

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

БР.АКП -73.00.00.000 ПЗ

група АКП -22-1

Іван Кіліштоф

2026 рік

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

Кіліштоф Іван Романович

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 681.5:004.89
(індекс)

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

Синтез системи автоматичного керування подачею клінкеру

(назва роботи)

в цементний млин на засадах Fuzzy Logic

Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

(назва освітньої програми)

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

(шифр і назва спеціальності)

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

Нормоконтроль

доцент О. В. Кучмистенко
(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

Рецензент

доцент Л. І. Фешанич
(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

Здобувач освітнього ступеня

АКП-22-1 І. Р. Кіліштоф
(шифр групи) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

Науковий керівник

асистент Г. Г. Зварич
(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

Допущено до захисту Завідуючий кафедри

доцент А. І. Лагойда
(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

(повне найменування закладу вищої освіти)

Факультет Автоматизації та енергетики

Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій

Освітній рівень перший (бакалаврський)

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

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри АКТ

А.І. Лагойда.

« » 20 року

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

Кіліштофу Івану Романовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи **Синтез системи автоматичного керування подачею клінкеру в цементний млин на засадах Fuzzy Logic.**

керівник роботи Зварич Галина Григорівна.

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

затверджені наказом закладу вищої освіти від «29» квітня 2026 року № 192/7

2. Строк подання студентом роботи 10.06.2026

3. Вихідні дані до роботи: матеріали переддипломої практики, технічна література, інтернет-ресурс.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Вступ. 1. Аналіз технологічного процесу подачі клінкеру як об'єкта автоматичного керування. 2. Дослідження математичної моделі процесу подачі клінкеру як об'єкта керування. 3. Синтез структури автоматизованої системи керування подачею клінкеру. 4. Модернізація сак шляхом впровадження інтелектуальних технологій керування. Загальні висновки. Перелік посилань на джерела.

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

1. БР.АКТ-73.00.00.001 – Структурна схема моделі вагового дозатора та її передавальна Функція. 2. БР.АКТ-73.00.00.002 – Перехідні характеристики та графік зміни похибки апроксимації. 3. БР.АКТ-73.00.00.003 – Частотні характеристики

4. БР.АКТ-73.00.00.004 – Параметри налаштування з ПІД- регулятором.

5. БР.АКТ-73.00.00.005 – Перехідна характеристика АСК подачею клінкеру.

6. БР.АКТ-73.00.00.006 – Нечіткий регулятор налаштування коефіцієнтів.

7. БР.АКТ-73.00.00.007 – Simulink-схема системи керування подачею клінкеру до і після оптимізації.

6. Консультанти розділів роботи

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

7. Дата видачі завдання 06.11.2025

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів бакалаврської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз технологічного процесу подачі клінкеру як об'єкта автоматичного керування	13.04.2026	
2	Дослідження математичної моделі процесу подачі клінкеру як об'єкта керування	03.05.2026	
3	Синтез структури автоматизованої системи керування подачею клінкеру	30.05.2026	
4	Модернізація сак шляхом впровадження інтелектуальних технологій керування	05.06.2026	
5	Оформлення бакалаврської роботи	10.06.2026	

Студент _____
(підпис)

І. Р. Кіліштоф
(ініціали та прізвище)

Керівник роботи _____
(підпис)

Г. Г. Зварич
(ініціали та прізвище)

АНОТАЦІЯ

Бакалаврська робота містить: 55 сторінки, 27 рисунків, 63 таблиця, 98 джерел.

Тема: «Синтез системи автоматичного керування подачею клінкеру в цементний млин на засадах Fuzzy Logic».

Метою роботи є розробка і дослідження математичної моделі процесу подачі клінкеру в цементний млин та удосконалення системи автоматичного керування.

Об'єктом дослідження є процес подачі клінкеру до цементного млина за допомогою вагового дозатора.

Цемент використовується як основний в'язучий матеріал у виробництві бетону, залізобетону і шлакоблоків. Клінкер – спечена суміш вапняку та глини, що є основною складовою для виробництва цементу. Синтез і аналіз автоматизованої системи управління подачею клінкеру в цементний млин на засадах інтелектуальних технологій дозволяє покращити роботу та підвищити точність системи подачі клінкеру.

Побудова експериментальної моделі вагового дозатора та підбір регулятора з розрахунком оптимальних параметрів його налаштування, дозволить підвищити точність та швидкодію системи подачі клінкеру, а отже і якість цементу.

Синтез бази правил системи автоматичного керування подачі клінкеру за допомогою Fuzzy Logic Designer дозволяє швидко змоделювати систему подачі клінкеру та провести порівняльний аналіз із заданим ступенем точності: оперуючи принципами поведінки системи, описаними Fuzzy-методами.

Ключові слова: виробництво цементу, подача клінкеру, критерій стійкості, моделювання, інтелектуальних технологій, структурна схема, функція передачі.

ANNOTATION

Bachelor's thesis contains: 55 pages, 27 figures, 6 tables, 9 sources.

Topic: "Synthesis of an automated control system for clinker feeding into a cement mill based on Fuzzy Logic".

The aim of the work is to develop and study a mathematical model of the clinker feeding process into a cement mill and improve the automatic control system.

The object of the study is the process of feeding clinker to a cement mill using a weighing feeder.

Cement is used as the main binding material in the production of concrete, reinforced concrete and cinder blocks. Clinker is a sintered mixture of limestone and clay, which is the main component for the production of cement. The synthesis and analysis of an automated control system for clinker feeding into a cement mill based on intelligent technologies allows to improve the operation and increase the accuracy of the clinker feeding system.

The construction of an experimental model of a weighing batcher and the selection of a regulator with the calculation of the optimal parameters of its setting will allow to increase the accuracy and speed of the clinker feeding system, and therefore the quality of cement.

Synthesis of the rule base of the automatic control system for clinker feeding using Fuzzy Logic Designer allows you to quickly model the clinker feeding system and conduct a comparative analysis with a given degree of accuracy: operating on the principles of system behavior described by Fuzzy methods.

Keywords: cement production, clinker feeding, stability criterion, modeling, intelligent technologies, structural diagram, transfer function.

ЗМІСТ

ВСТУП	7
1 АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ПОДАЧІ КЛІНКЕРУ ЯК ОБ’ЄКТА АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ	8
1.1 Особливості технологічного процесу та характеристика сировини	8
1.2 Розгляд параметрів які впливають на технологічний процес подачі клінкеру	12
Висновок до розділу.....	14
2 ДОСЛІДЖЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ПРОЦЕСУ ПОДАЧІ КЛІНКЕРУ ЯК ОБ’ЄКТА КЕРУВАННЯ	15
2.1 Побудова експериментальної моделі вагового дозатора	15
2.2.1 Дослідження АФХ і АЧХ об’єкта керування.....	20
2.2 Вибір типу регулятора та його параметри налаштування.....	22
Висновки до розділу.....	25
3 СИНТЕЗ СТРУКТУРИ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПОДАЧЕЮ КЛІНКЕРУ	27
3.1 Структурна схема автоматизованої системи керування подачею клінкеру.....	27
3.2 Розрахунок автоматизованої системи керування подачею клінкеру.....	30
3.3 Вибір технічних засобів автоматизації.....	33
Висновки до розділу.....	37

					БР.АКП-73.00.00.000 ПЗ			
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Кілішгоф І. Р.			Синтез системи автоматичного керування подачею клінкеру в цементний млин на засадах Fuzzy Logic	Літ.	Арк.	Акрушів
Перевір.		Зварич Г.Г.				7	79	
Реценз.		Фешанич Л.І.				ІФНТУНГ АКП-22-1		
Н. Контр.		Кучмистенко О.В.						
Затверд.		Лагойда А.І.						

4 МОДЕРНІЗАЦІЯ САК ШЛЯХОМ ВПРОВАДЖЕННЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ ТЕХНОЛОГІЙ КЕРУВАННЯ.....	37
4.1 Дослідження функціональної структури ПІ-регулятора на засадах Fuzzy Logic.....	37
4.2 Синтез нечіткого ПІ-регулятора для САК подачі клінкеру	39
4.3 Застосування нечіткої логіки для налаштування коефіцієнтів ПІД-регулятора	47
4.4 Пошук параметрів ПІД-регулятора методами оптимізації.....	51
Висновки до розділу.....	49
ВИСНОВОК	54
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ НА ДЖЕРЕЛА.....	55
ДОДАТКИ.....	56

					БР.АКП-73.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		7

ВСТУП

Актуальність теми бакалаврської роботи. У сучасних умовах розвитку промисловості автоматизація технологічних процесів відіграє ключову роль у забезпеченні ефективності виробництва. Підприємства цементної, нафто-газової та інших галузей функціонують на основі складних технологічних систем, які характеризуються високою продуктивністю, значними габаритами та складністю протікання фізико-хімічних процесів.

У промислових технологічних процесах автоматичне керування є ключовим інструментом забезпечення стабільної роботи обладнання та якості продукції. Це сприяє переходу від централізованих систем до розподілених структур керування, що дозволяє підвищити гнучкість, масштабованість та ефективність виробничих процесів. Особливого значення набуває вдосконалення систем керування подачею сировини, зокрема клінкеру в цементний млин. Від точності дозування та стабільності подачі безпосередньо залежить якість кінцевого продукту, енергоефективність процесу та загальні техніко-економічні показники виробництва. Саме тому задача автоматизації цього процесу є актуальною як з наукової, так і з практичної точки зору.

Метою даної роботи є розробка та дослідження математичної моделі процесу подачі клінкеру в цементний млин, а також удосконалення системи автоматичного керування на основі сучасних підходів.

Об'єктом дослідження є технологічний процес подачі клінкеру в цементний млин.

Предметом дослідження виступає система автоматичного керування ваговим дозатором, яка реалізується із застосуванням методів Fuzzy Logic.

Методи дослідження: Для досягнення поставленої мети використано такі методи дослідження: аналіз існуючих технологічних рішень, методи теорії автоматичного керування для синтезу регуляторів, а також апарат нечітких множин для побудови інтелектуальних систем керування.

					БР. АКП – 73.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		7

1 АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ПОДАЧІ КЛІНКЕРУ ЯК ОБ'ЄКТА АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ

1.1 Особливості технологічного процесу та характеристика сировини

Процес подачі клінкеру є важливою складовою технологічного циклу виробництва цементу, оскільки саме на цьому етапі забезпечується рівномірне транспортування матеріалу до подальших стадій обробки. Клінкер — це напівфабрикат, основа цементу. Найбільш енергоємна стадія — випал у печі. Якість цементу визначається: складом клінкеру; тонкістю помолу. Сучасні заводи використовують сухий спосіб (енергоефективніший) Стабільність подачі безпосередньо впливає на ефективність роботи обладнання та якість кінцевого продукту [1÷4].

Клінкер є гранульованим матеріалом, що утворюється в результаті випалу сировинної суміші у печах. Його фізичні властивості можуть змінюватися залежно від умов виробництва, що ускладнює процес дозування та транспортування. Зокрема, важливими характеристиками є фракційний склад, вологість, насипна густина та абразивність (рис. 1.1).

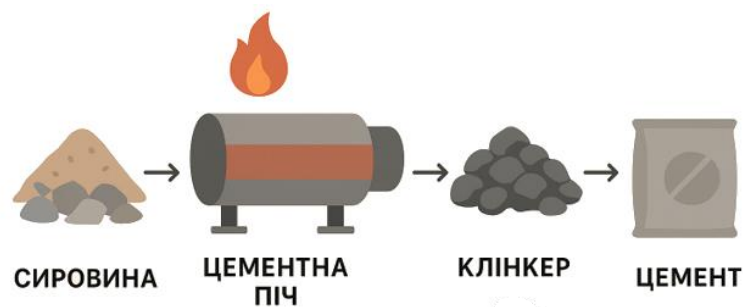


Рисунок 1.1 – Схема отримання цементу через стадію клінкеру

Подача клінкеру зазвичай здійснюється за допомогою стрічкових транспортерів або вагових дозаторів, які забезпечують безперервне переміщення матеріалу. У процесі транспортування виникають фактори, що впливають на точність подачі, серед яких нерівномірність потоку, затримки переміщення та зміна навантаження на приводи.

					БР. АКП – 73.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8

Особливістю даного процесу є наявність інерційності, що пов'язана з масою матеріалу та динамікою руху стрічки. Крім того, суттєвий вплив має транспортне запізнення, яке виникає через час проходження клінкеру від точки подачі до місця вимірювання. Це ускладнює оперативне реагування системи керування на зміну умов роботи.

Ще одним важливим фактором є нестабільність параметрів сировини. Зміни у гранулометричному складі або вологості можуть призводити до коливань витрати матеріалу навіть при сталих параметрах приводу. У зв'язку з цим виникає необхідність використання адаптивних методів керування.

Аналіз технологічного процесу показує, що система подачі клінкеру є нелінійною та динамічною, з наявністю зовнішніх збурень і внутрішніх невизначеностей. Це обумовлює складність побудови ефективної системи автоматичного керування на основі класичних підходів.

Для випалу клінкеру використовуємо:

- основне паливо- вугілля, яке попередньо мелеться в вугільному млині.

Для помолу вугілля використовуємо два вугільні млини: Pfeiffer MPS-180 BK і АТОХ. 60% меленого вугілля спалюється в декардонізаторі і 40% в печі;

- альтернативне паливо – шини б/у, торф'яні півбрикети, високовуглецевий твердий залишок, відходи гумових виробів подаються в обертову камеру згорання, де при температурі 800⁰С починається горіння. Продукти згорання при температурі 1000-1600⁰С за допомогою газоходу Ø 2500мм і через заслінку подаються в конус декарбонізатора технологічної лінії.

Рух третинного повітря до обертової камери спалювання і продуктів спалювання від обертової камери спалювання до декарбонізатора відбувається за рахунок негативного тиску, який створює вентилятор технологічної лінії. Процеси спалювання як на печі так і в декарбонізаторі контролюються при допомозі термопар та двох стаціонарних газоаналізаторів і не перевищують допустимих норм. Готовий продукт (клінкер), який виходить із печей, подається в клінкерний склад із якого грейферними кранами або пластинчатими транспортером Aumund та елеватором поступає в бункера цементних млинів. З

					БР. АКП – 73.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		9

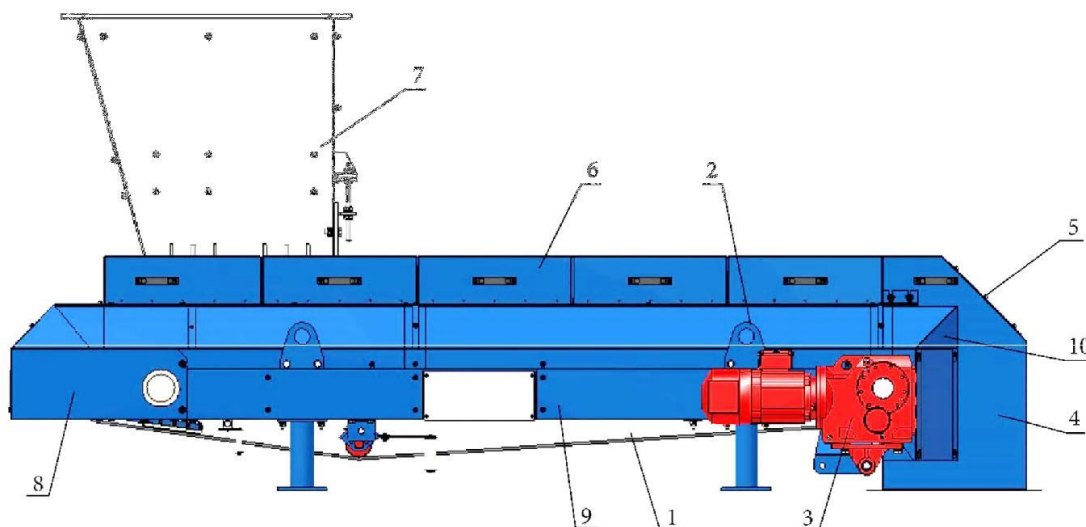
бункера готовий продукт клінкер за допомогою вагового дозатора поступає в цементний млин.

Потім в окремі бункера цементних млинів поступають добавки до ементу, а саме доменний гранульований шлак, цеоліт, зола виносу, сульфат заліза, гіпсовий щебінь. Дозування клінкеру і добавок на кожний млин проходить залежно від типу і марки цементу.

Для помолу клінкеру та випуску цементу використовується 8 цементних кульових млинів: 2 шт- $\varnothing 2,2 \times 13,0$ м; 3 шт – $\varnothing 2,6 \times 13,0$ м; 2 шт – $\varnothing 4,2 \times 13$ м; 1 шт - $\varnothing 3,2 \times 8,5$ м.

Після помолу готовий продукт (цемент) транспортується до силосів зберігання цементу із яких вивантажується для тарування в мішки, палетування в палети або відвантаження насипом в залізничні вагони (хопера) і автотранспортом (цементовозами).

Основними комплектуючими частинами вагового дозатора, який транспортує клінкер в цементний млин є:



1 – стрічковий ваговий транспортер; 2 – вушка для установки дозатора; 3 – привід; 4 – розвантажувальна воронка; 5 – фланець для приєднання зовнішньої аспірації; 6 – верхній кожух, знімний; 7 –завантажувальна воронка; 8 – задній кожух; 9 – бічні кришки; 10 – кожух бічний передній

Рисунок 1.2 – Комплектуючі частини вагового дозатора

					БР. АКП – 73.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

Стрічковий ваговий транспортер є складною електромеханічною системою, яка поєднує: механічні вузли транспортування; вимірювальні пристрої; систему автоматичного керування. Це дозволяє забезпечити точне дозування та стабільну подачу матеріалу. Основними комплектуючими стрічкового вагового транспортера є (рис. 1. 3):

1. Стрічка транспортера: несучий елемент, на якому переміщується матеріал, який виготовляється з гуми або гумотканинних матеріалів.

2. Привідний барабан: передає рух стрічці, який з'єднаний з електродвигуном

3. Натяжний барабан: забезпечує необхідний натяг стрічки та компенсує її подовження.

4. Опорні ролики (роликоопори): підтримують стрічку та формують жолоб для транспортування матеріалу

5. Електропривод: складається з електродвигуна, редуктора, які забезпечують рух стрічки.

6. Частотний перетворювач, який регулює швидкість руху стрічки та дозволяє змінювати продуктивність дозатора.

7. Ваговий пристрій (тензометрична система): основний вимірювальний вузол, який складається з вагового ролика та тензодатчиків, що вимірюють масу матеріалу на стрічці

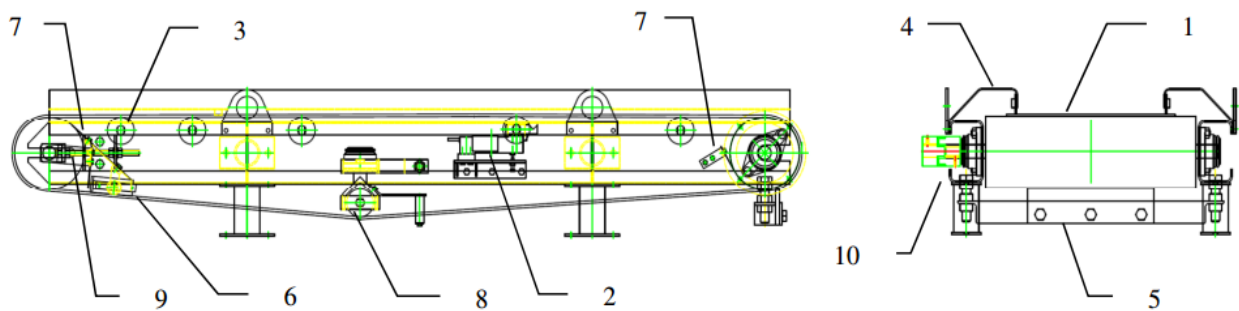
8. Давач швидкості стрічки, який визначає швидкість руху стрічки і використовується для обчислення витрати.

9. Завантажувальний пристрій (бункер) подає матеріал на стрічку та забезпечує рівномірне завантаження

10. Розвантажувальний пристрій, який забезпечує сход матеріалу зі стрічки та направляє його в подальший технологічний процес

11. Система керування: PLC або інший контролер, що обробляє сигнали давачів та формує керуючі дії.

					БР. АКП – 73.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11



: 1 – стрічка транспортера; 2 – основний ваговий міст; 3 – додатковий ваговий міст; 4 – борти; 5 – скребок стрічки передній; 6 – скребок стрічки задній; 7 – шкребки барабанів; 8 – вантажна станція натягу/вирівнювання руху стрічки.

Рисунок 1.3 – Комплектуючі стрічкового вагового транспортера

1.2 Розгляд параметрів які впливають на технологічний процес подачі клінкеру

Ваговий стрічковий дозатор призначений для безперервного дозування сипких матеріалів, в нашому випадку клінкеру із заданою продуктивністю. Стрічка транспортера витягує матеріал з воронки (рис. 1.4). Вертикальний шибер завантажувального воронки формує висоту шару матеріалу на стрічці, забезпечуючи постійне навантаження на стрічку, і налаштовується при введенні в експлуатацію дозатора.



Рисунок 1.4 – Подача матеріалу

					БР. АКП – 73.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

Між завантажувальною і розвантажувальною воронками на транспортері знаходиться основний вимірювальний міст, який визначає поточне навантаження на стрічку. Вимірювальний сигнал і сигнал від давача швидкості стрічки передаються у ваговий контролер, який обчислює поточну продуктивність.

Регулятор вагового контролера регулює швидкість стрічки так, щоб поточна продуктивність була рівна заданій.

В конвеєр вбудована вагова платформа, що складається з двох обмежувальних роликів і одного (або кілька) вагових роликів, встановлених на тензOMETричних давачах ваги. Давачі ваги перетворюють навантаження W від матеріалу в напругу, пропорційне навантаженню, яке подається на прилад WEICONT. Прилад обчислює навантаження матеріалу на давачі W (кг) і погонну навантаження Q (кг/м):

$$Q = W / L_{\text{effe}},$$

де L_{effe} - ефективна довжина вимірювальної платформи, м.

Швидкість стрічки V (м/с) визначається за допомогою давача швидкості. Давач, встановлений в приводі конвеєра або безпосередньо на конвеєрній стрічці, виробляє сигнал у вигляді послідовності імпульсів з частотою, пропорційною швидкості стрічки.

Прилад WEICONT обчислює швидкість стрічки відповідну частоті імпульсів. Виходячи з продуктивності I визначається кількість пропонованого матеріалу Z (т) за одиницю часу.

$$\Delta Z = I * \Delta t ,$$

де ΔZ - збільшення кількості матеріалу за відрізок часу Δt .

На цей процес впливає швидкість подачі клінкера з бункера на ваговий дозатор, згідно з висновками, яких ми досягнули в процесі активного експерименту зі збільшенням швидкості подачі клінкеру, продуктивність дозатора зростає, оскільки спрацьовує давач ваги [3].

					БР. АКП – 73.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

Висновок до розділу

Проаналізовано основні особливості процесу, пов'язані з фізико-механічними характеристиками клінкеру, нерівномірністю його надходження та впливом зовнішніх і внутрішніх збурень на роботу транспортного обладнання.

Визначено, що властивості сировини, зокрема гранулометричний склад, вологість, сипкість та абразивність, суттєво впливають на параметри процесу подачі, продуктивність обладнання та точність регулювання. Аналіз технологічного процесу дозволив встановити основні керовані та збурювальні параметри, а також оцінити вимоги до системи автоматичного керування.

					БР. АКП – 73.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

2 ДОСЛІДЖЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ПРОЦЕСУ ПОДАЧІ КЛІНКЕРУ ЯК ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ

2.1 Побудова експериментальної моделі вагового дозатора

Для синтезу ефективної системи автоматичного керування необхідно попередньо побудувати математичну модель об'єкта, яка адекватно описує його динамічні властивості [1, 2].

Об'єктом дослідження є процес подачі клінкеру до цементного млина за допомогою вагового дозатора. Даний процес характеризується інерційністю, наявністю транспортного запізнення та впливом зовнішніх збурень.

Математичний опис об'єкта базується на аналізі експериментальних даних та подальшій ідентифікації параметрів моделі. У результаті отримано модель у вигляді аперіодичної ланки другого порядку. Найбільш доцільним у даному випадку є комбінований підхід, який поєднує загальну структурну схему моделі, отриману теоретично, з параметрами, визначеними експериментально (рис. 2.1).

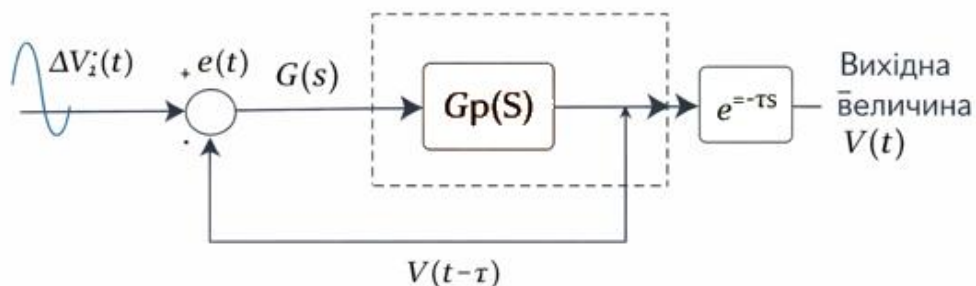


Рисунок 2.1 – Структурна схема моделі вагового дозатора

Експериментальна модель вагового дозатора подачі клінкеру представлена у вигляді структурної схеми із зворотним зв'язком і врахуванням інерційності об'єкта. На вхід системи подається керуючий вплив $\Delta V_i(t)$, який моделює зміну швидкості подачі матеріалу або зміну заданого значення продуктивності. Даний сигнал надходить до суматора, де формується сигнал похибки $e(t)$, що визначається як різниця між вхідним впливом і сигналом зворотного зв'язку.

					БР. АКП – 73.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

Сигнал похибки проходить через динамічну ланку $G(s)$, яка описує попередню обробку або регулюючий вплив на систему [2].

Далі сигнал надходить до основного блоку моделі $G_p(s)$, що відображає динамічні властивості вагового дозатора як об'єкта керування. Блок $G_p(s)$ враховує інерційність процесу транспортування та дозування клінкеру, а також вплив механічних і технологічних факторів. Вихід цього блоку проходить через ланку запізнення $e^{-\tau s}$, яка моделює транспортну затримку матеріалу у системі (час переміщення клінкеру по стрічці). На виході формується сигнал $V(t)$, який відповідає фактичній продуктивності або швидкості подачі клінкеру.

Для підвищення точності моделі використовується зворотний зв'язок: вихідний сигнал із затримкою $V(t-\tau)$ повертається на вхід суматора. Це дозволяє врахувати реальні умови роботи системи, де поточний стан залежить від попередніх значень.

2.2 Визначення функції передачі об'єкту керування

Передавальна функція експериментальної моделі в иглядає так [5]:

$$W(s) = G(s) * G_p(s) * e^{-\tau s},$$

де $G_p(s)$ – динамічна ланка об'єкта; $G(s)$ – додаткова ланка; $e^{-\tau s}$ – запізнення.

Тоді повна модель із врахуванням запізнення має вигляд:

$$W(p) = \frac{K}{(0,236s^2 + 1)(1.115s + 1)} e^{-\tau s}$$

де K – коефіцієнт підсилення (зазвичай ≈ 1 , якщо не задано); τ — час запізнення.

Таким чином, побудована експериментальна модель дозволяє адекватно описати процес подачі клінкеру з урахуванням його динамічних характеристик та транспортного запізнення, що є необхідним для подальшого синтезу ефективної системи автоматичного керування.

					БР. АКП – 73.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

До основних властивостей якими володіють передавальні функції автоматичних систем і їх елементів відносять [5]:

- встановлення зв'язку між вхідною і вихідною величиною як в динамічному, так і в статичному режимах;
- функція передачі являє собою правильний раціональний дріб, в якому степінь полінома, що знаходиться в чисельнику, менший або дорівнює степеню полінома знаменника $m \leq n$. Всі коефіцієнти передавальної функції – дійсні числа, що характеризують параметри елемента.
- функція передачі є функцією комплексної змінної $p = \alpha + i\beta$, яка може при деяких значеннях змінної p перетворюватись в нуль або нескінченність [1, 2].

Для отримання перехідної характеристики ми спершу збільшили швидкість подачі клінкеру, а потім спостерігали її стабілізацію внаслідок чого змінювалась наша продуктивність. Нижче наведено дані активного експерименту у середовищі Matlab [7]:

Знаходження передавальної функції за результатами активного експеримента на об'єкті.

$T1 :=$	0	$X :=$	0
	0.25		7
	0.4		14
	0.56		24
	0.75		33
	1		42
	1.25		53
	1.5		57
	1.75		62
	1.9		64
	2		65
	2.1		67
	2.25		69
	2.5		71
	2.75		74
	3		75
	3.25		76
	3.5		76
	4		77

Структура об'єкта:
Структура об'єкта:

$$Y := \frac{(X - 0)}{77}$$

	0
0	0
1	0.091
2	0.182
3	0.312
4	0.429
5	0.545
6	0.688
7	0.74
8	0.805
9	0.831
10	0.844
11	0.87
12	0.896
13	0.922
14	0.961
15	0.974
16	0.987
17	0.987
18	1

Y =

Структура нашої математичної моделі матиме вигляд [5]:

$$n := 1$$

$$W(p, T01, T02) := \frac{1}{(T01 \cdot p + 1)^n \cdot (T02 \cdot p + 1)}$$

Обробка експериментальних даних

$$k1 := \text{rows}(Y) \quad k1 = 19 \quad tk := T1_{k1-1}$$

$$S := \text{cspline}(T1, Y)$$

$$h(t) := \text{interp}(S, T1, Y, t)$$

Знаходження оригіналу від передавальної функції об'єкта

$X(p) := \frac{1}{P}$ - зображення за Лапласом вхідної величини. Тоді вихід об'єкта P можна представити у такий спосіб:

$$Y(p, T01, T02) := W(p, T01, T02) \cdot X(p)$$

$$H(t, T01, T02) := Y(p, T01, T02) \left| \begin{array}{l} \text{invlaplace, } p \\ \text{simplify} \\ \text{float, } 3 \end{array} \right. \rightarrow \frac{T01 + -1.0 \cdot T02 + -1.0 \cdot T01 \cdot e^{-\frac{1.0 \cdot t}{T01}} + T02 \cdot e^{-\frac{1.0 \cdot t}{T02}}}{T01 + -1.0 \cdot T02}$$

Знаходження інтегрального середньоквадратичного відхилення від експериментальних даних

$$s1(T01, T02) := \int_0^{tk} (H(t, T01, T02) - h(t))^2 dt$$

Розв'язок задачі параметричної оптимізації

$$T01 := 10 \quad T02 := 40$$

Given

$$T01 > 0 \quad T02 \geq 0$$

$$\begin{pmatrix} T01 \\ T02 \end{pmatrix} := \text{Minimize}(s1, T01, T02)$$

Оптимальні параметри моделі

$$T01 = 0.831 \quad T02 = 0.284 \quad n = 1$$

$$t := 0, 0.1..4$$

$$\Delta(t) := \frac{(H(t, T01, T02) - h(t)) \cdot 100}{h(tk)}$$

На рис. 2.2 наведено апроксимацію перехідної характеристики. Для інерційного об'єкта (як дозатор): $W(s) = \frac{R}{Ts+1} e^{-\tau s}$, де K – коефіцієнт підсилення; T – стала часу; τ – запізнення [5].

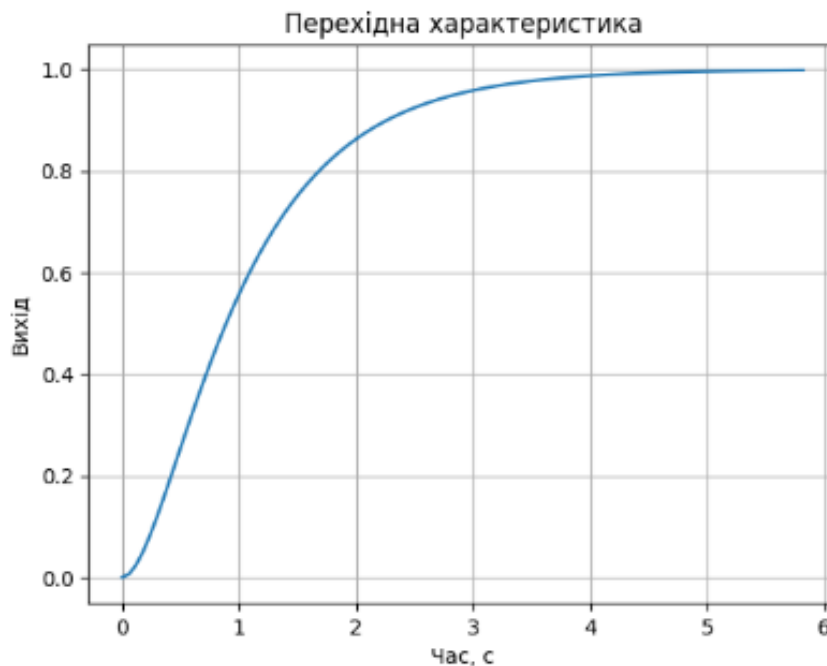


Рисунок 2.2 – Апроксимація перехідної характеристики

					БР. АКП – 73.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

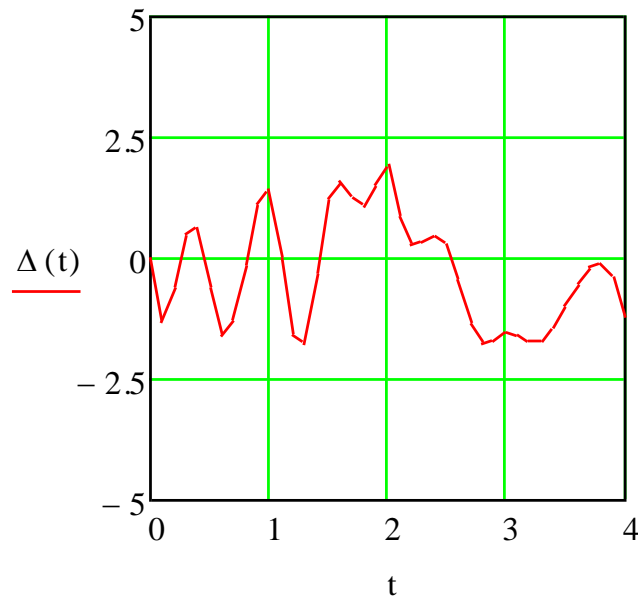


Рисунок 2.3 – Графік зміни похибки апроксимації перехідної характеристики

Отже, передавальну функцію нашого об'єкта (дозатора) керування запишемо у вигляді [5]:

$$W(p) = \frac{1}{(0,831p + 1)(0,284p + 1)}$$

2.2.1 Дослідження АФХ і АЧХ об'єкта керування

Частотні характеристики описують передавальні властивості елементів і систем в режимі встановлених гармонічних коливань, викликаних зовнішніми гармонічними діями. Знаючи частотну характеристику елемента, можна визначити його реакцію на гармонічну дію будь-якої частоти, а також на суму гармонічних дій різної частоти. Позитивною властивістю частотних характеристик є те, що вони можуть бути безпосередньо визначені експериментальним шляхом [6].

>> b = 1;

>> a = [0.236004 1.115 1];

>> w = 0.1:0.001:10^3;

					БР. АКП – 73.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

```
>> h = freqs(b,a,w);
```

```
>> semilogx(w,20*log10(abs(h)))
```

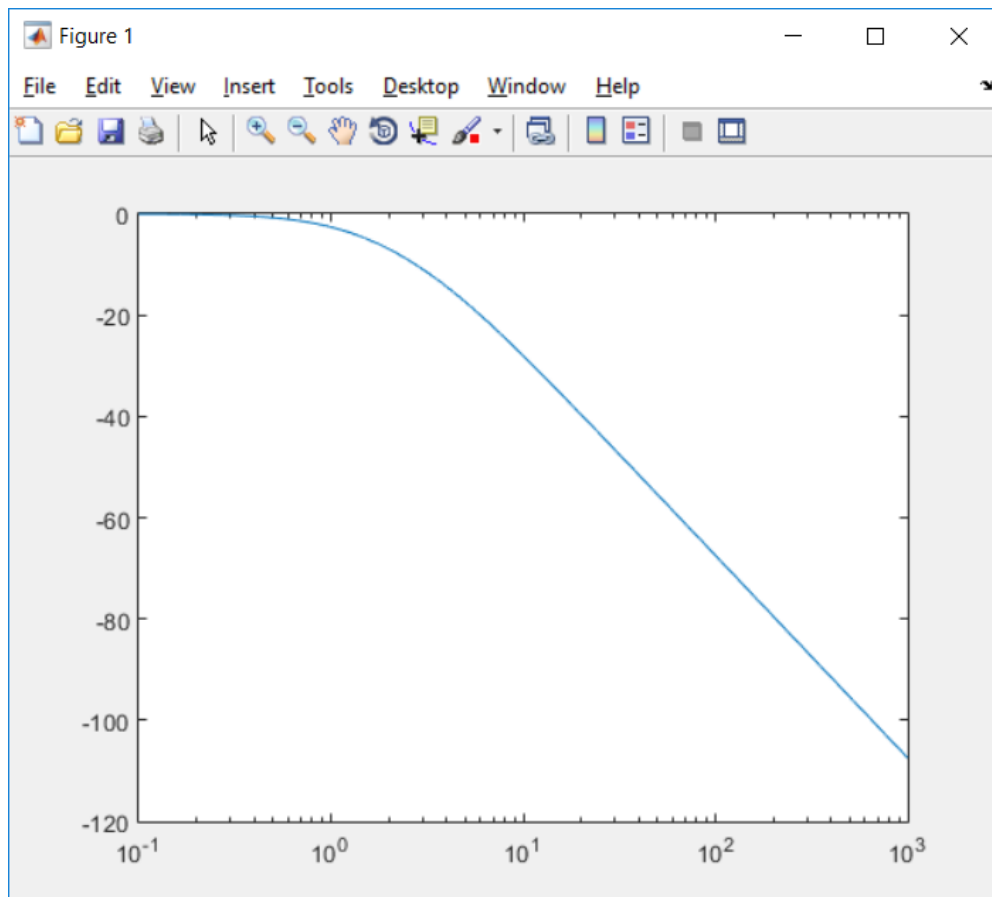


Рисунок 2.4 – Амплітудно-частотна характеристика ОК

```
>> w=tf([1],[0.236004 1.115 1])
```

w =

1

0.236 s² + 1.115 s + 1

Continuous-time transfer function.

```
>> nyquist(w); grid on;
```

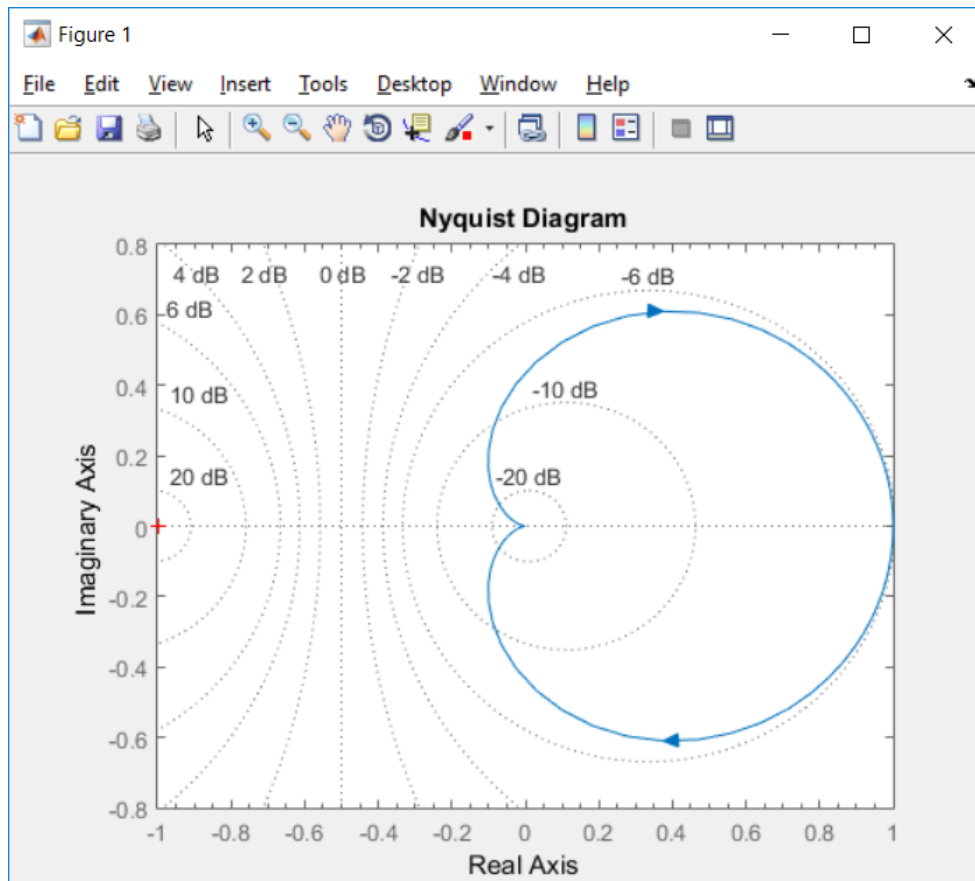


Рисунок 2.5 – Амплітудно-фазова характеристика ОК

За результатами моделювання отримано перехідну характеристику об'єкта керування, яка свідчить про аперіодичний характер процесу та відсутність коливань. Час встановлення становить приблизно 3–4 секунди, що відповідає вимогам до швидкодії системи. Амплітудно-частотна характеристика показує, що об'єкт має властивості фільтра низьких частот: при зростанні частоти амплітуда сигналу зменшується. Це підтверджує здатність системи пригнічувати високочастотні збурення [6,5].

2.2 Вибір типу регулятора та його параметри налаштування

За законом регулювання регулятори діляться на типові інтегральні, пропорційні, пропорційно-диференціальні, пропорційно-інтегральні, і пропорційно-інтегрально-диференціальні регулятори - скорочено І, П, ПД, ПІ і ПІД – регулятори [4].

					БР. АКП – 73.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

Тип регулятора і найкращі значення його параметрів налаштування вибираються виходячи з властивостей об'єкта, характеру і величини збурюючої дії і вимог до статичних і динамічних властивостей АСР. Для формування загальних принципів регулятора і визначення його параметрів налаштування доцільно звести до мінімуму число величин, від яких залежить вирішення цієї задачі [4].

Для того щоб вибрати тип регулятора і визначити його налагодження необхідно знати:

- Статичні і динамічні характеристики об'єкта керування.
- Вимоги до якості процесу регулювання.
- Показники якості регулювання для серійних регуляторів.
- Характер збурень, які діють на процес регулювання.

Задача інженера з автоматизації полягає у виборі такого типу регулятора, який при мінімальній вартості і максимальній надійності забезпечував би задану якість регулювання [4].

Параметри налаштування для заданого об'єкта знаходимо за методом параметричної оптимізації використовуючи програмний продукт Matlab [7].

Передавальна функція регулятора запишеться у вигляді:

$$W(s) = \frac{(0.831s + 1)(0.284s + 1)}{1} = \frac{T^2 s^2 + Ts + 1}{1}$$

Застосовуємо ПІД- регулятор (рис. 2.6) [4].

					БР. АКП – 73.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

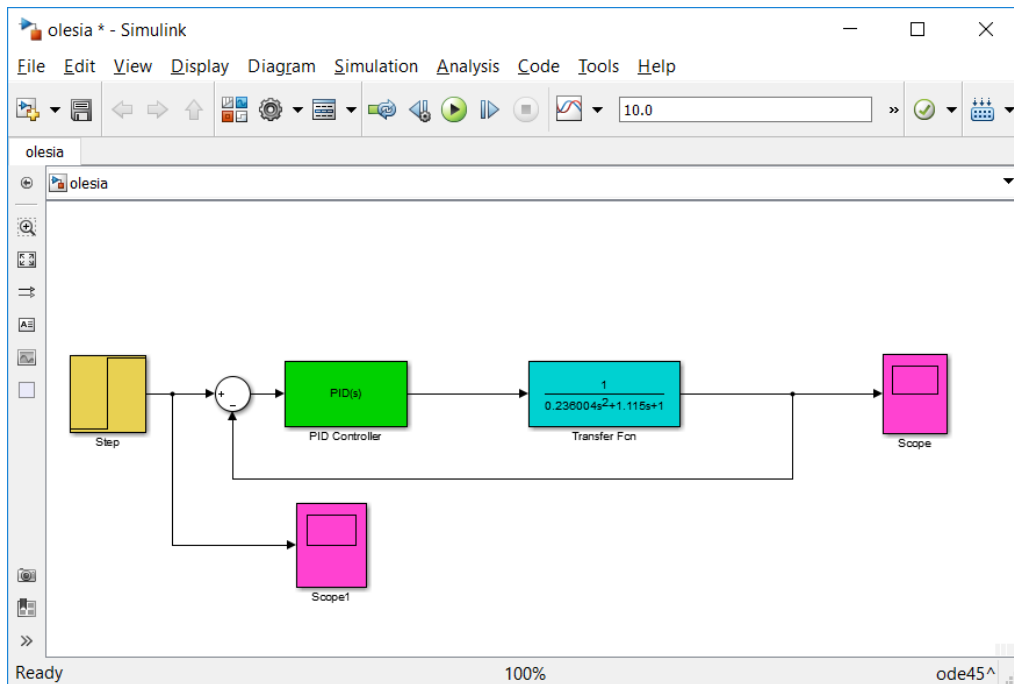


Рисунок 2.6 – Структурна схема САК

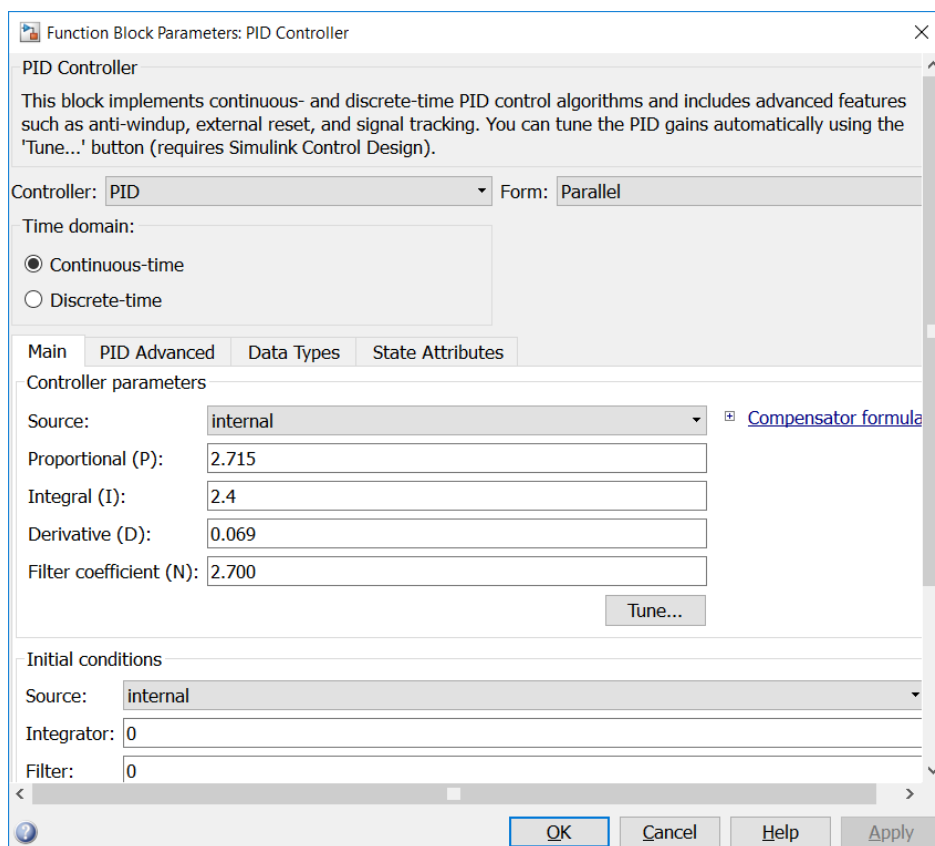


Рисунок 2.7 – Параметри налаштування ПД-регулятора [4]

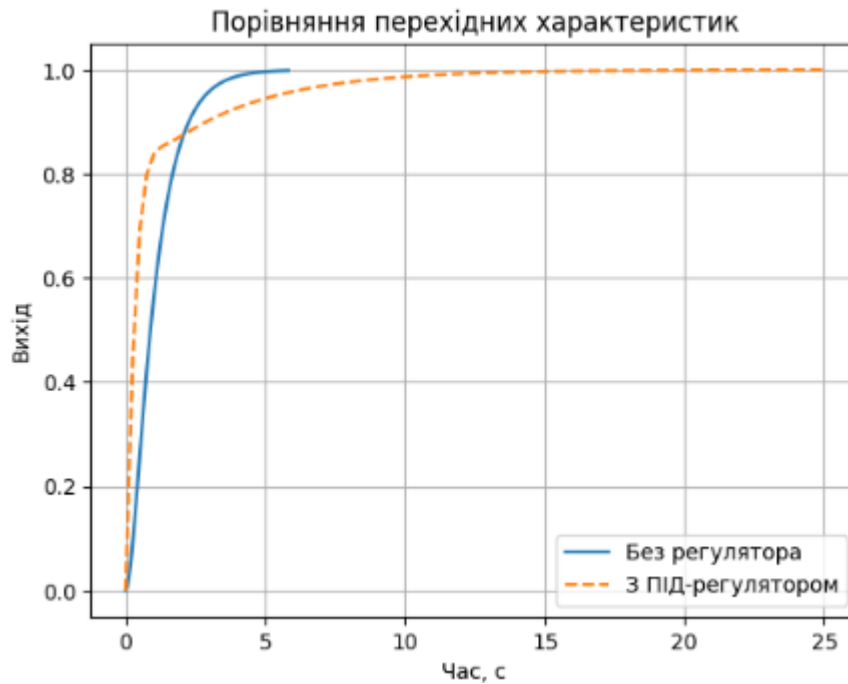


Рисунок 2.8 – Перехідний процес в системі керування з ПІД- регулятором

З отриманого графіка видно, що використання ПІД-регулятора суттєво впливає на якість перехідного процесу. Система без регулятора має повільнішу реакцію та більший час встановлення. Після введення ПІД-регулятора спостерігається: більш швидке реагування системи на вхідний вплив; зменшення часу встановлення; покращення точності досягнення усталеного значення.

Тому, передавальна функція регулятора така:

$$W_s(s) = \frac{(c_2 s^2 + c_1 s + c_0)}{s} = \frac{0.069s^2 + 1.718s + 2.436}{s}$$

Таким чином, застосування ПІД-регулятора дозволяє підвищити швидкодію та якість регулювання процесу подачі клінкеру.

Висновок до розділу

Побудовано експериментальну модель вагового дозатора подачі клінкеру, що дозволило використати її для дослідження часових і частотних характеристик об'єкта керування, та побудувати перехідну характеристику об'єкта.

					БР. АКП – 73.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25

Визначено функцію передачі об'єкта керування, що дозволило визначити його амплітудно-частотну та амплітудно-фазову характеристику.

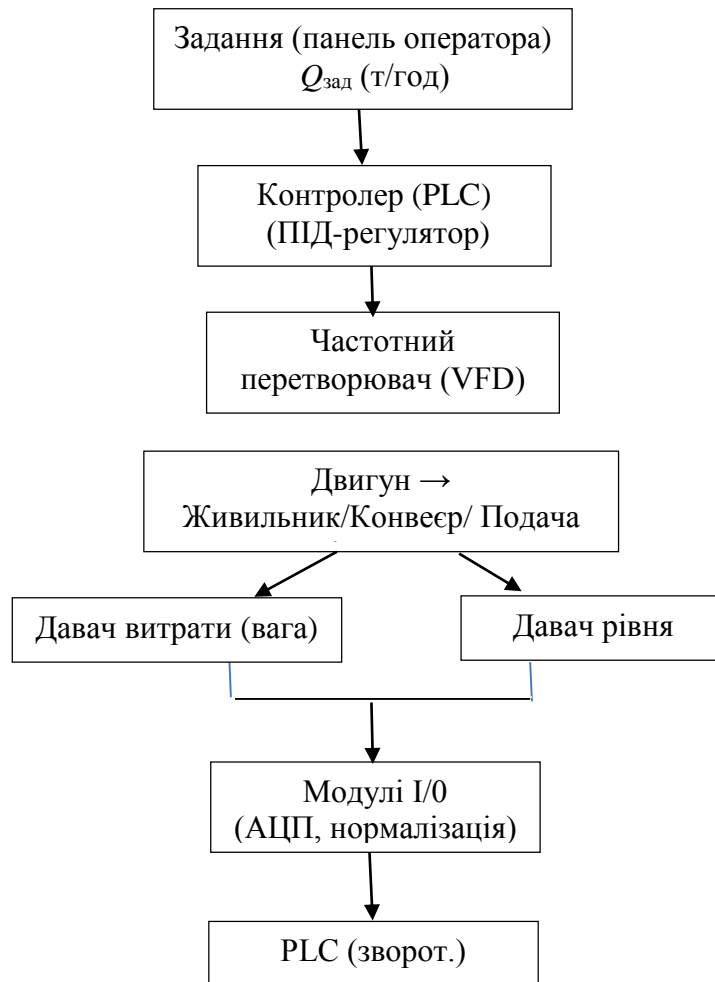
Вибрано тип регулятора для досліджуваного об'єкта (ПД- регулятор), що дозволило синтезувати алгоритмічну структуру системи керування і дослідити її властивості в Simulink.

					БР. АКП – 73.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

3 СИНТЕЗ СТРУКТУРИ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПОДАЧЕЮ КЛІНКЕРУ

3.1 Структурна схема автоматизованої системи керування подачею клінкеру

Структурна схема автоматизованої системи керування подачею клінкеру (наприклад, у цементному виробництві) зазвичай включає основні функціональні блоки, які забезпечують вимірювання, обробку сигналів і керування виконавчими механізмами (рис. 3.1) [6].



: $Q_{\text{зад}}$ – задана продуктивність подачі клінкеру; $Q_{\text{ф}}$ – фактична продуктивність подачі клінкеру

Рисунок 3.1 – Блок-схема автоматизованої системи керування подачею
клінкеру

					БР. АКП – 73.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27

У верхній частині блок-схеми знаходиться блок задання, який реалізується через панель оператора (НМІ). Оператор задає необхідну продуктивність подачі клінкеру $Q_{\text{зад}}$ (т/год). Сигнал завдання надходить до програмованого логічного контролера (PLC), де виконується порівняння заданого значення $Q_{\text{зад}}$ з фактичним $Q_{\text{ф}}$; реалізується алгоритм керування (найчастіше ПІД-регулятор); формується керуючий сигнал. Далі сигнал передається на електродвигун, який приводить у рух живильник або конвеєр. Цей блок є виконавчим механізмом, що безпосередньо здійснює подачу клінкеру. Живильник або конвеєр забезпечує фактичну подачу клінкеру з витратою $Q_{\text{ф}}$. Для контролю параметрів використовуються давач витрати (ваговий або тензодатчик) вимірює фактичну продуктивність; давач рівня контролює наявність матеріалу в бункері. Сигнали з датчиків надходять до модулів вводу (I/O), де виконуються перетворення (аналог–цифра); сигнали нормалізуються для обробки контролером. Оброблені дані передаються назад до PLC, утворюючи замкнену систему керування. Контролер постійно порівнює $Q_{\text{зад}}$ з фактичним $Q_{\text{ф}}$ та автоматично коригує швидкість подачі.

Система працює за принципом замкненого регулювання: оператор задає необхідну продуктивність; контролер формує керуючий вплив; через перетворювач змінюється швидкість двигуна; живильник подає клінкер; давачі вимірюють фактичні параметри.

Система регулювання стрічкового дозатора призначена для безперервного та рівномірного витягу сипкого матеріалу (клінкеру) з бункера і подачі його з заданою продуктивністю. Основна задача системи – підтримання витрати матеріалу на заданому рівні незалежно від: зміни властивостей матеріалу; нерівномірного заповнення бункера; зовнішніх збурень.

Стрічковий дозатор встановлюється безпосередньо під бункером з матеріалом (рис.3.2). Наддозаторна воронка формує шар матеріалу, і забезпечує рівномірне витікання матеріалу з бункера. Стрічка дозатора витягує матеріал, який зважується на вагову платформу. У гравіметричному режимі сигнал різниці між виміряною фактичною продуктивністю (I) і заданою (P) подається на

					БР. АКП – 73.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

регулятор R, керуючий сигнал Y з якого змінює швидкість стрічки до тих пір, поки значення фактичної продуктивності не стане рівне заданій [2, 4].

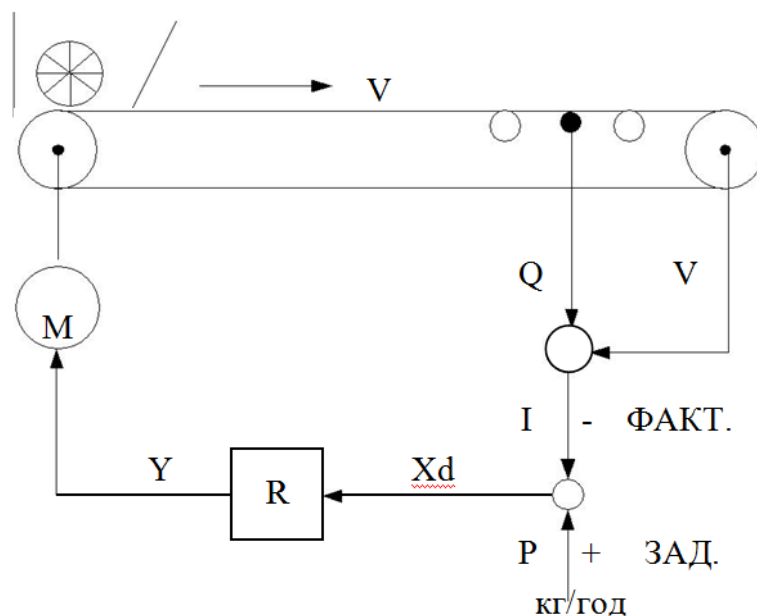


Рисунок 3.2 – Система регулювання стрічкового дозатора: витяг матеріалу з бункера

Система працює за принципом замкнутого автоматичного регулювання:

- оператор задає необхідну витрату матеріалу $Q_{\text{зад}}$;
- контролер отримує сигнал і порівнює його з фактичним значенням $Q_{\text{ф}}$;
- визначається похибка регулювання:

$$\varepsilon = Q_{\text{зад}} - Q_{\text{ф}},$$

де $Q_{\text{зад}}$ – задана продуктивність подачі клінкеру; $Q_{\text{ф}}$ – фактична продуктивність подачі клінкеру.

На основі похибки ПІД-регулятор формує керуючий сигнал [5]:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt},$$

де $u(t)$ – керуючий сигнал; $e(t)$ – похибка; K_p , K_i , K_d – коефіцієнти регулятора/

Отож, система регулювання стрічкового дозатора забезпечує автоматичне підтримання заданої витрати матеріалу шляхом зміни швидкості стрічки на основі зворотного зв'язку, що робить процес подачі клінкеру стабільним і керованим.

3.2 Розрахунок автоматизованої системи керування подачею клінкеру

Для розрахунку параметрів налагодження АСР, а також аналізу стійкості, синтезу коригуючих пристроїв і побудови перехідних процесів, необхідно чітко й правильно складати рівняння розімкнутих та замкнених систем за всіма каналами впливу [1-5].

На рис. 3.2 зображена АСР подачею клінкеру, в якій є три входи: зміна завдання q (керуючий вплив), внутрішнє збурення $z_{\text{вн}}$, яке надходить через регулюючий орган, внутрішній збурюючий чинник $z_{\text{зн}}$, що формується від навантаження, а також два виходи: значення регульованої координати x і регулююча дія U_p . В даній одноконтурній АСР є три передавальні функції [5]:

- за зовнішнім збуренням $W_{3.c}^{z_{\text{зн}}}(p) = \frac{x(p)}{z_{\text{зн}}(p)}$,

- за внутрішнім збуренням $W_{3.c}^{z_{\text{вн}}}(p) = \frac{x(p)}{z_{\text{вн}}(p)}$,

- за керуючою дією $W_{3.c}^q(p) = \frac{x(p)}{q(p)}$.

Для одноконтурних систем автоматичного регулювання передавальна функція і амплітудно – фазова характеристика розімкнутої системи виражається однозначно через добуток передавальних функцій, або амплітудно – фазових характеристики регулятора і об'єкта регулювання за каналом регулюючої дії і не залежить від передавальної функції об'єкта регулювання за каналом збурюючої дії [2, 5].

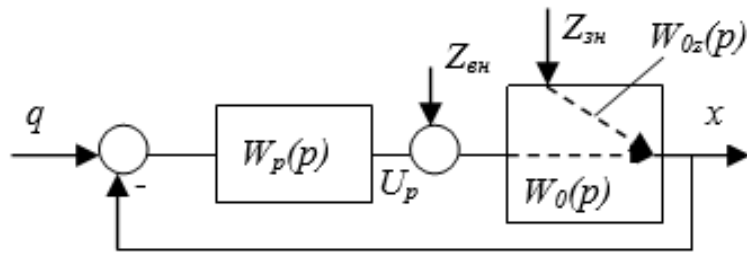


Рисунок 3.2 – Алгоритмічна структура регулювання [5]

Приводимо основні залежності для АСР подачі клінкеру.

Передавальна функція розімкнутої системи:

$$W_{p.c}(p) = W_0(p)W_p(p) = \frac{1}{(0.831p + 1)(0.284p + 1)} \frac{0.069p^2 + 1.718p + 2.436}{p} \quad (3.1)$$

Передавальна функція замкнутої системи за керуючою дією:

$$(3.2)$$

та передавальна функція характеристичного полінома:

$$(3.3)$$

$$W_{x.n}(p) = 1 + W_{p.c}(p).$$

Амплітудно-фазова

характеристика замкнутої системи за керуючою дією:

$$W_{z.c}^q(i\omega) = \frac{A_{p.c}(\omega)}{A_{x.n}(\omega)} e^{-i[\varphi_{p.c}(\omega) - \varphi_{x.n}(\omega)]}. \quad (3.4)$$

Передавальна функція замкнутої системи за дією внутрішнього збурення:

$$W_{z.c}^{z_{вн}}(p) = \frac{W_0(p)}{W_{x.n}(p)} = \frac{1}{1 + \left(\frac{1}{(0.831p + 1)(0.284p + 1)} \frac{0.069p^2 + 1.718p + 2.436}{p} \right)}. \quad (3.5)$$

Амплітудно-фазова характеристика замкнутої системи за цим каналом:

$$W_{z.c}^{z_{вн}}(i\omega) = \frac{A_0(\omega)}{A_{x.n}(\omega)} e^{-i[\varphi_0(\omega) - \varphi_{x.n}(\omega)]}. \quad (3.6)$$

Передавальна функція замкнутої системи за дією зовнішнього збурення:

					БР. АКП – 73.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

$$W_{3.C}^{z_{3H}}(p) = \frac{W_{0z}(p)}{W_{x.n}(p)}, \quad (3.7)$$

а амплітудно – фазова характеристика відповідно рівна:

$$W_{3.C}^{z_{3H}}(i\omega) = \frac{A_{0z}(\omega)}{A_{x.n}(\omega)} e^{-i[\varphi_{0z}(\omega) - \varphi_{x.n}(\omega)]}. \quad (3.8)$$

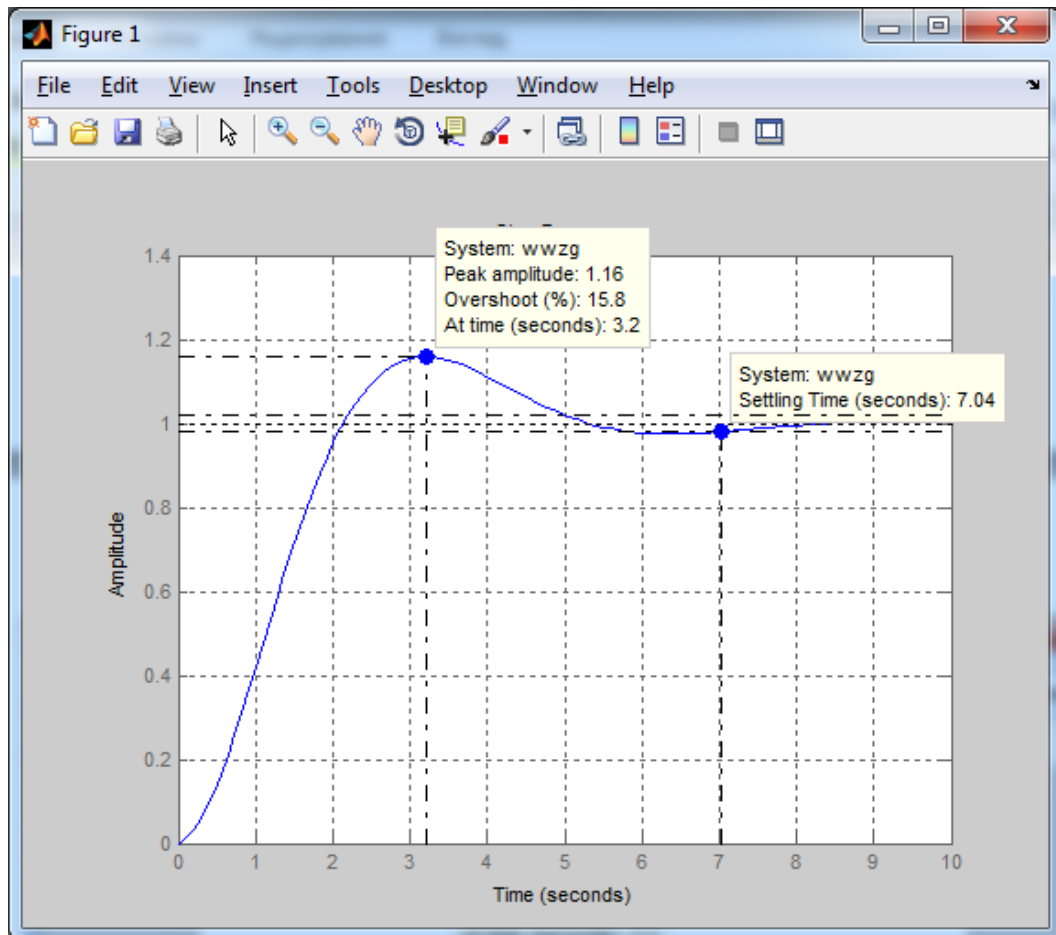


Рисунок 3.3 – Перехідна характеристика АСК подачею клінкеру

З отриманого графіку визначаємо такі параметри якості:

– перерегулюванням є максимальним відхиленням регульованої величини від встановленого значення $\tau=15\%$;

Максимальне значення в точці 1,16 .

– час регулювання визначається тривалістю перехідного процесу , головна характеристика швидкодії системи $t_p= 3,2$ с.

					БР. АКП – 73.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

Так як час регулювання характеризує швидкодію системи, то його стараються звести до мінімуму.

3.3 Вибір технічних засобів систем автоматизації

При виборі технічних засобів автоматизації необхідно керуватись наступними основними принципами [3]:

- надійність засобів автоматизації;
- простота в обслуговуванні;
- підтримка різних протоколів передачі даних;
- набір виконуваних функцій.

Оскільки на установці контролюється та регулюється ряд однотипних параметрів технологічного процесу, то в систему ТЗА входять однакові автоматичні пристрої, що значно полегшує їх використання та експлуатацію, налаштування та ремонт [3].

Таблиця 4.2 – Комплектність вагового дозатора [3]

№	Назва	К-сть	Примітка
1	2	3	4
Механічна частина			
1.	Механічна частина безперервного стрічкового дозатора WEITEQ WBF - M1225 , включаючи :	1 шт.	
	- Датчик ваги тензорезисторний PWSEC3 / 100кг		HBM
	- Мотор-редуктор KA77/T DRS1000M4/TF	1 шт.	SEW- EURODRIVE
	- Клемна коробка	1 шт.	WeiTeq
	- Датчик швидкості	1 шт.	Lika ROTAPULS C80, EI7C
	- Датчик схода ленти KN F2 S11	2 шт.	Lovato

Електрична частина			
2.	Шафа управління РС RACE 0863 800x600x300мм, включаючи:	1 шт.	на 1 дозатор
	- Ваговий контролер WEICONT M	1 шт.	Bulkteq
	- Частотний перетворювач MC07B-0030	2 шт.	SEW- EURODRIVE
	- Блок живлення 100-240VAC/24VDC	2 шт.	
	- Автоматичні вимикачі, реле, лампи, з'єднувальні елементи	1 компл.	
3.	Блок ручного управління AL3616-9 160x360x90	1 шт.	Bulkteq
	- Кнопки, лампи сигнальні, потенціометри, з'єднувальні елементи	1 компл.	
4.	Вимірний кабель UNITRONIC Li2YCY PiMF 5X2X0,5	25 м	

Виходячи із сказаного вище, у курсовому проекті використані наступні засоби автоматизації [3]:

1) Давач ваги PWSE 100 кг - Платформний тензOMETричний давач ваги серії PWSE - клас точності С3MR. Призначений для зважування вантажів в діапазоні мас від 100 до 750 кг.



Рисунок 3.3 – Давач ваги PWSE

Тензодавач ваги серії PWSE - функціональні особливості:

					БР. АКП – 73.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		34

- Тип: PWSE (аналогові).
- Номінальне навантаження: 100 кг ... 750 кг.
- Клас точності: С3MR.
- Ступінь захисту IP67.
- Нержавіюча сталь.
- Відповідність вимогам EMC.
- Компенсація зміщеного навантаження (OIML R76).
- Виробник: Hottinger Baldwin Messtechnik (HBM).

2) Давач швидкості C-80-Y-360BNF225L2



Рисунок 3.4 – Давач швидкості C-80-Y-360BNF225L2

Функціональні особливості [3]:

- С80 серія;
- Y вихідний контур Push Pull;
- 360 імп / об;
- BNF вихідний сигнал / підключення АВ кабельний вихід;
- Живлення +10 V ÷ + 30V (вихідний контур Y);
- Діаметр вала 25 мм;
- Захист IP 64 (стандарт) ;
- Робоча температура -25 ° C + 85 ° C (стандарт) ;
- L2 довжина кабелю 2м.

3) Давач сходження стрічки KN F2 S11

					БР. АКП – 73.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		35



Рисунок 3.5 – Давач сходження стрічки KN F2 S11 [3]

Експлуатаційні характеристики

- Максимальна частота перемикань 3600 циклів / год;
- Швидкість перемикання: 0.5-1.5m / s;
- Механічна зносостійкість: > 10 мільйонів циклів;
- ІЕС звичайний тепловий струм I_{th}: 10А;
- UL / CSA і ІЕС / EN 60947-5-1 .

Позначення:

- А600 Q300 для типів КС;
- А300 Q300 для типів К.М.
- ІЕС номінальна U_i напруга ізоляції:
- 690VAC для типів КС;
- 440VAC для типів К.М;
- Клас ізоляції II для КС тільки;
- Контактна опір: <10 Мом;
- Захист від короткого замикання: 10А Gg / SC швидкий запобіжник;
- Оператори алюмінієво-цинкового сплаву.

Корпус:

- типи КС - Самозгасаючий подвійний ізоляції;
- термопластичний полімер;
- KN типу - алюмінієво-цинкового сплаву;

					БР. АКП – 73.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

- Введення кабелю: стандартна M20; PG13.5 і 1;
- Робоча сила: 3Ncm / 4.25ozin;
- Підключення кабелю: самозакріплюючий гвинтовий затиск.

4) Ваговий контролер WEICONT

Прилад WEICONT має два режими роботи:

- Гравіметричний (регульований) - прилад проводить вимірювання і регулює швидкість стрічки так, щоб фактична продуктивність I збігалася із заданою продуктивністю P.
- Об'ємний (нерегульований) - прилад проводить вимірювання, але швидкість стрічки не регулюється, а встановлюється пропорційно заданій продуктивності [7].

Висновок до розділу

1. Розроблено блок-схему системи керування подачею клінкеру, яка дозволяє зрозуміти принцип роботи вагового дозатора, а саме процес витягу матеріалу з бункера.

2. Проведено розрахунок системи автоматичної подачі клінкеру, представлено алгоритмічну структуру системи регулювання, що дозволяє розрахувати основні залежності для досліджуваної АСР.2.

Підібрано технічні засоби системи автоматизації подачі клінкеру, які покращують роботу САК.

					БР. АКП – 73.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		37

4 МОДЕРНІЗАЦІЯ САК ШЛЯХОМ ВПРОВАДЖЕННЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ ТЕХНОЛОГІЙ КЕРУВАННЯ

4.1 Дослідження функціональної структури ПІ-регулятора на засадах Fuzzy Logic

Керування на основі методів теорії нечітких множин і нечіткої логіки використовується при недостатньому знанні ОК, але наявності досвіду керування ним у нелінійних системах, ідентифікація яких занадто трудомістка, а також у випадках, коли за умовою завдання необхідно використовувати знання експерта. ПІД-регулятори з нечіткою логікою (FuzzyLogic) у даний час використовуються в комерційних системах для наведення телекамер при трансляції спортивних подій, у системах кондиціонування повітря, при управлінні автомобільними двигунами, для автоматичного керування двигуном пирососа, пральної машини й в інших областях. Якщо в теорії чітких множин певний елемент (наприклад, температура 50 градусів) може належати множині (наприклад, множині «температура гарячої води»), або не належати їй, то в теорії нечітких множин вводиться поняття функції належності, яка характеризує ступінь належності елемента множині. При цьому говорять, наприклад, «температура 50 градусів належить множині $T_{гор.}$ зі ступенем належності 0,56». Функцію належності можна приблизно трактувати як ймовірність того, що даний елемент належить множині, однак така інтерпретація, хоча і є для інженерів більш зрозумілою, не є математично строгою, оскільки, існуюча теорія нечітких множин не оперує поняттям ймовірності. Тому, область застосування нечітких регуляторів постійно розширюється, збільшується різноманітність їх структур і виконуваних функцій. Слід відзначити, що нечітка логіка в ПІД-регуляторах використовується переважно двома шляхами: для побудови самого регулятора і для організації підстроювання коефіцієнтів ПІД-регулятора [4, 8].

Одна з найбільш поширених структур нечіткого регулятора (ПІ-регулятора) показана на рис. 4.1 .

					БР. АКП – 73.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		38

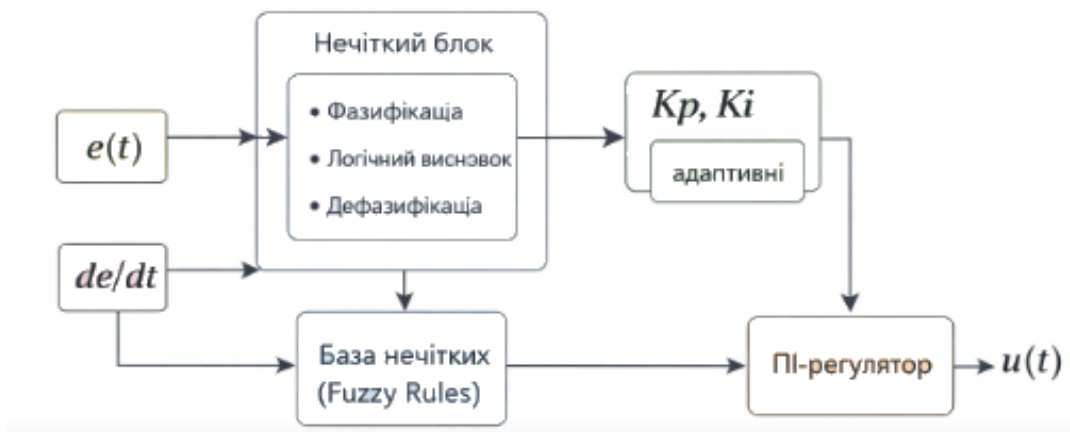


Рисунок 4.1 – Функціональна структура нечіткого регулятора [4]

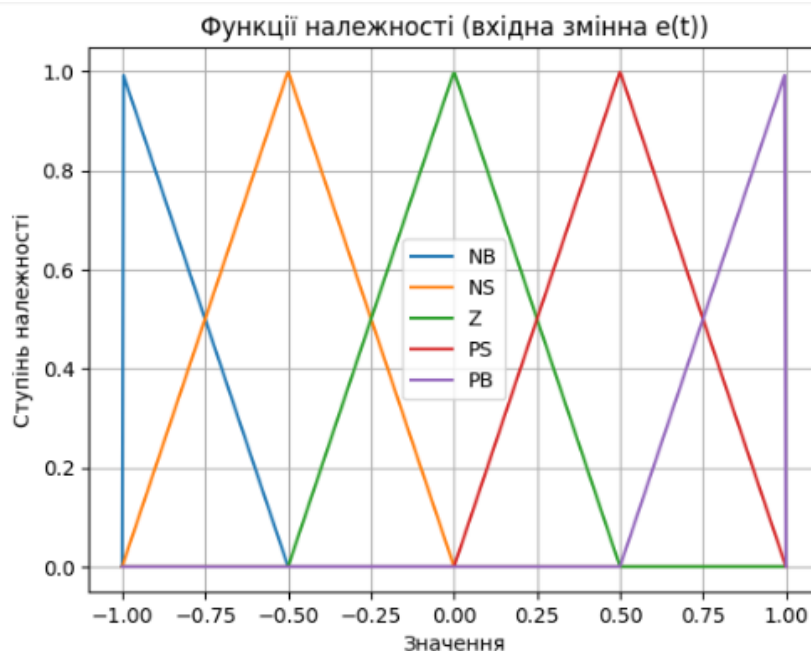
Функціональна структура нечіткого ПІ-регулятора передбачає використання блоку нечіткої логіки для адаптивного налаштування параметрів регулятора. Вхідними змінними є похибка та швидкість її зміни. На основі бази нечітких правил формується керуючий вплив на коефіцієнти ПІД-регулятора, що дозволяє змінювати їх у процесі роботи системи.

4.2 Синтез нечіткого ПІ-регулятора для САК подачі клінкеру

Для застосування методів нечіткої логіки насамперед необхідно перетворити звичайні чіткі змінні у нечіткі. Процес фазифікації ілюструється рис. 4.2. Діапазон зміни змінної e розбивається на множині(підмножини) $NL, NM, NS, Z, PS, PM, PL$, в межах кожної з яких будується функція належності змінної e кожної з множин.

На рис. 4.2 функції належності мають трикутну (найбільш поширену) форму, хоча в загальному випадку вони можуть бути будь-якими, виходячи з сенсу розв'язуваної задачі. Кількість множин також може бути довільною. Для опису вхідних змінних використано нечіткі множини з трикутними функціями належності. Діапазон значень нормовано в інтервалі $[-1; 1]$. Кожна змінна представлена п'ятьма лінгвістичними термами: NB, NS, Z, PS, PB. Функції належності перекриваються, що забезпечує плавний перехід між станами та

підвищує якість нечіткого висновку. Якщо величина помилки e на вході нечіткого регулятора (рис. 4.1) дорівнює e_1 (рис. 4.2). то відповідне значення нечіткої змінної буде дорівнювати PS зі ступенем належності підмножині PS , рівної $\mu(e_1) = 0,82$ або буде дорівнювати PM зі ступенем належності $\mu(e_1) = 0,18$. Ступінь належності помилки e_1 іншим множинам (Z, PL, NS і ін.) дорівнює нулю. Таким чином, величина помилки e_1 виявилася перетвореною в нечіткі змінні.



NB — велике від’ємне; NS — мале від’ємне; Z — нуль; PS — мале додатне; PB — велике додатне

Рисунок 4.2 – Графік функцій належності [8]

Для виконання функції регулювання над нечіткими змінними повинні бути виконані операції, побудовані на підставі висловлювань оператора формульованих у вигляді нечітких правил. Сукупність нечітких правил і нечітких змінних використовується для здійснення нечіткого логічного висновку (рис. 4.1), результатом якого є керуючий вплив на ОК [8].

Формування бази нечітких правил: база правил визначає логіку роботи регулятора і формується на основі експертних знань про поведінку системи.

Приклад правил:

IF ($e(t)$) є PB AND (de/dt) є Z THEN (K_p) є великим, (K_i) є середнім;

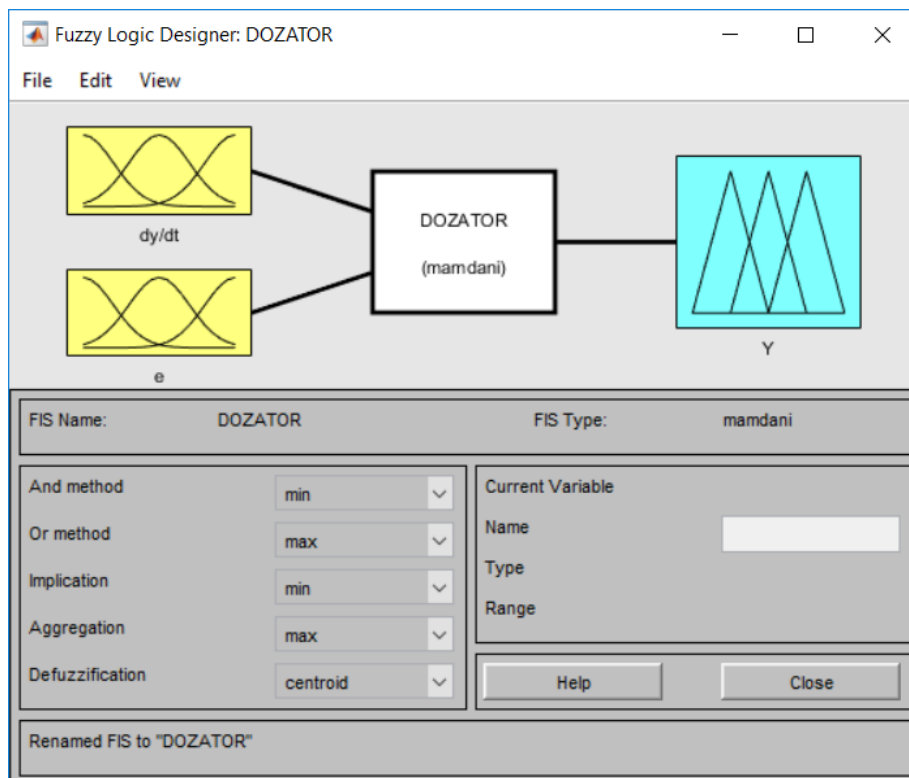


Рисунок 4.3 – Графічний інтерфейс редактора Fuzzy Logic Designer після задання вхідних та вихідних змінних нечіткої системи [8]

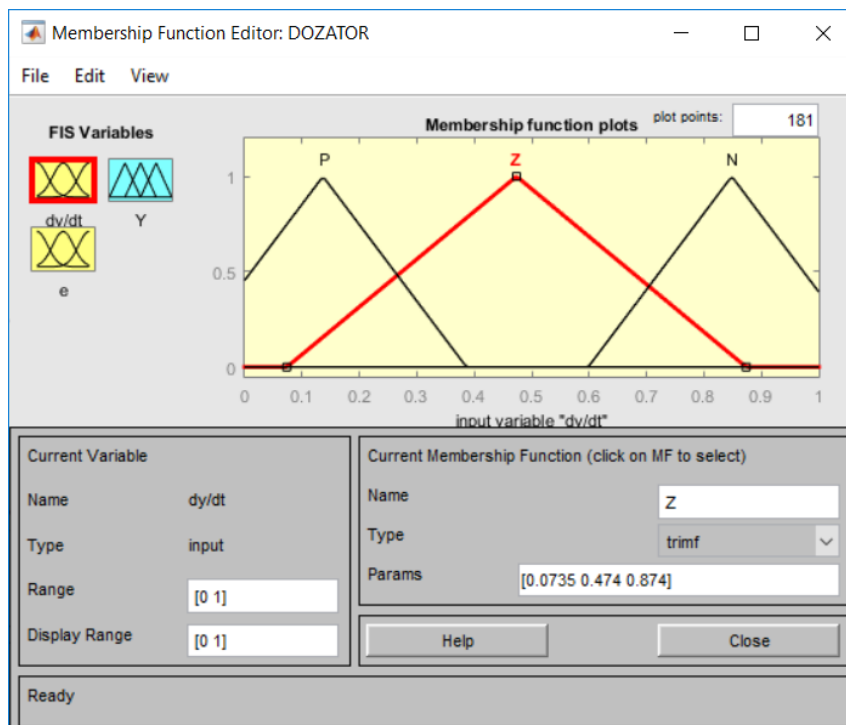


Рисунок 4.4 – Графічний інтерфейс редактора Fuzzy Logic Membership Function Editor для вхідної змінної dy/dt [8]

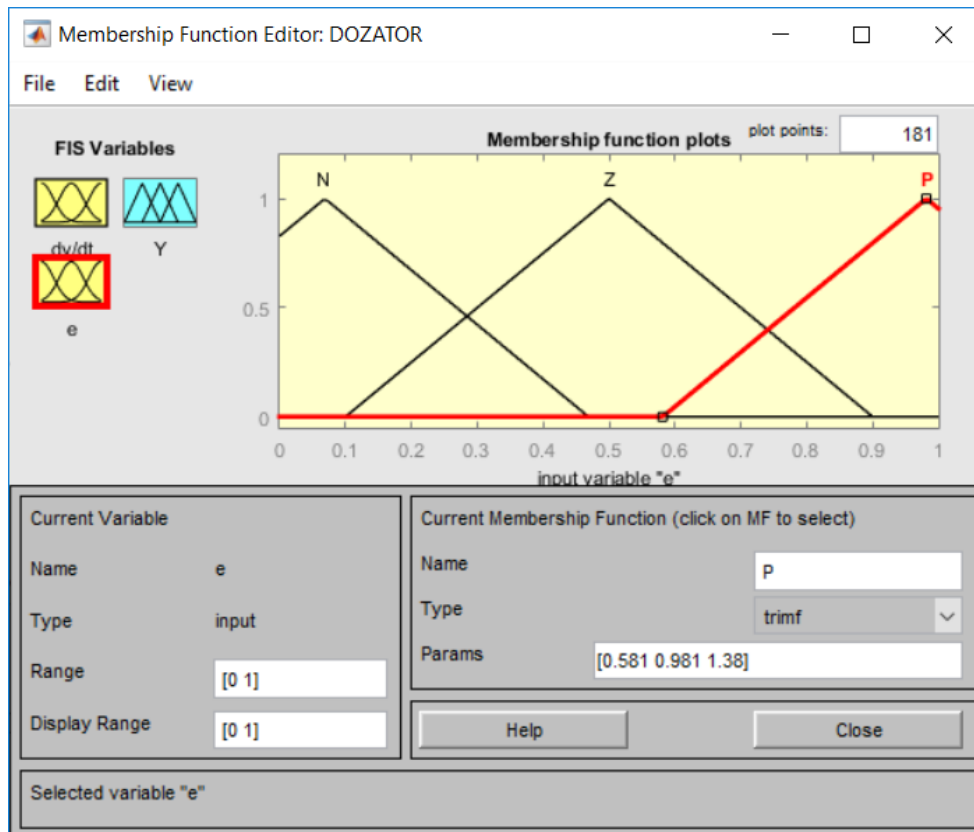


Рисунок 4.5 – Графічний інтерфейс редактора Fuzzy Logic Membership Function Editor для вхідної змінної e [8]

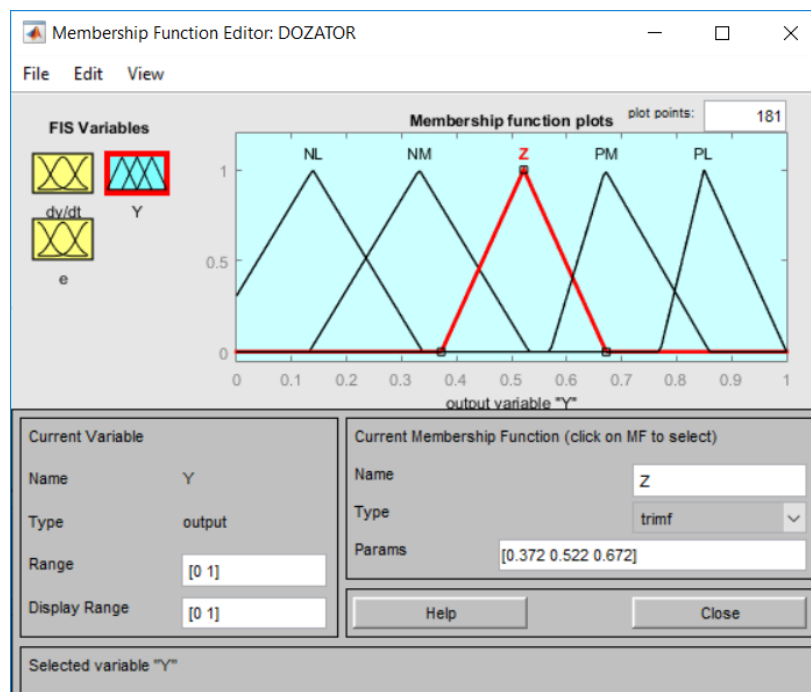


Рисунок 4.6 – Графічний інтерфейс редактора Fuzzy Logic Membership Function Editor для вихідної змінної Y [8]

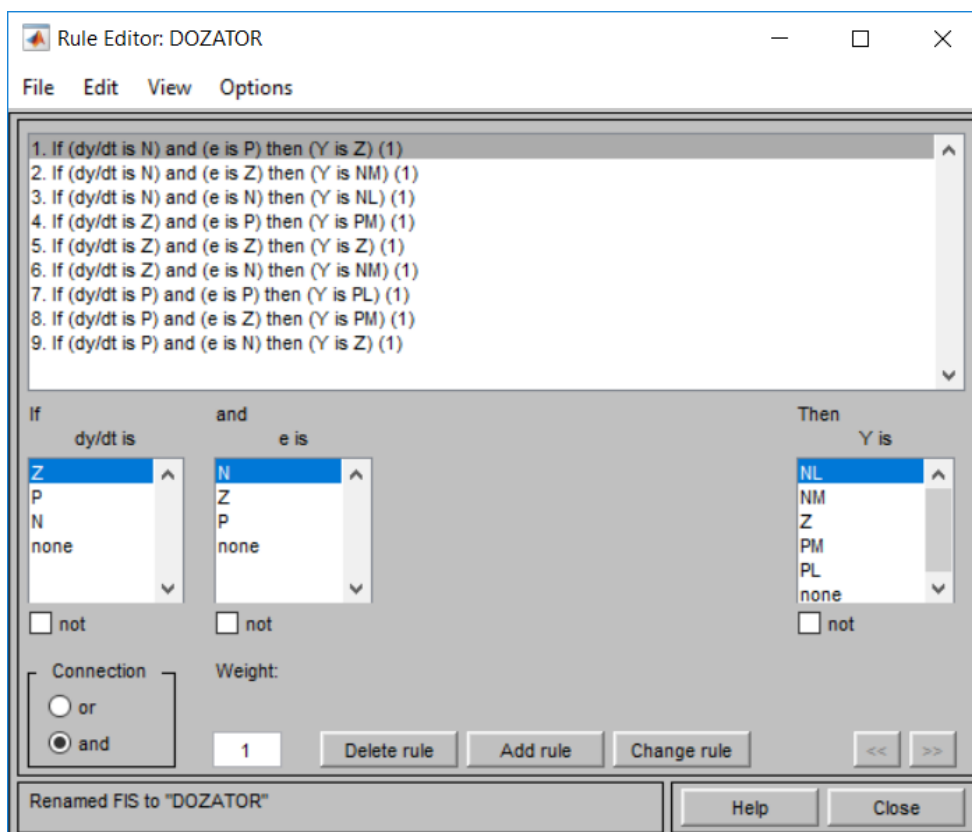


Рисунок 4.7 – Графічний інтерфейс редактора бази правил Rule Editor [8]

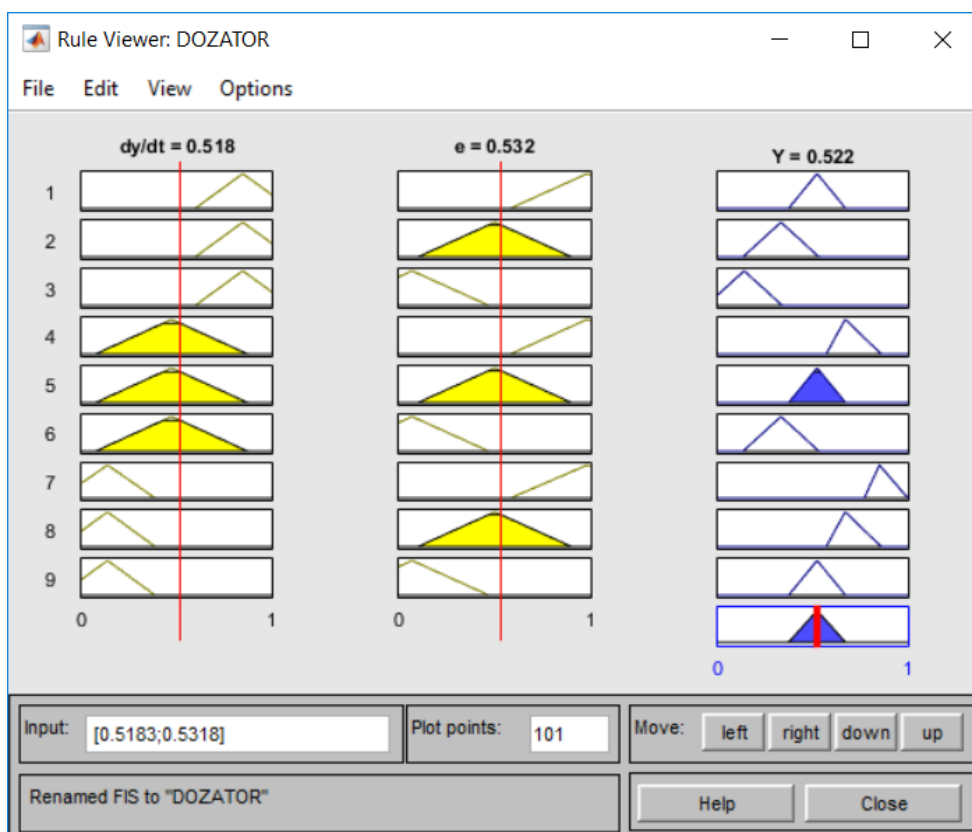


Рисунок 4.8 – Графічний інтерфейс редактора бази правил Rule Viewer

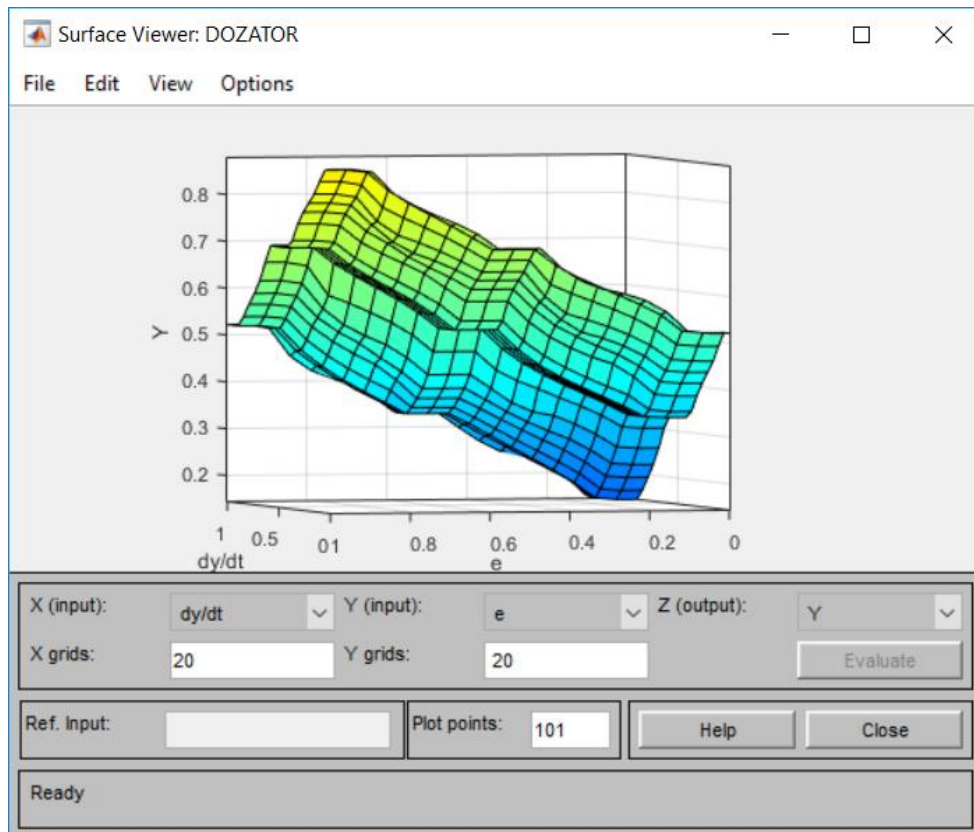


Рисунок 4.9 – Графічний інтерфейс редактора Surface Viewer [8]

Використовуючи правила роботи регулятора, можна отримати значення керуючої змінної u на виході нечіткого регулятора. Для цього потрібно знайти функцію належності змінної u множині, створеної у результаті виконання операцій логічного висновку над множинами, що входять у систему правил (4.1). Операція \cap в правилах (4.1) відповідає перетину множин, а результат застосування всіх правил відповідає операції об'єднання множин. Функція належності для перетину двох множин, наприклад N і P (правило 1), знаходиться як [8]:

$$\mu_{e \cap de/dt} = \min(\mu_e, \mu_{de/dt}) \quad (4.2)$$

тобто кожне значення функції належності перетину множин дорівнює найменшому значенню з двох, що стоять у виразі (4.1) у круглих дужках. Функція належності для об'єднання тих же множин має вигляд:

$$\mu_{e \cup de/dt} = \max(\mu_e, \mu_{de/dt}) \quad (4.3)$$

Функції належності, отримані при перетині чи об'єднанні множин, можуть бути визначені різними способами, в залежності від сенсу розв'язуваної задачі. У цьому сенсі сама теорія нечітких множин теж є нечіткою. В літературі наводиться 10 різних визначень функції належності для перетину множин, але не сказано, яке з них потрібно вибрати для вирішення конкретного завдання. Використовують, зокрема, більш зрозумілу операцію знаходження функцій належності в разі перетину та об'єднання множин, що має аналогію з правилами множення і додавання ймовірностей:

$$\mu_{e \cap de/dt} = \mu_e * \mu_{de/dt}$$

$$\mu_{e \cup de/dt} = \mu_e + \mu_{de/dt} - \mu_e * \mu_{de/dt} \quad (4.4)$$

Однак застосування перших двох способів знаходження функції належності зазвичай є кращим, оскільки при цьому зберігається більшість правил, розроблених для звичайних множин [8].

Функції належності для кожної з множин $N1, MM, 2, PM, PБ$, що входять у нечітку змінну y в правилах (4.1), виходять у вигляді:

$$\begin{aligned} \mu_{R1} &= \min\{\mu_{y_1}(y), \min(\mu_{e1}(e), \mu_{de/dt1}(de/dt))\}, \\ \mu_{R2} &= \min\{\mu_{y_2}(y), \min(\mu_{e2}(e), \mu_{de/dt2}(de/dt))\}, \\ &\dots \\ \mu_{R9} &= \min\{\mu_{y_9}(y), \min(\mu_{e9}(e), \mu_{de/dt9}(de/dt))\}. \end{aligned} \quad (4.5)$$

Тут кожне з дев'яти рівнянь відповідає одному з правил (4.1). Результируюча функція належності керуючого впливу y , що отримана після застосування всіх 9 правил, знаходиться у відповідності з (4.3) як об'єднання функцій належності всіх правил (4.1):

$$\mu(y) = \max\{\mu_{R1}(y), \mu_{R2}(y), \dots, \mu_{R9}(y)\} \quad (4.6)$$

Тепер, коли отримана результируюча функція належності керуючого впливу y , виникає питання, яке конкретно значення керуючого впливу потрібно вибрати. Якщо використовувати ймовірнісну інтерпретацію теорії нечітких множин, то

					БР. АКП – 73.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

стає зрозуміло, що таке значення можна отримати за аналогією з математичним сподіванням керуючого впливу у такому вигляді:

$$y = \frac{\int_{y_{min}}^{y_{max}} y \mu(y) dy}{\int_{y_{min}}^{y_{max}} \mu(y) dy} \quad (4.7)$$

Такий спосіб дефазифікації є найбільш поширеним, але не єдиним. Для побудови нечітких регуляторів зазвичай використовують П, І, ПІ, ПД, ПІД (І), ПІ (Д) і ПІД-закони регулювання. Як вхідні сигнали для системи нечіткого виведення використовують сигнал помилки, прирощення помилки, квадрат помилки і інтеграл від помилки. Реалізація нечіткого ПІД-регулятора викликає проблеми, оскільки він повинен мати тривимірну таблицю правил відповідно до трьох складовими в рівнянні ПІД-регулятора, яку надзвичайно складно заповнити, користуючись відповідями експерта. Остаточне налаштування нечіткого регулятора або налаштування, близьке до оптимального, досі залишається важким завданням. Для цього використовуються генетичні пошукові методи, що вимагають великих обчислювальних ресурсів і часу [8].

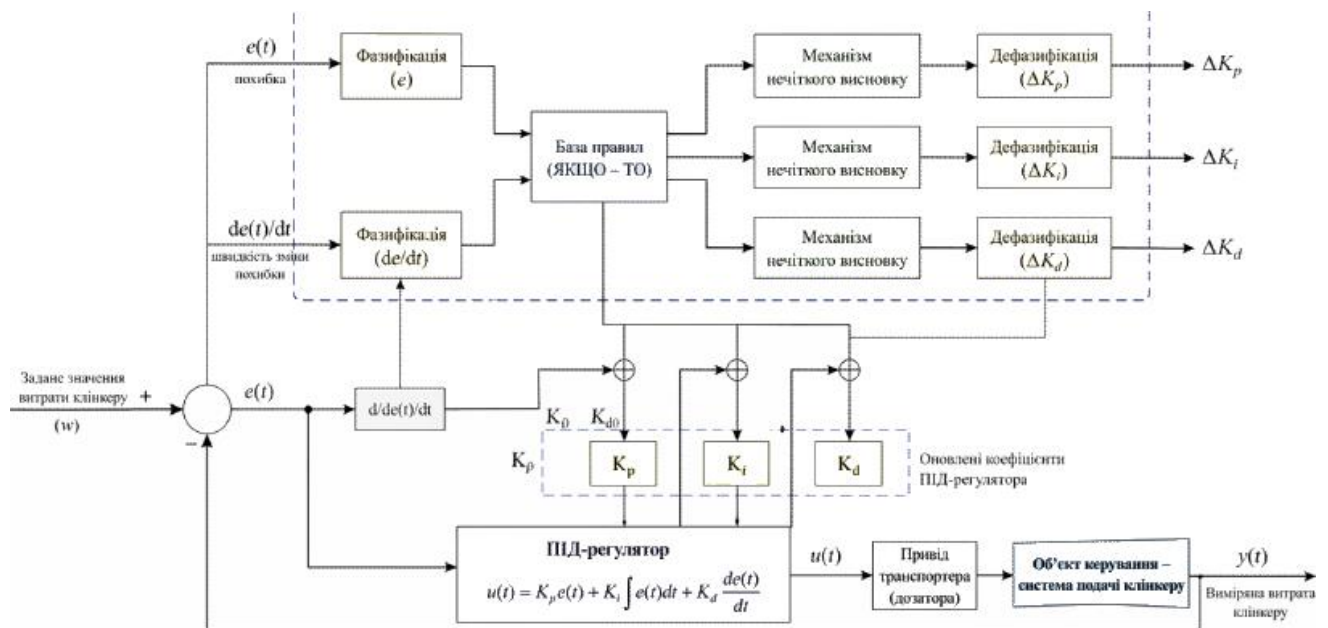
4.3 Застосування нечіткої логіки для налаштування коефіцієнтів ПІД- регулятора

Застосування нечіткої логіки для налаштування коефіцієнтів ПІД-регулятора в системі подачі клінкеру дозволяє значно підвищити якість керування за рахунок адаптації до змінних умов роботи. З метою підвищення адаптивності системи доцільно застосовувати методи нечіткої логіки, які дозволяють враховувати експертні знання та формалізувати їх у вигляді лінгвістичних правил. Такий підхід дає можливість змінювати параметри регулятора в процесі роботи системи залежно від поточного стану об'єкта керування [8].

Основою нечіткого налаштування ПІД-регулятора є використання двох основних вхідних змінних: похибки регулювання $e(t)$ та швидкості її зміни

					БР. АКП – 73.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		47

$(de(t)/dt)$. На основі* цих параметрів формується керуючий вплив на такі коефіцієнти: K_p – пропорційний коефіцієнт, K_i – інтегральний коефіцієнт та K_d – диференціалний коефіцієнт (рис. 4.10).



K_p – пропорційний коефіцієнт, K_i – інтегральний коефіцієнт та K_d – диференціалний коефіцієнт

Рисунок 4.10 – Нечіткий регулятор налаштування коефіцієнтів [8]

Алгоритм роботи системи такий:

- вимірюється поточна витрата клінкеру;
- обчислюється похибка $e(t)$;
- визначається швидкість її зміни;
- проводиться фазифікація вхідних змінних;
- активуються відповідні правила бази знань;
- обчислюються коригування коефіцієнтів ПІД-регулятора.
- виконується дефазифікація;
- оновлені параметри K_p , K_i , K_d застосовуються у регуляторі.

Для системи подачі клінкеру: об'єкт має інерційність і запізнення; присутні збурення (нерівномірний потік, залипання); параметри змінюються з

часом. Нечіткий ПІД-регулятор дозволяє: швидше реагувати на зміни навантаження; зменшити перерегулювання; покращити стабільність витрати матеріалу.

Існує два основних підходи:

1. Адаптивний ПІД. Нечітка система змінює:

$$K_p, K_i, K_d = f(e).$$

2. Самоналаштуваний ПІД. Формуються поправки:

$$K_p = K_p^0 + \Delta K_p$$

Математична модель ПІД-регулятора така:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt},$$

де $e(t)$ – похибка між заданою та реальною витратою клінкеру; $u(t)$ – керуючим сигнал на привід; $\frac{de(t)}{dt}$ – швидкість зміни похибки

База правил формується на основі досвіду експлуатації системи та має вигляд набору умов типу IF–THEN. Наприклад, при великій похибці та незначній швидкості її зміни доцільно збільшити пропорційну складову.

Нижче наведено повну таблицю правил 7×7 для нечіткого налаштування коефіцієнтів ПІД-регулятора в системі подачі клінкеру. Вона базується на двох вхідних змінних: похибці $e(t)$ та швидкості її зміни de/dt (табл. 4.1. 4.2, 4.3).

Таблиця 4.2 – Правила для K_p

$e(t) / de/dt$	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS	Z	Z
NM	PB	PM	PM	PS	PS	Z	NS
NS	PM	PM	PS	PS	Z	NS	NM
Z	PM	PS	PS	Z	NS	NS	NM
PS	PS	PS	Z	NS	NS	NM	NM
PM	Z	Z	NS	NM	NM	NM	NB
PB	Z	NS	NM	NM	NB	NB	NB

Таблиця 4.3 – Правила для K_i

$e(t) / de/dt$	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NM	NM	NS	Z	Z
NM	NB	NM	NM	NS	Z	Z	PS
NS	NM	NM	NS	Z	PS	PS	PM
Z	NM	NS	Z	PS	PS	PM	PM
PS	NS	Z	PS	PS	PM	PM	PB
PM	Z	PS	PS	PM	PM	PB	PB
PB	Z	PS	PM	PM	PB	PB	PB

Таблиця 4.4 – Правила для K_d

$e(t) / de/dt$	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NB	PS	NS	NB	NB	NB	NS	PS
NM	PS	NS	NB	NM	NS	PS	PM
NS	Z	NS	NM	NS	PS	PM	PM
Z	Z	NS	NS	Z	NS	PS	Z
PS	PM	PS	PS	NS	NS	NS	Z
PM	PM	PM	PS	NS	NB	NS	Z
PB	PS	PS	Z	NB	NB	NS	PS

де NB – велике від’ємне; NM – середнє від’ємне; NS – мале від’ємне; Z – нуль; PS – мале додатне; PM – середнє додатне; PB – велике додатне.

Після виконання нечіткого висновку результати агрегуються та піддаються дефазифікації, в результаті чого отримуються чіткі значення коефіцієнтів (K_p), (K_i) та (K_d). Ці параметри використовуються у ПІД-регуляторі для формування керуючого сигналу (рис. 4.11).

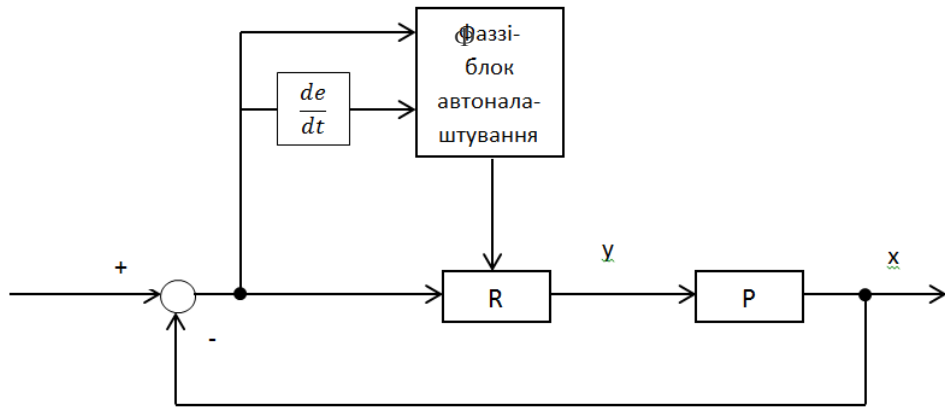


Рисунок 4.11 – Спрощена структура ПІД-регулятора з блоком автоналаштування на основі нечіткої логіки [4]

У процесі налаштування регулятора використовується кілька кроків. Спочатку вибираються діапазони вхідних і вихідних сигналів тюнера (блоку автоналаштування), форма функцій належності шуканих параметрів, правила нечіткого виводу, механізм логічного висновку, метод дефазифікації і діапазони масштабних множників, необхідних для перерахунку чітких змінних в нечіткі.

4.4 Пошук параметрів ПІД-регулятора методами оптимізації

У системі автоматичної подачі клінкеру ефективність роботи ПІД-регулятора значною мірою залежить від правильного вибору коефіцієнтів (K_p), (K_i) та (K_d). Оскільки об'єкт керування є інерційним, нелінійним і має змінні параметри, доцільно застосовувати методи оптимізації, які дозволяють знайти оптимальні значення параметрів за певним критерієм якості [9].

Для цього вибирається цільова функція як інтеграл від суми квадратів помилки регулювання і часу встановлення. У критерій мінімізації іноді додають швидкість наростання вихідної змінної об'єкта керування. Як шукані параметри (параметрів, які треба знайти) вибирають положення максимумів функцій належності і масштабні коефіцієнти на вході і виході фаззі-блоку. До задачі оптимізації додають обмеження на діапазон зміни позиції функцій належності.

Оптимізація критеріальної функції може бути виконана, наприклад, за допомогою генетичних алгоритмів [4, 8].

Методи оптимізації:

1. Градієнтні методи, тобто параметри змінюються в напрямку зменшення функції якості.

2. Метод перебору (Grid Search), тобто перебір значень (K_p), (K_i) та (K_d) у заданому діапазоні

3. Генетичні алгоритми реалізуються, зокрема, в MATLAB [7], тобто параметри кодується як "хромосоми" відбір, схрещування, мутації

Для системи подачі клінкеру необхідно мінімізувати коливання витрати та забезпечити плавний запуск транспортерів. Застосувати обмеження коефіцієнтів: $K_p > 0$, $K_i > 0$ та $K_d > 0$.

Графік перехідного процесу до і після методу оптимізації подачі клінкеру наведено на рис. 4.12.

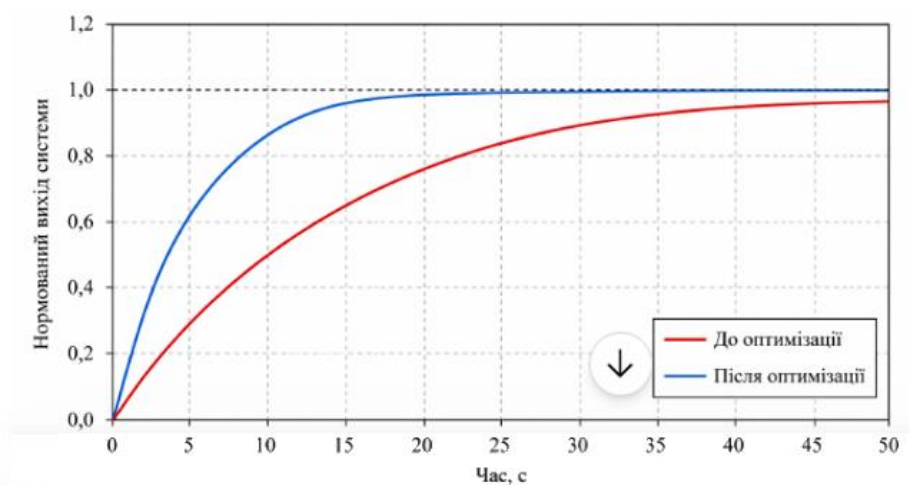
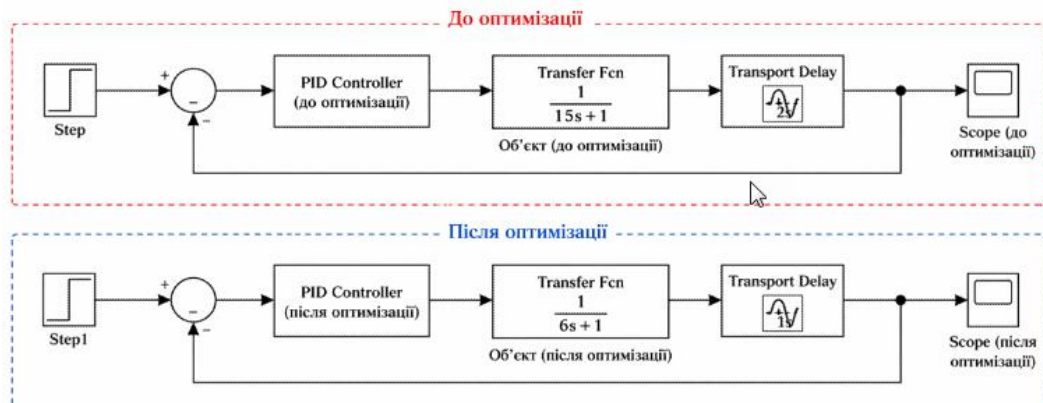


Рисунок 4.12 – Графік перехідного процесу до і після методу оптимізації подачі клінкеру

Після застосування методу оптимізації параметрів системи керування подачею клінкеру спостерігається зменшення сталої часу процесу, що приводить до суттєвого підвищення швидкодії системи та скорочення часу перехідного процесу. MATLAB-код для графіка перехідного процесу наведений у додатку А.

На рис 4.13 наведено Simulink-схема системи керування подачею клінкеру до і після оптимізації [9].



Step/Step1 – змінні завдання; Σ – суматор (обчислення похибки $e=t-y$)

Рисунок 4.13 – Simulink-схема системи керування подачею клінкеру до і після оптимізації:

Методи оптимізації є ефективним інструментом налаштування ПІД-регуляторів у системах подачі клінкеру. Найбільш доцільним є використання генетичних алгоритмів, які дозволяють знайти глобально оптимальні параметри навіть для складних і нелінійних об'єктів.

Висновок до розділу

Сформульовано функціональну структуру ПІ-регулятора на засадах Fuzzy Logic, що дало змогу синтезувати регулятор.

Синтезовано базу правил за допомогою Fuzzy Logic Designer для ПІ-регулятора, що дало змогу підвищити ефективність системи автоматичного керування подачі клінкеру та здійснено пошук параметрів ПІД-регулятора методами оптимізації.

Таким чином, використання нечіткої логіки для налаштування коефіцієнтів ПІД-регулятора є ефективним підходом до підвищення якості керування складними технологічними процесами, зокрема процесом подачі клінкеру в цементному виробництві.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У роботі проведено синтез і аналіз автоматизованої системи управління подачею клінкеру на засадах інтелектуальних технологій.

Побудовано експериментальну модель вагового дозатора подачі клінкеру, що дозволило використати її для дослідження часових і частотних характеристик об'єкта керування, та побудувати перехідну характеристику об'єкта. Побудова експериментальної моделі вагового дозатора та підбір регулятора з розрахунком оптимальних параметрів його налаштування, дозволить підвищити точність та швидкодію системи подачі клінкеру, а отже і якість цементу.

Визначено функцію передачі об'єкта керування, що дозволило вибрати тип регулятора для досліджуваного об'єкта (ПД- регулятор), після чого стало можливо синтезувати алгоритмічну структуру системи керування і дослідити її властивості в Simulink.

Сформульовано функціональну структуру ПІ-регулятора на засадах Fuzzy Logic, що дало змогу синтезувати регулятор. Синтезовано базу правил за допомогою Fuzzy Logic Designer для ПІ- регулятора, що дало змогу підвищити ефективність системи автоматичного керування подачі клінкеру та здійснено пошук параметрів ПД-регулятора методами оптимізації.

Таким чином, використання нечіткої логіки для налаштування коефіцієнтів ПД-регулятора є ефективним підходом до підвищення якості керування складними технологічними процесами, зокрема процесом подачі клінкеру в цементному виробництві.

					БР. АКП – 73.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		54

ПЕРЕЛІК ПОВИЛАНЬ НА ДЖЕРЕЛА

1. Горбійчук М.І., Чигур Л.Я. Теорія автоматичного керування. Нелінійні системи. Лабораторний практикум, ІФНТУНГ, 2024. – 84 с.
2. Горбійчук М.І. Теорія алгоритмів, числові методи та програмні засоби моделювання: [навч.посібник] / М.І.Горбійчук, В.М. Гарасимів: ІФНТУНГ, 2021. – 299 с.
3. Когутяк М.І. Технічні засоби автоматизації. Ч4: лабор.практикум / М.І.Когутяк. ІФНТУНГ, 2025. – 127 с.
4. Семенцов Г. Н. Автоматизація неперервних технологічних процесів. Регулятори: [навч.посібн.] / Г. Н. Семенцов. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2016. – 201 с.
5. Горбійчук М.І. Теорія автоматичного керування: [консп.лекцій] / М.І. Горбійчук: ІФНТУНГ, 2021. – 78 с.
6. Білак Н.В. Апроксимовано-спектральний аналіз випадкового процесу // Проблеми інформації та управління. - 2015. - № 2(50). - С.26-31.
7. Програмування у середовищі Matlab. Режим доступу: <http://www.mathworks.com/discovery/matlab-mapreduce-hadoop.html>
8. Чигур І.І Інтелектуальні системи прийняття рішень в умовах невизначеності: практикум / І.І.Чигур, В.М.Гарасимів: ІФНТУНГ, 2021. – 66 с.
9. Борин В.С. Теорія оптимізації керування технологічними процесами; метод. вказівки для самост. роботи / Борин В.С., Фешанич Л.І., Зварич Г.Г. – Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2021. – 25 с.

					БР. АКП – 73.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		55