

Хмельницький національний університет  
Факультет інформаційних технологій  
Кафедра автоматизації, комп'ютерно-інтегрованих технологій та робототех-  
ніки

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

магістр

Освітній рівень

Метод автоматизованого управління розподілом пари та конденсату при ви-  
робництві карбаміду

Назва теми

КвРАКІТР.2023183.01.16 ПЗ

Галузь знань 17 «Електроніка, автоматизація та електронні комунікації»

Шифр, назва

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

Шифр, назва

Освітня програма «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та  
робототехніка»

Назва

Виконав:

студент II курсу, група АКІТРм-23-1

Підпис

Максим МОЛІН

Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Керівник

Підпис, дата

Юрій ФОРКУН

Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Нормоконтролер

Підпис, дата

Людмила КОРЕЦЬКА

Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

До захисту допускаю:  
зав. кафедри АКІТтаР

Підпис, дата

Валерій МАРТИНЮК

Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

« 19 » грудня 2024 р.

# ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інформаційних технологій

Кафедра автоматизації, комп'ютерно-інтегрованих технологій та робототехніки

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Галузь знань 17 – Електроніка, автоматизація та електронні комунікації

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

Освітня програма Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри АКІТтаР

Валерій МАРТИНЮК

01 вересня 2024р.

## ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Моліну Максиму Андрійовичу

Прізвище, ім'я, по батькові студента

1 Тема роботи Метод автоматизованого управління розподілом пари та конденсату при виробництві карбаміду

Керівник роботи Форкун Юрій Вікторович, к.т.н., доцент

Прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, учене звання

Затверджено наказом ректора університету від 26.08.2024 р. №60

2 Строк подання студентом роботи на кафедру 02.12.2024р.

3 Вихідні дані до роботи Аналіз сучасного стану обладнання для виробництва карбаміду.

Розробка алгоритмічного та програмного забезпечення

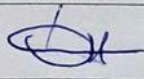
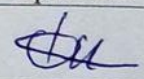

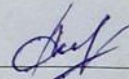
4 Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

Вступ. Процеси виробництва карбаміду. Математичне моделювання виробництва за технологічною схемою синтезу карбаматів. Синтезування системи управління реактором. Математичне моделювання процесу схеми синтезу карбаміду. Висновки.

5 Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень)

презентаційні матеріали (слайди)

6 Консультанти розділів кваліфікаційної роботи


Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Антиплагіат	Федула М.В., доцент кафедри АКІТтаР		
Нормоконтроль	Корецька Л.О., доцент кафедри АКІТтаР		

7 Дата видачі завдання 01 вересня 2024р.

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Назва розділу кваліфікаційної роботи	Строк виконання	Примітка
1 Вступ	10.09.2024р.	Виконано
2 Огляд літературних джерел та патентних даних	25.09.2024р.	Виконано
3 Огляд існуючих методів	15.10.2024р.	Виконано
4 Алгоритмічне проектування	30.10.2024р.	Виконано
5 Розробка програмного забезпечення	10.11.2024р.	Виконано
6 Висновки	15.11.2024р.	Виконано
7 Оформлення пояснювальної записки до ДР	20.11.2024р.	Виконано
8 Оформлення презентаційних матеріалів	1.12.2024р.	Виконано

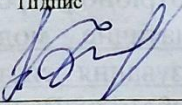
Студент

  
Підпис

Максим МОЛІН

Ім'я, прізвище

Керівник роботи

  
Підпис

Юрій ФОРКУН

Ім'я, прізвище

Дата	Виконав	Відомості	Відомості

## АНОТАЦІЯ

Тема кваліфікаційної роботи: «Метод автоматизованого управління розподілом пари та конденсату при виробництві карбаміду».

Автор роботи: Молін Максим Андрійович.

Керівник роботи: Форкун Юрій Вікторович, к.т.н., доцент


Пояснювальна записка: 77 с., 25 рис., 6 табл., 1 дод., 71 джерело.

Графічна частина: 13 презентаційних слайдів.

КАРБАМІД, ТЕХНОЛОГІЧНА СХЕМА, МАТЕМАТИЧНЕ  
МОДЕЛЮВАННЯ, ПЕРЕДАТОЧНА ФУНКЦІЯ.

**Мета роботи:** розробити метод автоматизованого управління розподілом пари та конденсату при виробництві карбаміду.

Виконаний аналіз технічного процесу виробництва карбаміду, розроблено математичну модель процесів та побудовані відповідні статичні та динамічні характеристики; розроблено автоматичну систему керування; виконано аналіз основних небезпек з охорони праці.

  
Підпис студента

02.12.2024  
Дата

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
1 ПРОЦЕСИ ВИРОБНИЦТВА КАРБОМІДУ .....	6
1.1 Опис схеми тех.процесу.....	6
1.2. Технологічний пристрій та особливості роботи.....	14
1.3 Дослідження фізико-хімічних засад процесу автоматичного управління виробництвом.....	16
1.4 Постановка задачі автоматизованого управління при виробництві карбаміду .....	17
1.5 Висновки до першого розділу .....	19
2 Математичне моделювання виробництва за технологічною схемою синтезу карбаматів.....	21
2.1 Загальні поняття математичного моделювання.....	21
2.2 Опис технічного процесу формування аміаку .....	24
2.2 Статичний режим техпроцесу .....	27
2.4 Висновки до другого розділу.....	40
3 СИНТЕЗУВАННЯ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ РЕАКТОРОМ .....	41
3.1 Огляд середовища математичного модулювання Simulink .....	41
3.4 Синтезування ПІ-регулятора по методу Ціглера-Нікольса.....	45
3.3 Порівняння систем управління.....	47
3.5 Висновки до третього розділу .....	53
4 Математичне моделювання процесу схеми синтезу карбамІДУ.....	54
4.1 Налаштування ПІ-регулятора методом М-кола:.....	61
4.2 Налаштування ПІІ-регулятора методом М кола .....	63
4.3 Дослідження характеристики перехідної об'єкта.....	65
4.4 Система технологічних сигналів, що керують ходом процесу установки розподілу пари і конденсату у виробництві карбаміду.....	66

4.5 Технологічні параметри установки, технічна сигнальна схема, принципова схема та опис розподілу пари та конденсату у виробництві карбаміду .....	68
4.6 Принципова електрична схема та опис роботи системи блокування сигналів із пристроїв регулювання .....	70
4.7 Монтажно-комутаційна схема з'єднань .....	71
4.8 Схема підключення, монтажу, перемикання та інструкція з пристрою автоматичного керування вихідним сигналом технології блокування системи в аварійних ситуаціях .....	72
4.9 Монтажно-комутаційна схема з'єднань та опис системи сигналізації параметрів процесу .....	74
4.10 Висновки до четвертого розділу.....	75
ВИСНОВКИ .....	76
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....	78
ДОДАТОК А Стаття у фаховому журналі.....	86

## ВСТУП

**Актуальність роботи.** Виробництво сполук азоту є однією з найважливіших галузей хімічної промисловості, а його продукція широко використовується в різних галузях народного господарства. Основною сферою використання сполук азоту є сільське господарство, де вони використовуються як мінеральні добрива. Тому продовольче забезпечення населення залежить від рівня розвитку промисловості виробництва азотних добрив. У міру зростання населення планети попит на продукти харчування продовжує зростати. Це потребує збільшення виробництва азотних добрив, що може бути досягнуто шляхом удосконалення існуючих та розробки нових технологічних процесів. Розвиток промисловості азотних добрив передбачає не тільки кількісні зміни, а й якісні зміни у виробництві на нові, більш високі технологічні рівні.

Азот і його сполуки відіграють величезну роль у функціонуванні народногосподарського комплексу та життя на землі. Чистий азот є основним компонентом сировини для синтезу аміаку, і масштаб його виробництва можна виміряти. Сотні мільйонів тонн на рік. Крім того, він використовується як інертний газ у багатьох хімічних процесах. Для досягнення низьких температур в якості теплоносія використовується рідкий азот.

На основі азотистих сполук отримують велику кількість неорганічних і органічних речовин, які знаходять широке використання в різних галузях техніки. До цих речовин відносяться: аміак, азотна кислота, солі амонію, азотна кислота і азотиста кислота, аміни, аміди, нітрили, оксими, лактами, ціанати, які використовуються у виробництві синтетичних волокон, смол, пластмас, клеїв, лаків, фарб, фармацевтичних препаратів, вибухові речовини та інші продукти.

Азот входить до складу білка, будівельного матеріалу рослинних і тваринних тканин і одного з найважливіших компонентів їжі людини. Щодня людина споживає з їжею 70-100 г білка, який містить 13-16 г азоту. Нестача білка в організмі може призвести до виснаження і смерті. Вміст білка в м'ясі

18-21%, риби - 15-23%, хлібі - 5-10%, яйцях - 12,5%. Організм людини або тварин не може використовувати елементарний азот і його сполуки для синтезу білка. Такою здатністю володіють тільки рослини, вони витягують азот із ґрунтового розчину і перетворюють його на білок, який накопичується в зернах, бульбах, соломі, коренях і листі рослини. [1]

Для виробництва азотних добрив широко застосовують карбамід, який є початковою речовиною у значній кількості технологічних процесів. Тому розробка методу та системи автоматизованого управління устаткуванням по виробництву карбаміду є задачею актуальною.

**Метою роботи** є розробка методу автоматизованого управління розподілом пари та конденсату при виробництві карбаміду.

**Об'єкт дослідження** процеси автоматизованого управління обладнанням виробництва карбаміду.

**Предмет дослідження** методи автоматизованого управління обладнанням виробництва карбаміду.

**Методи дослідження** методи математичного Дослідження, теорії диференційного числення, аналітичної геометрії, методи математичного моделювання.

Для досягнення поставленої мети потрібно вирішити наступні завдання:

- дослідити сучасне обладнання для виробництва карбаміду;
- визначити шляхи покращення систем автоматизації дослідженого устаткування;
- розробити структуру автоматизованого управління;
- розробити математичну модель управління;
- провести математичне модулювання методу автоматизованого управління устаткуванням по виробництву карбаміду.

**Наукова новизна** полягає у розробці методу автоматизованого управління розподілом пари та конденсату при виробництві карбаміду, що дозволило покращити характеристики системи управління за рахунок оптимального вибору параметрів ПІ і ПІД-пристроїв регулювання

## 1 ПРОЦЕСИ ВИРОБНИЦТВА КАРБОМІДУ

Карбопол (або карбамід) — концентроване безбаластне азотне добриво. Містить 46,6% азоту, легко засвоюється рослинами. Як добриво сечовина має переваги перед аміачною селітрою. Він містить більше азоту, не становить штормової небезпеки, менш гігроскопічний (80% гігроскопічний при 20°C), повільніше вимивається з ґрунту та не злежується.

У той же час на виробництві великих заводів собівартість одиниці азоту в карбаміді нижча, ніж у аміачної селітри, тому за масштабами виробництва вона займає одне з найкращих місць серед азотних добрив. Карбамід широко використовується і в інших галузях народного господарства. Використовується як білкова добавка до кормів для тварин, у виробництві штучних смол, пластикових блоків, клеїв, лаків, фармацевтичних препаратів, гербіцидів тощо. Тому виробництво карбаміду швидко розвивалося і досягло сотень мільйонів тонн на рік. [1]

### 1.1 Опис схеми тех.процесу

Синтез сечовини з вмістом аміаку та  $\text{CO}_2$ . 70%, обсяг дистильованого газу дуже великий і його очищення необхідне не тільки з екологічної точки зору, а й з економічної.

Промислові способи виробництва карбаміду поділяються на три категорії, засновані на методі обробки дистиляційного газу: відкритий, напівзамкнутий і закритий цикл.

У відкритому контурі перегонка флотованої сечовини здійснюється в одну стадію шляхом зниження тиску до атмосферного і нагрівання до температури кипіння. Отриманий дистильований газ після відповідної кислотної абсорбції можна використовувати для виробництва інших видів добрив - аміачної селітри, сульфату або фосфату амонію. При цьому кількість отриманих добрив значно перевищує кількість утвореного карбонаміду — на кожну 1 т

утвореного карбонаміду утворюється від 5 до 8 т  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  або інших добрив. За напівзакритою схемою перегонку флотаційного карбаміду проводять у дві стадії. [1, 2]

Крім того, аміак спочатку видаляється з флоту, а після падіння на землю повертається в цикл. На другому етапі тиск знижується до атмосферного. Крім того, можливі як повне випаровування аміаку, так і розпад карбамату амонію. Газ другого етапу перегонки перетворюють на інші хімічні добрива. Крім того, досягнутий об'єм добрива зменшується приблизно на дві третини, але загальний об'єм все ще перевищує об'єм утвореного карбаміду. Як наслідок, на сучасних великих потужностях з виробництва карбаміду більше не використовуються відкритий і закритий цикли, більші за тоннажем. Сучасні схеми зазвичай передбачають синтез карбаміду в закритій системі, газ повністю повертається назад у процес синтезу. Газ, який переганяється, рециркулює двома способами: по-перше, він циркулює у вигляді газу (схема циркуляції газу), а по-друге, використовується концентрований розчин гідрокарбонату амонію (схема для циркуляції рідини).

У схемах, які використовують регенерацію газу, газу, які переганяються, повинні бути конденсовані до заданого тиску. Крім того, в компресорі може утворюватися твердий ацетат амонію, що спричиняє його поломку. Щоб цього уникнути, необхідно перед стисненням розділяти газу, які переганяються на аміак і  $\text{CO}_2$ , це значно ускладнює схему. У зв'язку з цим у сучасних установках синтезу сечовини найчастіше використовуються схеми, які включають повну рециркуляцію рідини, при якій дистиляційні газу поглинаються водою, а потім повертаються в цикл синтезу у вигляді концентрованої суміші вуглецевих солей. Кілька компаній запровадили та використовують численні з цих схем, які відрізняються одна від одної щодо конструкції апаратного забезпечення. Для прикладу розглянемо технічний план синтезу сечовини з повною рециркуляцією рідких речовин. [1, 2]

Сировиною для синтезу сечовини є аміак і  $\text{CO}_2$ , які отримують при регенерації поглинаючого розчину при очищенні конвертованого газу від вуг-

лекісного газу при виробництві аміаку. Вуглекислий газ має склад 2,5-2,9% газів, які розчинені в ньому - включаючи азот, водень, метан та інші домішки. Ці домішки не беруть участі в реакції, яка виробляє аміак і  $\text{CO}_2$ , таким чином знижуючи парціальний тиск цих молекул, їх присутність повинна бути мінімальною рис. 1.1.

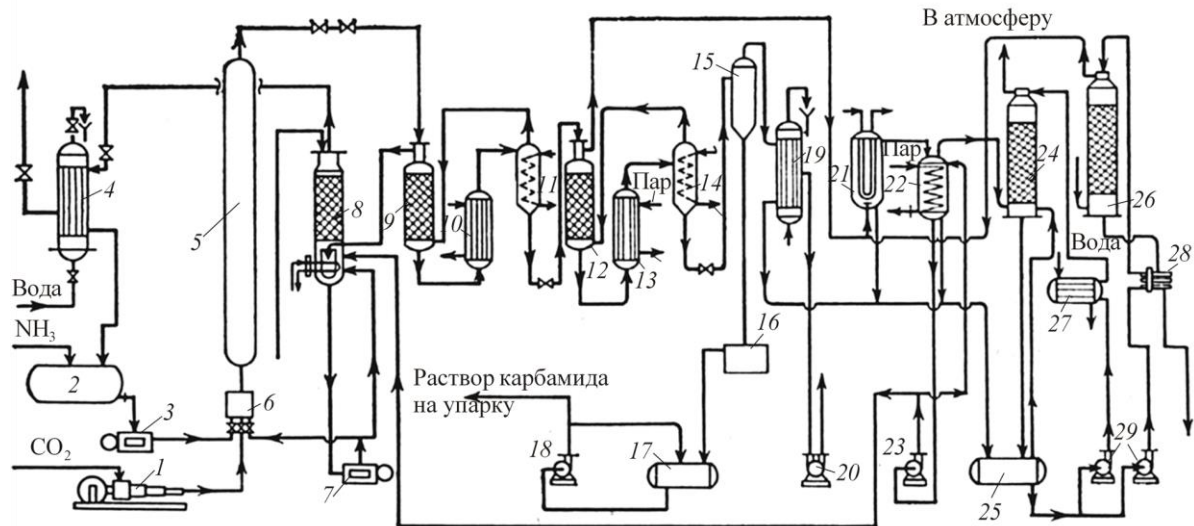


Рисунок 1.1 - Технологічна схема синтезу карбаміду із завершеним рідинним ЦИКЛОМ

На рисунку введено наступні позначення: 1 - компресор чотириступінчастий для 2 ; 2 – бак з рідким аміаком; 3 - насос плунжерний аміаку; 4 – конденсатор першого ступеню; 5 - Колона для синтезу; 6 – змішувач; 7 – насос плунжерний; 8 – колона промивна; 9 - колона ректифікаційна першого щабля; 10 – перший підігрівач; 11 – перший сепаратор; 12 – друга ректифікаційна колона; 13 – другий підігрівач; 14 - другий сепаратор; 15 - випарник вакуумний; 16 – ємність розчину карбаміду; 17 – масло роздільник; 18 – насос відцентровий; 19 - конденсатор; 20 – вакуумний насос; 21 – другий конденсатор; 22 - ємність; 23 - насос відцентровий; 24 – очищувач; 25 – ємність для розчину солей амонію; 26 – змішувач; 27 – охолоджувач; 28 – обмінник тепла; 29 – насоси відцентрові.

Найбільш токсичними домішками є легкозаймісті гази, до складу яких входять водень, метан і вуглекислий газ, оскільки вони з'єднуються з киснем, утворюючи вибухову суміш. Це подається в колону синтезу для запобігання корозії. В результаті перед надходженням в колону синтезу вуглекислий газ каталітично перетворюється в кисень повітрям при температурах 180-200°C, що виключає виділення легкозаймістих токсинів. Вуглекислий газ, з якого видалено домішки, стискають у компресорі до 1-20 МПа при температурі 95-100 °C і подають у змішувач 6 . Сюди плунжерним насосом 3 під тиском 20 МПа і температурою 90°C подається рідкий аміак, а плунжерним насосом 7 - концентрований розчин карбонату амонію, який утворюється при поглинанні дистильованого газу водою. У змішувачі співвідношення  $\text{NH}_3 : \text{CO}_2 : \text{H}_2\text{O}$  становить (3,7-4,6):1:(0,6-0,9). [3-5]

Основними недоліками схеми синтезу карбонату є:

- 1) Складність схеми відновлення аміаку та вуглекислого газу, що не прореагував;
- 2) Зменшення виробництва карбонату через наявність води в рециркуляційному розчині карбонату амонію;
- 3) Потрібно встановити насос високого тиску для рециркуляції розчину карбонату амонію;
- 4) Теплота синтезу та конденсації аміаку та вуглекислого газу не може бути ефективно використана, і ця теплота видаляється низькотемпературною охолоджувальною водою.

Щоб усунути ці недоліки, був розроблений вдосконалений процес синтезу карбонату, який отримав назву «процес стріппінгу» («відновлення стріппінгу»). У цих процедурах перша стадія дистиляції карбонату включає видалення аміаку, виділеного колоною синтезу, а також розкладання сполуки карбамату амонію, все це відбувається без зниження тиску. Ця проблема вирішується шляхом підняття сечовини в небо разом із одним із компонентів реакції (аміаком або вуглекислим газом) у стріппері, який є трубчастим теплообмінником, що нагрівається парою. Потік карбонату з башти синтезу тече

вздовж трубок теплообмінника і подається аміаком або CO<sub>2</sub>, щоб забезпечити швидкість потоку. [3]

Завдяки цьому під час продування знижується його парціальний тиск над CO<sub>2</sub> або аміаком, що призводить до відганяння надлишку аміаку та розкладання карбамату амонію без скидання тиску. Нижня частина відпарника подається дистильованим газом, оскільки це підтримує вирівняний тиск у конденсаторі. Таким чином, у цьому конденсаторі, де і аміак, і CO<sub>2</sub> зустрічаються для спільного утворення, карбамат амонію при температурі °C; піднімається самостійно за рахунок теплоти реакції, що досягає 180-185°C. Одночасно утворюється розплав карбамату амонію, який повертають у колону синтезу. Надлишок тепла конденсації можна ефективно використовувати для виробництва пари. Тому в схемі з процесом відпарювання, операції синтезу карбонату, першої стадії перегонки і конденсації ректифікаційного газу, що здійснюються в однакових умовах - при тиску, що підтримується в колоні синтезу, і при температурі 180-185 °C, це Перевищує температуру плавлення карбамату амонію.

Це значно спрощує схему переробки непрореагованого аміаку та вуглекислого газу, оскільки немає потреби встановлювати насос високого тиску для стиснення розчину бікарбонату амонію, тому тепло конденсації можна ефективно використовувати. Генерація водяної пари, кількість води в колоні синтезу зменшується, оскільки конденсація аміаку та CO<sub>2</sub> відбувається при температурі, вищій за температуру плавлення карбамату амонію та аміаку, це не реакція, CO<sub>2</sub> є повернувся до форми плаваючого карбамату амонію Synthesis Tower. Це зменшує надлишок аміаку у вихідній суміші.

Варіант схеми синтезу карбонату за допомогою процесу десорбції показано на рисунку 1.2.

В схемі введені наступні позначення: 1 , 11 , 14 – розділювач; 2 - нагнітач; 3 – дистиллятор із теплообмінником; 4 – насосний блок; 5 , 7 - конденсатори із високим тиском; 6 - реактор; 8 - клапан дросельний; 9 - ректифікацій-

на колона; 10 - нагрівач; 12 - конденсатор із низьким тиском; 13 , 17 – бак; 15 - десорбер; 16 – обмінник тепла; 18 – скруббер.

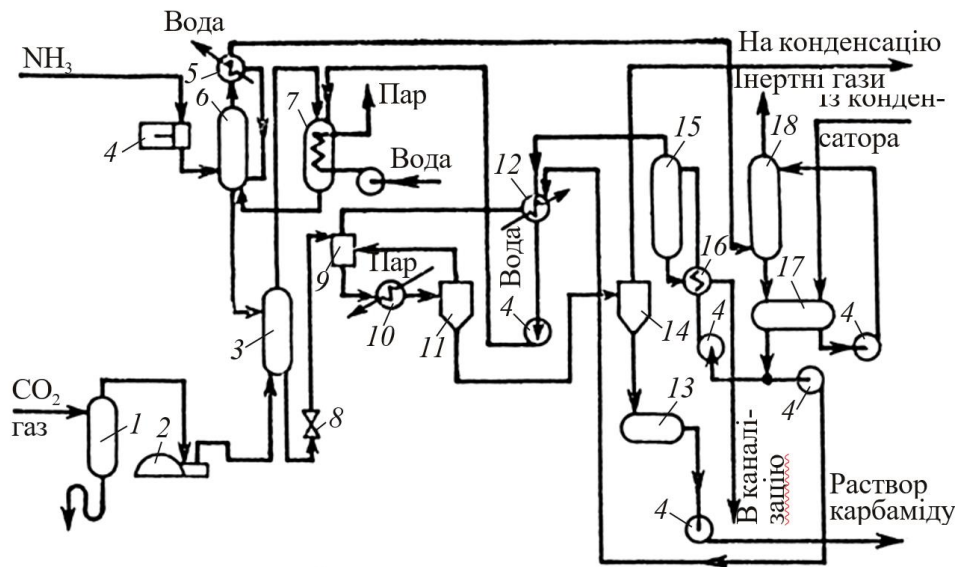


Рисунок 1.2 - Схема техпроцесу виробництва карбаміду

У цій конструкції синтез вуглеводів ведеться в реакторі 6 при тиску 13 МПа і температурі 180-190 °С. Час плавання в синтез-вежі 45-60 хвилин. Склад  $\text{NH}_3 : \text{CO}_2 : \text{H}_2\text{O}$  становить 2,8:1:(0,3-0,4). Продуктивність карбаміду з  $\text{CO}_2$  становить близько 60%. Пари аміаку, що утворюються, будуть проходити через випарну башту 3, яка є кожухотрубним теплообмінником, що обігривається парою. У рамках процесу випаровування другий компресор подає  $\text{CO}_2$  під тиском 13 МПа. При реверсуванні потоку  $\text{CO}_2$  вловлюється і передається в конденсатор високого тиску 7, де з конденсатора низького тиску 12 через насос 4 одержують розчин гідрокарбонату амонію. У конденсаторі 7 аміак з'єднується з  $\text{CO}_2$  і входить до складу хімічної реакції, в результаті якої при температурі 180-185°С утворюється карбамат амонію. Теплота відходів конденсації утилізується для створення пари низького тиску (0,35 МПа). [3-5]

Внаслідок зв'язку між карбамідом утворюється розплав, який складається з води, карбаміду, карбонатів кальцію та додаткової кількості аміаку. Крім того, розплав піддається дистиляції, яка призначена для руйнування ка-

рбамату та видалення карбонатів, які не були перетворені на аміак або  $\text{CO}_2$ , потім отриманий водний розчин вуглеводів перетворюється на твердий продукт.

Існують різні методи отримання карбаміду, різні способи збору та утилізації газів з розплаву, середній відсоток перетворення в сечовину не перевищує 50 або 70 відповідно. Ці умови, які призводять до синтезу, такі як співвідношення  $\text{NH}_3:\text{CO}_2$ , тиск і температура, мають менший вплив. Мало-масштабне виробництво карбаміду в поєднанні з великою кількістю нітрату амонію може працювати за відкритим контуром, тобто без повернення газів із процесу дистиляції для виробництва карбаміду. У цьому випадку дистиляція проводиться в одну стадію, весь присутній аміак поглинається із суміші газів з азотною кислотою, в результаті чого утворюється нітрат амонію. Сучасні та найдосконаліші високопродуктивні процеси виробництва карбаміду слідують замкнутим контурам, продукти процесу дистиляції повністю повторно подаються в процес синтезу. Удосконалення цих схем спрямоване на збільшення обсягу одиниць і ступеня їх використання.

Кількість споживаної енергії можна мінімізувати, оскільки більша частина тепла, що утворюється під час деградації карбамату амонію, повторно використовується під час синтезу розплаву. Це тепло перетворюється на пару та використовується на стадіях низького тиску обробки розплаву.

На рисунку 1.3 наведено схему техпроцесу виробництва карбаміду в устаткуванні з розподілом пари і конденсату.  $\text{CO}_2$  і частина  $\text{NH}_3$  вводяться в реактор (1). Залишок випаровується і відправляється в куб (3). В останньому більша частина карбамату амонію розкладається, а залишок у розплаві становить приблизно 2 відсотки. Крім того, розплав містить безаміачну речовину. Суміш парів транспортується з дистилятора (3) в конденсатор (4), де в результаті тепла, яке виділяється при створенні суміші, утворюється розчин солей, які конденсуються (РБАС). в результаті процесу утворюється пара під тиском. Рециркуляційні ПБА транспортуються в реактор самопливом. На вхідних патрубках у реактор (1) їхнє відношення  $L$  знаходиться в межах (3-

3,5):1, на вихідних патрубках суміш близько на 100% рідка. Розплав, який видаляється з дистильатора (3), не містить  $\text{NH}_3$  і не містить  $\text{CO}_2$  в установці випаровування (6). Плавильний розплав нагрівається котлом (5), далі він надходить до першого корпусу випарної установки, який нагрівається свіжою первинною парою. Другий корпус отримує вторинну пару з цього корпусу, оскільки він використовується для його нагрівання, знижений тиск у другому випадку змушує розчин нагріватися при нижчій температурі, ніж у першому випадку. Подібним чином випарений розчин з другого корпусу тече через самотечію (внаслідок нижчого тиску) у третій корпус, який нагрівається вторинною парою з другого корпусу. Вивільнені гази компенсуються за тиском і подаються в скруббер (8). Розчин, отриманий за допомогою БПА, використовується в конденсаторі, а аміак, який вийшов з абсорбера (7), конденсується і потім виливається в збірник конденсату. [3-6]

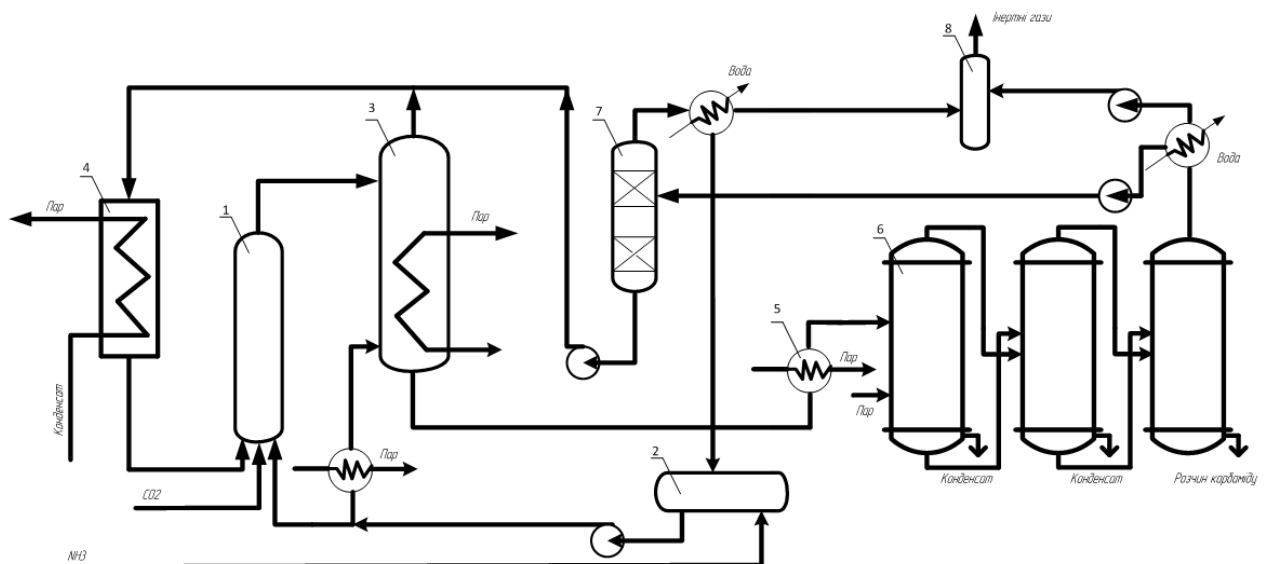


Рисунок 1.3 - Схема техпроцесу виробництва карбаміду в устаткуванні з розподілом пари і конденсату: де 1 – Реакторний бак ; 2 –накопичувач конденсату; 3-Випарник; 4- Конденсаторний бак; 5-бойлер; 6- Випарний блок; 7 - Очищувач; 8 – Скрубер.

## 1.2. Технологічний пристрій та особливості роботи

### Реактор

Виробництво походить від реакції Базарова, яка передбачає поєднання двох молекул аміаку з однією молекулою вуглекислого газу для отримання карбонату. Формування аміаку з  $\text{CO}_2$  і аміаку розділено на два етапи. Перший етап - формування карбонату амонію. У другій фазі вода виділяється з карбонату амонію.

Основним пристроєм, що використовується для синтезу карбонату, є реактор, у цьому пристрої спочатку відбувається перша фаза синтезу.  $\text{CO}_2$  і частина  $\text{NH}_3$  вводяться в реактор. Для цього в системі, яка його синтезує, необхідні тиск 13,4...14,7 МПа і температура 170...171 °С, тепло, що виділяється, використовується для формування пари. [3-6]

### Дистилятор

Аміак з ядерного реактора пропускають через куб. У цій фазі відбувається друга частина процесу синтезу карбонату, яка полягає в майже повному розчиненні амонійної карбонату. Залишок речовини в розплаві синтезу становить приблизно 3%, крім того, розплав містить незв'язаний  $\text{NH}_3$ . Суміш пари і газу потім направляється в конденсатор.

### Ребойлер

Перезавантажувач - це випарник, який має паровий простір, цей простір складається з корпусу та трубчастих пучків, які, по суті, є теплообмінниками, розташованими поблизу випарника.

Важливо нагрівати розчин розплаву в першій частині випарної установки, інші дві будуть нагріватися вторинною парою, отриманою з першої установки, друга буде третьою, а перша буде четвертою. Розчин у котлі нагрівається за допомогою пари. Розчин розплаву нагрівається, і в результаті конденсат з котла збирається в окрему ємність.

## Випарна установка

Випаровування - це конденсація розчинів, які переважно є нелеткими або малолеткими, у рідких розчинниках, які є леткими. У процесі випаровування розчинник видаляється з усього об'єму розчину при температурі кипіння води.

Основним параметром, який потрібно підтримувати постійним у певному діапазоні при автоматизації роботи випарних пристроїв, є концентрація розчину на виході. У всіх випадках цю проблему можна вирішити, змінивши певні величини, включаючи швидкість потоку розчину на вході та виході, кількість тепла, що виділяється парою, і тиск вторинної пари.

Оскільки більшість води, яка випаровується у випарних установках, споживається процесом, кількість доступної пари зменшується завдяки реалізації процесу в багатокорпусній установці, яка випаровує воду. В основі їх дії лежить багаторазова утилізація теплоти пари, що нагрівається в першому корпусі установки, з наступним нагріванням кожного наступного корпусу вторинною (соковою) парою попереднього корпусу. [4, 5]

Давайте дослідимо дизайн, який включає три екземпляри. Розплав нагрівається до температури кипіння, потім надходить у перший корпус агрегату, який обігрівається свіжою первинною парою. Другий корпус отримує вторинну пару з цього корпусу, оскільки він використовується для його нагрівання, знижений тиск у другому випадку змушує розчин нагріватися при нижчій температурі, ніж у першому випадку.

Подібним чином випарований розчин з другого корпусу піднімається за допомогою нижчого градієнта тиску (сліди пари) у третій корпус, який нагрівається вторинною парою з другого корпусу.

У процесі випаровування на виході з пристрою третього корпусу досягається концентрований розчин карбонату, причому початкова концентрація трикорпусної установки була такою ж, як концентрація на виході третього корпусу.

### 1.3 Дослідження фізико-хімічних засад процесу автоматичного управління виробництвом

Характеристики, пов'язані з технологічним процесом виробництва карбаміду з парою і системою розподілу конденсату:

- контролювання і сигналізування об'єму суміші, що подається в реактор;
- регуляція об'єму конденсату в колекторі;
- контролювання ступеня конденсації в конденсаті.
- контролювання і сигналізування температури речовин у дистиляторі;
- контролювання ризику надмірного тиску в конденсаторі.
- регуляція та запобігання температурі води в котлі;
- контролювання ризику надмірного впливу тиску пари розчину в паровій камері.
- регулювання тиску при сигналізації в розчині, що поглинає енергію.
- Контролювання сигналізації в прибиральнику.

Параметри виробничого контролю наведені в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 Параметри виробничого контролю

№ п/п	Найменування процедури (технологічного об'єкта), місце вимірювання параметра.	Назва параметра, який контролюється або регулюється.	Стандарти технологічного режиму та гранично допустимі розбіжності	Необхідні компоненти схеми автоматизації (регулювання, Контролювання, сигналізування)
1	2	3	4	5
1	Реактор	Розхід	2086 М <sup>3</sup> /год	Контролювання, регулювання

Кінець таблиці 1.1 Параметри виробничого контролю

2	Накопичувач конденсату	Рівень	10м	Контролювання, регулювання
3	Дистилятор	Температура	172...173 °С	Контролювання, сигналізування
4	Конденсаторний бак	Тиск	15,7 МПа	Контролювання, сигналізування
5	Бойлер	Температура	172...173 °С	Контролювання, сигналізування
6	Випарний блок	Тиск	14,4 МПа	Контролювання, сигналізування
7	Сорбер	Тиск	15,7 МПа	Контролювання, сигналізування
8	Скрубер	Тиск	13,5 МПа	Контролювання, сигналізування

#### 1.4 Постановка задачі автоматизованого управління при виробництві карбаміду

Для формування якісного вихідного продукту при виробництві карбаміду потрібно розробити схему, що враховує специфіку процесу. Крім того, важливо враховувати економічну доцільність використання тієї чи іншої форми автоматизації, щоб виробництво тієї чи іншої інновації не стало фінансово збитковим.

Перед встановленням регулятора та під час роботи системи автоматичного регулювання необхідний розрахунок.

Найбільш ефективні настройка для пристроїв регулювання , при яких система є достатньо стабільною та задовольняє прийняті стандарти якості під

час перехідного процесу. Ефективність роботи САР залежить від якості балансування регулятора. Вибір найбільш відповідних параметрів для налаштування.

Процес створення САР є одним із найвідповідальніших і складних етапів. Незважаючи на впровадження в практику автоматизації складних виробничих процесів ЕОМ, вимоги до точності та якості оптимальних налаштувань апаратури керування не знизилися, а ускладнилися. Оптимальне налаштування пристроїв регулювання підвищує якість і економічну цінність основного і додаткового обладнання, а також надійність його роботи.

Властивості SAR залежать від об'єкта та контролера. Усі параметри SAR поділяються на три категорії:

- визначити параметри, які не можна змінити (наприклад, статичні та динамічні параметри);
- параметри, які проектувальник може вибрати під час розробки регулятора, але не може змінити під час переробки;
- параметри, які можна змінити під час налаштування (налаштування).
- формування САР на базі промислових контролерів передбачає розв'язок питання пошуку та налаштування параметрів контролера відповідно до заданих параметрів об'єкта.

Це питання розв'язується таким чином:

- на основі інформації щодо об'єкта регулювання, характеру збурень, керуючого впливу тощо вибирається загальний закон, який є відносно простим регулюванням;
- визначити оптимальне розміщення контролера;
- проводиться оцінка якості роботи системи з знайденими оптимальними конфігураціями регулятора;
- якщо система не в змозі виконати завдання, використовується більш складний закон регулювання;

- якщо розглянутий захід не є ефективним, то доповнити структуру САР (додати додаткові норми, визначити характер наслідків порушень тощо).

Для технічної процедури виробництва сечовини на установці, яка використовує пару та конденсацію, важливо вибрати засоби автоматизації, які дозволять максимально ефективно контролювати процес. Всі необхідні реагенти повинні бути присутніми в певному співвідношенні; це досягається шляхом вимірювання споживання конкретних компонентів і регулювання споживаної кількості. Введення сировини ( $\text{CO}_2$  і  $\text{NH}_3$ ) має підтримуватися постійним у певному обсязі. Важливо підтримувати конкретну температуру в машині, певний тиск у дистилляторі та конкретну концентрацію на виході з конденсатора, що є типовим для процедури. Для цього необхідно використовувати методи регулювання та управління температурою: первинні прилади, що вимірюють температуру на виході з реактора та дистиллятора; механізми, що регулюють потік пари, що використовується для нагріву дистиллятора. У реакторі необхідне вимірювання і регулювання об'єму, щоб уникнути переливів і регулювати поточні значення.

Насоси працюють від електродвигунів, ці двигуни мають дистанційне управління, яке є окремим від основної системи. Електродвигуни повинні бути захищені від перевантаження. Для цього використовується механічний та електричний захист. У разі аварійної зупинки насоса слід спрацювати автоматику захисту електродвигунів під час аварійних ситуацій та систему технологічних блоків для перекриття регулюючої арматури на відповідних технологічних трубопроводах у схемі процесу синтезу.

### 1.5 Висновки до першого розділу

В першому розділі проведено опис властивостей карбаміду. Наведено дослідження установок по виробництву карбаміду. Визначено їх переваги і недоліки. Запропоновано технологічна схема і покращеними параметрами.

Виконано постановка задачі по автоматизації устаткування виробництва карбаміду, що має покращені параметри. Приведено основні поняття вибору системи автоматичного регулювання, що забезпечує якісне виконання функції управління технологічним процесом. Визначені основні вимоги до САР, показані етапи вибору системи автоматичного регулювання, які полегшують розробнику процес формування нових технологічних та автоматизованих систем.

## 2 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВИРОБНИЦТВА ЗА ТЕХНОЛОГІЧНОЮ СХЕМОЮ СИНТЕЗУ КАРБАМАТІВ.

### 2.1 Загальні поняття математичного моделювання

Математичне моделювання можна розглядати як форму дослідження, що вивчає реальну систему шляхом її заміни більш практичною системою (моделлю), що зберігає вихідні ознаки. У процесі моделювання функція опису замінюється більш простою та більш практичною функцією, якою є модель.

Формування математичних моделей, які використовують чисельні методи, займає багато часу та коштує дорого. Таким чином, вирішення проблеми та формування нової моделі приймається лише тоді, коли є більш простий спосіб вирішення проблеми (наприклад, зміна однієї з поточних моделей).

Дослідження предмета дослідження і фіксація його математичного опису передбачає зв'язок властивостей процедури, розпізнавання її меж і початкових умов, формалізацію процедури як системи математичних зв'язків.

Процес створення будь-якої математичної моделі можна описати як ряд кроків, зображених на малюнку 2.1. [7-10]

На етапі дослідження прототипу потрібно виконати наступні дії:

- Дослідження взаємодії між об'єктом і його зовнішнім середовищем, вибір характеристик вхідних даних, які впливають на об'єкт, і реакції об'єкта на них, класифікація їх на вимірювані чи невимірні, Контрольовані чи неКонтрольовані, а також перешкоди;
- проведення дослідження та аналіз внутрішнього складу об'єкта;
- дослідження порядку функціонування об'єкта, виявлення вхідних і вихідних зав'язків і формування множинних станів об'єкта;
- збір і підтвердження існуючої експериментальної інформації про аналогічні об'єкти, за потреби проведення додаткових експериментів;

- класифікація об'єкта, що моделюється, як стаціонарного чи не-стаціонарного, вимірювання ступеня впливу на об'єкт випадкових факторів і порядок зв'язку характеристик об'єкта один з одним;
- детальний Дослідження писемних джерел, порівняння та Дослідження раніше створених моделей одного і того ж об'єкта;
- Дослідження та узагальнення всього накопиченого матеріалу, формування загальної схеми формування математичної моделі.

На основі дослідження об'єкта, що моделюється, створюється релевантне положення про процес моделювання, яке повинно містити:

- мета моделювання;
- тип моделі.

Керівні принципи повинні чітко вказувати, що вимоги моделі щодо адекватності та якості виконуються.

Тип моделі повинен відповідати результатам класифікації модельованого об'єкта, інакше модель навряд чи підійде.

Було розглянуто всю дослідницьку роботу, а також відповідний опис задачі моделювання, додаткові вимоги, які повинні бути виконані під час впровадження моделі, вони задокументовані в технічному завданні щодо проектування та розробки моделі.

Концептуальний опис моделювання — перелік основних питань, які формулюються в термінах конкретних галузей науки (таких як фізика, хімія, біологія тощо), разом із гіпотезами про властивості та поведінку модельованого об'єкта. На основі дослідження результатів об'єкта моделювання розробник моделі створює своє бачення процесів, що відбуваються в об'єкті, і формулює його природною мовою, що описує предметну область. Крім того, для спрощення моделі він визнає кілька умов і припущень. Припущення можуть передбачати ігнорування конкретних процедур або зміну характеру їх прогресування. Концептуальна модель має бути схвалена експертами у відповідній галузі, щоб оцінити її достатність. Правильність концептуальної мо-

делі має вирішальне значення для правильності математичної моделі, яка з неї виводиться. [7-10]

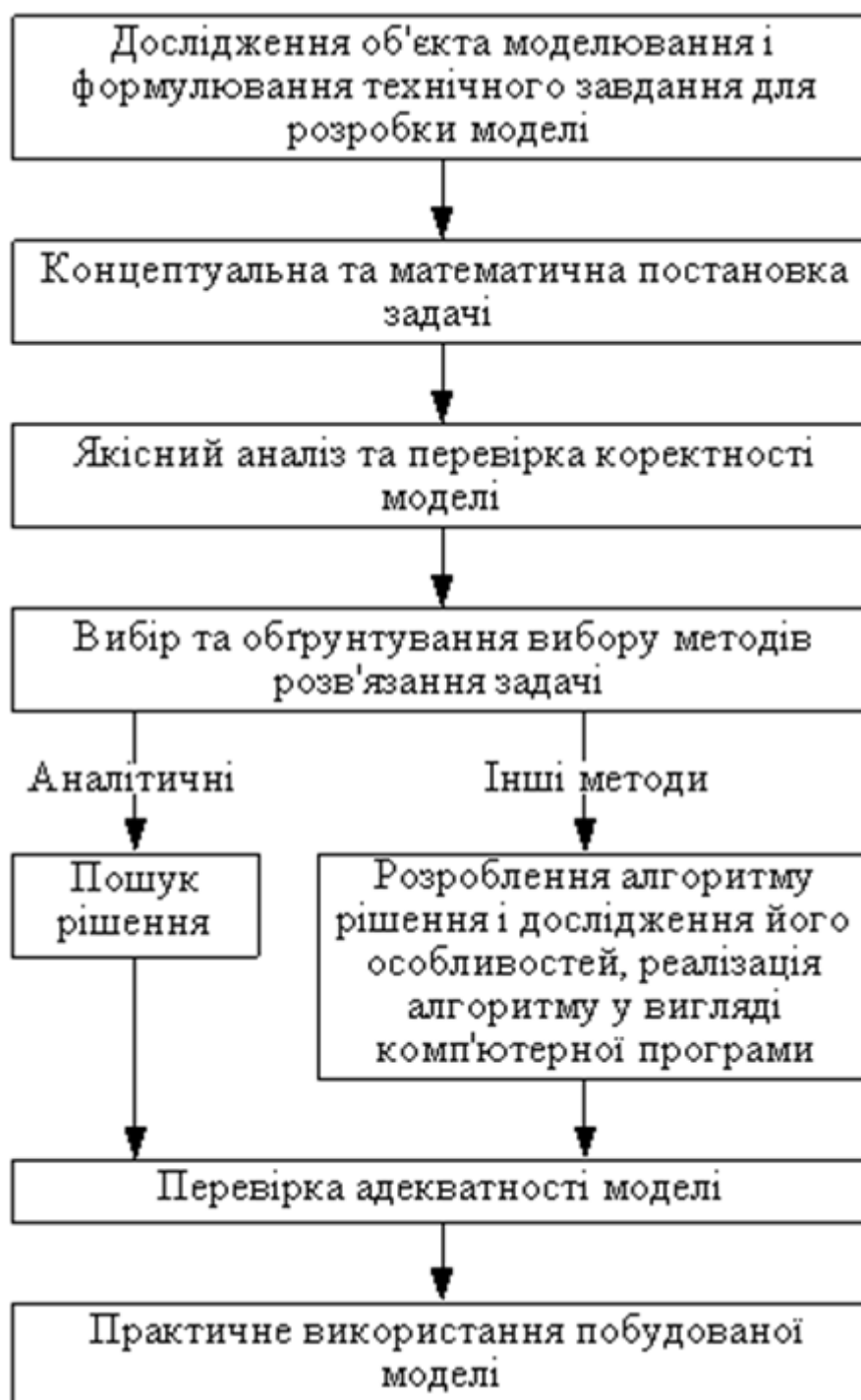


Рисунок 2.1 – Етапи формування математичної моделі

Математичний опис проблеми моделювання — це набір математичних рівнянь, які описують поведінку та властивості об'єкта моделювання. Дуже

важливо формалізувати моделі змінних та їхні зв'язки. Математичний опис моделі виводиться з правил фізики, хімії та інших галузей, що стосуються динаміки і статички процесів у досліджуваному предметі, і виражається спільною мовою з усіма іншими розділами математики. У створенні попередньо визначених моделей, алгебраїчних рівнянь і систем найбільшої популярності набули звичайні диференціальні рівняння і рівняння в частинних похідних, матрична математика і теорія ймовірностей. Без попереднього знання об'єкта наявність математичних моделей посилюється за рахунок використання багатовимірних статистичних методів: регресії, кореляції та інших методів, а також проведення планових або пасивних експериментів.

## 2.2 Опис технічного процесу формування аміаку

Опишемо технічний процес формування аміаку в клітинному реакторі. На рис. 2.2. зображено креслення такого типу установки.

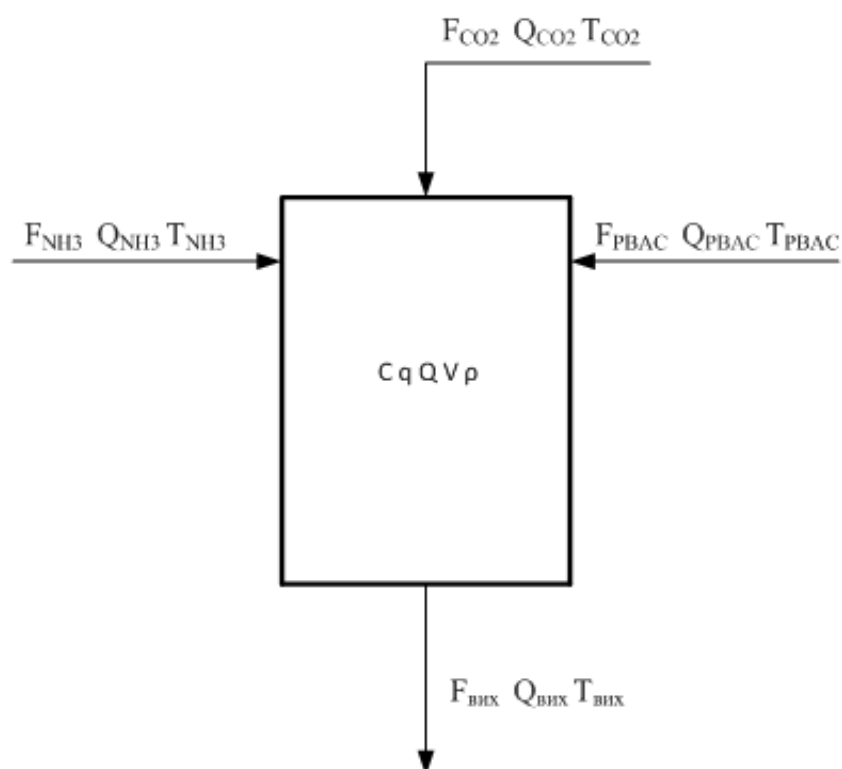


Рисунок 2.2 – Вхідні і вихідні сигнали синтезу карбамату амонію

$F_{CO_2}$  – розхід  $CO_2$  на вході у реактор;

$F_{NH_3}$  – розхід  $NH_3$  на вході в реактор;

$F_{PBAC}$  – розхід розчину солей вуглецево-амонійових на вході в реактор;

$F_{вих}$  – розхід на виході розчину карбамату амонію з реактору;

$Q_{CO_2}$  – вхідна теплоємність  $CO_2$  у реакторі;

$Q_{NH_3}$  – вхідна теплоємність  $NH_3$  реактору;

$Q_{PBAC}$  – вхідна теплоємність розчину вуглецево-амонійових солей реактору;

$Q_{вих}$  – вхідна теплоємність розчину карбамату амонію реактору;

$T_{CO_2}$  – вхідна температура  $CO_2$  реактору;

$T_{NH_3}$  – вхідна температура  $NH_3$  реактору;

$T_{PBAC}$  – вхідна температура розчину вуглецево-амонійових солей реактору;

$T_{вих}$  – вихідна температура розчину карбамату амонію реактору;

$T_{H.C.}$  – температура навколишнього середовища;

$x_{PBAC}$  – концентрація карбаміду у розчині вуглецево-амонійових солей;

$x_{вих}$  – вихідна концентрація карбаміду у плаві реактору;

$V$  – об'єм;

$\rho$  – густина;

$q$  – кількість енергії в результаті реакції;

$R$  – універсальна газова постійна.

Під час моделювання статичного і динамічного режиму, приймаємо наступні припущення [11-14]:

– об'єм реакції повного перемішування;

– швидкість початкової реакції;

– на хід реакції концентрація та температура не впливають;

– формула реакції у реакторні :



– немає втрат у навколишнє середовище.

Таблиця 2.1 – Основні характеристики процесу

Назва	Значення	Розмірність
витрата $\text{CO}_2$ на вході в реактор	700	$\text{м}^3/\text{ГОД}$
витрата $\text{NH}_3$ на вході в реактор	1300	$\text{м}^3/\text{ГОД}$
вхідний розхід розчину солей вуглецево-амонійових	480	$\text{м}^3/\text{ГОД}$
розхід розчину карбамату амонію на виході	2086	$\text{м}^3/\text{ГОД}$
теплоємність $\text{CO}_2$ на вході в реактор	1.05	кДж/(кг·К)
теплоємність $\text{NH}_3$ на вході в реактор	2.2	кДж/(кг·К)
теплоємність розчину солей вуглецево-амонійових вхідна	1.7	кДж/(кг·К)
теплоємність розчину амонія карбамату вихідна	3.5	кДж/(кг·К)
температура $\text{CO}_2$ вхідна	287	К
температура $\text{NH}_3$ вхідна	312	К
температура розчину амонію карбамату вихідна	422	К
температура амонію розчину карбамату вихідна	459	К

Кінець таблиці 2.1 – Основні характеристики процесу

температура навколишнього середовища	293	К
концентрація карбаміду у розчині вуглецево-амонійових солей	65	%
концентрація в плаві карбаміду вихідна	78	%
об'єм	1,97	м <sup>3</sup>
густина	1,2	кг/м <sup>3</sup>
кількість енергії у результаті реакції	125,7	кДж
універсальна газова постійна	8,31	кДж/(кг·К)

Усі технологічні значення, пов'язані зі статичним моделюванням, перераховані в таблиці 2.1.

## 2.2 Статичний режим техпроцесу

Теплове та матеріальне співвідношення у реакторі.

На рис. 2.3. показано узагальнену схему, що демонструє процес синтезу карбаміду.

Параметром обмеження є кількість карбаміду в суміші, що виходить з реактора.

Вплив на Контролювання залежить від споживання аміаку та CO<sub>2</sub>, FNH<sub>3</sub> FCO<sub>2</sub>.

Найбільше порушення має температура сировини TCO<sub>2</sub>.

Середнім значенням є температура суміші на виході з реактора [11-14].

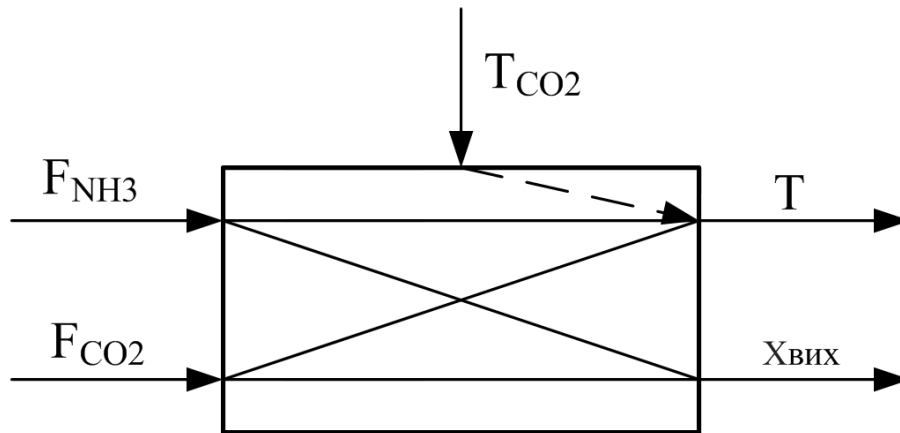


Рисунок 2.3 – Параметрична схема реактору

Запишемо склад матеріалів пристрою:

$$F_{вих} = F_{CO_2} + F_{NH_3} + F_{PBAC}$$

$$F_{вих} = F_{CO_2} + F_{PBAC} + 2.1 F_{PBAC} = F_{CO_2} + 3.1 F_{PBAC} = 2085$$

Вираз статичного режиму балансу за компонентом:

$$F_{вих} X_{PBAC} - (F_{CO_2} + 3.1 F_{PBAC}) X_{вих} - Vp X_{вих} A e^{-E/R Q_{вих}} = 0 \quad (2.1)$$

Вираз статичного режиму балансу за температурою:

Умова відсутності викидів у навколишнє середовище:

$$F_{NH_3} Q_{NH_3} T_{NH_3} + F_{CO_2} Q_{CO_2} T_{CO_2} + 2.1 F_{PBAC} Q_{PBAC} T_{PBAC} +$$

$$+ Vp X_{вих} A e^{-E/R Q_{вих}} q(F_{CO_2} + 3.1 F_{PBAC}) - (F_{CO_2} + 3.1 F_{PBAC}) Q_{вих} T_{вих} = 0 \quad (2.2)$$

Умова наявності викидів у навколишнє середовище:

$$F_{NH_3} Q_{NH_3} T_{NH_3} + F_{CO_2} Q_{CO_2} T_{CO_2} + 2.1 F_{PBAC} Q_{PBAC} T_{PBAC} - KS(T_{вих} - T_{н.с.})$$

$$+ Vp X_{вих} A e^{-E/R Q_{вих}} q(F_{CO_2} + 3.1 F_{PBAC}) - (F_{CO_2} + 3.1 F_{PBAC}) Q_{вих} T_{вих} = 0 \quad (2.3)$$

Рівняння балансу динамічного режиму за компонентною:

$$F_{\text{вих}} X_{\text{PBAC}} - (F_{\text{CO}_2} + 3.1 F_{\text{PBAC}}) X_{\text{вих}} - Vp X_{\text{вих}} A e^{-E/R} Q_{\text{вих}} = Vp \frac{dX_{\text{вих}}}{dt} \quad (2.4)$$

Рівняння балансу динамічного режиму у реакторі окиснення аміаку за температурою:

Умова відсутності викидів у навколишнє середовище:

$$\begin{aligned} & F_{\text{NH}_3} Q_{\text{NH}_3} T_{\text{NH}_3} + F_{\text{CO}_2} Q_{\text{CO}_2} T_{\text{CO}_2} + 2.1 F_{\text{PBAC}} Q_{\text{PBAC}} T_{\text{PBAC}} + \\ & + Vp X_{\text{вих}} A e^{-E/R} Q_{\text{вих}} q(F_{\text{CO}_2} + 3.1 F_{\text{PBAC}}) - (F_{\text{CO}_2} + 3.1 F_{\text{PBAC}}) Q_{\text{вих}} T_{\text{вих}} = \\ & = V Q_{\text{вих}} \frac{dT_{\text{вих}}}{dt} \end{aligned} \quad (2.5)$$

Умова присутності викидів у навколишнє середовище:

$$\begin{aligned} & F_{\text{NH}_3} Q_{\text{NH}_3} T_{\text{NH}_3} + F_{\text{CO}_2} Q_{\text{CO}_2} T_{\text{CO}_2} + 2.1 F_{\text{PBAC}} Q_{\text{PBAC}} T_{\text{PBAC}} - KS(T_{\text{вих}} - T_{\text{H.C.}}) \\ & + Vp X_{\text{вих}} A e^{-E/R} Q_{\text{вих}} q(F_{\text{CO}_2} + 3.1 F_{\text{PBAC}}) - (F_{\text{CO}_2} + 3.1 F_{\text{PBAC}}) Q_{\text{вих}} T_{\text{вих}} = \\ & = V Q_{\text{вих}} \frac{dT_{\text{вих}}}{dt} \end{aligned} \quad (2.6)$$

Получаємо систему рівнянь:

Умова відсутності викидів у навколишнє середовище:

$$\begin{aligned} & F_{\text{вих}} X_{\text{PBAC}} - (F_{\text{CO}_2} + 3.1 F_{\text{PBAC}}) X_{\text{вих}} - Vp X_{\text{вих}} A e^{-E/R} Q_{\text{вих}} = Vp \frac{dX_{\text{вих}}}{dt} \\ & F_{\text{NH}_3} Q_{\text{NH}_3} T_{\text{NH}_3} + F_{\text{CO}_2} Q_{\text{CO}_2} T_{\text{CO}_2} + 2.1 F_{\text{PBAC}} Q_{\text{PBAC}} T_{\text{PBAC}} + \\ & + Vp X_{\text{вих}} A e^{-E/R} Q_{\text{вих}} q(F_{\text{CO}_2} + 3.1 F_{\text{PBAC}}) - (F_{\text{CO}_2} + 3.1 F_{\text{PBAC}}) Q_{\text{вих}} T_{\text{вих}} = \\ & = V Q_{\text{вих}} \frac{dT_{\text{вих}}}{dt} \end{aligned} \quad (2.7)$$

Умова наявності викидів у навколишнє середовище:

$$\begin{aligned}
 & F_{\text{вих}} X_{\text{PBAC}} - (F_{\text{CO}_2} + 3,1 F_{\text{PBAC}}) X_{\text{вих}} - Vp X_{\text{вих}} A e^{-E/R} Q_{\text{вих}} = Vp \frac{dX_{\text{вих}}}{dt} \\
 & F_{\text{NH}_3} Q_{\text{NH}_3} T_{\text{NH}_3} + F_{\text{CO}_2} Q_{\text{CO}_2} T_{\text{CO}_2} + 2,1 F_{\text{PBAC}} Q_{\text{PBAC}} T_{\text{PBAC}} - KS(T_{\text{вих}} - T_{\text{H.C.}}) + \\
 & + Vp X_{\text{вих}} A e^{-E/R} Q_{\text{вих}} q(F_{\text{CO}_2} + 3,1 F_{\text{PBAC}}) - (F_{\text{CO}_2} + 3,1 F_{\text{PBAC}}) Q_{\text{вих}} T_{\text{вих}} = \\
 & = V Q_{\text{вих}} \frac{dT_{\text{вих}}}{dt}
 \end{aligned} \tag{2.8}$$

Лінерізація рівнянь

Система рівнянь з диференціальним оператором є складною. У цьому математичному описі системи відсутні необхідні деталі, і він не підходить для подальшого Дослідження чи використання. Щоб отримати лінійну систему диференціальних рівнянь, спочатку лінеаризуємо систему нелінійних диференціальних рівнянь у точках основного статичного режиму. [15-22]

Щоб отримати рівняння для відхилення (лінеаризоване), припустимо:

$$F_{\text{PBAC}} = F_{\text{PBAC}(0)} + \Delta F_{\text{PBAC}}$$

$$F_{\text{CO}_2} = F_{\text{CO}_2(0)} + \Delta F_{\text{CO}_2}$$

$$X_{\text{вих}} = X_{\text{вих}(0)} + \Delta X_{\text{вих}}$$

$$T_{\text{вих}} = T_{\text{вих}(0)} + \Delta T_{\text{вих}}$$

$$T_{\text{PBAC}} = T_{\text{PBAC}(0)} + \Delta T_{\text{PBAC}}$$

В результаті отримаємо:

Умова відсутності викидів у навколишнє середовище:

$$\Delta F_{\text{PBAC}} X_{\text{PBAC}} - 3,1 \Delta F_{\text{PBAC}} X_{\text{PBAC}} - \Delta F_{\text{CO}_2} X_{\text{вих}} - (F_{\text{CO}_2} - 3,1 \Delta F_{\text{PBAC}}) \Delta X_{\text{вих}} -$$

$$\begin{aligned}
& -\Delta T_{\text{вих}} \frac{Vp X_{\text{вих}} (Ae^{-\frac{E}{RQ_{\text{вих}}}}) E}{R T_{\text{вих}}^2} - Vp \Delta X_{\text{вих}} A e^{-E/R} Q_{\text{вих}} = Vp \frac{d X_{\text{вих}}}{dt} \\
& \Delta F_{\text{PВАС}} Q_{\text{PВАС}} T_{\text{PВАС}} + F_{\text{PВАС}} Q_{\text{PВАС}} \Delta T_{\text{PВАС}} + \Delta F_{\text{CO}_2} Q_{\text{CO}_2} T_{\text{CO}_2} + \\
& + 2.1 \Delta F_{\text{PВАС}} Q_{\text{NH}_3} T_{\text{NH}_3} + Vp \Delta X_{\text{вих}} A e^{-E/R} Q_{\text{вих}} (F_{\text{CO}_2} + 3.1 \Delta F_{\text{PВАС}}) + \\
& + \Delta T_{\text{вих}} \frac{Vp X_{\text{вих}} (Ae^{-\frac{E}{RQ_{\text{вих}}}}) q (F_{\text{CO}_2} - 3.1 \Delta F_{\text{PВАС}}) E}{R T_{\text{вих}}^2} + 3.1 \Delta F_{\text{PВАС}} Vp \Delta X_{\text{вих}} A e^{-E/R} Q_{\text{вих}} \\
& q \Delta F_{\text{CO}_2} Vp \Delta X_{\text{вих}} A e^{-E/R} Q_{\text{вих}} q - \Delta F_{\text{CO}_2} Q_{\text{вих}} T_{\text{вих}} - 3.1 \Delta F_{\text{PВАС}} Q_{\text{вих}} T_{\text{вих}} - (F_{\text{CO}_2} \\
& + 3.1 \Delta F_{\text{PВАС}}) Q_{\text{вих}} T_{\text{вих}} = Vp Q_{\text{вих}} \frac{d T_{\text{вих}}}{dt}
\end{aligned} \tag{2.9}$$

Умова наявності викидів у навколишнє середовище:

$$\begin{aligned}
& \Delta F_{\text{PВАС}} X_{\text{PВАС}} - 3.1 \Delta F_{\text{PВАС}} X_{\text{PВАС}} - \Delta F_{\text{CO}_2} X_{\text{вих}} - (F_{\text{CO}_2} - 3.1 \Delta F_{\text{PВАС}}) \Delta X_{\text{вих}} \\
& -\Delta T_{\text{вих}} \frac{Vp X_{\text{вих}} (Ae^{-\frac{E}{RQ_{\text{вих}}}}) E}{R T_{\text{вих}}^2} - Vp \Delta X_{\text{вих}} A e^{E/R} Q_{\text{вих}} = Vp \frac{d X_{\text{вих}}}{dt} \\
& \Delta F_{\text{PВАС}} Q_{\text{PВАС}} T_{\text{PВАС}} + F_{\text{PВАС}} Q_{\text{PВАС}} \Delta T_{\text{PВАС}} + \Delta F_{\text{CO}_2} Q_{\text{CO}_2} T_{\text{CO}_2} - \\
& - K_S \Delta T_{\text{вих}} - K_S \Delta T_{\text{H.C.}} + Vp \Delta X_{\text{вих}} A e^{-E/R} Q_{\text{вих}} (F_{\text{CO}_2} + 3.1 \Delta F_{\text{PВАС}}) + \\
& + \Delta T_{\text{вих}} \frac{Vp X_{\text{вих}} (Ae^{-\frac{E}{RQ_{\text{вих}}}}) q (F_{\text{CO}_2} - 3.1 \Delta F_{\text{PВАС}}) E}{R T_{\text{вих}}^2} + 3.1 \Delta F_{\text{PВАС}} Vp \Delta X_{\text{вих}} A e^{-E/R} Q_{\text{вих}} q - \\
& - \Delta F_{\text{CO}_2} Vp \Delta X_{\text{вих}} A e^{-E/R} Q_{\text{вих}} q - \Delta F_{\text{CO}_2} Q_{\text{вих}} T_{\text{вих}} - 3.1 \Delta F_{\text{PВАС}} Q_{\text{вих}} T_{\text{вих}} - (F_{\text{CO}_2} + \\
& + 3.1 \Delta F_{\text{PВАС}}) Q_{\text{вих}} T_{\text{вих}} = Vp Q_{\text{вих}} \frac{d T_{\text{вих}}}{dt}
\end{aligned} \tag{2.10}$$

Зведемо подібні доданки.

Умова відсутності викидів у навколишнє середовище:

$$\begin{aligned}
& Vp \frac{d X_{\text{Вих}}}{dt} + (F_{\text{CO}_2} + 3,1 \Delta F_{\text{PBAC}} + Vp A e^{-E/R} Q_{\text{вих}}) \Delta X_{\text{вих}} = \\
& = \Delta T_{\text{вих}} \frac{Vp X_{\text{Вих}} (A e^{-\frac{E}{R Q_{\text{вих}}}}) E}{R T_{\text{Вих}}^2} + \Delta F_{\text{PBAC}} (X_{\text{CO}_2} - 3,1 \Delta X_{\text{PBAC}}) - \Delta F_{\text{CO}_2} X_{\text{PBAC}} \\
& \Delta T_{\text{вих}} \left( - \frac{Vp X_{\text{Вих}} (A e^{-\frac{E}{R Q_{\text{вих}}}}) q (F_{\text{CO}_2} - 3,1 \Delta F_{\text{PBAC}}) E}{R T_{\text{Вих}}^2} + (F_{\text{CO}_2} + 3,1 \Delta F_{\text{PBAC}}) Q_{\text{Вих}} \right) + \\
& Vp Q_{\text{вих}} \frac{d T_{\text{Вих}}}{dt} = \Delta F_{\text{PBAC}} (Q_{\text{PBAC}} T_{\text{PBAC}} + 2,1 Q_{\text{NH}_3} T_{\text{NH}_3} + 3,1 Vp \Delta X_{\text{вих}} A e^{-E/R} Q_{\text{вих}} q - \\
& 3,1 Q_{\text{Вих}} T_{\text{Вих}}) + \Delta F_{\text{CO}_2} (Q_{\text{CO}_2} T_{\text{CO}_2} + 3,1 Vp \Delta X_{\text{вих}} A e^{-E/R} Q_{\text{вих}} q - Q_{\text{Вих}} T_{\text{Вих}}) + \\
& + K_S T_{\text{H.C.}} + Vp \Delta X_{\text{вих}} A e^{-E/R} Q_{\text{вих}} (F_{\text{CO}_2} + 3,1 \Delta F_{\text{PBAC}}) + \Delta F_{\text{PBAC}} Q_{\text{PBAC}} T_{\text{PBAC}}
\end{aligned} \tag{2.11}$$

Умова наявності викидів у навколишнє середовище:

$$\begin{aligned}
& Vp \frac{d X_{\text{Вих}}}{dt} + (F_{\text{CO}_2} + 3,1 \Delta F_{\text{PBAC}} + Vp A e^{-E/R} Q_{\text{вих}}) \Delta X_{\text{вих}} = \\
& = \Delta T_{\text{вих}} \frac{Vp X_{\text{Вих}} (A e^{-\frac{E}{R Q_{\text{вих}}}}) E}{R T_{\text{Вих}}^2} + \Delta F_{\text{PBAC}} (X_{\text{CO}_2} - 3,1 \Delta X_{\text{PBAC}}) - \Delta F_{\text{CO}_2} X_{\text{PBAC}} \\
& \Delta T_{\text{вих}} \left( - \frac{Vp X_{\text{Вих}} (A e^{-\frac{E}{R Q_{\text{вих}}}}) q (F_{\text{CO}_2} - 3,1 \Delta F_{\text{PBAC}}) E}{R T_{\text{Вих}}^2} + (F_{\text{CO}_2} + 3,1 \Delta F_{\text{PBAC}}) Q_{\text{Вих}} \right) + \\
& Vp Q_{\text{вих}} \frac{d T_{\text{Вих}}}{dt} = \Delta F_{\text{PBAC}} (Q_{\text{PBAC}} T_{\text{PBAC}} + 2,1 Q_{\text{NH}_3} T_{\text{NH}_3} + 3,1 Vp \Delta X_{\text{вих}} A e^{-E/R} Q_{\text{вих}} q - \\
& 3,1 Q_{\text{Вих}} T_{\text{Вих}}) + \Delta F_{\text{CO}_2} (Q_{\text{CO}_2} T_{\text{CO}_2} + 3,1 Vp \Delta X_{\text{вих}} A e^{-E/R} Q_{\text{вих}} q - Q_{\text{Вих}} T_{\text{Вих}}) + \\
& + K_S T_{\text{H.C.}} + Vp \Delta X_{\text{вих}} A e^{-E/R} Q_{\text{вих}} (F_{\text{CO}_2} + 3,1 \Delta F_{\text{PBAC}}) + \Delta F_{\text{PBAC}} Q_{\text{PBAC}} T_{\text{PBAC}}
\end{aligned} \tag{2.12}$$

Введемо такі позначення:

$$Y_1 = F_{\text{CO}_2} + F_{\text{PBAC}} + Vp \Delta A e^{-E/R} Q_{\text{вих}}$$

$$T_1 = \frac{Vp}{Y_1}$$

$$K_{F_{\text{CO}_2} X_{\text{вих}}} = \frac{X_{\text{Вих}}}{Y_1}$$

$$K_{F_{PВАС}X_{ВИХ}} = \frac{X_{PВАС} - 3,1X_{ВИХ}}{Y_1}$$

$$K_{T_{ВИХ}X_{ВИХ}} = \frac{3,1Vp\Delta X_{ВИХ}(Ae^{-\frac{E}{RQ_{ВИХ}}}}{Y_1 R Q_{ВИХ}^2}$$
(2.13)

Умова присутності викидів у навколишнє середовище:

$$Y_2 = KS - \frac{Vp X_{ВИХ}(Ae^{-\frac{E}{RQ_{ВИХ}}})q(F_{CO_2} - 3,1\Delta F_{PВАС})E}{R T_{ВИХ}^2} + (F_{CO_2} + 3,1\Delta F_{PВАС})Q_{ВИХ}$$

$$T_2 = \frac{VpQ_{ВИХ}}{Y_2}$$

$$K_{F_{CO_2}X_{ВИХ}} = \frac{Q_{CO_2}T_{CO_2} + Vp q \Delta X_{ВИХ}(Ae^{-\frac{E}{RQ_{ВИХ}}}) - Q_{ВИХ}T_{ВИХ}}{Y_2}$$

$$K_{F_{PВАС}T_{ВИХ}} = \frac{Q_{PВАС}T_{PВАС} + Q_{CO_2}T_{CO_2} + 3,1Vp q \Delta X_{ВИХ}(Ae^{-\frac{E}{RQ_{ВИХ}}}) - 3,1Q_{ВИХ}T_{ВИХ}}{Y_2}$$

$$K_{T_{ВИХ}X_{ВИХ}} = \frac{Vp q \Delta X_{ВИХ}(Ae^{-\frac{E}{RQ_{ВИХ}}}) - (F_{CO_2} + 3,1F_{PВАС})}{Y_2}$$

$$K_{T_{CO_2}T_{ВИХ}} = \frac{F_{CO_2}T_{CO_2}}{Y_2}$$

(2.14)

Умова відсутності викидів у навколишнє середовище:

$$Y_2 = - \frac{Vp X_{ВИХ}(Ae^{-\frac{E}{RQ_{ВИХ}}})q(F_{CO_2} - 3,1\Delta F_{PВАС})E}{R T_{ВИХ}^2} + (F_{CO_2} + 3,1\Delta F_{PВАС})Q_{ВИХ}$$

$$T_2 = \frac{VpQ_{ВИХ}}{Y_2}$$

$$K_{F_{CO_2}X_{ВИХ}} = \frac{Q_{CO_2}T_{CO_2} + Vp q \Delta X_{ВИХ}(Ae^{-\frac{E}{RQ_{ВИХ}}}) - Q_{ВИХ}T_{ВИХ}}{Y_2}$$

$$K_{F_{PВАС}T_{ВИХ}} = \frac{Q_{PВАС}T_{PВАС} + Q_{CO_2}T_{CO_2} + 3,1Vp q \Delta X_{ВИХ}(Ae^{-\frac{E}{RQ_{ВИХ}}}) - 3,1Q_{ВИХ}T_{ВИХ}}{Y_2}$$

$$K_{T_{вих}X_{вих}} = \frac{Vp\eta\Delta X_{вих}(Ae^{-\frac{E}{RQ_{вих}}}) - (F_{CO_2} + 3,1F_{рвас})}{Y_2}$$

$$K_{T_{CO_2}T_{вих}} = \frac{F_{CO_2}T_{CO_2}}{Y_2} \quad (2.15)$$

Рівняння в формі Коші.

Умова відсутності викидів у навколишнє середовище:

$$T_1 \frac{dX_{ВИХ}}{dt} + \Delta X_{вих} = \Delta T_{вих} K_{T_{вих}X_{вих}} + \Delta F_{РВАС} K_{рвасX_{вих}} - \Delta F_{CO_2} K_{CO_2X_{вих}}$$

$$\Delta T_{вих} + T_2 \frac{dT_{ВИХ}}{dt} = \Delta F_{РВАС} K_{рвасX_{вих}} + \Delta F_{CO_2} K_{CO_2T_{вих}} + \Delta X_{вих} K_{X_{вих}T_{вих}} + \Delta T_{рвас} K_{ТрвасX_{вих}} \quad (2.16)$$

Умова наявності викидів у навколишнє середовище:

$$T_1 \frac{dX_{ВИХ}}{dt} + \Delta X_{вих} = \Delta T_{вих} K_{T_{вих}X_{вих}} + \Delta F_{РВАС} K_{рвасX_{вих}} - \Delta F_{CO_2} K_{CO_2X_{вих}}$$

$$+ \Delta T_{H.C.} K_{ТрвасX_{вих}}$$

$$\Delta T_{вих} + T_2 \frac{dT_{ВИХ}}{dt} = \Delta F_{РВАС} K_{рвасX_{вих}} + \Delta F_{CO_2} K_{CO_2T_{вих}} + \Delta X_{вих} K_{X_{вих}T_{вих}} + \Delta T_{рвас} K_{ТрвасX_{вих}}$$

$$+ \Delta T_{H.C.} K_{ТрвасX_{вих}} \quad (2.17)$$

Визначення коефіцієнтів рівнянь.

Звернемо увагу на розмірність коефіцієнтів:

$$Y_1 = \left[ \frac{M^3}{ГОД} \right] + \left[ \frac{M^3}{ГОД} \right] + [M^3] \left[ \frac{КГ}{M^3} \right] \left[ \frac{M^3}{КГ * ГОД} \right] e^{-\frac{\left[ \frac{МОЛЬ}{ДЖ} \right]}{\left[ \frac{ДЖ}{МОЛЬ * К} \right] [К]}} = \left[ \frac{M^3}{ГОД} \right]$$

$$T_1 = \frac{[\text{М}^3] \left[ \frac{\text{КГ}}{\text{М}^3} \right]}{\left[ \frac{\text{М}^3}{\text{ГОД}} \right]} = \left[ \frac{\text{КГ} * \text{ГОД}}{\text{М}^3} \right]$$

$$K_{\text{Рвас}} X_{\text{вих}} = \frac{1}{\left[ \frac{\text{М}^3}{\text{ГОД}} \right]} = \left[ \frac{\text{ГОД}}{\text{М}^3} \right]$$

$$K_{X_{\text{вих}} T_{\text{вих}}} = \frac{[\text{М}^3] \left[ \frac{\text{КГ}}{\text{М}^3} \right] \left[ \frac{\text{М}^3}{\text{КГ} * \text{ГОД}} \right] e^{-\frac{\left[ \frac{\text{МОЛЬ}}{\text{ДЖ}} \right]}{\left[ \frac{\text{ДЖ}}{\text{МОЛЬ} * \text{К}} \right] [\text{К}]} [\text{ДЖ}]} \left[ \frac{\text{М}^3}{\text{ГОД}} \right]}{\left[ \frac{\text{М}^3}{\text{ГОД}} * \frac{\text{ДЖ}}{\text{КГ} * \text{К}} \right]} = \left[ \frac{\text{М}^3 * \text{КГ} * \text{К}}{\text{ГОД}} \right]$$

$$K_{T_{\text{рвас}} T_{\text{вих}}} = \frac{\left[ \frac{\text{М}^3}{\text{ГОД}} \right] \left[ \frac{\text{ДЖ}}{\text{КГ} * \text{К}} \right]}{\left[ \frac{\text{М}^3}{\text{ГОД}} * \frac{\text{ДЖ}}{\text{КГ} * \text{К}} \right]} = \left[ \frac{\text{К} * \text{ГОД}}{\text{М}^3} \right]$$

$$K_{X_{\text{вих}} T_{\text{вих}}} = \frac{[\text{М}^3] \left[ \frac{\text{КГ}}{\text{М}^3} \right] \left[ \frac{\text{М}^3}{\text{КГ} * \text{ГОД}} \right] e^{-\frac{\left[ \frac{\text{МОЛЬ}}{\text{ДЖ}} \right]}{\left[ \frac{\text{ДЖ}}{\text{МОЛЬ} * \text{К}} \right] [\text{К}]} [\text{ДЖ}]} \left[ \frac{\text{М}^3}{\text{ГОД}} \right]}{\left[ \frac{\text{М}^3}{\text{ГОД}} * \frac{\text{ДЖ}}{\text{КГ} * \text{К}} \right]} = \left[ \frac{\text{М}^3 * \text{КГ} * \text{К}}{\text{ГОД}} \right]$$

$$K_{T_{\text{рвас}} T_{\text{вих}}} = \frac{\left[ \frac{\text{М}^3}{\text{ГОД}} \right] \left[ \frac{\text{ДЖ}}{\text{КГ} * \text{К}} \right]}{\left[ \frac{\text{М}^3}{\text{ГОД}} * \frac{\text{ДЖ}}{\text{КГ} * \text{К}} \right]} = \left[ \frac{\text{К} * \text{ГОД}}{\text{М}^3} \right]$$

$$K_{T_{\text{вих}} X_{\text{вих}}} = \frac{[\text{М}^3] \left[ \frac{\text{КГ}}{\text{М}^3} \right] \left[ \frac{\text{М}^3}{\text{КГ} * \text{ГОД}} \right] e^{-\frac{\left[ \frac{\text{МОЛЬ}}{\text{ДЖ}} \right]}{\left[ \frac{\text{ДЖ}}{\text{МОЛЬ} * \text{К}} \right] [\text{К}]} \left[ \frac{\text{МОЛЬ}}{\text{ДЖ}} \right]} \left[ \frac{\text{МОЛЬ}}{\text{ДЖ}} \right]}{\left[ \frac{\text{М}^3}{\text{ГОД}} \right] \left[ \frac{\text{ДЖ}}{\text{МОЛЬ} * \text{К}} \right] [\text{К}]^2} = \left[ \frac{\text{МОЛЬ}}{\text{ДЖ}} \right]^2 \frac{1}{[\text{К}]}$$

$$Y_2 = \left[ \frac{\text{Дж} * \text{М}}{\text{кг} * \text{К} * \text{ГОД}} \right] [\text{М}^2] - \frac{[\text{М}^3] \left[ \frac{\text{КГ}}{\text{М}^3} \right] \left[ \frac{\text{М}^3}{\text{КГ} * \text{ГОД}} \right] e^{-\frac{\left[ \frac{\text{МОЛЬ}}{\text{Дж}} \right]}{\left[ \frac{\text{Дж}}{\text{МОЛЬ} * \text{К}} \right] [\text{К}]}} [\text{Дж}] \left[ \frac{\text{М}^3}{\text{ГОД}} \right] \left[ \frac{\text{МОЛЬ}}{\text{Дж}} \right]}{\left[ \frac{\text{Дж}}{\text{МОЛЬ} * \text{К}} \right] [\text{К}]^2}$$

$$+ \left[ \frac{\text{М}^3}{\text{ГОД}} \right] \left[ \frac{\text{Дж}}{\text{кг} * \text{К}} \right] = \left[ \frac{\text{М}^3}{\text{ГОД}} * \frac{\text{Дж}}{\text{кг} * \text{К}} \right]$$

$$T_2 = \frac{[\text{М}^3] \left[ \frac{\text{КГ}}{\text{М}^3} \right] \left[ \frac{\text{Дж}}{\text{КГ} * \text{К}} \right]}{\left[ \frac{\text{М}^3}{\text{ГОД}} * \frac{\text{Дж}}{\text{КГ} * \text{К}} \right]} = \left[ \frac{\text{КГ} * \text{ГОД}}{\text{М}^3} \right]$$

$$K_{\text{ГрвасТвих}} = \frac{\left[ \frac{\text{Дж}}{\text{КГ} * \text{К}} \right] [\text{К}] + [\text{М}^3] \left[ \frac{\text{КГ}}{\text{М}^3} \right] \left[ \frac{\text{М}^3}{\text{КГ} * \text{ГОД}} \right] e^{-\frac{\left[ \frac{\text{МОЛЬ}}{\text{Дж}} \right]}{\left[ \frac{\text{Дж}}{\text{МОЛЬ} * \text{К}} \right] [\text{К}]}} [\text{Дж}] - \left[ \frac{\text{Дж}}{\text{КГ} * \text{К}} \right] [\text{К}]}{\left[ \frac{\text{М}^3}{\text{ГОД}} * \frac{\text{Дж}}{\text{КГ} * \text{К}} \right]}$$

$$= \left[ \frac{\text{К} * \text{ГОД}}{\text{М}^3} \right]$$

$$K_{\text{ХвихТвих}} = \frac{[\text{М}^3] \left[ \frac{\text{КГ}}{\text{М}^3} \right] \left[ \frac{\text{М}^3}{\text{КГ} * \text{ГОД}} \right] e^{-\frac{\left[ \frac{\text{МОЛЬ}}{\text{Дж}} \right]}{\left[ \frac{\text{Дж}}{\text{МОЛЬ} * \text{К}} \right] [\text{К}]}} [\text{Дж}] \left[ \frac{\text{М}^3}{\text{ГОД}} \right]}{\left[ \frac{\text{М}^3}{\text{ГОД}} * \frac{\text{Дж}}{\text{КГ} * \text{К}} \right]} = \left[ \frac{\text{М}^3 * \text{КГ} * \text{К}}{\text{ГОД}} \right]$$

$$K_{\text{ТрвасТвих}} = \frac{\left[ \frac{\text{М}^3}{\text{ГОД}} \right] \left[ \frac{\text{Дж}}{\text{КГ} * \text{К}} \right]}{\left[ \frac{\text{М}^3}{\text{ГОД}} * \frac{\text{Дж}}{\text{КГ} * \text{К}} \right]} = \left[ \frac{\text{К} * \text{ГОД}}{\text{М}^3} \right]$$

Перевірка стійкості системи - Теорема Калмана.

Зпишемо матриці А і В:

$$A = \begin{pmatrix} T_1 + 1 & K_{\text{Тсо2Хсо2}} \\ -K_{\text{Хсо2Тсо2}} & T_2 + 2 \end{pmatrix}$$

$$B = \begin{pmatrix} K_{\text{Fсо2Хсо2}} \\ -K_{\text{Хсо2Хсо2}} \end{pmatrix}$$

$$A * B = \begin{pmatrix} K_{Fco2Xco2} \\ -K_{Xco2Xco2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T_1 + 1 + K_{Tco2Xco2} \\ T_2 + 2 - K_{Xco2Tco2} \end{pmatrix}$$

$$K = [B \ A * B]$$

$$K = \begin{pmatrix} K_{Fco2Xco2} & K_{Fco2Xco2} (T_1 + 1 + K_{Tco2Xco2}) \\ K_{Fco2Tco2} & K_{Fco2Tco2} (T_2 + 2 - K_{Xco2Tco2}) \end{pmatrix}$$

$$K_{ww} := \begin{pmatrix} -3.799 \times 10^{-6} & -0.0000038476546636973883748975 \\ -0.02 & -0.022651954087324150060476 \end{pmatrix} \text{float}, 2 \rightarrow \begin{pmatrix} -0.0000038 & -0.0000038 \\ -0.02 & -0.023 \end{pmatrix}$$

$$\text{rank}(K) = 2$$

Перетворення Лапласа по змінній часу

Щоб емулювати систему з відповідними функціями передачі. [15-22]  
Важливо написати диференціальне рівняння в операційному форматі, іншими словами одразу за формуванням змінної за часом Лапласа  $t \rightarrow s$  за нульових початкових умовах:

$$\Delta X_{вих} \rightarrow X_{вих}(p);$$

$$\Delta T_{вих} \rightarrow T_{вих}(p);$$

$$\Delta F_{CO_2} \rightarrow F_{CO_2}(p);$$

$$\Delta F_{PBAC} \rightarrow F_{PBAC}(p);$$

$$\Delta T_{вих} \rightarrow T_{вих}(p);$$

Умова відсутності викидів у навколишнє середовище:

$$\begin{aligned} (T_1 p + 1) X_{вих}(p) &= T_{вих}(p) K_{T_{вих} X_{вих}} + F_{CO_2}(p) K_{CO_2 X_{вих}} - F_{PBAC}(p) K_{F_{PBAC} X_{вих}} + T_{вих}(p) (1 + T_2 p) = \\ &= F_{CO_2}(p) K_{F_{CO_2} T_{вих}} + F_{PBAC}(p) K_{F_{PBAC} T_{вих}} + X_{вих}(p) K_{X_{вих} T_{вих}} + T_{CO_2}(p) K_{T_{CO_2} T_{вих}} \end{aligned}$$

Умова наявності викидів у навколишнє середовище:

$$\begin{aligned}
 T_1 p + 1) x_{вих}(p) &= T_{вих}(p) K_{T_{вих} X_{вих}} + F_{CO_2}(p) K_{CO_2 X_{вих}} - F_{рвас}(p) K_{F_{рвас} X_{вих}} + T_{вих}(p) (1 + T_2 p) = \\
 &= F_{CO_2}(p) K_{F_{CO_2} T_{вих}} + F_{PВАС}(p) K_{F_{PВАС} T_{вих}} + X_{вих}(p) K_{X_{вих} T_{вих}} + T_{CO_2}(p) K_{T_{CO_2} T_{вих}}
 \end{aligned}$$

Функції передачі по каналам збурення та управління

Тож функція передачі по каналу управління «витрати газів паливних  
→ концентрація суміші із вуглецем» :

$$W_{ker}(p) = \frac{-K_{F_{рвас} T_{вих}}}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1) + K_{T_{вих} X_{вих}} K_{X_{вих} T_{вих}}}$$

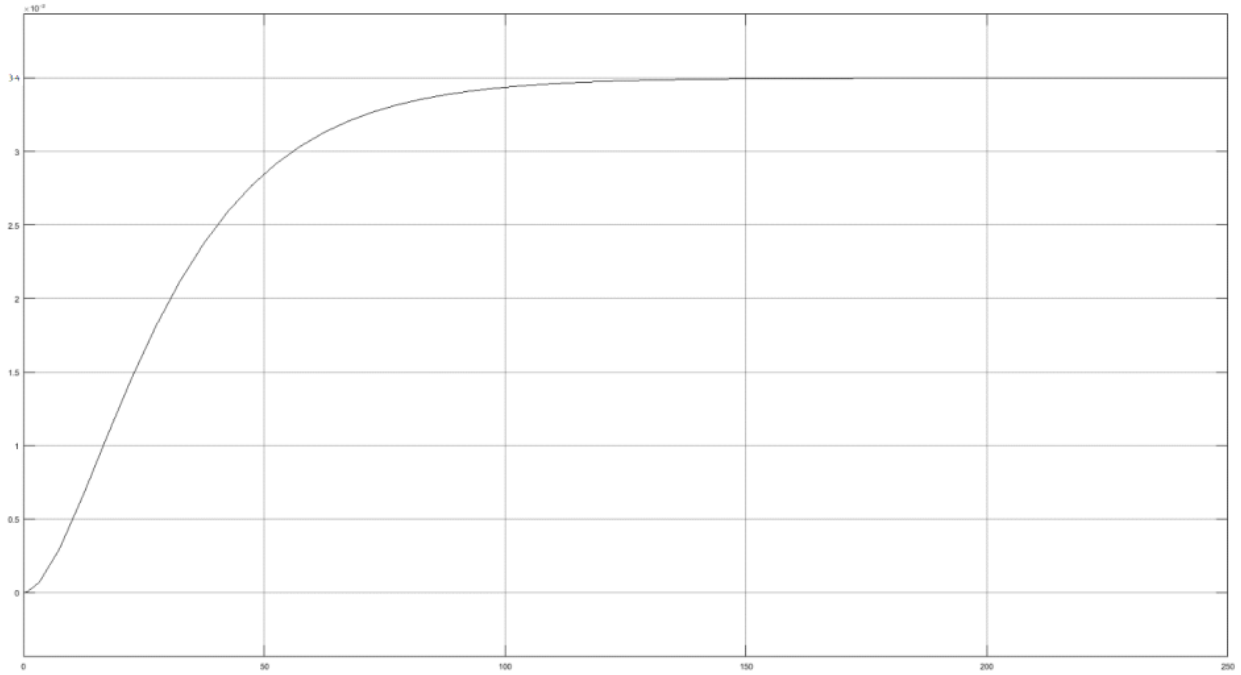
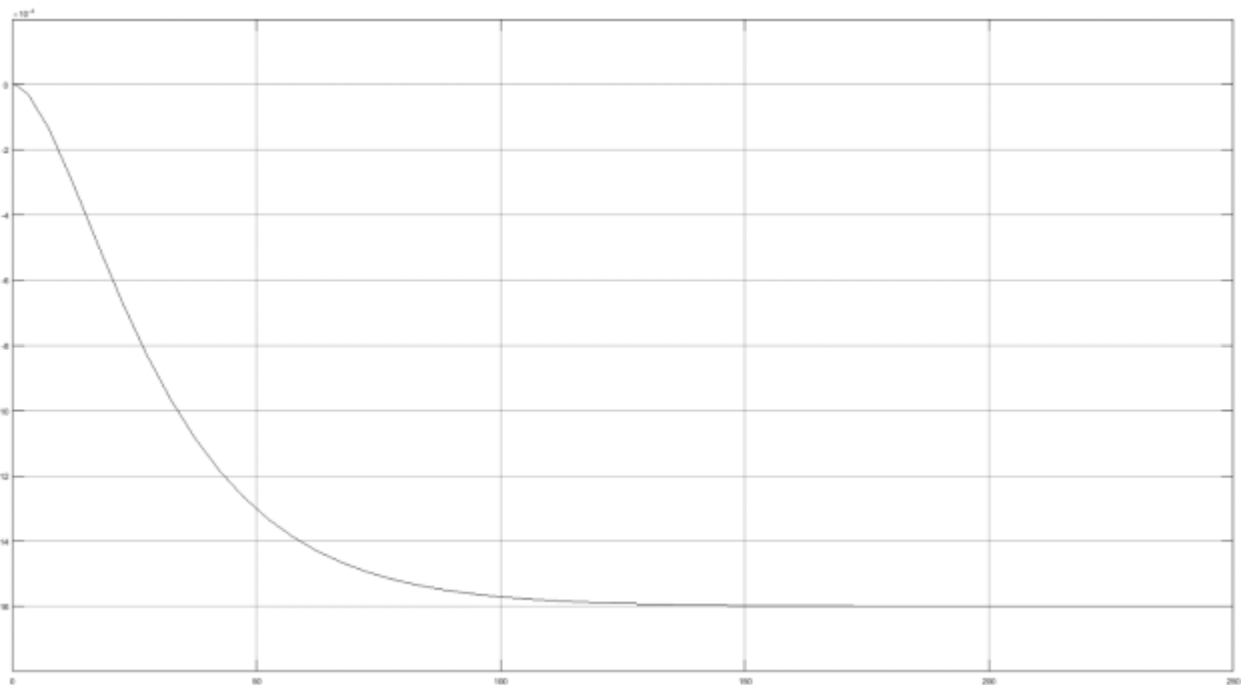
Функції передачі по каналу збурення «витрата сировини → концентрація суміші із вуглецю»:

$$W_{zb}(p) = \frac{K_{F_{рвас} T_{вих}}}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1) + K_{T_{вих} X_{вих}} K_{X_{вих} T_{вих}}}$$

Перехідні і імпульсні функції рис 2.4. та рис. 2.5.

$$W_{ker} = 0.0034 / 232.26 * p * p + 31.64 * p + 1$$

$$W_{zb} = -0.0591 / 232.26 * p * p + 31.64 * p + 1$$

Рисунок 2.4 - Перехідна та імпульсна функція  $W_{ker}$ Рисунок 2.5 - Перехідна та імпульсна функція  $W_{zb}$

## 2.4 Висновки до другого розділу

У другому розділі запропоновано узгальнена структура автоматизації виробництва карбноміду. Запропоновано математична модель опису процесу автоматизації. Проведено дослідження математичної моделі. На основі дослідження матмоделі, показано межі її використання.

## 3 СИНТЕЗУВАННЯ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ РЕАКТОРОМ

### 3.1 Огляд середовища математичного модулювання Simulink

Simulink — це графічне середовище для моделювання процесів, яке дозволяє створювати моделі динамічні та статичні, що включають дискретні, неперервні і гібридні процеси, а також блок-схеми, які представляють намічені графіки. Інтерактивне середовище Simulink можна використовувати із заздалегідь розробленими бібліотеками блоків для математичного моделювання електричних, механічних і гідравлічних систем, а також розробку розробленого модельного дизайну при створенні систем управління, цифрових телекомунікацій і реальних систем у режимі реального часу. Пакети розширення Simulink пропонують розв'язок різноманітних проблем від концепції моделі до її тестування, тестування, генерації коду та апаратної реалізації. Simulink включено в середовище MATLAB, що дозволяє використовувати інтегровані математичні методи, методи обробки великих даних і наукову графіку. [23-26]

Робота проектувальника полягає в тому, щоб вибрати тип контролера, який би гарантував бажану якість регулювання за мінімальних витрат і з максимально можливою надійністю. Щоб вибрати тип контролера і визначити його переваги, потрібно знати:

1. Властивості об'єкта управління статичні та динамічні.
2. Необхідність якості в процесі регулювання.
3. Якосні показники регулювання широко відомих пристроїв регулювання .
4. Характер зовнішніх збурень, що беруть участь у процесі регуляції.

Вибір типу регулятора зазвичай ініціюють двопозиційні регулятори, за якими можуть слідувати самонастроювальні регулятори невеликі процесори.

Постійно автоматичні регулятори, які дотримуються законів P (пропорційний), I (інтегральний), PI (пропорційний і інтегральний одночасно) і PID

(пропорційний, інтегральний і диференціальний одночасно), вважаються послідовними. У міру ускладнення законодавства про регулювання якості системи зростає, але витрати на систему також значно зростають.

Тип коригування вибирається виходячи з властивостей об'єкта і бажаних параметрів перехідного процесу. Параметри процесу переходу можуть потребувати різних конфігурацій. В одних випадках вигідною є процедура з найменшим значенням динамічної похибки, в інших – з найменшим значенням часу настрійка тощо. Зазвичай використовується один із трьох типових перехідних режимів: граничний аперіодичний, з перерегулюванням на 20%, і має мінімальну квадратичну площу відхилення.

Межа аперіодичного процесу характеризується відсутністю перерегулювання, мінімальною тривалістю регулювання та найменшим впливом регулятора на об'єкт (що призводить до найбільшого відхилення регульованої величини від заданої). Ця процедура називається оптимальним переходом, коли існує значний вплив регулювання на інші технологічні властивості об'єкта, про який йде мова, це робиться для того, щоб мінімізувати відхилення об'єкта від наміченого шляху. [23-26]

Процес з на 20% більшим контролем вважається більш значущим, оскільки збільшується величина впливу регулятора при зменшенні відхилення регульованого значення від заданого значення, і в той же час трохи збільшується час регулювання. Ця процедура вибрані як найефективніший, коли допускається невелика надмірна регуляція.

Процедура з максимально можливою зоною відхилення має значний заниження (до 40%), довго налагоджується і має найбільшу динамічну похибку.

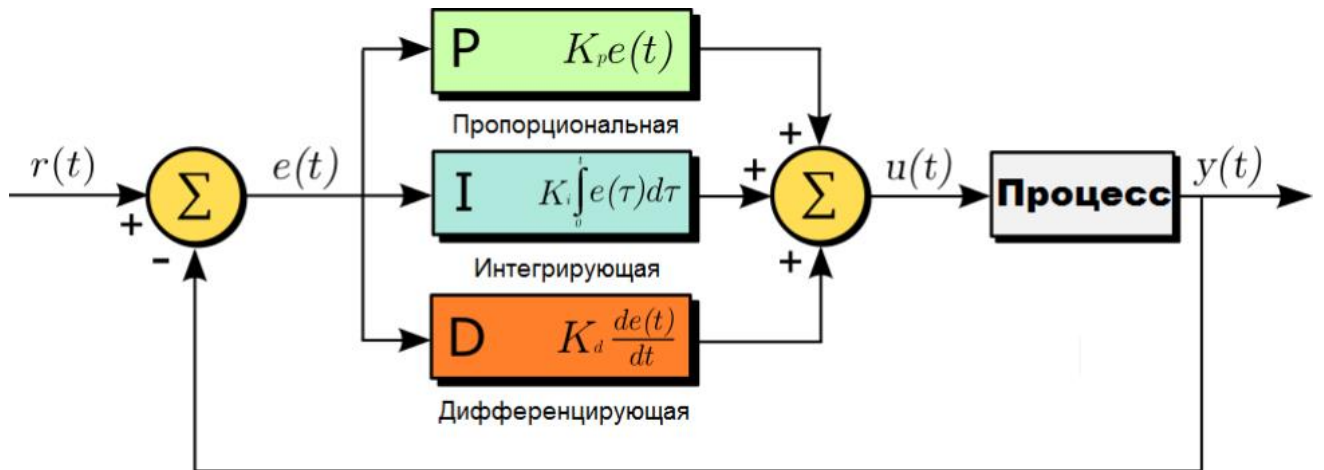
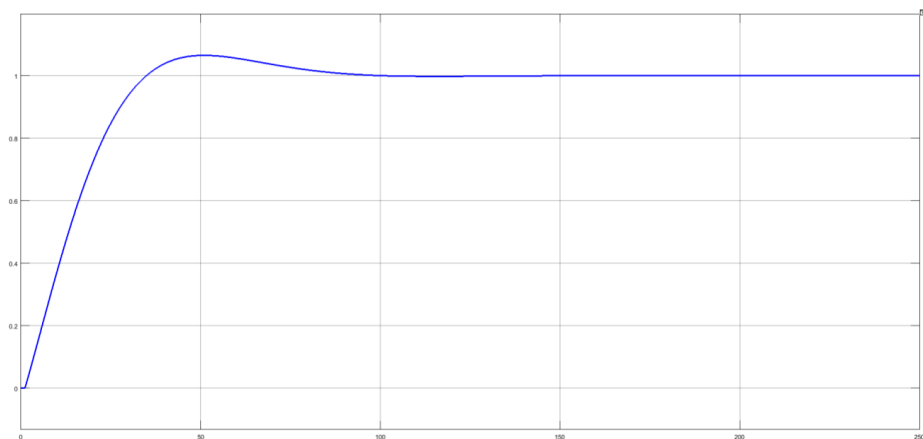
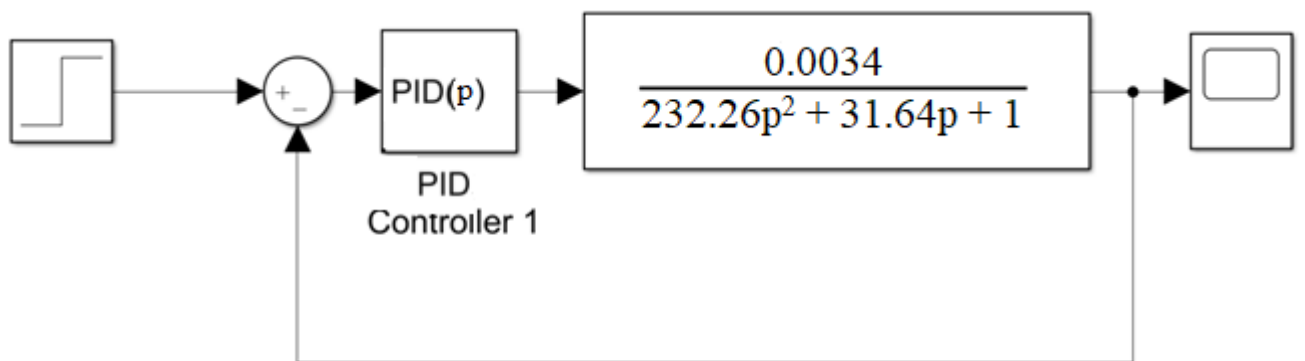


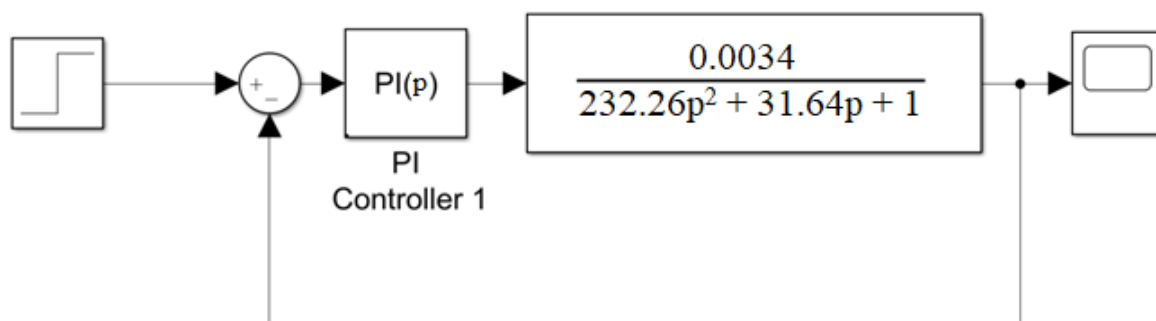
Рисунок 3.1 – Схема ПІД-регулятора що використовується



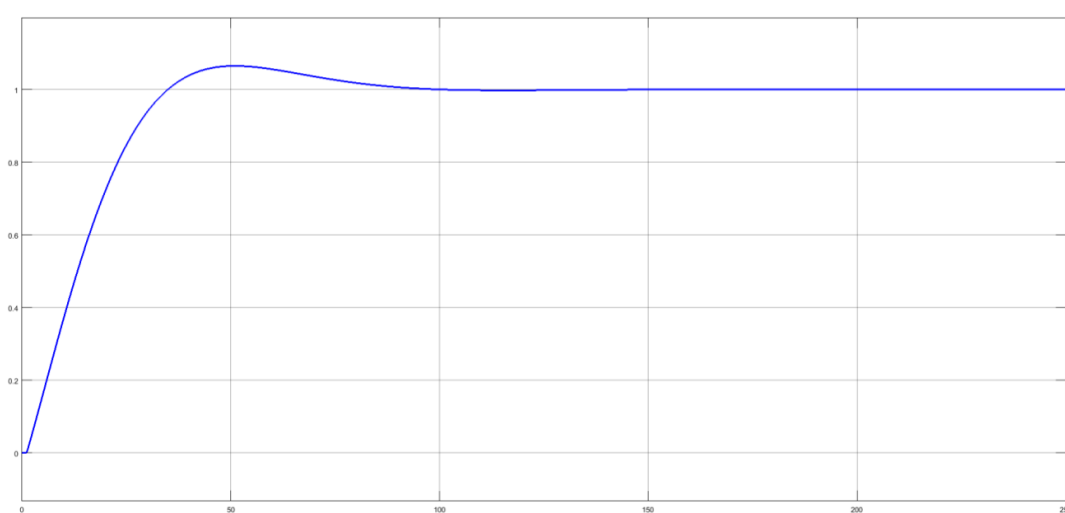
Proportional (P):	556.949611622871
Integral (I):	24.9582574519649
Derivative (D):	2629.8862898859
Filter coefficient (N):	7.41003323663517

Рисунок 3.2 - а) – Simulink модель системи, б) – характеристика перехідна  
в) – настройка регулятора

Тому як тільки Р-компонент, очевидно, недостатньо ефективний, вивчається його одноразове використання, а потім перейдемо до дослідження PI- та PID-пристроїв регулювання, для яких буде використана автоматна функцію Simulink, а також метод Циглера-Ніколса.



а)



б)

Proportional (P):

Integral (I):

в)

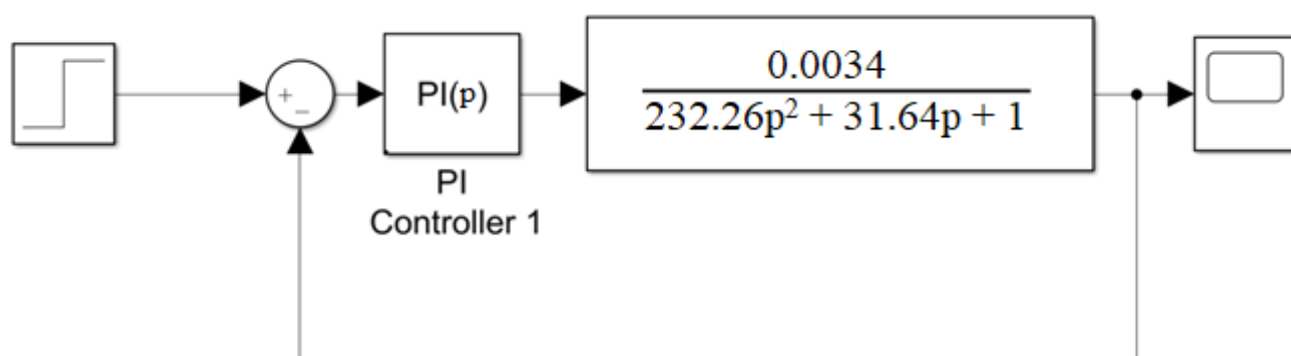
Рисунок 3.3 - а) – Simulink модель системи, б) – характеристика перехідна, в) – настройка регулятора,

### 3.4 Синтезування ПІ-регулятора по методу Ціглера-Нікольса

Вибір параметрів регулювання регулюючого пристрою повинен забезпечити певний запас стійкості замкнутої системи автоматичного регулювання, а обраний показник якості регулювання повинен відповідати вимогам (або мати конкретне значення). Оскільки теорія авторегуляції припускає, що запас стабільності може бути оцінений різними способами, і використовує різні показники якості регулювання, в процесі проектування використовуються різні методи пошуку оптимальних параметрів для налаштувань регулятора. [27-33]

Метод Циглера-Ніколса заснований насамперед на використанні експериментальних даних, пов'язаних з реальними об'єктами. Експериментальні методи, які обумовлюють учасників, не вимагають розуміння математичних описів об'єктів. Однак це передбачає, що система встановлена та готова до роботи. Крім того, можлива можливість зміни налаштувань контролера. Популярними стали два підходи: метод незатухаючих коливань і метод затухаючих коливань.

Матмодель ПІ-регулятора із її дослідженням наведена на рис. 3.10.



а)

$$C \downarrow = 143.48 \times \frac{(1 + 13p)}{p}$$

б)

```
>> pid(C)
```

```
ans =
```

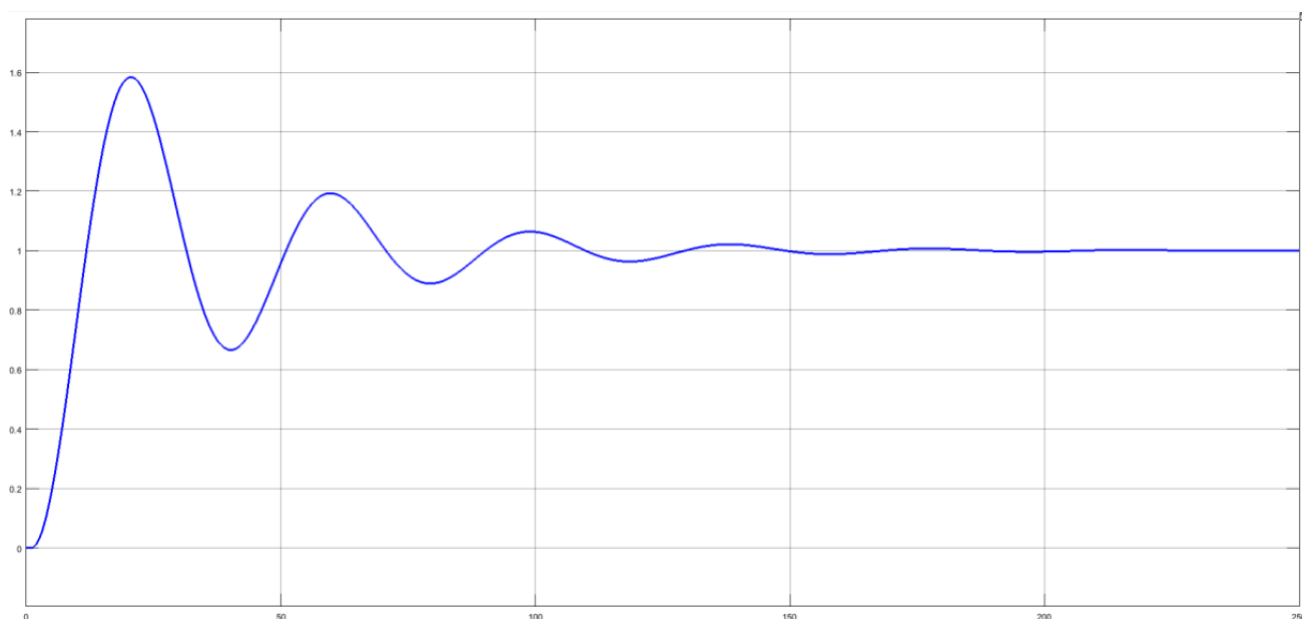
$$K_p + K_i * \frac{1}{s}$$

```
with Kp = 1.82e+03, Ki = 143
```

```
Name: C
```

```
Continuous-time PI controller in parallel form.
```

PI(p)      в)



г)

Рис 3.10 а) – Simulink модель системи, б) – ланка компенсатору в Sisotool, в) – настройка регулятора, г) – характеристика перехідна

Матмодель ПІД-регулятора із її дослідженням наведена на рис. 3.11.

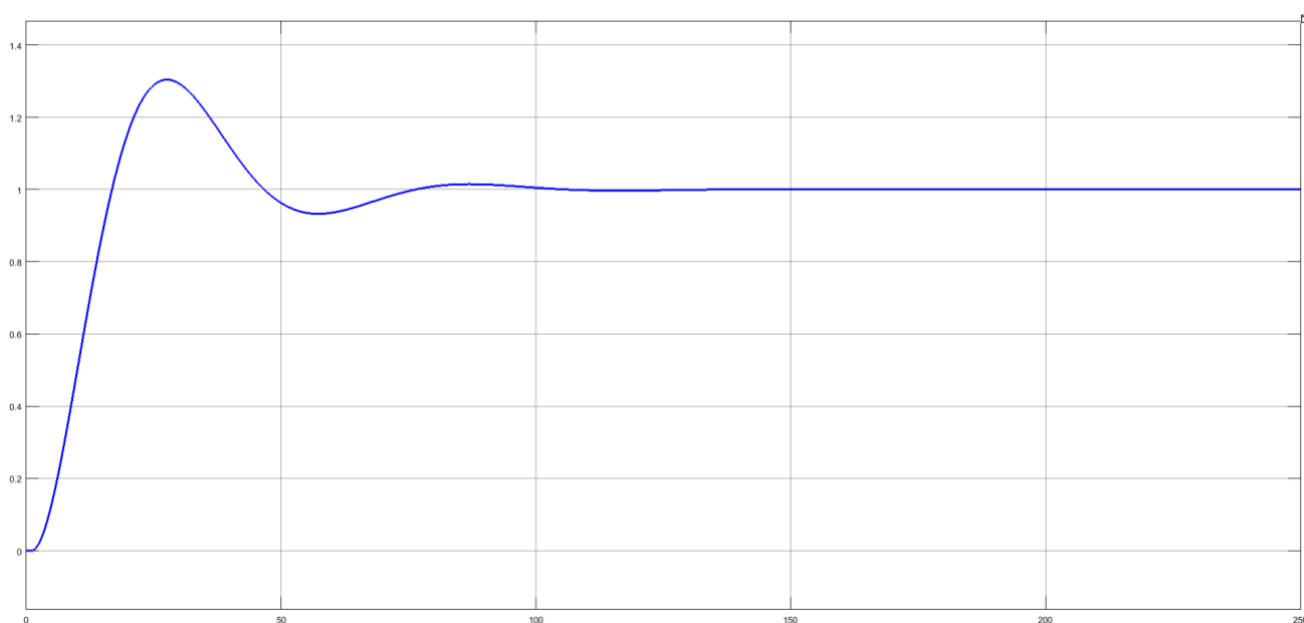
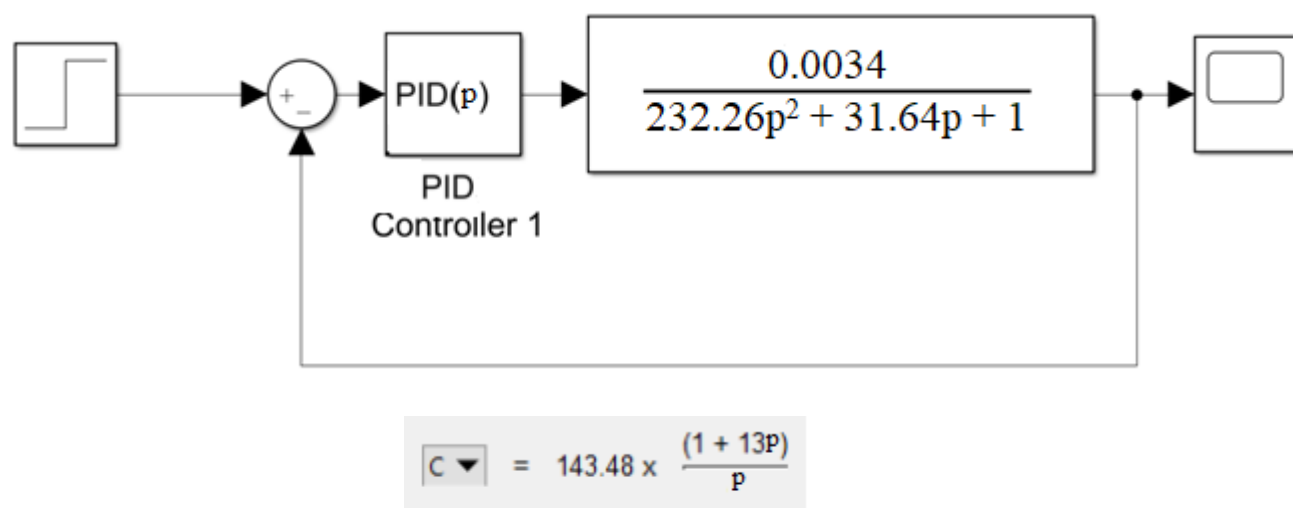


Рисунок 3.11 а) – Simulink модель системи, б) – ланка компенсатора у Sisotool, в) – настройка регулятора, г) – характеристика перехідна

### 3.3 Порівняння систем управління

Щоб порівняти різні системи керування максимально точно, система повинна мати числовий атрибут, який описує інші системи, цей атрибут повинен дозволити оцінювати, яка система є найбільш ефективнішою. Ці якісні атрибути мають назву ознаки якості.

Керування системою описується різними показниками, в які входять у першу чергу: точність, швидкодія, стабільність, надійність, вартість і опти-

мальність. У зв'язку із великою різноманітністю систем і об'єктів управління, на той час розроблено велику кількість різноманітних критеріїв, до яких відносяться і вищезазначені показники. Ці показники тісно пов'язані між собою (критерії якості), тому будь-яке бажання збільшити будь-який з показників системи управління призведе до зниження іншого. Наприклад, прагнення зменшити похибку, пов'язану з налаштуванням, приводить до зниження запасу по стійкості та швидкості, або ж зростання надійності системи неминуче приводить до підвищення її вартості. [27-33]

Через зв'язок поміж різними метриками систем управління задачу підбору або конструювання оптимальної системи розглядається як умовна екстремальна задача. Дізнайтеся про мінімальне та максимальне значення довільного показника, наприклад ціни, тоді як інші параметри обмежені певним значенням.

Прямі показники якості - це показники, які походять безпосередньо від властивості переходу. З прямих показників якості найчастіше використовують тривалість настрійка та кількість повторних налаштувань.

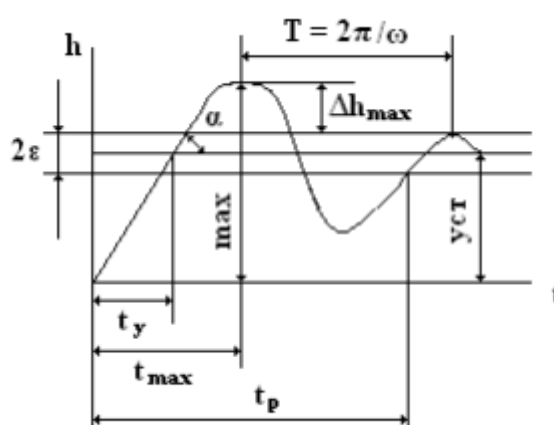


Рисунок 3.12 – Визначення прямих показників якості

Одним із головних показників якості процесу перехідного є час  $t_p$ , який використовується для обчислення тривалості перехідного процесу. Процес регулювання включає період часу  $t_p$ , який триває від моменту відхилення,

коли кількість матеріалу, що підлягає регулюванню, відхиляється від свого наміченого шляху, доки він знову не повертається на призначений шлях контролером. Теорія процесу перехідного регулювання полягає в тому, що він має нескінченну тривалість, але на практиці вважається, що теорія процесу перехідного регулювання закінчується, коли різниця між регульованою величиною та її призначеним значенням менше ніж ступінь чутливості регулювання.

$$|h(t) - h_{уст}| \leq \Delta, \quad \Delta = const$$

Час  $t_P$  базується на динамічних властивостях об'єкта регулювання, законах регулювання та значеннях регулятора, що визначають параметри регулювання. Будь-яке законодавство щодо регулювання має тривалість, яка залежить від параметрів законодавця. Однак  $t_P$  має бути принаймні певним порогом, чим нижчий поріг, тим менш суворий регулятор. Це мінімальний час, необхідний для здійснення переходу  $t_P$ , що пов'язано з відсутністю періодичності перехідних процесів регулювання. У всіх інших сценаріях, включаючи аперіодичні або конвергентні коливання, час, необхідний для налаштування, збільшується.

Вигідно, щоб за інших рівних умов процес переходу був якомога коротшим. Однак, якщо руйнівні умови в роботі виникають часто в інтервалах, коротших за  $t_P$ , тоді перехідні процеси не встигають завершитися, і тоді значення регульованої змінної буде відхилятися від свого встановленого значення з часом. [34-38]

Часом перехідного процесу є перша точка перетину графіка  $h(t)$  з ординатою постійної величини  $h_u$  або графіка  $e(t)$  з віссю абсцис. Перерегулювання  $s$ , це є максимальне відхилення характеристики перехідної від встановленого значення початкової величини, що виражається у відсотках або як відносні одиниці.

$$\sigma\% = \frac{h_{\max 1} - h_{уст}}{h_{уст}} \cdot 100\%$$

де  $h_{\max 1}$  - перший максимум.

Ступінь згасання визначається, як дріб:

$$\Psi = \frac{A1 - A3}{A3}$$

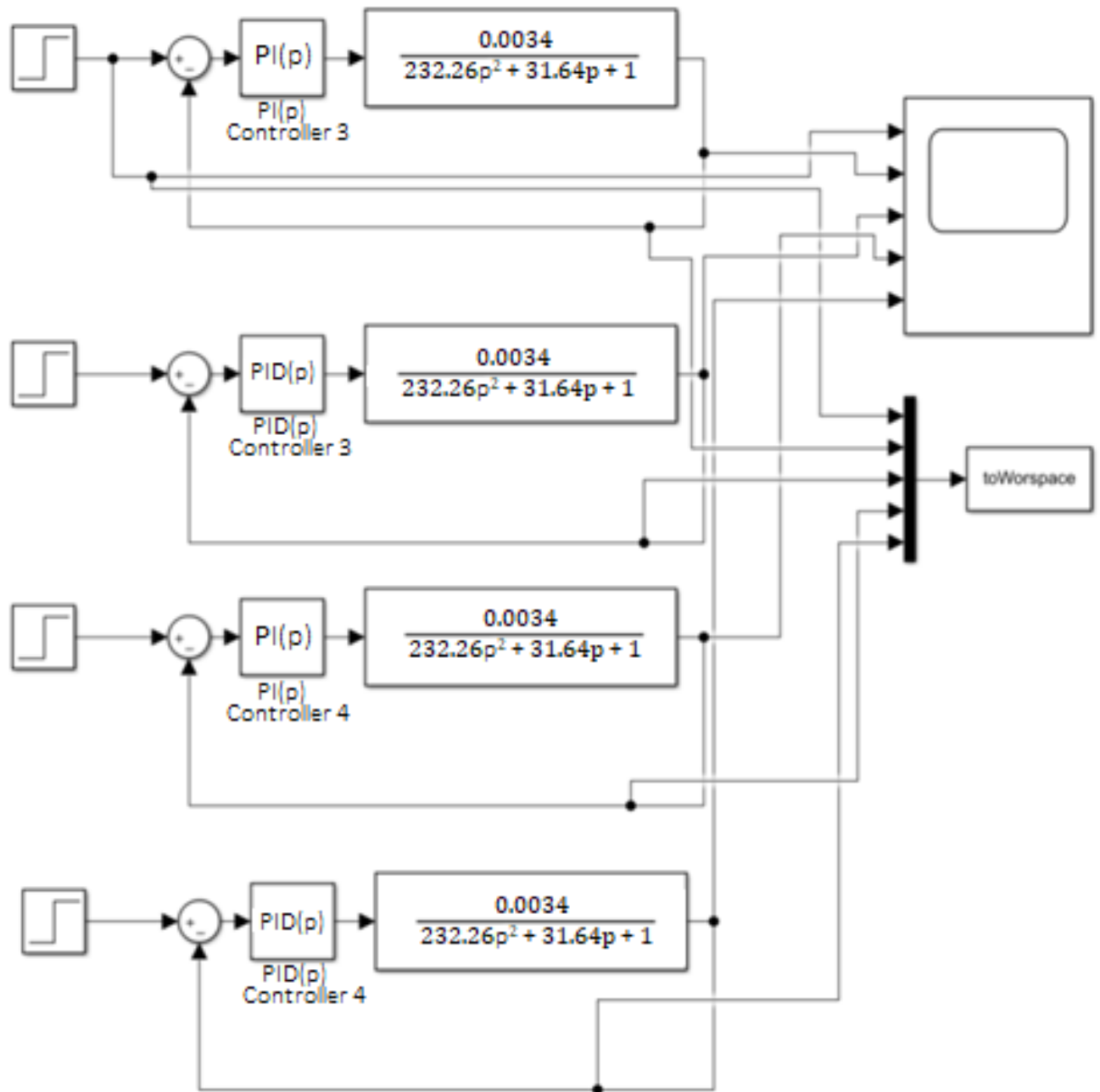
де  $A1$  і  $A3$  - 1-а і 3-я амплітуди відповідно характеристики перехідної .

Для порівняння було побудовано Simulink систему, яка представлена на рис. 3.13 а. Результати виконання функцій усіх систем показані на рис. 3.13 б.

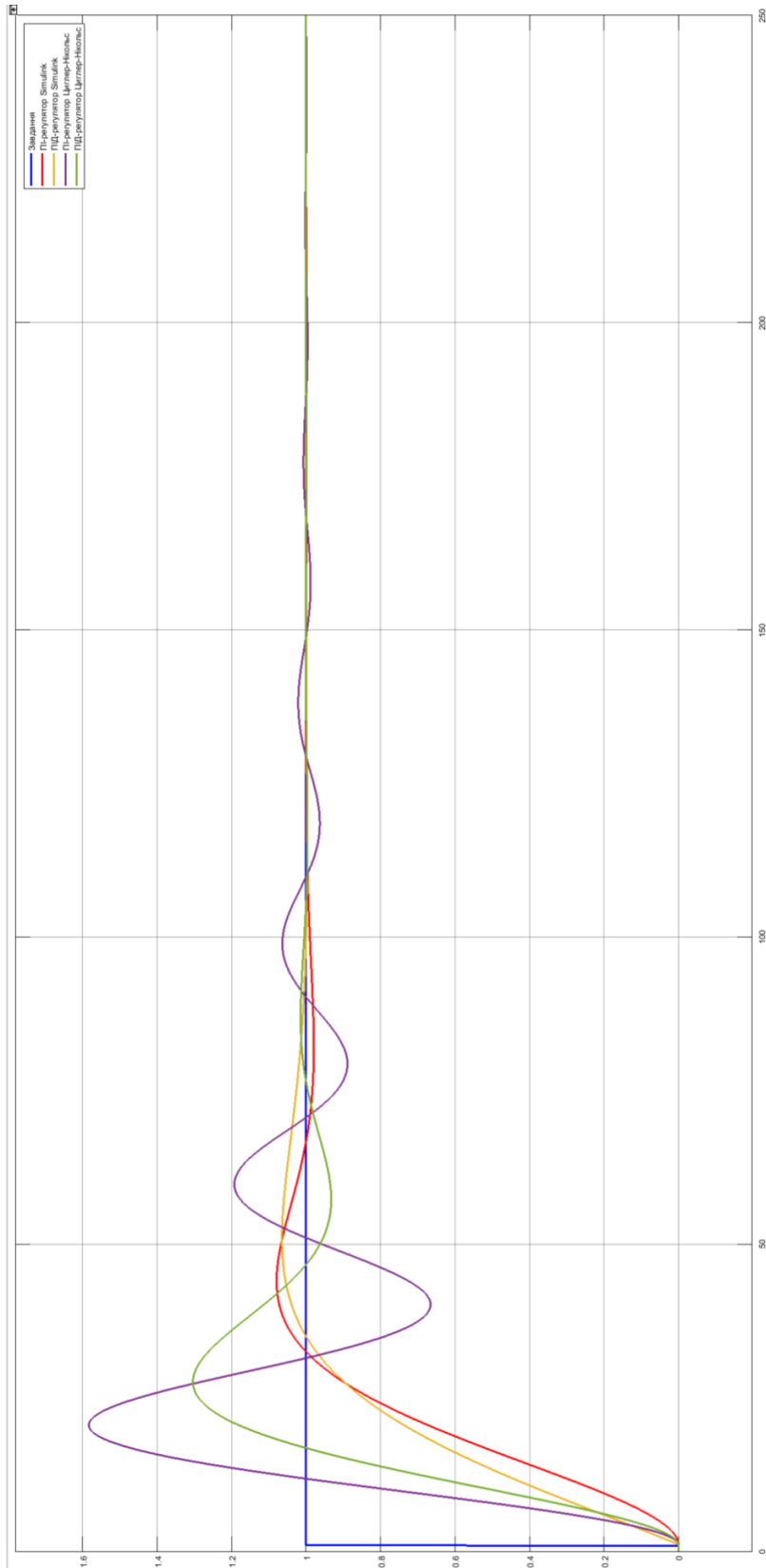
Порівняльне дослідження усіх систем представлений у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 Порівняння показників якості для різних налаштувань пристроїв регулювання

Критерій	ПІ (авто)	ПІД (авто)	ПІ (Ц-Н)	ПІД (Ц-Н)
Час регулювання, с	53.301	61.582	103.336	64.317
Час наростання, с	29.240	30.262	11.430	16.005
Перерегуляція, %	7.4	6.2	58.1	29.8
Степінь згасання	-	-	1.990	18.882



a)



б)

Рис 3.13 а) – поєднання систем з різними регуляторами, б) – порівняння характеристик перехідних систем

Також визначено середньоквадратичне відхилення від заданого значення, результати представлені в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 Середнє відхилення величин від заданого

ПІ (авто)	ПІД (авто)	ПІ (Ц-Н)	ПІД (Ц-Н)
0.0078	0.0059	0.0068	0.0055

### 3.5 Висновки до третього розділу

У третьому розділі проведено синтез схем автоматизованого управління устаткуванням виробництва карбонату у середовищі Simulink. Запропоновані різні схеми управління із використанням ПІД та ПІД –пристроїв регулювання . Показані їх переваги і недоліки. Проведено їх порівняння по критеріям точності та швидкодії. Найкращим виявився метод ПІД-регулювання за методом Ціглера-Нікольса.

#### 4 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ СХЕМИ СИНТЕЗУ КАРБАМІДУ

Основною змінною, яку необхідно підтримувати на певному рівні при автоматизації роботи пристроїв, що випаровуються, є концентрація розчину на виході. У всіх випадках цю проблему можна вирішити, посилаючись на конкретні значення, включаючи швидкість потоку розчину на вході та виході, кількість тепла, що виділяється парою, і тиск вторинної пари.

Оскільки більшість води, яка випаровується у випарних установках, споживається процесом, кількість доступної пари зменшується завдяки реалізації процесу в багатокорпусній установці, яка випаровує воду. В основі його роботи лежить багаторазове використання тепла пари, що нагрівається в першому корпусі установки. Це досягається шляхом нагрівання кожного наступного тіла вторинною (соковою) парою попереднього тіла.

Давайте дослідимо дизайн, який включає три екземпляри. Початкова суміш, яка нагрівається до температури кипіння, потім додається до першого корпусу установки випарювання, яка сама нагрівається первинною свіжою парою. Пара вторинна ( $W_1$ ) із цього корпусу передається як джерело тепла до другого корпусу, де тиск нижчий, ніж у першому, тому розчин матиме нижчу температуру, ніж у першому. [39-44]

Подібним чином, випарений розчин з другого корпусу тече потоком, який є властивим йому (в результаті нижчого тиску) у третій корпус, який нагрівається вторинною парою з другого корпусу ( $W_2$ ).

У процесі випаровування в місці розташування апарату третього корпусу досягається концентрований розчин карбаміду, а вихідним значенням для трикорпусного випарного пристрою є концентрація розчину на виході з третього корпусу.

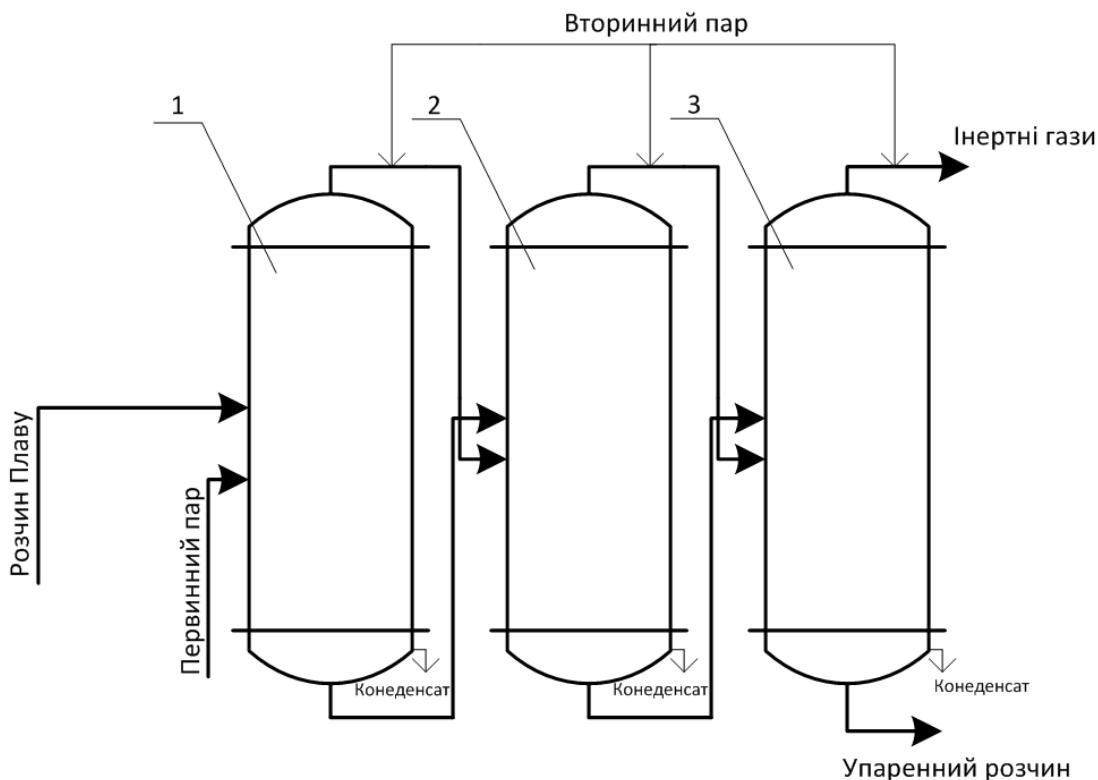


Рисунок 4.1 – Технологічна схема устаткування

Для зниження початкової концентрації води на 75%, кінцева концентрація становить 97%, використовується установка з трьох корпусів, яка випаровує воду.

Процесу нагрівання сприяє тиск водяної пари 1,079 МПа. Кількість витраченої пари 3,464 кг/с. Атмосферний тиск в барометричному конденсаторі 0,0147 МПа. Випаровування полегшується за принципом прямого потоку. Немає переваги для додаткових пар. Відповідь поміщається в 1-й корпус, який нагрівається до температури кипіння.

Щоб зменшити складність моделі, виконуються такі гіпотетичні твердження:

- 1) Обговорюється випадок ВУ № 2 як окремої сутності з численними атрибутами.
- 2) Об'єм і температура розчину в кожному місці однакові.
- 3) Не враховується втрата тепла в навколишнє середовище, видалення лугу з вторинною парою та зміну тепла утворення пари в апараті.

Таблиця 4.1 Технологічна параметри устаткування

Назва	значення	Розмірність
розхід розчину карбаміду	11,14	кг/с
розхід пари нагрівання	3,466	кг/с
тиск у барометричному конденсаторі	0,0148	МПа.
концентрація розчину	77	%
Концентрація вихідного розчину	96	%
розхід випареної води	3,06	кг/с
об'єм	3,2	м <sup>3</sup>
густина	1,2	кг/м <sup>3</sup>
універсальна газова стала	8,31	кДж/(кг·К)
Температура розчину	187	С
скрита теплота пароутворення розчинника	1.6	кДж/кг
питома теплота конденсації пари	2.2	кДж/кг

Допустивши деякі спрощення, створюється математичну модель статичних і динамічних властивостей струму для основних параметрів, які впливають на поведінку.

Параметром, що визначає значення (початкове, регульоване) БА, є концентрація випареного розчину карбаміду в ньому (і на його виході)  $x_1$ .

Актом контролю (впливу) є витрата розчину карбаміду на вході в ВА Ф0. [45-49]

Зміна  $x_1$  через  $F_0$  - це концентрація карбонату на вході в  $x_0$ .

4) зроблено припущення, що температура кипіння розчину прямо пропорційна концентрації розчину при даному тиску, а температура водяної пари в насиченому стані прямо пропорційна тиску.

5) Об'єм розчину в приладі будемо вважати об'ємом твердої фази; це вважається об'ємом всього розчину в пристрої.

6) Температура розчину, що надходить до залишку, ідентична температурі розчину в апараті, а коефіцієнт тепловіддачі не змінюється;

7) Концентрація карбонату в розчині, який надходить у наступний випарний апарат, така ж, як і концентрація карбонату в розчині попереднього апарату.

Іншими проміжними змінними (параметрами стану) є об'єм випареного розчинника (води)  $W_1$  і температура розчину при температурі кипіння  $\Theta$ .

$V_A$  застосовується для зниження концентрації  $F_0 = 40\,000$  кг/год (11,12 кг/с) розчину сечової кислоти на водній основі з  $x_0 = 5\%$  до  $x_1 = 6,88\%$ . Витрачена кількість випареної води склала 3,04 кілограма на квадратний метр.

Рівняння, яке описує матеріальний баланс  $V_A$ , якщо  $V$  постійне:

$$F_0 - F_1 - W_1 = 0; \quad (4.1)$$

$$F_1 = F_0 - W_1; \quad (4.2)$$

Рівняння матеріального балансу:

$$F_0 x_0 - (F_0 - W_1) x_1 = V \rho_1 \frac{d(x_1)}{dt}; \quad (4.3)$$

Рівняння теплового балансу:

$$F_0 c \theta + F_n r_n - (F_0 - W_1) c \theta - W_1 r = V \rho c \frac{d(\theta)}{dt}; \quad (4.4)$$

Рівняння балансу речовини ВА при допущенні  $V = \text{const}$ :

$$F_0 - F_1 - W_1 = 0; \quad (4.5)$$

$$F_1 = F_0 - W_1; \quad (4.6)$$

Рівняння матеріального балансу:

$$F_0 x_0 - (F_0 - W_1) x_1 = V \rho_1 \frac{d(x_1)}{dt}; \quad (4.7)$$

Рівняння теплового балансу:

$$F_0 c \theta + F_n r_n - (F_0 - W_1) c \theta - W_1 r = V \rho c \frac{d(\theta)}{dt};$$

У точці первинного статичного режиму співвідношення між концентрацією розчину в ВА  $x_1$  і температурою його кипіння залежить від режиму:

$$\theta = a + b x_1; \quad (4.8)$$

$$b = \frac{\theta_{\max} - \theta_{\min}}{x_{1\max} - x_{1\min}}; \quad (4.9)$$

де  $[\Theta_{\min}, \Theta_{\max}]$  і  $[x_{1\min}, x_{1\max}]$  – діапазони змінних, в яких дозволена лінеаризація даної залежності.

Лінеаризація і перетворення Лапласа за змінною часу у рівняннях балансів.

Змінні, які підлягають лінеаризації:  $x_0, x_1, F_0, W_1, \Theta$ .

Рівняння (2.3) після виконання лінеаризації :

$$(x_1 - x_0) \Delta F_0 + x_1 \Delta W_1 + F_0 \Delta x_0 - (F_0 - W_1) \Delta x_1 = V \rho \frac{d(\Delta x_1)}{dt}; \quad (4.10)$$

Після введення наступних позначень:

$$T_1 = \frac{V\rho_1}{F_0 - W_1}; \quad K_{F_0x_1} = \frac{x_0 - x_1}{F_0 - W_1};$$

$$K_{W_1x_1} = \frac{x_1}{F_0 - W_1}; \quad K_{x_0x_1} = \frac{F_0}{F_0 - W_1};$$

та перетворення Лапласа за змінною часу  $t \rightarrow p$  отримуємо рівняння:

$$(T_{1p} + 1)x_1(p) - K_{W_1x_1}W_1(p) = K_{x_0x_1}x_0(p) + K_{F_0x_1}F_0(p); \quad (4.11)$$

Рівняння (2.4) після виконання лінеаризації:

$$(c\theta - c\theta)\Delta F_0 + (cF_0 - cF_0 + cW_1)\Delta\theta - (c\theta - r)\Delta W_1 = V\rho c \frac{d(\Delta\theta)}{dt}; \quad (4.12)$$

Після введення наступних позначень:

$$T_\theta = \frac{V\rho}{W_1}; \quad K_{W_1\theta} = \frac{r - c\theta}{cW_1};$$

та перетворення за Лапласом змінної часу  $t \rightarrow p$  отримуємо рівняння:

$$(T_{\theta p} - 1)\theta(p) + K_{W_1\theta}W_1(p) = 0; \quad (4.13)$$

Рівняння (2.5) після лінеаризації змінних:

$$\Delta\theta(p) = bx_1(p); \quad (4.14)$$

Порушення та контролювання функції щодо пересадок.

Лінійна система рівнянь — це математичне представлення процесу, отримане з перетворення часу Лапласа. Щоб отримати функції передачі, першим кроком є визначення величини  $x_1$  як функції збурення  $x_0$  і керуючої дії  $F_0$  з системи рівнянь. [50-55]

$$x_1(p) = W_{x_0x_1}(p)x_0(p) + W_{F_0x_1}(p)F_0(p); \quad (4.15)$$

Розв'язок системи рівнянь (2.7), (2.9), (2.11) отримано методом Крамера.

Детермінант даної системи:

$$\nabla = \begin{vmatrix} T_{1p} + 1 & 0 & -K_{W1x1} \\ 0 & T_{\theta p} - 1 & 0 \\ -b & 1 & K_{W1\theta} \end{vmatrix} = - [(T_1 K_{W1\theta} + T_{\theta} K_{W1x1} b)p + (K_{W1\theta} - K_{W1x1} b)]; \quad (4.16)$$

Вектори-стовпці дії керування та збурення:

$$F_0(p) = \begin{vmatrix} K_{F_0x1} \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix}, x_0 = \begin{vmatrix} K_{x_0x1} \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix}; \quad (4.17)$$

Доповнення до  $F_0$ :

$$\nabla F_0 = \begin{vmatrix} K_{F_0x1} & 0 & -K_{W1x1} \\ 0 & T_{\theta p} - 1 & K_{W1\theta} \\ 0 & 1 & 0 \end{vmatrix} = - (K_{F_0x1} K_{W1\theta}); \quad (4.18)$$

Доповнення до  $x_0$ :

$$\nabla x_0 = \begin{vmatrix} K_{x_0x1} & 0 & -K_{W1x1} \\ 0 & T_{\theta p} - 1 & K_{W1\theta} \\ 0 & 1 & 0 \end{vmatrix} = - (K_{x_0x1} K_{W1\theta}); \quad (4.19)$$

Функція передаточна по каналу управління  $F_0 \rightarrow x_1$ :

$$W_{F_0x_1}(p) = \frac{x_1(p)}{F_0(p)} = \frac{\nabla F_0}{\nabla} = \frac{K_{F_0x_1} K_{W_{1\theta}}}{(T_1 K_{W_{1\theta}} + T_\theta K_{W_{1x_1}} b)p + K_{W_{1\theta}} - K_{W_{1x_1}} b}; \quad (4.20)$$

Функція передаточна по каналу управління  $x_0 \rightarrow x_1$ :

$$W_{x_0x_1}(p) = \frac{x_1(p)}{x_0(p)} = \frac{\nabla x_0}{\nabla} = \frac{K_{x_0x_1} K_{W_{1\theta}}}{(T_1 K_{W_{1\theta}} + T_\theta K_{W_{1x_1}} b)p + K_{W_{1\theta}} - K_{W_{1x_1}} b}; \quad (4.21)$$

#### 4.1 Налаштування П-регулятора методом М-кола:

Проведемо налаштування П-регулятора методом М-кола та зробимо дослідження у середовищі Simulink .

$$K_{reg} := 348.4 \quad \omega := 0.1, 0.12 \dots 2 \cdot \pi \quad M_k := 1.2 \quad r := \frac{M_k}{M_k^2 - 1} \quad \frac{L}{M} := \frac{M_k^2}{M_k^2 - 1}$$

$$W_{reg}(p) := K_{reg}$$

$$W_{prs1}(p) := W_{obj}(p) \cdot W_{reg}(p) \left| \begin{array}{l} \text{simplify} \\ \text{float, 3} \end{array} \right. \rightarrow \frac{7.21}{p + 0.0893} - \frac{1.0 \cdot (6413.0 \cdot p + 8.61e7)}{6.0e6 \cdot p + 100000.0 \cdot p^2 + 1.2e8}$$

$$W_{ps1}(p) := \frac{W_p(p) \cdot W_{reg}(p)}{1 + W_p(p) \cdot W_{reg}(p)} \left| \begin{array}{l} \text{simplify} \\ \text{float, 3} \end{array} \right. \rightarrow \frac{7.16}{p + 7.25}$$

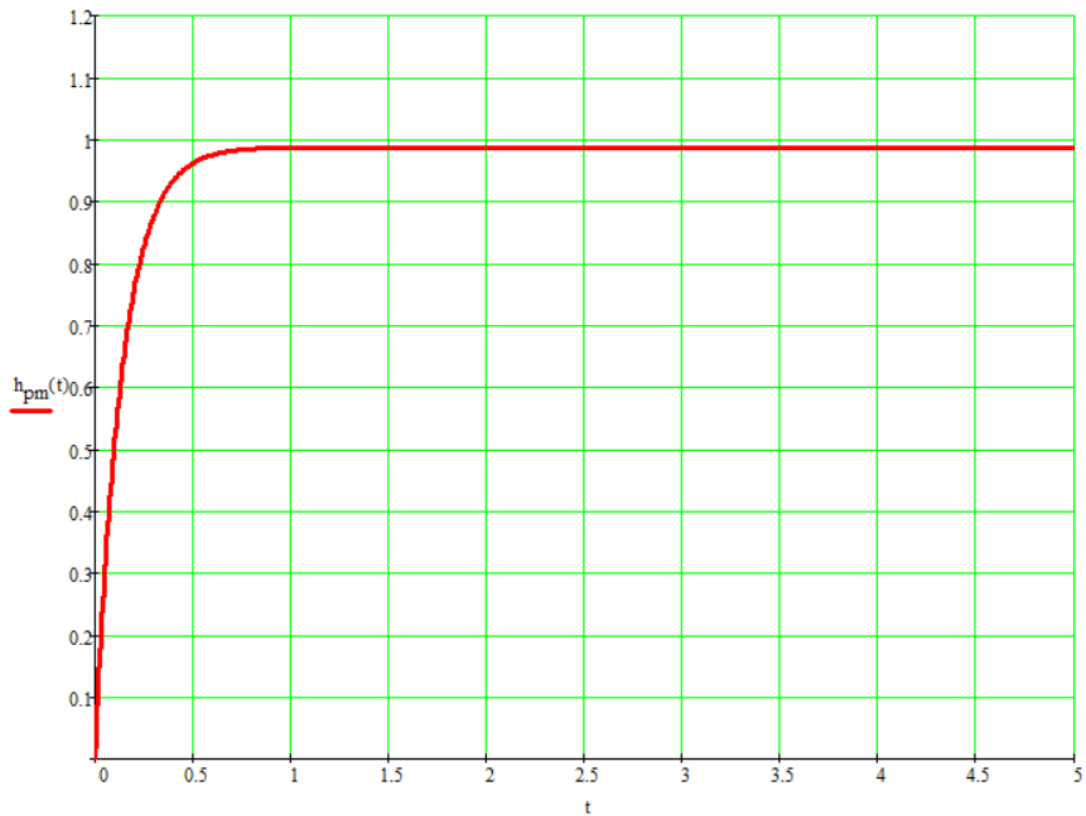
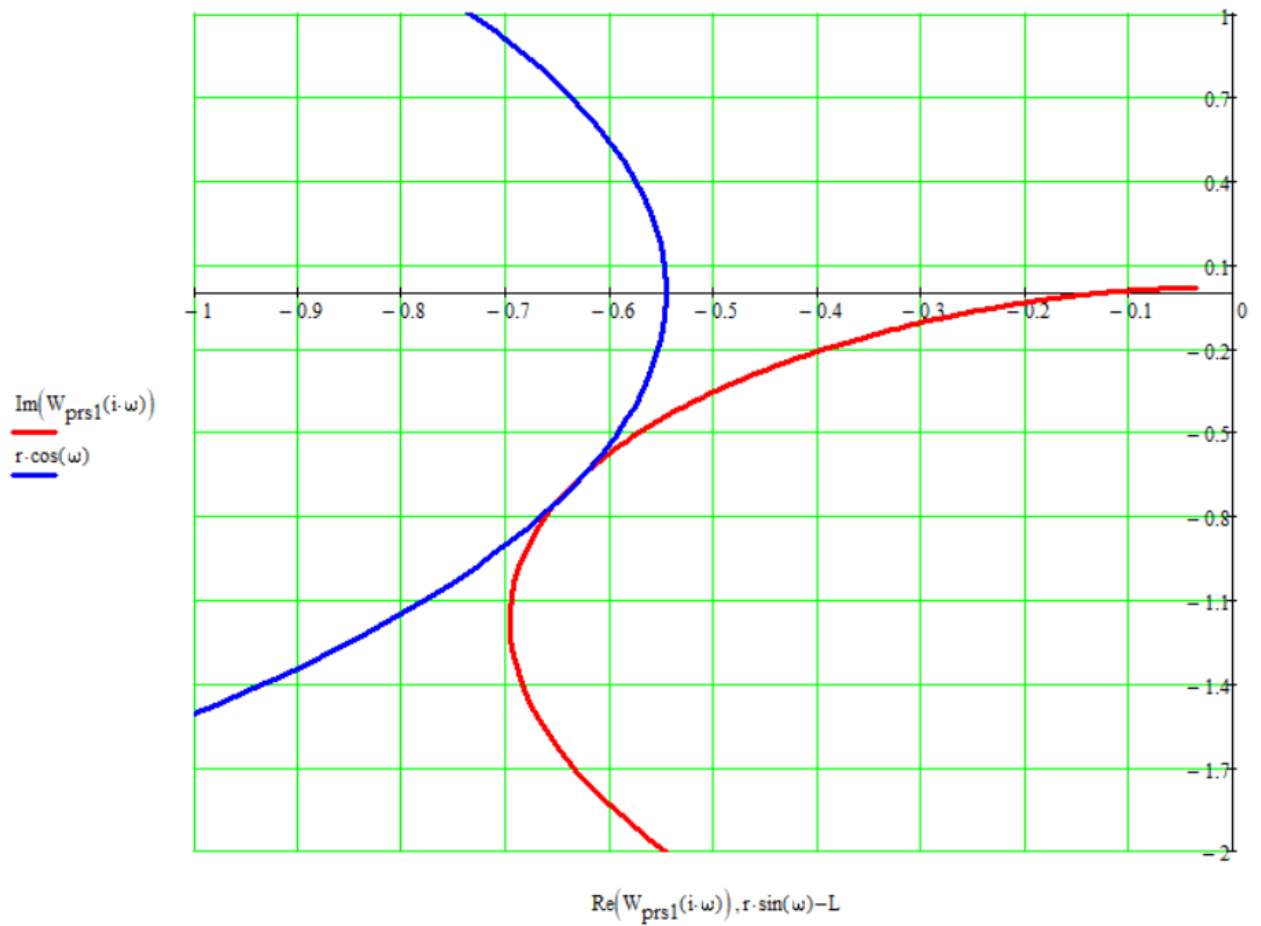


Рисунок 4.2 – Характеристика переходна П-регулятора методом М кола

## 4.2 Настройка ПИ-регулятора методом М кола

Проведемо настройку ПИ-регулятора за методом М-кола та зробимо дослідження у середовищі Simulink. [50-55]

Підбираємо параметри моделі.

$$K_{reg} := 180.42 \quad T_i := 10.5$$

$$W_{pi}(p) := K_{reg} \cdot \left(1 + \frac{1}{T_i \cdot p}\right) \quad W_{pirs}(p) := W_{obj}(p) \cdot W_{pi}(p) \quad \left| \begin{array}{l} \text{simplify} \\ \text{float, 3} \end{array} \right. \rightarrow \frac{4420.0 \cdot p + -221.0 \cdot p^2 + 3.7 \cdot p^3 + 423.0}{p \cdot (p + 0.0894) \cdot (60.0 \cdot p + p^2 + 1199.0)}$$

Будуємо передаточну функцію за знайденими параметрами регулятора:

$$W_{pim}(p) := \frac{W_{obj}(p) \cdot W_{pi}(p)}{1 + W_{obj}(p) \cdot W_{pi}(p)} \quad \left| \begin{array}{l} \text{simplify} \\ \text{float, 3} \end{array} \right. \rightarrow \frac{4420.0 \cdot p + -221.0 \cdot p^2 + 3.7 \cdot p^3 + 423.0}{(p + 43.6) \cdot (p + 0.0954) \cdot (20.1 \cdot p + p^2 + 102.0)}$$

$$h_{pim}(t) := \frac{W_{pim}(p)}{p} \quad \left| \begin{array}{l} \text{invlaplace, p} \\ \text{float, 3} \end{array} \right. \rightarrow -0.43 \cdot e^{-43.6 \cdot t} + 0.00212 \cdot e^{-0.0954 \cdot t} + -0.569 \cdot \cos(0.999 \cdot t) \cdot e^{-10.0 \cdot t} + -20.8 \cdot \sin(0.999 \cdot t) \cdot e^{-10.0 \cdot t}$$

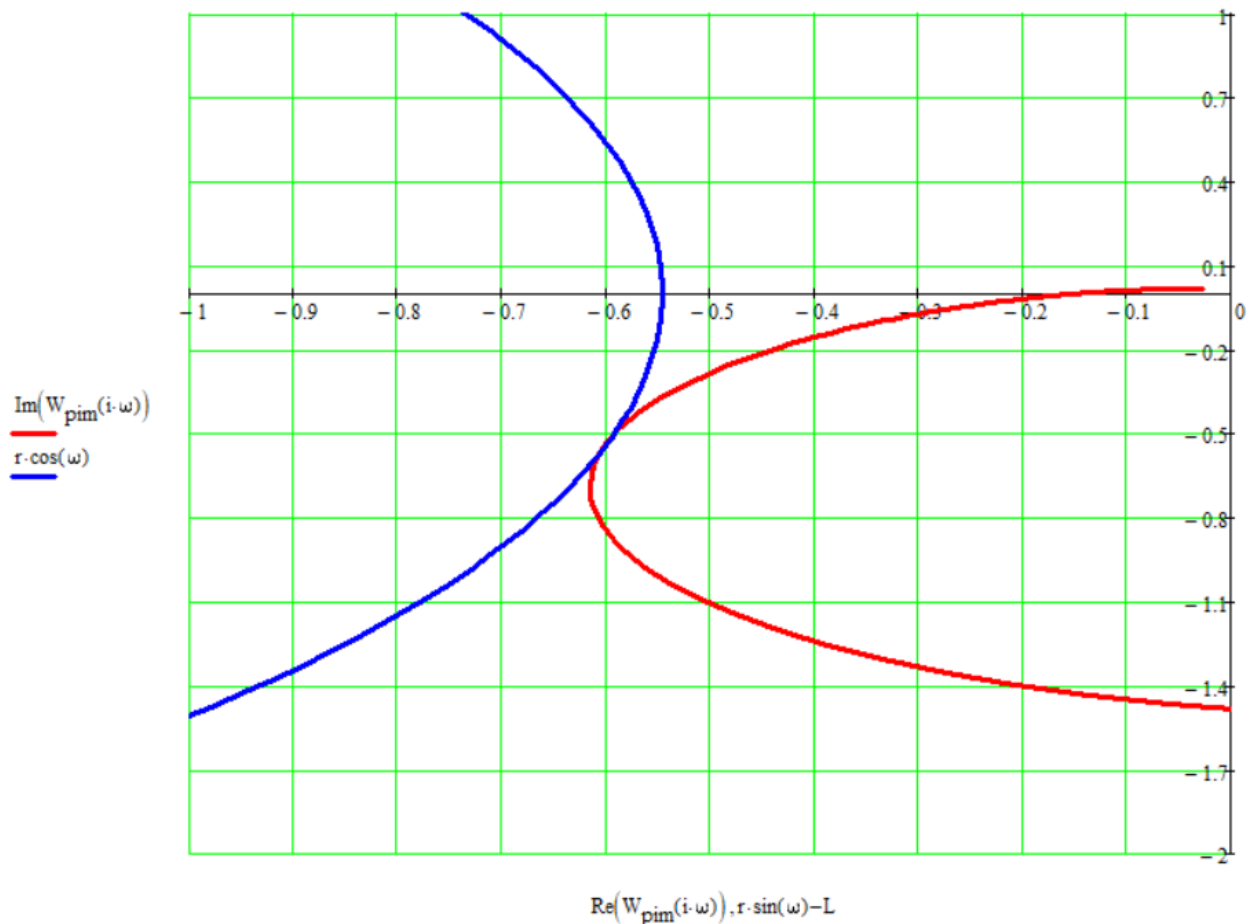


Рисунок 4.3 – Настройка ПИ-регулятора методом М кола

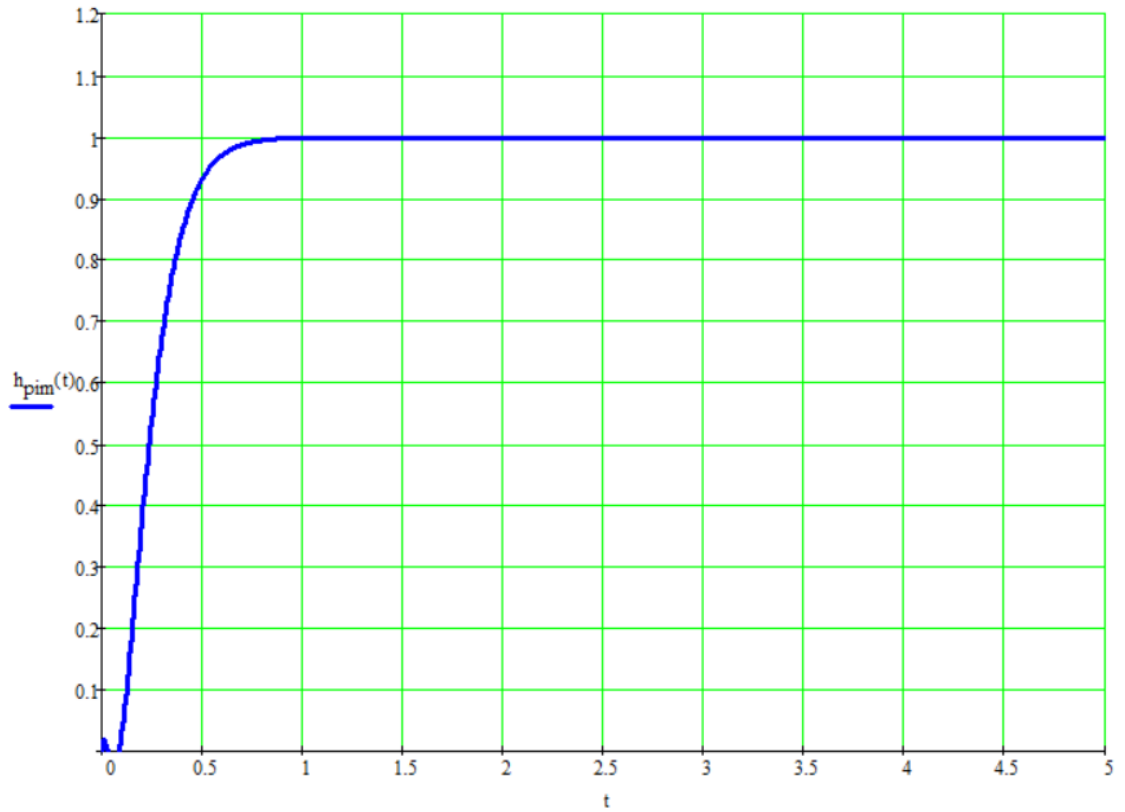


Рисунок 4.4 – Характеристика перехідна ПІ-регулятора методу М кола

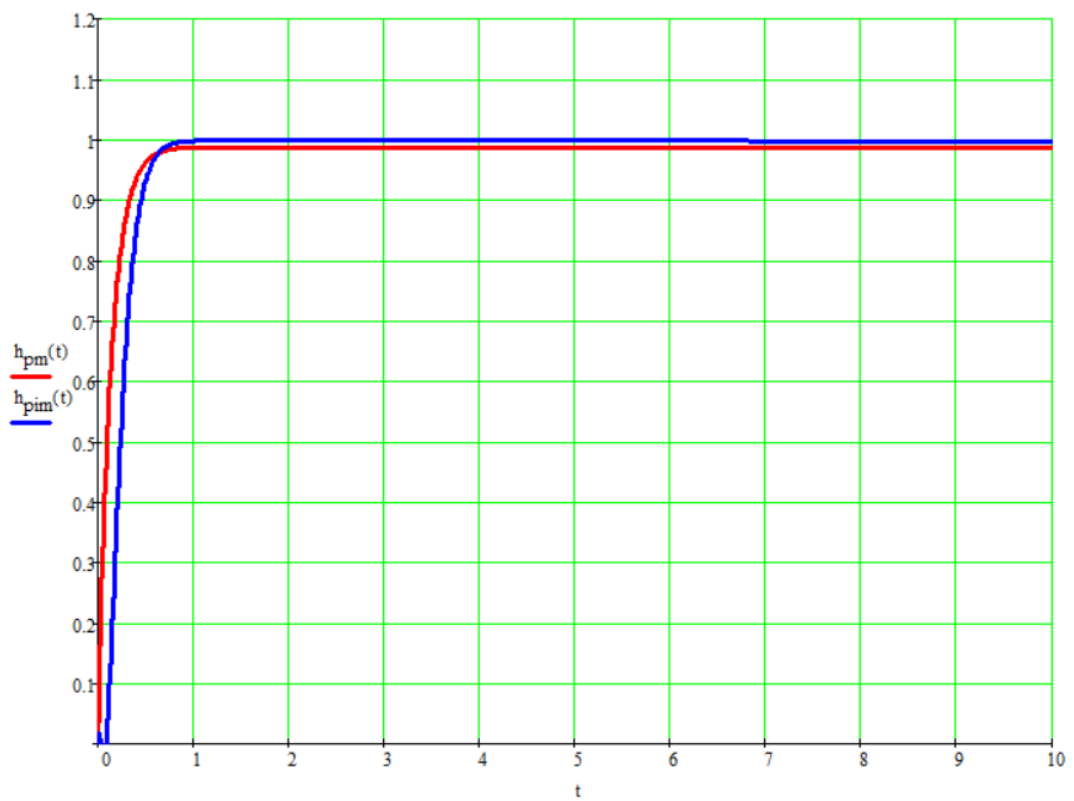


Рисунок 4.5 – Налаштування П та ПІ-пристроїв регулювання методу М ко-

ла

### 4.3 Дослідження характеристики перехідної об'єкта

Щоб регулятори відповідали заданим специфікаціям, була побудована замкнута система управління параметрами та побудовані перехідні властивості. Проведено порівняння властивостей обох супервізорів в одній системі вимірювання з метою визначення найбільш відповідного типу супервізора. Результати виходу обох контролерів відображаються в таблиці 4.1. [50-55]

Таблиця 4.1 – Метод М кола

Закони регулювання	П	ПІ	
Метод М-кола	$K_p$	$K_{pi}$	$T_i$
	349,8	180,62	18,6
Час виходу на постійне значення (t, с)	0,85	0,89	

Найбільш ефективним для цієї системи є PI-регулятор, оскільки метод М-кола передбачає, що значення досягне стаціонарного стану за 0,88 секунди, а P-регулятор має статичну похибку  $1 : 0,985 = 0,015$ .

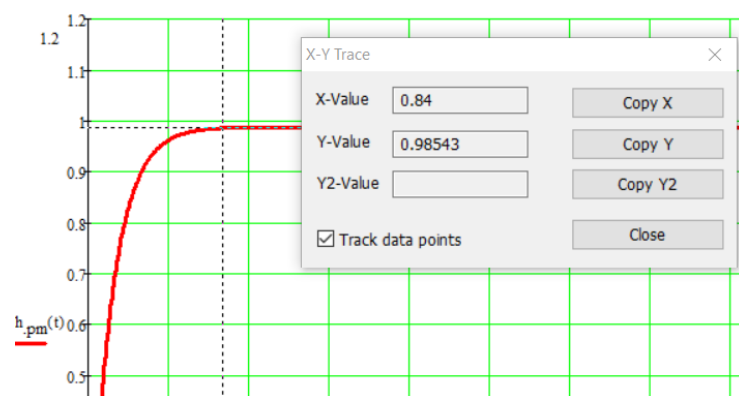


Рисунок 4..6 – Статична помилка П-регулятора

#### 4.4 Система технологічних сигналів, що керують ходом процесу установки розподілу пари і конденсату у виробництві карбаміду.

На рис. 4.7 показана процедура автоматизації технічного процесу, пов'язаного з установкою системи розподілу пари і конденсату при виробництві аміаку. Це основна документація для проекту системи хімічного виробництва. Інші схеми, які використовують електричні системи керування, основні електричні компоненти та інсталяційні перемикачі, походять від нього. [56-62]

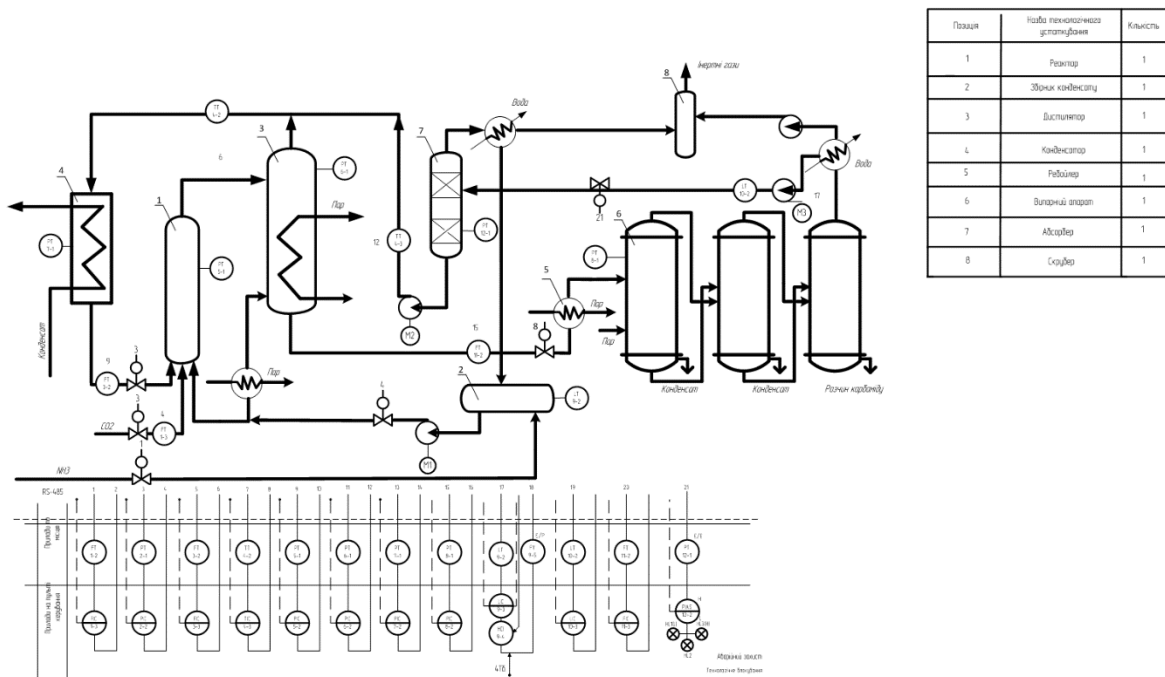


Рисунок 4.7 - Схема автоматизації тех.процесу установки розподілу пари і конденсату у виробництві карбаміду

Рішення для автоматизації процесу конденсації ізобутилену та формальдегіду для виробництва ізопрену є комплексним рішенням для контролю параметрів процесу в пристроях, що входять до складу технологічного рішення хімічного виробництва.

Повний опис контурів контролю схеми автоматизації:

LE(9-1), LE(10-1) – це електромагнітні давачі рівня, які виробляють сигнал, який подається на пристрої. LT(9-2), LT(10-2) – блоки, які виробляють сигнали. Ці пристрої передають сигнали на плати управління та контролери LIC(9-3), LIC(10-3). Сигнали від пристроїв регулювання надходять на ручний контролер HCI (9-4). Сигнали від органів управління надходять на перетворювачі сигналів, що перетворюють електричний сигнал у пневмосигнал - FY(9-5). Якщо гучність пристроїв досягає дозволеного порогу, сигнали від ручного керування надходять на пневматичні клапани (поз. 9-6, 10-4).

FE(1-1), FE(3-1) і FE(11-1) – це витратоміри, які створюють сигнал, який подається на FT(1-2), FT(3-2) і FT( 11-2). Ці пристрої використовуються для формування сигналу. Ці пристрої передають сигнали на плати управління та регулятори, останніми з яких є FFIC(1-3), FFIC(3-3) і FIC(11-3). Коли обсяг споживання в пристроях перевищує допустимий поріг, активуються вихідні сигнали ручного управління і відкриваються пневматичні клапани (поз. 1-4, 3-4 і 11-4), розміщені на трубопроводі.

TE(4-1) – давачі температури, їхні виходи приходять на пристрої TT( 4-2 ) – блоки, що формують вихідні сигнали. Ці пристрої передають сигнали на щити управління та диспетчери ТЩ (4-3). Коли температура в пристроях перевищує допустимий діапазон, сигнали від пристроїв регулювання надходять на пневматичні клапани (поз. 4-4), розташовані на трубопроводі.

Пристрої PT(2-1), PT(5-1), PT(6-1), PT(7-1) і PT(8-1) є пристроями, які створюють вихідні сигнали, отримані від манометрів. Ці пристрої надсилають сигнали на плати управління та контролери PIC(2-2), PIC(5-2), PIC(6-2) і PIC(7-2). Коли тиск на виході з пристроїв перевищує допустимий поріг, вихідні сигнали контролерів надходять на пневматичні клапани (поз. 2-3, 5-3, 6-3, 7-3 і 8- 3) були розміщені на трубопроводі.

Прилади PT(12-1) до PT(16-1) міряють (регулюють) тиск у трубопроводі на виході відцентрового насосу та виробляють вихідні сигнали (4...20 мА), які надходять на входи PIAS(12-2), PIAS(13-2), PIAS(14-2) та PIAS (15-

2). Ці пристрої також оснащені датчиком тиску, який виробляє сигнал, який вимірюється і подається на входи системи. Пристрої: поз. 12-2, 13-2, 14-2, 15-2 і 16-2) обробляють використані мікропроцесорними технологічними індикаторами типу ITM11 MIKROL. Ці прилади демонструватимуть значення тиску робочого на виходах насосів, а модулі, що сигналізують, вказуватимуть на зниження значень тиску, одночасно формуючи сигнал постійного струму 24В для електромагнітного реле (поз. (Km1, Km3, Через контакти електрореле типу KM1-1 до KM6-1 буде подаватись напруга на сигнальні лампочки HL6, HL10, HL14 і HL17, які будуть свідчити про несправність насоса. відбулося. Другі взаємодії реле KM61-2, KM63-2, KM65-2 і KM66-2 будуть використовуватися для живлення змінного струму 220В на електромагнітні реле KM62, KM64 і KM65, а також на контакти KM62-1, KM64-1 та KM65-1. , 3 Az., 4 Az. Аварійні укриття 1Az., 2Az., 3Az., 4Az. Це буде здійснено за допомогою нормально замкнутих контактів KM62-2, KM6 4-2, KM6 5-2 і KM6 6-2, які потрібно підключити послідовно до контактів МПз1-1, МПз2-1, МПз3-1. і МР4з-1. Контакти KM62-2, KM6 4-2, KM6 5-2, KM6 6-2 відключать живлення електромагнітів магнітних пускачів МП1, МП2, МП3, МП4 шляхом розмикання ланцюгів живлення. При відключенні електромагнітів в магнітних пускачах МПз1, МПз2, МПз3, МПз4 стають доступними контакти в магнітних пускачах МПз1-4, МПз1-5, МПз1-6, тобто електродвигуни М1, М2, М3 і М4 зупиняться.

4.5 Технологічні параметри установки, технічна сигнальна схема, принципова схема та опис розподілу пари та конденсату у виробництві карбаміду

Основна електрична схема для індикації технологічних параметрів була узгоджена зі стратегією автоматизації:

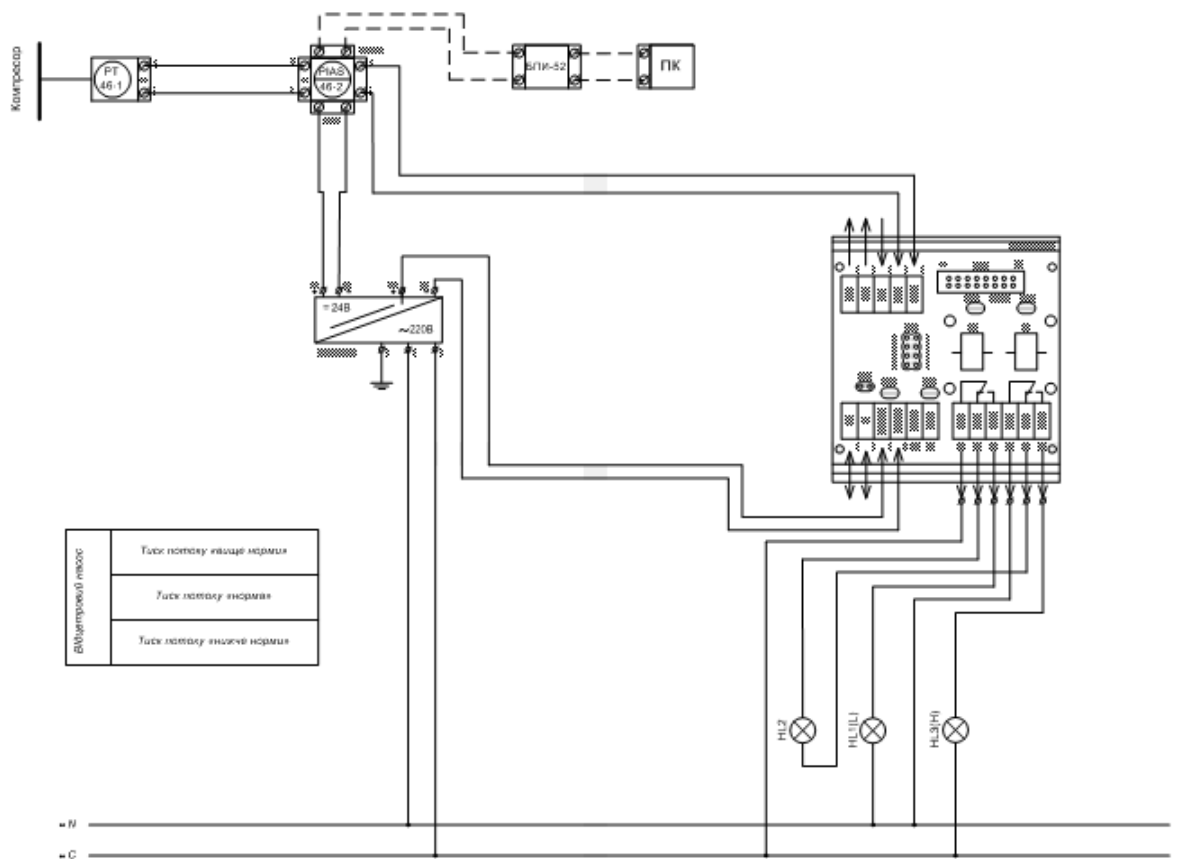


Рисунок 4.8 – Схема електрична принципова

Схема технологічної сигналізації складається з наступних компонентів:

- встановлено пристрій (поз. 12-1), що передає сигнал на ППК. Далі пристрій (поз. 12-1) передає сигнал на плату КБЗ-17Р-01, яка в свою чергу передає сигнал на ПК. Апарат (поз. 46-3) живиться від джерела живлення БПС12-24к. До відповідних виходів плати КБЗ-17Р-01 прив'язані три лампи;
  - жовтий (HL1(L)) – коли кількість сировини в пристрої зменшується до критичного рівня, він активується;
  - зелений (HL2) – світиться в типовому режимі, коли вся система працює в типовому режимі;
  - червоний (HL3(H)) – сигнальна лампа, яка спрацьовує при збільшенні об'єму сировини в апараті до критичного рівня.

#### 4.6 Принципова електрична схема та опис роботи системи блокування сигналів із пристроїв регулювання

Основний електричний склад технологічної перешкоди сигналів від пристроїв регулювання до регулюючої арматури (рис. 4.9) відповідав стратегії автоматизації. [56-62]

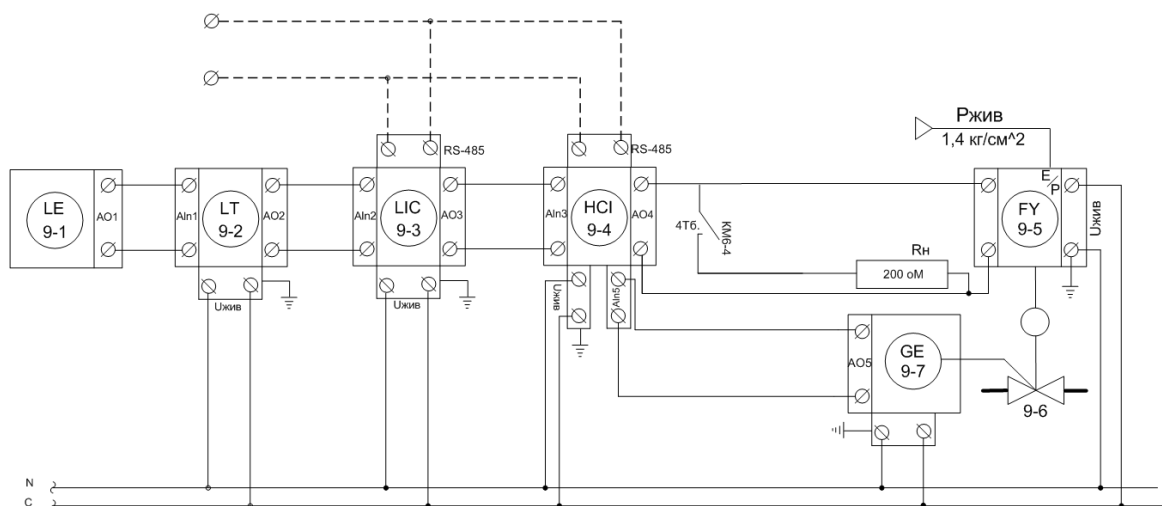


Рисунок 4.9 - Принципова електрична схема і опис роботи системи технологічного блокування сигналів з пристроїв регулювання

Склад фігури такий: показано, що функція технологічного блокування 4Тб здійснюється через контакт електромагнітного реле КМ6, на виході якого є постійний опір 200 Ом, як це рекомендовано виробником ручного блоку управління БРУ-7 МІКРОЛ.

Регулюючий вентиль (поз. 9-6) матиме нормально закрити конструкцію, яка буде перекривати процес прокачки по трубопроводу при зміні вихідного сигналу з автоматичного регулятора за постійного опору 200 Ом.

#### 4.7 Монтажно-комутаційна схема з'єднань

У поєднанні з базовою електричною схемою дистанційного керування двигуном та аварійного захисту було сформульовано план монтажу системи дистанційного керування двигуном та аварійного захисту.

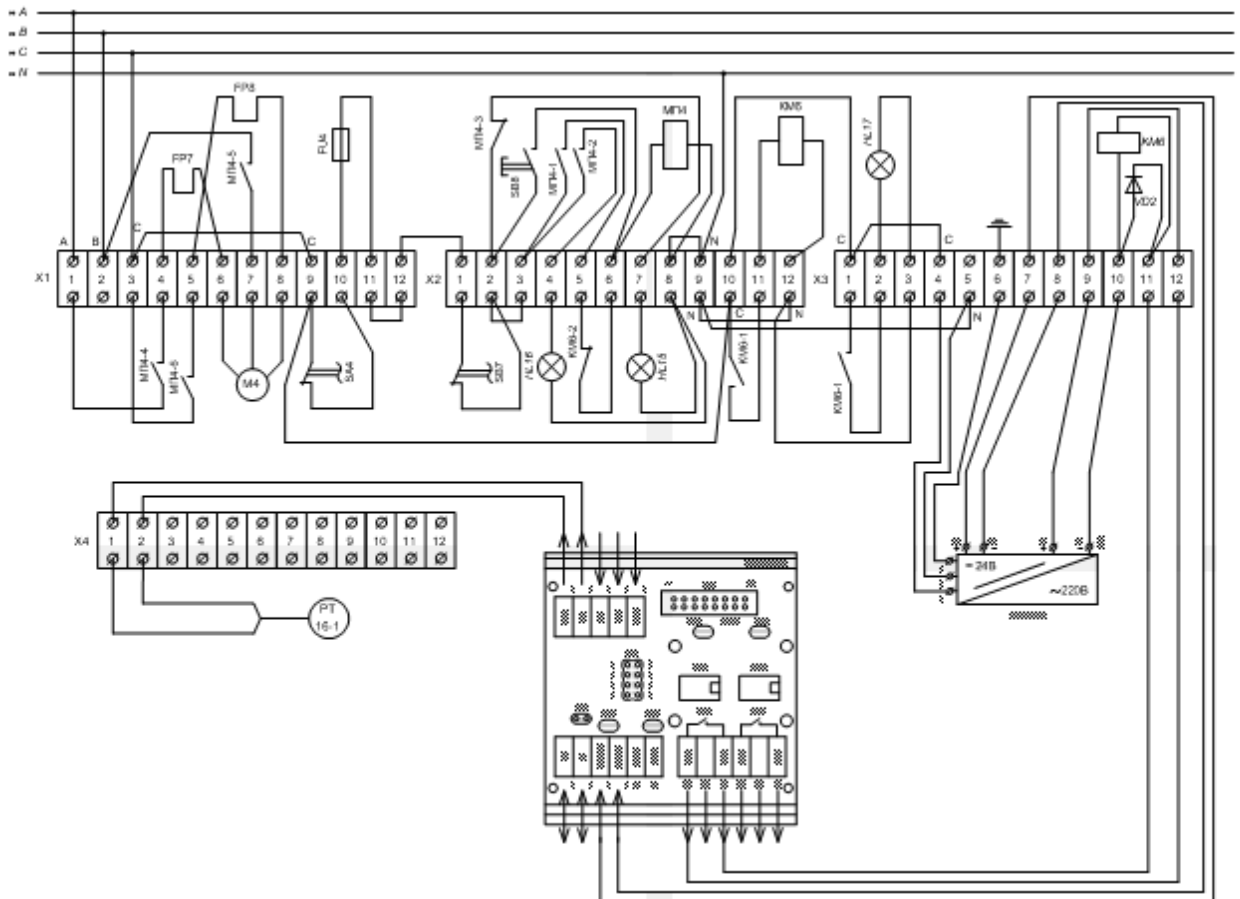


Рисунок 4.10 – Монтажна схема системи дистанційного управління і захисту від аварійного електродвигуна

Для виконання монтажу технічних засобів автоматизації на основі принципової електричної схеми створюється відповідна монтажна схема комутації, яка ілюструє необхідні зв'язки між різними елементами схеми. Ця схема показує, як різні компоненти ланцюга повинні бути з'єднані для досягнення бажаних результатів, наприклад, базова схема електродвигуна М4.

Ці компоненти з'єднані з блоками, які служать термінаторами для відповідних ланцюгів відповідно до (рис. 5.3). Цей тип діаграми для складання компонентів є похідним від використання клемних блоків і слідуючих правил щодо представлення зображень з'єднань між компонентами на принциповій схемі: [56-62]

- 1). Схема схеми установки намальована в неактивному стані;
- 2). Для кожного кінця клемної колодки потрібно продемонструвати зв'язок лише двох пов'язаних провідників між іншими елементами схеми (при прикріпленні провідників до колодки за допомогою гвинтів і пружинних кріплень);
- 3). Для монтажу схеми комутації слід застосувати відповідну кількість блокувальних клем.

4.8 Схема підключення, монтажу, перемикання та інструкція з пристрою автоматичного керування вихідним сигналом технології блокування системи в аварійних ситуаціях

На схемі нижче показано підключення системи технологічного блокування аварійних сигналів від автоматичних контролерів. Була створена базова електрична схема, яка з ним пов'язана (рис.4.11).

На малюнку видно, що функція технічної блокади 4Тб виконується за допомогою контактів електромагнітного реле КМ6, яке згідно специфікації виробника формує для автоматичного регулювання після перемикання ручного керування на постійний опір 200 Ом Сигнал від жалюзі. Блок ручного керування БРУ-7 МІКРОЛ. Контролер (позиція 41-6) повинен мати нормально закритий клапан, який блокуватиме процес, коли вихідний сигнал автоматичного регулятора стане постійним значенням 200 Ом. Схематична діаграма технічних бар'єрів для контролю вхідного струму клапана (позиції 9-6) із можливістю 4 ТБ може виглядати подібно до цього малюнка. [56-62]

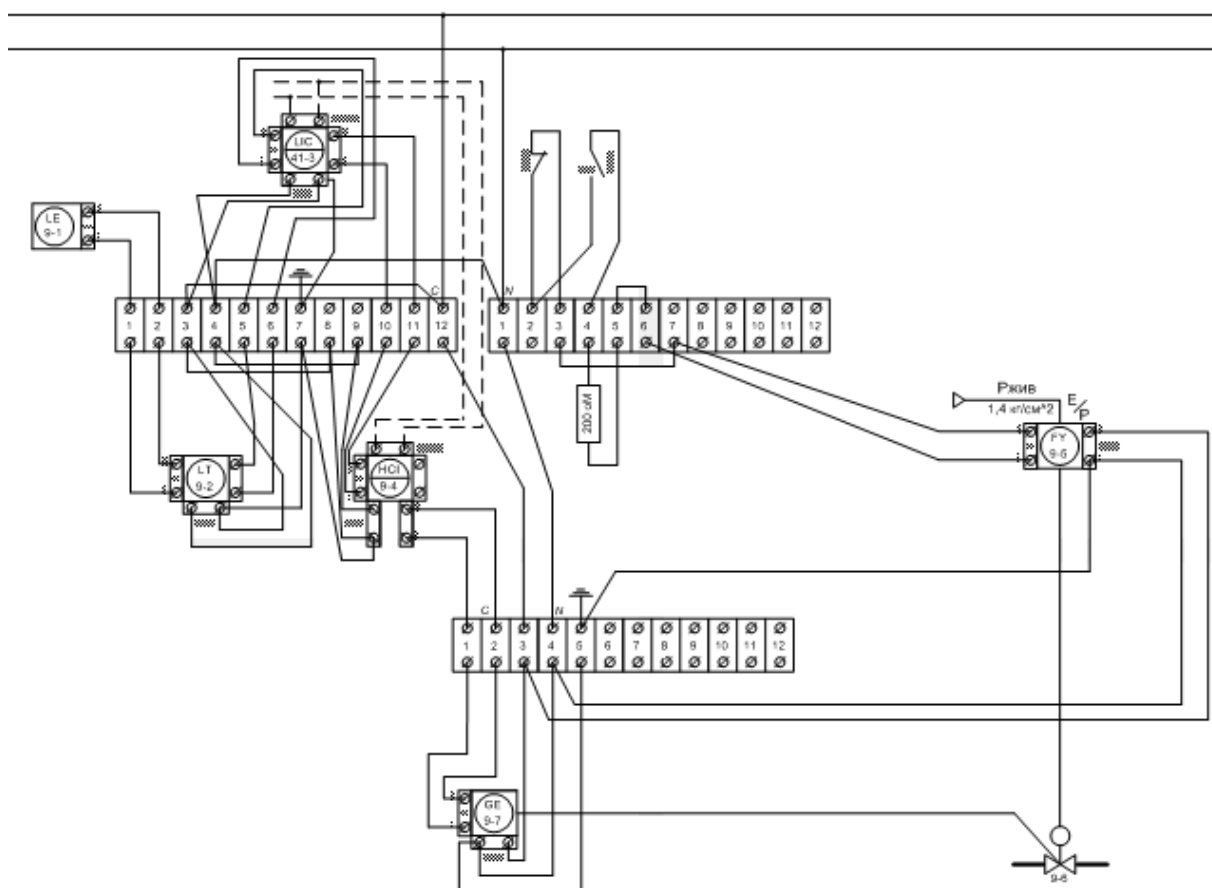


Рисунок 4.11 - Підключення системи технологічного блокування аварійних сигналів від автоматичних контролерів

Ця схема монтажу схеми отримана на основі використання клемних колодок і наступного набору правил для візуального представлення з'єднань між елементами на принциповій схемі:

- 1). Схема схеми установки намальована в неактивному стані.
- 2). До кожного кінця клемної колодки потрібно продемонструвати об'єднання лише двох пов'язаних провідників між іншими елементами схеми (при кріпленні провідників до колодки за допомогою гвинтів і пружинних кріплень).
- 3). Для монтажу комутаційної схеми слід використовувати відповідну кількість відповідних блокувальних клем.

#### 4.9 Монтажно-комутаційна схема з'єднань та опис системи сигналізації параметрів процесу

Схема перемикання вузла, пов'язана з технологічними компонентами параметрів процесу, повинна була бути такою ж, як аналог електричного кола в теорії.

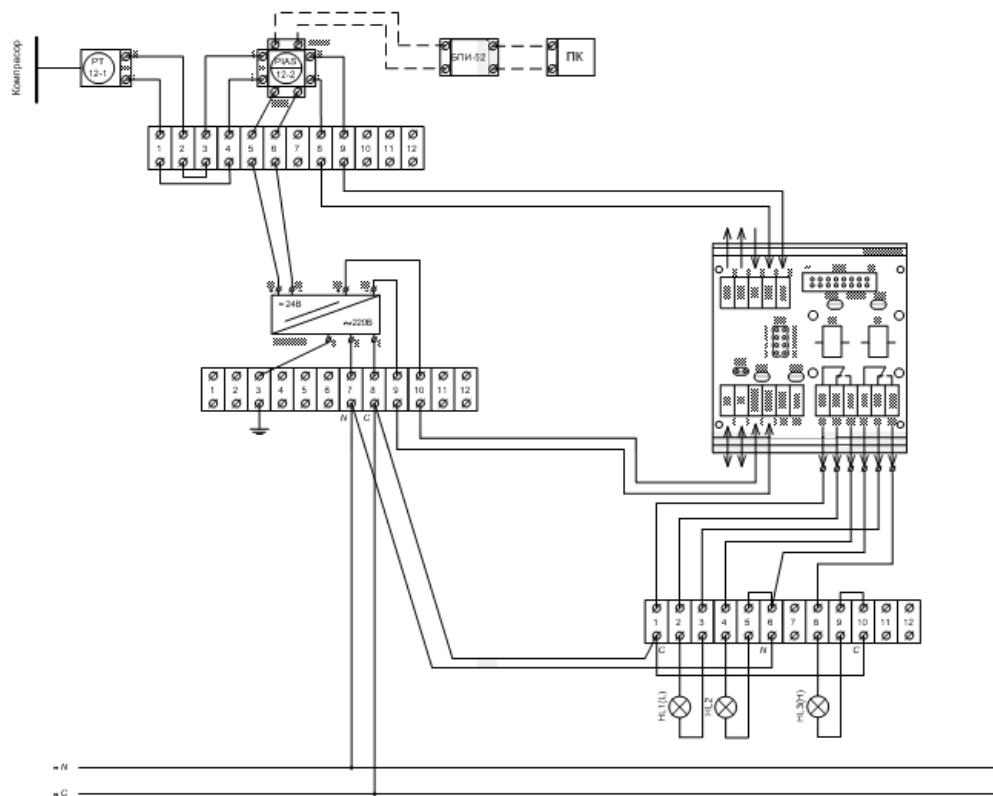


Рисунок 4.12 - Монтажно-комутаційна схема з'єднань

На схемі можна побачити пристрій (поз. Перше число в ряду 12-1, це число використовується для передачі сигналу на панель контролера. Пристрій отримає цей сигнал (поз. Тоді напруга збільшується на 12-2, що в свою чергу сигналізує платі КБЗ-17Р -01, і передає цифровий сигнал на ПК. Пристрій (поз. 12-2) живиться блоком живлення БПС12-24к. Три лампочки пов'язані з відповідними виводами плати КБЗ-17Р-01: [63-70]

- жовтий (HL1(L)) – коли кількість сировини в пристрої зменшується до критичного рівня, він активується.

- зелений (HL2) – світиться в типовому режимі, коли вся система працює в типовому режимі.

- червоний (HL3(H)) – сигнальна лампа, яка спрацьовує при збільшенні об'єму сировини в апараті до критичного рівня.

Ця електрична схема для складання отримана на основі використання клемних блоків і наступного набору правил для представлення електричних з'єднань між компонентами на принциповій схемі.

#### 4.10 Висновки до четвертого розділу

Проведено математичне моделювання процедури створення карбамату. Зміна положення Р-спотера методом М-кола. Встановлення регулятора ПІ методом М кіл. Дослідження властивостей тимчасового об'єкта.

Виконано створення технологічної системи сигналізації параметрів розподілу пари та конденсату при виробництві карбаміду. Принципові схеми, що описують електричні процеси та їх цільове призначення для технологічних цілей у виробництві аміаку. Принципова схема електричної системи та опис технологічної системи блокування сигналу від пристроїв керування..

Були розроблені наступні схеми складання. Порядок монтажу та спосіб зміни підключень та опис системи дистанційного керування та аварійного захисту електродвигунів. Порядок монтажу та спосіб зміни підключень та опис технологічного блокування видачі сигналу з автоматики в аварійних ситуаціях. Встановлення та опис технологічної системи параметрів, пов'язаних з процесами.

## ВИСНОВКИ

Під час виконання завдання було розглянуто методичний процес виробництва карбаміду.

В даному дослідженні досліджено технологічну схему виробництва карбаміду, створено математичну модель процесів в обладнанні технологічної схеми виробництва карбаміду, визначено статичні та динамічні властивості, підбір та модифікацію пристроїв. Для контролю були проведені спроби автоматизованого виробництва сечовини та вивчена безпека процесу.

Проведено опис властивостей карбаміду. Наведено дослідження установок по виробництву карбаміду. Визначено їх переваги і недоліки. Запропоновано технологічна схема і покращеними параметрами.

Виконано постановка задачі по автоматизації устаткування виробництва карбаміду, що має покращені параметри. Приведено основні поняття вибору системи автоматичного регулювання, що забезпечує якісне виконання функції управління технологічним процесом. Визначені основні вимоги до САР, показані етапи вибору системи автоматичного регулювання, які полегшують розробнику процес формування нових технологічних та автоматизованих систем.

Запропоновано узагальнена структура автоматизації виробництва карбаміду. Запропоновано математична модель опису процесу автоматизації. Проведено дослідження математичної моделі. На основі дослідження матмоделі, показано межі її використання.

Проведено синтез схем автоматизованого управління устаткуванням виробництва карбаміду у середовищі Simulink. Запропоновані різні схеми управління із використанням ПІД та ПД –пристроїв регулювання . Показані їх переваги і недоліки. Проведено їх порівняння по критеріям точності та швидкодії. Найкращим виявив-ся метод ПДІ-регулювання за методом Цігlera-Нікольса.

Проведено математичне моделювання процесу схеми синтезу карбама-ту. Налаштування П-регулятора методом М кола. Налаштування ІІ-регулятора методом М кола. Дослідження характеристики перехідної об'єкта.

Виконано розробку системи технологічної сигналізації до параметрів процесу установки по розподілу пари і конденсату на виробництві карбаміду. Принципова електрична схема і опис роботи контурів з технологічної сигналізації параметрів процесу установки по розподілу пари і конденсату на виробництві карбаміду. Принципова електрична схема і опис роботи системи технологічного блокування сигналів з пристроїв регулювання .

Розроблено наступні монтажні схеми. Монтажно-комутаційна схема з'єднань і опис системи дистанційного управління та аварійного захисту електромоторів. Монтажно-комутаційна схема з'єднань і опис системи технологічного блокування вихідних сигналів з автоматичних пристроїв регулювання у аварійних ситуаціях. Монтажно-комутаційна схема з'єднань і опис системи технологічної сигналізації параметрів процесу.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Алексєєнко С. Ю., Ковалєвський В. М. Контури регулювання у схемі автоматизації процесу виділення нижчих парафінів з нафтового дистилляту [Текст] / С. Ю. Алексєєнко, В. М. Ковалєвський // АКІТ – 2015: Матеріали конференції. Друга Міжнародна науково-практична конф. молодих учених, студентів та аспірантів; Київ, 15-16 квітня 2015 р. – К. :НТУУ «КПІ», 2015. – 128 с. : іл. – Бібліогр.: в кінці тез. – с. 23-24. – 100 пр.
2. Алексєєнко С. Ю., Ковалєвський В. М. Статичні властивості технологічних апаратів у процесі переробки нафтового дистилляту [Текст] / С. Ю. Алексєєнко, В. М. Ковалєвський // АКІТ – 2015: Матеріали конференції. Дев'ята науково-практична конференція студентів; Київ, 9-10 грудня 2015 р. – К. :НТУУ «КПІ», 2015. – 95 с. : іл. – Бібліогр.: в кінці тез. – с. 23-24. – 100 пр.
3. Алексєєнко С. Ю., Ковалєвський В. М. Динамічні властивості процесів у технологічній схемі переробки нафтового дистилляту [Текст] / С. Ю. Алексєєнко, В. М. Ковалєвський // Матеріали II Міжнародної науково-технічної конференції «Сучасні методи, інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем управління організаційно-технічними та технологічними комплексами», 25 листопада 2015 р. [Електронний ресурс] – К: НУХТ, 2015 р. – 241 с. – Режим доступу: <http://nuft.edu.ua/page/view/konferentsii>. – с. 15-16.
4. Бабіченко А. К. Промислові засоби автоматизації [Текст]: навч. посіб.: У 2 ч. / А. К. Бабіченко, В. І. Тошинський, В. С. Михайлов та ін. ; за заг. ред. А. К. Бабіченка. – Харків: НТУ «ХПІ», 2003. – Ч. 1. Вимірювальні пристрої. – 470 с. : іл. – Бібліогр.: с. 467. – 500 пр. – ISBN 966-593-232-2.
5. Бабіченко А. К. Промислові засоби автоматизації [Текст]: навч. посіб.: У 2 ч. / А. К. Бабіченко, В. І. Тошинський, В. С. Михайлов та ін. ; За заг. ред. А. К. Бабіченка. – Харків: НТУ «ХПІ», 2003 р. – Ч. 2. Регулювальні і

виконавчі пристрої. – 658 с. : іл. – Бібліогр.: с. 644–645. – 500 пр. – ISBN 966-593-292

6. Ковалевський В. М. Методичні вказівки по виконанню розрахунково-графічної роботи курсу «Контролювання та управління хіміко-технологічними процесами» до напрямку підготовки «Хімічна технологія» [Текст] / Уклад. В. М. Ковалевський // - К.: НТУУ «КПІ», 2012. – 114 с. – Бібліогр.: с. 64–71.

7. Лукінюк М. В. Автоматизація типових технологічних процесів: технологічні об'єкти управління та схеми автоматизації [Текст] : навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл., які навчаються за напрямом «Автоматизація і комп'ют.-інтегр. технології / М. В. Лукінюк. – К.: НТУУ «КПІ», 2008. – 236 с. : іл. – Бібліогр.: с. 230–231. – 200 пр. – ISBN 978-966-622-287-2.

8. Лукінюк М.В. Технологічні вимірювання та прилади: Навч. посіб. для курс. проектування. – К.: «ПОЛПАРНАС», 2002. – 257 с.

9. Дубчак В. М. Вища математика в прикладах та задачах. Навчальний посібник / В.М.Дубчак, В.М.Пришляк, Л.І.Новицька. – Вінниця: ВНАУ, 2018. – 254 с

10. Харченко А.П. Вища математика в прикладах і задачах, частина І: Навчальний посібник / А.П.Харченко, В.О.Гаєвська, Г.В.Лисянська. – Х:НТМТ, 2017. – 194 с

11. Харченко А.П. Вища математика в прикладах і задачах, частина ІІ: Навчальний посібник / А.П.Харченко, В.О.Гаєвська, Г.В.Лисянська. – Х:НТМТ, 2017. – 233 с

12. Вища математика: базовий підручник для вузів / В.С.Пономаренка. – Х.: Фоліо, 2016. – 669 с

13. Герасимчук В. С. Вища математика. Повний курс у прикладах і задачах / В.С.Герасимчук, Г.С.Васильченко, В.І.Кравцов. – К.: Книги України ЛТД, 2015. – 470 с

14. Практикум з вищої математики: Навчальний посібник / За ред. В.О.Ковалю. – Ж: ЖДТУ, 2008. – 448 с

15. Вища математика. Загальний курс: Збірник задач та вправ. / А.Д.Тевяшев, О.Г.Литвин. URL: <https://www.twirpx.com/file/277182/> (дата звернення 12.05.2021)
16. Вища математика. Збірник задач: Навчальний посібник / В.П.Дубовик. URL: [https://issuu.com/erudytnet/docs/1dubovik\\_v\\_p\\_yurik\\_i\\_i\\_vishcha\\_mate](https://issuu.com/erudytnet/docs/1dubovik_v_p_yurik_i_i_vishcha_mate) (дата звернення 12.11.2024)
17. Коруд В.І., Електротехніка: Підручник / В.І. Коруд, О.Є. Гамола, С.М. Малинівський; За заг. ред. В.І. Коруда. – 3-є вид., переробл. і доп. – Львів: Магнолія Плюс, 2006. – 447 с.
18. Михайленко В.Є., Інженерна та комп'ютерна графіка: Підручник / В.Є. Михайленко, В.В. Ванін, С.М. Ковальов; За ред. В.Є. Михайленка. – 6-е вид. – К.: Каравела, 2012. – 368 с.
19. Титаренко М.В., Електротехніка: Навчальний посібник/ М.В. Титаренко. – К.: Кондор, 2013. – 240 с.
20. Будіщев М. С. Електротехніка, електроніка та мікропроцесорна техніка : Підручник / М. С. Будіщев. – Львів : Афіша, 2001. – 424 с.
21. Колонтаєвський Ю. П. Промислова електроніка і мікросхемотехніка / Ю. П. Колонтаєвський, А. Г. Сосков. під ред. А. Г. Соскова. – Вид. 2-ге, виправл. і доповн. – Харків : ХДАМГ, 2003. – 281 с.
22. Теорія електропривода : Підручник / [М. Г. Попович, М.Г. Борисик, В.А. Гаврилюк та ін.] ; за ред. М. Г. Поповича. – Київ : Вища шк., 1993. – 454 с.
23. Костін М. О. Теоретичні основи електротехніки [Текст]: підручник у 3 т. / М. О. Костін, О. Г. Шейкіна. – Дніпро: Вид-во ДНУЗТ, 2006. – Т. 1. – 336 с; 2007.- Т.2.- 276 с; 2011. – Т.3, Ч.1. – 224 с; 2012.– Т.3, Ч.2. – 352 с.
24. Качан Ю. Г. Лінійна електротехніка (теоретичні основи) [Текст]: навч. посібник / Ю. Г. Качан.– Запоріжжя: Вид-во Запорізької держ. інж. академії, 1995. – 206 с.
25. Гуржій А. М. Електротехніка та основи електроніки : підручник

для здобувачів професійної (професійно-технічної) освіти / А. М. Гуржій, С. К. Мещанінов, А. Т. Нельга, В. М. Співак. - Київ : Літера ЛТД, 2020. - 288 с.

26. Електрика та магнетизм : підручник / Л. Д. Дідух. - Тернопіль : Підручники і посібники, 2020. - 464 с. - Режим доступу : <http://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/31412..>

27. Автоматика та електропривод техніки реєстрації інформації [Електронний ресурс] : навч. посіб. / Г. Г. Власюк, В. М. Співак, К. О. Трапезон, В. Б. Швайчен-ко. - Київ : Освіта України, 2010. - 159 с. - Режим доступу: <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/19129>.

28. Колонтаєвський Ю. П. Електроніка і мікросхемотехніка : підручник / Ю. П. Колонтаєвський. - Київ : Каравела, 2006. - 384 с.

29. Макаренко В. В. Цифрова та імпульсна схемотехніка. Моделювання та Дослідження : навч. посіб. для студентів, які навчаються за напрямом підготовки «Акустотехніка» [Електронний ресурс] / В. В. Макаренко, В. М. Співак ; НТУУ «КПІ». - Київ : НТУУ «КПІ», 2015. - 314 с. - Режим доступу: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/19099>.

30. Панчевний Б. І. Загальна електротехніка: теорія і практика / Б. І. Панчевний, Ю. Ф. Свергун. - 2-ге вид. - Київ : Каравела, 2004. - 440 с.

31. Воробйова О. М. Технічні засоби автоматизації: навч. посіб. / О. М. Воробйова, Ю. В. Флейта. - Одеса : ОНАЗ ім. О. С. Попова, 2018. - 208 с.

32. Бойко В. І. Мікрокомп'ютерна техніка / В. І. Бойко, А. Т. Нельга. - 2-ге вид. - Київ : Науково-методичний центр вищої освіти, 2008. - 254 с.

33. Електропривід сільськогосподарських машин, агрегатів та поточкових ліній: Підручник / Є.Л. Жулай, Б.В. Зайцев, Ю.М. Лавріненко, О.С. Марченко, Д.Г. Войтюк; За ред. Є.Л. Жулая. – К.: Вища освіта, 2001. – 288 с.: іл.

34. Автоматизація технологічних процесів і системи автоматичного управління: Навчальний посібник /Барало О.В., Самойленко П.Г.,Гранат С.Є., Ковальов В.О. – К.: Аграрна освіта, 2010. – 557 с.

35. Експлуатація машин і обладнання: Навчальний посібник / Ружи-

цький М.А., Рябець В.І., Кіяшко В.М. та ін. – К.: Аграрна освіта, 2010. – 617 с.

36. Матвійчук А. Я. Електротехніка: навчально-методичний посібник / Матвійчук А. Я., В. Л. Стінянський; Вінницький державний педагогічний університет ім. М.Коцюбинського.– Вінниця, 2017. -270 с.

37. Загальна електротехніка з основами автоматики: Навчальний посібник / Т.В.Левченко. – К., 2010. – 358 с.

38. Технічний сервіс в агропромисловому комплексі: навчальний посібник / Коновалюк О.В., Кіяшко В.М., Колісник М.В. – К.: Аграрна освіта, 2013. – 404 с.

39. Електричні машини і апарати: навчальний посібник / Ю.М. Куценко, В.Ф. Яковлєв та ін. – К.: Аграрна освіта, 2011. – 449 с.

40. Електроніка та мікросхемотехніка: Навчальний посібник / За ред. проф. В.Ф. Яковлєва. – К.: Аграрна освіта, 2010. – 329 с.

41. Паначевний Б.І., Свергун Ю.Ф. Загальна електротехніка: теорія і практикум. - К.: Каравела, 2003. – 440 с.

42. Монтаж електрообладнання і систем управління / За заг. ред. проф. Яковлєва В.Ф. – К.: Аграрна освіта, 2009. – 348 с.

43. Довідникова книга з електроенергетики: навчальний посібник / П.В. Волох, М.П. Цоколенко, Л.В. Ревенко, В.А. Грічаненко та ін. –К. : Аграрна освіта, 2014. – 506 с.

44. Електроніка і мікропроцесорна техніка / Сенько В.І., Лисенко В.П., Юрченко О.М., Лукін В.Є., Руденський А.А. — К. : «Агроосвіта», 2015. — 676 с.

45. Електропостачання агропромислового комплексу : підруч. / Козирський В.В., Каплун В.В., Волошин С.М. – К. : Аграрна освіта, 2011. – 448 с.

46. Ремонт машин та обладнання : підручник / [Сідашенко О.І. та ін.]; за ред. проф. О.І. Сідашенка, О.А. Науменка. – К. : Агроосвіта, 2014. – 665 с.

47. Механізація, електрифікація та автоматизація сільськогосподарського виробництва : підруч. у 2 т : Т 1 / А.В. Рудь, І.М. Бендера, Д.Г. Войтюк та ін. ; за ред. А.В. Рудя. – К. : Агроосвіта, 2012. – 584 с.; іл.

48. Механізація, електрифікація та автоматизація сільськогосподарського виробництва : підруч. у 2 т : Т 2 / А.В. Рудь, І.М. Бендера, Д.Г. Войтюк та ін. ; за ред. А.В. Рудя. – К. : Агроосвіта, 2012. – 434 с.; іл.

49. Комп'ютери та комп'ютерні технології : навч. посіб. Ч. 1. Програмування в математичному пакеті MathCAD / В.П. Лисенко. І.М. Болбот. – К. : Аграрна освіта, 2010. – 229 с.

50. Костинюк Л.Д. Моделювання електроприводів/ Л.Д. Костинюк, В.І. Мороз, Я.С. Паранчук.. - Львів: НУ "Львівська політехніка", 2004. - 404 с.

51. Ткачук В.І. Електромеханотроніка. Підручник/ В.І. Ткачук. - Львів: НУ "Львівська політехніка", 2006. - 440 с.

52. Півняк Г.Г. Сучасні частотно-регульовані електроприводи зі широтно- імпульсною модуляцією: Монографія/ Г.Г. Півняк, О.В. Волков.. - Дніпропетровськ, НГУ, 2006. - 470 с.

53. Ісікова, Н. П. Проектування інформаційних систем [Текст] : навч. посіб. / Н. П. Ісікова, Т. В. Решетняк. — Краматорськ : ДДМА, 2020. — 111 с.

54. Мікропроцесорна техніка : підручник / Ю. І. Якименко, Т. О. Терещенко, Є. І. Сокол та ін. / за ред. Т. О. Терещенко. – Київ : Політехнік, 2003. – 440 с.

55. Алексієв О. П. Мікроконтролери для транспортних і промислових застосувань.: архітектура та програмування : навч. посіб. / О. П. Алексієв, О. Б. Богаєвський, В. П. Волков. – Харків : ХНАДУ, 2004. – 156 с.

56. Методичні вказівки до лабораторних робіт з курсу «Мікропроцесорні пристрої». – Ч. 2 : «Однокристальні мікро контролери» для студентів спеціальностей 092206 «Електричні машини та апарати» і 092205 «Електропобутова техніка» усіх форм навчання / уклад. Ю. С. Грищук. – Харків : НТУ «ХПІ», 2003. – 43 с.

57. Пальчевський Б.О. Автоматизація технологічних проце-

сів[Текст]:навч. посіб./ Б.О. Пальчевський.-Львів:Світ,2007.-392с.

58. Автоматизація технологічних процесів і системи автоматичного управління[Електронний ресурс]:навч. посіб. .-Текст. і граф. дані. / О.В. Барало, П.Г. Самойленко, С.Є. Гранат [та ін.].-Київ:Аграрна освіта,2010.- Систем.вимоги: Adobe Reader/ Foxit Reader.- Режим доступу: доступний тільки для користувачів НБ ХНУ.-Назва з екрана.

59. Автоматизація технологічних процесів. Розробка програми управління технологічним процесом автоматизованого переміщення продукції[Текст]:метод. вказівки до лаб. роботи для студентів спец. 133 "Галузеве машинобудування", 141 "Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка", 208 "Агроінженерія" уклад.: С. Л. Горященко, М. В. Лук'янюк, П. С. Майдан, А. О. Поліщук .-Хмельницький:ХНУ,2021.-19с.

60. Шарбатіан М.Д. Розробка математичної моделі і системи управління процесом шлакоутворення у ванні конвертера[Текст]:автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук; спец. 05.13.07/ М.Д. Шарбатіан.- К.:КІА,2006.-17с

61. Автоматичне та комп'ютерне управління електромеханічними системами[Електронний ресурс]:метод. вказівки до вивчення дисципліни для студ. спец. «Електроенергетика. електротехніка та електромеханіка» уклад. О. Г. Тимощук .-Текст. і граф. дані. ( 3,93 Мб ) .-Хмельницький:ХНУ,2017.- Систем.вимоги: Adobe Reader/ Foxit Reader.- Режим доступу: доступний тільки для користувачів НБ ХНУ.-Назва з екрана

62. Куценко Ю.М. Монтаж електрообладнання і систем управління[Електронний ресурс]:підручник за заг. ред. проф. В.Ф.Яковлева .-Текст. і граф. дані. ( 9,2 Мб )/ Ю.М. Куценко, В.Ф. Яковлев.-Київ:Аграрна освіта,2009.-Систем.вимоги: Adobe Reader/ Foxit Reader.- Режим доступу: доступний тільки для користувачів НБ ХНУ.-Назва з екрана.

63. Лежнюк П.Д. Оцінка якості оптимального управління критеріальним методом[Текст]:монографія/ П.Д. Лежнюк, В.О. Комар.- Вінниця:УНІВЕРСУМ,2006.-108с.

64. Попович М.Г. Теорія автоматичного управління[Текст]:підруч. для вузів.-2-ге вид. переробл. і доповн./ М.Г. Попович, О.В. Ковальчук.- К.:Либідь,2007.-656с.

65. Лежнюк П.Д. Взаємовплив електричних мереж і систем в процесі оптимального управління їх режимами[Текст]:монографія/ П.Д. Лежнюк, В.В. Кулик, О.Б. Бурикін.-Вінниця:Універсум,2008.-123с.

66. Васюра А.С. Методи і засоби нейроподібної обробки даних для систем управління[Текст]:монографія/ А.С. Васюра, Т.Б. Мартинюк, Л.М. Куперштейн.-Вінниця:Універсум,2008.-175с.

67. Контролювання та управління хіміко-технологічними процесами[Текст]:лаб. практикум для студ. напрямів підготовки "Хімічна технологія" та "Хімічна інженерія" уклад. О.І. Стремецький .- Хмельницький:ХНУ,2009.-31с

68. Вольдек А.И. Электрические машины / А.И. Вольдек – Л. : Энергия, 1974. – 840 с. 11. Кацман М.М. Электрические машины : учеб. для студентов сред. проф. учебных заведений / М.М. Кацман - 3-е изд., испр. – М. : Высшая школа, 2001. – 463 с.

69. Щерба А.А., Поворознюк Н.І. Електротехніка. Частина І. Електричні кола.: Посібник для студентів вищих навчальних закладів. – Київ: ТОВ "Лазурит-Поліграф", 2011. – 384 с.

70. Бойко В. С., Бойко В. В., Видолоб Ю. Ф. та ін. Теоретичні основи електротехніки. Підручник: У 3 т.; Т. 1: Усталені режими лінійних електричних кіл із зосередженими параметрами. – К.: ІВЦ "Видавництво «Політехніка»", 2004. – 272 с.

71. Васюра А.С. Методи і засоби нейроподібної обробки даних для систем управління[Текст]:монографія/ А.С. Васюра, Т.Б. Мартинюк, Л.М. Куперштейн.-Вінниця:Універсум,2008.-175с.

## Додаток А

### Стаття у фаховому журналі (подана до редакції журналу «Вісник Хмельницького національного університету: технічні науки»)

УДК 661.5

DOI:

**ФОРКУН Юрій**

Хмельницький національний університет  
<https://orcid.org/0000-0002-7906-4191>  
 forkynjv@khnu.km.ua

**МАКАРИШКІН Денис**

Хмельницький національний університет  
<https://orcid.org/0000-0003-3447-811X>  
 makaryshkinde@khmnu.edu.ua

**МОЛІН М.А.**

Хмельницький національний університет

#### ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ СХЕМИ ВИРОБНИЦТВА КАРБАМІДУ І ЇЇ МОДЕЛЮВАННЯ

У роботі, проаналізована технологічна схема процесу виробництва карбаміду, виконане математичне моделювання процесів в апаратах технологічної схеми виробництва карбаміду, побудовані статичні і динамічні характеристики, проведено вибір та налаштування регуляторів. Проведено математичне моделювання у середовищі Sumulink. Отримана перехідні характеристики різних схем регулювання. Проведено порівняння різних методів регулювання.

Ключові слова: карбамід, технологічна схема, математичне моделювання, передаточна функція.

FORKUN Yuriy, MAKARYSHKIN Denys, MOLIN M.A.  
 Khmelnytskyi National University

#### STUDY OF THE TECHNOLOGICAL SCHEME OF UREA PRODUCTION AND ITS MODELING

In the work, the technological scheme of the urea production process is analyzed, mathematical modeling of processes in the devices of the technological scheme of urea production is performed, static and dynamic characteristics are constructed, selection and adjustment of regulators are carried out. Mathematical modeling is carried out in the Sumulink environment. Transient characteristics of different control schemes are obtained. Comparison of different control methods is carried out.

Keywords: urea, technological scheme, mathematical modeling, transfer function.

#### Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Карбамід використовується переважно як добриво вибору під посів технічних і зернових культур. Карбамід додатково використовується для овочевих і фруктових рослин, а також квітів і декоративних рослин. Добриво вносять в насіння перед посадкою. Карбамід має високий ступінь ефективності при обприскуванні зернових та інших рослин.

Карбамід – безпечне добриво для листя, воно не призводить до опіків на листі. Застосовується на всіх типах ґрунтів як основне добриво, так і в якості основного добрива. Його використання значно підвищує врожайність.

Розробка і виготовлення простих у використанні, безпечних і надійних установок по виробництву карбаміду є важливою науковою і інженерною проблемою.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

В результаті з'єднання сечовини утворюється розплав, який складається з води, сечовини, карбонатів кальцію і додаткової кількості аміаку. Крім того, розплав піддається дистиляції для термічної деструкції карбамату та вилучення карбонатів, які не були перетворені в аміак або  $\text{CO}_2$ , отриманий водний розчин сечовини потім переробляється в твердий продукт.

Промислові способи виробництва сечовини відрізняються методами уловлювання та утилізації газів від дистиляції розплаву, це суміш аміаку та  $\text{CO}_2$ , відсоток перетворення в сечовину зазвичай не перевищує 50 або 70 відповідно. Ці умови, які призводять до синтезу, такі як співвідношення  $\text{NH}_3:\text{CO}_2$ , тиск і температура, мають менший вплив. Маломасштабне виробництво сечовини в поєднанні з великою кількістю нітрату амонію може працювати за відкритим контуром, тобто без повернення газів із процесу дистиляції для виробництва сечовини. У цьому випадку дистиляція проводиться в одну стадію, весь присутній аміак поглинається із суміші газів з азотною кислотою, в результаті чого утворюється нітрат амонію. Сучасні та найдосконаліші високопродуктивні процеси виробництва сечовини слідує замкнутим контурам, продукти процесу дистиляції повністю повторно подаються в процес синтезу. Удосконалення цих схем спрямоване на збільшення обсягу одиниць і ступеня їх використання.

Кількість споживаної енергії можна мінімізувати, оскільки більша частина тепла, що утворюється під час деградації карбамату амонію, повторно використовується під час синтезу розплаву. Це тепло перетворюється на пару та використовується на стадіях низького тиску обробки розплаву.

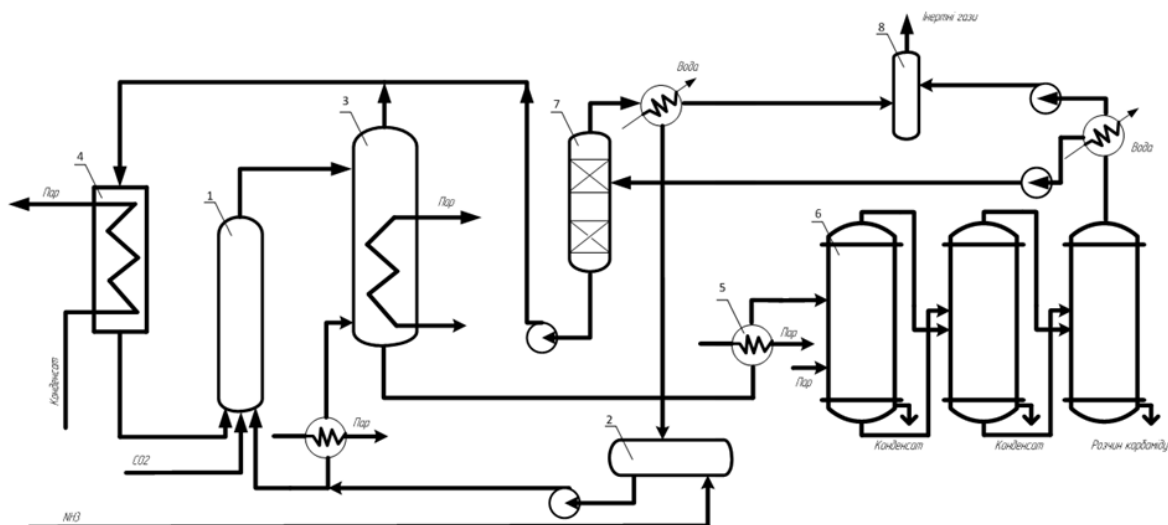


Рис. 1 - Схема тех. процесу виробництва карбаміду в обладнанні із розподілом пари і конденсату.

1 – Реактор; 2 –Збірник конденсату; 3-Дистилятор; 4- Конденсатор; 5-Ребойлер; 6- Випарна установка; 7 - Абсорбер; 8 – Скрубер.

$\text{CO}_2$  і частина  $\text{NH}_3$  вводяться в реактор (1). Залишок випаровується і відправляється в куб (3). В останньому більша частина карбамату амонію розкладається, а залишок у розплаві становить приблизно 2 відсотки. Крім того, розплав містить безаміачну речовину. Суміш парів транспортується з дистилятора (3) в конденсатор (4), де в результаті тепла, яке виділяється при створенні суміші, утворюється розчин солей, які конденсуються. В результаті процесу утворюється пара під тиском. Рециркуляційні ПБА транспортуються в реактор самопливом. На вході в реактор (1) їх співвідношення L становить (3-3,5):1, на виході суміш майже на 100% рідка. Розплав, який видаляється з дистилятора (3), не містить  $\text{NH}_3$  і не містить  $\text{CO}_2$  в установці випаровування (6). Плавильний розплав нагрівається котлом (5), далі він надходить до першого корпусу випарної установки, який нагрівається свіжою первинною парою. Другий корпус отримує вторинну пару з цього корпусу, оскільки він використовується для його нагрівання, знижений тиск у другому випадку змушує розчин нагріватися при нижчій температурі, ніж у першому випадку. Подібним чином випарений розчин з другого корпусу тече через самотечію (внаслідок нижчого тиску) у третій корпус, який нагрівається вторинною

парою з другого корпусу. Вивільнені гази компенсуються за тиском і подаються в скруббер (8). Розчин, отриманий за допомогою ПБА, використовується в конденсаторі, а аміак, який виїшов з абсорбера (7), конденсується і потім виливається в збірник конденсату. [1, 2]

#### Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується стаття

В результаті аналізу літератури видно, що питання детального і точного опису технологічного обладнання і комплексу із створенням адекватних математичних моделей технологічного устаткування по виробництву карбаміду є проблемою по потребує вирішення.

#### Формулювання цілей статті

Метою статті є детальний опис технологічного обладнання та створенням адекватної математичної моделі технологічного устаткування по виробництву карбаміду. А також проведення математичного моделювання процесів керування технологічного обладнання різними методами та вибір найкращого методу.

#### Виклад основного матеріалу

Опишемо технічний процес створення аміаку в клітинному реакторі. На рис. 2. зображено креслення такого типу установки.

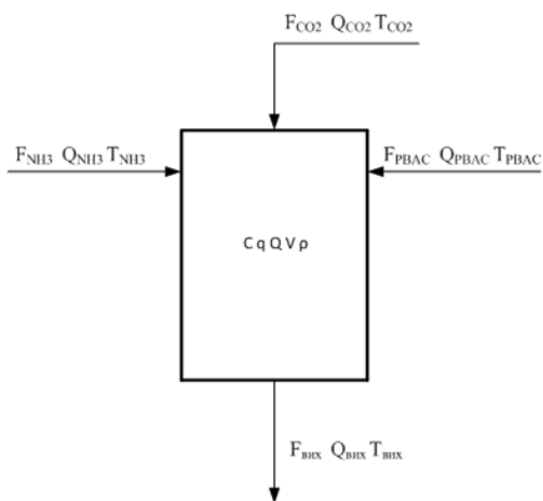


Рисунок 2 –Реактор синтезування карбамату амонію

Вхідні і вихідні параметри реактору [1, 2]:

$F_{CO_2}$  – витрата  $CO_2$  на вході в реактор;

$F_{NH_3}$  – витрата  $NH_3$  на вході в реактор;

$F_{PBAC}$  – витрата розчину вуглецево-амонійових солей на вході в реактор;

$F_{вих}$  – витрата розчину карбамату амонію на виході з реактору;

$Q_{CO_2}$  – теплоємність  $CO_2$  на вході в реактор;

$Q_{NH_3}$  – теплоємність  $NH_3$  на вході в реактор;

$Q_{PBAC}$  – теплоємність розчину вуглецево-амонійових солей на вході в реактор;

$Q_{вих}$  – теплоємність розчину карбамату амонію на виході з реактору;

$T_{CO_2}$  – температура  $CO_2$  на вході в реактор;

$T_{NH_3}$  – температура  $NH_3$  на вході в реактор;

$T_{PBAC}$  – температура розчину вуглецево-амонійових солей на вході в реактор;

$T_{вих}$  – температура розчину карбамату амонію на виході з реактору;

$T_{H.C.}$  – температура навколишнього середовища;

$x_{PBAC}$  – концентрація карбаміду в розчині вуглецево-амонійових солей;

$x_{вих}$  – концентрація карбаміду в плаві на виході з реактору;

$V$  – об'єм;

$\rho$  – густина;

$q$  – кількість енергії у результаті реакції;

$R$  – універсальна газова стала.

При моделюванні статичного та динамічного режимів, приймаємо наступні припущення:

- реакційний об'єм повного перемішування;
- швидкість реакції першого порядку;
- на хід реакції концентрація та температура не впливають;
- формула реакції у реакторі :  $2\text{NH}_3 + \text{CO}_2 = \text{NH}_2\text{COONH}_4 + 125,6 \text{ кДж.}$ ;
- відсутні втрати на навколишнє середовище;

Тепловий і матеріальний баланс реактору

На рис. 3. зображено узагальнену схему реактору, що демонструє процес синтезу карбаміду.

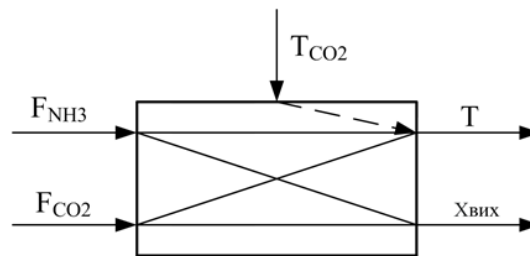


Рис. 3 – Структурно-параметрична схема реактору

Параметром обмеження є кількість сечовини в суміші, що виходить з реактора. Вплив на контроль залежить від споживання аміаку та  $\text{CO}_2$ ,  $F_{\text{NH}_3}$   $F_{\text{CO}_2}$ . Найбільше порушення має температура сировини  $F_{\text{CO}_2}$ . Середнім значенням є температура суміші на виході з реактора.

Для математичного моделювання було розроблено функції передачі.

Функції передачі за каналам збурення та керування

Отже функція передачі за каналом керування «витрата паливних газів

→ концентрація вуглецю у суміші» :

$$W_{\text{ker}}(p) = \frac{-K_{F_{\text{рвас}}T_{\text{вих}}}}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1) + K_{T_{\text{вих}}X_{\text{вих}}}K_{X_{\text{вих}}T_{\text{вих}}}}$$

Функції передачі за каналом збурення «витрата сировини →

концентрація вуглецю у суміші»

$$W_{\text{zb}}(p) = \frac{K_{F_{\text{рвас}}T_{\text{вих}}}}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1) + K_{T_{\text{вих}}X_{\text{вих}}}K_{X_{\text{вих}}T_{\text{вих}}}}$$

Для симулювання побудовано модель у середовищі Simulink.

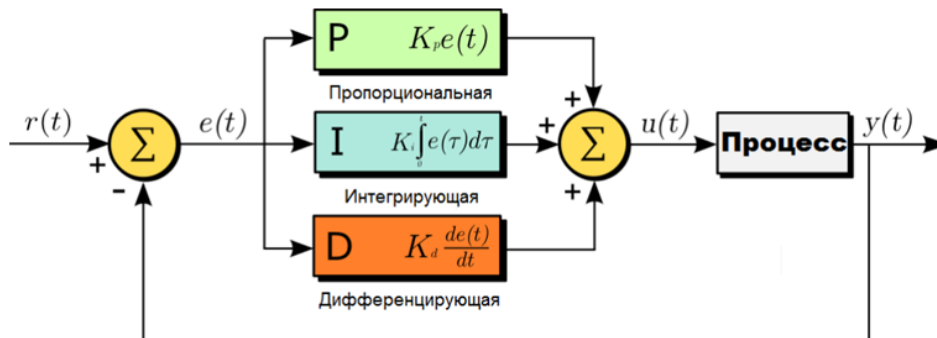
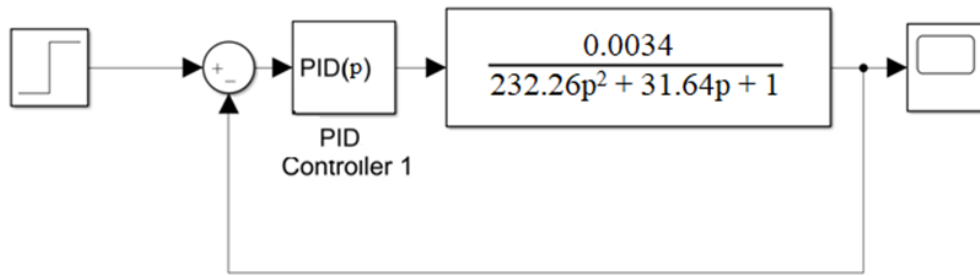
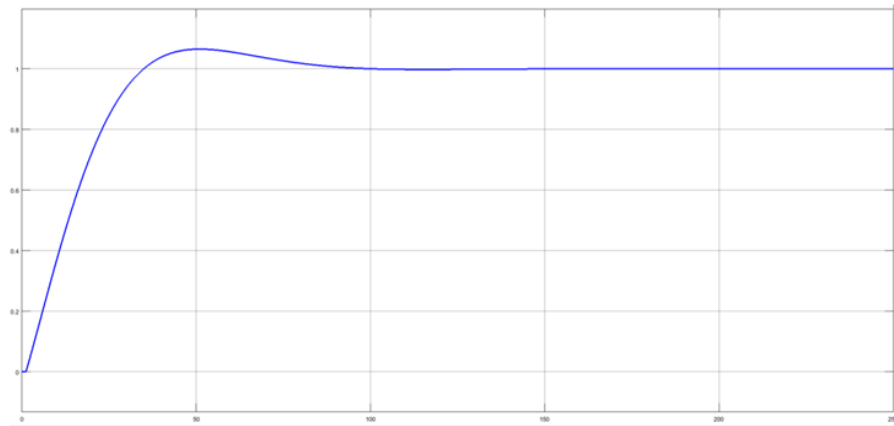


Рис. 4 - Схема ПІД-регулятора яку ми використовуємо



а)



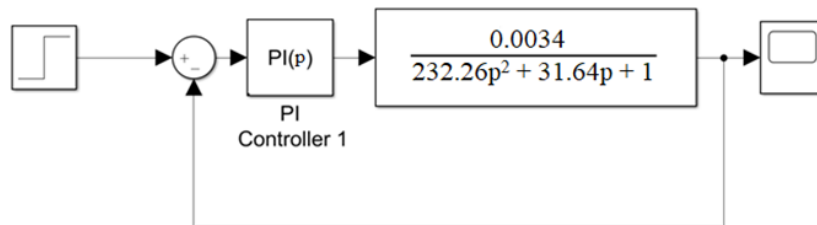
б)

Proportional (P):	556.949611622871	⋮
Integral (I):	24.9582574519649	⋮
Derivative (D):	2629.8862898859	⋮
Filter coefficient (N):	7.41003323663517	⋮

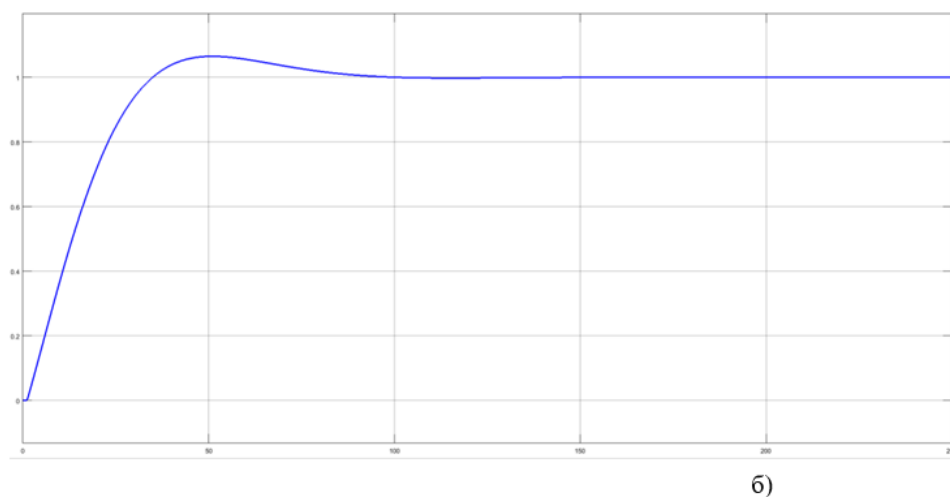
в)

Рис. 5 - а) – модель Simulink системи, б) – перехідна характеристика,  
в) – налаштування регулятора

Оскільки лише P-компонент, очевидно, недостатньо ефективний, ми вивчимо його одноразове використання, а потім перейдемо до дослідження PI- та PID-регуляторів, для яких ми будемо використовувати автоматичну функцію Simulink, а також Циглера-Ніколса.



а)



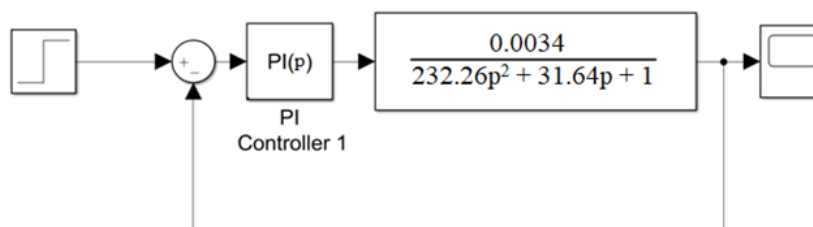
Proportional (P):

Integral (I):

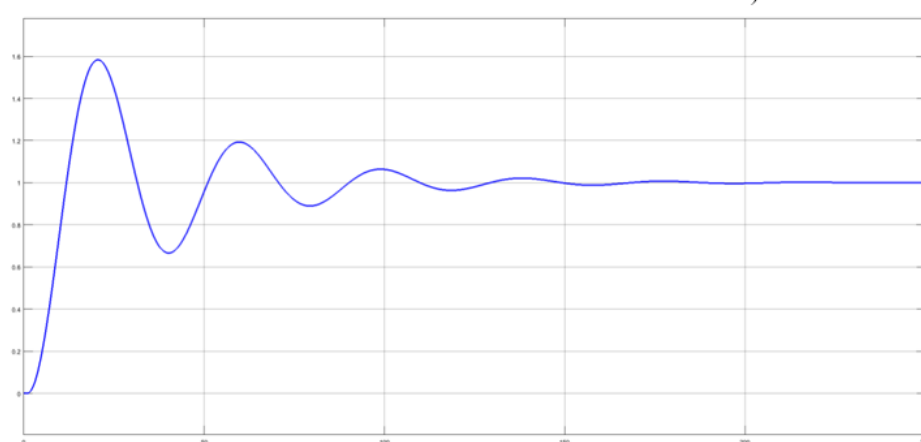
в)

Рис. 6 – Математична модель PI-регулятора

- а) – модель Simulink системи,
- б) – перехідна характеристика,
- в) – налаштування регулятора



а)



б)

Рис. 7 - Математична модель PI-регулятора із перерегулюванням

- а) – модель Simulink системи,
- б) – перехідна хариктеристика

Синтез система з ПД-регулятором за методом Ціглера-Нікольса

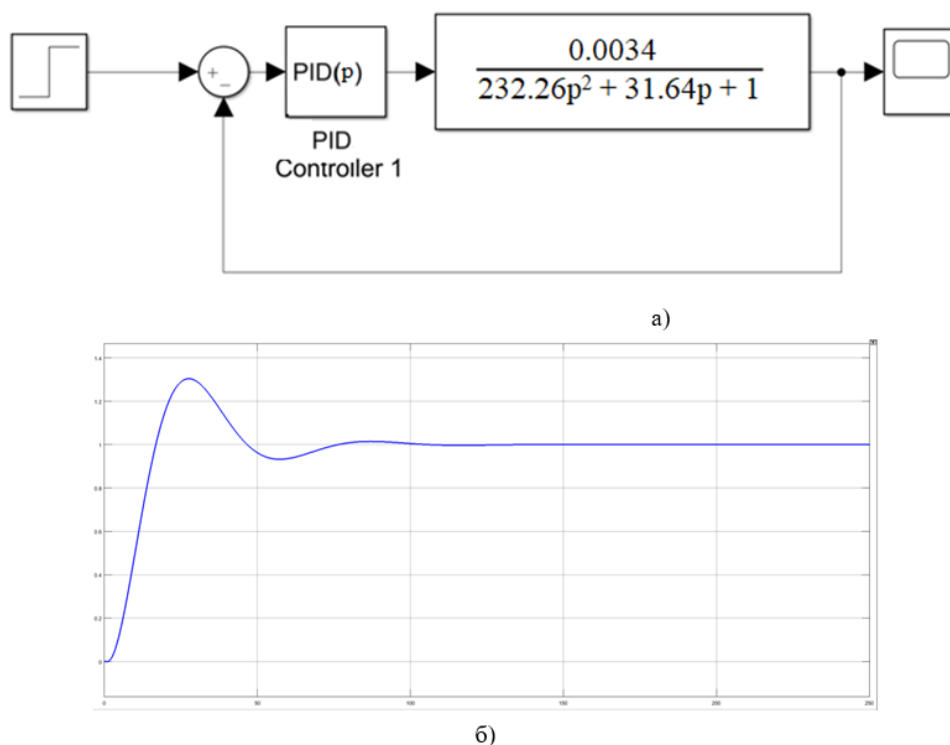


Рис. 8 - система з ПІД-регулятором за методом Ціглера-Нікольса,  
а) – модель Simulink системи, б) – перехідна характеристика

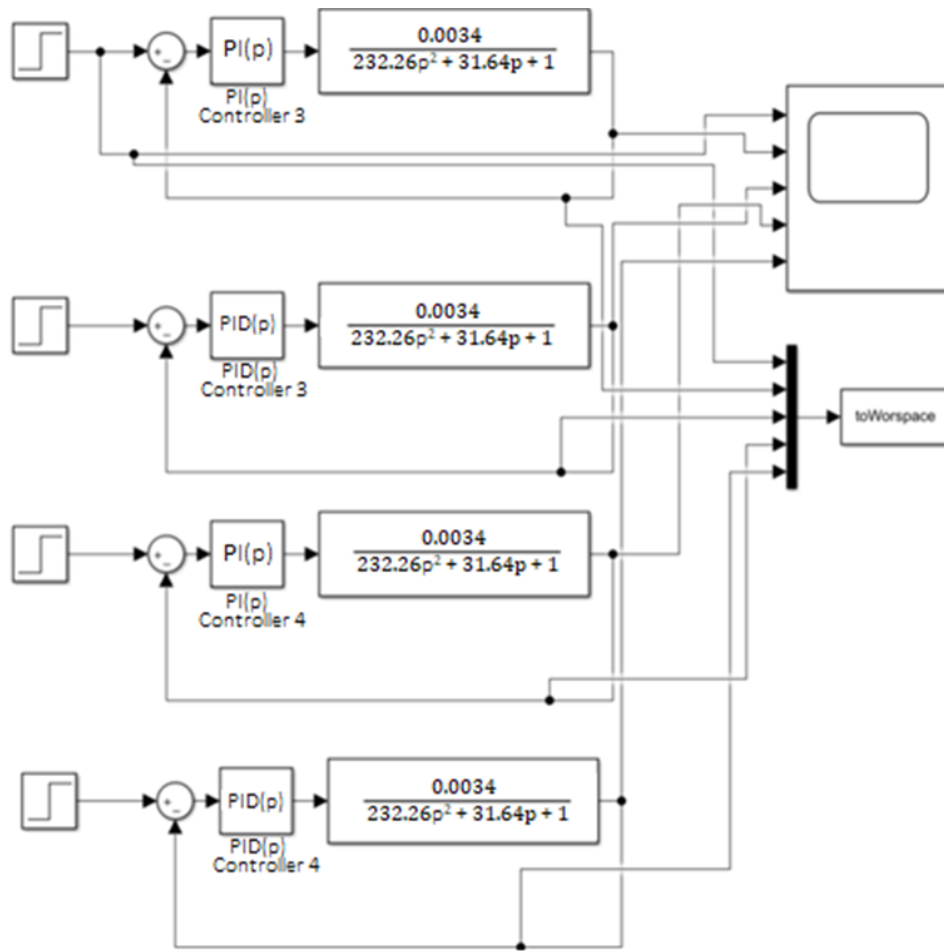
Щоб порівняння різних систем управління було точним, система повинна мати числовий атрибут, який описує інші системи, цей атрибут дозволить оцінити, яка система є більш ефективною. Ці якісні атрибути називаються ознаками якості.

Управління системою характеризується різними показниками, до яких в першу чергу відносяться: точність, стабільність, швидкість, надійність, вартість і оптимальність. У зв'язку з великою різноманітністю систем і об'єктів управління, на той час розроблено велику кількість різноманітних критеріїв, до яких відносяться і вищезазначені показники. Ці показники тісно пов'язані між собою (критерії якості), тому будь-яке бажання збільшити будь-який з показників системи управління призведе до зниження іншого. Наприклад, прагнення зменшити похибку, пов'язану з налаштуванням, призводить до зниження запасу стійкості і швидкодії, або підвищення надійності системи неминує призводити до збільшення її вартості.

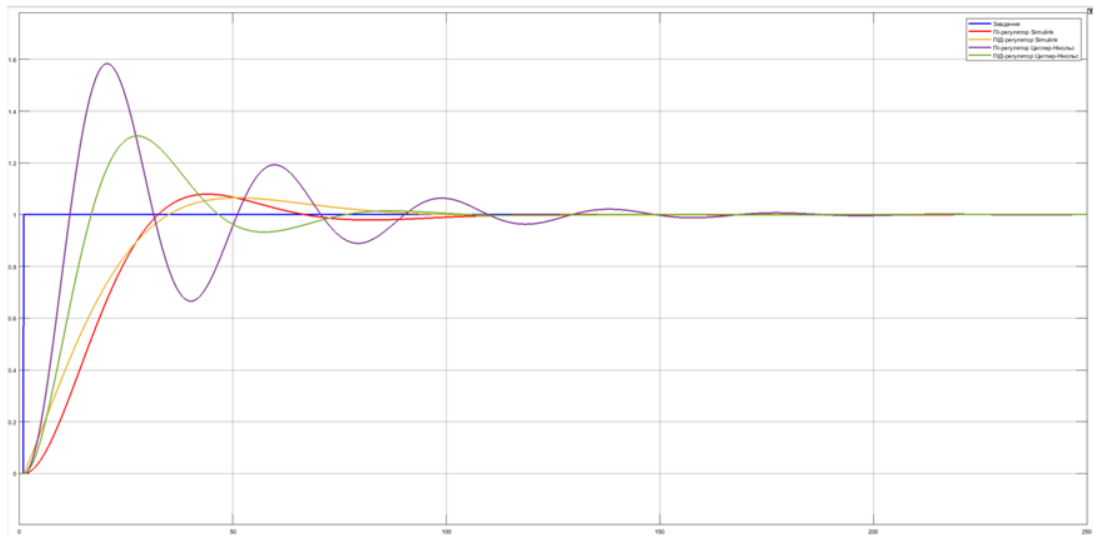
Через зв'язок між різними метриками систем керування задачу вибору або проектування оптимальної системи можна розглядати як умовну екстремальну задачу. Дізнайтеся про мінімальне та максимальне значення будь-якого показника, наприклад вартості, тоді як інші показники обмежені певним значенням.

Для порівняння було побудовано систему у Simulink, яка зображена на рисунку 9 а. Результати роботи усіх систем показані на рисунку 9 б.

Порівняльний аналіз усіх систем представлений у таблиці 1.



a)



б)

Рис. 9 а) – поєднання систем з різними регуляторами, б) – порівняння перехідних характеристик систем

⊕ Таблиця 1 Порівняння показателів якості керування для різних налаштувань регуляторів

Критерій	ПІ (авто)	ПІД (авто)	ПІ (Ц-Н)	ПІД (Ц-Н)
Час регулювання, с	53.201	61.572	103.236	64.307
Час нарощування, с	29.140	30.162	11.410	15.995
Перерегулювання, %	7.3	6.1	57.1	29.7
Степінь затухання	-	-	1.980	18.881

Також визначено середньоквадратичне відхилення від заданого значення, результати представлені в таблиці 2.

Таблиця 2 Значення середнього відхилення величини від заданої

ПІ (авто)	ПІД (авто)	ПІ (Ц-Н)	ПІД (Ц-Н)
0.0077	0.0058	0.0067	0.0054

#### Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

У роботі, проаналізована технологічна схема процесу виробництва карбаміду, виконане математичне моделювання процесів в апаратах технологічної схеми виробництва карбаміду, побудовані статичні і динамічні характеристики, проведено вибір та налаштування регуляторів. Проведено математичне моделювання у середовищі Sumulink. Отримана перехідні характеристики різних схем регулювання. Проведено порівняння різних методів регулювання.

#### Література

1. Алексеєнко С. Ю., Ковалевський В. М. Контури регулювання у схемі автоматизації процесу виділення нижчих парафінів з нафтового дистилляту [Текст] / С. Ю. Алексеєнко, В. М. Ковалевський // АКІТ – 2015: Матеріали конференції. Друга Міжнародна науково-практична конф. молодих учених, студентів та аспірантів; Київ, 15-16 квітня 2015 р. – К. :НТУУ «КПІ», 2015. – 128 с. : іл. – Бібліогр.: в кінці тез. – с. 23-24. – 100 пр.
2. Алексеєнко С. Ю., Ковалевський В. М. Статичні властивості технологічних апаратів у процесі переробки нафтового дистилляту [Текст] / С. Ю. Алексеєнко, В. М. Ковалевський // АКІТ – 2015: Матеріали конференції. Дев'ята науково-практична конференція студентів; Київ, 9-10 грудня 2015 р. – К. :НТУУ «КПІ», 2015. – 95 с. : іл. – Бібліогр.: в кінці тез. – с. 23-24. – 100 пр.
3. Алексеєнко С. Ю., Ковалевський В. М. Динамічні властивості процесів у технологічній схемі переробки нафтового дистилляту [Текст] / С. Ю. Алексеєнко, В. М. Ковалевський // Матеріали II Міжнародної науково-технічної конференції «Сучасні методи, інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем управління організаційно-технічними та технологічними комплексами», 25 листопада 2015 р. [Електронний ресурс] – К: НУХТ, 2015 р. – 241 с. – Режим доступу: <http://nuft.edu.ua/page/view/konferentsii>. – с. 15-16.
4. Бабіченко А. К. Промислові засоби автоматизації [Текст]: навч. посіб.: У 2 ч. / А. К. Бабіченко, В. І. Тошинський, В. С. Михайлов та ін. ; за заг. ред. А. К. Бабіченка. – Харків: НТУ «ХПІ», 2003. – Ч. 1. Вимірювальні пристрої. – 470 с.
5. Бабіченко А. К. Промислові засоби автоматизації [Текст]: навч. посіб.: У 2 ч. / А. К. Бабіченко, В. І. Тошинський, В. С. Михайлов та ін. ; За заг. ред. А. К. Бабіченка. – Харків: НТУ «ХПІ», 2003 р. – Ч. 2. Регулювальні і виконавчі пристрої. – 658 с.

#### References

1. Aliexsieienko S. Yu., Kovalevskiy V. M. Kontury rehuliuвання u skhemi avtomatyzatsii protsesu vydilennia nyzhchychk parafiniv z naftovoho dystyliatu [Tekst] / S. Yu. Aliexsieienko, V. M. Kovalevskiy // AKIT – 2015:

- Materialy konferentsii. Druha Mizhnarodna naukovo-praktychna konf. molodykh uchenykh, studentiv ta aspirantiv; Kyiv, 15-16 kvitnia 2015 r. – K. :NTUU «KPI», 2015. – 128 s. : il. – Bibliohr.: v kintsi tez. – s. 23-24. – 100 pr.
2. Alieksieienko S. Yu., Kovalevskiy V. M. Statychni vlastyvosti tekhnolohichnykh aparativ u protsesi pererobky naftovoho dystyliatu [Tekst] / S. Yu. Alieksieienko, V. M. Kovalevskiy // AKIT – 2015: Materialy konferentsii. Devyata naukovo-praktychna konferentsiia studentiv; Kyiv, 9-10 hrudnia 2015 r. – K. :NTUU «KPI», 2015. – 95 s. : il. – Bibliohr.: v kintsi tez. – s. 23-24. – 100 pr.
3. Alieksieienko S. Yu., Kovalevskiy V. M. Dynamiczni vlastyvosti protsesiv u tekhnolohichnii skhemi pererobky naftovoho dystyliatu [Tekst] / S. Yu. Alieksieienko, V. M. Kovalevskiy // Materialy II Mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii «Suchasni metody, informatsiine, prohramne ta tekhnichne zabezpechennia system upravlinnia orhanizatsiino-tekhnichnymy ta tekhnolohichnymy kompleksamy», 25 lystopada 2015 r. [Elektronnyi resurs] – K: NUKhT, 2015 r. – 241 s. □ Rezhym dostupu: <http://nuft.edu.ua/page/view/konferentsii>. – s. 15-16.
4. Babichenko A. K. Promyslovi zasoby avtomatyzatsii [Tekst]: navch. posib.: U 2 ch. / A. K. Babichenko, V. I. Tshynskiy, V. S. Mykhailov ta in. ; za zah. red. A. K. Babichenka. – Kharkiv: NTU «KhPI», 2003. – Ch. 1. Vymiriuvalni prystroi. – 470 s.
5. Babichenko A. K. Promyslovi zasoby avtomatyzatsii [Tekst]: navch. posib.: U 2 ch. / A. K. Babichenko, V. I. Tshynskiy, V. S. Mykhailov ta in. ; Za zah. red. A. K. Babichenka. – Kharkiv: NTU «KhPI», 2003 r. – Ch. 2. Rehuliuvalni i vykonavchi prystroi. – 658 s.

РЕЦЕНЗІЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Дипломник: Молін Максим Андрійович

Тема: Метод автоматизованого управління розподілом пари та конденсату при виробництві карбаміду

Спеціальність: 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка»

Обсяг кваліфікаційної роботи:

Кількість сторінок записки 95

1. Короткий зміст роботи та прийнятих рішень: Метою роботи є розробка методу автоматизованого управління розподілом пари та конденсату при виробництві карбаміду.
2. Висновок про відповідність роботи дипломному завданню: Робота повністю відповідає поставленому завданню
3. Характеристика виконання кожного розділу, ступінь використання останніх досягнень науки і техніки і передових методів роботи: У першому розділі проведено опис властивостей карбаміду. Наведено дослідження установок по виробництву карбаміду. Визначено їх переваги і недоліки. Запропоновано технологічна схема і покращеними параметрами. У другому розділі запропоновано узгальнена структура автоматизації виробництва карбаміду. Запропоновано математична модель опису процесу автоматизації. Проведено дослідження математичної моделі. На основі дослідження матмоделі, показано межі її використання. У третьому розділі проведено синтез схем автоматизованого управління устаткуванням виробництва карбаміду у середовищі Simulink. Запропоновані різні схеми управління із використанням ПД та ПД –пристроїв регулювання . Показані їх переваги і недоліки. Проведено їх порівняння по критеріям точності та швидкодії. Найкращим виявився метод ПД-регулювання за методом Ціглера-Нікольса. У четвертому розділі проведено математичне моделювання процедури створення карбамату. Виконано створення технологічної системи сигналізації параметрів розподілу пари та конденсату при виробництві карбаміду.
4. Позитивні сторони роботи: розроблено метод автоматизованого управління розподілом пари та конденсату при виробництві карбаміду

5. Негативні сторони роботи: у роботі недостатньо уваги приділяється огляду існуючих технічних рішень

6. Оцінка графічного оформлення та пояснювальної записки роботи: Пояснювальна записка оформлена коректно, згідно діючих стандартів оформлення документації

7. Відгук про роботу в цілому: Робота виконана на належному науково-технічному рівні.

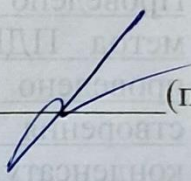
8. Інші зауваження: відсутні

9. Оцінка дипломної роботи: задовільно (3,50/D)

Рецензент (прізвище, ім'я, по батькові, посада, місце роботи) Р. М. Н.,

доцент кафедри кібербезпеки Тьова  
Віра Юфіївна

“14” 12 2024 р.

 (підпис)

Завідувачу кафедри АКІТтаР  
д-ру техн.наук, проф. Мартинюку В.В.

Молін Максим Андрійович

ІІБ здобувача вищої освіти

ФІТ, 2 курс, групи АКІТРм-23-1

### ЗАЯВА

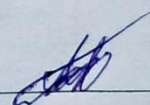
З правилами чинного Положення «Про систему забезпечення академічної доброчесності у Хмельницькому національному університеті» від 01.07.2022, згідно з яким виявлення плагіату є підставою для відмови в допуску кваліфікаційної роботи до захисту та застосування заходів дисциплінарної та академічної відповідальності, ознайомлений(а). Про використання програмно-технічних засобів для перевірки кваліфікаційних робіт здобувачів вищої освіти на наявність плагіату ознайомлений(а) та надаю свою згоду на обробку та збереження університетом моєї роботи в інституційному репозитарії університету.

Також надаю університету право на передачу моєї роботи для обробки та збереження в базах даних програмно-технічних засобів (StrikePlagiarism та Anti-Plagiarism) та використання роботи для виявлення плагіату в інших роботах, які перевіряються програмно-технічними засобами та користувачами, що мають доступ до цих програмно-технічних засобів, виключно в обмежених цілях для виявлення плагіату в текстах робіт.

Робота для перевірки університетом надається в друкованому та електронному варіанті. Електронна версія моєї роботи збігається (ідентична) з друкованою.

02.12.2024

дата



підпис

## Протокол аналізу звіту подібності науковим керівником

Заявляю, що я ознайомився (-лась) з Повним звітом подібності, який був згенерований Системою виявлення і запобігання плагіату щодо роботи:

**Автор:** Микола МОЛІН

**Співавтор:**

**Назва:** МКР Молін

**Науковий керівник:** Юрій ФОРКУН

**Підрозділ:** Кафедра автоматизації, комп'ютерно-інтегрованих технологій та робототехніки

**Коефіцієнт подібності 1:** 26.9%

**Коефіцієнт подібності 2:** 13.2%

**Мікропробіли:** 31

**Заміна букв:** 36

**Інтервали:** 0

**Білі знаки:** 0

**Дата створення звіту:** 2024-12-16 14:23:31.0

**Після аналізу Звіту подібності констатую наступне:**

Запозичення, виявлені в роботі є законними і не є плагіатом. Рівень подібності не перевищує допустимої межі. Таким чином робота незалежна і приймається.

Запозичення не є плагіатом, але перевищено граничне значення рівня подібностей. Таким чином робота повертається на доопрацювання.

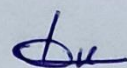
Виявлено запозичення і плагіат або навмисні текстові спотворення (маніпуляції), як передбачувані спроби укриття плагіату, які роблять роботу невідповідною вимогам законодавства (Ст. 32. ЗУ Про вищу освіту, пункт 3.1, Ст. 42. ЗУ Про освіту) та вимог НАЗЯВО (Критерій 5), а також кодексу етики і процедур. Таким чином робота не приймається.

**Обґрунтування:**

Відсоток співпадінь в основному тексті роботи перевищує 25%

2024-12-16

Дата

  
експерт

## Протокол аналізу звіту подібності науковим керівником

Заявляю, що я ознайомився (-лась) з Повним звітом подібності, який був згенерований Системою виявлення і запобігання плагіату щодо роботи:

**Автор:** Микола МОЛІН

**Співавтор:**

**Назва:** МКР Молін в3

**Науковий керівник:** Юрій ФОРКУН

**Підрозділ:** Кафедра автоматизації, комп'ютерно-інтегрованих технологій та робототехніки

**Коефіцієнт подібності 1:** 9.7%

**Коефіцієнт подібності 2:** 2.1%

**Мікропробіли:** 31

**Заміна букв:** 18

**Інтервали:** 0

**Білі знаки:** 0

**Дата створення звіту:** 2024-12-19 10:17:04.0

**Після аналізу Звіту подібності констатую наступне:**

Запозичення, виявлені в роботі є законними і не є плагіатом. Рівень подібності не перевищує допустимої межі. Таким чином робота незалежна і приймається.

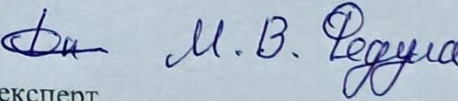
Запозичення не є плагіатом, але перевищено граничне значення рівня подібностей. Таким чином робота повертається на доопрацювання.

Виявлено запозичення і плагіат або навмисні текстові спотворення (маніпуляції), як передбачувані спроби укриття плагіату, які роблять роботу невідповідною вимогам законодавства (Ст. 32. ЗУ Про вищу освіту, пункт 3.1, Ст. 42. ЗУ Про освіту) та вимог НАЗЯВО (Критерій 5), а також кодексу етики і процедур. Таким чином робота не приймається.

**Обґрунтування:**

2024-12-19

Дата

  
експерт

## Anti-Plagiarism v-15.257

**Максимальне співпадіння з одним документом 8.0%**

Словники перевірки: en\_US, ru\_RU, ua\_UA. **Помилки в документах: 12%**

ID: 160046 Назва: МКР Метод автоматизованого управління розподілом пари та конденсату при ви-робництві карбаміду Додано в БД: 2024-12-16 Автора: М. МОЛІН Керівники: Юрій ФОРКУН Консультанти: Опоненти:	Документ		Сумарний збіг по Базі Даних	
	Символи	Лексеми	Символи	Лексеми
	72605	622	5787 (8%)	71 (11%)

Thu Dec 19 10:39:22 EET 2024, Федула Микола Васильович, Хмельницький національний університет, ХНУ

## Anti-Plagiarism v-15.257

**Максимальне співпадіння з одним документом 41.0%**

Словники перевірки: en\_US, ru\_RU, ua\_UA. **Помилки в документах: 12%**

ID: 161268 Назва: МКР Метод автоматизованого управління розподілом пари та конденсату при ви-робництві карбаміду Додано в БД: 2024-12-19 Автора: Микола МОЛІН Керівники: Юрій ФОРКУН Консультанти: Опоненти:	Документ		Сумарний збіг по Базі Даних	
	Символи	Лексеми	Символи	Лексеми
	71487	625	29368 (41%)	287 (46%)

### Джерело плагіату

ID	Опис	Наявність плагіату в документі	
		Символи	Лексеми
160046	Назва: МКР Метод автоматизованого управління розподілом пари та конденсату при ви-робництві карбаміду Додано в БД: 2024-12-16 Автора: М. МОЛІН Керівники: Юрій ФОРКУН Консультанти: Опоненти:	29298 (41.0%)	309 (49.0%)

РІШЕННЯ ЕКСПЕРНОЇ КОМІСІЇ  
КАФЕДРИ АВТОМАТИЗАЦІЇ, КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ТА  
РОБОТОТЕХНІКИ  
ПРО ДОПУСК КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ ДО ЗАХИСТУ

Підтверджуємо ознайомлення з результатом звіту подібності щодо роботи, генерованого системою виявлення текстових збігів/ідентичності/схожості:

Назва: Метод автоматизованого управління розподілом пари та конденсату при виробництві карбаміду

Автор: Молін Максим Андрійович

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

Освітня програма: Освітньо-професійна програма «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

Науковий керівник: Форкун Юрій Вікторович, кандидат технічних наук, доцент

Після аналізу звіту подібності зроблено такий висновок:

№	Висновок	Позначка про відповідність
1	Запозичення, виявлені в роботі, є законними і не є плагіатом. Робота приймається до захисту.	відповідає
2	Виявлені запозичення не є плагіатом, розміщені в розділах, які не описують безпосередньо авторське дослідження, але кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи. Робота приймається до захисту, але має бути відкоригована. Відкоригований варіант має бути поданий на кафедру за 2 дні до захисту, разом із заявою щодо самостійності виконання письмової роботи та ідентичності друкованої й електронної версії роботи	
3	Виявлені запозичення не є плагіатом, але частково розміщені в розділах, які описують безпосередньо авторське дослідження, а кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи. В зв'язку з цим мета роботи та поставлені завдання не були досягнені. Робота може бути допущена до захисту (наступного року) після того, як буде відкоригована та допрацьована і успішно пройде повторну перевірку на академічний плагіат.	
4	Робота містить навмисні текстові спотворення, передбачувані спроби укриття запозичень або інші прояви академічного плагіату. Робота містить фабрикацію або фальсифікацію даних. Робота не допускається до захисту.	
5	Інше:	

Підтвердження:

Запозичення, виявлені в роботі, є законними і не є плагіатом, оскільки:

1) у тексті кваліфікаційної роботи системами перевірки на плагіат виявлено схожість з деякими документами в частині загальноживаних обов'язкових словосполучень у стандартних бланках (титулка, відомість документів), у структурі змісту, назвах розділів/підрозділів тощо, у назвах публікацій у переліку джерел посилання;

2) усі запозичення є фрагментарними або мають належним чином оформленні посилання;

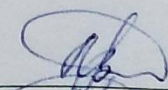
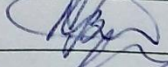

3) виявлені модифікації тексту не впливають на відсоток схожості.

Сумарний обсяг всіх запозичень, визначений системою виявлення збігів ідентичності/схожості, складає 9,7% і адресується до 13 джерела, що, з урахуванням наведених обґрунтувань, відповідає характеру теми і свідчить на користь кваліфікаційної роботи.

Завідувач кафедри

Гарант освітньої програми

Керівник кваліфікаційної роботи

  
\_\_\_\_\_  
  
\_\_\_\_\_  
  
\_\_\_\_\_

Валерій МАРТИНЮК

Валерій МАРТИНЮК

Юрій ФОРКУН