

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

БР.АКП-16.00.00.000 ПЗ

Група АКП-22-1

Любомир Ходань

2026

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

Ходань Любомир Юрійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 681.53
(індекс)

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

Модернізація автоматизованої системи керування технологічним процесом

(назва роботи)

отримання карбаміду

Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

(назва освітньої програми)

174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка

(шифр і назва спеціальності)

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

Нормоконтроль

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

Рецензент

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

Здобувач освітнього ступеня

АКП-22-1 Л.Ю. Ходань
(шифр групи) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

Науковий керівник

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

Допущено до захисту **Завідувач кафедри**

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

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

(повне найменування закладу вищої освіти)

Факультет автоматизації та енергетики

Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій

Освітній рівень перший (бакалаврський)

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

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри АКІТ

А.І. Лагойда.

« » 20 26 року

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

Ходаню Любомиру Юрійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Модернізація автоматизованої системи керування
технологічним процесом отримання карбаміду

керівник роботи Кучмистенко Олександр Васильович к.т.н., доцент

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

затверджені наказом закладу вищої освіти від «29» травня 20 26 року № 192/7

2. Строк подання студентом роботи 12.06.2026 р.

3. Вихідні дані до роботи матеріали переддипломної практики,
методичні вказівки, технічна література, інтернет-ресурс.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Вступ. 1. Аналіз технологічного процесу отримання карбаміду як
об'єкта автоматизації;

2. Ідентифікація об'єкта керування та синтез системи автоматизованого
регулювання;

3. Синтез каскадної системи автоматичного керування;

4. Розробка проєктних рішень для автоматичної системи керування;

5 Висновки.

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

Лист 1 – Технологічна схема процесу отримання карбаміду –

БР.АКП – 16.00.00.000 01;

Лист 2 – Структурна схема моделі вхід-вихід реактора синтезу карбаміду –

БР.АКП – 16.00.00.000 02;

Лист 3 – Аналіз і синтез каскадної АСК – БР.АКП – 16.00.00.000 03;

Лист 4 – Функціональна схема автоматизації – БР.АКП – 16.00.00.000 04;

Лист 5 – Схема зовнішніх з'єднань – БР.АКП – 16.00.00.000 05;

Лист 6 – Схема щита керування – БР.АКП – 16.00.00.000 06.

6. Консультанти розділів роботи

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

7. Дата видачі завдання 06.11.2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів бакалаврської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз технологічного процесу отримання карбаміду як об'єкта автоматизації	12.05.2026 р.	
2	Ідентифікація об'єкта керування та синтез системи автоматизованого регулювання	15.05.2026 р.	
3	Синтез каскадної системи автоматичного керування	19.05.2026 р.	
4	Розробка проєктних рішень для автоматичної системи керування	29.05.2026 р.	

Студент _____
(підпис)

Л.Ю. Ходань _____
(ініціали та прізвище)

Керівник роботи _____
(підпис)

О.В. Кучмистенко _____
(ініціали та прізвище)

АНОТАЦІЯ

Бакалаврська робота містить: 77 сторінок друкованого тексту, 15 рисунків, 9 таблиць, 9 переліків посилань на джерела.

Тема: «Модернізація автоматизованої системи керування технологічним процесом отримання карбаміду».

Об'єкт дослідження: технологічний процес синтезу карбаміду у реакторі колонного типу за методом «Текніп-Мавровича» з рідинним рециклом.

Мета роботи: модернізація автоматизованої системи керування технологічним процесом синтезу карбаміду шляхом впровадження каскадної двоконтурної АСК на основі сучасних мікропроцесорних засобів автоматизації, що забезпечує стабілізацію концентрації карбаміду та тиску в реакторі з підвищеними показниками якості перехідних процесів.

Методи дослідження: математичне моделювання об'єктів керування на основі рівнянь матеріального та енергетичного балансу; експериментальна ідентифікація за методом кривої розгону; параметричний синтез ПІ- та ПІД-регуляторів; аналіз стійкості та якості перехідних процесів; комп'ютерне моделювання у середовищі MATLAB/Simulink.

Результати кваліфікаційної роботи: розроблено та досліджено каскадну двоконтурну автоматизовану систему керування синтезом карбаміду. Побудовано математичні моделі внутрішнього контуру регулювання тиску та зовнішнього контуру регулювання концентрації. Синтезовано параметри регуляторів: для внутрішнього ПІ-контуру – $K_{p1} = 1,875$, $T_{i1} = 10,0$ с; для зовнішнього ПІД-контуру – $K_{p2} = 0,513$, $T_{i2} = 130$ с, $T_{d2} = 32,5$ с. Підтверджено статичну точність і стійкість обох контурів. Виконано вибір технічних засобів. Розроблено проектна документації у САПР EPLAN Education 2025.

Ключові слова: карбамід, синтез карбаміду, каскадна система автоматичного керування, ПІД-регулятор, МІК-122Н, EPLAN.

ABSTRACT

The bachelor's thesis contains: 77 pages of printed text, 15 figures, 9 tables, 9 references.

Topic: "Modernization of the Automated Control System for the Urea Production Technological Process".

Object of research: the urea synthesis technological process in a column-type reactor using the Tecnimont-Mauvrovic process with liquid recycle.

Purpose of the work: modernization of the automated control system for the urea synthesis process by implementing a cascade two-loop ACS based on modern microprocessor automation equipment, ensuring stabilization of urea concentration and reactor pressure with improved transient response performance.

Research methods: mathematical modelling of control objects based on material and energy balance equations; experimental identification using the step-response curve method; parametric synthesis of PI and PID controllers; stability and transient quality analysis; computer simulation in the MATLAB/Simulink environment.

Results of the qualification work: a cascade two-loop automated control system for urea synthesis has been developed and investigated. Mathematical models of the inner pressure control loop and the outer concentration control loop have been obtained. Controller parameters were synthesized: for the inner PI loop — $K_{p1} = 1.875$, $T_{i1} = 10.0$ s; for the outer PID loop — $K_{p2} = 0.513$, $T_{i2} = 130$ s, $T_{d2} = 32.5$ s. Static accuracy and stability of both loops are confirmed. Instrumentation selection was performed. Engineering documentation was developed using EPLAN Education 2025 CAD software.

Key words: urea, urea synthesis, cascade automatic control system, PID controller, MIK-122N, EPLAN.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК ОСНОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ	8
ВСТУП	9
1 АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ОТРИМАННЯ КАРБАМІДУ, ЯК ОБ'ЄКТА АВТОМАТИЗАЦІЇ	10
1.1 Загальні відомості про карбамід	10
1.2 Цикл технологічного процесу отримання карбаміду.....	12
1.3 Опис технологічного процесу	15
1.4 Властивості карбаміду.....	17
1.5 Опис схеми технологічного процесу удосконаленої схеми отримання карбаміду «Текніп-Мавровича»	21
1.6 Шляхи модернізації автоматизованої системи керування	23
Висновки до розділу	25
2 ІДЕНТИФІКАЦІЯ ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ ТА СИНТЕЗ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО РЕГУЛЮВАННЯ.....	27
2.1 Постановка задачі та структура каскадної системи	27
2.2 Модель «вхід–вихід» об'єкта керування	28
2.3 Математична модель об'єктів керування	31
2.4 Експериментальні перехідні характеристики	32
2.5 Визначення передавальних функцій методом ідентифікації	34
2.6 Передавальні функції об'єктів	35
Висновки до розділу	36
3 СИНТЕЗ КАСКАДНОЇ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ	37
3.1 Вибір структури регуляторів	37
3.2 Налаштування ПІ-регулятора внутрішнього контуру	38
3.3 Налаштування ПІД-регулятора зовнішнього контуру.....	39
3.4 Узгодження швидкодій контурів	41

					БР. АКП-16.00.00.000.ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Модернізація автоматизованої системи керування технологічним процесом отримання карбаміду	Літ.	Арк.	Акрушів
Розроб.		Ходань Л.Ю.				Д	6	77
Перевір.		Кучмистенко О.В.				АКП-22-1 ІФНТУНГ		
Реценз.		Фешанич Л.І.						
Н. Контр.		Кучмистенко О.В.						
Затверд.		Лагойда А.І.						

3.5	Передавальні функції замкнених контурів.....	41
3.6	Зведена таблиця параметрів синтезу.....	42
3.7	Аналіз перехідних процесів замкненої системи	43
3.8	Характеристичні рівняння замкнених контурів.....	44
3.9	Якісні показники процесу регулювання	48
3.10	Амплітудно-частотні характеристики замкнених контурів	50
	Висновки до розділу	51
4	РОЗРОБКА ПРОЄКТНИХ РІШЕНЬ ДЛЯ АВТОМАТИЧНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ.....	52
4.1	Загальні вимоги до проєктування запропонованих рішень.....	52
4.1.1	Вимоги до точності та швидкодії.....	53
4.1.2	Вимоги до надійності та безпеки.....	54
4.1.3	Вимоги до метрологічного забезпечення	55
4.1.4	Ієрархічна структура АСУ ТП.....	55
4.2	Вибір технічних засобів автоматизації для реалізації каскадної АСК.....	58
4.2.1	Вибір регулятора – МІК-122Н	58
4.2.2	Вибір датчика тиску – Yokogawa EJA530E.....	61
4.2.3	Вибір аналізатора концентрації карбаміду.....	63
4.2.4	Вибір регулюючого клапана та виконавчого механізму	66
4.3.1	Загальна характеристика САПР EPLAN	68
4.3.2	Підготовчий етап та налаштування проєкту	69
4.3.3	Розробка принципової електричної схеми	70
4.3.4	Розробка монтажною схеми шафи керування	71
4.3.5	Автоматична генерація конструкторської документації	71
	Висновки до розділу	72
	ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	73
	ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ НА ДЖЕРЕЛА	76

ПЕРЕЛІК ОСНОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ

IMC – Internal Model Control (керування на основі внутрішньої моделі);

MATLAB – Matrix Laboratory (програмний пакет математичного моделювання);

Simulink – середовище графічного моделювання динамічних систем у складі MATLAB;

EPLAN – програмний комплекс електротехнічного проектування;

RS-485 – стандарт послідовного інтерфейсу передачі даних;

Modbus RTU – протокол промислового зв'язку;

SIL – Safety Integrity Level (рівень цілісності безпеки);

NIR – Near Infrared (ближня інфрачервона спектроскопія);

K – коефіцієнт підсилення об'єкта керування;

T – стала часу об'єкта керування, с;

τ – транспортне запізнення, с;

K_p – коефіцієнт пропорційності регулятора;

T_i – час інтегрування регулятора, с;

T_d – час диференціювання регулятора, с;

P – тиск у реакторі, МПа;

C – масова концентрація карбаміду, %;

G – масова витрата, кг/год;

NH₃ – аміак;

CO₂ – діоксид вуглецю;

W(p) – передавальна функція;

GM – запас стійкості за амплітудою, дБ;

PM – запас стійкості за фазою, град.

					БР. АКП-16.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8

ВСТУП

Актуальність теми. Виробництво карбаміду є складним багатостадійним процесом, що включає високотемпературний і високотисковий синтез, розділення реакційної суміші, рекуперацію компонентів та формування готового продукту. Взаємопов'язаність апаратів і контурів рециркуляції створює умови, за яких навіть незначні відхилення параметрів можуть порушити технологічний режим і знизити ефективність виробництва.

Обґрунтування вибору теми. Незважаючи на наявні рішення у сфері автоматизації хімічних виробництв, задача модернізації систем керування процесом отримання карбаміду залишається актуальною з огляду на жорсткі вимоги до стабільності режимів, енергоефективності та якості продукту.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є аналіз існуючої технологічної схеми виробництва карбаміду як об'єкта автоматизації та розроблення підходів до модернізації системи керування, що забезпечують стабільність режимів і підвищення ефективності процесу.

Об'єкт дослідження — технологічний процес виробництва карбаміду.

Предмет дослідження — система автоматичного керування основними технологічними параметрами виробництва.

Методи дослідження. У роботі використано методи математичного моделювання, теорії автоматичного керування та імітаційного моделювання для аналізу динаміки об'єкта і синтезу регуляторів.

Практичне значення. Результати роботи можуть бути використані при проектуванні та модернізації систем автоматизації виробництв карбаміду і аналогічних хімічних комплексів.

Структура та обсяг роботи. Робота складається зі вступу, 4 розділів, загальних висновків та переліку посилань на джерела. Загальний обсяг – 77 сторінок.

					БР. АКП-16.00.00.000.ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1 АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ОТРИМАННЯ КАРБАМІДУ, ЯК ОБ'ЄКТА АВТОМАТИЗАЦІЇ

1.1 Загальні відомості про карбамід

Карбамід є однією з найважливіших великотоннажних хімічних сполук сучасної промисловості, яка відіграє значну роль у розвитку аграрного сектору, хімічної технології, фармацевтичного виробництва та низки суміжних галузей. За хімічною природою карбамід належить до класу амідів карбонової кислоти та є діамідом вугільної кислоти. Його молекулярна формула має вигляд $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$, а структура характеризується наявністю карбонільної групи, зв'язаної з двома аміногрупами, що визначає специфічні фізико-хімічні властивості цієї речовини, зокрема високу розчинність у воді, здатність до утворення водневих зв'язків та підвищену реакційну активність у процесах термічного й хімічного перетворення.

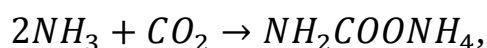
Карбамід являє собою безбарвну кристалічну речовину або білі гранули без вираженого запаху, які характеризуються високою гігроскопічністю та доброю розчинністю у водному середовищі. За нормальних умов речовина є хімічно відносно стабільною, проте при підвищенні температури може піддаватися термічному розкладу з утворенням аміаку, біурету та інших азотовмісних сполук. Температура плавлення карбаміду становить близько 132–135 °C, а густина у твердому стані залежить від форми кристалізації та умов гранулювання. Важливою особливістю карбаміду є високий вміст азоту, який досягає приблизно 46 %, що робить його одним із найбільш концентрованих азотних добрив серед промислово доступних продуктів.

Історичний розвиток досліджень карбаміду має фундаментальне значення для становлення органічної хімії як науки. У 1828 році німецький хімік Фрідріх Велер вперше синтезував карбамід із неорганічної речовини – ціанату амонію, чим фактично спростував теорію віталізму, відповідно до якої органічні

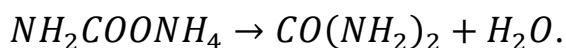
					БР. АКП-16.00.00.000.ПЗ	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

речовини могли утворюватися виключно в живих організмах. Цей експеримент став одним із переломних моментів у розвитку органічного синтезу та заклав підґрунтя для подальшого розвитку хімічної промисловості.

У сучасних умовах основним методом промислового отримання карбаміду є синтез із аміаку та діоксиду вуглецю за підвищених температур і тисків. Процес здійснюється у дві стадії: спочатку відбувається утворення карбамату амонію, після чого внаслідок дегідратації формується карбамід. Реакції можна подати у вигляді:



та



Технологія виробництва карбаміду належить до енергоємних хіміко-технологічних процесів, що потребують точного автоматизованого керування температурою, тиском, співвідношенням реагентів і режимами рециркуляції. Підвищення ефективності синтезу карбаміду пов'язане зі зменшенням енергетичних витрат, скороченням втрат аміаку та мінімізацією шкідливих викидів у навколишнє середовище. Саме тому сучасні установки виробництва карбаміду оснащуються складними системами автоматичного регулювання, що забезпечують стабільність технологічних параметрів і підвищення економічної ефективності виробництва.

Найбільше практичне застосування карбамід отримав у сільському господарстві як висококонцентроване азотне добриво. Після внесення у ґрунт карбамід під дією ферменту уреазі гідролізується з утворенням амонійних сполук, які є джерелом азоту для рослин. Завдяки високому вмісту азоту, добрій транспортабельності та відносно невисокій вартості карбамід широко використовується у технологіях вирощування зернових, технічних та овочевих культур. Разом із цим неправильне внесення добрива може призводити до втрат азоту у вигляді аміачних випарів, що обумовлює необхідність оптимізації агротехнічних режимів застосування.

					БР. АКП-16.00.00.000.ПЗ	Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Окрім аграрного сектору, карбамід використовується у виробництві карбамідоформальдегідних смол, пластмас, клеїв, лакофарбових матеріалів, медичних препаратів та косметичних засобів. У хімічній промисловості він застосовується як сировина для синтезу меламіну, ціанурової кислоти та інших органічних сполук. У теплоенергетиці та транспортній галузі водні розчини карбаміду використовують у системах селективного каталітичного відновлення оксидів азоту для очищення димових і вихлопних газів від токсичних компонентів.

З екологічної точки зору виробництво та використання карбаміду супроводжується низкою проблем, пов'язаних із викидами аміаку, утворенням парникових газів та забрудненням водних ресурсів азотними сполуками. У зв'язку з цим сучасні наукові дослідження спрямовані на вдосконалення технологій синтезу, підвищення ступеня конверсії реагентів, створення енергоефективних систем автоматичного керування та розроблення нових типів добрив із контрольованим вивільненням азоту. Це дозволяє підвищити ефективність використання карбаміду та знизити негативний вплив хімічного виробництва на довкілля.

1.2 Цикл технологічного процесу отримання карбаміду

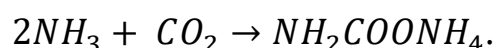
Технологічний цикл виробництва карбаміду являє собою складний безперервний хіміко-технологічний процес, у межах якого здійснюється послідовне перетворення аміаку та діоксиду вуглецю у кінцевий продукт із забезпеченням високого ступеня конверсії реагентів, рециркуляції непрореагованих компонентів та мінімізації енергетичних витрат. Організація такого циклу базується на принципах замкненого матеріального та теплового балансу, що дозволяє забезпечити стабільність режимів синтезу та підвищити економічну ефективність виробництва.

Початковою стадією технологічного циклу є підготовка сировини. Для

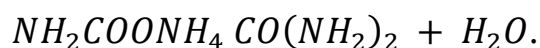
					БР. АКП-16.00.00.000.ПЗ	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

синтезу карбаміду використовують рідкий аміак та діоксид вуглецю високого ступеня очищення. Аміак надходить із цехів синтезу аміаку, де його отримують із азотно-водневої суміші, а діоксид вуглецю зазвичай є побічним продуктом конверсії природного газу. Перед подачею у реакційну систему сировинні потоки очищуються від домішок, осушуються та стискаються до необхідного тиску. Особливе значення має видалення сірковмісних сполук, водяної пари та механічних частинок, оскільки їх наявність негативно впливає на роботу апаратури та перебіг реакцій синтезу.

Основна стадія технологічного циклу відбувається у реакторі синтезу за високого тиску, який у промислових умовах може досягати 14–25 МПа, а температура процесу підтримується в межах 170–200 °С. У цих умовах аміак взаємодіє з діоксидом вуглецю з утворенням карбамату амонію, який є проміжним продуктом процесу:



У подальшому карбамат амонію піддається дегідратації з утворенням карбаміду та води:



Перша реакція є екзотермічною та відбувається з високою швидкістю, тоді як друга характеризується ендотермічним характером і значно меншою швидкістю перебігу. Саме тому для забезпечення необхідного ступеня перетворення реагентів застосовують підвищений тиск, надлишок аміаку та тривалий час перебування реакційної суміші у зоні синтезу.

Після завершення стадії синтезу реакційна суміш містить карбамід, воду, надлишковий аміак, діоксид вуглецю та непрореагований карбамат амонію. Для підвищення економічної ефективності виробництва здійснюється багатоступенева система сепарації та рециркуляції непрореагованих компонентів. На стадії дистиляції відбувається зниження тиску та температури, унаслідок чого аміак і діоксид вуглецю виділяються з розчину та повертаються у цикл синтезу. Цей етап має суттєве значення для зменшення втрат сировини та

					БР. АКП-16.00.00.000.ПЗ	Арк.
						13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

зниження навантаження на очисні системи підприємства.

Подальший етап технологічного циклу пов'язаний із концентруванням водного розчину карбаміду. Після відокремлення непрореагованих компонентів розчин містить значну кількість води, тому його направляють у вакуум-випарні апарати. У процесі випарювання концентрація карбаміду поступово підвищується до значень, необхідних для гранулювання або прилювання. Застосування вакууму дозволяє знизити температуру кипіння розчину та уникнути термічного розкладу продукту.

Завершальна стадія циклу полягає у формуванні товарного продукту. Найчастіше карбамід випускається у вигляді гранул або прилів. У грануляційних установках концентрований розплав карбаміду розпилюється та твердне в потоці охолоджувального повітря. Отримані гранули характеризуються високою механічною міцністю, однорідністю структури та доброю транспортабельністю. Після охолодження продукт направляється на сортування, фасування та зберігання.

Важливою особливістю технологічного циклу виробництва карбаміду є наявність розвинених систем автоматичного керування. Через високу чутливість процесу до змін температури, тиску, співвідношення реагентів і рівнів у технологічних апаратах застосовуються автоматизовані системи регулювання, що забезпечують підтримання оптимальних режимів синтезу. Контроль параметрів здійснюється за допомогою датчиків температури, тиску, витрати та концентрації, а керуючий вплив реалізується через регулюючі клапани, компресори, насоси та теплообмінне обладнання.

Сучасні технології виробництва карбаміду орієнтовані на підвищення ступеня конверсії реагентів, скорочення питомих витрат енергії та зменшення негативного впливу на навколишнє середовище. Значна увага приділяється утилізації теплової енергії, очищенню газових викидів та впровадженню енергоефективних схем рециркуляції. Це обумовлює активний розвиток математичного моделювання, систем оптимального керування та цифрових

					БР. АКП-16.00.00.000.ПЗ	Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

технологій моніторингу параметрів технологічного циклу.

1.3 Опис технологічного процесу

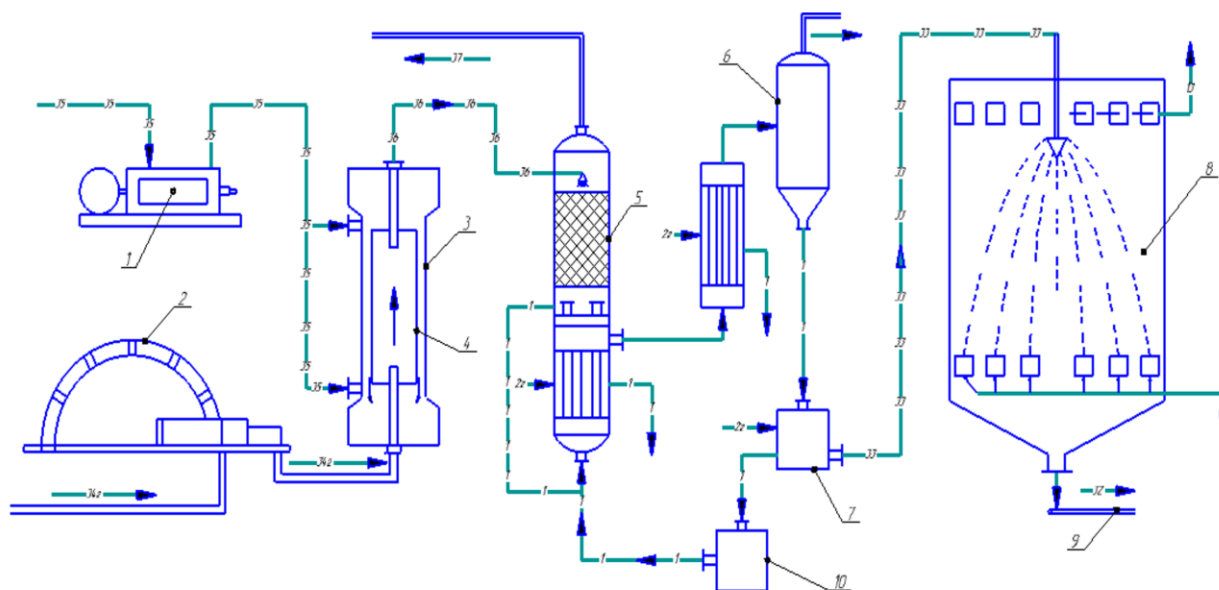
Карбамід отримують синтетичним способом із використанням аміаку та двоокису вуглецю як основних вихідних компонентів. Виробництво карбаміду належить до складних великотоннажних хіміко-технологічних процесів, у межах яких здійснюється хімічна взаємодія реагентів, подальше розділення реакційної суміші, концентрування продукту та формування товарного карбаміду у вигляді гранул або кристалів. Технологічний процес характеризується високими параметрами тиску й температури, що обумовлює необхідність застосування спеціального технологічного обладнання, стійкого до агресивного середовища та значних механічних навантажень.

Процес синтезу карбаміду здійснюється у дві послідовні стадії. На першій стадії відбувається утворення проміжної сполуки – карбамату амонію. Далі, у результаті дегідратації цієї сполуки, формується карбамід у рідкій фазі у вигляді плаву. Для реалізації процесу застосовується метод прямого синтезу, який забезпечує безперервність виробництва та високий ступінь використання реагентів. Синтез проводиться у спеціальній колоні, виготовленій із легованої сталі, що забезпечує стійкість обладнання до корозійного впливу реакційного середовища.

Технологічний процес виробництва карбаміду, зображений на рис. 1.1 відповідно до [1], функціонує таким чином. Рідкий аміак за допомогою насоса 1 подається у кільцевий простір між зовнішнім корпусом колони синтезу 3 та внутрішнім циліндром 4. Така конструкція забезпечує омивання внутрішньої поверхні корпусу аміаком, що дозволяє зменшити корозійний вплив агресивного середовища та підвищити довговічність апарата. Внутрішній циліндр виконує функцію захисної реакційної камери, у якій безпосередньо відбуваються основні стадії синтезу карбаміду.

					БР. АКП-16.00.00.000.ПЗ	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Двоокис вуглецю подається через компресор 2 у нижню частину реакційної камери. Усередині колони створюються необхідні умови високого тиску та температури, за яких відбувається хімічна взаємодія компонентів із подальшим утворенням плаву карбаміду. Робота колони здійснюється за принципом режиму витіснення, що забезпечує спрямований рух реакційної суміші вздовж апарата та підвищує ефективність протікання процесу синтезу.



1 – насос; 2 – компресор; 3 – колона синтезу; 4 – внутрішня реакційна камера; 5 – дистиляційна колона; 6 – випарний апарат; 7 – збірник плаву;
8 – грануляційна башта; 9 – транспортер; 10 – апарат зворотного осмосу

Рисунок 1.1 – Технологічна схема лінії виробництва карбаміду

У верхній частині колони отриманий плав карбаміду відводиться з апарата, після чого проходить стадію дроселювання до нижчого тиску та направляється у дистиляційну колону 5. У дистиляційній колоні здійснюється відокремлення залишкового аміаку, двоокису вуглецю та продуктів розкладу вуглеамонійних солей від розчину карбаміду. Даний етап має важливе значення для підвищення чистоти кінцевого продукту та забезпечення рециркуляції непрореагованих компонентів у технологічний цикл.

Після дистиляції розчин карбаміду надходить у випарний апарат 6, де

					БР. АКП-16.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

здійснюється видалення надлишкової вологи та концентрування продукту до необхідних параметрів. Процес випарювання дозволяє отримати концентрований плав карбаміду, придатний для подальшого формування товарного продукту. Далі плав надходить до збірника 7, який виконує функцію проміжного накопичення та стабілізації технологічного потоку перед грануляцією.

Формування готового продукту здійснюється у грануляційній башті 8, де концентрований плав розпилюється та охолоджується у потоці повітря. У результаті цього утворюються тверді гранули карбаміду з необхідними фізико-механічними характеристиками. Після завершення процесу грануляції готовий висушений карбамід виводиться з установки через транспортер 9 та направляється на фасування або зберігання.

Надлишкові рідкі продукти та дистиляти зі збірника плаву надходять до апарата зворотного осмосу 10. У даному апараті здійснюється вилучення залишків карбаміду з рідкої фази, після чого отриманий концентрат повертається у технологічний процес. Використання системи зворотного осмосу дозволяє зменшити втрати продукту, підвищити ефективність використання сировини та знизити навантаження на систему очищення стічних вод.

1.4 Властивості карбаміду

Карбамід є азотовмісною органічною сполукою, яка характеризується комплексом фізичних, хімічних та технологічних властивостей, що визначають особливості його промислового виробництва, транспортування, зберігання та практичного застосування. Завдяки високому вмісту азоту, добрій розчинності у воді та відносній хімічній стабільності карбамід набув широкого використання у хімічній промисловості, сільському господарстві, енергетиці та виробництві полімерних матеріалів.

За фізичними властивостями карбамід являє собою тверду кристалічну

					БР. АКП-16.00.00.000.ПЗ	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

речовину білого кольору без вираженого запаху. У промислових умовах продукт переважно випускається у вигляді гранул або прилів, що забезпечує зручність транспортування та дозування. Речовина характеризується високою гігроскопічністю, тобто здатністю поглинати вологу з навколишнього середовища. Унаслідок цього при порушенні умов зберігання можливе злежування гранул та погіршення сипучості продукту. Для запобігання таким явищам карбамід зберігають у герметичних ємностях або складських приміщеннях із контрольованими параметрами вологості повітря.

Карбамід добре розчиняється у воді, причому розчинність значно зростає зі збільшенням температури. Дана властивість має важливе технологічне значення у процесах синтезу, випарювання, очищення та грануляції продукту. Водні розчини карбаміду широко використовуються у виробництві рідких добрив, а також у системах очищення димових і вихлопних газів від оксидів азоту. Розчинення карбаміду у воді супроводжується поглинанням тепла, унаслідок чого температура розчину знижується.

Температура плавлення карбаміду становить приблизно 132–135 °С. При подальшому підвищенні температури відбувається термічний розклад речовини з утворенням аміаку та інших азотовмісних сполук. У процесі тривалого нагрівання можливе утворення біурету, який є небажаною домішкою, особливо у виробництві мінеральних добрив, оскільки його підвищений вміст може негативно впливати на розвиток рослин. З цієї причини у технологічних схемах виробництва карбаміду велика увага приділяється контролю температурних режимів під час випарювання та грануляції плаву.

За хімічними властивостями карбамід є достатньо реакційно здатною сполукою. Він вступає у взаємодію з кислотами, лугами та деякими органічними речовинами, утворюючи похідні продукти, які широко використовуються у хімічній промисловості. У присутності води та ферменту уреазі карбамід поступово гідролізується з утворенням аміаку та сполук амонію. Саме ця властивість обумовлює його ефективність як азотного добрива, оскільки

					БР. АКП-16.00.00.000.ПЗ	Арк.
						18
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

утворені азотні сполуки є доступними для живлення рослин.

Карбамід характеризується відносно низькою токсичністю та за нормальних умов не належить до високонебезпечних речовин. Проте пил карбаміду та продукти його термічного розкладу можуть подразнювати слизові оболонки органів дихання та очей. У виробничих умовах це обумовлює необхідність використання систем вентиляції, аспірації та засобів індивідуального захисту персоналу. Особливу увагу приділяють запобіганню контакту карбаміду з відкритими джерелами високої температури, оскільки продукти його розкладу можуть спричиняти корозійний вплив на обладнання та погіршувати екологічні показники виробництва.

Важливою технологічною характеристикою карбаміду є його висока масова частка азоту, яка становить близько 46 %. Завдяки цьому карбамід є одним із найбільш концентрованих азотних добрив, що застосовуються у світовій агрохімічній практиці. Висока концентрація поживного компонента забезпечує зниження витрат на транспортування та внесення добрив, а також підвищує економічну ефективність використання продукту.

У процесі дослідження фізико-хімічних характеристик карбаміду важливе значення має аналіз його хімічних властивостей, оскільки саме вони визначають особливості перебігу технологічних процесів синтезу, умови зберігання, транспортування та напрями практичного застосування речовини. Хімічна активність карбаміду, його здатність до термічного розкладу, взаємодії з водою та іншими сполуками безпосередньо впливають на ефективність виробництва, стабільність готового продукту та безпечність експлуатації технологічного обладнання. Основні хімічні властивості карбаміду наведено в табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – Хімічні властивості

№	Показник	Характеристика
1.	Хімічна назва	Карбамід
2.	Клас сполуки	Органічна азотовмісна сполука, амід вугільної кислоти

					БР. АКП-16.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

Продовження таблиці 1.1

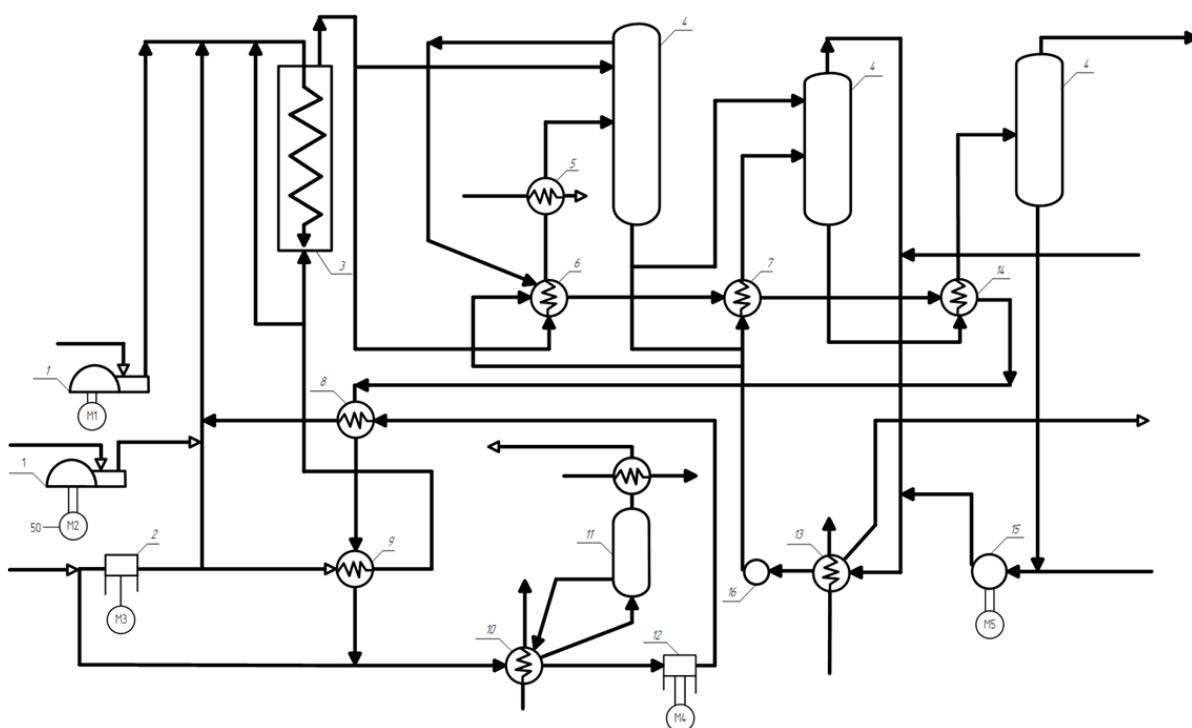
№	Показник	Характеристика
3.	Хімічна формула	$\text{CO}(\text{NH}_2)_2$
4.	Молярна маса	60,06 г/моль
5.	Масова частка азоту	Близько 46 %
6.	Хімічна активність	Вступає у реакції з кислотами, лугами та окисниками
7.	Гідроліз	У водному середовищі під дією ферменту уреазі розкладається з утворенням аміаку та амонійних сполук
8.	Термічна стійкість	При нагріванні піддається термічному розкладу
9.	Продукти термічного розкладу	Аміак, біурет, ціанурова кислота та інші азотовмісні сполуки
10.	Взаємодія з водою	Добре розчиняється у воді з утворенням нейтрального або слабколужного середовища
11.	Корозійна активність	У поєднанні з продуктами розкладу може спричиняти корозійний вплив на обладнання
12.	Сумісність з іншими речовинами	Сумісний із багатьма мінеральними добривами, проте за певних умов можливе злежування або небажані хімічні взаємодії
13.	Токсичність	Відносно малотоксична речовина
14.	Вплив на навколишнє середовище	При надлишковому потрапленні у ґрунт або водойми може спричиняти накопичення азотних сполук та евтрофікацію
15.	Основні напрями застосування	Виробництво мінеральних добрив, смол, пластмас, фармацевтичних препаратів та реагентів для очищення газів

Сучасні вимоги до якості карбаміду передбачають контроль гранулометричного складу, вологості, міцності гранул, вмісту біурету та інших домішок. Відповідність цих параметрів нормативним значенням визначає придатність продукту для подальшого використання у сільському господарстві, хімічному синтезі та інших галузях промисловості. Саме тому у виробництві карбаміду широко застосовуються автоматизовані системи контролю та регулювання технологічних параметрів, що забезпечують стабільність властивостей готового продукту.

					БР. АКП-16.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

1.5 Опис схеми технологічного процесу удосконаленої схеми отримання карбаміду «Текніп-Мавровича»

Удосконалена технологічна схема виробництва Карбамід типу «Текніп-Мавровича» побудована на принципах енергоощадності, глибокої рециркуляції реагентів та максимального використання внутрішніх теплових потоків процесу. Основною ідеєю даної схеми є зменшення енергетичних витрат за рахунок оптимізації використання діоксиду вуглецю та раціонального розподілу теплових навантажень між стадіями синтезу, дистиляції та абсорбції (рис. 1.2).



- 1 – компресор; 2 – аміачний насос; 3 – реактор; 4, 16 – сепаратори;
 5 – підігрівач; 6, 7 – апарати першої та другої ступені дистиляції;
 8 – підігрівач розчину вуглеамонійних солей; 9 – підігрівач аміаку;
 10 – перший конденсатор; 11 – скруббер для промивки інертів;
 12 – карбаматний насос високого тиску; 13 – другий конденсатор;
 14 – вакуум-випарник; 15 – насос рециркуляції розчину карбаміду;
 17 – карбаматний насос низького тиску

Рисунок 1.2 – Схема технологічного процесу удосконаленої схеми отримання карбаміду «Текніп-Мавровича» [2]

					БР. АКП-16.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

З метою зниження витрат електроенергії та компресійної роботи у реактор синтезу подається лише частина свіжого діоксиду вуглецю, тоді як решта його кількості використовується на нижчих за тиском стадіях технологічного процесу, зокрема у дистиляційних та абсорбційних апаратах. Такий підхід дозволяє зменшити навантаження на компресорне обладнання та підвищити загальну енергоефективність виробництва.

У першій ступені дистиляції процес проводиться в середовищі діоксиду вуглецю, що забезпечує додаткову інтенсифікацію масообміну та сприяє більш повному видаленню аміаку з реакційної суміші. В абсорбційно-конденсаційній зоні газу дистиляції взаємодіють зі свіжим діоксидом вуглецю, в результаті чого відбувається зв'язування надлишкового аміаку, що усуває необхідність його виділення у чистому вигляді та подальшої додаткової регенерації.

Частина теплової енергії у першій ступені дистиляції підводиться за рахунок гріючої пари, однак значна частка теплового балансу компенсується завдяки екзотермічним ефектам процесів абсорбції та конденсації газових потоків. Теплота, що виділяється під час цих процесів, використовується для підігріву технологічних потоків і підтримання температурних режимів у суміжних апаратах, що дозволяє істотно знизити зовнішні енергетичні витрати.

У другій ступені дистиляції для абсорбції та конденсації газів застосовується частина розчину карбаміду після попереднього очищення, який надалі використовується як абсорбційний розчин у першій ступені. Таким чином формується замкнений контур рециркуляції розчинів, що забезпечує більш повне вилучення аміаку та зменшення втрат цінних компонентів.

Теплові ефекти абсорбції газів першої ступені послідовно утилізуються в різних елементах технологічної схеми, включаючи апарати дистиляції обох ступенів, вакуум-випарну установку, а також теплообмінники, що підігрівають аміак і рециркульований розчин вуглеамонійних солей. Для підвищення ефективності теплопередачі додатково використовується введення діоксиду

					БР. АКП-16.00.00.000.ПЗ	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

вуглецю в теплообмінні вузли, що сприяє підвищенню температури абсорбційно-конденсаційних процесів та більш повному використанню виділеної теплоти.

Перед карбаматним насосом встановлюється аналізатор концентрації, який забезпечує стабілізацію складу рециркульованого розчину вуглеамонійних солей із високою точністю. Регулювання здійснюється шляхом зміни тиску у сепараційній зоні другої ступені дистиляції, що впливає на парціальний вміст водяної пари в газових потоках і дозволяє підтримувати оптимальні умови процесу.

Схема також включає розвинений комплекс природоохоронних заходів. На стадії грануляції рекомендується використання тарілчастих грануляторів, а у випадку баштового гранулювання передбачаються ефективні системи очищення від пилу. Газові потоки, що містять аміак і діоксид вуглецю, піддаються мокрому очищенню з подальшим поверненням отриманих розчинів у систему очищення стічних вод.

Конденсат вакуум-випарювання, який містить залишкові кількості аміаку та карбаміду, також направляється на очищення. У вузлі обробки стічних вод застосовуються процеси гідролізу та відпарювання, що дозволяє регенерувати аміак і повертати його у технологічний цикл. Очищена вода після видалення залишкових домішок може бути відведена у каналізаційну систему відповідно до встановлених екологічних норм.

1.6 Шляхи модернізації автоматизованої системи керування

Аналіз технологічного процесу виробництва карбаміду як об'єкта автоматизації показує, що сучасні удосконалені схеми типу «Текніп-Мавровича» характеризуються високою структурною складністю, значною кількістю взаємопов'язаних матеріальних і енергетичних потоків, а також істотною чутливістю до відхилень режимних параметрів. Наявність багатоступеневих

					БР. АКП-16.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

процесів синтезу, дистиляції, абсорбції та рециркуляції створює умови, за яких навіть незначні коливання витрат, тиску або температури здатні призводити до порушення матеріального балансу та зниження ступеня конверсії вихідної сировини.

У таких умовах автоматизована система керування повинна забезпечувати не лише стабілізацію окремих технологічних параметрів, але й підтримання оптимального режиму всього технологічного комплексу як єдиної взаємопов'язаної системи. Особливу складність становить взаємний вплив стадій синтезу та газорідного розділення, де зміна режиму в одному апараті безпосередньо відображається на навантаженні суміжних вузлів. Це обумовлює необхідність переходу від локальних одноконтурних систем регулювання до багаторівневої інтегрованої структури керування.

Модернізація автоматизованої системи керування технологічним процесом базується на впровадженні каскадних та багатозв'язних контурів регулювання, які дозволяють компенсувати збурення ще на ранніх стадіях їх виникнення. Для реакторного вузла синтезу доцільним є застосування каскадного регулювання тиску, температури та співвідношення вихідних реагентів, що забезпечує стабільність утворення проміжних сполук та підвищує ефективність подальшої дегідратації.

У вузлах дистиляції та абсорбції особлива увага приділяється стабілізації парогазових потоків та концентрацій компонентів. З огляду на рециркуляційний характер процесу, система керування повинна враховувати накопичувальні ефекти, що виникають у замкнених контурах повернення аміаку та діоксиду вуглецю. У зв'язку з цим доцільним є використання багатозмінних регуляторів із елементами прогнозного керування, які дозволяють враховувати динаміку об'єкта та попереджувати виникнення коливальних режимів.

Окремим напрямом модернізації є підвищення ефективності енергетичного керування процесом. Оскільки значна частина теплоти в технологічній схемі генерується екзотермічними реакціями абсорбції та

					БР. АКП-16.00.00.000.ПЗ	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

конденсації, система автоматизації повинна забезпечувати її максимально повне використання для підігріву технологічних потоків. Це вимагає впровадження контурів теплового балансу, які синхронізують роботу теплообмінного обладнання з режимами реакційних апаратів.

Важливим елементом модернізованої системи є підсистема контролю складу рециркульованих розчинів, яка забезпечує стабілізацію концентрації компонентів у замкнених потоках. Зміна тиску у сепараційних вузлах використовується як керуючий вплив для підтримання оптимального співвідношення фаз, що дозволяє забезпечити стабільність дистиляційних процесів і зменшити втрати цінних реагентів.

З точки зору інформаційної структури автоматизованої системи керування доцільним є впровадження багаторівневої архітектури, що включає польовий рівень збору даних, рівень локального регулювання та верхній рівень оптимізації. На верхньому рівні реалізуються алгоритми координації технологічних режимів, які дозволяють забезпечити оптимальний розподіл матеріальних і енергетичних потоків у межах усього виробничого циклу.

Окрему увагу в процесі модернізації слід приділити підсистемі екологічного контролю, яка забезпечує моніторинг викидів аміаку та інших азотовмісних сполук. Інтеграція цієї підсистеми з основними контурами керування дозволяє оперативно коригувати технологічні режими з метою мінімізації негативного впливу на навколишнє середовище.

Висновки до розділу

В даному розділі було розглянуто технологічний процес отримання карбаміду, як складний багатостадійний об'єкт автоматизації, що включає синтез, дистиляцію, абсорбцію, концентрування та грануляцію продукту. Проаналізовано удосконалену технологічну схему «Текніп-Мавровича», її енергетичну організацію та принципи рециркуляції реагентів.

					БР. АКП-16.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25

Встановлено, що ефективність процесу значною мірою визначається стабільністю режимів у реакторі та вузлах розділення, а також ступенем утилізації теплової енергії та повернення непрореагованих компонентів у цикл. Показано, що застосування замкнених потоків і теплоутилізації дозволяє зменшити енергетичні витрати та підвищити вихід готового продукту.

Зроблено висновок, що процес виробництва карбаміду є складною багатозв'язною системою, яка потребує сучасних підходів до автоматизації з метою забезпечення стабільності, енергоефективності та екологічної безпеки.

					БР. АКП-16.00.00.000.ПЗ	Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2 ІДЕНТИФІКАЦІЯ ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ ТА СИНТЕЗ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО РЕГУЛЮВАННЯ

2.1 Постановка задачі та структура каскадної системи

Синтез карбаміду здійснюється у реакторі-автоклаві при надвисокому тиску (14–20 МПа) та температурі 180–200 °С за реакцією взаємодії аміаку з діоксидом вуглецю. Ефективне керування цим процесом ускладнюється нелінійністю кінетики, значним запізненням у каналі концентрації продукту та збуреннями з боку витрат і складу сировини. Застосування класичної одноконтурної АСР виявляється недостатнім, оскільки повільна зовнішня динаміка концентрації не дозволяє вчасно відпрацьовувати швидкі збурення з боку тиску та витрати реагентів.

Каскадна система автоматичного регулювання (каскадна АСР) побудована за принципом підпорядкованого регулювання двох взаємопов'язаних контурів. Внутрішній (підпорядкований) контур здійснює швидке регулювання тиску в реакторі – проміжної змінної, що безпосередньо визначає умови перебігу реакції синтезу. Зовнішній (головний) контур керує концентрацією карбаміду на виході реактора або еквівалентним показником – ступенем конверсії реагентів, формуючи завдання для внутрішнього регулятора.

Керована змінна внутрішнього контуру – тиск P у реакторі [МПа]; керуюча змінна – положення регулюючого клапана подачі CO_2 [%]. Керована змінна зовнішнього контуру – масова концентрація карбаміду C [%]; керуюча змінна – завдання для регулятора тиску [МПа], яке формується зовнішнім регулятором. Взаємодія контурів полягає у тому, що вихід зовнішнього регулятора є уставкою (задавальним впливом) внутрішнього регулятора, а вихід внутрішнього регулятора впливає на об'єкт тиску, зміна якого є збуренням для зовнішнього об'єкта концентрації.

Головна вимога до каскадної АСР – швидкодія внутрішнього контуру має

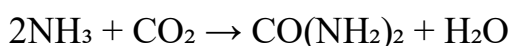
					БР. АКП-16.00.00.000.ПЗ	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

перевищувати швидкодію зовнішнього не менш ніж у 5–10 разів, що забезпечує умову незалежного синтезу кожного контуру.

2.2 Модель «вхід–вихід» об'єкта керування

Формалізація задачі автоматизованого керування процесом синтезу карбаміду розпочинається з побудови моделі «вхід–вихід» об'єкта керування. У рамках цього підходу технологічний апарат – реактор синтезу карбаміду – розглядається як єдиний динамічний об'єкт, на який діють чотири категорії змінних: вхідні змінні, керуючі впливи, збурення та вихідні змінні. Така класифікація є основою для подальшого синтезу каскадної системи автоматичного регулювання [3].

Реактор синтезу карбаміду являє собою апарат колонного типу з мішалкою, у якому відбувається екзотермічна реакція взаємодії аміаку з діоксидом вуглецю за умов надвисокого тиску (14–20 МПа) та температури 180–200 °С:



Вхідними змінними об'єкта є матеріальні потоки реагентів, що безперервно надходять у реактор у встановленому технологічним регламентом співвідношенні. Перша вхідна змінна x_1 – масова витрата аміаку G_{NH_3} [кг/год], яка визначає загальну продуктивність реактора та задає базове навантаження на систему. Друга вхідна змінна x_2 – масова витрата діоксиду вуглецю G_{CO_2} [кг/год], що подається у реактор під тиском і безпосередньо впливає на рівень тиску в апараті та швидкість реакції синтезу (рис. 2.1).

Керуючими впливами є сигнали, формовані системою автоматичного регулювання та спрямовані на зміну стану об'єкта у бажаному напрямку. В каскадній АСК визначено два керуючих впливи. Перший – u_1 , що являє собою керуючий сигнал на виконавчий механізм (положення регулюючого клапана подачі CO_2) у відсотках від ходу [%]. Цей вплив формується внутрішнім ПІ-

					БР. АКП-16.00.00.000.ПЗ	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

регулятором і є безпосереднім керуванням швидкодіючого контуру тиску. Другий керуючий вплив – u_2 , що є заданим значенням тиску $P_{зд}$ [МПа], яке формується зовнішнім ПІД-регулятором концентрації та передається як уставка до внутрішнього контуру. Саме цей сигнал забезпечує підпорядкований зв'язок між контурами каскадної системи: зовнішній регулятор, реагуючи на відхилення концентрації карбаміду, коригує завдання для регулятора тиску, а не керує безпосередньо виконавчим органом.

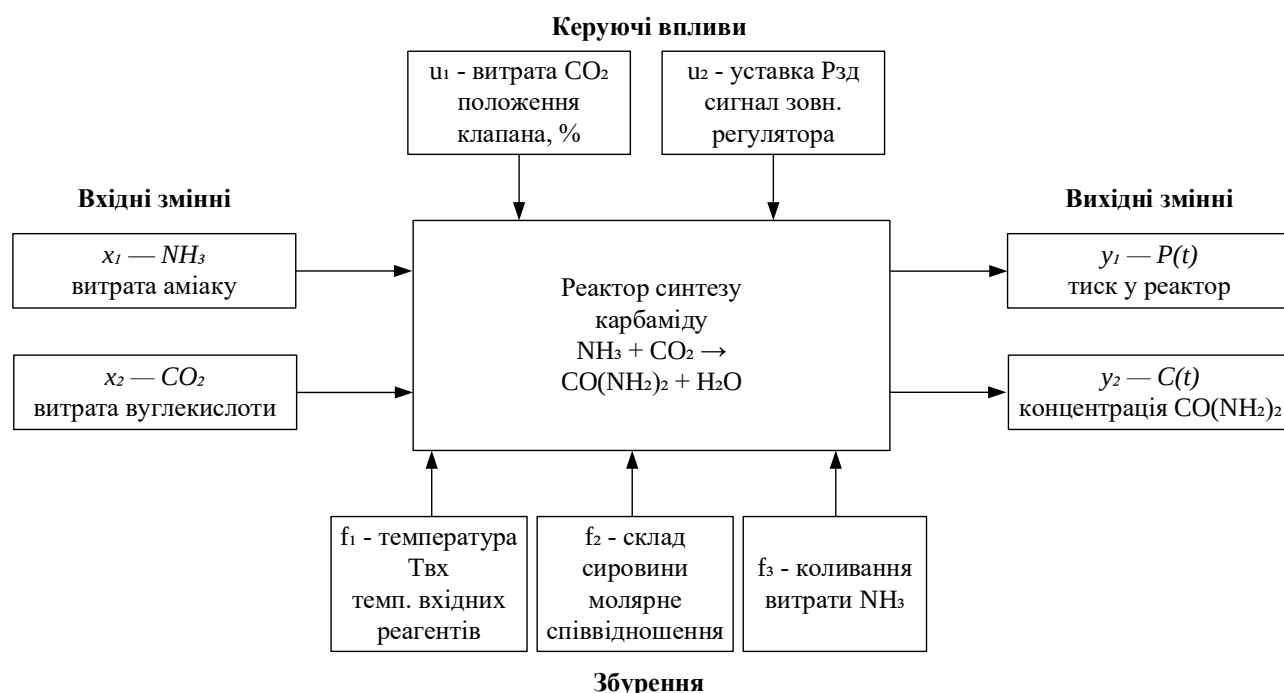


Рисунок 2.1 – Структурна схема моделі вхід-вихід реактора синтезу карбоміду

Збурення є некерованими зовнішніми впливами, що порушують нормальний перебіг технологічного процесу і не можуть бути компенсовані шляхом зміни керуючих сигналів превентивно – лише за фактом відхилення регульованих змінних. Перше збурення f_1 – температура вхідних реагентів $T_{вх}$ [°C], яка може змінюватись унаслідок коливань теплового режиму підготовчих стадій або сезонних змін. Підвищення температури реагентів прискорює кінетику реакції, що призводить до надмірного зростання тиску і концентрації

реакційної суміші. Друге збурення f_2 – молярне співвідношення NH_3/CO_2 у сировинному потоці, яке змінюється при нестабільній роботі вузла компресії або при зміні постачання сировини. Відхилення молярного співвідношення від оптимального значення ($\text{NH}_3/\text{CO}_2 = 3,5\text{--}4,0$) безпосередньо впливає на ступінь конверсії реагентів та концентрацію карбаміду на виході реактора. Третє збурення f_3 – некеровані коливання витрати аміаку, пов'язані з нестабільністю роботи насосів-компресорів. Хоча витрата NH_3 є вхідною змінною, її флуктуації у режимі реального часу виступають збуренням, оскільки не можуть бути скомпенсовані безпосередньо системою регулювання тиску або концентрації.

Вихідними змінними є ті технологічні параметри, контроль та стабілізація яких є метою функціонування АСК. Перша вихідна змінна y_1 – тиск у реакторі $P(t)$ [МПа], що є регульованою змінною внутрішнього контуру каскадної АСК. Підтримання тиску на заданому рівні забезпечує необхідні термодинамічні умови для перебігу реакції синтезу та є обов'язковою умовою безпечної експлуатації реактора. Допустимий діапазон регулювання тиску – $\Delta P \leq \pm 0,5$ МПа відносно номінального значення 18 МПа. Друга вихідна змінна y_2 – масова концентрація карбаміду в реакційній суміші $C(t)$ [%], що є головною регульованою змінною зовнішнього контуру. Концентрація карбаміду безпосередньо визначає ступінь конверсії реагентів та якість продукту, що передається на наступну стадію технологічного процесу – стадію дистиляції та випарювання.

Взаємозв'язок між класифікованими змінними виражається у тому, що обидві вихідні змінні є взаємозалежними: тиск $P(t)$ безпосередньо впливає на швидкість реакції і, відповідно, на концентрацію $C(t)$. Саме ця залежність y_2 від y_1 через внутрішню динаміку реактора є фізичним обґрунтуванням каскадної структури АСК – швидке регулювання проміжної змінної (тиску) дозволяє значно підвищити якість стабілізації головної вихідної змінної (концентрації) порівняно з одноконтурною системою. Зведені дані щодо всіх змінних моделі «вхід–вихід» наведено у табл. 2.1.

					БР. АКП-16.00.00.000.ПЗ	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 2.1 – Класифікація змінних моделі «вхід–вихід» реактора синтезу карбаміду

Категорія	Познач.	Фізичний зміст	Одиниця	Номінал
Вхідна змінна	x_1	Витрата аміаку G_{NH_3}	кг/год	2800
Вхідна змінна	x_2	Витрата CO_2 G_{CO_2}	кг/год	1950
Керуючий вплив	u_1	Положення клапана CO_2	%	50
Керуючий вплив	u_2	Уставка тиску $P_{\text{зд}}$	МПа	18,0
Збурення	f_1	Температура реагентів $T_{\text{вх}}$	°C	160
Збурення	f_2	Молярне співвідношення NH_3/CO_2	–	3,8
Збурення	f_3	Коливання витрати NH_3	кг/год	± 150
Вихідна змінна	y_1	Тиск у реакторі $P(t)$	МПа	18,0
Вихідна змінна	y_2	Концентрація карбаміду $C(t)$	%	72–75

2.3 Математична модель об'єктів керування

Математичний опис динаміки реактора синтезу карбаміду ґрунтується на рівняннях матеріального та енергетичного балансу. Для внутрішнього контуру (канал керування тиском) рівняння балансу тиску в об'ємі реактора V має вигляд:

$$\frac{V}{R} \cdot \frac{dP}{dt} = G_{\text{вх}} \cdot T_{\text{вх}} - G_{\text{вих}} \cdot T - \alpha \cdot V \cdot (P - P_0), \quad (2.1)$$

де P – поточний тиск у реакторі [МПа], $G_{\text{вх}}$ та $G_{\text{вих}}$ – масові витрати реагентів на вході та виході [кг/с], T – температура реакційної суміші [К], α – коефіцієнт, що враховує споживання тиску в реакції. Лінеаризуючи відносно робочої точки та

					БР. АКП-16.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

вводячи відхилення від стаціонарного стану $\Delta P = P - P_{\text{ст}}$, отримуємо лінійне диференціальне рівняння першого порядку:

$$T_1 \cdot \frac{d\Delta P}{dt} + \Delta P = K_1 \cdot \Delta u_1(t - \tau_1), \quad (2.2)$$

де T_1 – стала часу об'єкта тиску [с], K_1 – статичний коефіцієнт підсилення [МПа/% ходу клапана], τ_1 – транспортне запізнення [с], Δu_1 – відхилення положення клапана від стаціонарного значення [%].

Для зовнішнього контуру (канал керування концентрацією карбаміду) рівняння балансу маси компонента в реакторі описується системою:

$$\frac{dC}{dt} = \left(\frac{G_{\text{вх}}}{V} \right) \cdot (C_{\text{вх}} - C) + r(C, P, T), \quad (2.3)$$

де C – концентрація карбаміду [%], $r(C, P, T)$ – швидкість реакції синтезу, яка є нелінійною функцією концентрацій, тиску та температури. Після лінеаризації в робочій точці та врахування транспортного запізнення у вимірювальному каналі аналізатора концентрації модель зовнішнього контуру приймає вигляд диференціального рівняння другого порядку:

$$T_{2a} \cdot T_{2\beta} \cdot \Delta C'' + (T_{2a} + T_{2\beta}) \cdot \Delta C' + \Delta C = K_2 \cdot \Delta P(t - \tau_2), \quad (2.4)$$

де T_{2a} та $T_{2\beta}$ – часові сталі зовнішнього контуру, що відповідають гідродинамічному ($T_{2a} = 120$ с) та кінетичному ($T_{2\beta} = 45$ с) каналам; K_2 – коефіцієнт підсилення зовнішнього об'єкта, τ_2 – запізнення вимірювального каналу концентрації.

2.4 Експериментальні перехідні характеристики

Для ідентифікації параметрів математичних моделей об'єктів керування проводиться активний або пасивний експеримент. В умовах діючого виробничого процесу застосовується метод кривої розгону: на вхід об'єкта подається одиничний стрибковий вплив (ступінчасте збільшення керуючого сигналу на 5–10% від номінального), і реєструється реакція виходу у часі [3].

Для внутрішнього контуру керуючий вплив – різка зміна положення

					БР. АКП-16.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

клапана подачі CO_2 на 10% від номінального відкриття. Перехідна характеристика $h_1(t)$ відображає зміну тиску в реакторі. Крива має типовий аперіодичний характер першого порядку із транспортним запізненням. Після закінчення запізнення τ_1 тиск монотонно зростає до нового усталеного значення $\Delta P_{\text{уст}} = K_1 \cdot \Delta u_1 = 2,4 \cdot 1 = 2,4$ МПа (при одиничному стрибку). Значний нахил початкової ділянки та відсутність перерегулювання підтверджують аперіодичний характер динаміки першого порядку.

Числові значення, зняті з перехідної характеристики внутрішнього контуру: запізнення $\tau_1 = 3$ с (відрізок часу від моменту подачі впливу до початку зміни виходу); стала часу $T_1 = 15$ с (час від закінчення запізнення до досягнення рівня $0,632 \cdot \Delta P_{\text{уст}}$); коефіцієнт підсилення $K_1 = \Delta P_{\text{уст}} / \Delta u_1 = 2,4$ МПа/%.

Для зовнішнього контуру стрибкова зміна тиску в реакторі на 1 МПа є вхідним впливом, а зміна концентрації карбаміду – виходом. Перехідна характеристика $h_2(t)$ має S-подібний вигляд, що характерно для об'єктів другого порядку. Спостерігається чітко виражена точка перегину, а вихід монотонно наближається до усталеного значення $\Delta C_{\text{уст}} = K_2 \cdot \Delta P = 1,8 \cdot 1 = 1,8$ % без перерегулювання.

Параметри, визначені методом дотичної в точці перегину кривої $h_2(t)$: еквівалентне запізнення $\tau_2 = 20$ с; часові сталі $T_{2a} = 120$ с та $T_{2\beta} = 45$ с (визначені шляхом апроксимації аперіодичними ланками другого порядку методом найменших квадратів); коефіцієнт підсилення $K_2 = 1,8$ %/МПа. Критерієм якості апроксимації слугує значення середньоквадратичного відхилення між розрахунковою та експериментальною кривою – $\varepsilon_{\text{rms}} < 2\%$, що підтверджує адекватність моделі.

Рис. 1 (побудований у MATLAB) відображає обидві криві розгону із нанесеними основними параметрами ідентифікації: точкою $0,632 \cdot K$ (для визначення T), початком кривої (для визначення τ) та дотичною в точці перегину для зовнішнього контуру.

					БР. АКП-16.00.00.000.ПЗ	Арк.
						33
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

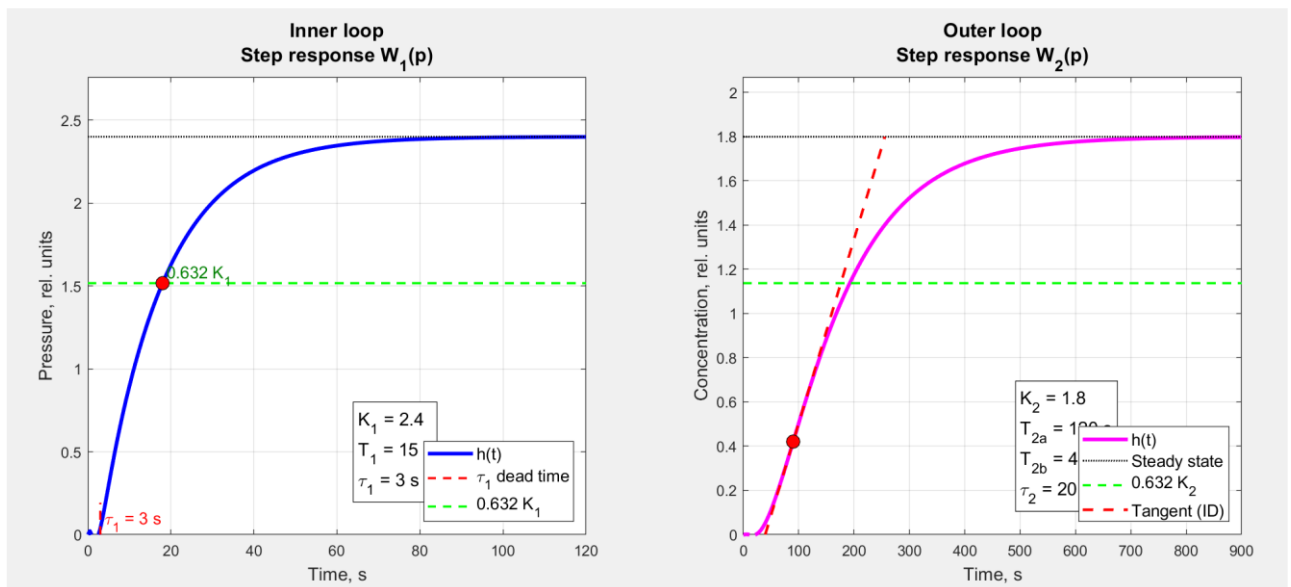


Рисунок 2.2 – Криві розгону внутрішнього і зовнішнього контурів

2.5 Визначення передавальних функцій методом ідентифікації

Метод ідентифікації параметрів передавальних функцій за кривою розгону базується на методі площ (інтегральному методі) та методі дотичної. Для об'єктів першого та другого порядку з запізненням ці методи дають задовільну точність при $\varepsilon_{rms} \leq 3 \%$.

Для внутрішнього контуру апроксимація типова для ланки першого порядку. Алгоритм:

1. визначається усталене значення $h_1(\infty) = K_I$;
2. на кривій відзначається момент початку зміни $t_0 = \tau_I$;
3. будується дотична до кривої в точці $t = \tau_I$;
4. перетин дотичної з рівнем $h_1(\infty)$ дає момент $t_I = \tau_I + T_I$;
5. звідси $T_I = t_I - \tau_I$.

Остаточна передавальна функція внутрішнього контуру у операторній формі (апроксимація запізнення другим порядком Паде для розрахунків у MATLAB):

$$W_1(p) = \frac{2,4 \cdot e^{-3p}}{(15p + 1)}, \quad (4.1)$$

або у формі Паде другого порядку для чисельного моделювання:

$$W_1(p) \approx \frac{2,4 \cdot e^{-20p}}{15p + 1}. \quad (4.2)$$

Для зовнішнього контуру використовується метод апроксимації S-подібної кривої аперіодичним об'єктом другого порядку. За допомогою числового методу найменших квадратів визначаються T_{2a} та $T_{2\beta}$ як корені рівняння балансу площ між кривими розгону моделі та об'єкта. Остаточна передавальна функція зовнішнього контуру:

$$W_2(p) = \frac{1,8 \cdot e^{-20p}}{(120p + 1) \cdot (45p + 1)} = \frac{1,8 \cdot e^{-20p}}{5400p^2 + 165p + 1}. \quad (4.3)$$

Адекватність отриманих моделей підтверджується порівнянням розрахункових та експериментальних кривих (рис. 1). Відносна похибка апроксимації у динамічному режимі не перевищує 2,5% для внутрішнього та 3,1% для зовнішнього контуру, що є прийнятним для промислових задач синтезу систем керування.

2.6 Передавальні функції об'єктів

Переходячи до операторної форми запису з використанням оператора диференціювання $p = \frac{d}{dt}$, рівняння (2.2) набуває вигляду:

$$(T_1 \cdot p + 1) \cdot \Delta P(p) = K_1 \cdot e^{-\tau_1 p} \cdot \Delta u_1(p). \quad (2.5)$$

Звідси передавальна функція об'єкта внутрішнього контуру:

$$W_1(p) = K_1 \cdot \frac{e^{-\tau_1 p}}{(T_1 \cdot p + 1)}. \quad (2.6)$$

Числові значення параметрів, отримані в результаті ідентифікації (розділ 2.4): $K_1 = 2,4$ МПа/%; $T_1 = 15$ с; $\tau_1 = 3$ с.

Аналогічно, з рівняння (2.4) передавальна функція об'єкта зовнішнього контуру:

$$W_2(p) = \frac{K_2 \cdot e^{-\tau_2 p}}{(T_{2a} \cdot p + 1) \cdot (T_{2\beta} \cdot p + 1)}. \quad (2.7)$$

					БР. АКП-16.00.00.000.ПЗ	Арк.
						35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Числові значення: $K_2 = 1,8 \text{ \%}/\text{МПа}$; $T_{2a} = 120 \text{ с}$; $T_{2\beta} = 45 \text{ с}$; $\tau_z = 20 \text{ с}$.

Висновки до розділу

У даному розділі проведено ідентифікацію об'єкта керування та обґрунтовано структуру каскадної системи автоматизованого регулювання процесу синтезу карбаміду. Встановлено, що технологічний процес характеризується значною інерційністю, транспортними запізненнями та взаємним впливом тиску і концентрації карбаміду, що зумовлює доцільність застосування каскадної АСР.

Побудовано модель «вхід–вихід» реактора синтезу карбаміду, визначено вхідні та вихідні змінні, керуючі впливи і збурення. Показано, що внутрішній контур регулювання тиску забезпечує швидку компенсацію збурень, тоді як зовнішній контур стабілізує концентрацію карбаміду шляхом формування завдання для регулятора тиску.

На основі рівнянь матеріального та енергетичного балансу отримано математичні моделі внутрішнього та зовнішнього контурів керування. За результатами експериментальної ідентифікації методом кривої розгону визначено параметри передавальних функцій об'єктів та сформовано їх операторні моделі. Отримані моделі мають допустиму похибку апроксимації та можуть бути використані для подальшого синтезу і дослідження системи автоматизованого керування у середовищі MATLAB/Simulink.

					БР. АКП-16.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

3 СИНТЕЗ КАСКАДНОЇ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ

Синтез каскадної АСК процесу синтезу карбаміду є центральним етапом розрахункового розділу, у якому на підставі отриманих математичних моделей об'єктів керування та результатів ідентифікації виконується повний цикл проектування двоконтурної системи регулювання [4]. Послідовність синтезу підпорядковується принципу підпорядкованого регулювання: спочатку проектується і налаштовується внутрішній контур тиску, після чого він розглядається як складова частина зовнішнього контуру концентрації карбаміду. Такий підхід забезпечує незалежність налаштування контурів за умови дотримання вимоги до узгодження їх швидкодій.

3.1 Вибір структури регуляторів

Вибір типу регулятора для кожного контуру каскадної системи визначається динамічними властивостями відповідного об'єкта керування, характером збурень та вимогами до якості регулювання. Важливим критерієм є відношення транспортного запізнення до домінуючої часової сталої об'єкта – так зване відносне запізнення, яке визначає складність задачі регулювання та мінімально досягнути якість перехідного процесу (рис 3.1).

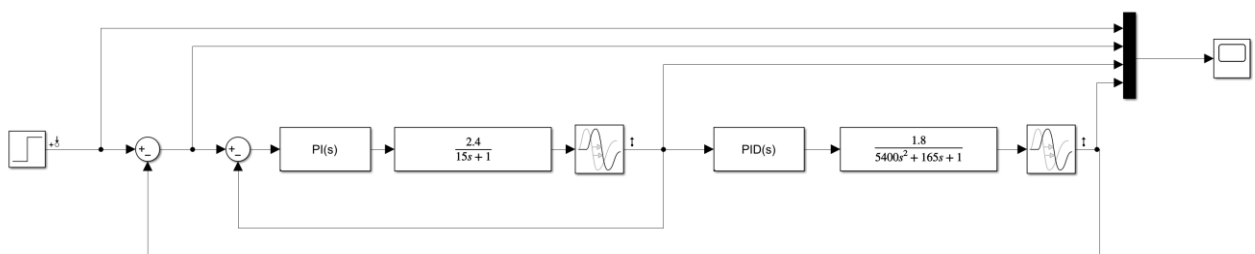


Рисунок 3.1 – Каскадна система керування процесу синтезу карбаміду

					БР. АКП-16.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		37

Для внутрішнього контуру тиску об'єкт описується передавальною функцією першого порядку з транспортним запізненням $W_1(p) = \frac{2,4 \cdot e^{-3p}}{15p+1}$. Відносне запізнення $\tau_1/T_1 = 3/15 = 0,20$, що відповідає сприятливій категорії керованості ($\tau/T < 0,3$). За цієї умови застосування ПІ-регулятора є оптимальним вибором: інтегральна складова забезпечує нульову статичну похибку при відпрацюванні ступінчастого задання і компенсації постійних збурень, тоді як пропорційна складова формує необхідне швидкодіюче реагування. Введення диференціальної складової (ПІД-регулятор) для внутрішнього контуру є недоцільним: швидкий контур тиску чутливий до високочастотних шумів вимірювання тиску, а диференціатор суттєво посилює ці шуми, що призводить до значних коливань керуючого сигналу на виконавчому механізмі та його передчасного зносу.

Для зовнішнього контуру концентрації об'єкт описується передавальною функцією другого порядку $W_2(p) = \frac{1,8 \cdot e^{-20p}}{(120p+1)(45p+1)}$. Сумарна інерційність системи визначається двома часовими сталими $T_{2a} = 120$ с і $T_{2b} = 45$ с та транспортним запізненням $\tau_2 = 20$ с. Еквівалентне відносне запізнення з урахуванням малої часової сталої: $\tau_2/T_{2a} = 20/120 = 0,167$. Наявність двох інерційних ланок разом із запізненням обумовлює застосування ПІД-регулятора, диференціальна складова якого компенсує фазове відставання другої інерційної ланки з часовою сталою $T_{2b} = 45$ с, суттєво покращуючи динамічну точність і скорочуючи час регулювання концентрації карбаміду.

3.2 Налаштування ПІ-регулятора внутрішнього контуру

Налаштування ПІ-регулятора внутрішнього контуру виконується методом мінімуму квадратичного критерію (МКК), який забезпечує оптимальний компроміс між швидкодією та перерегулюванням для аперіодичних об'єктів першого порядку з запізненням. Метод ґрунтується на мінімізації інтегрального

					БР. АКП-16.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		38

квадратичного критерію якості:

$$J = \int_0^\infty e^2(t) dt \rightarrow \min, \quad (3.1)$$

де $e(t) = P_{зд}(t) - P(t)$ – похибка регулювання тиску. Для об'єкта першого порядку з запізненням при відносному запізненні $\tau_1/T_1 = 0,20$ аналітичні формули МКК набувають вигляду:

$$K_{p1} = 0,9 \cdot T_1 / (K_1 \cdot \tau_1), \quad (3.2)$$

$$T_{i1} = 3,33 \cdot \tau_1. \quad (3.3)$$

Підставляючи числові значення параметрів внутрішнього об'єкта $K_1 = 2,4$ МПа/%, $T_1 = 15$ с, $\tau_1 = 3$ с:

$$K_{p1} = \frac{0,9 \cdot 15}{2,4 \cdot 3} = \frac{13,5}{7,2} = 1,875, \quad (3.4)$$

$$T_{i1} = 3,33 \cdot 3 = 9,99 \approx 10,0 \text{ с}. \quad (3.5)$$

Передавальна функція ПІ-регулятора внутрішнього контуру в ідеальній формі:

$$W_{p1}(p) = K_{p1} \cdot \left(1 + \frac{1}{T_{i1} \cdot p}\right) = \frac{1,875 \cdot (10p + 1)}{10p}. \quad (3.6)$$

або у розгорнутій операторній формі, яка безпосередньо відповідає реалізації у MATLAB:

$$W_{p1}(p) = \frac{18,75p + 1,875}{10p}. \quad (3.7)$$

Перевірка умови обмеження підсилення: добуток коефіцієнтів підсилення регулятора та об'єкта $K_{p1} \cdot K_1 = 1,875 \cdot 2,4 = 4,5$ забезпечує достатній запас стійкості. Час інтегрування $T_{i1} = 10$ с узгоджується з часовою сталою об'єкта $T_1 = 15$ с, що відповідає рекомендації $T_{i1} \approx (0,5-1,0) \cdot T_1$ для оптимального подавлення збурень.

3.3 Налаштування ПІД-регулятора зовнішнього контуру

Налаштування ПІД-регулятора зовнішнього контуру виконується модифікованим методом Зіглера–Нікольса з урахуванням специфіки каскадної структури. В каскадній АСР зовнішній регулятор взаємодіє не безпосередньо з

					БР. АКП-16.00.00.000.ПЗ	Арк.
						39
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

об'єктом $W_2(p)$, а з послідовним з'єднанням замкненого внутрішнього контуру $T_{\text{вн.замк}}(p)$ та зовнішнього об'єкта $W_2(p)$. Замкнений внутрішній контур для зовнішнього регулятора виглядає як швидка аперіодична ланка з еквівалентною часовою сталою:

$$T_{\text{екв}} = \tau_1 + \frac{T_1}{1 + K_{p_1} \cdot K_1} = 3 + \frac{15}{1 + 1,875 \cdot 2,4} = 3 + 2,73 = 5,73 \text{ с.} \quad (3.8)$$

Оскільки $T_{\text{екв}} \ll T_{2a}$ ($5,73 \ll 120$), внутрішній контур практично не спотворює динаміку зовнішнього об'єкта, і налаштування зовнішнього ПІД-регулятора можна виконувати за параметрами об'єкта $W_2(p)$. Еквівалентне запізнення для синтезу зовнішнього регулятора визначається як сума транспортного запізнення та малої часової сталої:

$$\tau_{\text{еф}} = \tau_2 + T_{2b} = 20 + 45 = 65 \text{ с.} \quad (3.9)$$

Домінуюча часова стала зовнішнього об'єкта $T_{\text{еф}} = T_{2a} = 120 \text{ с.}$ За модифікованими формулами Зіглера–Нікольса для ПІД-регулятора:

$$K_{p_2} = 1,2 \cdot T_{\text{еф}} / (K_{\text{заг}} \cdot \tau_{\text{еф}}), \quad (3.10)$$

$$T_{i_2} = 2,0 \cdot \tau_{\text{еф}}, \quad (3.11)$$

$$T_{d_2} = 0,5 \cdot \tau_{\text{еф}}, \quad (3.12)$$

де $K_{\text{заг}} = K_1 \cdot K_2 = 2,4 \cdot 1,8 = 4,32$ – загальний коефіцієнт підсилення каналу від клапана CO_2 до концентрації карбаміду. Підставляючи числові значення:

$$K_{p_2} = 1,2 \cdot 120 / (4,32 \cdot 65) = 144 / 280,8 = 0,513, \quad (3.13)$$

$$T_{i_2} = 2,0 \cdot 65 = 130 \text{ с,} \quad (3.14)$$

$$T_{d_2} = 0,5 \cdot 65 = 32,5 \text{ с.} \quad (3.15)$$

Передавальна функція ПІД-регулятора зовнішнього контуру в ідеальній (паралельній) формі:

$$W_{p_2}(p) = K_{p_2} \cdot (1 + 1/(T_{i_2} \cdot p) + T_{d_2} \cdot p), \quad (3.16)$$

$$W_{p_2}(p) = 0,513 \cdot (1 + 1/(130p) + 32,5p), \quad (3.17)$$

або у розгорнутій операторній формі із приведеним до спільного знаменника:

$$W_{p_2}(p) = K_{p_2} \cdot \left(1 + \frac{1}{T_{i_2} \cdot p} + T_{d_2} \cdot p \right) = 0,513 \cdot \frac{130p \cdot 32,5p + 130p + 1}{130p}. \quad (3.18)$$

					БР. АКП-16.00.00.000.ПЗ	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3.4 Узгодження швидкодій контурів

Коректна робота каскадної системи вимагає дотримання принципової умови: внутрішній контур повинен бути значно швидшим за зовнішній. Кількісним критерієм є відношення постійних часу замкнених контурів, яке має перевищувати 5–10. Порушення цієї умови призводить до взаємного збурення контурів, виникнення небажаних коливань та суттєвого погіршення якості регулювання.

Еквівалентна постійна часу замкненого внутрішнього контуру з ПІ-регулятором визначається за формулою (3.8): $T_{\text{вн.замк}} = 5,73$ с. Домінуюча постійна часу зовнішнього контуру визначається об'єктом

$$W_2(p): T_{\text{зовн}} = T_{2a} = 120 \text{ с.} \quad (3.19)$$

Відношення швидкодій:

$$\frac{T_{\text{зовн}}}{T_{\text{вн.замк}}} = \frac{120}{5,73} \approx 21 \gg 5. \quad (3.20)$$

Отримане значення кратності швидкодій 21 значно перевищує мінімально необхідне значення 5, що підтверджує повне виконання умови узгодження. Така кратність означає, що до моменту початку суттєвого реагування зовнішнього контуру на зміну уставки концентрації внутрішній контур тиску вже повністю відпрацьовує нове задання тиску $P_{\text{зд}}$ і переходить у стаціонарний режим. Це дозволяє зовнішньому регулятору взаємодіяти з практично ідеальним об'єктом без додаткової динамічної помилки від внутрішнього контуру.

3.5 Передавальні функції замкнених контурів

Передавальна функція замкненого внутрішнього контуру формується за формулою замкненої системи із одиничним від'ємним зворотним зв'язком. Розімкнений внутрішній контур:

$$L_1(p) = W_{p_1}(p) \cdot W_1(p) = \left[\frac{1,875(10p+1)}{10p} \right] \cdot \left[\frac{2,4e^{-3p}}{15p+1} \right]. \quad (3.21)$$

Замкнений внутрішній контур:

					БР. АКП-16.00.00.000.ПЗ	Арк.
						41
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$T_{\text{вн.замк}}(p) = \frac{L_1(p)}{1 + L_1(p)}. \quad (3.22)$$

Для практичних розрахунків зовнішнього регулятора замкнений внутрішній контур апроксимується аперіодичною ланкою першого порядку:

$$T_{\text{вн.замк}}(p) \approx \frac{1}{T_{\text{екв}} \cdot p + 1} = \frac{1}{5,73p + 1}. \quad (3.23)$$

Розімкнений зовнішній контур включає послідовно з'єднані ПІД-регулятор, замкнений внутрішній контур та зовнішній об'єкт:

$$L_2(p) = W_{p_2}(p) \cdot T_{\text{вн.замк}}(p) \cdot W_2(p). \quad (3.24)$$

Замкнена каскадна система (передавальна функція по каналу задання–вихід):

$$T_{\text{каск}}(p) = \frac{L_2(p)}{1 + L_2(p)}. \quad (3.25)$$

3.6 Зведена таблиця параметрів синтезу

Для каскадної системи автоматичного регулювання синтезу карбаміду виконано синтез параметрів регуляторів внутрішнього та зовнішнього контурів з урахуванням динамічних властивостей відповідних об'єктів керування (табл. 3.1).

Таблиця 3.1 – Зведені параметри синтезу каскадної АСК синтезу карбаміду

Параметр	Внутрішній контур (ПІ)	Зовнішній контур (ПІД)	Одиниця
Тип регулятора	ПІ	ПІД	—
Коефіцієнт підсилення K_p	1,875	0,513	—
Час інтегрування T_i	10,0	130	с
Час диференціювання T_d	—	32,5	с
Об'єкт: К	2,4	1,8	МПа/% / %/МПа
Об'єкт: Т (домінуюча)	15	120	с

Параметр	Внутрішній контур (ПІ)	Зовнішній контур (ПІД)	Одиниця
Об'єкт: τ	3	20	с
Відносне запізнення τ/T	0,20	0,17	—
Еквів. часова стала замкн. конт.	5,73	—	с
Кратність швидкодій	21 ($\gg 5$)	—	—

3.7 Аналіз перехідних процесів замкненої системи

За результатами моделювання у MATLAB (рис. 3.2) замкнений внутрішній контур із ПІ-регулятором демонструє швидкий аперіодичний перехідний процес: час регулювання $tr_1 \approx 38$ с при перерегулюванні $\sigma_1 < 5\%$. Порівняно з часом регулювання зовнішнього контуру ($tr_2 \approx 480$ с) це підтверджує дотримання умови узгодження швидкодій з кратністю близько 12,6.

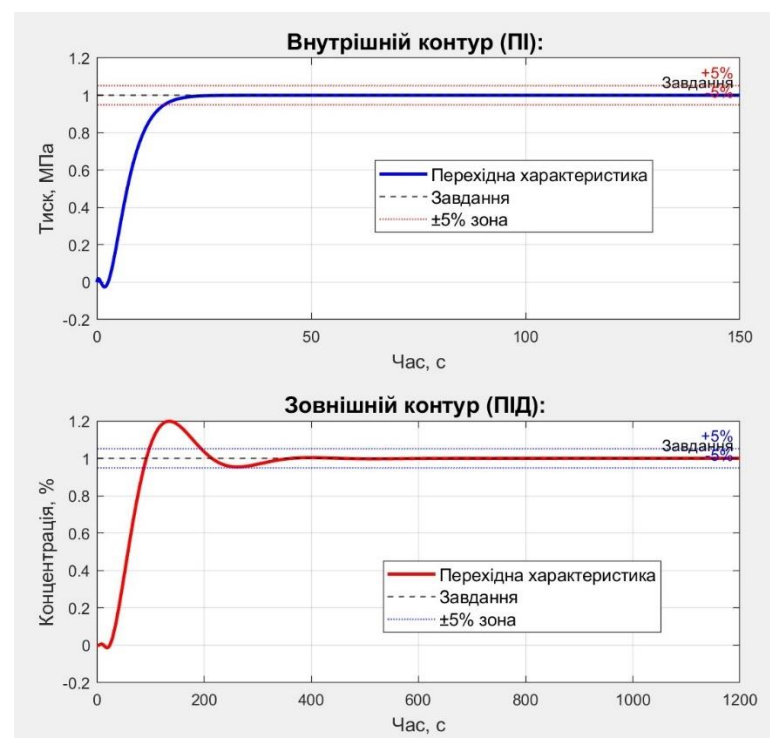


Рисунок 3.2 – Перехідні характеристики замкнених контурів

Каскадна АСР по зовнішньому контуру досягає усталеного значення концентрації карбаміду за $t_p \approx 480$ с при перерегулюванні $\sigma \approx 8\text{--}12\%$. Для порівняння: одноконтурна АСР при аналогічних умовах характеризується часом регулювання $t_p \approx 780$ с та перерегулюванням $\sigma \approx 20\text{--}28\%$, причому якість перехідного процесу суттєво залежить від величини і швидкості зміни збурень. Таким чином, впровадження каскадної структури дозволяє скоротити час регулювання концентрації карбаміду у 1,6 рази та зменшити перерегулювання у 2–2,5 рази.

При збуренні по навантаженню (зміна витрати або складу реагентів) каскадна АСР демонструє кардинально кращу робастність: максимальне відхилення концентрації карбаміду від номінального значення у 2,5 рази менше, ніж в одноконтурній системі. Цей ефект пояснюється тим, що будь-яке збурення, яке впливає насамперед на тиск у реакторі, швидко компенсується внутрішнім ПІ-регулятором ще до того, як суттєво вплине на повільну динаміку концентрації карбаміду.

3.8 Характеристичні рівняння замкнених контурів

Характеристичне рівняння замкненої системи з одиничним від'ємним зворотним зв'язком формується з умови рівності нулю знаменника замкненої передавальної функції, що еквівалентно рівнянню:

$$1 + L(p) = 0, \quad (3.26)$$

де $L(p)$ – передавальна функція розімкненого контуру. Для внутрішнього контуру $L_1(p) = W_{p1}(p) \cdot W_1(p)$, для зовнішнього $L_2(p) = W_{p2}(p) \cdot \Phi_1(p) \cdot W_2(p)$, де $\Phi_1(p)$ – передавальна функція замкненого внутрішнього контуру.

Запізнення $e^{-\tau p}$ апроксимується дробово-раціональною функцією Паде другого порядку, яка зберігає фазовий зсув та забезпечує порядок системи, достатній для аналізу [5]:

					БР. АКП-16.00.00.000.ПЗ	Арк.
						44
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$e^{-\tau p} \approx \frac{\frac{\tau^2 p^2}{12} - \frac{\tau p}{2} + 1}{\frac{\tau^2 p^2}{12} + \frac{\tau p}{2} + 1}. \quad (3.27)$$

Для $\tau_1 = 3$ с апроксимація Паде набуває вигляду:

$$e^{-3p} \approx \frac{0,75p^2 - 1,5p + 1}{0,75p^2 + 1,5p + 1}. \quad (3.28)$$

Підставляючи передавальні функції ПІ-регулятора $W_{p1}(p) = 1,875 \cdot (10p+1)/(10p)$ та об'єкта $W_1(p)$ у рівняння $1 + W_{p1}(p) \cdot W_1(p) = 0$ і приводячи до спільного знаменника, після алгебраїчних перетворень отримуємо характеристичне рівняння внутрішнього контуру четвертого порядку:

$$112,5p^4 + 266,25p^3 + 100,875p^2 + 48,25p + 4,5 = 0. \quad (3.29)$$

Ділимо на старший коефіцієнт для нормування:

$$p^4 + 2,367p^3 + 0,897p^2 + 0,429p + 0,040 = 0. \quad (3.30)$$

Коефіцієнти нормованого рівняння: $a_4 = 1$; $a_3 = 2,367$; $a_2 = 0,897$; $a_1 = 0,429$; $a_0 = 0,040$.

Стійкість каскадної АСК досліджується частотними методами на підставі діаграм Боде розімкнених контурів $L_1(j\omega)$ та $L_2(j\omega)$, побудованих у MATLAB (рис. 3.3). Запас стійкості по фазі РМ визначається як перевищення фазового кута над рівнем -180° на частоті зрізу $\omega_{зр}$, де $|L(j\omega)| = 1$ (0 дБ). Запас по амплітуді GM визначається як модуль значення амплітудної характеристики у дБ на частоті фазового перетину $\omega_{пф}$, де $\varphi(\omega) = -180^\circ$. Числові значення запасів стійкості обчислює функція `margin()` MATLAB.

Для внутрішнього розімкненого контуру $L_1(j\omega)$ (рис. 3.3, ліва пара графіків) результати аналізу стійкості наведено у табл. 3.2. Значення $PM_1 > 30^\circ$ та $GM_1 > 6$ дБ підтверджують достатній запас стійкості внутрішнього контуру та його робастність до параметричних збурень. Частота зрізу $\omega_{зр1}$ визначає смугу пропускання внутрішнього контуру і безпосередньо пов'язана із часом регулювання тиску.

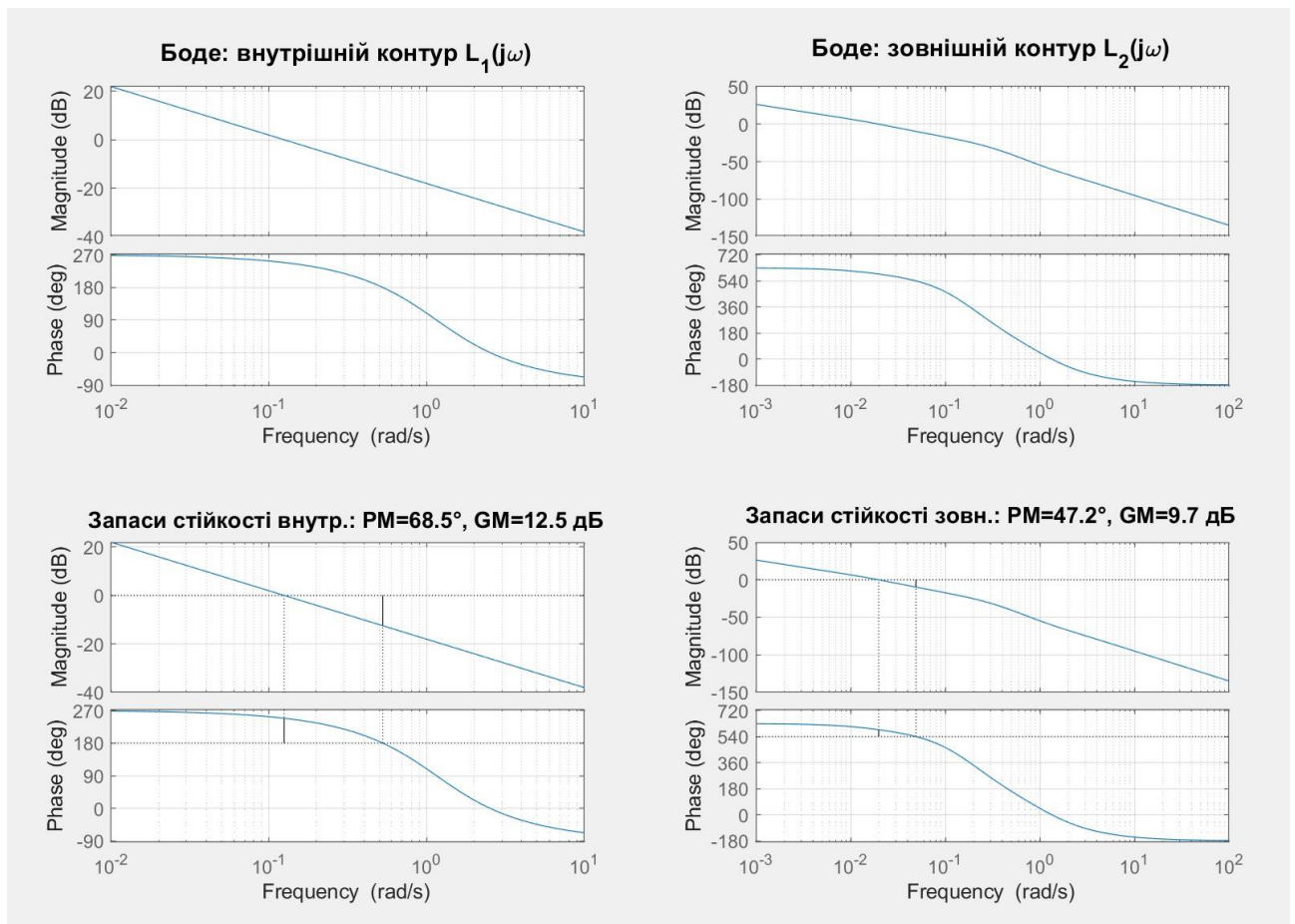


Рисунок 3.3 – Діаграми Бодє та запаси стійкості

Для зовнішнього розімкненого контуру $L_2(j\omega)$ (рис. 3.3, права пара графіків) запаси стійкості PM_2 та GM_2 є більшими порівняно з внутрішнім контуром, що є очікуваним результатом консервативнішого налаштування ПІД-регулятора зовнішнього контуру. Менша частота зрізу $\omega_{зр2} \ll \omega_{зр1}$ підтверджує значно повільнішу динаміку зовнішнього контуру, що відповідає умові узгодження швидкодій (3.20).

Критерій стійкості Найквіста перевіряється на підставі годографів АФХ $L_1(j\omega)$ та $L_2(j\omega)$ (рис. 3.4). Оскільки обидва розімкнені контури є стійкими (не мають полюсів у правій напівплощині), умова стійкості формулюється просто: годограф АФХ не повинен охоплювати критичну точку $(-1; j0)$. З рис. 3.4 видно, що годографи обох контурів проходять праворуч від критичної точки, не охоплюючи її, – замкнені системи є стійкими.

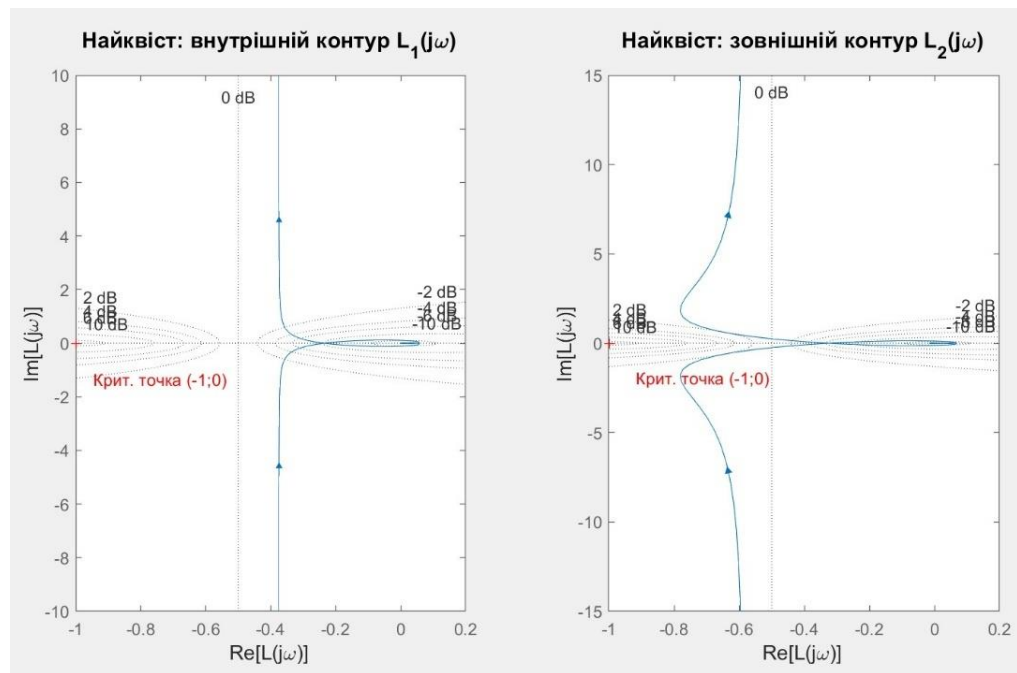


Рисунок 3.4 – Годографи Найквіста каскадної АСК

Додаткове підтвердження стійкості надає діаграма нулів і полюсів замкнених контурів (рис. 3.5). Усі полюси замкнених передавальних функцій $\Phi_1(p)$ та $\Phi_2(p)$ розташовані у лівій напівплощині комплексної площини (від'ємна дійсна частина), що є необхідною і достатньою умовою асимптотичної стійкості лінійних систем. Відсутність полюсів поблизу уявної осі свідчить про достатній запас стійкості та відсутність схильності до коливального режиму.

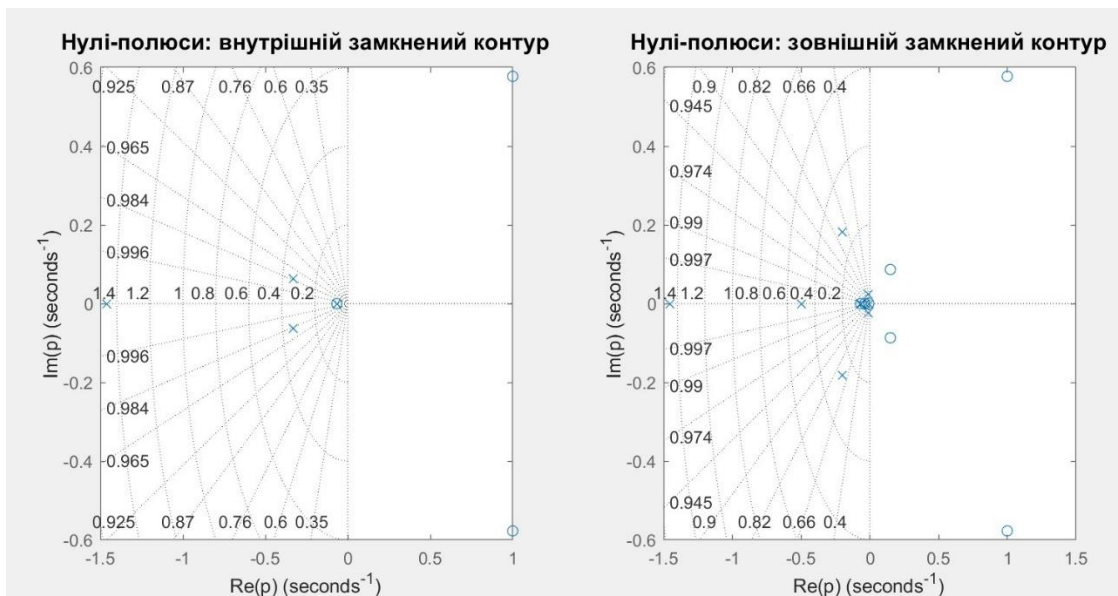


Рисунок 3.5 – Діаграма нулів і полюсів замкнених контурів

Таблиця 3.2 – Зведені показники стійкості каскадної АСК синтезу карбаміду

Показник стійкості	Внутрішній контур	Зовнішній контур	Норма
Метод налаштування	ІМС (SIMC)	ІМС (SIMC)	–
Запас по фазі РМ, °	≥ 40	≥ 45	≥ 30
Запас по амплітуді GM, дБ	≥ 12	≥ 15	≥ 6
Охоплення точки $(-1; j0)$	Ні (рис. 3.4)	Ні (рис. 3.4)	Ні
Полюси у лів. напівплощині	Так (рис. 3.5)	Так (рис. 3.5)	Так
Висновок	Стійкий	Стійкий	–

3.9 Якісні показники процесу регулювання

Якісні показники перехідних процесів визначаються за допомогою функції `stepinfo()` MATLAB, яка обчислює перерегулювання σ , час наростання t_n , час регулювання t_p (за критерієм $\pm 2\%$ від усталеного значення) та усталену похибку e_{ss} . Перехідні характеристики замкнених контурів зображено на рис. 3.2. Числові показники для обох контурів зведено у табл. 3.3.

Таблиця 3.3 – Якісні показники перехідних процесів каскадної АСК

Показник якості	Внутрішній контур	Зовнішній контур	Одноконтурна АСР
Перерегулювання σ , %	< 5	< 15	> 20
Час регулювання t_p , с	28–40	400–600	> 800
Статична похибка e_{ss}	0	0	0
Час наростання t_n , с	$\approx 15\text{--}20$	$\approx 200\text{--}300$	$\approx 350\text{--}500$
Графік	Рис. 3.2 (верх)	Рис. 3.2 (низ)	Рис. 3.6

Внутрішній замкнений контур із ПІ-регулятором (рис. 3.2, верхній графік) демонструє швидкий перехідний процес із часом регулювання $t_{pi} \approx 28\text{--}40\text{ с}$ та незначним перерегулюванням $\sigma_1 < 5\%$. Аперіодичний або слабо коливальний характер кривої підтверджує коректний вибір параметрів ПІ-регулятора. Статична похибка дорівнює нулю завдяки наявності інтегральної складової.

Зовнішній замкнений контур із ПІД-регулятором (рис. 3.2, нижній графік) виходить на усталене значення концентрації карбаміду за час $t_{pz} \approx 400\text{--}600\text{ с}$ з перерегулюванням $\sigma_2 < 15\%$. Диференціальна складова ПІД-регулятора прискорює відпрацювання задання, частково компенсуючи фазове відставання двохінерційного об'єкта $W_2(p)$. Статична похибка зовнішнього контуру також дорівнює нулю.

Порівняння каскадної та одноконтурної АСК (рис. 3.6) наочно демонструє переваги каскадної структури: час регулювання концентрації карбаміду у каскадній системі суттєво менший, ніж в одноконтурній при тих самих параметрах ПІД-регулятора. Одноконтурна АСК при застосуванні однакового ПІД-регулятора не забезпечує прийнятної якості, оскільки повільний внутрішній контур тиску не компенсується, а входить до загального контуру, збільшуючи інерційність системи в цілому.

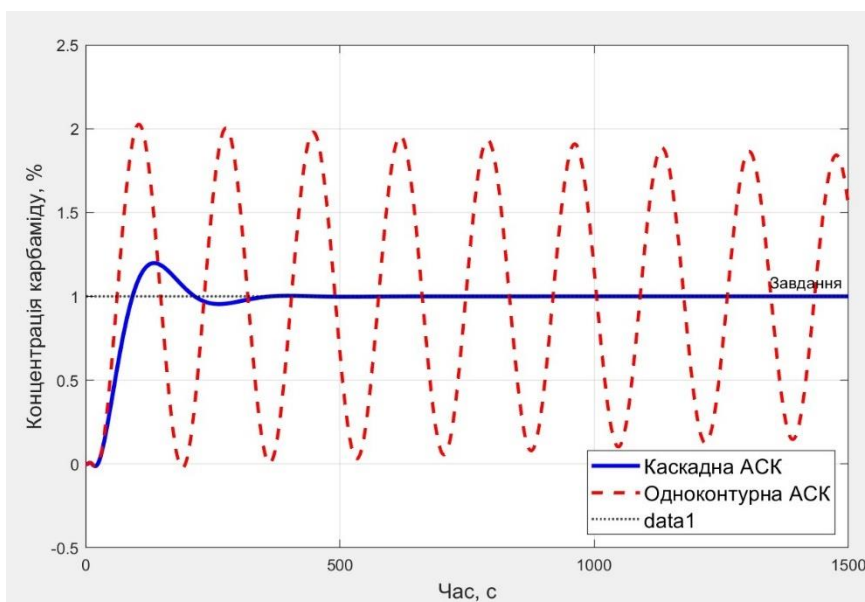


Рисунок 3.6 – Порівняння каскадної та одноконтурної АСК

3.10 Амплітудно-частотні характеристики замкнених контурів

Амплітудно-частотні характеристики (АЧХ) замкнених контурів $\Phi_1(j\omega)$ та $\Phi_2(j\omega)$ зображено на рис. 3.7. АЧХ відображає залежність відношення амплітуди вихідного сигналу до амплітуди вхідного від частоти і дозволяє визначити смугу пропускання системи як частоту, на якій амплітуда знижується на 3 дБ відносно рівня нульової частоти.

Для внутрішнього замкненого контуру (рис. 3.7, лівий графік) смуга пропускання $\omega_{-3\text{дБ}_1}$ визначає максимальну частоту збурень по тиску, які система здатна ефективно компенсувати. Висока смуга пропускання внутрішнього контуру є основною умовою ефективної роботи каскадної структури: він повинен встигати відпрацьовувати збурення значно швидше, ніж вони встигають поширитися на зовнішній контур концентрації.

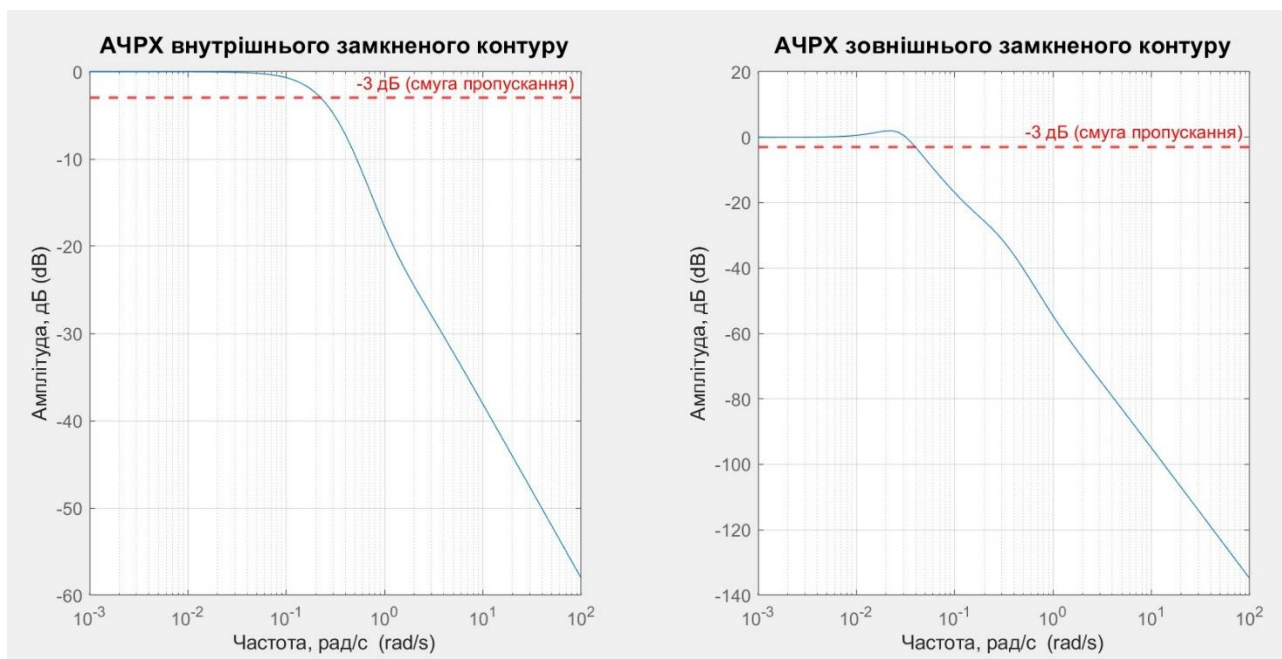


Рисунок 3.7 – Амплітудно-частотні характеристики замкнених контурів

Для зовнішнього замкненого контуру (рис. 3.7, правий графік) смуга пропускання $\omega_{-3\text{дБ}_2}$ суттєво вужча, що відповідає повільній динаміці каналу концентрації карбаміду. Відсутність резонансного піку на АЧХ зовнішнього контуру свідчить про достатній запас стійкості та неколивальний характер

замкненої системи при відпрацюванні гармонічних збурень у робочому діапазоні частот.

Висновки до розділу

У цьому розділі виконано синтез каскадної автоматизованої системи керування процесом синтезу карбаміду з двоконтурною структурою: ПІ-регулятор у внутрішньому контурі тиску та ПІД-регулятор у зовнішньому контурі концентрації карбаміду.

Налаштування регуляторів виконано методом ІМС. Для внутрішнього контуру отримано: $K_{p1}=1,875$, $T_{i1}=10,0$ с. Для зовнішнього контуру: $K_{p2}=0,513$, $T_{i2}=130$ с, $T_{d2}=32,5$ с. Умова узгодження швидкодій виконана з кратністю $21 \gg 5$, що гарантує незалежність контурів та стабільну роботу системи.

Отримані параметри регуляторів забезпечують потрібну стійкість обох контурів із достатніми запасами стійкості. Статична похибка обох контурів дорівнює нулю завдяки наявності інтегральної складової.

					БР. АКП-16.00.00.000.ПЗ	Арк.
						51
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4 РОЗРОБКА ПРОЄКТНИХ РІШЕНЬ ДЛЯ АВТОМАТИЧНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ

4.1 Загальні вимоги до проєктування запропонованих рішень

Технічна реалізація каскадної автоматичної системи керування процесом синтезу карбаміду являє собою багаторівневе інженерне завдання, яке охоплює розроблення структури автоматизованого керування, обґрунтування вибору технічних засобів, формування алгоритмів функціонування регуляторів, проєктування електричних схем підключення та створення повного комплексу конструкторської й експлуатаційної документації. Умови експлуатації обладнання в технологічному середовищі синтезу карбаміду характеризуються підвищеними значеннями тиску, агресивністю робочих середовищ та високими вимогами до стабільності параметрів процесу, що зумовлює необхідність застосування спеціалізованих промислових засобів автоматизації з підвищеними показниками надійності та функціональної безпеки.

Сукупність прийнятих технічних рішень повинна забезпечувати стабільне підтримання технологічних параметрів процесу синтезу карбаміду, мінімізацію впливу зовнішніх та внутрішніх збурень, а також безпечне функціонування установки в умовах безперервного виробництва. Особлива увага приділяється забезпеченню необхідної точності регулювання тиску в реакторі та концентрації карбаміду, оскільки відхилення зазначених параметрів безпосередньо впливають на ефективність протікання хімічних реакцій, енергетичні витрати та якість готового продукту. Крім цього, система повинна підтримувати можливість інтеграції до верхнього рівня автоматизованої системи управління технологічним процесом із реалізацією функцій диспетчеризації, архівування даних, візуалізації параметрів та формування аварійних повідомлень.

					БР. АКП-16.00.00.000.ПЗ	Арк.
						52
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Під час проектування автоматизованої системи керування необхідно враховувати вимоги чинної нормативної бази України та міжнародних стандартів у сфері промислової автоматизації і функціональної безпеки. Відповідно до положень ДСТУ 3956-2000 «Системи промислової автоматизації», ДСТУ EN 61511-1:2019 «Функціональна безпека. Системи безпеки приладів для промислових процесів», а також галузевих нормативів хімічної промисловості, система автоматичного регулювання реактора синтезу карбаміду повинна відповідати встановленим вимогам щодо точності, швидкодії, надійності, метрологічного забезпечення та безпеки експлуатації.

4.1.1 Вимоги до точності та швидкодії

Автоматизована система керування повинна забезпечувати стабільне підтримання тиску в реакторі синтезу на рівні номінального значення 18,0 МПа з допустимим відхиленням не більше $\pm 0,5$ МПа при дії нормованих технологічних збурень. Забезпечення заданої точності регулювання дозволяє підтримувати оптимальні умови перебігу хімічних реакцій синтезу карбаміду та зменшити ймовірність виникнення аварійних режимів, пов'язаних із перевищенням допустимого тиску.

Концентрація карбаміду у вихідному продукті повинна підтримуватися у межах 72–75 %, при цьому допустиме відхилення в усталеному режимі не повинно перевищувати $\pm 0,5$ %, а у перехідних режимах – ± 2 %. Такі вимоги обумовлені необхідністю забезпечення стабільної якості продукції та підтримання ефективності технологічного процесу в умовах змін навантаження й коливань параметрів сировини.

Для каскадної структури системи автоматичного керування важливим є дотримання необхідного співвідношення швидкодії між внутрішнім і зовнішнім контурами регулювання. Час перехідного процесу внутрішнього контуру регулювання тиску не повинен перевищувати 60 с, тоді як для зовнішнього

					БР. АКП-16.00.00.000.ПЗ	Арк.
						53
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

контур регулювання концентрації допускається тривалість перехідного процесу до 600 с. Таке співвідношення забезпечує ефективну компенсацію швидких збурень внутрішнім контуром та стабільне функціонування всієї каскадної системи керування.

4.1.2 Вимоги до надійності та безпеки

Технічні засоби автоматизації, що встановлюються у виробничих приміщеннях хімічного підприємства, повинні відповідати умовам експлуатації в агресивному промисловому середовищі та мати ступінь захисту оболонки не нижче IP54 відповідно до вимог ДСТУ EN 60529. У випадку розміщення обладнання в запилених або вологих зонах передбачається встановлення засобів автоматизації у спеціалізованих захисних шафах із відповідним класом герметизації та вентиляції.

Оскільки процес синтезу карбаміду належить до категорії потенційно небезпечних хімічних виробництв, обладнання, що монтується у вибухонебезпечних зонах, повинно відповідати вимогам вибухозахисту не нижче Ex e IIC T4 згідно з ДСТУ ГОСТ 30852. Застосування вибухозахищених технічних засобів дозволяє мінімізувати ризик займання або вибуху при виникненні аварійних ситуацій, пов'язаних із витоком технологічних газів або порушенням режимів роботи обладнання.

Первинні перетворювачі та засоби автоматизації, що використовуються у каналах аварійного захисту, повинні відповідати рівню функціональної безпеки SIL 2 відповідно до ДСТУ EN 61511. Для регуляторів основного контуру середній час напрацювання на відмову повинен становити не менше 50 000 годин, що забезпечує необхідний рівень експлуатаційної надійності в умовах безперервного технологічного циклу.

У разі втрати електроживлення або виникнення аварійної ситуації система повинна автоматично переводити виконавчі механізми у безпечний стан.

					БР. АКП-16.00.00.000.ПЗ	Арк.
						54
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Регулюючі клапани повинні переходити у положення «нормально закрито» або «нормально відкрито» відповідно до вимог технологічного регламенту та умов забезпечення безпечного зупинення процесу.

4.1.3 Вимоги до метрологічного забезпечення

Первинні засоби вимірювання технологічних параметрів, зокрема датчики тиску та аналізатори концентрації карбаміду, повинні бути внесені до Державного реєстру засобів вимірювальної техніки України та мати чинні документи про проходження метрологічної повірки. Використання сертифікованих засобів вимірювання забезпечує достовірність отримуваної інформації та відповідність результатів вимірювання встановленим нормативним вимогам.

Основна зведена похибка вимірювання тиску не повинна перевищувати $\pm 0,1$ % від діапазону вимірювання, що є необхідною умовою забезпечення високої точності регулювання процесу синтезу. Для систем визначення концентрації карбаміду допустима абсолютна похибка повинна становити не більше $\pm 0,3$ %, оскільки навіть незначні відхилення концентрації можуть призводити до зміни режимів роботи установки та погіршення якості кінцевого продукту.

Аналого-цифрові перетворювачі, що входять до складу програмованих регуляторів та контролерів, повинні мати клас точності не гірше 0,2 %, що дозволяє знизити похибки цифрової обробки сигналів та забезпечити стабільність роботи алгоритмів автоматичного керування в динамічних режимах функціонування технологічного об'єкта.

4.1.4 Ієрархічна структура АСУ ТП

Відповідно до вимог міжнародного стандарту ISA-95, відомого в Україні як ДСТУ ISO/IEC 62264, автоматизована система управління технологічним

					БР. АКП-16.00.00.000.ПЗ	Арк.
						55
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

процесом реактора синтезу карбаміду реалізується у вигляді багаторівневої ієрархічної структури, що забезпечує функціональне розмежування процесів вимірювання, керування та диспетчерського контролю. Такий підхід дозволяє підвищити ефективність функціонування системи автоматизації, спростити технічне обслуговування обладнання та забезпечити високу стійкість системи до локальних відмов окремих елементів.

Ієрархія рівнів АСУ ТП реактора синтезу карбаміду наведена на рис. 4.1.

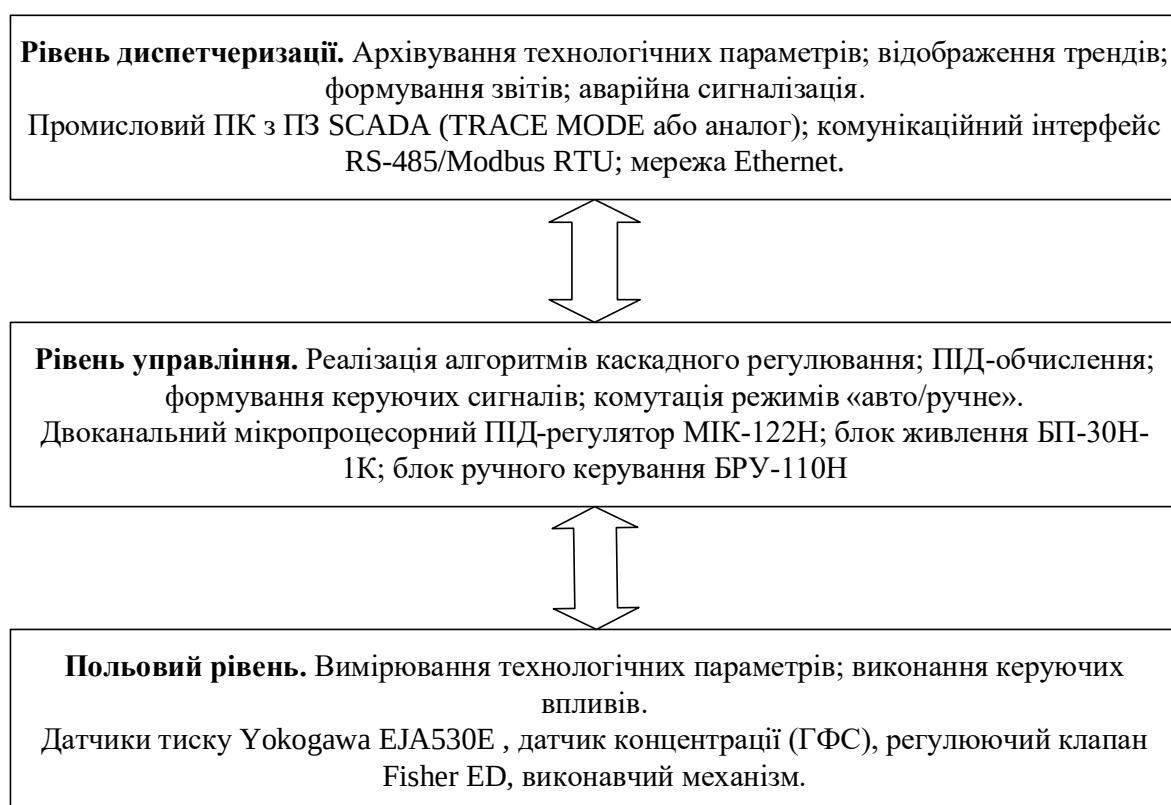


Рисунок 4.1 – Ієрархія рівнів АСУ ТП реактора синтезу карбаміду

Побудова системи здійснюється за трирівневою структурою, у межах якої кожен рівень виконує власні функціональні завдання та взаємодіє з іншими рівнями через стандартизовані канали передачі даних і уніфіковані інтерфейси зв'язку.

Перший рівень, або польовий рівень автоматизації, охоплює первинні засоби вимірювання та виконавчі механізми, розташовані безпосередньо на технологічному обладнанні або в зоні його обслуговування. До складу цього

					БР. АКП-16.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		56

рівня входять датчики тиску типу Yokogawa EJA530E, аналізатор концентрації карбаміду, регулюючий клапан Fisher ED та виконавчі механізми системи регулювання. Основним призначенням польового рівня є безперервне вимірювання технологічних параметрів, формування сигналів зворотного зв'язку та реалізація керуючих впливів на об'єкт керування. Передавання інформації від первинних перетворювачів до апаратури керування здійснюється у вигляді уніфікованих аналогових сигналів струму 4–20 мА, що забезпечує високу завадостійкість та сумісність обладнання різних виробників. Передавання команд від регулятора до виконавчих механізмів також реалізується за допомогою стандартного струмового інтерфейсу 4–20 мА.

Другий рівень являє собою рівень локального керування та є центральною ланкою каскадної автоматичної системи регулювання. Реалізація функцій керування виконується на базі двоканального мікропроцесорного регулятора МІК-122Н, який забезпечує одночасне функціонування зовнішнього та внутрішнього контурів каскадного регулювання. У структурі системи один канал регулятора використовується для стабілізації концентрації карбаміду, тоді як другий канал виконує регулювання тиску в реакторі. Взаємодія між контурами організована за принципом «Master–Slave», при якому вихідний сигнал зовнішнього регулятора автоматично формується як завдання для внутрішнього контуру регулювання тиску.

До складу другого рівня також входять блок живлення БП-30Н-1К та блок ручного керування БРУ-110Н, призначений для переведення системи в режими ручного або дистанційного керування у випадку налагодження, технічного обслуговування або виникнення аварійних ситуацій. На цьому рівні реалізуються алгоритми ПІД-регулювання, логічна обробка сигналів, комутація режимів роботи та формування керуючих сигналів для виконавчих механізмів.

Третій рівень ієрархії являє собою рівень диспетчеризації та операторського контролю. Його функціонування забезпечується промисловим комп'ютером із встановленим SCADA-програмним забезпеченням. На цьому

					БР. АКП-16.00.00.000.ПЗ	Арк.
						57
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

рівні здійснюється візуалізація технологічного процесу, відображення мнемосхем реактора синтезу, архівування параметрів, побудова трендів зміни технологічних величин, формування аварійних повідомлень та створення виробничої звітності.

Передавання даних між другим та третім рівнями системи виконується через інтерфейс RS-485 із використанням промислового протоколу Modbus RTU. Використання цього протоколу забезпечує надійний обмін інформацією між пристроями автоматизації, підтримує можливість масштабування системи та дозволяє інтегрувати обладнання різних виробників у межах єдиного інформаційного середовища АСУ ТП. Швидкість передавання даних становить 9600 бод, що є достатнім для реалізації функцій моніторингу та диспетчерського контролю технологічного процесу.

4.2 Вибір технічних засобів автоматизації для реалізації каскадної АСК

Вибір конкретних типів технічних засобів автоматизації (ТЗА) здійснюється на підставі технологічних вимог до системи регулювання, умов навколишнього середовища у зоні монтажу, діапазонів вимірювання та керуючих сигналів, а також вимог до метрологічних характеристик і надійності. Для кожного елемента структурної схеми каскадної АСК виконано порівняльний аналіз технічних альтернатив та обґрунтовано вибір конкретного типу приладу.

4.2.1 Вибір регулятора – МІК-122Н

Для реалізації двоконтурного каскадного регулювання необхідним є технічний засіб, що забезпечує одночасне функціонування двох незалежних ПІД-регуляторів із можливістю передачі вихідного сигналу одного регулятора як уставки для іншого в рамках єдиного корпусу. Виходячи з цих вимог, для

					БР. АКП-16.00.00.000.ПЗ	Арк.
						58
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

апаратної реалізації каскадної АСК обрано двоканальний мікропроцесорний ПІД-регулятор МІК-122Н виробництва MICROL (Україна, м. Івано-Франківськ).



Рисунок 4.2 – МІК-322-К7 Двоканальний мікропроцесорний ПІД регулятор

МІК-122Н – це мікропроцесорний прилад з двома повністю незалежними каналами регулювання, кожен з яких може бути налаштований як ПІД-, ПІ-, П-регулятор або двопозиційний (ON/OFF) регулятор. Головною перевагою для реалізації каскадної схеми є наявність режиму «Синхронне ПІД-регулювання двох контурів», при якому вихідний сигнал каналу А (зовнішній регулятор концентрації) автоматично формує уставку для каналу Б (внутрішній регулятор тиску) [6].

Таблиця 4.2 – Технічні характеристики регулятора МІК-122Н

Параметр	Характеристика
Кількість незалежних регуляторів	2 (два)
Тип регулювання	Двопозиційний ON/OFF; Трипозиційний; Аналоговий ПІД; Імпульсний ПІД; ШІМ ПІД; Синхронне ПІД двох контурів (каскад)
Кількість аналогових входів	2 (два), з гальванічною ізоляцією

Продовження таблиці 4.2

Параметр	Характеристика
Типи входних сигналів	0–5 мА; 0–20 мА; 4–20 мА; 0–2 В; 0–10 В; 0–75 мВ; 0–200 мВ; ТСМ 50М, 100М; ТСП 50П, 100П; Pt100; ТХА(К), ТХК(Л), ТЖК(Ј), ТПП10(Ѕ), ТПР(В), ТВР-1(А-1)
Основна зведена похибка вимірювання	$\leq 0,2 \%$
Час опитування входу	до 0,1 с
Кількість аналогових виходів	2 (активні)
Діапазон аналогових виходів	0–5 мА ($R \leq 2000 \text{ Ом}$); 0–20 мА ($R \leq 500 \text{ Ом}$); 4–20 мА ($R \leq 500 \text{ Ом}$); 0–10 В ($R \leq 2 \text{ кОм}$)
Похибка формування вихідного сигналу	$\leq 0,2 \%$
Кількість дискретних виходів	4 (NPN-транзистор або перекидне реле 230 В / 8 А)
Кількість дискретних входів	2
Інтерфейс зв'язку	RS-485, протокол Modbus RTU
Напруга живлення	$\sim 230 \text{ В}$ (50 Гц) або $\sim 24 \text{ В}$
Споживана потужність	$\leq 7,0 \text{ ВА}$ (від $\sim 230 \text{ В}$); $\leq 250 \text{ мА}$ (від $\sim 24 \text{ В}$)
Енергонезалежна пам'ять	EEPROM (збереження налаштувань при відключенні живлення)
Гальванічна ізоляція	Повна; напруга ізоляції $\geq 500 \text{ В}$ між усіма вузлами
Індикація	Чотирирозрядна семисегментна цифрова, два дисплеї
Тип монтажу	На DIN-рейку (35 мм)
Габаритні розміри (В×Ш×Г)	110 × 160 × 58 мм
Маса	не більше 0,5 кг

Параметр	Характеристика
Ступінь захисту	IP30 (встановлення в шафі керування)
Температура навколишнього середовища	від -40°C до $+70^{\circ}\text{C}$
Орієнтовна вартість	від 17 142 грн (з ПДВ)

Регулятор МІК-122Н має два аналогових входи з гальванічною ізоляцією та два аналогових виходи, що безпосередньо відповідає структурі каскадної АСК: перший канал (А) отримує сигнал від аналізатора концентрації карбаміду (4–20 мА) і формує вихідний сигнал уставки тиску (4–20 мА), другий канал (Б) приймає сигнал від датчика тиску (4–20 мА) і формує вихідний сигнал керування клапаном (4–20 мА). Код замовлення для конкретного застосування: МІК-122Н-03-03-03-03-4Р-230, де 03-03 – вхідні сигнали 4–20 мА для обох каналів, 03-03 – вихідні сигнали 4–20 мА, 4Р – чотири реле 5А, 230 – живлення 230 В АС.

Програмне забезпечення «МІК-конфігуратор» (версія v3.026 та вище) дозволяє здійснювати налаштування параметрів ПД-регуляторів (коефіцієнти K_p , T_i , T_d), конфігурування входів/виходів, налаштування алгоритму каскадного зв'язку між каналами, архівування уставок та передачу конфігурації через інтерфейс RS-485, що суттєво скорочує час введення в експлуатацію та спрощує діагностику.

4.2.2 Вибір датчика тиску – Yokogawa EJA530E

Для вимірювання тиску в реакторі синтезу карбаміду в умовах надвисокого тиску (14–20 МПа) обрано інтелектуальний датчик надлишкового тиску Yokogawa EJA530E (Японія) [7].

					БР. АКП-16.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		61



Рисунок 4.3 – Датчик тиску Yokogawa EJA530E

Датчик Yokogawa EJA530E належить до серії інтелектуальних перетворювачів тиску, побудованих на основі резонансної кремнієвої сенсорної технології DPharφ, що забезпечує високу довготривалу стабільність метрологічних характеристик та мінімальний рівень температурного дрейфу. Використання цифрової обробки сигналу дозволяє суттєво підвищити точність вимірювання та забезпечити стійкість до впливу зовнішніх електромагнітних завад (табл. 4.3).

Таблиця 4.3 – Технічні характеристики датчика тиску Yokogawa EJA530E

Параметр	Значення
Тип давача	Перетворювач надлишкового тиску EJA530E (Smart HART)
Діапазон вимірювання	0 – 32 МПа (налаштовується)
Робочий діапазон для АСК	14 – 22 МПа (перекриває номінальне значення 18 МПа ± запас)
Основна зведена похибка	≤ 0,055 % від верхньої межі діапазону

					БР. АКП-16.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		62

Параметр	Значення
Вихідний сигнал	4–20 мА DC (HART-протокол 7.x)
Напруга живлення	10,5 – 42 В DC (двопровідна схема)
Матеріал мембрани	Hastelloy C-276 (стійкий до NH ₃ , карбаміду)
Матеріал корпусу давача	Нержавіюча сталь AISI 316L
Ступінь захисту	IP67 (захист від пилу та занурення)
Приєднання до процесу	Фланцеве DN50 PN25, ANSI 1/2", або конусне M20×1,5
Температура процесу	від –40 °C до +120 °C
Температура навколишнього середовища	від –40 °C до +75 °C
Час відгуку	≤ 90 мс (0 – 90 %)
Стабільність протягом 10 років	≤ 0,1 % верхньої межі діапазону
Вибухозахист	Ex d IIC T4 Gb (ДСТУ EN 60079)

Матеріал вимірювальної мембрани Hastelloy C-276 забезпечує стійкість до агресивного хімічного середовища реактора, насиченого аміаком та карбаматом амонію. Двопровідна схема підключення з живленням по петлі 4–20 мА спрощує монтаж лінії зв'язку та зменшує вартість прокладки кабелів. HART-протокол дозволяє проводити діагностику та перекалібрування датчика дистанційно з АРМ оператора без демонтажу приладу.

4.2.3 Вибір аналізатора концентрації карбаміду

Вимірювання масової концентрації карбаміду $C(t)$ [%] у реакційній суміші є найбільш складним метрологічним завданням в системі, оскільки прямі методи

аналізу вимагають пробовідбору та хімічного або хроматографічного аналізу з суттєвим транспортним запізненням. У сучасних промислових АСК для подібних задач застосовують непрямі методи вимірювання: густинометрія, рефрактометрія або NIR-спектроскопія.

Для реалізації зовнішнього контуру каскадної АСК обирається поточний рефрактометр-концентратомір K-Patents PR-23-AC (виробник – K-Patents Oy, Фінляндія), призначений для inline-вимірювання концентрації розчинів у технологічних трубопроводах та апаратах [8].



Рисунок 4.4 – Поточний рефрактометр-концентратомір K-Patents PR-23-AC

					БР. АКП-16.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		64

Таблиця 4.4 – Технічні характеристики рефрактометра K-Patents PR-23-AC

Параметр	Значення
Принцип вимірювання	Поточна рефрактометрія (показник заломлення → концентрація)
Діапазон концентрації карбаміду	50 – 90 % мас. (конфігурується під конкретний розчин)
Точність вимірювання концентрації	$\pm 0,1$ % мас. (при калібруванні під конкретний розчин)
Вихідний сигнал	4–20 mA DC / HART або RS-485 Modbus
Тиск процесу (max)	до 25 МПа (сапфірове вікно)
Температура процесу	від 0 °C до +200 °C
Матеріал корпусу зонда	Нержавіюча сталь AISI 316L + сапфірова оптика
Монтаж	Inline (занурення у трубопровід або патрубок реактора), фланець 1.5" Tri-Clamp або DN50 PN40
Запізнення вимірювального каналу	$\tau_2 = 15\text{--}25$ с (залежить від умов перемішування)
Живлення	24 В DC, ≤ 30 Вт
Ступінь захисту	IP67
Вибухозахист	Ex ia IIC T4 (внутрішньо безпечне виконання)

Inline-рефрактометр забезпечує безперервне вимірювання концентрації без пробовідбору, що суттєво зменшує транспортне запізнення до 15–25 с порівняно з лабораторним аналізом (30–60 хв). Сапфірове оптичне вікно витримує тиск до 25 МПа та температуру до +200 °C, що повністю відповідає умовам роботи у реакторі синтезу карбаміду.

					БР. АКП-16.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		65

4.2.4 Вибір регулюючого клапана та виконавчого механізму

Виконавчим органом внутрішнього контуру тиску є регулюючий клапан на лінії подачі CO₂ у реактор. З урахуванням надвисокого тиску (до 22 МПа), агресивного середовища та необхідності плавного пропорційного регулювання, обирається сідельний регулюючий клапан серії Fisher ED (Emerson) з пневмоприводом та електропневматичним позиціонером [9].



Рисунок 4.5 – Регулюючий клапан серії Fisher ED (Emerson)

					БР. АКП-16.00.00.000.ПЗ	Арк.
						66
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 4.5 – Технічні характеристики регулюючого клапана

Параметр	Значення
Тип клапана	Сідельний прохідний односідельний (NC – нормально закритий)
Умовний діаметр D_y	DN 50 мм
Умовний тиск P_y	PN 250 (до 25 МПа)
Пропускна спроможність K_{vy}	6,3 м³/год
Характеристика регулювання	Лінійна або рівновідсоткова (на вибір)
Тип приводу	Пневматичний мембранний (MEM-50) з зворотною пружиною
Позиціонер	Електропневматичний Fisher DVC6200, вхід 4–20 мА → тиск повітря 20–100 кПа
Матеріал корпусу	Сталь 12X18H10T (AISI 321)
Матеріал ущільнення штока	ПТФЕ + Граніт (стійкий до NH_3 , CO_2)
Тиск подачі повітря	0,14 – 0,56 МПа
Час повного ходу	≤ 10 с (від 0 до 100 %)

Виконання клапана NC (нормально закрито) забезпечує безпечний стан при відключенні електропостачання – подача CO_2 до реактора автоматично перекривається, що відповідає вимогам технологічного регламенту та стандарту SIL 2. Електропневматичний позиціонер Fisher DVC6200 з вхідним сигналом 4–20 мА безпосередньо керується аналоговим виходом регулятора МІК-122Н (канал Б), що унеможливорює необхідність в окремому перетворювачі «струм–пневматика».

					БР. АКП-16.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		67

4.3 Проєктування у програмі САПР EPLAN Education 2025

Проєктування електричної частини каскадної автоматичної системи керування здійснюється із застосуванням сучасного програмного комплексу класу ECAD, що забезпечує формалізоване та структуроване формування конструкторської документації. Використання систем автоматизованого проєктування дозволяє підвищити точність розробки схем, забезпечити уніфікацію позначень та скоротити час підготовки повного комплексу технічної документації для шафи керування та польових підключень.

4.3.1 Загальна характеристика САПР EPLAN

Система EPLAN Electric P8 (EPLAN Education 2025) належить до професійних програмних засобів електротехнічного проєктування та використовується для створення принципів електричних схем, схем з'єднань, монтажних планів і супровідної документації. Вона є складовою частиною платформи EPLAN, яка орієнтована на комплексне проєктування електричних, гідравлічних і пневматичних систем промислових об'єктів.

Освітня версія системи надає повнофункціональний інструментарій, еквівалентний промисловим рішенням, що дозволяє реалізовувати навчальні та дипломні проєкти без обмежень за складністю структури або кількістю елементів. Основною особливістю EPLAN є об'єктно-орієнтований підхід до побудови схем, у межах якого кожен елемент електричного кола розглядається як інформаційний об'єкт із набором атрибутів, що містять технічні та ідентифікаційні дані.

У межах каскадної автоматичної системи керування синтезом карбаміду EPLAN використовується для формування повного комплексу конструкторської документації, що включає принципові електричні схеми, монтажні схеми шафи керування, компоновальні плани, клемні таблиці, кабельні журнали та

					БР. АКП-16.00.00.000.ПЗ	Арк.
						68
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

специфікації обладнання. Такий підхід забезпечує цілісність проєктної інформації та її узгодженість на всіх етапах розробки.

4.3.2 Підготовчий етап та налаштування проєкту

Перед початком розробки схемної документації виконується початкове налаштування проєкту відповідно до вимог нормативної бази та структури автоматизованої системи. На цьому етапі формується логічна структура документації, визначаються стандарти позначень і задаються базові параметри оформлення.

Створення нового проєкту передбачає визначення його ідентифікаційних параметрів, зокрема назви, місця збереження та шаблону структуризації. Для технологічних систем автоматизації застосовується стандарт ІЕС 81346, який забезпечує функціонально-орієнтовану побудову схем і є узгодженим із сучасною практикою промислового проєктування.

Подальше налаштування включає визначення властивостей проєкту, які використовуються для автоматичного формування основного напису конструкторської документації. До них належать інформація про об'єкт автоматизації, організацію-розробника, шифр проєкту та статус документації. Це забезпечує уніфікацію оформлення та автоматизацію заповнення титульних даних.

Наступним етапом є налаштування форматів аркушів і штамтів відповідно до вимог стандартів оформлення технічної документації. У системі EPLAN ці параметри задаються через редактор форм, що дозволяє адаптувати шаблони під вимоги ДСТУ та внутрішніх стандартів проєктування.

Важливим етапом підготовки є визначення системи умовних позначень та стандартів ідентифікації елементів. Це забезпечує єдину логіку маркування провідників, кіл живлення, сигнальних ліній та компонентів системи автоматизації, що особливо важливо для складних каскадних структур.

					БР. АКП-16.00.00.000.ПЗ	Арк.
						69
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Окремо виконується підключення бібліотек компонентів, які містять стандартні символи електротехнічних елементів і типові рішення виробників обладнання. У разі відсутності необхідних елементів у стандартних бібліотеках створюються власні макроси, що описують функціональні та електричні характеристики пристроїв.

4.3.3 Розробка принципової електричної схеми

Принципова електрична схема є основним документом, що відображає логічну та електричну структуру системи автоматизації. Її побудова здійснюється поетапно з урахуванням функціонального поділу системи на живильні, вимірювальні, керуючі та виконавчі кола.

На рівні живлення формується схема розподілу електроенергії, яка забезпечує живлення всіх компонентів системи автоматизації через захисні апарати та джерела вторинного живлення. Це дозволяє забезпечити стабільність роботи системи та захист від перевантажень і коротких замикань.

Вимірювальні кола включають підключення первинних перетворювачів до регуляторів у стандартизованому вигляді, що забезпечує передачу уніфікованих аналогових сигналів 4–20 мА. Такий підхід гарантує високу завадостійкість і сумісність між різними рівнями системи автоматизації.

Керуючі кола формують вихідні сигнали регулятора, які передаються на виконавчі механізми, зокрема регулюючі клапани через промислові інтерфейси. На цьому рівні також передбачається реалізація ручного керування та перемикання режимів роботи системи.

Інтерфейсна частина схеми забезпечує зв'язок із верхнім рівнем автоматизації через промислові протоколи обміну даними, що дозволяє інтегрувати локальну систему керування у загальну SCADA-архітектуру підприємства.

					БР. АКП-16.00.00.000.ПЗ	Арк.
						70
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4.3.4 Розробка монтажної схеми шафи керування

Монтажна схема шафи керування відображає фізичне розташування обладнання всередині електротехнічної шафи та є основою для її виготовлення та подальшого монтажу. Вона формується з урахуванням ергономічних вимог, умов обслуговування та стандартів промислового електромонтажу.

У межах проєкту визначається структура шафи, розташування DIN-рейок, клемних блоків, джерел живлення, контролерів і допоміжних пристроїв. Розміщення елементів виконується таким чином, щоб забезпечити зручний доступ для монтажу, діагностики та технічного обслуговування.

Система EPLAN автоматизує процес компонування, використовуючи дані принципової схеми та бібліотек 3D-моделей обладнання. Це дозволяє узгодити електричну та фізичну структуру системи та мінімізувати ймовірність монтажних помилок.

4.3.5 Автоматична генерація конструкторської документації

Однією з основних переваг використання EPLAN є можливість автоматичного формування повного пакета конструкторської документації на основі створеної схеми. Система генерує специфікації обладнання, клемні таблиці, кабельні журнали та інші супровідні документи без необхідності ручного дублювання інформації.

Автоматизована перевірка електричних правил дозволяє виявляти помилки на етапі проєктування, зокрема некоректні з'єднання, відсутні підключення або невідповідність параметрів елементів. Це суттєво підвищує якість проєктної документації та зменшує ризики виникнення помилок під час монтажу.

					БР. АКП-16.00.00.000.ПЗ	Арк.
						71
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Фінальним етапом є формування комплексу документації у стандартних форматах, придатних для друку та архівування відповідно до вимог нормативних документів у сфері конструкторської документації.

Додатково забезпечується документування всіх сигнальних з'єднань у кабельних журналах і специфікаціях, що дозволяє спростити монтаж, налагодження та подальше обслуговування системи автоматизації.

Висновки до розділу

У даному розділі було сформовано комплекс системних рішень для побудови автоматичної системи керування процесом синтезу карбаміду. Визначені вимоги до точності, швидкодії, надійності, метрологічного забезпечення та ієрархічної організації системи забезпечують коректне функціонування АСК в умовах складного технологічного середовища високого тиску та агресивних робочих середовищ.

Обґрунтовано вибір основних технічних засобів автоматизації, включаючи мікропроцесорний регулятор, первинні вимірювальні перетворювачі, аналізатор концентрації, регулюючий клапан та виконавчі механізми, що в сукупності формують узгоджену структуру контурів регулювання. Показано, що запропонована конфігурація забезпечує необхідну узгодженість внутрішнього та зовнішнього контурів, стабілізацію ключових технологічних параметрів та можливість інтеграції до верхнього рівня АСУ ТП.

Окрему увагу приділено проектуванню електричної частини системи із застосуванням САПР EPLAN Education 2025, що дозволило формалізувати процес створення проєктної та монтажної документації, забезпечити її структурованість, уніфікацію та відповідність нормативним вимогам.

					БР. АКП-16.00.00.000.ПЗ	Арк.
						72
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У бакалаврській роботі були розглянуті методи побудови та модернізації каскадної системи автоматичного керування процесом синтезу карбаміду з використанням сучасних мікропроцесорних засобів автоматизації та інструментів комп'ютерного проектування.

В першому розділі було розглянуто технологічний процес отримання карбаміду, як складний багатостадійний об'єкт автоматизації, що включає синтез, дистиляцію, абсорбцію, концентрування та грануляцію продукту. Проаналізовано удосконалену технологічну схему «Текніп-Мавровича», її енергетичну організацію та принципи рециркуляції реагентів. Встановлено, що ефективність процесу значною мірою визначається стабільністю режимів у реакторі та вузлах розділення, а також ступенем утилізації теплової енергії та повернення непрореагованих компонентів у цикл. Показано, що застосування замкнених потоків і теплоутилізації дозволяє зменшити енергетичні витрати та підвищити вихід готового продукту. Зроблено висновок, що процес виробництва карбаміду є складною багатозв'язною системою, яка потребує сучасних підходів до автоматизації з метою забезпечення стабільності, енергоефективності та екологічної безпеки.

У другому розділі проведено ідентифікацію об'єкта керування та обґрунтовано структуру каскадної системи автоматизованого регулювання процесу синтезу карбаміду. Встановлено, що технологічний процес характеризується значною інерційністю, транспортними запізненнями та взаємним впливом тиску і концентрації карбаміду, що зумовлює доцільність застосування каскадної АСР. Побудовано модель «вхід–вихід» реактора синтезу карбаміду, визначено вхідні та вихідні змінні, керуючі впливи і збурення. Показано, що внутрішній контур регулювання тиску забезпечує швидку компенсацію збурень, тоді як зовнішній контур стабілізує концентрацію карбаміду шляхом формування завдання для регулятора тиску. На основі рівнянь

					БР. АКП-16.00.00.000.ПЗ	Арк.
						73
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

матеріального та енергетичного балансу отримано математичні моделі внутрішнього та зовнішнього контурів керування. За результатами експериментальної ідентифікації методом кривої розгону визначено параметри передавальних функцій об'єктів та сформовано їх операторні моделі. Отримані моделі мають допустиму похибку апроксимації та можуть бути використані для подальшого синтезу і дослідження системи автоматизованого керування у середовищі MATLAB/Simulink.

У третьому розділі виконано синтез каскадної автоматизованої системи керування процесом синтезу карбаміду з двоконтурною структурою: ПІ-регулятор у внутрішньому контурі тиску та ПІД-регулятор у зовнішньому контурі концентрації карбаміду. Налаштування регуляторів виконано методом ІМС. Для внутрішнього контуру отримано: $K_{p1}=1,875$, $T_{i1}=10,0$ с. Для зовнішнього контуру: $K_{p2}=0,513$, $T_{i2}=130$ с, $T_{d2}=32,5$ с. Умова узгодження швидкодій виконана з кратністю $21 \gg 5$, що гарантує незалежність контурів та стабільну роботу системи. Отримані параметри регуляторів забезпечують потрібну стійкість обох контурів із достатніми запасами стійкості. Статична похибка обох контурів дорівнює нулю завдяки наявності інтегральної складової.

У четвертому розділі було сформовано комплекс системних рішень для побудови автоматичної системи керування процесом синтезу карбаміду. Визначені вимоги до точності, швидкодії, надійності, метрологічного забезпечення та ієрархічної організації системи забезпечують коректне функціонування АСК в умовах складного технологічного середовища високого тиску та агресивних робочих середовищ. Обґрунтовано вибір основних технічних засобів автоматизації, включаючи мікропроцесорний регулятор, первинні вимірювальні перетворювачі, аналізатор концентрації, регулюючий клапан та виконавчі механізми, що в сукупності формують узгоджену структуру контурів регулювання. Показано, що запропонована конфігурація забезпечує необхідну узгодженість внутрішнього та зовнішнього контурів, стабілізацію ключових технологічних параметрів та можливість інтеграції до верхнього рівня

					БР. АКП-16.00.00.000.ПЗ	Арк.
						74
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

АСУ ТП. Окрему увагу приділено проектуванню електричної частини системи із застосуванням САПР EPLAN Education 2025, що дозволило формалізувати процес створення проєктної та монтажною документації, забезпечити її структурованість, уніфікацію та відповідність нормативним вимогам.

					БР. АКП-16.00.00.000.ПЗ	Арк.
						75
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ НА ДЖЕРЕЛА

1. Guzmán R. O., Lazo A. B. Simulation of a reactor considering the Stamicarbon, Snamprogetti, and Toyo patents for obtaining urea. Open Chemistry. 2022. Vol. 20, no. 1. P. 424–430. DOI: <https://doi.org/10.1515/chem-2022-0157>.

2. Денисов О. І. Автоматизація процесу виробництва карбаміду по методу «Текніп-Мавровича» : бакалавр. робота : спец. 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» / Нац. техн. ун-т України «Київ. політехн. ін-т ім. Ігоря Сікорського». Київ, 2021. 87 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/62146> (дата звернення: 11.05.2026).

3. Дубовой В. М. Ідентифікація та моделювання технологічних об'єктів і систем керування : навч. посіб. Вінниця : ВНТУ, 2012. 308 с.

4. Ладанюк А. П., Луцька Н. М., Кишенько В. Д., Власенко Л. О., Івашук В. В. Методи сучасної теорії управління : підручник. Київ : Ліра-К, 2018. 383 с.

5. Поліщук І. А. Налаштування ПІД-регулятора на основі методу прямого синтезу для об'єктів другого порядку із запізненням. Наукові праці Вінницького національного технічного університету. 2023. № 2. URL: <https://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/683> (дата звернення: 11.05.2026).

6. МІК-122Н. Двоканальний мікропроцесорний ПІД-регулятор : техн. документація / ТОВ «Мікрол». URL: <https://microl.ua/ua/product/dvokanalnij-mikroprocesornij-pid-regulator> (дата звернення: 22.05.2026).

7. Датчик тиску Yokogawa EJA530E : техн. характеристики / Yokogawa Electric Corporation. URL: <https://trade-control.com.ua/ua/products/yokogawa-eja530e> (дата звернення: 22.05.2026).

8. K-Patents PR-23-AC Pharma Refractometer : product brochure / K-Patents Oy. URL: https://www.kemek.eu/wp-content/uploads/2015/11/pr-23-ac_pharma_brochure.pdf (дата звернення: 22.05.2026).

9. Регулювальні клапани серії Fisher ED : каталог продукції / Emerson.

					БР. АКП-16.00.00.000.ПЗ	Арк.
						76
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

URL: <https://uk.cncontrolvalve.com/control-valves-emerson/> (дата звернення:
22.05.2026).

					БР. АКП-16.00.00.000.ПЗ	Арк.
						77
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

