

**МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА**

МР.АКПМ-36.00.00.000 ПЗ

Група АКПМ-24-2

**Євгеній Боднарук**

**2025**

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

Боднарук Євгеній Тарасович

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 681.5:662.6

(індекс)

## МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

Розроблення системи автоматичного керування процесом подачі твердого

(назва роботи)

палива

Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

(назва освітньої програми)

174 - Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка

(шифр і назва спеціальності)

### Консультант з нормоконтролю

асистент

(посада)

Л.І. Лагойда

(підпис)

(дата)

(ініціали та прізвище)

### Здобувач освітнього ступеня

АКПм-24-2

(шифр групи)

(підпис)

(дата)

Є.Т. Боднарук

(ініціали та прізвище)

### Науковий керівник

к.т.н., доцент

(науковий ступінь, вчене звання) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

Л.І. Фешанич

### Допущено до захисту

### Завідувач кафедри

доцент, к.т.н.

(посада)

(підпис)

(дата)

А.І. Лагойда

(ініціали та прізвище)

### Рецензент

к.т.н., доцент

(посада)

(підпис)

(дата)

І.І. Чигур

(ініціали та прізвище)

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

**Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу**

(повне найменування закладу вищої освіти)

Факультет автоматизації та енергетики

Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій

Освітній рівень магістерський

Спеціальність 174 - Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та

(шифр і назва)

робототехніка

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри АКІТ

(А.І. Лагойда)

«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ року

**З А В Д А Н Н Я  
НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ**

Боднаруку Євгенію Тарасовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розроблення системи автоматичного керування процесом подачі твердого палива

керівник роботи Фешанич Лідія Ігорівна, канд. техн. наук, доцент

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

затверджені наказом закладу вищої освіти від «10» листопада 2025 року № 699/7

2. Строк подання студентом роботи 10.12.2025

3. Вихідні дані до роботи Опис технологічного процесу, технологічна схема, статті науково – технічних журналів, збірники, підручники.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

1. Аналіз технологічного процесу подачі твердого палива.

2. Розроблення модернізованої системи подачі палива на ТЕЦ

3. Моделювання системи автоматичного регулювання подачі палива в ТЕЦ.

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

6. Консультанти розділів роботи

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

7. Дата видачі завдання 20.11.2024

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз технологічного процесу подачі твердого палива.	1.10.2025	
2	Розроблення модернізованої системи подачі палива на ТЕЦ	1.11.2025.	
3	Моделювання системи автоматичного регулювання подачі палива в ТЕЦ.	02.12.2025	

Студент \_\_\_\_\_  
(підпис)

Боднарук Є.Т.  
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи \_\_\_\_\_  
(підпис)

Фешанич Л.І.  
(прізвище та ініціали)

## АНОТАЦІЯ

У даній магістерській роботі розроблена та модернізована система автоматизації подачі палива на ТЕЦ.

Описано загальну схему транспортування твердого палива від моменту його надходження на ТЕЦ до подачі в помольний агрегат. Визначено основні елементи системи — транспортні конвеєри, бункери, живильники, пересипні вузли та допоміжне обладнання. Проаналізовано технологічні параметри, що впливають на стабільність подачі палива, зокрема вологість, гранулометричний склад та навантаження на механізми.

Розглянуто конструкцію та принцип дії кульового барабанного млина як основного агрегата для підготовки палива до спалювання. Визначені точки контролю та регулювання технологічних параметрів і керуючих впливів, а також здійснено вибір технічних засобів вимірювання та автоматизації. Наведено таблиці порівняння різних давачів перепаду температури та тиску з обладнанням німецької компанії Siemens. У результаті аналізу враховано їхні експлуатаційні характеристики та економічну доцільність використання.

Змодельовано систему автоматичного регулювання в середовищі Matlab – Simulink. Як об'єкт керування обрано кульовий барабанний млин з максимальною продуктивністю помелу сирого палива. Проведено дослідження на стійкість. Побудовано частотні характеристики системи, проведено прямі оцінки якості.

За допомогою функціоналу PID-tuning система змодельована з використанням регуляторів різних типів. Отримані прямі оцінки якості внесено до таблиці. Порівнявши всі отримані дані, обґрунтовано вибір PD-регулятора, оскільки його характеристики є найбільш оптимальними для даного технологічного процесу.

**Ключові слова:** моделювання, стійкість, кульовий барабанний млин, тверде паливо.

## ANNOTATION

In this Master's thesis, a system for automating the fuel supply process at a combined heat and power plant (CHP) was developed and modernized. The general scheme of solid fuel transportation—from its arrival at the CHP plant to its delivery into the milling unit—has been described. The main elements of the system were identified, including transport conveyors, bunkers, feeders, transfer units, and auxiliary equipment. The technological parameters influencing the stability of fuel supply, such as moisture content, particle size distribution, and mechanical load on the equipment, were analyzed.

The design and operating principle of the ball drum mill, which serves as the main unit for preparing fuel for combustion, were examined. The control points and regulated technological parameters, as well as the control actions, were determined. A selection of measurement and automation equipment was carried out. Comparative tables of various temperature and pressure differential sensors with equipment produced by the German company Siemens were provided. Based on the analysis, their operational characteristics and economic feasibility were taken into account.

A system of automatic control was modeled in the Matlab–Simulink environment. The ball drum mill with maximum grinding capacity for raw fuel was chosen as the control object. A stability analysis was performed, frequency characteristics of the system were constructed, and direct quality indicators were obtained.

Using the PID-tuning functionality, the system was modeled with different types of controllers. The obtained quality indicators were summarized in a table. After comparing all results, the choice of a PD controller was justified, as its dynamic characteristics proved to be the most optimal for this technological process.

**Keywords:** modeling, stability, ball drum mill, solid fuel.

## ЗМІСТ

<b>ВСТУП.....</b>	<b>8</b>
<b>РОЗДІЛ 1</b>	
<b>АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ПОДАЧІ ТВЕРДОГО ПАЛИВА.....</b>	<b>14</b>
1.1. Опис технологічного процесу подачі твердого палива.....	14
1.2. Кульовий барабанний млин.....	15
1.3. Кульовий барабанний млин як об’єкт регулювання.....	19
1.4. Системи керування відділення подачі палива на ТЕЦ.....	20
1.5. Постановка задачі.....	22
Висновки до розділу 1.....	23
<b>РОЗДІЛ 2</b>	
<b>РОЗРОБЛЕННЯ МОДЕРНІЗОВАНОЇ СИСТЕМИ ПОДАЧІ ПАЛИВА НА ТЕЦ.....</b>	<b>24</b>
2.1. Точки контролю та регулювання технологічних параметрів і регулюючих впливів.....	24
2.2. Визначення структури АСУТП.....	27
2.3. Вибір технічних засобів вимірювання та автоматизації.....	28
2.3.1. Давачі температури.....	29
2.3.2. Вимірювання рівня.....	32
2.3.3. Вимірювання тиску.....	33
2.3.5. Вимірювання вібрації.....	34
2.3.6. Контроль потоку матеріалу.....	36
2.3.7 Реле електромагнітні проміжні.....	38
2.3.8. Вибір виконавчих механізмів.....	40
2.3.9. Вибір обчислювального пристрою.....	44
Висновки до розділу 2.....	48

**РОЗДІЛ 3**

<b>МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ПОДАЧІ ПАЛИВА В ТЕЦ.....</b>	<b>50</b>
3.1. Моделювання системи автоматичного регулювання в середовищі Matlab – Simulink подачі палива на ТЕЦ.....	50
Висновки до розділу 3	64
<b>ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....</b>	<b>65</b>
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....</b>	<b>66</b>

## ВСТУП

### **Актуальність теми.**

Розроблення системи автоматичного керування процесом подачі твердого палива є актуальним завданням сучасної енергетичної галузі, зокрема для теплоелектроцентралей (ТЕЦ), які забезпечують значну частку світового виробництва теплової та електричної енергії. Сучасні ТЕЦ генерують значні обсяги енергії, що підкреслює їх ключову роль у функціонуванні промислових об'єктів та енергетичної інфраструктури.

Основним видом палива, що використовується на більшості ТЕЦ, є сире вугілля, яке проходить складний технологічний шлях від розвантаження до безпосередньої подачі у топкове обладнання. Транспортування вугілля, його накопичення на складах, подача до бункерного господарства та подальше переміщення конвеєрними установками створюють багаторівневу систему, робота якої має бути синхронізованою, безпечною та енергоефективною. Будь-які збої у цій системі можуть призвести до простоїв, перевитрати палива, порушення режиму горіння або аварійних ситуацій.

Особливо важливою є автоматизація процесів, що забезпечують стабільну подачу палива до кульових барабанних млинів (КБМ), де відбувається його доведення до пилоподібного стану — необхідної форми для ефективного спалювання. Процес подрібнення вугілля має суттєві динамічні особливості, пов'язані з ударним навантаженням, балансом холодного та гарячого повітря, а також необхідністю точного підтримання коефіцієнта заповнення барабана на рівні 0,35–0,4. Нестабільність у подачі сировини або повітря може призвести до зниження ефективності горіння, підвищення витрати палива та додаткових викидів.

Умови роботи ТЕЦ характеризуються високими тепловими та механічними навантаженнями, пиловим середовищем та значною протяжністю транспортних ліній, що ускладнює ручне керування та підвищує вимоги до надійності автоматизованих систем. Тому впровадження сучасних систем автоматичного

керування процесом подачі твердого палива є критично важливим для підвищення енергоефективності, безперервності виробництва та екологічної безпеки.

Таким чином, автоматизація процесу подачі вугілля на ТЕЦ дозволяє забезпечити стабільність роботи млина, оптимізувати процеси транспортування та подрібнення палива, зменшити втрати енергії та підвищити загальну ефективність роботи енергоблоків. Це визначає високу актуальність теми дослідження у контексті сучасних тенденцій розвитку енергетики та промислової автоматизації.

### **Обґрунтування вибору теми дослідження**

Вибір теми, пов'язаної з розробленням системи автоматичного керування процесом подачі твердого палива на теплоелектроцентралі, зумовлений комплексом технічних, енергетичних та економічних факторів, що визначають ефективність сучасних енергетичних підприємств. ТЕЦ є одними з ключових об'єктів енергетичної інфраструктури, забезпечуючи стабільне тепlopостачання та електропостачання промислових споживачів. В умовах зростання енергетичних потреб та підвищення вимог до надійності роботи енергоблоків, питання автоматизації паливоподачі набуває особливої важливості.

Процес транспортування та підготовки твердого палива, зокрема сирого вугілля, включає кілька технологічних етапів: розвантаження вагонів, переміщення по конвеєрних трактах, подачу в бункери, подрібнення в кульових барабанних млинах і подальшу класифікацію в сепараторних установках. Кожний із цих етапів характеризується значною кількістю зовнішніх і внутрішніх збурень, нелінійністю характеристик обладнання та високими вимогами до точності регулювання. Ручне або недостатньо автоматизоване керування такими процесами призводить до зниження ефективності подрібнення, нестабільності факела горіння у топках котлів, перевитрати палива, підвищення викидів та прискореного зношування механічних елементів.

Крім того, кульові барабанні млини мають виражені динамічні особливості, включаючи теплову інерційність, зміну властивостей вугілля, необхідність точного підтримання співвідношення повітря та палива, а також жорсткі вимоги до рівня заповнення барабана. Усе це робить систему керування важкою для класичних

регуляторів та потребує впровадження сучасних методів автоматизації, здатних оперативно адаптуватися до змін технологічного режиму.

Актуальність теми також підсилюється загальносвітовими тенденціями: прагненням до енергоощадності, необхідністю підвищення ККД котлоагрегатів, зменшення техногенного впливу на довкілля та переходом до цифровізації енергетичних підприємств. Використання сучасних ПЛК, методів інтелектуального аналізу даних та алгоритмів керування дозволяє підвищити надійність та ефективність експлуатації паливоподаючих трактів.

Таким чином, обрана тема є науково значущою та практично важливою, оскільки забезпечує вирішення однієї з ключових проблем роботи ТЕЦ — стабільної, енергоефективної та надійної подачі твердого палива, що безпосередньо впливає на продуктивність та економічність енергоблоків. Тому дослідження та розроблення сучасної автоматизованої системи керування паливоподачею є обґрунтованим, актуальним і має суттєву практичну цінність для енергетичної галузі.

#### **Мета і завдання дослідження.**

Розроблення та модернізація системи автоматизації подачі палива на ТЕЦ.

Автоматизована система керування КБМ призначена для розв'язання таких задач як регулювання технологічних параметрів; підвищення точності вимірювання; покращення оперативної роботи технологічного персоналу; підвищення надійності роботи системи керування.

#### *Об'єктом дослідження*

Процес подрібнення суміші у кульовому барабанному млині.

#### *Предметом дослідження*

Процес подачі твердого палива та функціонування кульового барабанного млина як об'єкта автоматичного керування, включаючи параметри роботи млина, динаміку зміни технологічних характеристик та вплив системи регулювання на стабільність та ефективність процесу помелу.

### **Методи дослідження**

У процесі виконання магістерської роботи застосовано комплекс сучасних теоретичних, аналітичних, математичних і програмно-імітаційних методів дослідження, зокрема проведено порівняльний аналіз технічних засобів автоматизації, виконано математичне моделювання та ідентифікація параметрів, аналіз стійкості та частотний аналіз, а також використано методи комп'ютерного моделювання систем керування.

### **Наукова новизна отриманих результатів**

У межах магістерської роботи отримано результати, що мають елементи наукової новизни:

1. Розроблено вдосконалену систему автоматичного регулювання процесу подачі палива з використанням ПД-регулятора, оптимізованого для специфічної динаміки КБМ. Встановлено, що саме ПД-регулятор забезпечує найкращі показники якості регулювання для даного об'єкта.

2. Виконано частотний аналіз і підтверджено стійкість системи автоматичного регулювання.

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, грантами.**

Тематика роботи «Розроблення системи автоматичного керування процесом подачі твердого палива» відповідає пріоритетним напрямкам розвитку науки і техніки України, зокрема в галузях енергетики, енергоефективності та цифрових технологій. Дослідження узгоджується з науковими планами кафедри щодо модернізації систем автоматизації енергетичних об'єктів і підвищення їхньої надійності.

### **Практичні значення отриманих результатів**

Отримані результати мають значне прикладне значення для підвищення ефективності та надійності роботи теплоенергетичних об'єктів, зокрема систем подачі твердого палива на ТЕЦ. Обґрунтовано вибір оптимального типу регулятора для системи подачі твердого палива, що забезпечує зменшення енергетичних витрат, підвищення стабільності технологічного процесу та збільшення продуктивності кульового барабанного млина.

Додатково виконано підбір сучасних технічних засобів автоматизації, включаючи програмований логічний контролер Siemens S7-300, що забезпечує високу точність вимірювань, надійність керування.

### **Структура та обсяг магістерської роботи.**

Робота складається зі вступу, трьох основних розділів, висновків і списку використаних джерел, що охоплює 71 сторінку основного тексту, включає 34 рисунки, 10 таблиць і 9 літературних джерел .

## РОЗДІЛ 1

### АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ПОДАЧІ ТВЕРДОГО ПАЛИВА

#### 1.1. Опис технологічного процесу подачі твердого палива

Для отримання необхідної консистенції палива, придатного для подальшого спалювання в пиловугільних котлах, сире вугілля необхідно попередньо підготувати [1].

Початковим етапом є розвантаження вугілля на склад. Вугілля надходить залізничними вагонами, які по черзі розвантажуються у зону вивантаження за допомогою спеціальних розвантажувальних установок. Потрапляючи на склад, матеріал рівномірно розподіляється та ущільнюється бульдозерами, які також транспортують сире вугілля до дробильної установки, а потім — до бункера сирого вугілля. Частина палива з бункера подається на стрічковий транспортер, який доставляє його до кульового барабанного млина — основного агрегату, де відбувається подрібнення. Після перетворення в пиловугільну суміш матеріал надходить через сепаратор і циклон у бункер вугільного пилу, звідки подається до пальників за допомогою живильників.

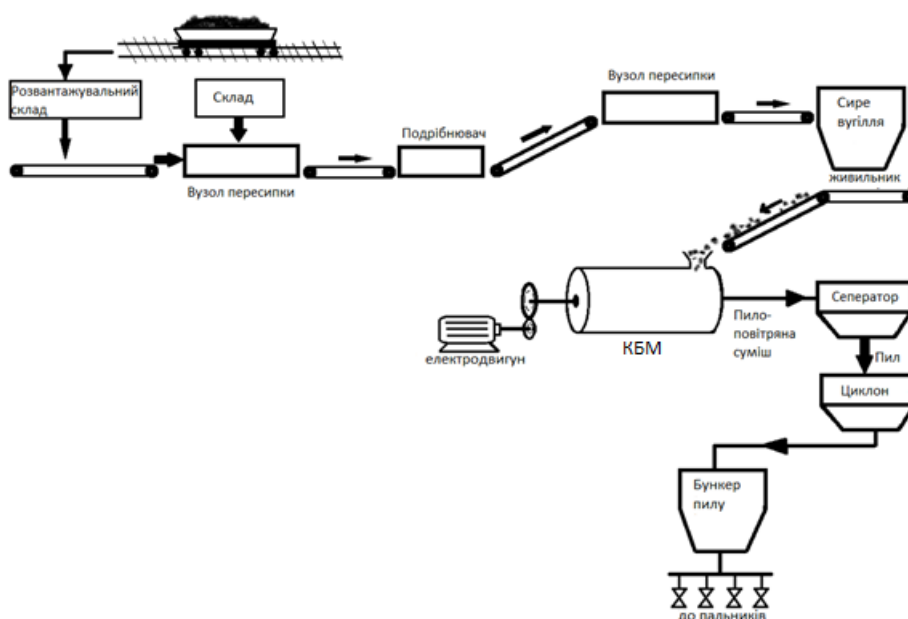


Рис 1.1 – Технологічна схема подачі палива на ТЕЦ

## 1.2. Кульовий барабанний млин

Кульовий барабанний млин (КБМ) обраний як об'єкт керування, оскільки є однією з основних установок у процесі підготовки вугілля та подальшого перетворення його на енергію.

Основою конструкції є циліндричний барабан, який обертається навколо своєї горизонтальної осі. Привід обертання здійснюється асинхронним електродвигуном через редуктор і ведучу шестерню. Барабан закритий торцевими кришками і заповнений мелючими тілами — сталевими кулями діаметром 35–65 мм. Наповнення кулями виконується приблизно до 1/3 об'єму барабана.

Діаметр барабана становить 3–5 м, а його довжина — 4–5 м. Внутрішня поверхня футерована листовими броньовими плитами, а зовнішня поверхня покрита тепло- та звукоізоляційним матеріалом. Загальна маса конструкції становить 100–400 т.

У барабан через трубопроводи подається холодне та гаряче повітря, що забезпечує сушіння вугілля під час помелу [2].

Розрахунок частоти обертання барабана

Необхідна кількість обертів для ефективної роботи млина визначається за формулою:

$$n_{об} = \left( \frac{0.77}{0.85} \right) * n_{кр} \quad (1.1)$$

де  $n_{кр}$  — критична частота обертання барабана, що визначається за формулою:

$$n_{кр} = \left( \frac{42.3}{\sqrt{D_6}} \right), \text{об/хв} \quad (1.2)$$

де  $D_6$  — діаметр барабана млина, м.

Критична частота відповідає умовам, коли кулі та частинки вугілля прилипають до стінок барабана під дією відцентрової сили.

Після визначення оптимальної кількості обертів КБМ кулі, які знаходяться всередині барабана, піднімаються вгору по стінках і, падаючи вниз, ударяють по частинках вугілля, подрібнюючи його до стану пилу. Металеві кулі поступово

зношуються, тому потрібна їх регулярна заміна та дозавантаження нових куль через завантажувальний отвір барабана. На функціональній схемі передбачена подача повітря в систему, щоб зменшити надлишковий вміст дрібнодисперсного пилю, тобто забезпечити періодичне очищення млини повітряним потоком.

За формулою (1.3) визначаємо загальну витрату повітря, що подається в барабан:

$$V_{\text{пов}} = 1.2 * V_{\text{вн}} * (1000 + \sqrt[3]{\text{кіл.}} + 36 * R_9 \sqrt{\text{кіл.}} * \sqrt[3]{k_{\text{зап}}}), \text{ м}^3 / \text{ГОД} \quad (1.3)$$

де

$V_{\text{вн}}$  — об'єм всередині КБМ, м<sup>3</sup>;

$k_{\text{зап}}$  — ступінь заповнення барабана металевими кулями.

Ступінь заповнення визначається за формулою:

$$k_{\text{зап}} = \frac{G}{4.9 * V_{\text{вн}}}$$

де  $G$  — маса завантаження КБМ металевими кулями, т.

У сепаратор надходить пилоповітряна суміш, де відбувається розподіл частинок: достатньо подрібнене вугілля надходить далі, а недостатньо розмелене — повертається до млини на повторне подрібнення.

Потужність, необхідна для обертання барабана  $N_{\text{м}}$ , практично не залежить від маси сирого вугілля всередині млини, оскільки її визначають маси самих куль і барабана. Таким чином, зі зменшенням об'єму вугілля  $B_{\text{м}}$  споживання енергії на подрібнення зростає.

Для підвищення енергоефективності доцільно використовувати млин з максимальною завантажувальною здатністю, тобто з найбільшою можливою кількістю вугілля [3].

Питомі витрати енергії визначаються за формулою:

$$\mu = \frac{N_{\text{м}}}{B_{\text{м}}}, \text{ кВт} * \text{год/кг}$$

де  $B_{\text{м}}$  — масова подача вугілля.

Вугілля подається тангенціально до кола ротора, а тепле повітря — уздовж вала ротора, через торцеві стінки корпусу млини.

У роторі розміщено диски з білоутримувачами, до яких прикріплені біла зі сталі з марганцем. Кожне било має масу 5–8 кг [7].

Ротор обертається по горизонтальній осі від електродвигуна, і ступінь подрібнення вугілля прямо залежить від швидкості обертання бил:

$$v = \frac{\pi \cdot D \cdot n_m}{60}, \quad \text{м/с} \quad (1.6)$$

де

$D$  — діаметр диска, на якому закріплена біла, м;

$n_m$  — частота обертання КБМ.

$$n_m = \frac{733}{984} = 0.745, \quad \frac{\text{об}}{\text{хв}} \quad (1.7)$$

Ефективність млина безпосередньо залежить від збільшення частоти обертання. Проте надмірне підвищення швидкості може викликати динамічні перевантаження та дисбаланс ротора [4].

Найбільше питоме навантаження на переріз ротора визначається за формулою:

$$N_{\text{пит}} = \frac{35}{55} = 0.63, \quad \text{кВт/м}^3 \quad (1.8)$$

При максимальному завантаженні вугілля продуктивність млини розраховується за формулою:

$$N_m = N_{\text{пит}} * F_p, \quad \text{кВт} \quad (1.9)$$

$F_p$  — площа поперечного перерізу ротора,

$$F_p = L_p * D_p$$

Де  $L_p$  — активна довжина ротора з дисками,

$D_p$  — діаметр ротора.

Після помелу вугілля млиною утворюється пилоповітряна суміш, частинки якої мають розмір 350–600 мкм, а при помелі бурого вугілля — до 2,5 мм.



### 1.3. Кульовий барабанний млин як об'єкт регулювання

КБМ працює у замкненому циклі безперервної дії разом із повітряним сепаратором і характеризується вхідними та вихідними параметрами.

До вхідних параметрів належать:

$G$  — маса завантаження куль;

$n$  — швидкість обертання млини;

$Q_{вх}$  — рівень заповнення барабана сирим вугіллям;

$C_{x1}$  — розмір частинок вихідного матеріалу.

До вихідних параметрів належать:

$Q_{вих}$  — продуктивність КБМ;

$N$  — потужність, необхідна для подрібнення вугілля;

$C_{x2}$  — гранулометричний склад.

У таких системах автоматизації зазвичай використовують одну або кілька вихідних величин КБМ як керовані параметри.

У випадку відхилення від заданого значення регулятор (Р) формує компенсуючий сигнал зворотного зв'язку, який впливає на зміну продуктивності барабана млини.

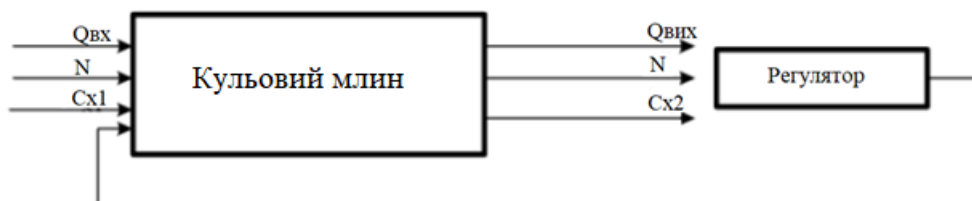


Рис. 1.2 – КБМ як об'єкт регулювання

Регулятор виконує функцію автоматичного налаштування системи на зміни, що відбуваються у процесі роботи.

Наприклад, коли досягається необхідне значення завантаження барабана млина, при цьому досягається максимальний рівень продуктивності пилопідготовчої системи.

Головним критерієм, що забезпечує нормальні умови перебігу технологічного процесу помелу у барабанному млині, є продуктивна робота

живильника сирого вугілля. Вона повинна перевищувати продуктивність помелу млина у 1,5–2 рази.

Якщо продуктивність пилопідготовчої системи є недостатньою, регулятор (Р) працює у нестандартному режимі, що характеризується низьким ступенем завантаження барабана млина. Це, у свою чергу, призводить до неефективної роботи пилопідготовчої системи.

На досягнення максимально можливої продуктивності млина впливають такі фактори, як вентиляційна та сушильна здатність млина.

У разі виникнення обмежень за цими параметрами, продуктивність млина може підтримуватися лише в межах допустимого інтервалу обмежень.

#### **1.4. Системи керування відділення подачі палива на ТЕЦ**

Для створення надійної та ефективної системи керування процесом подачі сирого вугілля на ТЕЦ необхідно визначити режими роботи обладнання, які забезпечують оптимальне функціонування технологічного процесу, а також встановити параметри керування, контролю та сигналізації [5].

Система автоматичного керування (САК) повинна забезпечувати безперебійну роботу у ручному та автоматичному режимах.

Режими роботи КБМ:

- Основний;
- Обмежувальний 1;
- Обмежувальний 2;
- Передаварійний.

Основний режим роботи КБМ передбачає подачу такого об'єму вугілля в барабан млина, за якого досягається максимальний рівень продуктивності млина, при цьому всі параметри перебувають у допустимих межах.

Цей режим визначається відносним ступенем завантаження млина.

Якщо завантаження млина менше 40%, подача вугілля здійснюється з максимально можливою продуктивністю живильника.

У протилежному випадку подача палива у млин відбувається за спеціально розробленим алгоритмом, який діє до досягнення оптимального значення ступеня завантаження вугіллям.

Коли досягнуто оптимальне завантаження обладнання і продуктивність пилопідготовчої системи виходить на максимальний рівень, система підтримує встановлене значення доти, поки не зміняться умови технологічного процесу.

Обмежувальний режим 1 — режим, який обмежує осушувальну здатність млина.

Обмежувальний режим 2 — режим, який обмежує вентиляційну здатність млина.

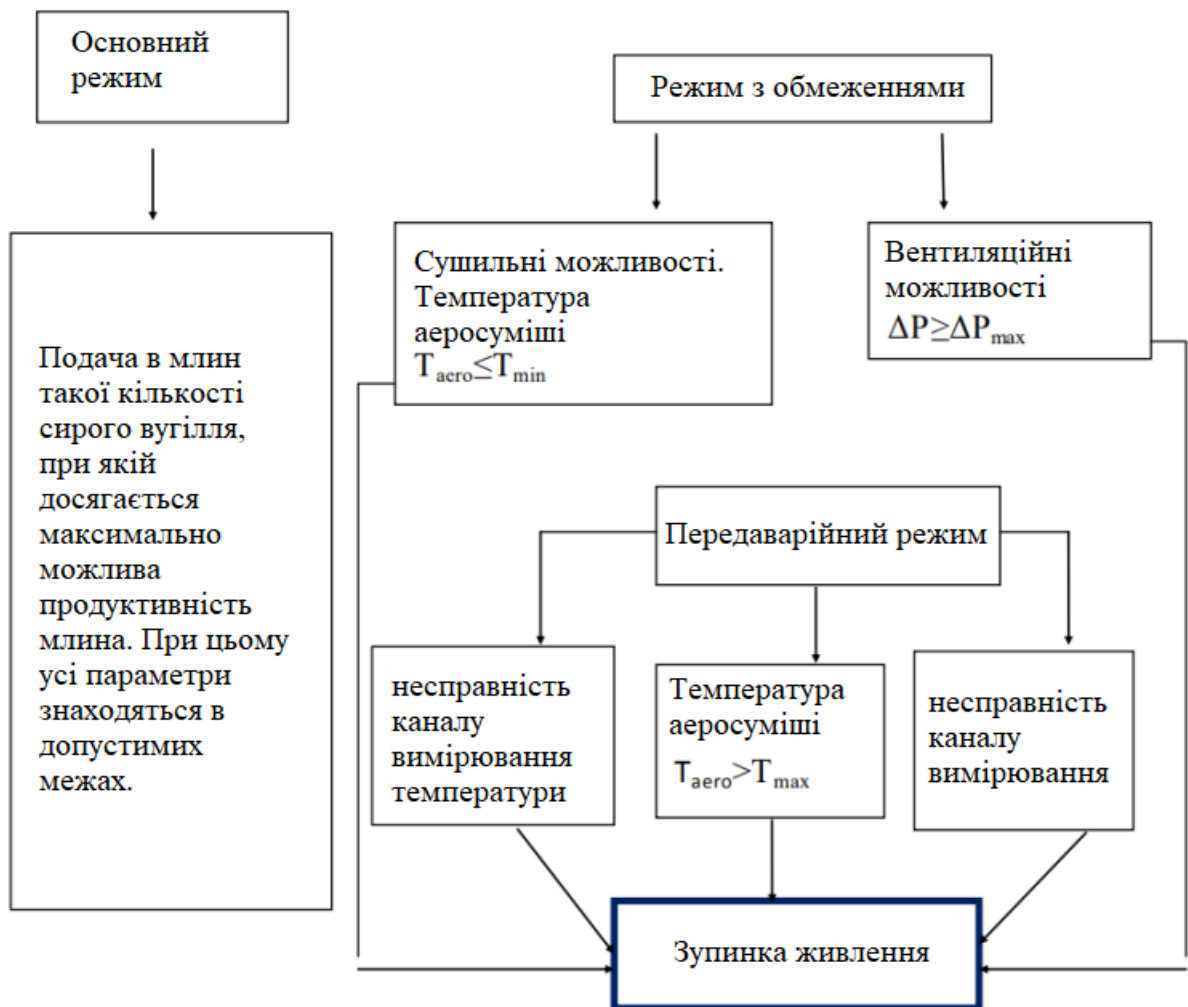


Рис. 1.3 – Режимы работы системы автоматического управления КБМ

Режим 1 виникає при зниженій температурі, нижчій за мінімально допустиме значення  $T > T_{max}$ . САУ повинна перекрити подачу сирого вугілля до млина.

Режим 2 виникає при перевищенні максимально допустимого значення перепаду тиску в барабані млина  $\Delta P > \Delta P_{max}$ , при цьому температура аеросуміші після млина знаходиться в межах допустимих значень  $T_{min} > T < T_{max}$ . У цьому режимі САУ також перекриває подачу палива до млина.

У разі несправності вимірювальних каналів та при виникненні високої температури аеросуміші на виході з барабана млина за умов великого ступеня завантаження млина  $L > 80\%$ ,  $T > T_{max}(^{\circ}\text{C})$  активується аварійний режим. У таких умовах СА також перекриває подачу палива до млина.

Після усунення всіх несправностей буде відновлено подачу сирого вугілля до млина та аварійний режим буде вимкнено.

### **1.5. Постановка задачі**

У цій магістерській роботі необхідно розробити та модернізувати систему подачі сирого вугілля на ТЕЦ. КБМ буде об'єктом керування. Вона є основним технологічним обладнанням для переробки та отримання палива. Необхідно опрацювати такі завдання:

Здійснити реєстрацію та контроль усіх параметрів у системі та розробити заходи щодо захисту технологічної частини процесу.

Досягти максимального рівня продуктивної роботи млина, спираючись на отримані характеристики пилової системи та вугілля.

Забезпечити автоматичне регулювання температури аеросуміші в КБМ.

Мінімізувати витрати КБМ відповідно до змінних на вході системи в автоматичному режимі.

Забезпечити безпеку всього обладнання при виникненні будь-яких аварійних ситуацій у системі шляхом зупинки всього процесу подачі палива.

## Висновки до розділу 1

В даному розділі магістерської роботи детально описано загальну схему транспортування твердого палива від моменту його надходження на ТЕЦ до подачі в помольний агрегат. Визначено основні елементи системи — транспортні конвеєри, бункери, живильники, пересипні вузли та допоміжне обладнання. Проаналізовано технологічні параметри, що впливають на стабільність подачі палива, зокрема вологість, гранулометричний склад та навантаження на механізми.

Розглянуто конструкцію та принцип дії кульового барабанного млина як основного агрегата для підготовки палива до спалювання. Визначено ключові керовані параметри — температуру аеросуміші, витрату первинного повітря, завантаження барабана, продуктивність помелу та концентрацію пилу. Показано, що процес характеризується інерційністю, взаємозалежністю параметрів та нелінійністю, що ускладнює застосування традиційних систем керування та потребує їхнього удосконалення.

Сформульовано основну задачу дослідження — створити та обґрунтувати сучасну систему автоматичного керування процесом подачі твердого палива до кульового барабанного млина, здатну забезпечити стабільність параметрів, підвищення продуктивності помольного обладнання та зниження аварійності.

## РОЗДІЛ 2

### РОЗРОБЛЕННЯ МОДЕРНІЗОВАНОЇ СИСТЕМИ ПОДАЧІ ПАЛИВА НА ТЕЦ

#### 2.1. Точки контролю та регулювання технологічних параметрів і регулюючих впливів

Точки контролю технологічних параметрів використовуються при проектуванні АСУТП відповідно до вимог проектних рішень і поставлених завдань. Технологічні параметри мають визначені діапазони значень, у межах яких САУ здійснює контроль усього процесу.

*Таблиця 2.1*

#### Контрольовані параметри

Точка контролю	Параметр	Діапазон значень
Бункер сирого вугілля	рівень	0 – 9.5 м
	заблоковано матеріалом	0 чи 1
Живлення	швидкість обертання електропривода	46.51 об/хв
	сила струму в ланцюгу електродвигуна	160 А
Трубопровід гарячого повітря	тиск	3.09 кПа
Трубопровід	температура повітря на КБМ	120°C
Шаровий барабанний млин	температура обмотки статора електропривода	80°C
	температура обертового сердечника статора	80°C

Продовження таблиці 2.1

Точка контролю	Параметр	Діапазон значень
	сила струму	4-50
	температура підшипників кочення	60°C
	вібрація	85 дБ
	перепад тиску в барабані млина	100-230 Па
	температура пило-повітряної суміші	120°C
Бункер пилу	рівень пилу	5 м
	температура пилу	120°C

Система також повинна включати регулювання наступних параметрів.

Таблиця 2.2

### Регулювання

Параметр	Керуючий елемент	Діапазон
Вібрація млина	Частотний перетворювач	0 – 50 Гц
Регулювання розрідження перед млином	Заслінка подачі гарячого повітря	0 – 100 %
Регулювання температури повітряної суміші після млина	Заслінки, що встановлені на лініях мало підігрітого та гарячого повітря	0 – 100 %

На передньому підшипнику млина встановлюється п'єзометричний акселерометр. Він призначений для вимірювання вібраційного прискорення підшипника млина, що також пов'язане із завантаженням млина сирим вугіллем.

Датчик, який сигналізує про перепад тиску перед млином, використовується для регулювання розрідження і є вхідним сигналом. Цей регулятор безпосередньо впливає на заслінку лінії подачі гарячого повітря, що надходить у млин.

За млином датчики температури стабілізують у визначених межах вплив на витрату суміші холодного і гарячого повітря. Через виконавчий механізм заслінки переміщуються у потрібному напрямку безпосередньо за сигналом температурного датчика, який отримує система. Ці датчики встановлюються на лініях холодного і гарячого повітря. Спільна робота виконавчого механізму зі спареними заслінками необхідна для регулювання загальної витрати повітря через млин: при відкритті одного клапана другий закривається, і навпаки — витрата повітря повинна залишатися незмінною.

САУ повинна мати попереджувальну сигналізацію у випадку перевищення технологічних параметрів. Коли температура опускається нижче мінімального значення, незалежно від рівня завантаження барабана млина, система автоматично блокує подачу сирого вугілля в млин. Система також блокує подачу сирого вугілля в млин у випадку виявлення перепаду тиску в барабані млина. Усі ці заходи необхідні для запобігання аварійним ситуаціям на ТЕЦ і уникнення перегріву або виходу з ладу кульового барабанного млина.

Таблиця 2.3

### Сигналізація

Обладнання	Параметр	Діапазон значення
Бункер сирого вугілля	Рівень вугілля – низький L	2
	Рівень вугілля – високий H	9.0
КБМ	Температура за млином	100°C
	Температура аеросуміші	100°C
	Перепад тиску на барабані млина	1 кПа

Розроблено функціональну схему автоматизації (додаток А)

## 2.2. Визначення структури АСУТП

Для даного технологічного процесу доцільним є використання АСУТП централізованого типу. Такі системи застосовуються в локальних технологічних процесах. Їх перевагою є простий алгоритм роботи з зручним розташуванням обладнання. Важливою перевагою є також простота створення програмного забезпечення та можливість впорядкування введення або виведення інформації у разі потреби. Якщо враховувати економічний фактор, то централізовані АСУТП значно дешевші в забезпеченні апаратними засобами порівняно з розподіленими системами.

Давачі збирають всю інформацію про параметри системи та перетворюють її в уніфікований струмовий сигнал від 4 до 20 мА. У сучасних системах дедалі частіше використовуються датчики, які забезпечують живлення та прийом сигналу через один кабель. Це дозволяє зменшити витрати на кабельну продукцію майже вдвічі. Для зменшення кількості щитів і панелей використовуються датчики з вбудованими перетворювачами.

З метою забезпечення нормальної роботи всієї системи доцільно використовувати такі типи датчиків:

- ENDERSS + Hausser Deltabar FMD71 – перетворювач перепаду тиску з керамічними сенсорами, для контролю перепаду тиску;

- IAC – CM – I від компанії Micromega – ємнісний акселерометр, для контролю вібрацій;

- ENDERSS + Hausser Cerabar TPMP 311 – вимірювальний перетворювач тиску, для контролю тиску аеросуміші.

Вихідний сигнал цих приладів є уніфікованим.

Для контролю всього процесу необхідно обрати ядро системи. Вибір зупинився на контролері Simatic S7-300 від німецької компанії Siemens. Цей контролер застосовується в промисловості, його основною перевагою є стійкість до відносної вологості повітря та різких перепадів температури.

Також цей тип контролера чудово взаємодіє з операторськими панелями для моніторингу та оперативного усунення несправностей в управлінні обладнанням на виробництві. Здебільшого використовується операторська панель Simatic MIC Comfort. Контролер має функцію дублювання всієї інформації про систему безпосередньо на ПК. За допомогою цього ПК також може здійснюватися контроль і керування обладнанням на виробництві. Можна також створити локальну передачу даних за допомогою мереж Ethernet. Таким чином інформація буде передаватися й на інші пристрої, підключені до цієї локальної мережі.

### **2.3. Вибір технічних засобів вимірювання та автоматизації**

При виборі засобів вимірювання необхідно враховувати такі фактори:

- обрані засоби вимірювання повинні забезпечувати необхідну точність вимірювання тиску та температури;
- мати довготривалу та надійну експлуатаційну здатність.

Крім того, враховується характер вихідного сигналу — слід обирати датчики з уніфікованим струмовим вихідним сигналом, якщо система працює в однакових умовах. Також потрібно врахувати той факт, що напруженість магнітних полів може перевищувати 40 А/м, що вимагає застосування додаткових заходів для підвищення завадостійкості каналів зв'язку та засобів вимірювання. Тому рекомендується використання уніфікованого струмового сигналу, оскільки він є завадостійким і зручним для введення інформації в контролер.

Датчики обрані за такими критеріями:

- похибка вимірювання;
- вихідний сигнал;
- наявність необхідних діапазонів вимірювання;
- перевірочний сигнал;
- функціональні можливості.

### 2.3.1. Давачі температури

Основними давачами температури обрані мідні термоперетворювачі опору.

Термоперетворювачі потрібні для безперервного вимірювання та відображення температури гарячого, холодного повітря та пилоповітряної суміші, що утворюється в результаті помелу сирого вугілля. Цей давач заснований на залежності температури від електричного опору металів. Його конструкція складається з тонкої мідної котушки або платинової дротини, намотаної на каркас з ізоляційного матеріалу, поміщеної в захисну гільзу.

Характеристика цього термоперетворювача базується на таких параметрах: співвідношення опору датчика при 100 °С до опору при 0 °С.

З цього випливає, що конструктивне виконання датчика (модель) з кабельним виходом має наступні параметри (таблиця 2.4).

Таблиця 2.4

#### Характеристика термоперетворювача

Номинальна статична характеристика	50 Ом, мідний
Клас допуску	В
Схема внутрішніх з'єднань провідників	Тридротова (стандарт)
Довжина занурюваної частини (L)	35 мм
Довжина кабельного виводу (I)	3 м
Робочий діапазон вимірюваних температур	+50 – +150 °С
Допустимі відхилення	$\pm 0.25 \text{ }^\circ\text{C} + 0.0035T$
Умовний тиск	10 МПа
Робочий струм	Не більше 5 мА
Показник теплової інерції	Не більше 30 с
Матеріал захисної арматури	Сталь 12Х18Н10Т

Обрано акселерометр PCE-VM 400B, оскільки він максимально відповідає технічним характеристикам системи, зокрема діапазону частот (1–10 кГц) (таблиця 2.5) [6].

Акселерометр PCE-VM 400B — це сучасний чотириканальний віброметр, розроблений для високоточних вимірювань і аналізу вібрацій у промисловому середовищі. Завдяки здатності одночасно здійснювати вимірювання на валах і підшипниках, пристрій ідеально підходить для діагностики стану обертового обладнання.

Прилад оснащений чутливими п'єзоелектричними давачами, які забезпечують точні результати навіть при незначних коливаннях. PCE-VM 400B підтримує вимірювання таких параметрів, як прискорення, швидкість, переміщення та частота обертання, що робить його універсальним для різних сфер застосування.

Серед додаткових функцій — можливість балансування з корекцією до восьми площин, що дозволяє ефективно усувати дисбаланс у механізмах. Пристрій також підтримує оцінку вібрацій згідно зі стандартом ISO 10816, а функція маршрутизованого вимірювання дає змогу повторно проводити заміри в одних і тих самих точках.

Для зручного зберігання та передачі даних прилад обладнаний USB-інтерфейсом і вбудованою пам'яттю на 4 ГБ. Його міцний корпус із захистом від пилу та вологи гарантує стабільну роботу навіть у складних виробничих умовах.



Рис. 2.1 – Акселерометр

Таблиця 2.5

### Технічні характеристики акселерометра PCE-VM 400B

Параметр	Значення
Тип	П'єзоелектричний акселерометр
Кількість каналів	4
Частотний діапазон	1 ... 25 000 Гц
Діапазон вимірювання	Швидкість: 0,001 ... 200 мм/с
	Прискорення: 0,001 ... 200 м/с <sup>2</sup>
	Обертальна швидкість: 10 ... 200 000 об/хв
Точність вимірювань	±5 % від виміряного значення
Клас захисту	IP20

У магістерській роботі проведено аналіз датчиків температури закордонного виробництва.

Таблиця 2.7

**Аналіз давача температури SITRANS T (Siemens, Німеччина)**

Діапазон вимірювання	0...+200 °С
Вихідний сигнал	4–20 мА
Чутливий елемент	Pt 100
Функціональні можливості	Підходить для проектних рішень
Похибка вимірювання	Клас В
Міжповірочний інтервал	3 роки

Давач температури SITRANS T виробництва Siemens (Німеччина) призначений для точного вимірювання температури в промислових умовах. Він підтримує стандартний вихідний сигнал 4–20 мА і використовує чутливий елемент Pt100, що забезпечує високу точність і стабільність вимірювань. Завдяки надійності та відповідності міжнародним стандартам, SITRANS T широко застосовується в автоматизованих системах контролю та керування.

**2.3.2. Вимірювання рівня**

Проведено порівняльний аналіз характеристик датчиків рівня (рівнемірів) виробників Rosemount 5600 та SITRANS JS300 Siemens (таблиця 2.8).

Існують деякі особливості при виборі давача SITRANS JS300 Siemens:

Це радарний датчик рівня, який застосовується для вимірювання сипучих матеріалів, зокрема пилоповітряної суміші, ідеально підходить для бункерних об'єктів та барабанних млинів.

Має програму швидкого запуску Plug & Play з автоматичною конфігурацією.

Відзначається оптимальним співвідношенням ціна–якість.

Шум, пил, газові шари та температурні коливання не впливають на точність вимірювання.

Робочий температурний діапазон: від 40 до 450 °С.

Таблиця 2.8

**Давачі рівня (рівнеміри)**

Критерій / Виробник	SITRANS Siemens	JS300	Rosemount 5600
Діапазон вимірювання	<b>30</b>		80
Принцип вимірювання	Радарний		Радарний
Вихідний сигнал	4–20 мА		4–20 мА
Похибка вимірювання	0,45 %		0,55 %
Функціональні можливості	Підходить для проектних рішень		Підходить для проектних рішень
Міжповірочний інтервал	3 роки		3 роки

**2.3.3. Вимірювання тиску**

Проведено аналіз характеристик давача тиску виробників SITRANS P 500 Siemens (таблиця 2.9).

Таблиця 2.9

**Давач тиску**

Критерій / Виробник	SITRANS P 500 Siemens
Діапазон вимірювання	Налаштовуваний
Діапазон температур вимірюваного середовища	-25 – +80 °С
Вихідний сигнал	4–20 мА
Похибка вимірювання	0,15 %
Функціональні можливості	Підходить для проектних рішень
Міжповірочний інтервал	3 роки

SITRANS P 500 вирізняється високою точністю вимірювання тиску, що робить його ідеальним для критичних технологічних процесів. Прилад має швидкий час реакції (менше 88 мілісекунд), завдяки чому забезпечує стабільний контроль навіть у

динамічних системах. Його корпус із нержавіючої сталі гарантує довговічність і стійкість до агресивних середовищ. Зручний інтерфейс та інтуїтивне меню спрощують налаштування й обслуговування приладу на виробництві. SITRANS P 500 підтримує цифрові протоколи зв'язку (HART, PROFIBUS, FOUNDATION Fieldbus), що дозволяє легко інтегрувати його в автоматизовані системи керування.

### 2.3.5. Вимірювання вібрації

Досліджувані акселерометри застосовуються в промислових цілях для різноманітних конструкцій і моніторингу обладнання.

Наведено порівняльну таблицю 3-осьових ємнісних MEMS-акселерометрів (аналогових) європейського виробництва.

Таблиця 2.9

#### Технічні характеристики

Параметр	ASC CS-1411LN (Німеччина)	Colibrys SF3000 (Швейцарія)	STMicroelectronics AIS328DQ (Італія)
Тип сенсора	Ємнісний (MEMS, Analog)	Ємнісний (MEMS, Analog)	Ємнісний (MEMS, Digital + Analog)
Кількість осей	3 (X, Y, Z)	3 (X, Y, Z)	3 (X, Y, Z)
Діапазон прискорення	$\pm 2 \text{ g} / \pm 5 \text{ g} / \pm 10 \text{ g} / \pm 25 \text{ g} / \pm 50 \text{ g} / \pm 100 \text{ g}$	$\pm 2 \text{ g} / \pm 5 \text{ g} / \pm 15 \text{ g} / \pm 30 \text{ g}$	$\pm 2 \text{ g} / \pm 4 \text{ g} / \pm 8 \text{ g} / \pm 16 \text{ g}$
Частотний діапазон	DC – 2 000 Гц	DC – 1 500 Гц	DC – 1 000 Гц
Вихідний сигнал	Аналоговий $\pm 5 \text{ В}$ або 4–20 мА	Аналоговий $\pm 5 \text{ В}$	Цифровий (SPI/I <sup>2</sup> C), іноді аналоговий
Лінійність	< 0,1 % FS	< 0,05 % FS	< 0,5 % FS
Рівень шуму	30–50 $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$	10–25 $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$	~100 $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$

Продовження таблиці 2.9

Параметр	ASC CS-1411LN (Німеччина)	Colibrys SF3000 (Швейцарія)	STMicroelectronics AIS328DQ (Італія)
Ступінь захисту	IP67 / IP68	IP65	IP40
Матеріал корпусу	Нержавіюча сталь / алюміній	Алюмінієвий сплав	Пластиковий корпус SMD
Робоча температура	-40 ... +85 °C	-55 ... +125 °C	-40 ... +85 °C
Маса	~100 г	~90 г	~2 г
Живлення	8–30 В DC	5 В DC	1,8–3,6 В DC
Застосування	Промислова діагностика, випробувальні стенди, вібраційний моніторинг	Авіація, нафтогаз, випробування конструкцій	Вбудовані системи, робототехніка, автомобільна електроніка
Країна виробництва	Німеччина	Швейцарія	Італія

Акселерометр ASC CS-1411LN — це високоточний тривісний сенсор, створений на основі ємнісної MEMS-технології для вимірювання прискорень у промислових та наукових застосуваннях. Прилад забезпечує надійну роботу в широкому діапазоні прискорень — від  $\pm 2$  g до  $\pm 100$  g, що дозволяє використовувати його як для моніторингу низькочастотних коливань, так і для контролю динамічних процесів із високою швидкістю зміни сигналу. Завдяки широкому частотному діапазону (до 2 кГц) і низькому рівню шуму сенсор передає стабільний та точний аналоговий сигнал, який легко інтегрується в системи збору даних, PLC або SCADA через стандартний промисловий інтерфейс 4–20 мА.

Корпус акселерометра виготовлений із нержавіючої сталі або анодованого алюмінію, що забезпечує ступінь захисту IP67/IP68 і стійкість до пилу, вологи та

механічних навантажень. Прилад характеризується високою лінійністю, температурною стабільністю та надійністю навіть за екстремальних умов експлуатації. Завдяки компактним розмірам, міцній конструкції та широкому діапазону робочих температур ( $-40 \dots +85 \text{ }^\circ\text{C}$ ) ASC CS-1411LN часто використовується для моніторингу вібрацій обладнання, діагностики стану конструкцій, у випробувальних лабораторіях та транспортних системах.

Це сучасне вимірювальне рішення, яке поєднує німецьку інженерну точність, довговічність і стабільність у роботі, забезпечуючи безперервний контроль параметрів руху у складних технічних середовищах.

### 2.3.6. Контроль потоку матеріалу

Під час транспортування сирого вугілля часто виникає проблема підвищеної вологості матеріалу, що може призвести до заторів у бункерах або перевантажувальних течках конвеєрів. Для запобігання таким ситуаціям використовується давач контролю потоку матеріалу серії ДЗІ, який забезпечує своєчасне виявлення блокувань або залипання матеріалу. Давач реагує на зміну кута нахилу під дією матеріального потоку та подає сигнал системі керування у разі зупинки або переповнення [7].

Таблиця 2.12

#### Технічні характеристики давача ДЗІ

Параметр	Значення
Напруга живлення	20–250 В АС або 20–320 В DC
Кут спрацювання	20°
Діапазон робочих струмів	5–500 мА
Імпульсний струм	3 А
Робоча частота	1 Гц
Діапазон робочих температур	$-15 \dots +150 \text{ }^\circ\text{C}$

## Продовження таблиці 2.12

Параметр	Значення
Ступінь захисту	IP68 (повна герметичність, придатність до роботи у запиленому середовищі)
Матеріал корпусу	Сталь 45 із антикорозійним покриттям (цинк + хроматування)
Габаритні розміри	37 × 220 мм

Давач ДЗІ монтується у зоні падіння або пересування матеріалу. Під час нормального потоку вугілля робочий елемент датчика відхиляється на кут до  $20^\circ$ , формуючи електричний сигнал. У разі зупинки потоку або накопичення матеріалу відхилення припиняється — система реєструє стан "затор" і подає сигнал на аварійне відключення або звукове попередження. Високий ступінь захисту IP68 дає змогу експлуатувати прилад у вологих, запилених умовах та при значних перепадах температур.



Рис. 2.2 – Давач контролю потоку матеріалу серії ДЗІ

### 2.3.7 Реле електромагнітні проміжні

Електромагнітне проміжне реле РП-21-003 [8] призначене для передачі керувальних сигналів від модулів введення або виведення контролера через електричні ланцюги, а також для комутації електричних кіл у системах автоматизації.

Реле використовується в схемах керування електроприводами змінного струму з робочою напругою до 380 В.

Завдяки своїй конструкції, реле забезпечує електричну розв'язку між низьковольтною частиною керування (контролер або ПЛК) та силовими ланцюгами. Це підвищує безпеку, зменшує ризик пошкодження електроніки, а також забезпечує стабільну роботу системи при частоті мережі 50–60 Гц.

Таблиця 2.13

#### Технічні характеристики реле РП-21-003

Параметр	Значення
Частота змінного струму	50 – 60 Гц
Робоча напруга (змінний струм)	12 – 220 В
Робоча напруга (постійний струм)	12 – 220 В
Номінальна напруга	24 В
Номінальний струм навантаження	0,01 – 5 А
Комутована потужність	до 3 Вт
Комутована потужність (номінальна)	2 Вт
Напруга котушки постійного струму	12 В, 24 В, 48 В, 60 В, 110 В
Напруга котушки змінного струму	12 В, 24 В, 36 В, 110 В, 127 В, 220 В
Кількість груп перемикаючих контактів	3
Тип спрацювання котушки	Постійного струму
Ступінь захисту	IP40
Габарити	34 × 29 × 54 мм

Корпус реле виготовлений із термостійкого діелектричного матеріалу, що відповідає вимогам ступеня захисту IP40. Реле може комплектуватися котушками

постійного або змінного струму з різними номіналами напруги, що робить його універсальним у застосуванні.

При подачі напруги на котушку реле створюється електромагнітне поле, яке притягує якір і замикає або розмикає комутаційні контакти. Завдяки цьому можна керувати силовими колами без прямого з'єднання з низьковольтними сигналами контролера.

Реле РП-21-003 має три групи перемикаючих контактів, що дозволяє одночасно комутувати декілька незалежних кіл. Таке рішення часто застосовується у системах автоматизації технологічних процесів, сигналізації, пуску двигунів, електричних шафах керування та щитовому обладнанні.

Переваги реле РП-21-003:

- універсальність: можливість роботи від постійного або змінного струму;
- компактність і простота монтажу;
- механічна надійність і стабільність спрацювання;
- електрична розв'язка керувальних і силових ланцюгів;
- сумісність із більшістю промислових контролерів і модулів автоматики.



Рис. 2.3 – Реле РП-21-003

### 2.3.8. Вибір виконавчих механізмів

Застосовуються для запуску запірно-регулюючої арматури та регулюючих органів в АСУ ТП, а також керувальних і регулювальних пристроїв за командними сигналами. Часто використовуються в інженерних системах і мережах.

Таблиця 2.13

#### Порівняльна таблиця аналогів

Параметр	Eltorque QT250	Agromatic N8 Z2/22	Elfor Controls SEM 250	Electric Actuator S300
Тип приводу	Поворотний (quarter-turn)	Поворотний / частково- поворотний	Багатооборотний / частково- поворотний	Поворотний
Номінальний крутний момент	250 Н·м	300–500 Н·м	250 Н·м	300 Н·м
Швидкість (об/хв або час повороту)	30–60 с/90°	30–90 с/90°	40–60 с/90°	50 с/90°
Живлення	230/400 В AC або 24 В DC	230 В AC або 24 В DC	230 В AC / 24 В DC	24–240 В AC/DC
Тип сигналу керування	On/Off, Modbus, 4– 20 мА	On/Off, аналоговий	On/Off, 0–10 В, 4– 20 мА	On/Off
Діапазон робочих температур	–30...+70 °С	–40...+80 °С	–20...+70 °С	–25...+70 °С

Продовження таблиці 2.13

Параметр	Eltorque QT250	Agromatic N8 Z2/22	Elfor Controls SEM 250	Electric Actuator S300
Ступінь захисту	IP67 (опц. IP68)	IP68	IP67	IP65
Матеріал корпусу	Алюмінієвий сплав	Нержавіюча сталь / алюміній	Алюмінієвий сплав	Алюмінієвий сплав
Тип монтажу	ISO 5211	ISO 5211	ISO 5211	ISO 5211
Маса, кг (приблизно)	15	17	14	16
Особливості	Інтелектуальний модуль керування, цифровий інтерфейс	Сертифікати АTEX/IECEX (вибухозахист)	Модульна система, точне позиціонування	Універсальне живлення, проста інтеграція
Країна виробництва	Норвегія	Німеччина	Італія	Німеччина
Орієнтовна ціна (євро)	≈ 850 €	≈ 900–1 200 €	≈ 750 €	≈ 600–700 €

Серед сучасних європейських електроприводів найкраще себе зарекомендували моделі Eltorque QT250 (Норвегія) та Agromatic N8 Z2/22 (Німеччина). Вони мають схожий або вищий крутний момент, підвищений ступінь захисту (IP67–IP68), ширший температурний діапазон та сумісність із міжнародними стандартами монтажу ISO 5211. Ці приводи підходять для автоматизованих систем керування запірною арматурою, насосами та клапанами, забезпечуючи надійність, точність і довговічність роботи в промислових умовах.

Мікропроцесорним пристроєм є блок БД в аналогових регулюючих органах. Він виконує такі функції:

- контроль і діагностика справної роботи датчиків, наявності та справності батареї резервного живлення, а також самого блоку БД;
- індикація за допомогою чотирирозрядного цифрового індикатора;
- датчик положення залежить від поточного положення регулюючого органа;
- передача кодів стану датчика та кодів несправностей;
- визначення аварійного стану, наявності резервної батареї, основного живлення, поточного положення вихідного вала;
- зв'язок по цифровій мережі з пристроєм верхнього рівня;
- перетворення положення вихідного механізму вала;
- підтримка протоколу ModBus RTU (блок БД з опцією C);
- передача цифрового сигналу через кабель UTP;
- вибір діапазону сигналу з вихідним уніфікованим аналоговим сигналом положення (від 0 до 5 мА), (від 0 до 20 мА), (від 4 до 20 мА).

Вибір перетворювача частоти. Для регулювання подачі сирого вугілля в млин застосовується перетворювач частоти, що забезпечує оптимальне завантаження КБМ. Цей пристрій необхідний для перетворення напруги з однієї частоти на іншу. Відповідно, частота на виході перетворювача змінюється в межах нижче або вище частоти мережі живлення.

У перетворювачі є дві частини схеми — керуюча та силова. Силова частина працює в режимі електронних ключів за допомогою транзисторів і тиристорів. Керуюча частина, у свою чергу, контролює силові електронні ключі, виконує захист і діагностику за допомогою цифрових мікропроцесорів.

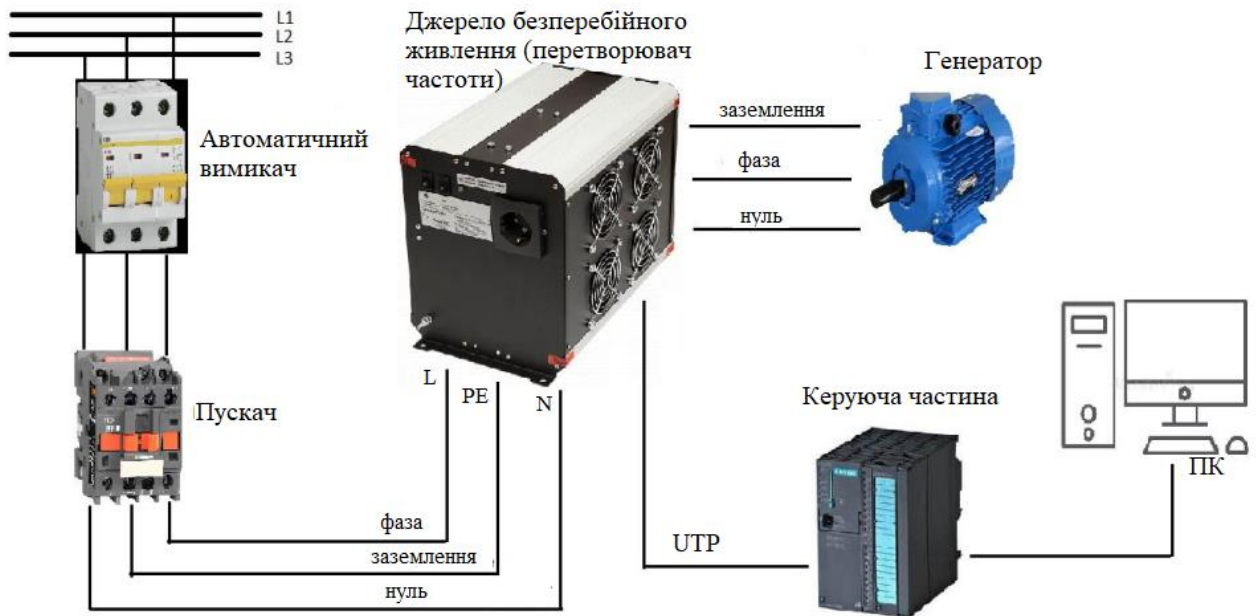


Рис. 2.3 – Система автоматизації з частотним перетворювачем

Перетворювачі частоти обирають за такими критеріями:

- живильна мережа повинна бути трифазною з напругою 220/380 В і частотою 50 Гц;
- параметри на виході перетворювача частоти:
- Максимальна лінійна напруга — 380 В.
- Максимальна частота на виході перетворювача розраховується за формулою (2.1):

$$f_{n \max} > 50 * \frac{\omega_{\max}}{\omega_0 * (1 - s_k)}, \quad (2.1)$$

Де  $\omega_{\max}$   $\omega_0$  та  $s_k$  — інженерно-електричні розрахункові величини.

Розрахунок (2.2):

$$f_{n \max} > 50 * \frac{\omega_{\max}}{\omega_0 * (1 - s_k)} = 50 * \frac{198.95}{157 * (1 - 0.19)} = 78.32 \text{ Гц.} \quad (2.2)$$

Мінімальна частота перетворювача на виході (2.3):

$$f_{n \min} > 50 * \frac{\omega_{\min}}{\omega_0} = 50 * \frac{52.3}{157} = 16.6 \text{ Гц.} \quad (2.3)$$

Розрахунок продуктивності

Проведено розрахунок годинної продуктивності живильника. Виходячи з технічних вимог, було обрано перетворювач частоти Simovert MasterDrives Vector Control від компанії Siemens.

Характеристики та виконання:

- потужність ПЧ у виконавчому блоці — від 2,1 до 2500 кВт.
- виконавчий блок має повітряне охолодження зі ступенем захисту IP20, у якому може бути встановлено варіант IP00.
- також існує тип ПЧ із системою водяного охолодження, що випускається зі ступенем захисту IP65.
- виконання шафи має стандарт захисту IP20.

Таблиця 2.15

#### Технічні характеристики перетворювача частоти

Параметр	Значення
Типорозмір	7025
Максимальна потужність двигуна, кВт	19
Номинальний вихідний струм, А	38,5
Базовий струм навантаження, А	34,5
Струм перевантаження, А	51,4
Номинальний струм ланки постійного струму, А	45,6
Споживаний струм, А	42,3
Втрата потужності при частоті 2,5 Гц, кВт	0,5
Вага, кг	353

#### 2.3.9. Вибір обчислювального пристрою

Для даної АСУТП (автоматизованої системи управління технологічним процесом) було обрано контролер Simatic S7-300, виробництва компанії Siemens.

Контролер створює керуючі сигнали, обробляє отримані дані, а також виконує операції введення та виведення сигналів. Має просту систему охолодження, програмовану модульну конструкцію.

Основні переваги контролера:

- зручний користувацький інтерфейс;
- оптимальне співвідношення ціни та якості для промислового використання;
- можливість роботи з кількома типами центральних процесорів із різними рівнями продуктивності;
- широкий вибір модулів введення аналогових та дискретних сигналів, функціональних модулів і комунікаційних процесорів.

*Таблиця 2.16*

### Технічні характеристики контролера Simatic S7-300

Характеристика	Значення
Ступінь захисту	IP 54
Діапазон температури експлуатації:	
– горизонтальне встановлення	від 0 до 60 °С
– вертикальне встановлення	від 0 до 40 °С
Діапазон відносної вологості	від 5 % до 95 %
Атмосферний тиск	800–1200 гПа
Електромагнітна сумісність	Відповідність German EMC Legislation
Стійкість до завад	Відповідно до EN 50082-2, випробування за IEC 801-2, ENV 50140, IEC 801, ENV 50141, IEC 801-5
Електромагнітні наводки	Відповідно до EN 50081-2, випробування за EN 55011, клас А, група 1

## Продовження таблиці 2.16

Характеристика	Значення
Механічні впливи:	
– вібрація	IEC 68, частина 2-6: 10–58 Гц, амплітуда постійна — 0,075 мм; 58–150 Гц — постійне прискорення 1 g
– ударні навантаження	IEC 68, частина 2-27: напівсинусоїдальні удари з прискоренням 15 g (пікове значення), тривалістю до 11 мс

## Центральний процесор

У контролері Simatic S7-300 використовується центральний процесор CPU 315-2DP. Він містить інтерфейси MPI/Profibus DP Pro, Profinet та Ethernet.

## Функціональні можливості CPU 315-2DP:

- автоматичне регулювання за допомогою модуля STEP 7, а також програмних пакетів Modular PID Control і Standard;

- керування рухом із використанням Easy Motion Control;

- пам'ять контролера, призначена для завантаження програмних секцій, обробки та зберігання оперативних даних — 256 КБ;

- мікрокарта пам'яті об'ємом 10 МБ, використовується як архів проектних даних і для керування рецептами;

- інтерфейс Ethernet;

- кількість вхідних сигналів — 16;

- кількість вихідних сигналів — 16.

## Модулі введення аналогових сигналів SM 331

Модулі SM 331 призначені для перетворення аналогових сигналів у цифрові сигнали, які обробляє контролер. Вони забезпечують коректну взаємодію з датчиками, що мають електричні вихідні сигнали (зазвичай це уніфіковані датчики температури).

Таблиця 2.17

**Характеристики модуля SM 331**

Найменування параметра	Значення параметра
Кількість вхідних каналів	8
Споживана потужність, Вт	5
Габаритні розміри, мм	40 × 125 × 117
Фронтальний з'єднувач, кількість полюсів	40
Маса, г	250

Модулі виведення аналогових сигналів SM 332

У даному технологічному процесі використовується три аналогові вихідні сигнали, які надходять від клапанів керування повітрям у трубопроводі. Модуль SM 332 виконує перетворення цифрових сигналів усередині контролера в аналогові сигнали на виході.

Таблиця 2.18

**Характеристики модуля SM 332**

Найменування параметра	Значення параметра
Загальна кількість виходів	4
Напруга живлення, В	24–34
Максимальна індуктивність навантаження, мГн	1
Захист від короткого замикання	Є
Час перетворення на канал, мс	0,8
Діагностичні переривання	Є
Довжина кабелю, м	200
Споживана потужність, Вт	3
Випробувальна напруга ізоляції, В	500
Фронтальний з'єднувач, кількість полюсів	20
Габаритні розміри, мм	40 × 125 × 120
Маса, кг	0,22

Продовження таблиці 2.18

Найменування параметра	Значення параметра
Параметри сигналів на виході:	0–10; $\pm 10$
Напруга, В	4–20; $\pm 20$
Сила струму, мА	$\geq 10$
Опір навантаження для напругових каналів, кОм	$\leq 0,6$
Опір навантаження для струмових каналів, кОм	
<i>Точність перетворення:</i>	
Канали напруги	$\pm 0,5$
Канали струму	$\pm 0,6$
<i>Час встановлення вихідного сигналу:</i>	
Активне навантаження	0,1
Ємнісне навантаження	3,3
Індуктивне навантаження	0,5

Окрім цього, у системі використовуються модулі для введення та виведення дискретних сигналів, що підключаються безпосередньо до каналів центрального процесора.

## Висновки до розділу 2

У другому розділі проведено комплексну розробку модернізованої системи подачі твердого палива на ТЕЦ із визначенням ключових параметрів контролю, структури АСУ ТП та вибору технічних засобів автоматизації. Визначено необхідні точки вимірювання, що забезпечують повноцінний моніторинг температури, тиску, рівня, вібрації, потоку матеріалу та інших критично важливих для стабільності процесу характеристик.

Сформовано оптимальну структуру автоматизованої системи керування, що охоплює засоби збору даних, обробки сигналів, регулювання та виконавчих впливів. Проведений аналіз сучасних технічних засобів дав змогу обґрунтовано

вибрати датчики вимірювання, виконавчі механізми та проміжне комутаційне обладнання, орієнтуючись на їхню точність, надійність, відповідність умовам експлуатації та економічну ефективність.

Особливу увагу приділено вибору обчислювального пристрою, який забезпечує необхідну швидкодію, стійкість до промислових перешкод та сумісність з іншими елементами системи. Отримані результати створили технічну основу для формування високоефективної, надійної та сучасної системи автоматичного керування процесом подачі твердого палива, що є фундаментом для подальшого моделювання та налаштування алгоритмів регулювання в наступних розділах роботи.

## РОЗДІЛ 3

МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ  
ПОДАЧІ ПАЛИВА В ТЕЦ3.1. Моделювання системи автоматичного регулювання в середовищі  
Matlab – Simulink подачі палива на ТЕЦ

На основі раніше відомих передавальних функцій була побудована система автоматичного регулювання (САР) подрібнення вугілля в середовищі Simulink.

$$W_1(p) = 1,$$

$$W_2(p) = \frac{20}{(0.01 * p + 1)},$$

$$W_3(p) = \frac{5}{(2 * p + 1)},$$

$$W_4(p) = \frac{0.1}{(0.05 * p^2 + 1)},$$

де:  $W_1(p)$ — передавальна функція виконавчого механізму (відкривання-закривання бункера сирого вугілля);

$W_2(p)$ — передавальна функція робочого органа (пневматичний клапан);

$W_3(p)$ — передавальна функція об'єкта управління (КБМ);

$W_4(p)$ — передавальна функція датчика (термопара).

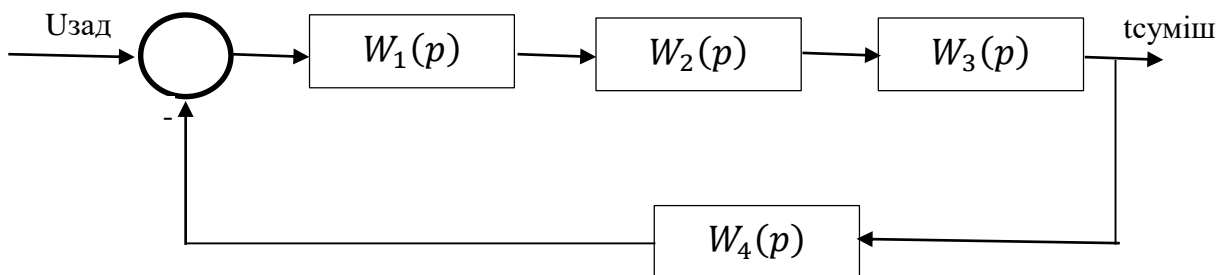


Рис. 3.1 – Функціональна схема системи автоматичного регулювання (САР) подрібнення сирого вугілля в КБМ

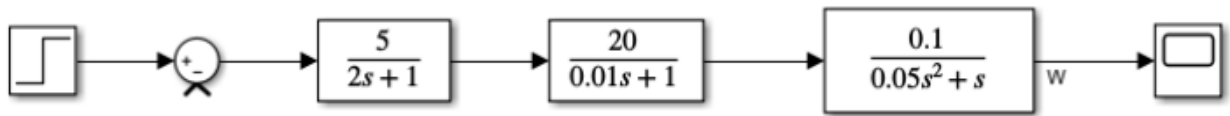


Рис. 3.2 – Структурна схема розімкненої системи в середовищі Simulink

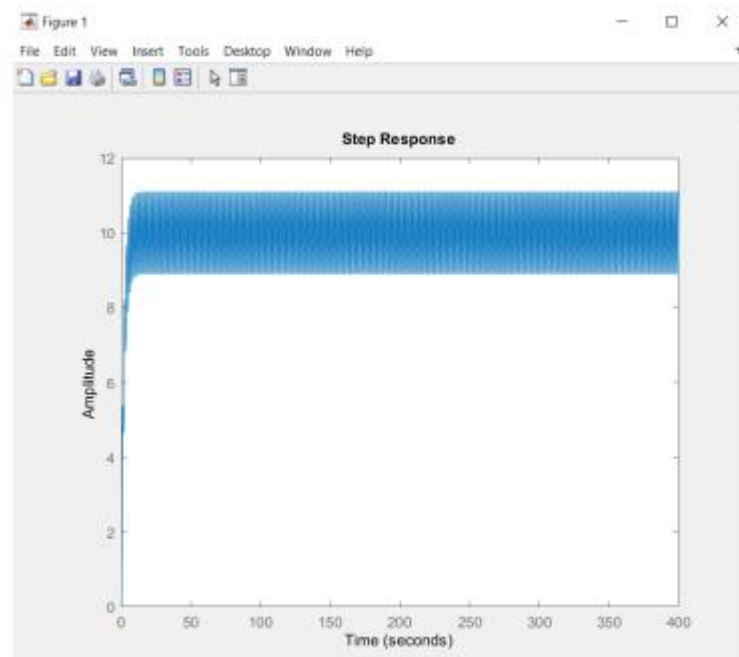


Рис. 3.3 – Результати моделювання розімкнутої системи

Необхідно перевірити систему у командному рядку. Для цього вводиться формула визначення передавальної функції розімкненого контуру. Далі виводяться її полюси.

Для стійкої системи виконується умова, що всі полюси мають від'ємні значення. Якщо хоча б один полюс має додатне значення, система є нестійкою.

У даному випадку система перебуває на межі стійкості, оскільки присутні уявні полюси, рівні нулю.

```

Command Window

>> A=tf([5],[2 1]);
>> B=tf([20],[0.01 1]);
>> C=tf([0.1],[0.05 0 1]);
>> W=A*B*C

W =

          10
-----
0.001 s^4 + 0.1005 s^3 + 0.07 s^2 + 2.01 s + 1

Continuous-time transfer function.

>> pole(W)

ans =

1.0e+02 *

-1.0000 + 0.0000i
 0.0000 + 0.0447i
 0.0000 - 0.0447i
-0.0050 + 0.0000i

>> step(W)

```

Рис. 3.4 – Дослідження стійкості системи в командному рядку Matlab

Згідно з рисунком 3.4, за прямим зв'язком система перебуває на межі стійкості. Усі полюси виявилися уявними, тому РСАР (розімкнена система автоматичного регулювання) є консервативною ланкою, що видно з графіка системи.

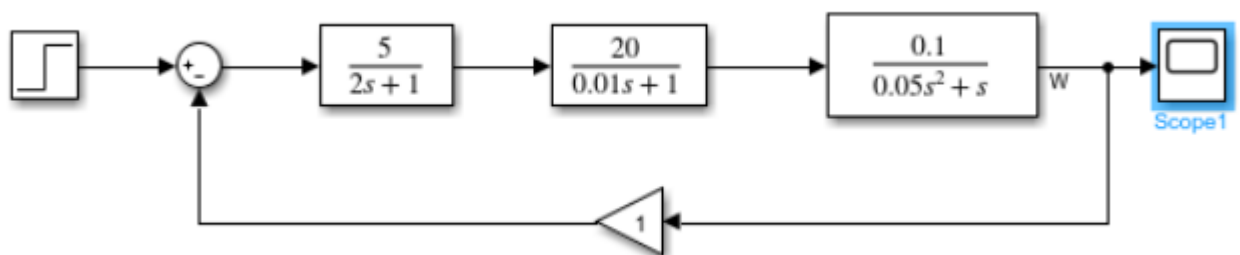


Рис. 3.5 – Структурна схема замкненої системи в Simulink

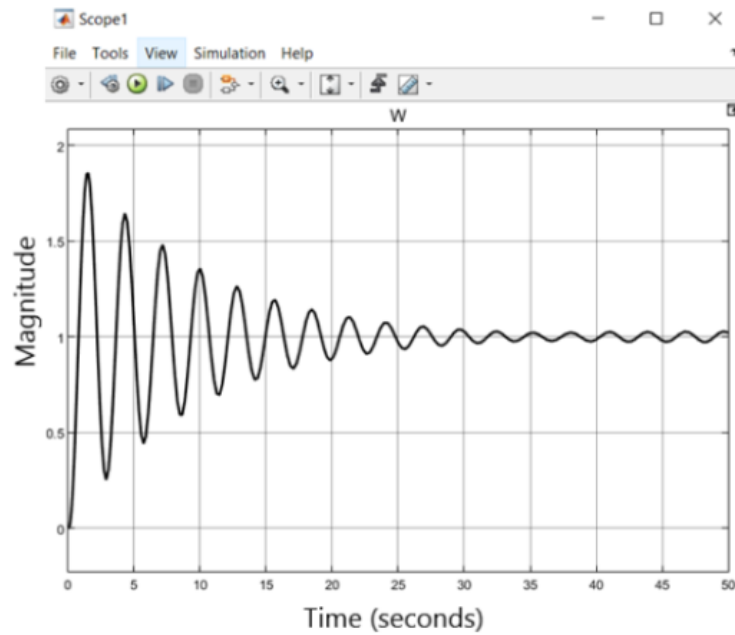


Рис. 3.6 – Результати моделювання замкненої системи

За результатами моделювання можна спостерігати, що замкнута система перебуває у стійкому стані, який прагне до значення 1.

Для підтвердження цього необхідно виконати перевірку у командному рядку, ввівши формулу визначення передавальної функції замкненого контуру, використовуючи передавальну функцію прямого контуру. Після цього виводяться її полюси.

```

Command Window
>> g=tf([10],[0.001 0.1205 2.06 1 10])

g =

          10
-----
0.001 s^4 + 0.1205 s^3 + 2.06 s^2 + s + 10

Continuous-time transfer function.

>> pole(g)

ans =

-99.9874 + 0.0000i
-20.3118 + 0.0000i
-0.1004 + 2.2167i
-0.1004 - 2.2167i

```

Рис. 3.7 – Моделювання розімкненої САР у Matlab

Усі полюси мають від'ємні уявні значення, отже, замкнений контур є стійким (відповідно до першого методу Ляпунова) [9]. Перевірку можна виконати також за допомогою графіка step.

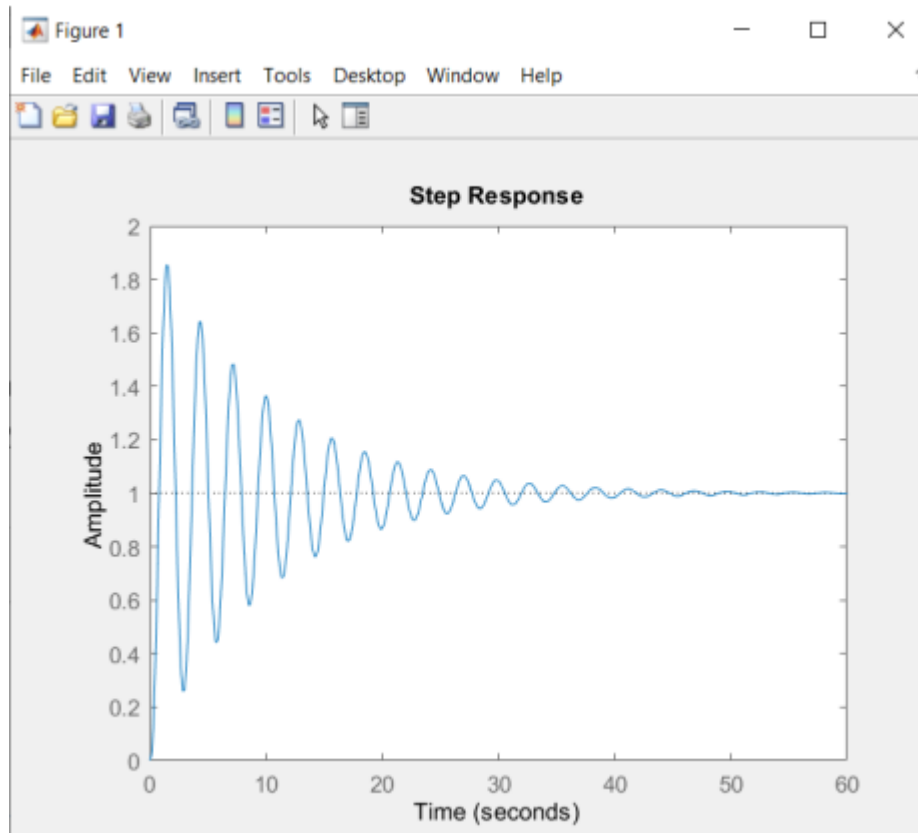


Рис. 3.8 – Результат моделювання замкненої системи в командному рядку Matlab

Виходячи з рисунка 2.8, графік досягає усталеного стану в точці 2. Графіки, отримані за допомогою функціональних блоків Simulink та в командному рядку Matlab, є ідентичними, отже дослідження проведено успішно. Система є стійкою. Дослідження стійкості замкненої САР за критерієм Михайлова.

$$G(s) = \frac{10}{0.001s^4 + 0.1205s^3 + 2.06s^2 + s + 10}$$

Визначаємо характеристичне рівняння

$$D(s) = 0.001s^4 + 0.1205s^3 + 2.06s^2 + s + 10 = 0.$$

Змінюємо  $s \rightarrow j\omega$

$$D(j\omega) = 0.001(j\omega)^4 + 0.1205(j\omega)^3 + 2.06(j\omega)^2 + j\omega + 10 = 0.$$

Частотний характеристичний поліном – годограф Михайлова

$$D(j\omega) = (0.001(\omega)^4 - 2.06 * \omega_2^2 + 10) + j * (-0.1205\omega_3^3 + \omega_1^1) = 0;$$

$$D(j\omega) = \text{Re}(\omega) + j\text{Im}(\omega) = X(\omega) + jY(\omega);$$

$$X(\omega) = 0.001(\omega)^4 - 2.06 * \omega_2^2 + 10 = 0;$$

$$\begin{cases} w_1 = -45.3 \\ w_2 = +45.3 \\ w_3 = -2.2 \\ w_4 = +2.2 \end{cases};$$

$$Y(\omega) = -0.1205\omega_3^3 + \omega_1^1 = 0;$$

$$\begin{cases} -2.88 \\ 0 \\ +2.88 \end{cases};$$

Побудувати годограф Михайлова в Matlab (рисунок 3.9).

```
Command Window
>> w=0:1:50;
>> D=(0.001*w.^4 - 2.06*w.^2 + 10)-i*(0.1205*w.^3 - w);
>> plot(real(D), imag(D))
>> grid on
fx >> |
```

Рис. 3.9 – Моделювання стійкості розімкненої САР за критерієм Михайлова

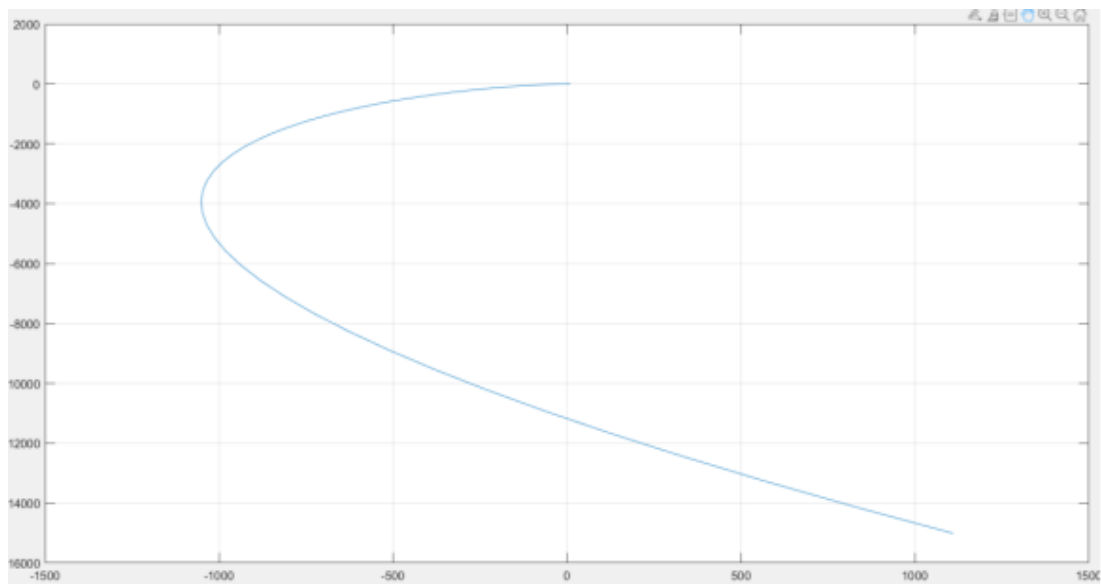


Рис. 3.10 – Результат моделювання стійкості розімкненої САР за критерієм Михайлова

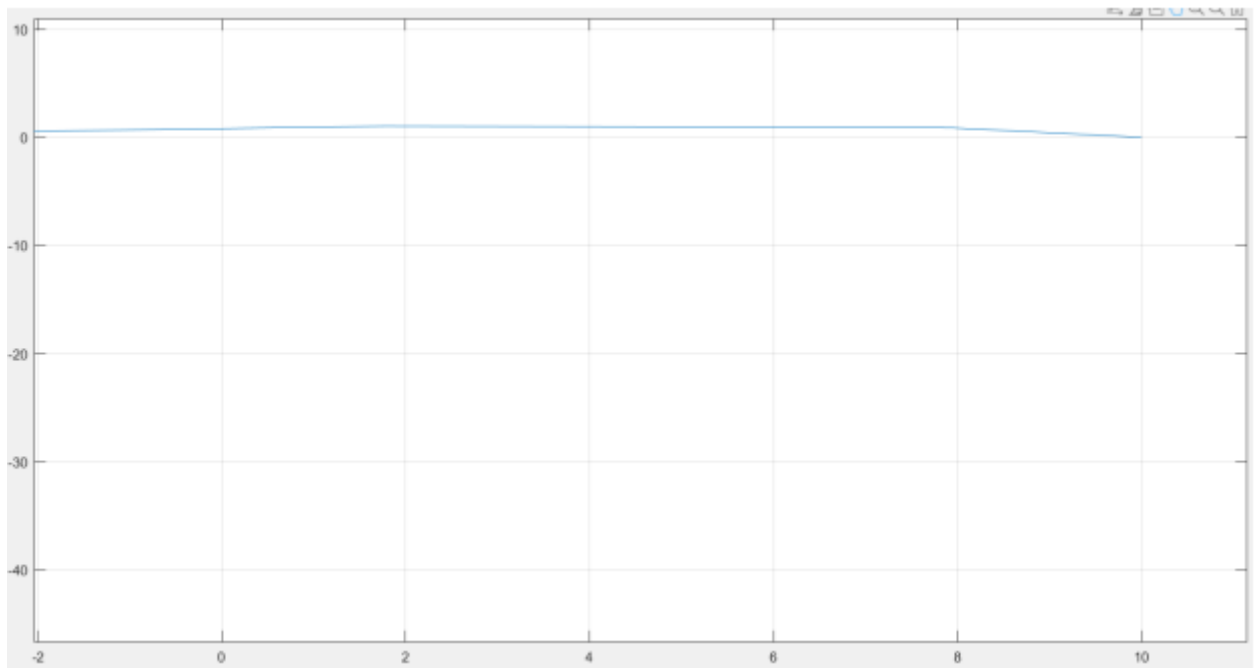


Рис. 3.11 – Годограф Михайлова

Виходячи з рисунка 3.11, графік проходить проти годинникової стрілки, перетинаючи одразу чотири квадранти, що відповідає стійкій системі четвертого порядку. Годограф Михайлова починається з додатної дійсної півосі, у четвертому квадранті прямує в нескінченність і не перетинає початок координат, отже, замкнена система автоматичного регулювання (ЗСАР) є стійкою за критерієм Михайлова [9].

Дослідити стійкість замкненої САР за критерієм Найквіста. Дослідження замкненої системи за амплітудно-фазовою характеристикою розімкненої системи. Наступним кроком є визначення кількості нестійких полюсів  $G(s)$ . У даній системі нестійких полюсів немає.

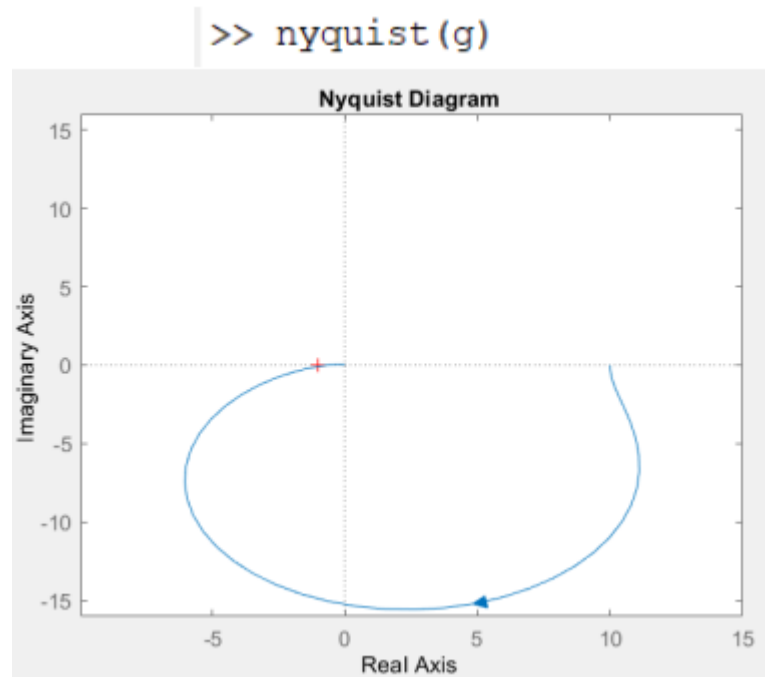


Рис. 3.12 – Результат моделювання ЗСАР за критерієм Найквіста

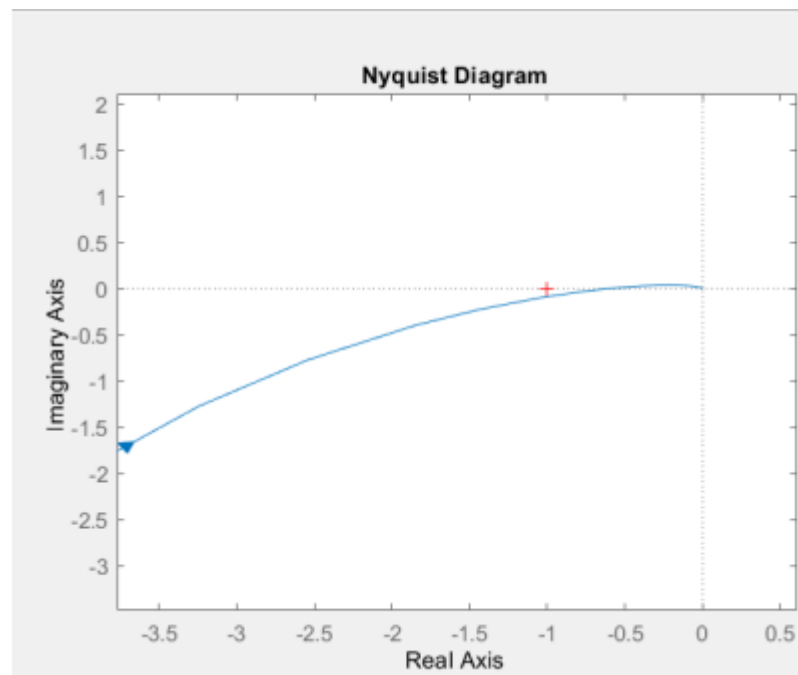


Рис. 3.13 – Результат моделювання ЗСАР за критерієм Найквіста

Визначення запасу стійкості за логарифмічною частотною характеристикою. Для отримання запасу стійкості за фазою та амплітудою необхідно побудувати ЛЧХ розімкненої системи [9].

```

Command Window

>> G=tf([54],[0.3263 2.851 4.655 1])

G =

          54
-----
0.3263 s^3 + 2.851 s^2 + 4.655 s + 1

Continuous-time transfer function.

>> nyquist(G)
>> ltiview(G)

```

Рис. 3.14 – Програма побудови ЛЧХ розімкненої системи в командному рядку Matlab

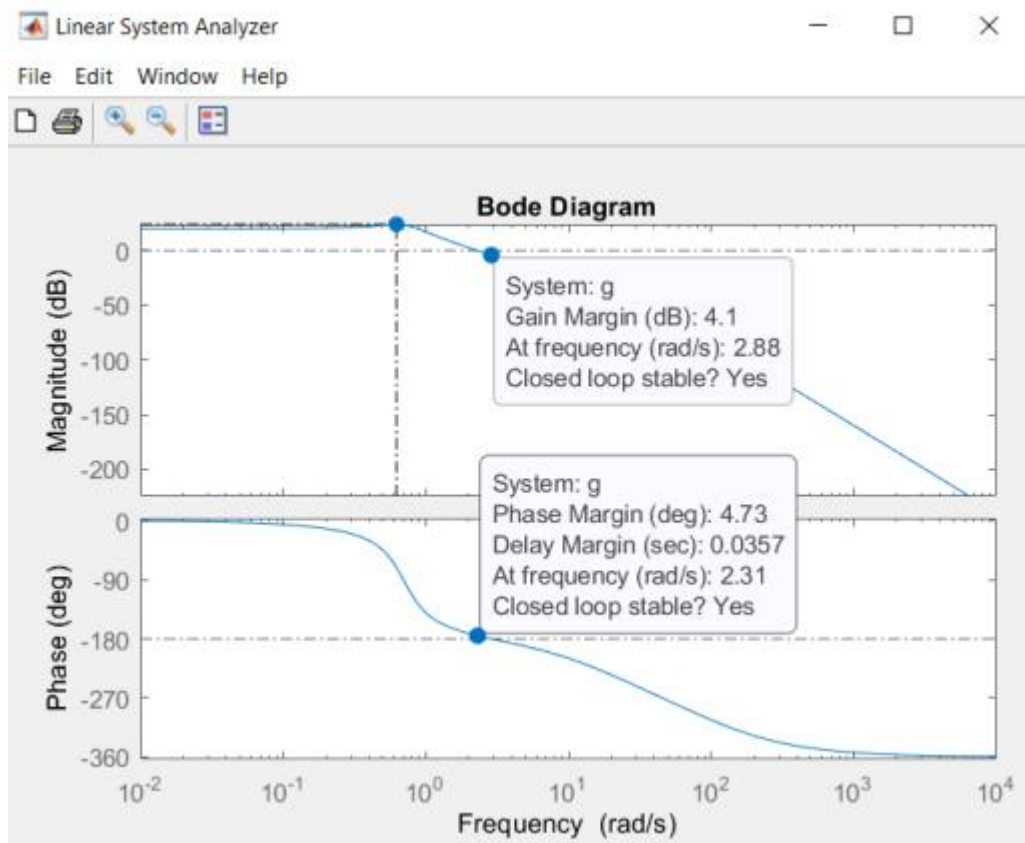


Рис. 3.15 – ЛАХ і ЛФХ САР подрібнення сирого вугілля в барабанному кульовому млині

Виходячи з отриманих даних (рисунок 3.15), з ЛАХ і ЛФХ можна побачити, що запас по амплітуді – 4.1 дБ, а запас по фазі – 4.73 градуса.

Дослідження замкненої САР з підключенням регулятора. Об'єкти керування бувають різних типів і властивостей, відповідно їх регулювання також обирається залежно від лінійних налаштувань і функцій [9]. У промисловості переважно використовуються лінійні регулятори.

Так, Р-регулятори застосовуються при довільному значенні часу запізнення та інерційності. Такий регулятор включає в себе як статичний, так і астатичний регулюючий орган.

У свою чергу, І-регулятор має лише статичний орган регулювання, за умови, що час запізнення малий, а зміни збурень відбуваються повільно.

РІ-регулятор працює при будь-якому значенні часу запізнення та інерційності.

Ще один тип регулятора — PID-регулятор. Він також працює при будь-якому значенні часу запізнення, але за умови незначних коливань на початкових етапах процесу.

З цього короткого викладу можна зробити висновок, що раціональним і доцільним буде використання Р-регулятора, оскільки його характеристики ідеально підходять для нашої САР.

Дослідження прямих оцінок якості ЗСАР подачі палива в ТЕЦ без регулятора.

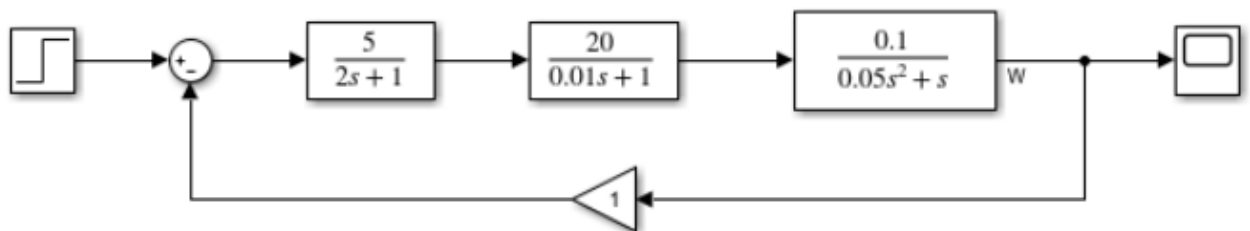


Рис. 3.16 – Замкнена система автоматичного регулювання без регулятора

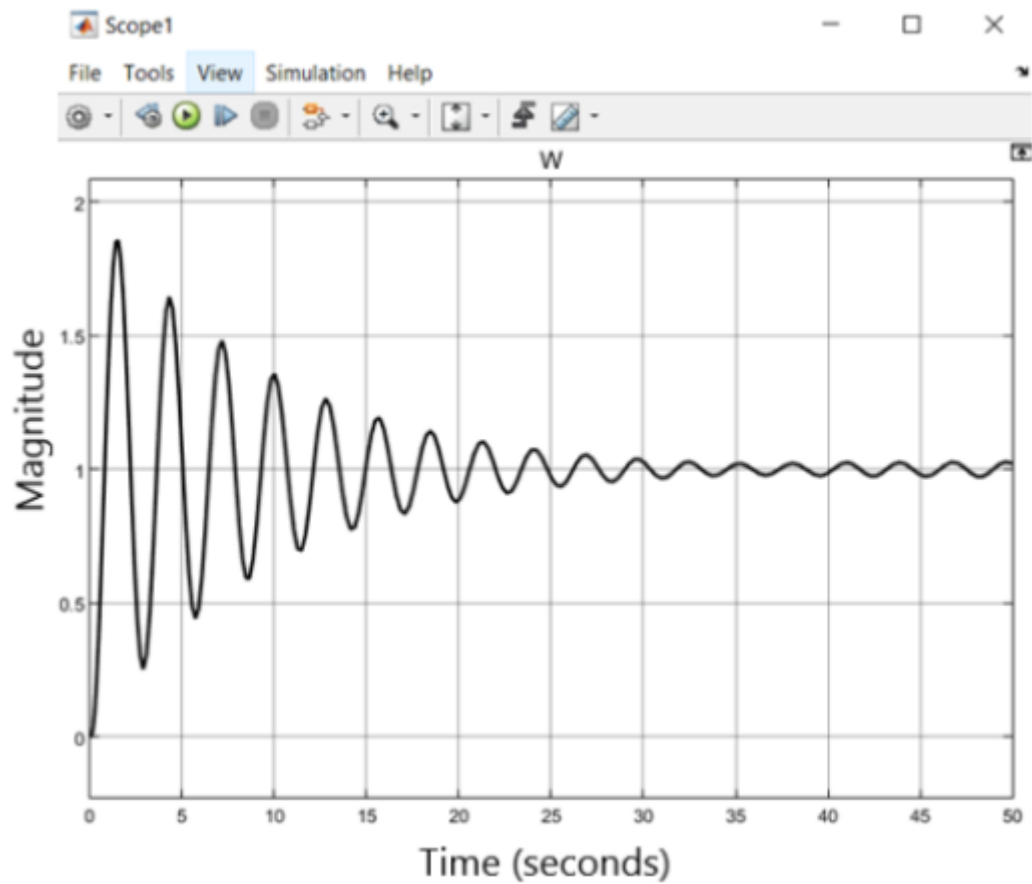


Рис. 3.17 – Графік ЗСАР без регулятора

Дослідження прямих оцінок якості ЗСАР подачі палива в ТЕЦ без регулятора

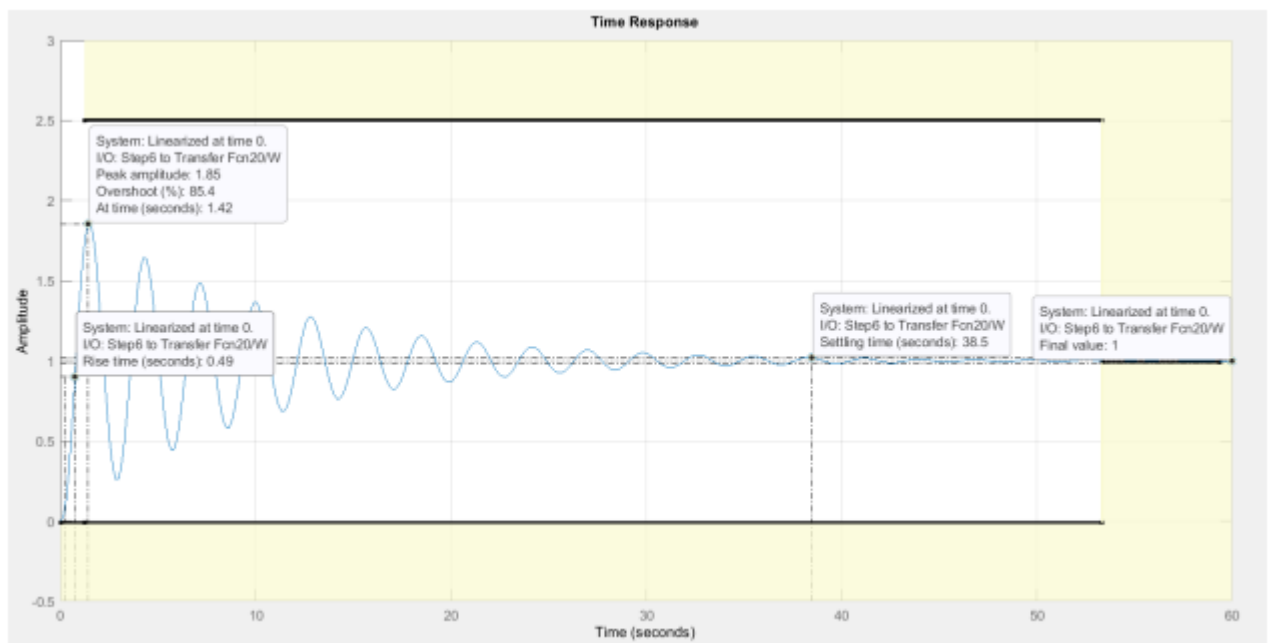


Рис. 3.18 – Графік ЗСАР без регулятора з прямими оцінками якості

Таблиця 3.1

### Характеристики прямих оцінок якості ЗСАР

№	Показник	Значення
1	Час регулювання ( <i>setting time</i> )	38.5
2	Перерегулювання ( <i>overshoot</i> ) %	85.4
3	Час досягнення першого максимуму ( <i>peaktime</i> )	1.85
4	Час наростання ( <i>rise time</i> )	0.49
5	Усталене значення ( <i>final value</i> )	1

Дослідження прямих оцінок якості ЗСАР подачі палива в ТЕЦ з Р-регулятором

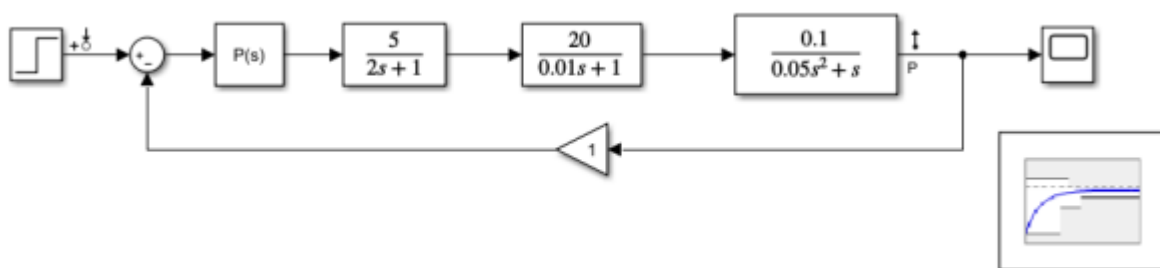


Рис. 3.19 – Замкнена система автоматичного регулювання з Р-регулятором

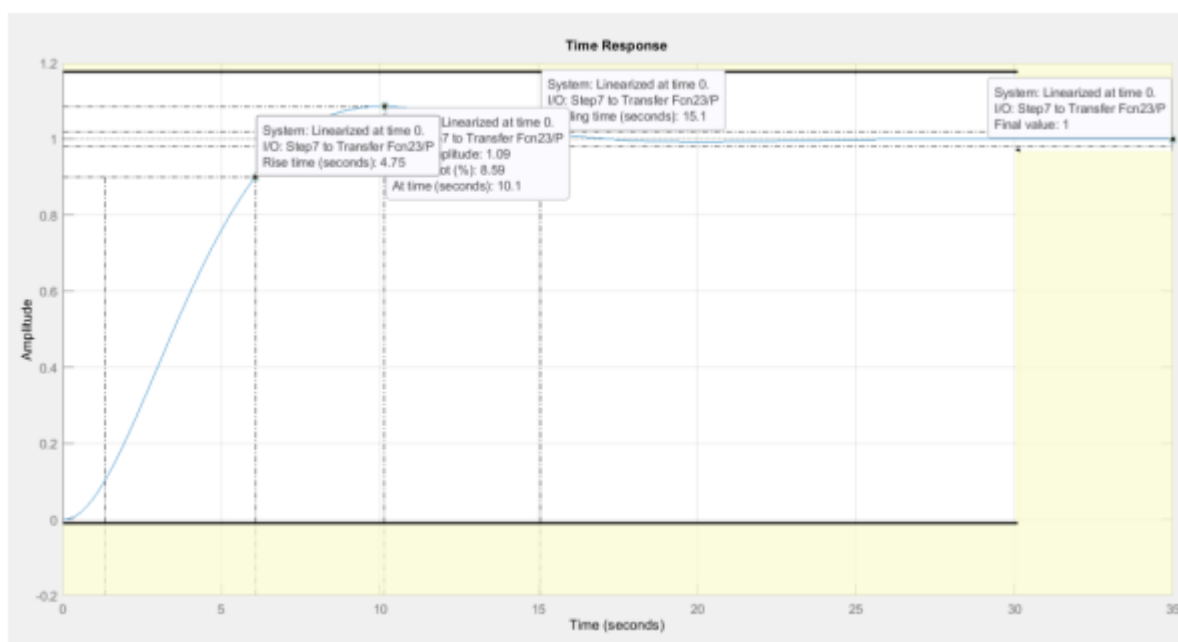


Рис. 3.20 – Графік ЗСАР з Р-регулятором з прямими оцінками якості

Таблиця 3.2

## Характеристики прямих оцінок якості ЗСАР з Р-регулятором

№	Показник	Значення
1	Час регулювання ( <i>setting time</i> )	15.1
2	Перерегулювання ( <i>overshoot</i> ) %	8.59
3	Час досягнення першого максимуму ( <i>peaktime</i> )	1.09
4	Час наростання ( <i>rise time</i> )	4.75
5	Усталене значення ( <i>final value</i> )	1

Дослідження прямих оцінок якості ЗСАР подачі палива в ТЕЦ з PD-регулятором.

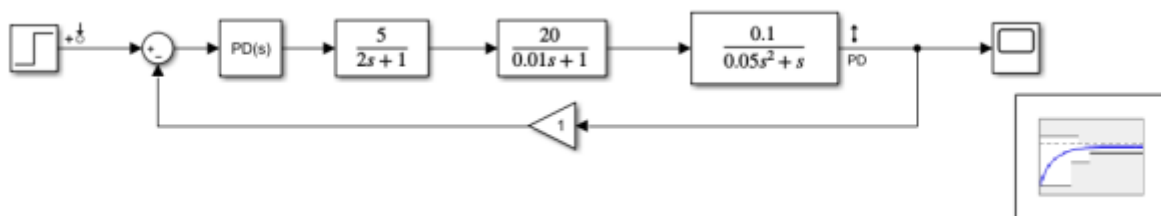


Рис. 3.21 – Замкнена система автоматичного регулювання з PD-регулятором

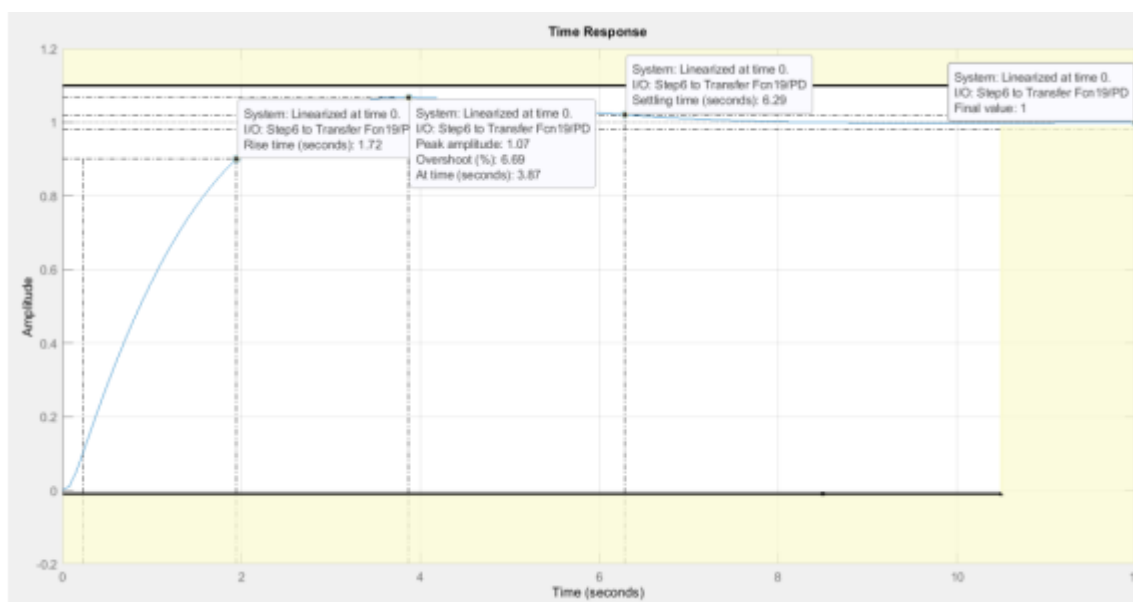


Рис. 3.22 – Графік ЗСАР з PD-регулятором з прямими оцінками якості

Таблиця 3.3

## Характеристики прямих оцінок якості ЗСАР з PD-регулятором

№	Показник	Значення
1	Час регулювання ( <i>setting time</i> )	6.29
2	Перерегулювання ( <i>overshoot</i> ) %	6.69
3	Час досягнення першого максимуму ( <i>peaktime</i> )	1.07
4	Час наростання ( <i>rise time</i> )	1.72
5	Усталене значення ( <i>final value</i> )	1

Дослідження прямих оцінок якості ЗСАР подачі палива в ТЕЦ з PI-регулятором.

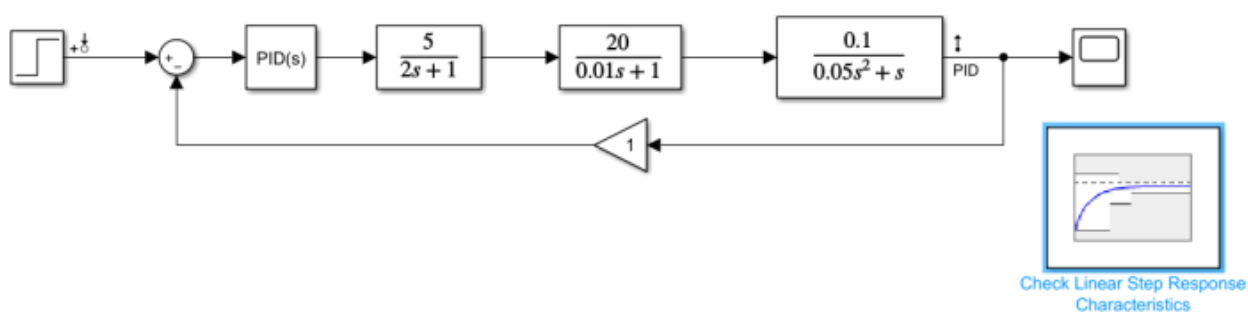


Рис. 3.25 – Замкнена система автоматичного регулювання з PID-регулятором

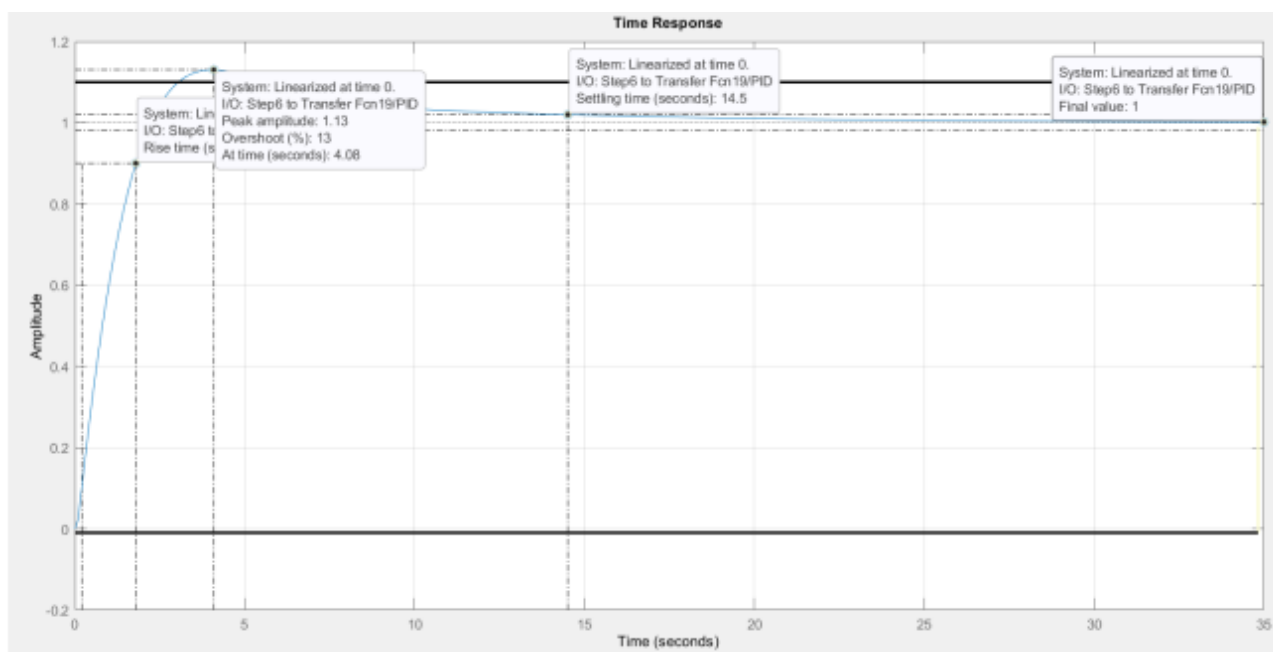


Рис. 3.26 – Графік ЗСАР з PID-регулятором з прямими оцінками якості

### Характеристики прямих оцінок якості ЗСАР з PID-регулятором

№	Показник	Значення
1	Час регулювання ( <i>setting time</i> )	14.5
2	Перерегулювання ( <i>overshoot</i> ) %	13
3	Час досягнення першого максимуму ( <i>peaktime</i> )	1.13
4	Час наростання ( <i>rise time</i> )	1.6
5	Усталене значення ( <i>final value</i> )	1

Дослідження прямих оцінок якості ЗСАР подачі палива в ТЕЦ з PID-регулятором.

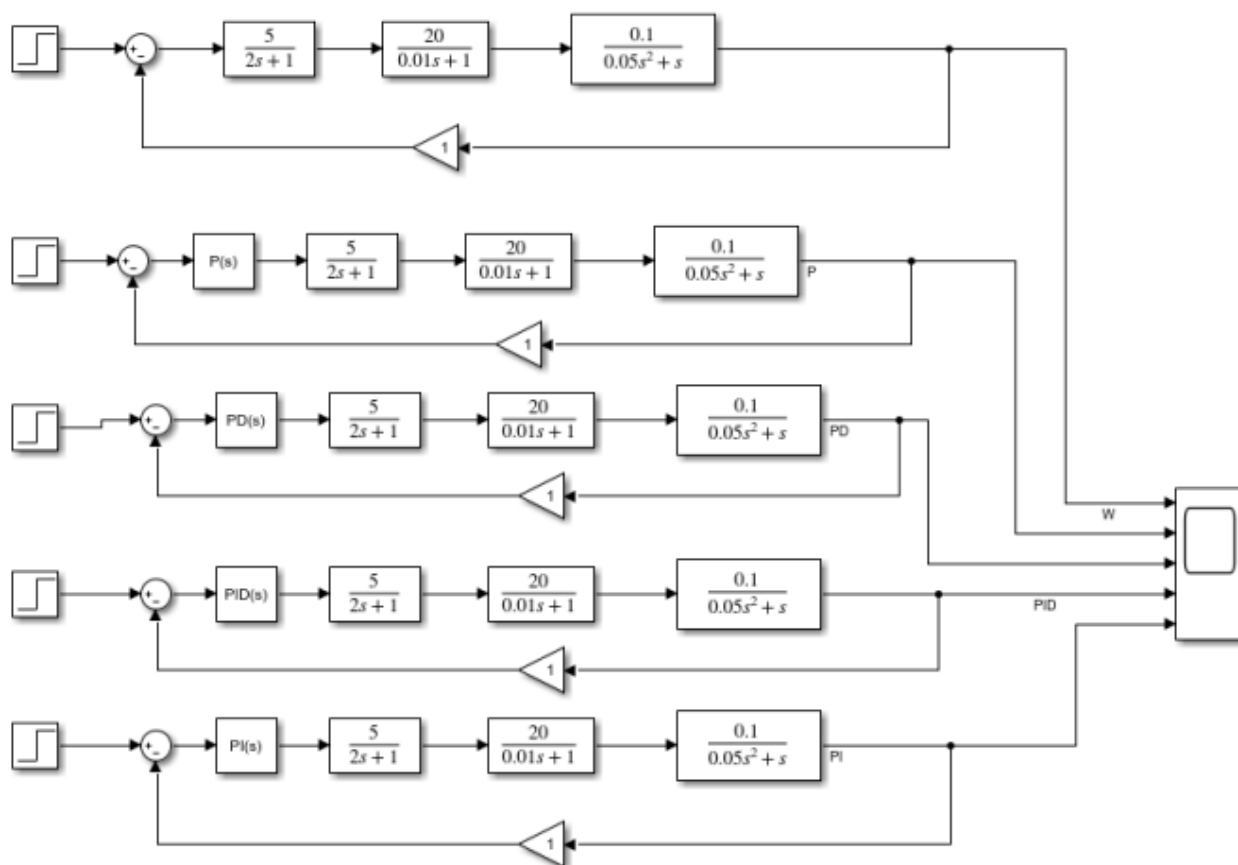


Рис. 3.27 – Загальна схема ЗСАР подачі палива в ТЕЦ без регулятора та з регуляторами в Simulink

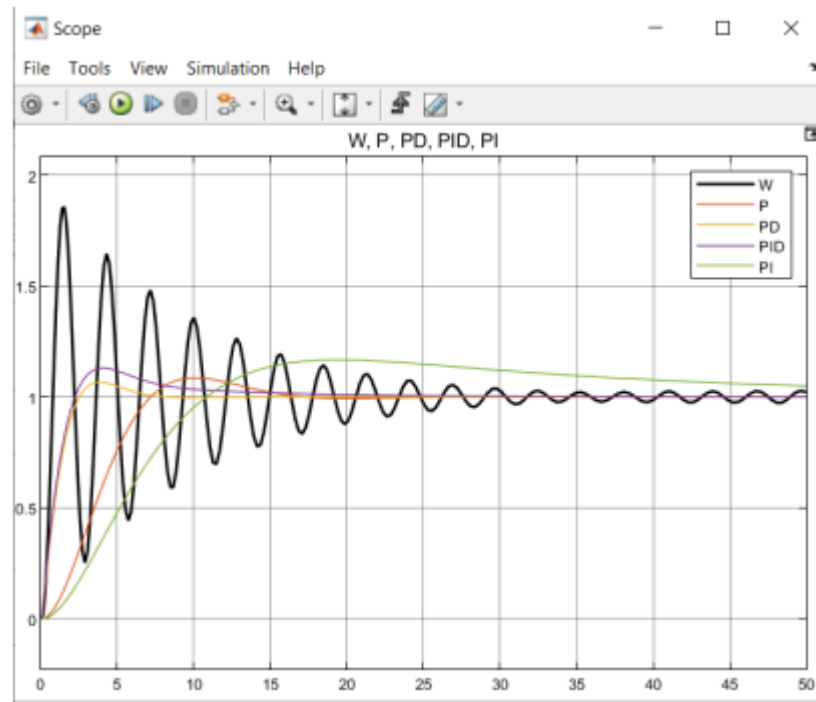


Рис. 3.28 – Графіки порівняння ЗСАР подачі палива в ТЕЦ без регулятора та з регуляторами в Simulink

Виходячи з рисунка 3.28, для даної системи подачі палива в ТЕЦ найбільш доцільним є вибір PD-регулятора. У цього типу регулятора:

- час регулювання становить 6.29;
- перерегулювання досягає найменшого значення — 6.69;
- час досягнення першого максимуму — 1.07;
- найшвидше з усіх досягається наростання — 1.72, у порівнянні з іншими регуляторами.

### Висновки до розділу 3

У цьому розділі виконано моделювання системи автоматичного регулювання процесу подрібнення сирого вугілля в кульовому барабанному млині із застосуванням середовища Matlab–Simulink. На основі відомих передавальних функцій побудовано розімкнену та замкнену схеми САР, що дало можливість дослідити її динамічні властивості та оцінити стійкість за різними критеріями.

Аналіз розімкненої системи показав, що вона перебуває на межі стійкості через наявність уявних полюсів. Після замикання контуру система стала повністю стійкою, що було підтверджено методом Ляпунова, критеріями Михайлова та Найквіста. Частотний аналіз також засвідчив наявність запасів стійкості, хоча їх значення були відносно невисокими для розімкненого контуру.

Подальше моделювання з використанням різних типів регуляторів (P, PI, PD, PID) дозволило визначити їх вплив на якість перехідних процесів та основні технічні показники: час регулювання, перерегулювання, час наростання й досягнення першого максимуму. Порівняльний аналіз показав, що найкращі динамічні характеристики забезпечує PD-регулятор, який дозволяє значно скоротити час регулювання, мінімізувати перерегулювання та забезпечити швидке встановлення вихідної величини.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У даній магістерській роботі виконано комплексне дослідження, спрямоване на розроблення та модернізацію системи автоматизації процесу подачі твердого палива на теплоелектроцентралі. Проведена робота охоплює цикл створення автоматизованої системи – від аналізу технологічних процесів до побудови математичних моделей і вибору оптимального регулятора для забезпечення стійкого та ефективного функціонування обладнання.

На першому етапі детально опрацьовано технологічну частину процесу транспортування й підготовки палива. Визначено ключові точки контролю та регулювання, проаналізовано основні параметри, що впливають на роботу пилосистеми й кульового барабанного млина. Виконано обґрунтований вибір технічних засобів автоматизації, включно з датчиками температури, рівня, тиску, вібрації та елементами керування німецької компанії Siemens. Їхній порівняльний аналіз дав змогу врахувати експлуатаційні характеристики, надійність та економічну ефективність обладнання.

Наступним значущим етапом стало моделювання системи автоматичного регулювання у середовищі Matlab–Simulink. Кульовий барабанний млин розглядався як складний об'єкт управління зі змінними параметрами та високими вимогами до точності підтримання технологічних режимів. На основі передавальних функцій побудовано розімкнену та замкнену структури САР, проведено оцінку стійкості за критеріями Ляпунова, Михайлова та Найквіста, а також виконано частотний аналіз. Результати підтвердили можливість забезпечення стабільної роботи системи за умови правильного вибору типу регулятора та його параметрів.

Використання функціоналу PID-tuning дало змогу порівняти ефективність різних типів регуляторів (P, PI, PD, PID). На основі аналізу прямих оцінок якості встановлено, що найкращі динамічні показники забезпечує PD-регулятор, який демонструє мінімальний час регулювання, низький рівень перерегулювання та

високу швидкодію. Це робить його найбільш придатним для керування системою подачі палива, що потребує точного та швидкого реагування на зміну параметрів.

У рамках роботи успішно вирішені такі завдання:

- організовано реєстрацію та контроль основних технологічних параметрів, а також розроблено заходи захисту обладнання;
- забезпечено можливість досягнення максимальної продуктивності млина з урахуванням характеристик вугілля та параметрів пилосистеми;
- реалізовано автоматичне регулювання температури аеросуміші в КБМ;
- мінімізовано витрати млина в умовах змінних зовнішніх впливів;
- підвищено рівень безпеки шляхом автоматичного реагування на аварійні ситуації та зупинки подачі палива.

Загалом отримані результати мають важливе практичне значення. Розроблена система автоматизації дозволяє підвищити ефективність роботи ТЕЦ, зменшити енергетичні та ресурсні витрати, а також забезпечити стабільність технологічного процесу подачі палива.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Колієнко А.Г. Конспект лекцій з дисципліни “ Паливо і теорія горіння» : – ПолтНТУ, 2024. –150С
2. Євген Пістун, Роман Федоришин, В. Заграй, Г. Николин Побудова математичної моделі кульового барабанного млина із застосуванням отриманих експериментальних даних
3. Ball Mill – Working Principle and Construction // Uniquet Mac Global. – Режим доступу: <https://www.uniquemacglobal.com/products/ball-mill>
- Півняк Г. Г., Кириченко В. І. Електромеханічні системи енергонапружених барабанних млинів. – Дніпропетровськ: НГА України, 2000. – 166 с.
- 5 Основи теплової енергетики: конспект лекцій [Електронний ресурс]: навч. посіб. для здобувачів ступеня бакалавра за спеціальністю 105 Прикладна фізика та наноматеріали / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: А. В. Борисенко, В. А. Пешко. – Електронні текстові дані (1 файл: 41,9 Мбайт). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 149 с.
6. Акселерометр PCE-VM 400B. Режим доступу: <https://promsystem.com.ua/product/akselerometr-pce-vm-400b/>.
7. Датчики контролю забивання (заштибування) переваантажувальних течок, індуктивні – ДЗІ. Режим доступу: <https://www.mashprom.com.ua/%D0%B4%D0%B7%D0%B8-%D0%B4%D0%B0%D1%82%D1%87%D0%B8%D0%BA%D0%B8-%D0%BA%D0%BE%D0%BD%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%BB%D1%8F-%D0%B7%D0%B0%D0%B1%D0%B8%D0%B2%D0%BA%D0%B8-%D0%B7%D0%B0%D1%88%D1%82%D1%8B%D0%B1%D0%BE/>
8. Електромагнітне проміжне реле РП-21-003. Режим доступу: <https://tehprom.com.ua/ukraine/rele-rp-21-003?page=3&limit=100>
9. Попович М. Г., Ковальчук, О. В. Теорія автоматичного керування : підручник. – 2-ге вид., перероб. І доп. – К.: Либідь, 2007. - 656 с. Режим доступу: [https://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/Popovich\\_2007\\_656.pdf](https://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/Popovich_2007_656.pdf)

# ДОДАТКИ

## ДОДАТОК А

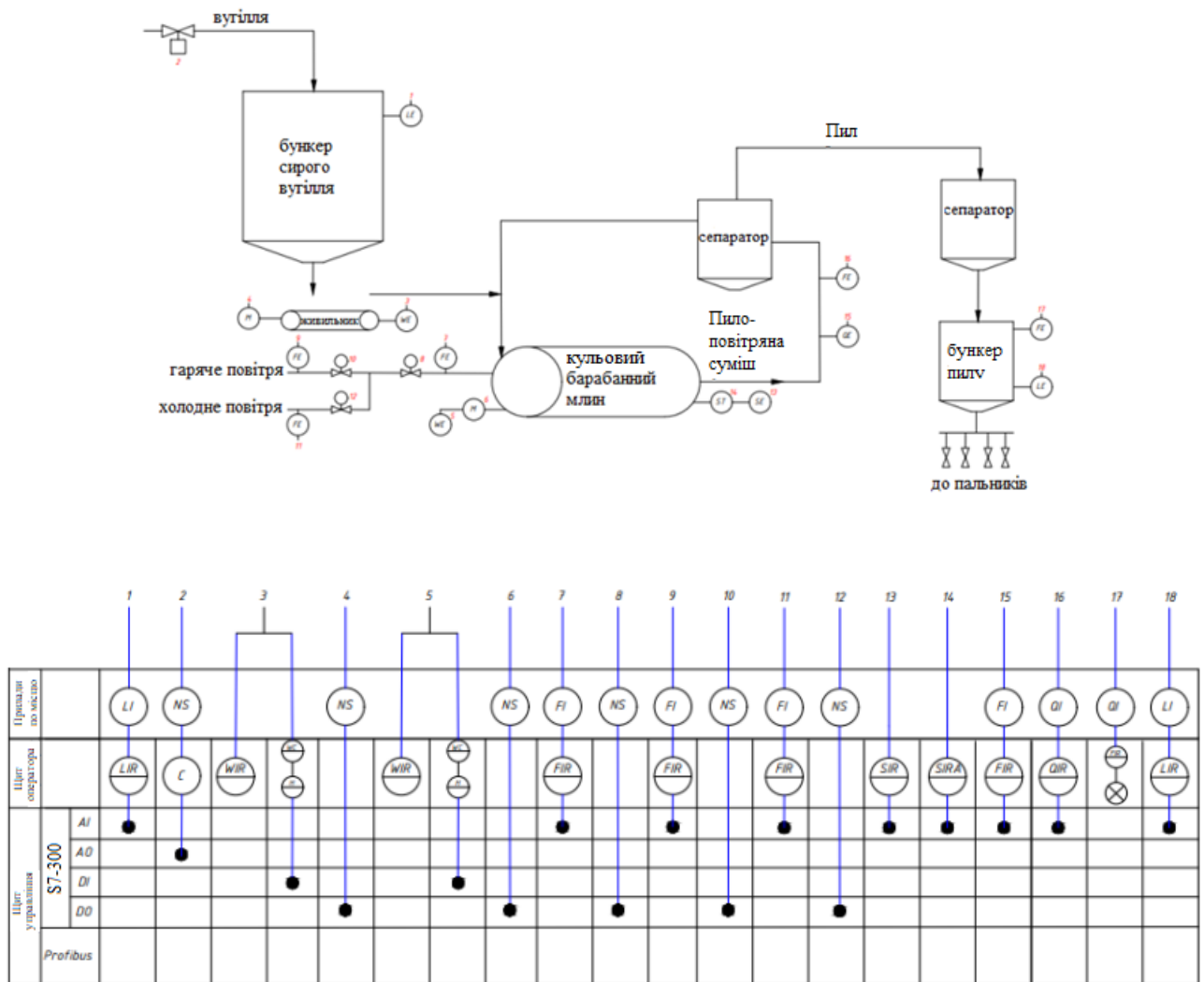


Рисунок 1 – Функціональна схема автоматизації