

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

БР.АКПз-44.00.00.000 ПЗ

Група АКПз-22-1

Ярослав Кріль

2026

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

Кріль Ярослав Володимирович
(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 681.5.013
(індекс)

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

Удосконалення системи автоматизації технологічного
(назва роботи)

процесу виробництва цементу

Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
(назва освітньої програми)

151 - Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
(шифр і назва спеціальності)

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

Нормоконтроль

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

Рецензент

доцент І.І. Чигур
(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

Здобувач освітнього ступеня

АКПз-22-1 Я.В. Кріль
(шифр групи) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

Науковий керівник

асистент Л.І. Лагойда
(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

Допущено до захисту Завідувач 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 151 - Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри АКІТ

«___» _____ 20__ року

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

Кріль Ярослав Володимирович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Удосконалення системи автоматизації технологічного процесу виробництва цементу

керівник роботи Лагойда Людмила Іванівна

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

затверджені наказом закладу вищої освіти від «___» _____ 20__ року № _____

2. Строк подання студентом роботи _____

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

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Вступ. 1. Аналіз технологічного процесу випалювання цементного клінкеру в обертовій печі як об'єкта автоматизованого контролю та керування.

2. Визначення параметрів та побудова математичної моделі об'єкта автоматичного керування. 3. Синтез ефективної системи керування. 4. Розробка проектної документації на САК. Загальні висновки. Перелік посилань на джерела.

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

Лист 1 - Функціональна схема автоматизації - БР.АКПз-44.00.00.001;

Лист 2 - Експериментальне дослідження - БР.АКПз-44.00.00.002;

Лист 3 - Аналіз та синтез одноконтурної АСК - БР.АКПз-44.00.00.003;

Лист 4 - Аналіз та синтез каскадної АСК - БР.АКПз-44.00.00.004;

Лист 5 - Структурна схема ієрархічної системи керування - БР.АКПз-44.00.00.005;

Лист 6 - Загальний вигляд щита - БР.АКПз-44.00.00.006.

6. Консультанти розділів роботи

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

7. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів бакалаврської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз технологічного процесу випалювання цементного клінкеру в обертій печі як об'єкта автоматизованого контролю та керування		
2	Визначення параметрів та побудова математичної моделі об'єкта автоматичного керування		
3	Синтез ефективної системи Керування		
4	Розробка проектної документації на САК		

Студент _____
(підпис)

Я.В. Кріль _____
(ініціали та прізвище)

Керівник роботи _____
(підпис)

Л.І. Лагойда _____
(ініціали та прізвище)

АНОТАЦІЯ

Бакалаврська робота містить: 72 сторінки друкованого тексту, 20 рисунків, 6 таблиць, 8 переліків посилань на джерела і 3 додатки.

Тема: «Удосконалення системи автоматизації технологічного процесу виробництва цементу».

Об'єкт дослідження: обертова піч.

Мета проекту: розробка автоматичної системи управління обертовою піччю.

Методи дослідження: експериментальне моделювання автоматичної системи управління.

Результати кваліфікаційної роботи: у роботі проведений аналіз технологічного процесу випалу портландцементного клінкеру в обертовій печі, з точки зору його автоматизації. Визначено, що основною зоною обертової печі, яка підлягає автоматизації, є зона кальцинування, яка при взаємодії з зоною спікання впливає на роботу всієї печі.

Експериментальним методом досліджені динамічні характеристики, вибрані регулятори, розраховані їх оптимальні параметри налаштування, проведено синтез одноконтурної та каскадної АСР температури в зоні кальцинування та спікання печі, визначені їх показники якості, а також досліджено їх стійкість.

Розроблено структурну схему ієрархічної системи керування, здійснено вибір технічних засобів автоматизації.

Ключові слова: автоматичне керування, регулювання, система, вимірювання, моделювання, контролер, налаштування регулятора.

ABSTRACT

Bachelor's thesis contains: 72 pages of printed text, 20 figures, 6 tables, 8 lists of references and 3 appendices.

Topic: "Improvement of the automation system of the technological process of cement production".

Object of research: rotary kiln.

Project goal: development of an automatic control system for a rotary kiln.

Research methods: experimental modeling of an automatic control system.

Results of qualification work: the work analyzes the technological process of firing Portland cement clinker in a rotary kiln, from the point of view of its automation. It was determined that the main zone of the rotary kiln, which is subject to automation, is the calcination zone, which, when interacting with the sintering zone, affects the operation of the entire kiln.

The dynamic characteristics were studied experimentally, regulators were selected, their optimal settings were calculated, a synthesis of single-circuit and cascade ACP temperature in the calcination and sintering zone of the furnace was carried out, their quality indicators were determined, and their stability was also studied.

A structural diagram of a hierarchical control system was developed, and technical means of automation were selected.

Keywords: automatic control, regulation, system, measurement, modeling, controller, regulator settings.

ЗМІСТ

	ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ.....	8
	ВСТУП.....	9
1	АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ВИПАЛЮВАННЯ ЦЕМЕНТНОГО КЛІНКЕРУ В ОБЕРТОВІЙ ПЕЧІ ЯК ОБ’ЄКТА АВТОМАТИЗОВАНОГО КОНТРОЛЮ ТА КЕРУВАННЯ.....	11
1.1	Призначення обертової печі і суть процесу випалювання клінкеру.....	11
1.2	Характеристика сировини, одержуваного клінкера і палива.....	12
1.2.1	Карбонатні і карбонатно-глинисті породи.....	12
1.2.2	Глинисті породи.....	12
1.2.3	Характеристика портландцементного клінкера.....	13
1.2.3.1	Хімічний склад.....	13
1.2.3.2	Хіміко-мінералогічний склад.....	13
1.2.3.3	Мінералогічний (фазовий) склад.....	13
1.2.4	Паливо для печі.....	14
1.3	Будова і робота обертової печі.....	15
1.4	Технічна характеристика технологічного устаткування.....	20
1.5	Вибір та обґрунтування параметрів контролю та регулювання.....	21
1.6	Вибір сучасного методу автоматизації технологічного процесу.....	22
	Висновки до розділу.....	23
2	ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ТА ПОБУДОВА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ОБ’ЄКТА АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ.....	24
2.1	Встановлення об’єкту керування.....	24
2.2	Головні якісні показники а також критерії оптимальності системи автоматичного керування.....	30

					БР.АКПз-44.00.00.000 ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Кріль Я.В.			Удосконалення системи автоматизації технологічного процесу виробництва цементу	Літ.	Арк.	Акрушів
Перевір.		Лагойда Л.І.					6	72
Реценз.		Чигур І.І.				ІФНТУНГ АКПз-22-1		
Н. Контр.		Кучмистенко О.В.						
Затверд.		Лагойда А.І.						

2.3	Експериментальне дослідження динаміки керованого об'єкта.....	30
2.3.1	Підготовка, планування а також проведення експерименту.....	31
2.3.2	Опрацювання отриманих результатів експерименту.....	32
	Висновки до розділу.....	41
3	СИНТЕЗ ЕФЕКТИВНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ.....	42
3.1	Побудова одноконтурної системи автоматичного керування.....	42
3.2	Розробка каскадної системи автоматичного керування.....	43
3.3	Виконання дослідження стійкості одноконтурної автоматичної системи керування.....	45
3.4	Виконання дослідження стійкості каскадної автоматичної системи керування.....	46
3.5	Визначення якісних показників системи керування.....	47
	Висновки до розділу.....	49
4	РОЗРОБКА ПРОЕКТНОЇ ДОКУМЕНТАЦІЇ НА САК.....	50
4.1	Побудова структурної схеми системи автоматичного керування.....	50
4.2	Вибір технічних засобів для автоматизації процесу випалювання клінкеру в обертій печі.....	51
4.2.1	Вибір давачів.....	51
4.2.2	Вибір виконавчого механізму.....	55
4.2.3	Вибір регуляторів.....	56
4.2.4	Вибір мікропроцесорних індикаторів.....	58
4.3	Проектна реалізація системи автоматизації.....	60
4.3.1	Розробка функціональної схеми автоматизації.....	60
4.3.2	Розробка загального вигляду щита.....	60
	Висновки до розділу.....	61
	ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	62
	ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ НА ДЖЕРЕЛА.....	63
	ДОДАТКИ	
	БІБЛІОГРАФІЧНА ДОВІДКА	

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ

АСУ ТП - автоматизована система управління технологічного процесу.

АСК - автоматична система керування.

РО - регулюючий орган.

АСК ТП - автоматизовані системи керування технологічними процесами.

АСР - автоматична система регулювання.

ТЗА - технічні засоби автоматизації.

ФСА - функціональна схема автоматизації.

ТП - технологічний процес.

					БР.АКПз-44.00.00.000 ПЗ	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВСТУП

Цемент є одним із важливіших будівельних матеріалів, який використовується як в'язучий матеріал із глибокої давнини.

До 60% собівартості цементу приходиться на випал сировинної суміші в печах. Тому автоматизація найдорожчої частини технологічної лінії виготовлення цементу дає значний економічний ефект внаслідок зменшення питомих затрат тепла на випал, збільшення терміну служби футеровки і продуктивності печей.

Затрати на установку і експлуатацію засобів автоматизації, установок любых розмірів приблизно однаковий, але економічний ефект при цьому прямо зв'язаний з їх продуктивністю.

Разом із тим, зі збільшенням потужності агрегатів ускладнюється керування ними, особливо тоді, коли вони працюють у форсованому режимі, при якому стараються досягнути максимальної продуктивності. Такий режим характерний для більшості обертових печей.

Машиніст печі, як правило, не в стані забезпечити стабільне і ефективне ведення процесу випалу клінкеру через його обмежені можливості. Тому розв'язок цих задач передається автоматизованим системам керування на базі аналогової і цифрової апаратури. Особливо великі можливості автоматизації процесу випалу відкриваються у зв'язку з запровадженням у виробництво керуючих обчислювальних машин і мікропроцесорних контролерів.

Основною метою автоматизації випалу клінкеру є оптимізація економічних показників процесу, стабілізація стійкості технологічного процесу та виключення безпосередньої участі людини в керуванні ним, покращення умов праці технологічного персоналу.

Якщо враховувати, що підвищення якості цементу на одну марку дає можливість будівельникам додатково отримати 0,6 - 0,7 м³ бетону із кожної тони цементу, то стає зрозумілим, які величезні резерви відкриваються для автоматизації цементних заводів, а особливо процесів випалу клінкеру.

					БР.АКПз-44.00.00.000 ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

У теперішній час значні успіхи досягнуті в області створення систем автоматичного контролю роботи основних технологічних агрегатів як за допомогою приладів загально промислового виконання, так і на базі ряду спеціальних давачів. Так останнім часом широке застосування знайшли давачі специфічних для галузі технологічних величин, як наприклад, вміст кисню у відпрацьованих газах, запиленість повітря, загазованості після печі, в'язкість шламу, його витрата, тощо.

Основною задачею бакалаврської роботи є розробка високоефективних автоматичних систем регулювання і керування технологічним процесом випалу цементного клінкеру в обертівій печі на базі локальних регуляторів та мікропроцесорних контролерів.

					БР.АКПз-44.00.00.000 ПЗ	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1 АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ВИПАЛЮВАННЯ ЦЕМЕНТНОГО КЛІНКЕРУ В ОБЕРТОВІЙ ПЕЧІ ЯК ОБ'ЄКТА АВТОМАТИЗОВАНОГО КОНТРОЛЮ ТА КЕРУВАННЯ

1.1 Призначення обертової печі і суть процесу випалювання клінкеру

Процес випалювання сировинної суміші з отриманням клінкеру є ключовим етапом у виробництві цементу. Попередньо тонко подрібнену та однорідно перемішану суміш заданого хімічного складу піддають термічній обробці в обертових печах при температурах 1400–1500 °С. У результаті формується спечений каменеподібний продукт - клінкер, який має складний мінералогічний склад і розвинену мікрокристалічну структуру. Якість отриманого клінкеру та експлуатаційні властивості цементу визначаються фізико-хімічними характеристиками сировини, видом і якістю палива, температурним режимом і тривалістю випалювання, а також інтенсивністю охолодження продукту.

Формування клінкеру з вихідної суміші передбачає хімічну взаємодію мінеральних компонентів - вапняку та глини. За нормальних умов ці речовини практично не реагують між собою, проте при підвищенні температури їх реакційна здатність суттєво зростає. Це зумовлено збільшенням енергії частинок твердих тіл, що сприяє дифузії атомів і молекул та утворенню нових хімічних сполук. Такий тип взаємодії називається реакціями у твердому стані.

Інтенсифікація хімічних процесів відбувається при появі рідкої фази, яка виникає внаслідок часткового плавлення компонентів. Це явище називають спіканням, а отриманий матеріал - спеченим. Для виробництва портландцементного клінкеру процес випалювання доводять саме до стадії спікання, що забезпечує ефективне зв'язування оксиду кальцію (CaO) з кремнеземом (SiO₂) з утворенням трьохкальцієвого силікату (3CaO·SiO₂).

Отримання клінкеру здійснюється у теплових агрегатах різних конструкцій і принципів дії. Основним обладнанням як для мокрого, так і для сухого способів виробництва є обертові печі, у яких виробляється близько 98,1% загального обсягу

					БР.АКПз-44.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

клінкеру. Решта (приблизно 1,9%) отримується у шахтних печах.

1.2 Характеристика сировини, одержуваного клінкера і палива

Клінкер - головний компонент цементу, що одержують в результаті випалювання до спікання сировинної суміші, що складається з природних гірських порід-карбонатних (75...80%) і глинистих (25...20%), що забезпечує в клінкері перевагу високоосновних силікатів кальцію.

1.2.1 Карбонатні і карбонатно-глинисті породи

Вапняк - основний вид карбонатної сировини при виробництві портландцементу. До вапняків звичайно відносять породи осадового походження, що складаються з вуглекислого кальцію CaCO_3 (не менше 50%) з домішкою глинистого матеріалу, доломіту, кремнезему, оксидів заліза та ін. Вапняк з домішкою глинистих часток називається мергелистим, з домішкою доломіта - доломітодозованим, з домішкою піщаних часток - піщанистим.

Крейда - кальцитова порода, у якого частинки слабо зцементовані. Крейда складається майже цілком з тонкозернистого порошкоподібного кальциту і дрібних вапняних органічних залишків. Вміст CaCO_3 у крейді складає 98...99%. Щільність крейди від 1,6 до 2 т/м³; природна вологість 15...30%; іноді до 35...37%; міцність на стискування від 0,5 до 15 МПа.

Мергель - осадова гірська порода, що представляє собою природну суміш дрібних зерен кальциту (50...80%) і глинисто-піщаних часток (20...50%) з домішкою доломіту, кварцового піску, польового шпату. Якщо в мергелях хімічний склад такої ж, як і в сировинної суміші для виробництва портландцементу, то їх називають натуральними.

1.2.2 Глинисті породи

Глини - тонкодисперсні осадові гірські породи, що складаються з різних мінералів: каолініту, монтморілоніта, гідрослюд та інших гідроалюмосилікатів.

					БР.АКПз-44.00.00.000 ПЗ	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Глинисті сланці являють собою тверді та щільні гірські породи, для яких характерне впорядковане (орієнтоване) розміщення мінералів, тонкошарова будова і чітко виражена сланцюватість - здатність легко розщеплюватися на тонкі пластини. Порівняно з глинами, вони мають нижчий вміст вологи, більш стабільний хімічний склад і не схильні до змерзання під час зберігання в зимовий період.

1.2.3 Характеристика портландцементного клінкера

Якість портландцементного клінкера визначається його хімічним, хіміко-мінералогічним і мінералогічним складами.

1.2.3.1 Хімічний склад

Клінкер характеризується вмістом оксидів (%): CaO - 62...67; SiO_2 - 20...24; Al_2O_3 - 4...7; Fe_2O_3 - 2...5; Mg - 0,5...4,5; $\text{SO}_3 < 1$. У складі клінкера містяться також домішки лужних металів K_2O і Na_2O , оксид TiO_2 , сірка S , іноді P_2O_5 та ін.

1.2.3.2 Хіміко-мінералогічний склад

Клінкер характеризується вмістом оксидів і мінералів, його складових, у відсотках і виражається коефіцієнтом насичення кремнезему SiO_2 , оксидом кальцію CaO і модулями.

1.2.3.3 Мінералогічний (фазовий) склад

Портландцементний клінкер складається з сполук (мінералів), основні з яких (%): трикальцієвий силікат (аліт) $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ - 40...75; двокальцієвий силікат (беліт) $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ - 5...25; трикальцієвий алюмінат $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ - 2...15 і чотирьохкальцієвий алюмоферрит $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ - 5...20.

Аліт - загальна назва твердих розчинів у трьохкальцієвому силікаті: алюмінію, магнію, фосфору, хрому, натрію та інших елементів. Основа портландцементу - алюмомагнезійний аліт, що складається $54\text{CaO}\cdot 16\text{SiO}_2 \times$

					БР.АКПз-44.00.00.000 ПЗ	Арк.
						13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$\times \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{MgO}$, що містить $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ 96,8%; Al_2O_3 - 1% і MgO - 2,2%. Існують і інші форми аліта. Аліт визначає високу міцність, швидкість твердіння і ряд інших властивостей портландцементу.

Беліт - загальна назва твердих розчинів різних елементів у двокальцієвому силікаті $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$. У клінкері присутня в основному β -форма беліта.

Трьохкальцієвий алюмінат і чотирьохкальцієвий алюмоферрит (браунміллерит) містяться в клінкері в речовині, що заповнює проміжки між зернами аліта і беліта. Розрізняють "темну" проміжну речовину, що складається з C_3A , і "світлу" проміжну речовину, що представляє собою C_4AF .

У клінкері присутні інші кристалічні й аморфні утворення, вміст яких невеликий. До речовин які негативно впливають на якість клінкера відносяться оксид магнію MgO і мінерали, що містять луги.

Мінералогічний склад клінкера покладений в основу поділу портландцементів на наступні види: високоалітовий (вміст $\text{C}_3\text{S} > 60\%$), алітовий (вміст $\text{C}_3\text{S} - 50 \dots 60\%$), белітовий (вміст $\text{C}_2\text{S} > 35\%$), алюмінатний (вміст $\text{C}_3\text{A} > 12\%$) і алюмоферитний, залозистий (вміст $\text{C}_3\text{A} < 2\%$).

1.2.4 Паливо для печі

Традиційно пічним паливом є газ, мазут або вугілля. Вибір палива завжди базується на ціні та доступності. На практиці залучається тільки чиста (нетто-) теплотдатність (допускається, що вода в продуктах горіння є вивільненою, тобто випареною).

Треба також зазначити, що газовий факел (полум'я) має найменше випромінювання і потребує найбільше повітря для горіння на одиницю тепла, тобто є останнім за ефективністю. Продуктивність печі, як правило, збільшується на 2 - 3 % при переході з газу на вугілля.

Вугілля, як правило, сушиться, мелеться до залишку не більше 0,5 % (об'ємних) на ситі $(0,074) \cdot 10^{-3}$ м, та вдувається за допомогою несучого (транспортного) повітря з швидкістю на зрізі пальника в 60 - 80 м/с. Загальна

					БР.АКПз-44.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

тривалість горіння частинки вугілля залежить від її розмірів та швидкості підведення до неї повітря і складає при обертанні печі 0,1-0,3 с. Чим тонше розмелене вугілля і чим інтенсивніше воно змішується з повітрям, тим швидше воно згоряє.

Мазут може потребувати попереднього підігріву, щоб знизити в'язкість та вдувається з тиском на форсунці в 2,0 МПа. Розміри краплинок повинні бути меншими за $2 \cdot 10^{-3}$ м, що дозволяє повністю вигоріти за час знаходження всередині факелу.

Газ поступає на цементний завод від газорозподільної станції під тиском 1-7 МПа. Немає необхідності в первинному повітрі, і газ вдувається аксіально (по осі) або як суміш осьового і закрученого, під тиском 0,3-1,0 МПа і швидкістю на зрізі пальника в 300 - 400 м/с (інжекція за нормами має бути обмеженою швидкістю звуку - 430 м/с для метану при 0°C).

1.3 Будова і робота обертової печі

Обертові печі мокрої способу виробництва бувають довгі від 80 до 230 м і короткі від 40 до 80 м. Довгі обертові печі обладнають тільки внутрішніми теплообмінними пристроями (іноді їх називають також вбудованими) - ланцюговими завісами, фільтрами-підігрівниками, металевими і керамічними теплообмінниками різних типів, що встановлюються в підготовчих зонах печі. Короткі печі з ланцюговими завісами малопродуктивні і вимагають великої витрати теплоти на випалювання клінкера. У зв'язку з цим їх реконструюють, чи виводять з експлуатації. Щоб підвищити продуктивність і зменшити витрату палива, деякі короткі печі без внутрішніх теплообмінних пристроїв обладнують запічними установками - концентраторами шламу або сушарками шламу.

Оберткова піч - це порожнистий металевий циліндр, внутрішня поверхня якого облицьована вогнетривкою футерівкою. Барабан змонтований під невеликим кутом нахилу та спирається на роликові опори. У його підняту частину подається рідкий шлам, гранульована сировинна суміш або сировинне борошно. Під час обертання барабана матеріал поступово переміщується до нижнього кінця печі.

Паливо вводиться з боку нижньої частини барабана, де відбувається його

					БР.АКПз-44.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

згорання. Утворені гарячі димові гази рухаються назустріч матеріалу, що обробляється, передаючи йому тепло та поступово охолоджуючись. У результаті термічної обробки матеріал перетворюється на клінкер, який вивантажується з печі.

Пічний агрегат містить у собі:

- корпус обертової печі (барабана) з вбудованим теплообмінним пристроєм (концентратор шламу), у яких відбуваються фізико-хімічні процеси перетворення сировинних матеріалів у клінкер;

- живильник шламу, за допомогою якого в піч безупинно подається сировинна суміш;

- трьохканальний пальник, по якому вуглеповітряна суміш, мазут або газ безупинно надходять у топковий простір - зону спікання печі;

- холодильник, у якому охолоджується розпечений клінкер при виході з печі і підігрівається повітря для горіння палива;

- димотяг, що переборює аеродинамічний опір усього газового тракту агрегату та забезпечує надійну швидкість газів у печі (тягу), при якій процеси випару, підігріву і випалювання матеріалу протікають з необхідною інтенсивністю;

- пилоуловлюючі пристрої, що складаються з камери вловлювання пилу і електрофільтра, що забезпечують необхідний рівень обезпилення пічних газів і надлишкового повітря з холодильника перед викидом в атмосферу;

- пристрій для повернення в піч пилу, уловленого в пилоуловлювачах;

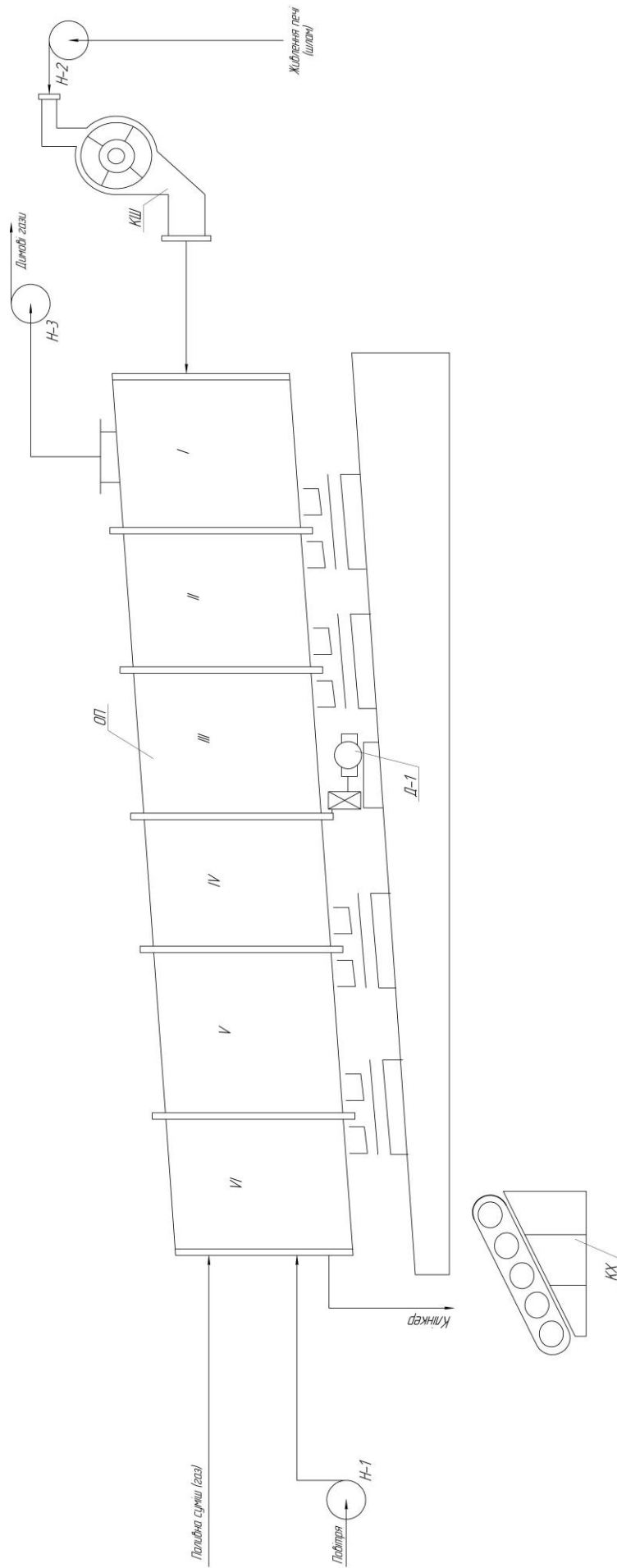
- пристрій для водяного охолодження корпусу печі в зоні спікання;

- ущільнювальні пристрої;

- контрольно-вимірювальні і регулюючі прилади й апаратура, що дозволяють з одного пункту контролювати процеси, що протікають в окремих механізмах, пристроях, частинах і зонах печі, а також регулювати інтенсивність цих процесів і керувати всією установкою з зазначеного пункту.

Оскільки дана обертова піч є короткою (довжина 69 м), то для підвищення її продуктивності і зниження витрати палива на випалювання клінкера використовують концентратор шламу, який наведений на рисунку 1.1.

					БР.АКПз-44.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16



Н-1 - компресор повітря; Н-2 - насос шламу; Н-3 - компресор димових газів; Д-1 - двигун (привід печі);
 КХ - колошниковий холодильник; КШ - концентратор шламу; ОП - обертова піч

Рисунок 1.1 - Технологічна схема випалювання клінкеру

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата
------	------	----------	--------	------

БР.АКПз-44.00.00.000 ПЗ

Арк.

17

При обертанні барабана за допомогою привода Д-1 рідкий шлам налипає на кільця і заповнювачі та швидко просушується від вологи 36-42 до 8-12%. Сухар, що утворився, у вигляді комочків і крупки просипається крізь зазори між кільцями і провалюється через живильний жолоб в обертову піч ОП. Гази, що відходять, просмоктуються через газохід за допомогою концентратора димових газів і поступають на очищення. Температура газів на виході з концентратора 150-200°C.

В обертовій печі можна виділити шість температурних зон. Між зонами, немає строгих границь, тому, що важко установити температуру газу, матеріалу і поверхні футеровки в окремих зонах реакції, що протікають, також частково перекриваються або йдуть паралельно. За характером процесів температурні зони в печі називають: I - до 200 °С - випаровування (сушіння шламу); II - 200-800 °С - підігрівання (дегідратації); III - 800-1000 °С - декарбонізації (кальцинування); IV - 1000-1300 °С - екзотермічних реакцій; V - 1300-1450-1300 °С - спікання; VI - 1300...1000 °С - охолодження.

У зоні випаровування I, що знаходиться в холодній частині печі, де надходить шлам, він піддається дії нагрітих до високої температури димових газів, що відходять. У результаті шлам нагрівається і з нього випаровується волога. Температура відхідних газів у процесі зменшується приблизно з 800–1000 до 150–250 °С.

Частина зони випаровування обладнується ланцюговими завісами, що сприяє підвищенню ефективності сушіння. Під час нагрівання шлам спочатку стає більш рідким, а згодом загусає і, втрачаючи значну кількість вологи, утворює великі грудки. При подальшому підвищенні температури ці грудки руйнуються на значно дрібніші гранули, які після проходження через ланцюгову завісу мають вологість до 12% і температуру близько 90–100 °С.

У зоні підігрівання II висушений матеріал, просуваючись уздовж печі, піддається впливу більш гарячих газів і нагрівається приблизно до 600 °С. У цій зоні поряд з підігріванням вигорають органічні домішки і губиться вода, що міститься в мінералах глинистого компонента. При цьому відбувається часткове чи

					БР.АКПз-44.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

повне розкладання глинистих мінералів на вільні оксиди SiO_2 і Al_2O_3 , а також декарбонізація вуглекислого магнію MgCO_3 . У результаті дегідратації і розпаду мінералів глинистий компонент утрачає пластичність і розсипається в порошок, що надходить у зону декарбонізації.

У зоні декарбонізації III відбувається розклад карбонату кальцію (CaCO_3). Цей процес інтенсивно протікає за температури понад $900\text{ }^\circ\text{C}$. Декарбонізація супроводжується значними витратами теплової енергії: для розкладання 1 кг CaCO_3 за реакцією $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$ необхідно близько 1785 кДж. У зв'язку з цим підведене тепло витрачається переважно на перебіг хімічної реакції, а не на підвищення температури матеріалу, що зумовлює повільне нагрівання сировинної суміші в цій зоні. Температура оброблюваного матеріалу тут знаходиться в межах $900\text{--}1200\text{ }^\circ\text{C}$.

У зоні екзотермічних реакцій IV взаємодія між основними та кислотними оксидами значно прискорюється завдяки підвищеній температурі. Твердофазні реакції супроводжуються виділенням теплоти. При температурах від $1200\text{ }^\circ\text{C}$ і вище відбувається перетворення раніше утворених низькоосновних сполук у відповідні клінкерні мінерали: однокальцієвий силікат переходить у двокальцієвий (C_2S), однокальцієвий алюмінат - у трьохкальцієвий (C_3A), а оксиди заліза формують сполуки типу C_4AF або $2\text{CaO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$.

У зоні спікання V матеріал частково переходить у рідкий стан, тобто відбувається його спікання. Цей процес починається приблизно при $1300\text{ }^\circ\text{C}$, інтенсифікується до $1450\text{ }^\circ\text{C}$ і триває при подальшому охолодженні до $1300\text{ }^\circ\text{C}$. Після утворення рідкої фази основною твердою складовою залишається двокальцієвий силікат (C_2S), який частково розчиняється в розплаві. Взаємодіючи з оксидом кальцію, він утворює трьохкальцієвий силікат (C_3S). Оскільки C_3S менш розчинний у розплаві, ніж C_2S , він кристалізується, що супроводжується подальшим розчиненням і реакцією нових порцій компонентів.

Трьохкальцієвий силікат ($3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$) є основною складовою портландцементного клінкеру. Бажано, щоб він формувався у вигляді дрібних

					БР.АКПз-44.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

добре оформлених кристалів, що досягається за умов інтенсивного випалювання та швидкого охолодження. Із зони спікання клінкер надходить у зону охолодження.

У зоні охолодження VI температура клінкеру знижується з 1300 до 1000 °С, унаслідок чого відбувається кристалізація розплаву з виділенням мінералів C_3A , C_4AF , C_2S , MgO та незначної кількості C_3S . Частина рідкої фази твердне у вигляді скла. При подальшому зниженні температури нижче 1000 °С охолодження клінкеру здійснюється у спеціальних холодильниках.

1.4 Технічна характеристика технологічного устаткування

В технологічну характеристику технологічного устаткування входить обладнання обертової печі, яка наведена в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 - Технічні характеристики технологічного устаткування

Номер позиції	Назва обладнання	Кількість	Технічна характеристика
ОП	обертова піч	1	Тонкість помолу $2,8\% \pm 0,2$. Вологість шламу $40\% \pm 2$. Теплота згорання 8000 ± 500 ккал/м ³ . Температура газів: а) після печі 200-220 °С; б) перед електрофільтром 170-190 °С; в) після електрофільтра 140-160 °С.
КХ	колошниковий холодильник	1	Готовий клінкер - транспортування на склад. Тип - ковшовий. Продуктивність 50 т/год.
КШ	концентратор шламу	1	Вимірювання витрати шламу в піч. Ємність 0,26 м ³ .
Н-2	насос шламу	1	Подача шламу в концентратор шламу. Продуктивність 200 м ³ /год..
Н-1	компресор повітря	1	Подача повітря в обертову піч.
Н-3	компресор димових газів	1	Вивід димових газів з обертової печі.

1.5 Вибір та обґрунтування параметрів контролю та регулювання

Система автоматичного регулювання процесу випалювання цементного клінкера в обертівій печі базується на якісному контролі параметрів процесу, розроблені і випробувані в цементній промисловості системи автоматичного регулювання побудовані на використанні непрямой інформації про технологічний стан матеріалу в різних зонах печі по його температурі.

Головними параметрами які впливають на процес випалювання клінкера є температури в зонах спікання та кальцинування. Температура в зоні спікання підтримується біля 1500 °С, а в зоні кальцинування - 1000 °С.

Контроль здійснюється шляхом дозуванням палива і швидкістю вентилятора димотяга, тобто через витрату димових газів. Як би не вівся процес ручним управлінням або автоматикою, більшість печей до цього часу піддаються виходу з рівноваги з причини утворення кілець, втрати обмазки і т.п., і поки що дуже багато зусиль треба прикласти в кожному випадку, щоб звести до мінімуму подібні відхилення, бо стабільність є попередньою умовою для ефективного комп'ютерного контролю.

Живлення і швидкість печі завжди контролюються в межах зафіксованих лінійних відхилень, і тому нелінійні (незвичайні) відхилення швидкості печі повинні, як найбільше, використовуватись тільки як короткотермінові дії (тобто, контроль раптового напливу матеріалу). Треба захистити точку зору, що для багатьох печей швидкість повинна утримуватись постійною на верхній межі швидкості живлення.

Від концентрації кисню, яка потрібна на вході в піч, може залежати стабільність печі та ефективність спалювання; якщо факел хороший то будемо мати 1 - 2 % O₂ і менше ніж 100 ppm (0,1%) CO, тоді як нестабільний факел може виробляти більше ніж 0,1% CO і до 3 % O₂.

Величини параметрів контролю а також регулювання є у таблиці 1.2.

					БР.АКПз-44.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

Таблиця 1.2 - Значення параметрів регулювання і контролю

Найменування параметру	Номер позиції на ФСА	Одиниця виміру	Межі коливань
Температура в зоні спікання	1-а	°С	1300 ÷ 1500
Температура в зоні кальцинування	2-а	°С	900 ÷ 1000
Температура в зоні випаровування	3-а	°С	190 ÷ 210
Температура димових газів	4-а	°С	200 ÷ 220
Витрата палива (газу)	6-а	м ³ /год	3500 ÷ 4500
Вміст СО ₂ у відхідних газах	9-а	%	1,9 ÷ 2,1
Тиск газу перед пальником	5-а	МПа	0,195 ÷ 2,005

1.6 Вибір сучасного методу автоматизації технологічного процесу

Система автоматичного керування процесом випалювання клінкеру в обортовій печі базується на якісному контролі параметрів управління.

Розроблені і випробувані в цементній промисловості системи автоматичного керування побудовані на використанні непрямой інформації про технологічний стан матеріалу в різних зонах печі по її температурі.

Основною задачею даного дипломного проекту є вдосконалення автоматичної системи керування процесом виготовлення цементу.

Для розв'язку цієї задачі необхідно:

- провести аналіз технологічного процесу як об'єкта системи автоматизації;
- проаналізувати існуючі системи керування об'єктом і виявити недоліки в існуючій системі управління;
- вибрати об'єкт керування та здійснити його експериментальне дослідження;
- провести аналіз та синтез АСК об'єкта, вибрати та розрахувати параметри налаштування регуляторів;

					БР.АКПз-44.00.00.000 ПЗ	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для покращення керування процесом доцільне встановлення багатофункціональних контролерів.

Для реалізації зазначених функцій доцільно використовувати мікропроцесорні контролери фірми «МІКРОЛ», які призначені для розв'язання широкого спектра задач автоматизації. Вони забезпечують можливість організації локального, каскадного та багатозв'язного регулювання.

Дані контролери здатні обслуговувати до двох незалежних контурів автоматичного керування з індивідуальними завданнями для кожного з них. Крім того, вони підтримують різні комбінації аналогових і дискретних входів та виходів, а також гарантують плавне (безударне) перемикання режимів роботи, увімкнення, вимкнення і переналаштування контурів регулювання.

Для збору й обробки даних пропонується застосовувати засоби автоматизації з уніфікованим вихідним сигналом. Зокрема, перетворювачі у вибухозахищеному виконанні є оптимальним рішенням, оскільки вони здійснюють безперервне перетворення вимірюваних параметрів у стандартний струмовий сигнал та забезпечують його дистанційну передачу.

Висновки до розділу

Виконано аналіз процесу випалювання клінкеру в обертовій печі при виготовленні цементу. Технологічний процес полягає у високотемпературному випалюванні сировини (карбонатні, карбонатно-глинисті і глинисті породи) і отримання попереднього продукту для виготовлення цементу - клінкеру.

Задача розробки АСК процесом випалювання клінкеру полягає у точному дотриманні технологічних параметрів, а саме:

- температура в зоні спікання повинна знаходитись в межах 1300 - 1500 °С;
- температура в зоні кальцинування в межах 900 - 1000 °С;
- витрата палива (газу) повинна не перевищувати 4500 м³/год.

					БР.АКПз-44.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

2 ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ТА ПОБУДОВА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ОБ'ЄКТА АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ

2.1 Встановлення об'єкту керування

Розроблення алгоритмів оптимального керування таким складним об'єктом, як обертова піч, є непростим завданням. Це зумовлено тим, що окремі зони печі не можуть регулюватися незалежно одна від одної, а також наявністю численних взаємопов'язаних процесів, які відбуваються під час випалювання. Додаткові труднощі виникають через обмежені можливості отримання достовірної інформації про перебіг процесу, контроль великої кількості вхідних, проміжних і вихідних параметрів, а також через значну тривалість перебування матеріалу в печі. Крім того, на процес суттєво впливає велика кількість неконтрольованих збурень.

Процес отримання цементного клінкеру є безперервним і включає нагрівання подрібненої та ретельно перемішаної сировинної суміші з подальшим охолодженням випаленого продукту. Він супроводжується складними фізико-хімічними перетвореннями та взаємодією компонентів сировини і проміжних продуктів. Визначення оптимального режиму роботи печі передбачає вибір складу сировини і палива, регулювання їх витрат, швидкості подачі первинного та вторинного повітря, коефіцієнта надлишку повітря, а також врахування вологості та дисперсності сировинної суміші. Оскільки стабільність складу суміші забезпечується на попередніх етапах автоматизації, основним завданням керування процесом випалу є підтримання сталих витрат сировини, палива та повітря, а також оптимізація подачі сировинної суміші в піч.

З технічної точки зору необхідно забезпечити рівномірне прогрівання всього об'єму матеріалу до заданої температури з подальшою витримкою протягом часу, достатнього для завершення процесів утворення клінкеру. Важливим фактором, що впливає на мінералогічний склад, є також швидкість нагрівання.

Таким чином, технологічний процес висуває ключову вимогу до режиму спалювання палива - забезпечення необхідної температури горіння та довжини

					БР.АКПз-44.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

факела, що гарантує достатній час перебування матеріалу в зоні спікання.

Відомі залежності між температурою суміші та її фізико-хімічними властивостями дозволяють використовувати температурні параметри як основні керуючі впливи. Регулюючи витрату шламу на вході в піч і тиск газу, можна стабілізувати вхідні параметри процесу. Вологість матеріалу в зоні дегідратації доцільно оцінювати за непрямим показником - температурою відхідних газів, а її регулювання здійснювати шляхом зміни подачі вторинного повітря залежно від температури газів у пиловій камері.

Надлишок повітря в печі, що визначається вмістом кисню у відпрацьованих газах, є важливим фактором стабільності та економічності горіння. Його регулювання здійснюється зміною кількості вторинного повітря: недостатній вміст кисню свідчить про неповне згоряння палива, тоді як надлишковий - про втрати тепла та збільшення винесення пилу.

Якість випалу клінкеру в зоні кальцинування забезпечується підтриманням необхідної температури шляхом регулювання подачі палива. Між температурою та витратою паливного газу існує пряма залежність, що дозволяє ефективно керувати процесом. Аналогічний принцип застосовується і в зоні спікання, де зміна подачі палива впливає на якість випалу клінкеру.

Один із прямих показників якості випалу клінкеру є вміст у ньому вільного вапна CaO. Але вимірювати цей параметр на потоці практично неможливо, тому для характеристики якості випалу використовується непрямий параметр, яким є температура в зоні спікання або гранулометричний склад клінкеру. Гранулометричний склад клінкеру можна визначити також двома непрямыми параметрами: тиском під решіткою холодильника $P_{реш}$, витратою повітря через шар клінкеру, що знаходиться на решітці $F_{п.реш}$ та струмом навантаження двигуна решітки холодильника $I_{реш}$, що є значно складнішим варіантом в його технічній реалізації. Тому більш доступною залежністю є якість клінкеру як функція температури в зоні спікання.

Температура в зоні спікання регулюється шляхом зміни витрат паливного

					БР.АКПз-44.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25

газу в піч. До особливостей обертових печей відносяться труднощі керування технологічним процесом із великою кількістю збурень, що спотворюють хід випалу. Причому дія збурень на процес часом рівні, а часом перевищують керуючі впливи, а часом вони є неконтрольовані. Збурення на піч поділяють на зовнішні і внутрішні.

Найхарактернішими зовнішніми ($\overline{f_k}$) збуреннями є:

- зміна теплотворної здатності палива;
- зміна хімічного складу, вологості, температури і тонкості потоку сировинної суміші;
- нерівномірне поступання сировинної суміші в піч;
- зміна температури і кількості повітря, що поступає в піч із холодильника (вторинна обстановка);
- зміна кількості пилу, що повертається в піч;
- випадкові зміни витрати палива;
- зміни атмосферних умов.

Дуже розповсюджена помилка про те, що ліквідувавши перераховані збурення, автоматизація не настільки актуальною. Але зменшення дисперсії цих змін представляє складну технічну задачу, яка переважно може бути розв'язана лише частково не завжди економічно оправдана.

Включення навіть більшої частини зовнішніх збурень не зменшує значимості автоматизації для обертової печі через наявність внутрішніх збурень ($\overline{z_k}$), обумовлених недосконалістю технології та впливом керуючих впливів.

До основних внутрішніх впливів ($\overline{z_k}$) відносяться:

- зношування теплообмінних пристроїв печей мокрого способу виробництва і футеровки;
- зміна швидкості руху матеріалу в печі;
- кільце утворення і руйнування кілець;
- клінкерне пилення;
- змінення положення зон у печі;

					БР.АКПз-44.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

- циркуляція лугів і пилу між матеріалом і газом;
- нерівномірність теплопередачі внаслідок зсуву зон.

Розглянемо джерела виникнення різних збурень і їх вплив на процес випалу клінкеру.

Зміна хімічного складу суміші матеріалу потребує зміни теплового режиму випалу, причому його потрібно здійснювати поступово, по мірі просування матеріалу з новими характеристиками по печі. Часто виявлення змінних характеристик матеріалу відбувається тільки при спіканні і скомпенсувати таке збурення шляхом зміни керуючих впливів стає неможливим. Тому машиніст змушений знижувати частоту обертання печі (тихий хід), що супроводжується утворенням і руйнуванням кілець у печі і підвищене зношування футеровки.

Зміна коефіцієнта насичення (КН), силікатного (n) і глиноземного (р) модулів сировинної суміші по різному впливають на якість клінкеру і на процеси, що відбуваються в зоні спікання. Так, наприклад, при температурі 1400 °С головний вплив на засвоєння вапна має величина модуля (р), потік (n), а аж потім КН.

Великий вплив на засвоєння вапна (СаО) клінкером має тонкість помолу сировини, що теж приходить керувати зміною температурного режиму зони спікання печі.

Зміна температурної здатності палива приводить до зміни умов теплообміну, швидкості поступлення матеріалу в зону спікання, а також до зміщення і зміни довжини теплових зон печі.

Температура і кількість вторинного повітря залежать в основному від температури і кількості матеріалу, що поступає на решітку холодильника з печі і від гранулометричного складу клінкеру. Зміна кількості тепла, що повертається вторинним повітрям суттєво впливає на умови згорання і на розподіл температур по довжині печі.

Первинне повітря переважно є сумішшю холодного і гарячого повітря, що відбирається з аспіраційної лінії холодильника. Оскільки температури обидвох цих

					БР.АКПз-44.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27

частин не постійні, то і температура самого первинного повітря змінна. Ця зміна температури впливає на положення місця спалаху факела, його геометричні розміри, і, як наслідок, на розподіл температур у печі.

Зміна витрати вихідних (відпрацьованих) газів, викликана утворенням і руйнуванням кілець, забиванням системи циклонних теплообмінників, а також підсмоктування холодного повітря через головку печі, діє на теплообмін одночасно у всіх технологічних зонах печі і є причиною серйозних порушень режиму.

Різні коливання температури і теплообміну в зоні спікання викликає також нерівномірність повернення в піч пилу, зношення внутрішніх (ланцюгових) теплообмінників тощо.

Якість клінкеру повинна оцінюватись наступними прямими показниками:

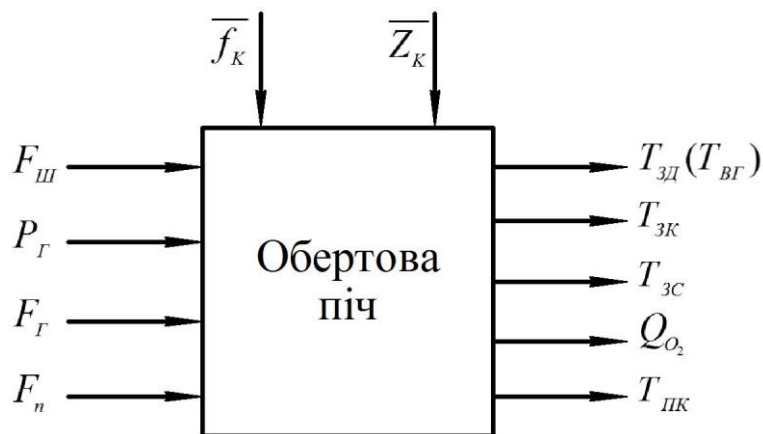
- міцністю на стискання цементу, отриманого з даного клінкеру після 3, 7, 28 діб твердіння (R_3 , R_7 , R_{28});
- мінералогічним складом клінкеру (вміст C_3S , C_3A , C_2S і C_4AF);
- наявність вільного вапна (CaO) в клінкері;
- густиною клінкеру.

Але всі ці показники якості не можуть контролюватись безперервно на потоці, тому для динамічного керування випалом використовують непрямі показники, що легко безперервно вимірюються і досить точно характеризують якість клінкеру. Такими величинами є теплотехнічні і фізико-хімічні характеристики процесу випалу і називаються режимними параметрами.

Непрямі показники мають недоліки, тому кожен із них зокрема не може бути використаний як єдиний критерій якості. У зв'язку з цим при розробці алгоритмів керування приймають комплексний показник, який складається із двох і більше непрямих якісних показників.

Виходячи з наведеного аналізу, можна представити керований об'єкт - обертову піч для мокрого способу випалу клінкеру у вигляді схеми динамічних каналів, приведених на рисунку 2.1.

					БР.АКПз-44.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28



Вхідні контрольні параметри: $F_{ш}$ - витрата шламу; $P_{г}$ - тиск паливного газу; $F_{г}$ - витрата паливного газу; F_{n} - витрата первинного повітря. Збурення: $\overline{f_k}$ - зовнішні збурення; $\overline{Z_k}$ - внутрішні збурення. Вихідні контрольовані параметри: $T_{зд} (T_{вг})$ - температура зони дегідратації (або рівносільно - температура вихідних газів); $T_{зк}$ - температура зони кальцинації; $T_{зс}$ - температура зони спікання; Q_{O_2} - концентрація кисню у вихідних газах; $T_{пк}$ - температура газу у пиловій камері, що характеризує вологість матеріалу після теплообмінника

Рисунок 2.1 - Схема динамічних каналів обертової печі

Отже, виходячи з приведеного вище, для синтезу і аналізу АСК температурою будемо розглядати дві основні зони обертової печі - зону декарбонації (кальцинування) - III і зону спікання клінкеру V, від роботи яких залежить весь процес випалу клінкеру і його якість. Структурна схема об'єкта приведена на рисунку 2.1.

Основними збурюючими факторами при умові стабілізації витрати шламу $F_{ш}$ та тиску газу $P_{г}$ є зміна фізико-хімічного складу сировини, теплотворної здатності палива, температури і кількості повітря, що поступає в піч із холодильника, які відносяться до зовнішніх $\overline{f_k}$, та внутрішні збурення, що залежить від швидкості руху сировини в печі - $\overline{Z_k}$.

					БР.АКПз-44.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29

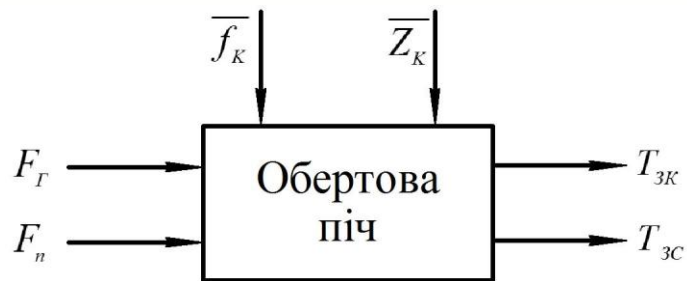


Рисунок 2.2 - Структурна схема об'єкта

Можна зробити висновок, що основним регульованим показником являється зміна витрати паливного газу в піч F_r .

Вихідними параметрами керованого об'єкту є температура в зоні кальцинування T_{zk} та температура в зоні спікання T_{zc} .

Метою регулювання температури в зазначених зонах є підтримання технологічного режиму випалу клінкеру та забезпечення його якісних показників і підвищення продуктивності печі.

2.2 Головні якісні показники а також критерії оптимальності системи автоматичного керування

Отже, з урахуванням викладеного, основною метою системи автоматизації є забезпечення та стабілізація температурного режиму в обертовій печі, необхідного для ефективного перебігу процесу випалювання клінкеру. Регулювання температури здійснюється шляхом зміни витрати паливного газу, що подається в піч.

З метою коректного проходження технологічного процесу регулювання температури встановимо такі показники якості процесу регулювання:

- максимально можлива похибка апроксимації - 2,5%;
- перерегулювання повинно бути менше - 20%;
- тривалість перехідного процесу.

2.3 Експериментальне дослідження динаміки керованого об'єкта

Під час визначення динамічних характеристик об'єкта керування на його вхід подається детерміноване збурення у вигляді одиничного стрибка, внаслідок

					БР.АКПз-44.00.00.000 ПЗ	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

чого формується перехідна характеристика як реакція системи на цей вплив. Даний підхід ґрунтується на припущенні, що об'єкт є лінійним у межах малих змін вхідної величини, його динамічні параметри залишаються сталими в часі, а вихідна змінна не залежить від просторового розташування об'єкта.

2.3.1 Підготовка, планування а також проведення експерименту

Підготовку і планування експерименту починають із вивчення об'єкта дослідження. У залежності від подальшого використання методу розрахунку параметрів налаштування регулятора об'єктом дослідження може бути або керований об'єкт, або вся система автоматичного регулювання. У нашому випадку досліджуваним об'єктом є керований об'єкт. Для цього об'єкта вибираємо вхідну і вихідну змінну.

За вхідну змінну основного каналу приймаємо переміщення регулюючого органу клапана на лінії подачі паливного газу в піч, за вихідну - температуру в зоні кальцинування, виміряну термоелектричним перетворювачем, що вмонтований в зону III печі.

За вхідну змінну допоміжного каналу приймаємо переміщення регулюючого органу клапану на лінії подачі паливного газу в піч, за вихідну - температуру в зоні спікання.

Однією із особливостей проведення експериментального дослідження являється те, що у процесі зняття кривих розгону по основному і допоміжному каналах проведення активного експерименту повинно проводитись при відсутності всяких інших збурень, крім випробувальних.

При плануванні експерименту вибираємо вид випробувальної дії, її амплітуду, початкове значення вихідної змінної, складаємо програму проведення експериментів.

За експериментальну вхідну дію вибираємо стрибкоподібне 10% - не переміщення робочого органу регулюючого клапану на лінії паливного газу, оскільки об'єкт має самовирівнювання.

					БР.АКПз-44.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

Початкове усталене значення вихідної змінної приймаємо близьким до одного з граничних його значень, враховуючи при цьому напрямок зміни вихідної величини під дією передбачуваної зміни вхідного впливу. Тобто, експеримент починаємо стрибкоподібним 10%-вим переміщенням регулюючого органу в сторону відкриття в момент, коли температура в зоні кальцинування рівна нижньому граничному значенню 900 °С і є незмінною протягом 2-25 хв. Крім реєстрації вихідної змінної - температури газу в зоні кальцинування, записуємо змінну основної збурюючої величини - витрати паливного газу в піч.

Проведення активного експерименту для процесу випалу клінкеру супроводжується суттєвими труднощами, тому такий експеримент використовують для визначення динамічних характеристик печі по газовому тракту, де час перехідного процесу порівняно з таким же часом по тракту матеріалу невеликий. Для дослідження динаміки тракту проходження матеріалу частіше використовується пасивний експеримент зі збуреннями у вигляді випадкових сигналів. При цьому для визначення динамічних характеристик використовують статистичні характеристики сигналів на вході і виході об'єкта в процесі його нормальної експлуатації. Статистичні характеристики випадкового процесу визначаються у формі оцінок кореляційних і взаємо-кореляційних функцій або у вигляді відповідних оцінок спектральних густин.

Закінчення перехідного процесу фіксуємо за незмінним значенням вихідної змінної навколо нового усталеного значення.

2.3.2 Опрацювання отриманих результатів експерименту

Отримані результати експерименту за каналами регулювання відображено у таблицях 2.1 та 2.2.

Таблиця 2.1 - Основний канал регулювання (результати експерименту)

t, c	%, вх	$T_{зк}, ^\circ C$
0	10	900
30	10	900

Продовження таблиці 2.1

t, c	%, ВХ	$T_{3K}, ^\circ C$
60	10	930,2
90	10	980,9
120	10	1025,4
150	10	1063
180	10	1089,2
210	10	1120,2
240	10	1130,9
270	10	1150,3
300	10	1160,3
330	10	1170,1
360	10	1170,8
390	10	1180,3
420	10	1180,6
450	10	1180,9
480	10	1190,2
510	10	1190,4
540	10	1190,5
570	10	1190,6
600	10	1190,7
630	10	1190,8
660	10	1190,8
690	10	1190,9
720	10	1190,9
750	10	1190,9

Таблиця 2.2 - Допоміжний канал регулювання (результати експерименту)

t, c	%, ВХ	$T_{3C}, ^\circ C$
0	10	1300
10	10	1320
20	10	1350
30	10	1380,9
40	10	1411
50	10	1431,8
60	10	1450,9
70	10	1460,9
80	10	1478
90	10	1480,3
100	10	1490,2
110	10	1490,5
120	10	1490,5
130	10	1492,8
140	10	1500
150	10	1500
160	10	1500
170	10	1500
180	10	1500
190	10	1500
200	10	1500
210	10	1500
220	10	1500
230	10	1500
240	10	1500
250	10	1500

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

БР.АКПз-44.00.00.000 ПЗ

Арк.

34

Згідно таблиць 2.1 та 2.2 побудовано на рисунках 2.3 та 2.4 експериментально отримані перехідні характеристики за каналами автоматичного регулювання.

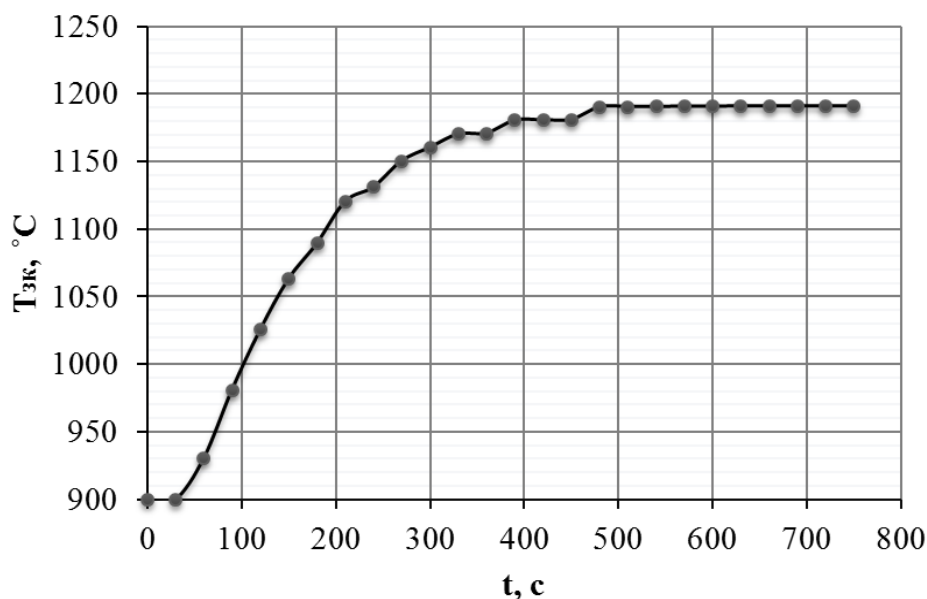


Рисунок 2.3 – Перехідна характеристика, отримана експериментальним шляхом для основного каналу автоматичного регулювання

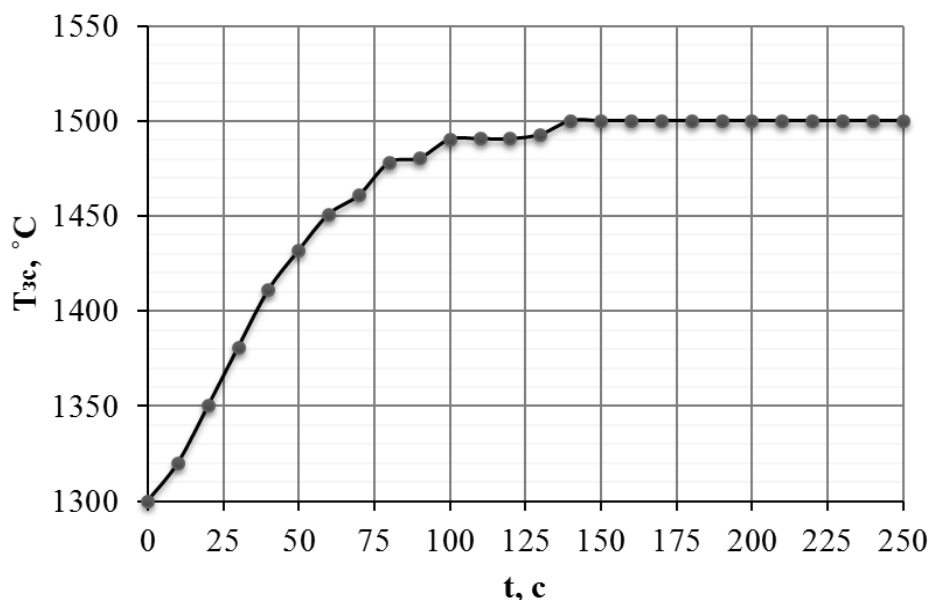


Рисунок 2.4 - Перехідна характеристика, отримана експериментальним шляхом для допоміжного каналу автоматичного регулювання

Згідно наведених нище формул проведемо перевід до безрозмірних величин отриманих експериментально даних:

$$Y_{вихi}^* = \frac{Y_{вихi} - Y_{вих0}}{Y_{вихmax} - Y_{вих0}}, \quad X_{ехi}^* = \frac{X_{ехi} - X_{ех0}}{X_{ехmax} - X_{ех0}}, \quad (2.1)$$

де $X_{ехi}$, $Y_{вихi}$ - поточні значення вхідної а також вихідної величин у одиницях вимірювання;

$X_{ех0}$, $Y_{вих0}$ - величини вхідних та вихідних величин у одиницях вимірювання до моменту нанесення певного збурення на об'єкт керування;

$X_{ехmax}$ - визначене максимальне значення вхідної величини у відповідних одиницях вимірювання;

$Y_{вихmax}$ - визначене значення вихідної величини після завершення перехідного процесу в одиницях вимірювання.

Для основного каналу регулювання були отримані наступні результати:

$$x_{ех} = 1;$$

$$y_{вих0} = \frac{900,0 - 900}{1190,9 - 900,0} = 0,0;$$

$$y_{вих1} = \frac{900,0 - 900}{1190,9 - 900,0} = 0,0;$$

$$y_{вих2} = \frac{930,20 - 900}{1190,9 - 900,0} = 0,1040;$$

$$y_{вих3} = \frac{980,90 - 900}{1190,9 - 900,00} = 0,2780;$$

$$y_{вих4} = \frac{1025,40 - 900}{1190,9 - 900,0} = 0,4310;$$

$$y_{вих5} = \frac{1063,0 - 900}{1190,9 - 900,0} = 0,560;$$

$$y_{вих6} = \frac{1089,20 - 900}{1190,9 - 900,0} = 0,650;$$

$$y_{вих7} = \frac{1120,20 - 900}{1190,9 - 900,0} = 0,7570;$$

$$y_{вих8} = \frac{1130,90 - 900}{1190,9 - 900,0} = 0,7940;$$

$$y_{вих9} = \frac{1150,30 - 900}{1190,9 - 900,0} = 0,860;$$

$$y_{вих10} = \frac{1160,30 - 900}{1190,9 - 900,0} = 0,8950;$$

$$y_{вих11} = \frac{1170,10 - 900}{1190,9 - 900,0} = 0,9280;$$

$$y_{вих12} = \frac{1170,80 - 900}{1190,9 - 900,0} = 0,9310;$$

$$y_{вих13} = \frac{1180,30 - 900}{1190,9 - 900,0} = 0,9640;$$

$$y_{вих14} = \frac{1180,60 - 900}{1190,9 - 900,0} = 0,9650;$$

$$y_{вих15} = \frac{1180,90 - 900}{1190,9 - 900,0} = 0,9660;$$

$$y_{вих16} = \frac{1190,20 - 900}{1190,9 - 900,0} = 0,9980;$$

$$y_{вих17} = \frac{1190,40 - 900}{1190,9 - 900,0} = 0,9980;$$

					БР.АКПз-44.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

$$y_{вих18} = \frac{1190,50 - 900}{1190,9 - 900,0} = 0,9990;$$

$$y_{вих19} = \frac{1190,60 - 900}{1190,9 - 900,0} = 0,9990;$$

$$y_{вих20} = \frac{1190,70 - 900}{1190,9 - 900,0} = 0,9990;$$

$$y_{вих21} = \frac{1190,80 - 900}{1190,9 - 900,0} = 1,0;$$

$$y_{вих22} = \frac{1190,80 - 900}{1190,9 - 900,0} = 1,0;$$

$$y_{вих23} = \frac{1190,80 - 900}{1190,9 - 900,0} = 1,0;$$

$$y_{вих24} = \frac{1190,80 - 900}{1190,9 - 900,0} = 1,0;$$

$$y_{вих25} = \frac{1190,80 - 900}{1190,9 - 900,0} = 1,0.$$

Таблиця 2.3 – Результати проведеного експерименту по основному каналу регулювання у безрозмірних одиницях

<i>t, c</i>	<i>y_{вих}</i>	<i>x_{ex}</i>
0	0	1
30.0	0	1
60.0	0,104	1
90.0	0,278	1
120.0	0,431	1
150.0	0,56	1
180.0	0,65	1
210.0	0,757	1
240.0	0,794	1
270.0	0,86	1
300.0	0,895	1
330.0	0,928	1
360.0	0,931	1
390.0	0,964	1
420.0	0,965	1
450.0	0,966	1
480.0	0,998	1
510.0	0,998	1

t, c	$y_{вих}$	x_{ex}
540.0	0,999	1
570.0	0,999	1
600.0	0,999	1
630.0	1,0	1
660.0	1,0	1
690.0	1,0	1
720.0	1,0	1
750.0	1,0	1

На основі отриманих даних побудуємо експериментальну перехідну характеристику на основі даних поданих у безрозмірних одиницях.

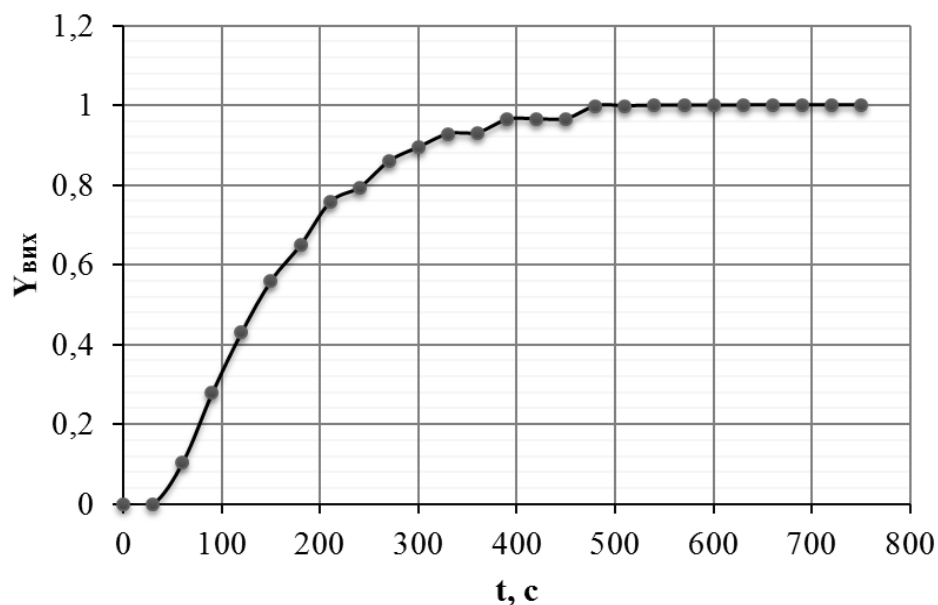


Рисунок 2.5 - Експериментально отримана перехідна характеристика основного каналу подана у безрозмірних одиницях

Апроксимацію виконано із використанням спеціалізованого програмного забезпечення Апрох. У результаті отримано передавальну функцію, яка має такий вигляд:

$$W_0(p) = \frac{-12.3740p + 1,00}{5994.3110p^2 + 149.9050p + 1,00} \quad (2.2)$$

У результаті апроксимації максимальною являється похибка 2,2% в точці $t = 60$ с (додаток А1).

Криву допоміжного каналу опрацюємо по такому самому сценарію. Отже:

$$x_{ex} = 1;$$

$$y_{вих0} = \frac{1300 - 1300}{1500 - 1300} = 0;$$

$$y_{вих1} = \frac{1320 - 1300}{1500 - 1300} = 0,1;$$

$$y_{вих2} = \frac{1350 - 1300}{1500 - 1300} = 0,25;$$

$$y_{вих3} = \frac{1380,9 - 1300}{1500 - 1300} = 0,4045;$$

$$y_{вих4} = \frac{1411 - 1300}{1500 - 1300} = 0,555;$$

$$y_{вих5} = \frac{1431,8 - 1300}{1500 - 1300} = 0,659;$$

$$y_{вих6} = \frac{1450,9 - 1300}{1500 - 1300} = 0,7545;$$

$$y_{вих7} = \frac{1460,9 - 1300}{1500 - 1300} = 0,8045;$$

$$y_{вих8} = \frac{1478 - 1300}{1500 - 1300} = 0,89;$$

$$y_{вих9} = \frac{1480,3 - 1300}{1500 - 1300} = 0,9015;$$

$$y_{вих10} = \frac{1490,2 - 1300}{1500 - 1300} = 0,951;$$

$$y_{вих11} = \frac{1490,5 - 1300}{1500 - 1300} = 0,9525;$$

$$y_{вих12} = \frac{1490,5 - 1300}{1500 - 1300} = 0,9525;$$

$$y_{вих13} = \frac{1492,8 - 1300}{1500 - 1300} = 0,964;$$

$$y_{вих14} = \frac{1500 - 1300}{1500 - 1300} = 1;$$

$$y_{вих15} = \frac{1500 - 1300}{1500 - 1300} = 1;$$

$$y_{вих16} = \frac{1500 - 1300}{1500 - 1300} = 1;$$

$$y_{вих17} = \frac{1500 - 1300}{1500 - 1300} = 1;$$

$$y_{вих18} = \frac{1500 - 1300}{1500 - 1300} = 1;$$

$$y_{вих19} = \frac{1500 - 1300}{1500 - 1300} = 1;$$

$$y_{вих20} = \frac{1500 - 1300}{1500 - 1300} = 1;$$

$$y_{вих21} = \frac{1500 - 1300}{1500 - 1300} = 1;$$

$$y_{вих22} = \frac{1500 - 1300}{1500 - 1300} = 1;$$

$$y_{вих23} = \frac{1500 - 1300}{1500 - 1300} = 1;$$

$$y_{вих24} = \frac{1500 - 1300}{1500 - 1300} = 1;$$

$$y_{вих25} = \frac{1500 - 1300}{1500 - 1300} = 1.$$

					БР.АКПЗ-44.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		39

Таблиця 2.4 - Результати експерименту по допоміжному каналу регулювання у безрозмірних одиницях

t, c	$y_{вих}$	x_{ex}
0	0	1
10.0	0,1	1
20.0	0,25	1
30.0	0,4045	1
40.0	0,555	1
50.0	0,659	1
60.0	0,7545	1
70.0	0,8045	1
80.0	0,89	1
90.0	0,9015	1
100.0	0,951	1
110.0	0,9525	1
120.0	0,9525	1
130.0	0,964	1
140.0	1,0	1
150.0	1,0	1
160.0	1,0	1
170.0	1,0	1
180.0	1,0	1
190.0	1,0	1
200.0	1,0	1
210.0	1,0	1
220.0	1,0	1
230.0	1,0	1
240.0	1,0	1
250.0	1,0	1

Згідно таблиці 2.4 будемо експериментальну перехідну характеристику у вигляді безрозмірних одиниць по допоміжному каналу (рисунок 2.6).

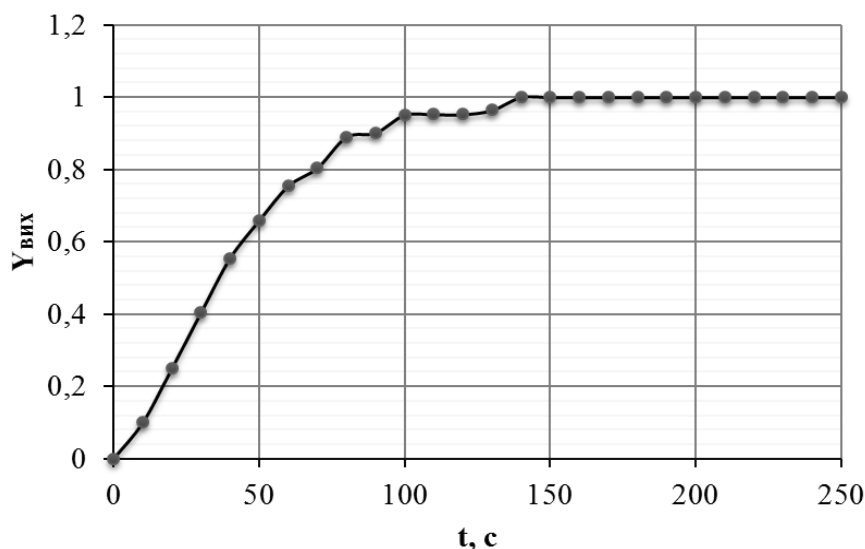


Рисунок 2.5 - Експериментальна перехідна характеристика допоміжного каналу в безрозмірних одиницях

Апроксимацію виконано з використанням спеціалізованого програмного забезпечення Аргох. У результаті отримана передавальна функція має наступний вигляд:

$$W_1(p) = \frac{4,6761p + 1,0}{661,87201p^2 + 48,5091p + 1,0} \quad (2.3)$$

У результаті апроксимації максимальна похибка становить 2,2% у точці $t = 80$ с (додаток А2). Отримані результати створюють основу для подальших розрахунків.

Висновки до розділу

В описаному розділі вибрано, а також обґрунтовано об'єкт керування. Проведено визначення структурної схема з точки зору автоматизації. Здійснено апроксимацію даних експериментальних досліджень, котрі відповідно були отримані у процесі проведення експериментального дослідження. Відповідно до отриманих експериментальних даних встановлено передавальні функції об'єкта як за допоміжним так і за основним каналами автоматичного регулювання з використанням ЕОМ.

					БР.АКПз-44.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		41

3 СИНТЕЗ ЕФЕКТИВНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ

3.1 Побудова одноконтурної системи автоматичного керування

Спрощена одноконтурна функціональна схема апарата представлена на рисунку 3.1.



$W_p(p)$ - передавальна функція регулятора; $W_0(p)$ - передавальна функція керованого об'єкту

Рисунок 3.1 - Структура одноконтурної АСК

Даний об'єкт є самовирівнювальним та за нормальних умов функціонує при повному навантаженні. Для забезпечення необхідних показників якості регулювання та підвищення стійкості системи автоматичного керування доцільно застосувати регулятор із ПІ-законом регулювання.

Даний закон автоматичного регулювання описується у загальному такою функцією передачі:

$$W_p(p) = \frac{C_1 p + C_0}{p}. \quad (3.1)$$

Визначимо передавальну функцію замкненої системи, для цього запишемо передавальну функція розімкненої системи керування:

$$W_{роз}(p) = \frac{-12,37401p + 1,0}{5994,311p^2 + 149,905p + 1,0} \cdot W_p(p); \quad (3.2)$$

$$\begin{aligned} W_{роз}(p) &= \frac{-12,37401p + 1}{5994,311p^2 + 149,905p + 1} \cdot \frac{C_1 p + C_0}{p} = \\ &= \frac{(-12,37401p + 1)(C_1 p + C_0)}{5994,311p^3 + 149,905p^2 + p}. \end{aligned}$$

У загальному вигляді передавальна функція замкненої системи автоматичного регулювання, структурна схема котрої представлена на рисунку 3.1 має такий вигляд:

					БР.АКПз-44.00.00.000 ПЗ	Арк.
						42
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$W_{зам}(p) = \frac{W_{роз}(p)}{1 + W_{роз}(p)}; \quad (3.3)$$

$$W_{зам}(p) = \frac{\frac{(-12,37401p + 1)(C_1p + C_0)}{5994,311p^3 + 149,905p^2 + p}}{1 + \frac{(-12,37401p + 1)(C_1p + C_0)}{5994,311p^3 + 149,905p^2 + p}} =$$

$$= \frac{(-12,37401p + 1)(C_1p + C_0)}{5994,311p^3 + 149,905p^2 + p + (-12,37401p + 1)(C_1p + C_0)}.$$

Пошук (визначення) оптимальних параметрів регулятора виконаємо за допомогою функції Tune програмного продукту Matlab. Результати роботи підпрограми наведені у додатку Б1 ($K_p = C_1 = 0.5623$, $K_i = C_0 = 0.005564$).

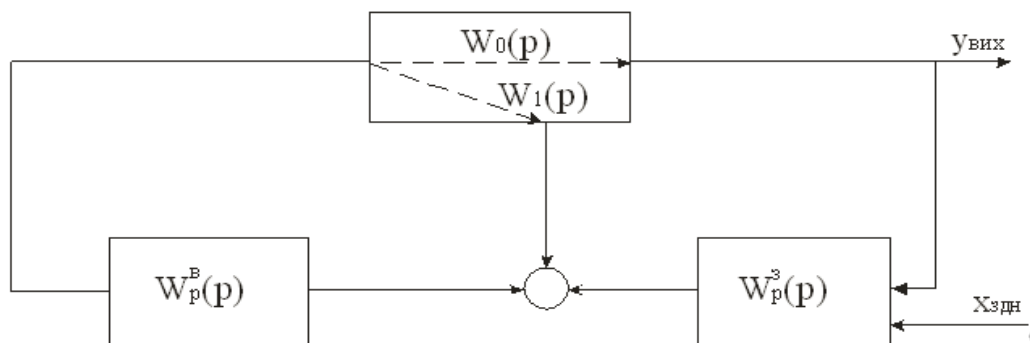
Підставивши числові значення одержимо:

$$W_{зам}(p) = \frac{-6.95790p^2 + 0.4934p + 0.005564}{5994.311p^3 + 142.947p^2 + 1.4934p + 0.005564}.$$

3.2 Розробка каскадної системи автоматичного керування

Для реалізації АСК до наявного основного контуру керування потрібно додати допоміжний контур автоматичного регулювання. Таким контуром являється контур регулювання величини температури безпосередньо у зоні спікання.

Алгоритмічна структурна схема каскадної системи наведена на рисунку 3.2.



$W_1(p)$ - допоміжний канал; $W_0(p)$ - основний канал; $W_p^в(p)$ - внутрішній регулятор; $W_p^з(p)$ - зовнішній регулятор

Рисунок 3.2 - Алгоритмічна структура каскадної АСК

Дослідження каскадної системи почнем з розробки основного регулятора для

					БР.АКПз-44.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		43

якого передавальна функція в загальному має наступний вигляд:

$$W_e'(p) = \frac{W_0(p)W_p^e(p)}{1 + W_p^e \cdot W_1(p)}, \quad (3.4)$$

Передавальну функцію основного а також допоміжного каналів уже було визначено вище:

$$W_0(p) = \frac{-12,374p + 1}{5994,311p^2 + 149,905p + 1}.$$

$$W_1(p) = \frac{4,676p + 1}{661,872p^2 + 48,509p + 1}.$$

Здійснимо припущення, що поточна робоча частота основного контуру регулювання W_p' являється значно меншою, за поточну робочу частоту допоміжного W_p'' контуру регулювання. У цьому випадку, за умови виконання відповідної умови, $W = W_p'$ справедливою буде така нерівність:

$$\frac{1}{(W_p^e(j\omega))} \ll (W_1(j\omega)). \quad (3.5)$$

Отже:

$$\begin{aligned} W_e'(p) &= \frac{W_0(p)}{W_1(p)} = \frac{\frac{-12,37401p + 1}{5994,311p^2 + 149,905p + 1}}{\frac{4,676p + 1}{661,872p^2 + 48,509p + 1}} = \\ &= \frac{-8190,004p^3 + 61,621634p^2 + 36,135p + 1}{28029,3982p^3 + 6695,26678p^2 + 154,581p + 1}. \end{aligned}$$

Пошук оптимальних параметрів ПІ-регулятора виконаємо за допомогою функції Tune програмного продукту Matlab. Результати роботи підпрограми наведені у додатку Б2 ($K_p = C_1 = 0,001814$, $K_i = C_0 = 0,003139$.).

Отже одержимо:

$$W_p^3(p) = \frac{0,001814p + 0,003139}{p}. \quad (3.6)$$

Для допоміжного каналу автоматичного регулювання також проведемо розрахунок:

					БР.АКПз-44.00.00.000 ПЗ	Арк.
						44
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$W_e''(p) = W_0(p) \cdot W_p^3(p) + W_1(p).$$

Одразу після підставлення числових значень одержимо:

$$W_e''(p) = \frac{-12,37401p + 1}{5994,3101p^2 + 149,9015p + 1} \cdot \frac{0,001814p + 0,003139}{p} + \frac{4,676p + 1}{661,872p^2 + 48,509p + 1} = \frac{28014.5415p^4 + 6669.67p^3 + 154.83998p^2 + 1.1152p + 0.003139}{3.967 \cdot 10^6 p^5 + 389995.951p^4 + 13927.9246p^3 + 198.414p^2 + p}.$$

Пошук (визначення) оптимальних параметрів ПІ-регулятора виконаємо за допомогою функції Tune програмного продукту Matlab. Результати роботи підпрограми наведені у додатку Б2 ($K_p = C_1 = 307,1$, $K_i = C_0 = 87,24$).

Отже одержимо:

$$W_p^e(p) = \frac{307,10p + 87,24}{p}.$$

Еквівалентна передавальна функція для каскадної АСК у загальному має таке наведення вигляду:

$$W_e^{кас}(p) = \frac{W_p^3(p) \cdot W_0(p) \cdot W_p^e(p)}{W_p^3(p) \cdot W_0(p) \cdot W_p^e(p) + W_1(p) \cdot W_p^e(p) + 1}, \quad (3.7)$$

а після підставлення числових значень та виконання певних обчислень наступний:

$$W_e^{кас}(p) = \frac{-4562.480p^5 - 9156.821p^4 - 2153.5181p^3 + 57.980p^2 + 11.018p + 0.2738}{3.971 \cdot 10^6 p^6 + 8.991 \cdot 10^6 p^5 + 4.52 \cdot 10^6 p^4 + 629611.79p^3 + 13851.731p^2 + 98.261p + 0.2738}.$$

3.3 Виконання дослідження стійкості одноконтурної автоматичної системи керування

Система автоматичного керування, Згідно з критерієм Михайлова, яка описується за допомогою рівняння n -ого порядку, являється стійкою, у випадку коли побудований годограф Михайлова послідовно проходить n квадрантів та йде у безкінечність.

У нашому випадку характеристичний поліном матиме такий вигляд:

					БР.АКПз-44.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		45

$$F(p) = 5994.3111p^3 + 142.9472p^2 + 1.49341p + 0.005564.$$

Прирівнявши до нуля одержимо:

$$5994.3111p^3 + 142.9472p^2 + 1.49341p + 0.005564 = 0.$$

Виконавши заміну $p = j\omega$ одержимо:

$$-5994.3111j\omega^3 - 142.9472\omega^2 + 1.49341j\omega + 0.005564 = 0.$$

З отриманого рівняння виокремимо дійсну та уявну частини:

$$P(\omega) = -142.9472\omega^2 + 0.005564;$$

$$Q(\omega) = -5994.3111\omega^3 + 1.49341\omega.$$

За допомогою Mathcad побудуємо годограф Михайлова (Додаток В1). З наведених результатів можна зробити висновок, що годограф Михайлова послідовно перетинає три квадранти і йде у безкінечність, що задовольняє умови стійкої системи за критерієм Михайлова.

3.4 Виконання дослідження стійкості каскадної автоматичної системи керування

У нашому випадку характеристичний поліном матиме такий вигляд:

$$F(p) = 3.9701 \cdot 10^6 p^6 + 8.9901 \cdot 10^6 p^5 + 4.501 \cdot 10^6 p^4 + 629611.7901 p^3 + 13851.731 p^2 + 98.2601 p + 0.27380.$$

Характеристичний поліном прирівняє до нуля:

$$3.9701 \cdot 10^6 p^6 + 8.9901 \cdot 10^6 p^5 + 4.501 \cdot 10^6 p^4 + 629611.7901 p^3 + 13851.731 p^2 + 98.2601 p + 0.2738 = 0.$$

Виконавши заміну $p = j\omega$ одержимо:

$$-3.9701 \cdot 10^6 \omega^6 + 8.9901 \cdot 10^6 j\omega^5 + 4.501 \cdot 10^6 \omega^4 - 629611.7901 j\omega^3 - 13851.731 \omega^2 + 98.2601 j\omega + 0.2738 = 0.$$

З отриманого рівняння виокремимо дійсну та уявну частини:

$$P(\omega) = -3.9701 \cdot 10^6 \omega^6 + 4.501 \cdot 10^6 \omega^4 - 13851.731 \omega^2 + 0.2738;$$

$$Q(\omega) = 8.9901 \cdot 10^6 \omega^5 - 629611.7901 \omega^3 + 98.2601 \omega.$$

За допомогою Mathcad побудуємо годограф Михайлова (Додаток В2). З

					БР.АКПз-44.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

наведених результатів можемо побачити, що годограф Михайлова проходить шість квадрантів і йде у безкінечність, що задовольняє умови стійкої системи за критерієм Михайлова.

3.5 Визначення якісних показників системи керування

З метою ефективної оцінки перехідного процесу з розробленими регуляторами виконаємо побудову перехідної характеристики одноконтурної системи автоматичного керування. Зазначену побудову здійснимо за допомогою використання програмного пакета Matlab, а точніше за допомогою підпрограми Simulink (рис. 3.3).

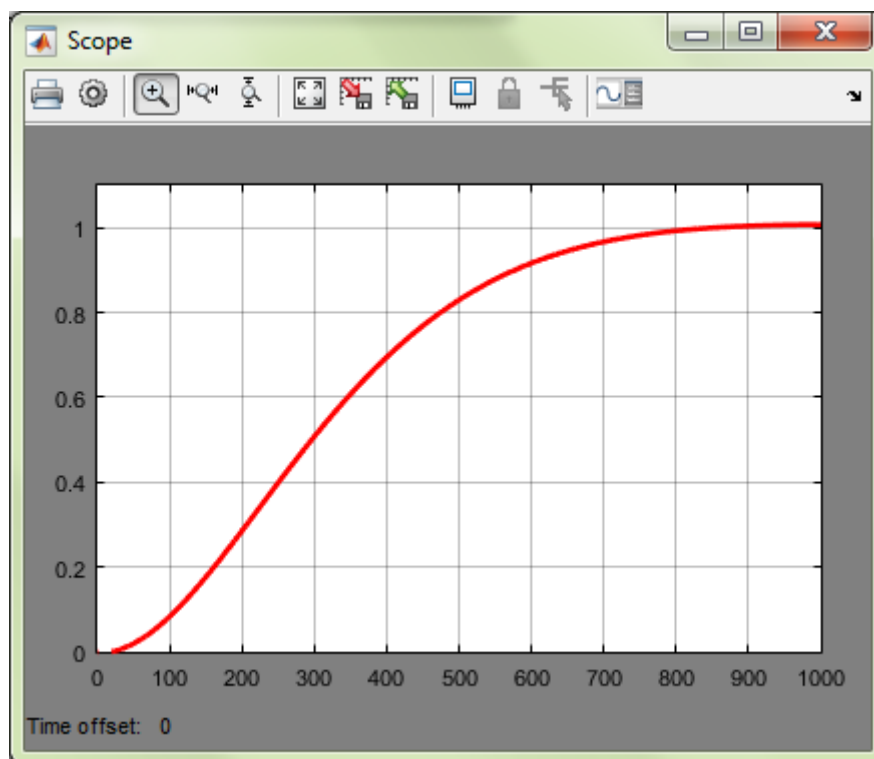
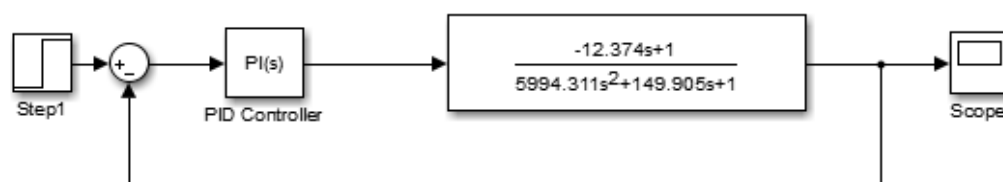


Рисунок 3.3 - Перехідна характеристика одноконтурної системи

З рисунку 3.3 виділимо показники, які описані в пункті 2.2:

- час перехідного процесу:

$$t_n = 800 \text{ c};$$

					БР.АКПз-44.00.00.000 ПЗ	Арк. 47
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- перерегулювання системи:

$$\delta = 0\% .$$

Аналогічним чином виконаємо побудову перехідної характеристики каскадної системи автоматичного керування. Зазначену побудову здійснимо також за допомогою використання програмного пакета Matlab, а точніше за допомогою підпрограми Simulink (рис. 3.4).

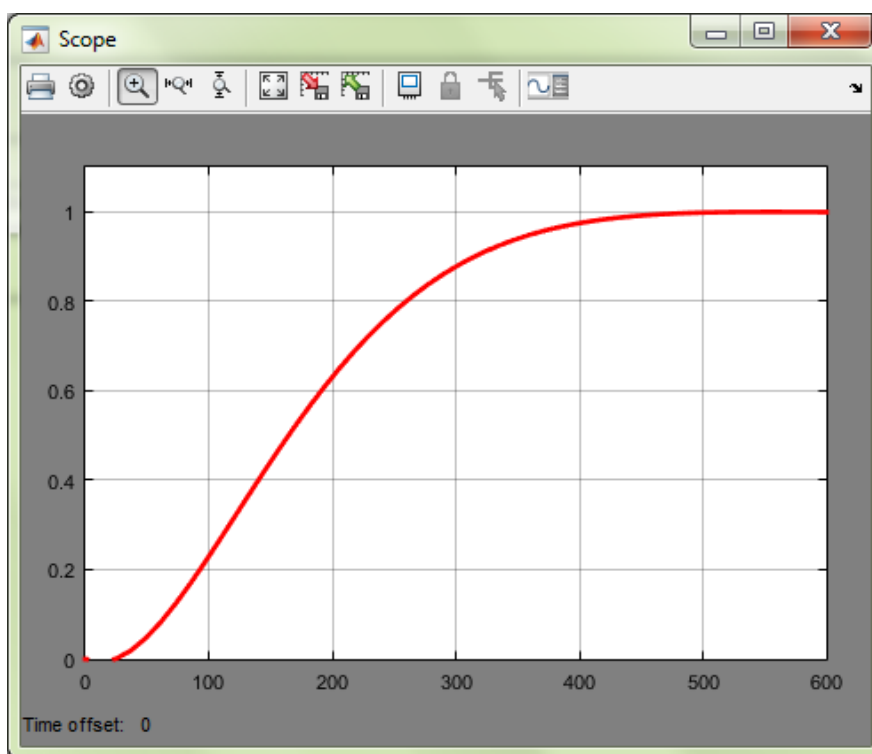
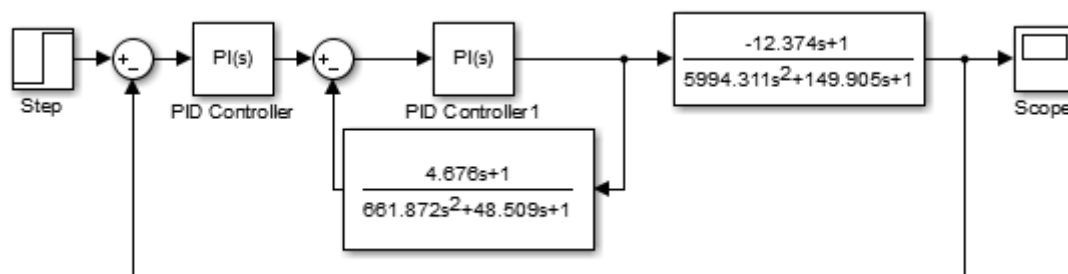


Рисунок 3.4 - Перехідна характеристика каскадної системи

З рисунку 3.4 виділимо показники, які описані в пункті 2.2:

- час перехідного процесу:

$$t_n = 470 \text{ с.}$$

- перерегулювання системи:

$$\delta = 0\% .$$

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Висновки до розділу

Виконано ґрунтовний аналіз автоматичної системи керування. Досліджено схеми керування каскадної та одноконтурної систем.

Визначено параметри налаштування регуляторів для даних системи керування та здійснено аналіз стійкості цих систем за критерієм Михайлова, який показав, що досліджувані системи є стійкими. Визначено якісні показники досліджуваних систем та відображені їхні перехідні характеристики.

					БР.АКПз-44.00.00.000 ПЗ	Арк.
						49
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4 РОЗРОБКА ПРОЕКТНОЇ ДОКУМЕНТАЦІЇ НА САК

4.1 Побудова структурної схеми системи автоматичного керування

В процесі розробки системи керування потрібно чітко визначити з яких саме місць відбувається управління кожним з об'єктів. Де безпосередньо будуть розташовуватись операторські приміщення, пункти управління, яким повинен бути зв'язок між ними. У загальному під структурою управління мається на увазі деяка сукупність частин усієї автоматичної системи безпосередньо на які така система може бути розділена по встановлених у нормативних документах ознаках, а також певні шляхи передавання інформації між цими системами. Графічне відображення структури управління має назву - структурна схема. Вказана схема являє головним проектним документом.

На структурній схемі у загальному вигляді відображаються всі ключові проектні рішення, що стосуються функціональної, організаційної та технічної побудови автоматичної системи керування. При цьому забезпечується повне дотримання ієрархії системи, а також взаємозв'язків між пунктами контролю й управління, залученим персоналом і технологічним об'єктом керування.

Розробка такої системи збору даних здійснюватиметься з урахуванням наведених вимог:

- забезпечення надійної, а як наслідок - ефективної та продуктивної роботи підприємства шляхом виконання всіх необхідних функцій системи керування, які безпосередньо пов'язані з регулюванням технологічних змінних, а також із захистом технологічного процесу та всього обладнання;

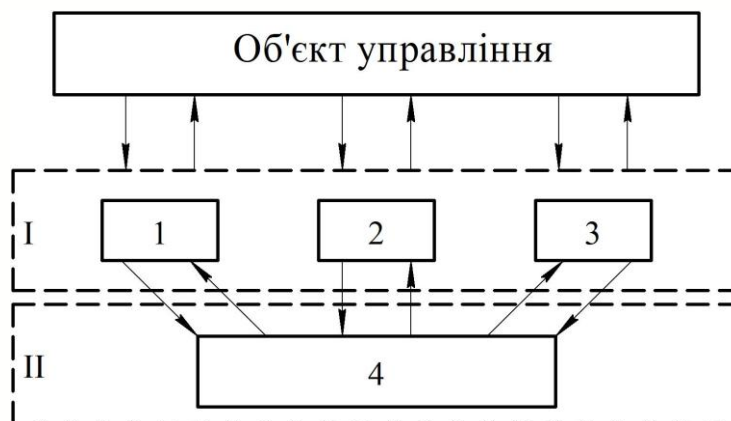
- забезпечення взаємодії в режимі реального часу між оператором системи та обслуговуючим персоналом із технологічним процесом і обладнанням, що безпосередньо задіяне у виробничому процесі;

- видача інформації котра безпосередньо необхідна для обліку а також керівництва роботою усього підприємства.

З метою досягнення конкретної мети керування для розроблюваного

					БР.АКПз-44.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		50

дипломного проекту запропоновано двохрівневу систему управління (рис. 4.1) де на першому рівні передбачене місцеве управління агрегатами котре здійснюється апаратчиками з робочих постів, а на другому рівні розташоване централізоване управління агрегатами, які входять у даний технологічний процес.



I - перший рівень системи управління (1 - 3 - регулятори а також індикатори);

II - другий рівень системи управління (4 - ПЕОМ)

Рисунок 4.1 - Структурна схема АСК

4.2 Вибір технічних засобів для автоматизації процесу випалювання клінкеру в обертовій печі

Здійснивши аналіз процесу випалювання клінкеру в обертовій печі, вимог параметрів контролю чи регулювання здійснимо ґрунтовний вибір технічних засобів автоматизації для даного виробництва.

4.2.1 Вибір давачів

Для вимірювання температури на вході обертової печі використовуємо термопару з захисною гільзою та вимірювальним модулем SensyTemp Heavy Duty (рис. 4.2). Термопара використовується для вимірювання температури гарячих газових потоків, а також температури в процесах горіння (домни, цементні та скловарочні печі, печі для випалу цегли та інші) в температурному діапазоні до 1200 °С.

					БР.АКПз-44.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		51



Рисунок 4.2 - Термопара SensyTemp Heavy Duty

Коротка характеристика приладу:

- діапазон вимірювання температури - 100°C - 1200°C;
- діаметр дроту 2.5 мм;
- клас точності 1200 °C;
- склад термопари:
 - термопара в керамічному капілярі;
 - захисна гільза із вогнетривкої сталі;
 - фланець або втулка із зовнішньою різьбою для кріплення гільзи;
 - з'єднувальна головка;
 - перетворювач (4 ... 20 мА), розміщений в з'єднувальній головці;
 - стандартні довжини гільзи: 500, 710, 1000, 1400 мм.

Температура в зоні кальцинування є найважливішим параметром, що характеризує хід всього технологічного процесу та забезпечує необхідну якість клінкеру. Для вимірювання температури в зоні кальцинування використовуємо термоелектричний перетворювач типу ТХА-2174 (рис. 4.3).

Коротка характеристика приладу:

- діапазон вимірювання температури - 100°C - 1300°C;
- частота відліку 100 раз в 1 секунду;

					БР.АКПз-44.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		52

- точність відрахування - 1°C;
- опір термопари а також вимірювального каналу становить до 100 Ом;
- компенсація холодного спаю - автоматична з точністю 0.01°C;
- робоча температура - +5°C - 50°C;
- живлення – 220 В, 60 Гц;
- споживана потужність - 3 Вт;
- вихідний сигнал 4-20 мА.



Рисунок 4.3 - Термоелектричний перетворювач ТХА-2174

Для вимірювання витрати палива та кисню використаємо інтелектуальний вихровий витратомір SVM 3000 PLUS фірми Honeywell (рис. 4.4), що здійснює вимірювання об'ємної витрати середовищ з різноманітними характеристиками:

- насичена пара;
- перегріта пара;
- газ;
- рідини з низькою в'язкістю.



Рисунок 4.4 - Витратомір SCM 3000 PLUS

					БР.АКПз-44.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		53

Точність даного приладу складає $< 1\%$ витрати для газу та $< 0.75\%$ витрати для рідини. Даний витратомір працює в температурному режимі від $- 200$ до $+ 400^{\circ}\text{C}$, має широкий діапазон вимірювання - до 45:1, а також здійснює самоконтроль і діагностику електроніки.

Для аналізу якості димових газів використаємо газовий хроматограф SGC 3000 фірми Honeywell (рис. 4.5). Набагато легший, ніж стандартні газові хроматографи, забезпечує управління виробничими процесами реального часу з мінімальним часом аналізу, всього 30 секунд.



Рисунок 4.5 - Газовий хроматограф SGC 3000

Коротка характеристика приладу:

- число компонентів: 1 компонент - вихід 4 - 20 мА;
- цикл аналізу 30 - 180 сек.;
- точність $\pm 1\%$ повної шкали;
- температура навколишнього середовища від $- 10$ до $+ 50^{\circ}\text{C}$;
- температура технологічного газу від 0 до $+ 200^{\circ}\text{C}$;
- монтаж: вертикальна труба 5.1 см. (без кожуха);
- стійкість до пилу – діаметр частинок 5 мкм. і менше.

З метою точного вимірювання тиску у колонах використовуватимемо перетворювачі тиску Сапфір-22ДІ 2161, котрі володіють такими основними характеристиками:

- максимальний тиск 4 МПа;
- клас точності $\pm 0,5\%$;

					БР.АКПз-44.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		54

- струмовий вихід 4...20 мА;
- температура середовища у якому здійснюється вимірювання - до 300 °С.



Рисунок 4.6 - Перетворювач тиску **Сапфір-22ДІ 2161**

4.2.2 Вибір виконавчого механізму

Для виконання функцій виконавчого механізму застосуємо електропривідний клапан V2001-Е3.



Рисунок 4.7 - Клапан V2001-Е3

Вибір виконавчого механізму здійснено з урахуванням необхідної пропускної здатності, максимального робочого тиску та діаметра умовного проходу.

Обрані клапани призначені для роботи з рідкими та газоподібними середовищами, а також із водяною парою.

Клапан V2001-вбудований у привід типу 3372 та має вхідний сигнал 4...20 мА а також максимальний тиск живлення до 6 атм.

					БР.АКПз-44.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		55

4.2.3 Вибір регуляторів

Мікропроцесорні контролери в системах автоматизації являються одними з найважливіших елементів. Для даного проекту вибрано багатофункціональний контролер серії МІК-51.

Дані контролери призначаються для автоматичного регулювання і логічного керування широким спектром технологічних процесів. Лицьова панель мікропроцесорного контролера наведена на рисунку 4.8.



Рисунок 4.8 - Загальний вигляд регулятора МІК-51

Контролер МІК-51 дозволяє вести як локальне й каскадне так само й програмне і багатозв'язне регулювання параметрів технологічного процесу.

Базова архітектура мікропроцесорного контролера гарантує можливість автоматично та ручного включення, відключення, переключення та реконфігурації контурів регулювання. Зазначені операції можуть виконуватись абсолютно незалежно від складності та структури системи керування. Разом з обробкою аналогових сигналів мікропроцесорний контролер МІК-51 дає можливість виконувати логічні перетворення сигналів та виробляти різноманітні команди керування.

Наявні у бібліотеці функціональні блоки призначені для формування логічної програми керування. Пляд з можливістю обробки дискретних сигналів МІК-51 може застосовувати цілий ряд різноманітних функціональних перетворень аналогових сигналів та виробляти не тільки дискретні, але й аналогові керувальні

						БР.АКПз-44.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			56

сигнали.

МІК-51 оснащений засобами для оперативного керування. Такі засоби розташовуються на лицьовій панелі контролера. За допомогою цих засобів є можливість ручної зміни режимів роботи, можливість встановлення певних завдань, можливість керування ходом виконання програми, можливість ручної зміни керування виконавчими пристроями. Також є можливість контролювати сигнали а також реєструвати помилки. Зазначені технологічні елементи відображені на рисунку 4.9.



Рисунок 4.9 - Елементи оперативного управління

До складу мікропроцесорного контролера МІК-51 входять центральний мікропроцесорний блок та необхідний для підєднання клемно-блочний з'єднувач. Центральний мікропроцесорний блок призначений для перетворення аналогових і дискретних сигналів у цифровий формат, а також для обробки цифрової інформації та формування необхідних керуючих сигналів.

Контролер МІК-51 є проектно-компонованим пристроєм, який конфігурується відповідно до конкретних потреб виробництва. Його склад і основні параметри визначаються замовником та зазначаються під час оформлення замовлення.

Контролер МІК-51 передбачає:

- Не більше 9 окремо діючих контурів автоматичного регулювання. Кожен із зазначених контурів може бути як локальним так само й каскадним. Може мати аналогові чи за потреби імпульсні виходи, а також може забезпечувати як ручне та програмне так само й супервізорне керування.

- Наявність великої кількості вбудованих функціональних блоків.

					БР.АКПз-44.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		57

- Близько 100 блоків, які мають можливість вільного заповнення блоками наявними у бібліотеці а також вільним конфігуруванням між собою чи при потребі з входами-виходами контролера.

- Зміна режимів керування, включення/відключення, переключення а також реконфігурації наявних контурів автоматичного регулювання різнорідного ступеня складності.

- За допомогою клавіш передньої панелі оперативне управління контурами регулювання, що надає можливість зміни режимів, встановлювати необхідні завдання, можливість керування виконавчими механізмами та контролювання сигналів.

Базова модель контролера має таку комплектацію:

- дискретних виходів – 5;
- дискретних входів - 3;
- аналогових входів - 4;
- аналогових виходів - 1.

4.2.4 Вибір мікропроцесорних індикаторів

Мікропроцесорні індикатори ІТМ-22У (рис. 4.10) служитимуть у нашому проекті для індикації технологічних параметрів. Зазначені індикатори відображають вимірювані параметри на розташованому на передній панелі цифровому індикаторі, а також виконують сигналізацію технологічних параметрів вимірювання і відповідно можуть пересилати інформацію з метою реєстрації.



Рисунок 4.10 - Індикатор ІТМ-22У

					БР.АКПз-44.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		58

Індикатор володіє такими характеристиками:

- Здатен виконувати наступні функції:

- Виконувати індикацію двох параметрів із встановленими уставками зі значеннями сигналізації мінімуму й максимуму.

- Двопозиційного або трипозиційного регулювання температури, тиску, витрати, рівня чи інших величин, фізичне значення котрих може перетворюватись в уніфікований сигнал.

- Може працювати із датчиками як уніфікованих сигналів, так і з датчиками температури: термоопору, термопари.

- Здатен забезпечувати керування двопозиційним а також трипозиційним навантаженням.

- Сфера застосування:

- промислова автоматика;

- цифрова індикація технологічних параметрів;

- пристрої зв'язку із об'єктами з індикацією;

- Функціональні можливості, котрі є додатковими:

- можливість індикації параметрів в фактичних одиницях;

- можливість автоматичного калібрування діапазону виміру а також початку шкали;

- наявність вхідного цифрового фільтру аналогових входів;

- наявність функції інтегрування витрати від задіяного датчика витрати;

- добування квадратного кореня (вимір витрати по перепаду тиску);

- лінеаризація вхідного сигналу (по 16 крапках);

- чотири вільно-програмувальні дискретні виходи;

- програмувальна логіка роботи вихідних пристроїв;

- збереження параметрів при відключенні електро живлення;

- наявність захисту від несанкціонованої зміни технологічних параметрів;

- максимальне число приладів в мережі RS-485 повинно бути до 255 одиниць;

					БР.АКПз-44.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		59

- дискретні й імпульсні сигнали: транзистор 40В-100мА, оптосимістор, який має внутрішню схему переходу через нуль, реле 220В-8А, твердотільне реле 60В-1ААС/2АDC. Групова розв'язка.

4.3 Проєктна реалізація системи автоматизації

4.3.1 Розробка функціональної схеми автоматизації

Правильно сформована функціональна схема автоматизації (ФСА) повинна забезпечувати чітке уявлення про об'єкт керування. Відомо, що в системах автоматизації технологічних процесів об'єктом керування є сукупність основного та допоміжного обладнання разом із встановленими в ньому запірними і регулювальними органами, а також сировиною, енергоносіями й іншими матеріальними потоками, які визначаються специфікою технологічного процесу. З огляду на це, на функціональній схемі необхідно відображати технологічні апарати, засоби автоматизації, трубопроводи та взаємозв'язки між ними.

ФСА являє собою технічне креслення, на якому за допомогою умовних позначень зображено технологічні об'єкти, комунікації, органи керування та засоби автоматизації із нанесенням відповідних ліній зв'язку між ними.

Допоміжне обладнання та монтажні елементи на схемі, як правило, не відображаються.

Прилади, що розташовані поза щитами та не мають безпосереднього зв'язку з технологічним обладнанням або трубопроводами, зображаються у вигляді прямокутника з написом «Місцеві прилади». Водночас перетворювачі вимірювань, а також відбірні та приймальні пристрої, які встановлюються безпосередньо в апаратах чи трубопроводах, на ФСА не показуються.

4.3.2 Розробка загального вигляду щита

Основне призначення щитів систем автоматизації полягає в розміщенні засобів контролю та керування технологічними процесами, пристроїв

					БР.АКПз-44.00.00.000 ПЗ	Арк.
						60
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

автоматизації, блокування, захисту, живлення, а також організації зв'язків між ними.

Проектування загального вигляду щита керування здійснюється у такій послідовності:

1) вибір типового щита або пульта з урахуванням кількості приладів та категорії приміщення, де він буде встановлений;

2) розміщення приладів на лицьових панелях і всередині щита або пульта.

Для даної установки використовується шафовий щит, виконаний за субблочним принципом. Окрім цього, застосовуються також панельні щити.

Такі щити мають наступні особливості:

1) засоби керування розташовуються на передній панелі субблоку, тоді як допоміжна малогабаритна апаратура — на внутрішній поверхні; підключення до електроживлення здійснюється через роз'єми, розміщені на задній стінці;

2) обладнання для керування насосами та допоміжними пристроями організоване у вигляді окремих блоків, що забезпечує зручність керування та спостереження за перебігом технологічного процесу;

3) субблочна конструкція відзначається компактністю порівняно з іншими типами щитів; на передній панелі розміщуються сигнальні елементи (світлові табло), а всередині - реле часу та проміжні реле.

Для розміщення реєструвальних, показувальних і самописних вторинних приладів використовується повногабаритний панельний щит типу ЩЦП 2200×600×600. Перетворювачі та сигналізатори встановлюються поза межами щитів на спеціальному штативі. На кресленні загального вигляду щита керування також наведено таблицю написів для бірок і сигнальних табло.

Висновки до розділу

У зазначеному розділі виконано розробку технічної документації на САК. Виконано вибір структури системи керування. Вибрано актуальні технічні засоби автоматизації, котрі ефективні при проходженні технологічного процесу.

					БР.АКПз-44.00.00.000 ПЗ	Арк.
						61
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі проаналізований процес випалу портландцементного клінкеру в обертовій печі із точки зору його автоматизації. Визначено, що процес роботи печі в регламентних обмеженнях у значній мірі залежить від температурних режимів у зонах кальцинування і спікання, яким у роботі приділена основна увага.

Аналіз систем автоматизації дозволив визначити напрям бакалаврської роботи - розробку удосконаленої системи автоматизації на базі мікропроцесорних контролерів.

Здійснено експериментальне моделювання керованого об'єкта, що дозволило визначити його динамічні характеристики, обґрунтовано вибрані регулятори, розраховані їх оптимальні параметри налаштування.

Синтезовані одноконтурна та каскадна АСР температури в зоні кальцинування та спікання клінкеру, проведений їх аналіз на забезпечення стійкості та показників якості їх роботи.

Складено ієрархічну структурну схему контурів регулювання. Розроблені заходи з охорони праці та довкілля.

Аналіз ефективності запропонованих удосконалень показав, що її складовими є, крім інших, ще і підвищення точності регулювання та надійності удосконаленої системи автоматизації.

					БР.АКПз-44.00.00.000 ПЗ	Арк.
						62
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

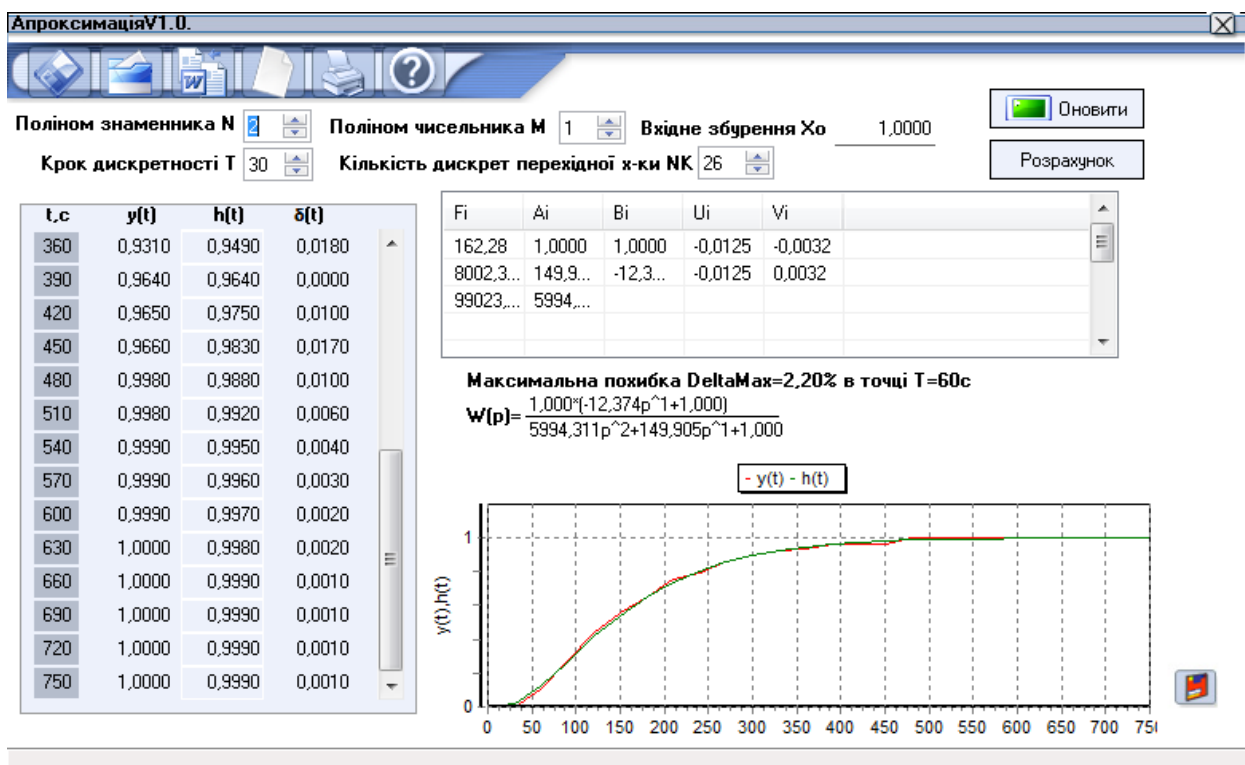
ПЕРЛІК ПОСИЛАНЬ НА ДЖЕРЕЛА

1. Когутяк, М. І. Програмно-технічні комплекси автоматизації [Текст] : лабораторний практикум / М. І. Когутяк. – Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2016. – 77 с.
2. Горбійчук, М. І. Алгоритми і методи обчислень [Текст] : навч. посіб. / М. І. Горбійчук. – Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2014. – 310 с.
3. Когутяк, М. І. Технічні засоби автоматизації [Текст] : навч. посіб. / М. І. Когутяк. – Івано-Франківськ : ІФНТУНГ Факел, 2008. – 212 с.
4. Горбійчук, М. І. Теорія автоматичного керування [Текст] : метод. вказівки до виконання курс. роботи / М. І. Горбійчук. – Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2021. – 57 с.
5. Семенцов Г. Н. Теорія автоматичного керування. Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 1999. 610 с.
6. Семенцов Г. Н., Когуч Я. Р., Дранчук М. М. Автоматизація технологічних процесів та виробництв в нафтовій та газовій промисловості. Івано-Франківськ: Факел, 2003. 352 с.
7. Когутяк, М. І. Технічні засоби автоматизації [Текст] : лаб. практикум / М. І. Когутяк. – Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2023. – 127 с.
8. Дранчук М. М. Проектування систем автоматизації технологічних процесів в нафтовій та газовій промисловості. Івано-Франківськ: Факел, 2005. 448 с.

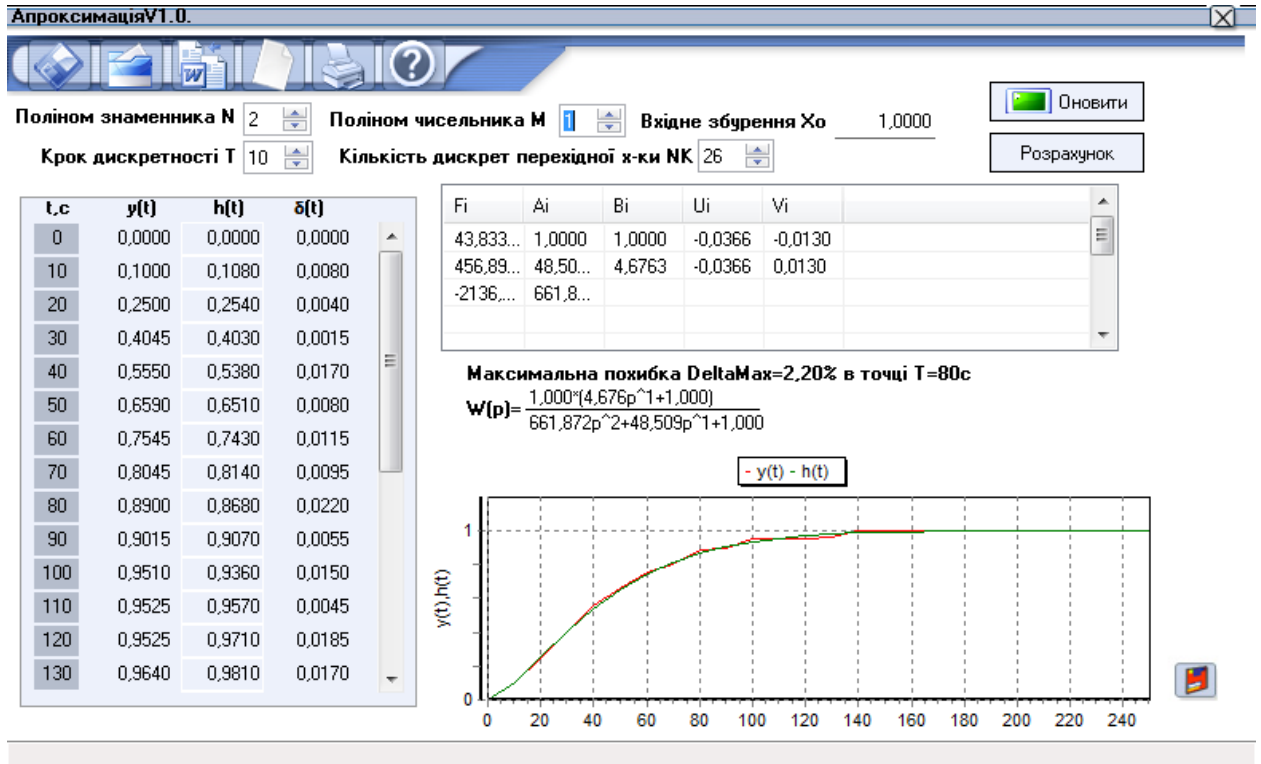
					БР.АКПз-44.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		63

ДОДАТКИ

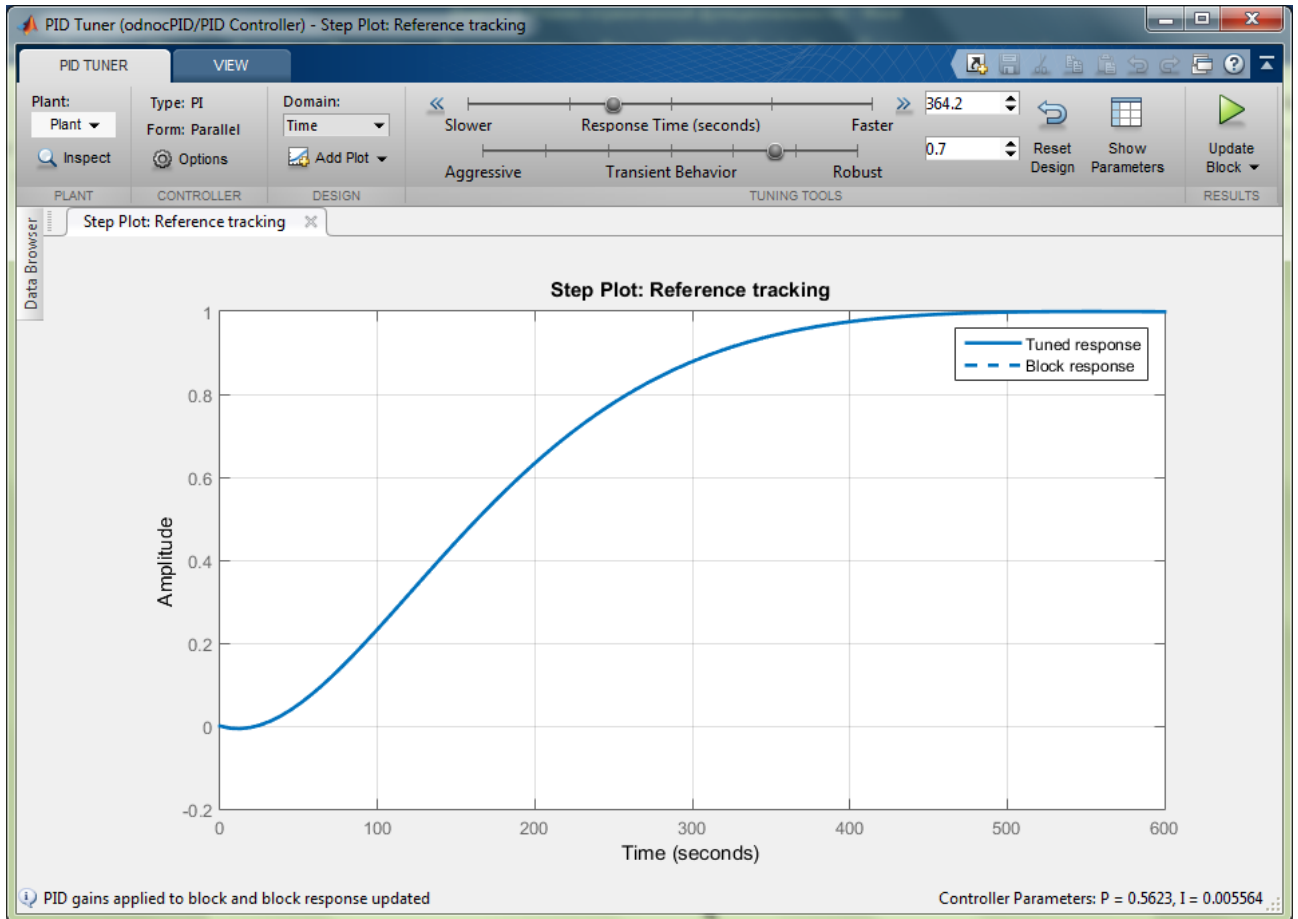
Додаток А1



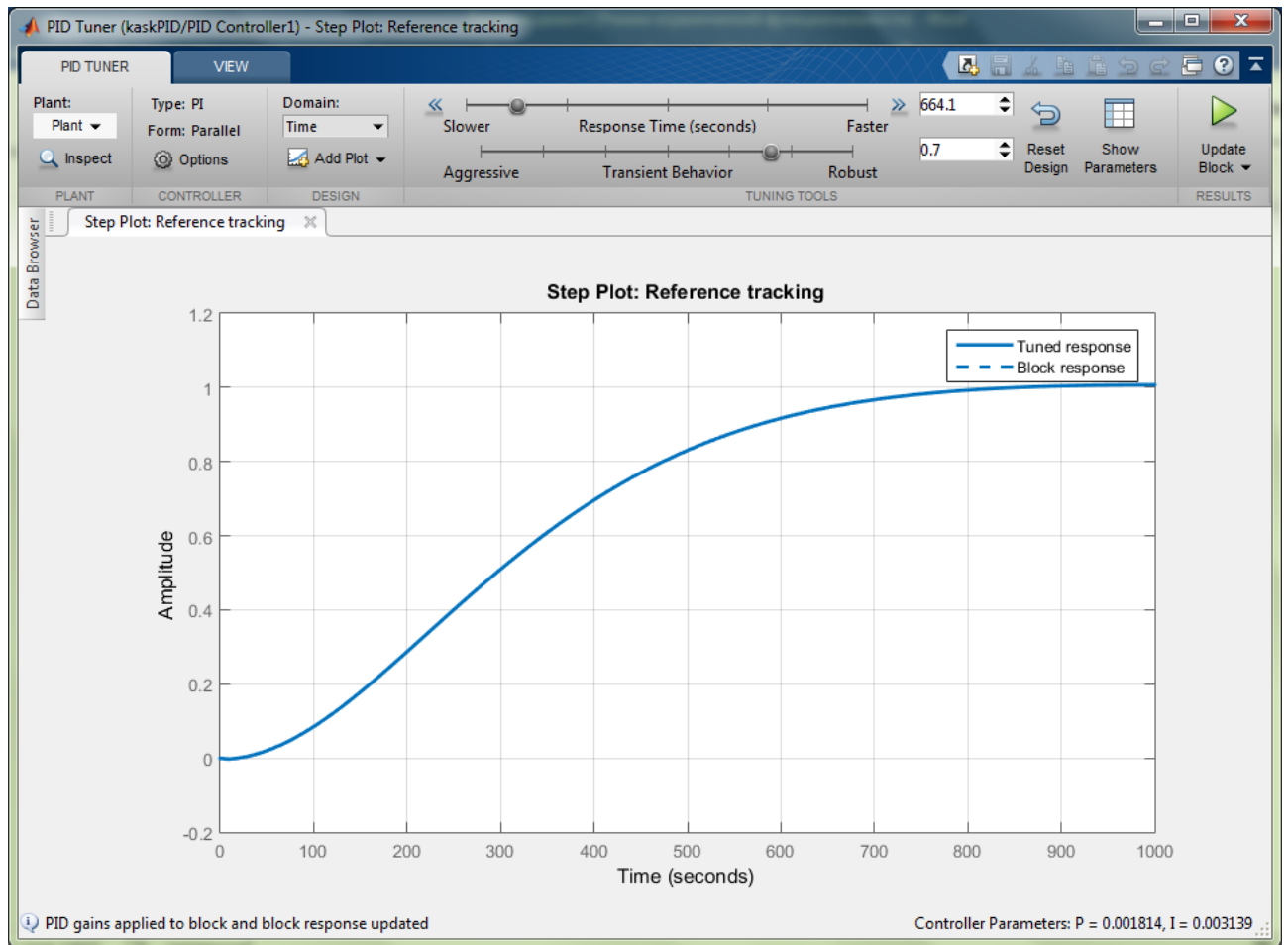
Додаток А2



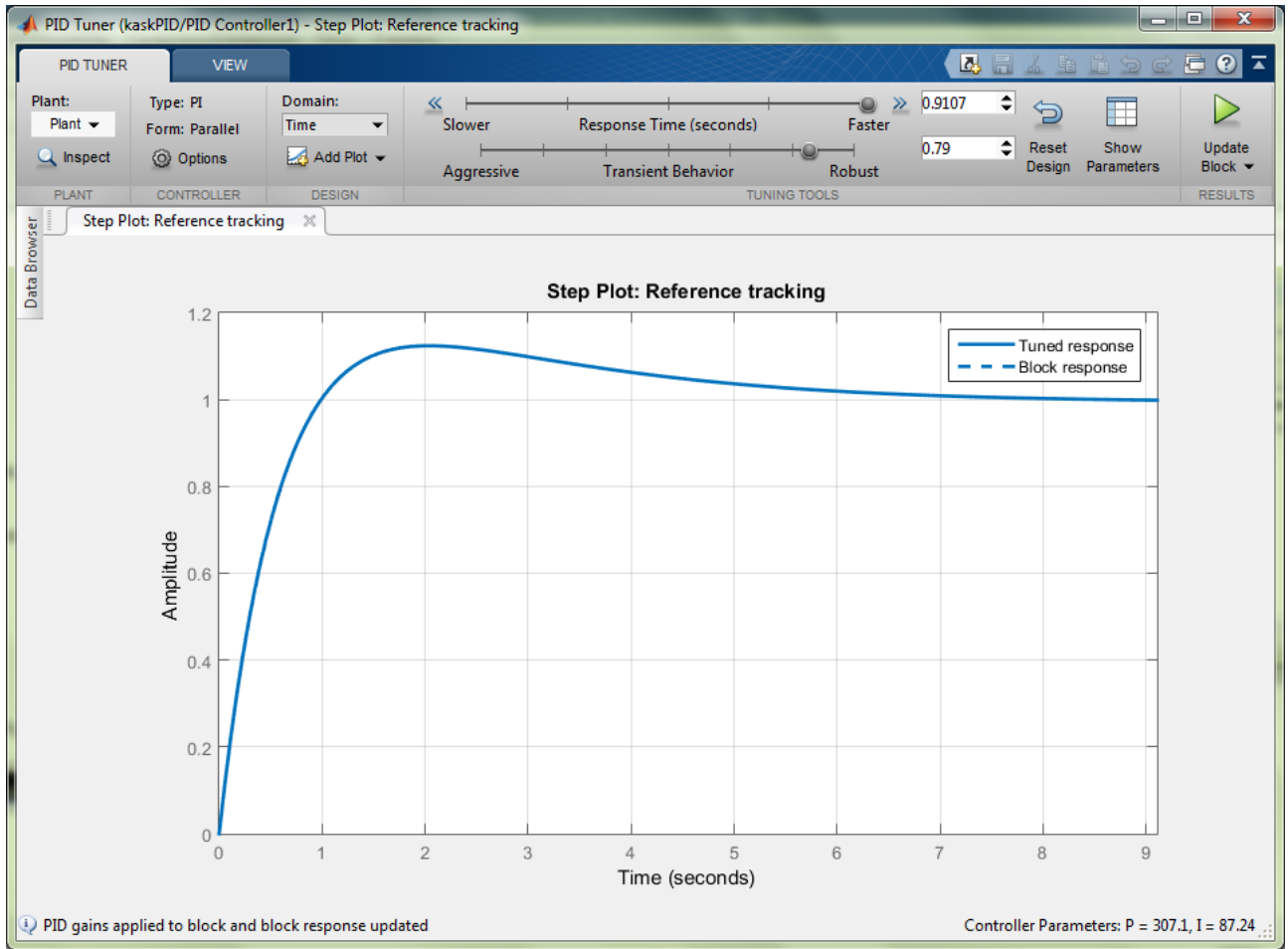
Додаток Б1



Додаток Б2



Додаток Б3

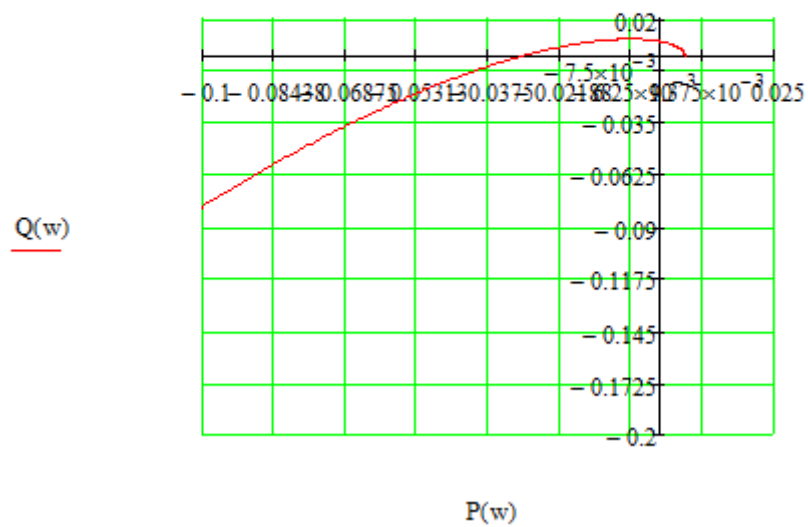


Додаток В1

$$P(w) := -142.947 \cdot w^2 + 0.005564$$

$$Q(w) := -5994.311 \cdot w^3 + 1.4934 \cdot w$$

$$w := 0, 0.0001 \dots 30$$

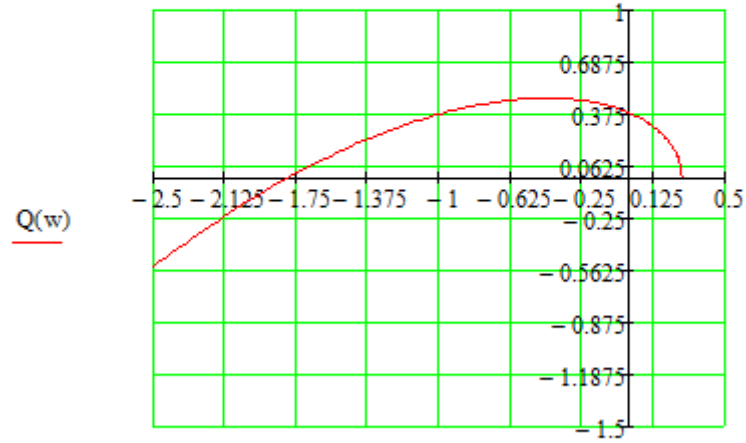


Додаток В2

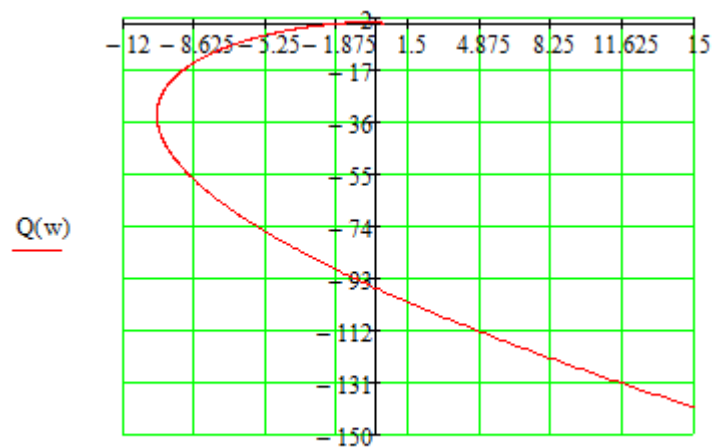
$$P(w) := -3.97 \cdot 10^6 \cdot w^6 + 4.5 \cdot 10^6 \cdot w^4 - 13851.73 \cdot w^2 + 0.2738$$

$$Q(w) := 8.99 \cdot 10^6 w^5 - 629611.79 \cdot w^3 + 98.26 \cdot w$$

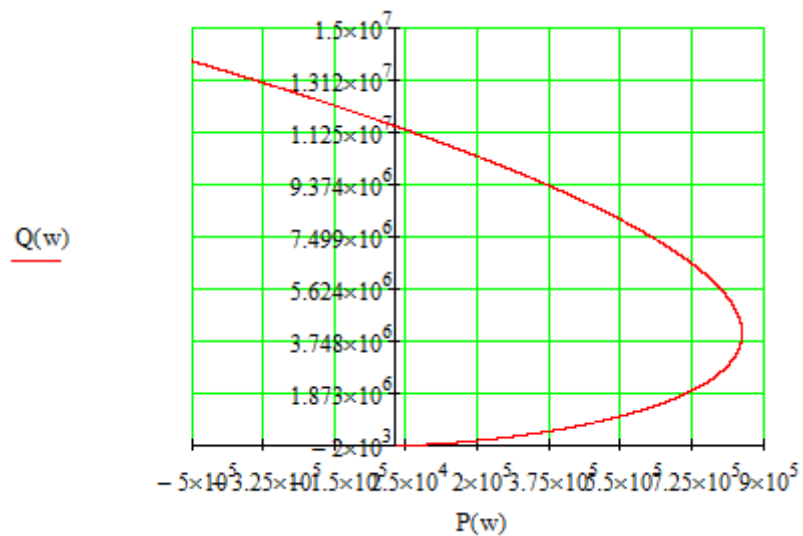
$$w := 0, 0.0001.. 30$$



P(w)



P(w)



БІБЛІОГРАФІЧНА ДОВІДКА

Тема кваліфікаційної роботи: «Удосконалення системи автоматизації технологічного процесу виробництва цементу».

Обсяг пояснювальної записки: 72 аркуші.

Перелік креслень графічної частини:

1. Функціональна схема автоматизації.
2. Експериментальне дослідження.
3. Аналіз та синтез одноконтурної АСК.
4. Аналіз та синтез каскадної АСК.
5. Структурна схема ієрархічної системи керування.
6. Загальний вигляд щита.

Дата закінчення проекту _____

Підпис студента-дипломника _____