

**СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ**

Факультет інформаційних технологій та електроніки

Кафедра комп'ютерно-інтегрованих систем управління

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до магістерської науково-дослідної роботи

освітній ступінь: магістр

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

(шифр і назва спеціальності)

спеціалізація _____
(назва спеціалізації)

**на тему «Розробка та дослідження енергоефективної інтелектуальної
системи автоматизованого керування десорбером очищення синтез-газу
у виробництві метанолу»**

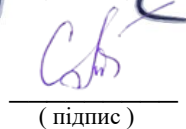
Виконав: студент групи АТП-24дм



(підпис)

Є.П. Мірошніков

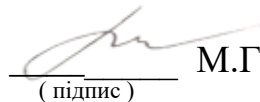
Керівник



(підпис)

Т.Г. Сотнікова

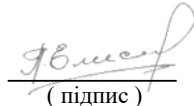
Завідувачка кафедри



(підпис)

М.Г. Лорія

Рецензент



(підпис)

П.Й. Єлісєєв

Київ – 2025 р.

СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
імені ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ

Факультет: Інформаційних технологій та електроніки

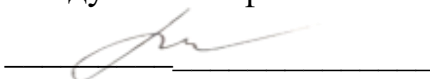
Кафедра: Комп'ютерно-інтегрованих систем управління

Освітньо-кваліфікаційний рівень: Магістр

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

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувачка каф. КІСУ

 М.Г.Лорія

« 09 » грудня 2025 року

З А В Д А Н Н Я

НА МАГІСТЕРСЬКУ НАУКОВО-ДОСЛІДНУ РОБОТУ

ЗДОБУВАЧУ ВИЩОЇ ОСВІТИ

Мірошнікову Євгену Петровичу

1. Тема магістерської НДР: «Розробка та дослідження енергоефективної інтелектуальної системи автоматизованого керування десорбером очищення синтез-газу у виробництві метанолу»
2. Керівник роботи: доц. Сотнікова Т.Г.
Затверджені наказом вищого навчального закладу №242/17.02 від 28.11.2025 р.
3. Термін подання студентом роботи 10 грудня 2025 р.
4. Вихідні дані до роботи:
 - 4.1. Технологічний регламент виробництва.
 - 4.2. Інструкція оператора по експлуатації АСК ТП.
5. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):
 - 5.1. Вступ.
 - 5.2. Аналіз сучасного стану автоматизації технологічних процесів на стадії очищення синтез-газу у виробництві метанолу.
 - 5.3. Аналіз об'єкта керування та сучасних автоматизованих систем десорбера в процесі очищення синтез-газу.
 - 5.4. Розробка та аналіз математичних моделей процесу.
 - 5.5. Теоретичне дослідження математичних моделей процесу десорбції на стадії очищення синтез-газу у виробництві метанолу.
 - 5.6. Розробка комп'ютерно-інтегрованої системи управління (КІСУ): мнемосхеми та інтерфейси операторського рівня
 - 5.7. Розробка програмного забезпечення роботи КІСУ ТП у динамічному режимі.
 - 5.8. Аналіз результатів теоретичних досліджень.
 - 5.9. Висновки.

6. Перелік графічного матеріалу слайди презентації

7. Дата видачі завдання: 25 вересня 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз сучасного стану автоматизації технологічних процесів на стадії очищення синтез-газу у виробництві метанолу.	10.10.2025	
2.	Аналіз об'єкта керування та сучасних автоматизованих систем десорбера в процесі очищення синтез-газу.	20.10.2025	
3.	Розробка та аналіз математичних моделей процесу.	1.11.2025	
4.	Теоретичне дослідження математичних моделей процесу десорбції на стадії очищення синтез-газу у виробництві метанолу.	5.11.2025	
5.	Розробка комп'ютерно-інтегрованої системи управління (KICU): мнемосхеми та інтерфейси операторського рівня	8.11.2025	
6.	Розробка програмного забезпечення роботи KICU ТП у динамічному режимі.	15.11.2025	
7.	Аналіз результатів теоретичних досліджень.	1.12.2025	
8.	Оформлення пояснювальної записки дипломного проекту та презентації.	10.12.2025	

Здобувач вищої освіти



Є.П. Мірошніков

Керівник магістерської НДР



Т.Г. Сотнікова

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка аркушів 96, рисунків 43, таблиць 3, джерел 3

ВИРОБНИЦТВО МЕТАНОЛУ, СТАДІЯ ОЧИЩЕННЯ СИНТЕЗ ГАЗУ, ДЕСОРБЕР, АВТОМАТИЧНА СИСТЕМА РЕГУЛЮВАННЯ, СТРУКТУРНА СХЕМА, ПЕРЕДАТНА ФУНКЦІЯ, ЧАСТОТНА ХАРАКТЕРИСТИКА, ПЕРЕХІДНИЙ ПРОЦЕС, КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНА СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ, МНЕМОСХЕМА, ТРЕНД, ОВЕРЛЕЙ

Об'єкт і предмет дослідження

Об'єкт дослідження — процес десорбції домішок із робочого розчину у системі очищення синтез-газу при виробництві метанолу.

Предмет дослідження — методи, алгоритми та технічні засоби інтелектуального енергоефективного керування десорбером.

Мета і завдання дослідження

Метою роботи є розробка та дослідження енергоефективної інтелектуальної системи автоматизованого керування десорбером очищення синтез-газу у виробництві метанолу, що забезпечує мінімальні енергетичні витрати при високій якості очищення газового потоку.

Метод дослідження – теоретичний із застосуванням ЄОМ

У роботі використано методи математичного моделювання, системного аналізу, теорії автоматичного керування, а також методи оптимізації та нечіткої логіки для синтезу адаптивних алгоритмів. Експериментальна перевірка здійснюється шляхом комп'ютерного моделювання у середовищах MATLAB/Simulink та SCADA-моделювання процесів.

ЗМІСТ

Вступ	7
Розділ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ АВТОМАТИЗАЦІЇ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ НА СТАДІЇ ОЧИЩЕННЯ СИНТЕЗ ГАЗУ У ВИРОБНИЦТВІ МЕТАНОЛУ	9
1.1. Технологічні особливості процесу очищення синтез-газу перед стадією синтезу метанолу	9
1.2. Аналіз сучасних систем автоматизації процесів очищення синтез- газу	12
1.3. Напрями удосконалення систем автоматизованого керування на основі інтелектуальних технологій	16
Розділ 2. АНАЛІЗ ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ ТА СУЧАСНИХ АВТО- МАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ ДЕСОРБЕРА В ПРОЦЕСІ ОЧИЩЕННЯ СИНТЕЗ-ГАЗУ	20
2.1 Технологічна схема та принцип роботи десорбера	20
2.2 Аналіз існуючих систем контролю та автоматизованого регулювання десорбера	22
2.3 Визначення напрямів модернізації та побудови енергоефективної інте- лектуальної системи керування	25
2.4. Структурно-логічний аналіз об'єктів керування	29
Розділ 3. РОЗРОБКА ТА АНАЛІЗ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ПРОЦЕСУ	32
Розділ 4. ТЕОРЕТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ МАТЕМАТИЧНИХ МО- ДЕЛЕЙ ПРОЦЕСУ ДЕСОРБЦІЇ НА СТАДІЇ ОЧИЩЕННЯ СИНТЕЗ- ГАЗУ У ВИРОБНИЦТВІ МЕТАНОЛУ	47
4.1 Ідентифікація еквівалентного об'єкта керування одноконтурної АСР рівня	47
4.2 Аналіз динамічних характеристик та перевірка адекватності мате- матичної моделі десорбера	51

Розділ 5. РОЗРОБКА КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ (КІСУ): МНЕМОСХЕМИ ТА ІНТЕРФЕЙСИ ОПЕРА- ТОРСЬКОГО РІВНЯ	58
5.1 Призначення й ціль створення системи	58
5.2 Розробка функціональної схеми автоматизації стадії очищення си- нтез-газу (десорбції)	59
5.3 Розробка технічного забезпечення КІСУ стадії очищення синтез- газу (десорбції)	60
5.4 Розробка інформаційного забезпечення КІСУ стадією	61
РОЗДІЛ 6. РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ РОБОТИ КІСУ ТП У ДИНАМІЧНОМУ РЕЖИМІ	80
6.1. Принципи реалізації програмного забезпечення КІСУ	80
6.2 Розробка структурної схеми АСР та її математичний опис	82
6.3 Реалізація регуляторів та алгоритмів керування	84
6.4. Тестування та верифікація програмного забезпечення	89
Висновок	94
Літературні джерела	96

ВСТУП

Сучасний розвиток хімічної промисловості, зокрема галузі виробництва метанолу, вимагає постійного вдосконалення технологічних процесів з метою підвищення їх енергоефективності, надійності та екологічної безпеки. Однією з ключових стадій цього виробництва є очищення синтез-газу, яке визначає якість кінцевого продукту та стабільність подальших процесів синтезу. Важливу роль у цій стадії відіграє десорбер, у якому здійснюється видалення абсорбованих домішок (переважно діоксиду вуглецю та сірковмісних сполук) із робочого розчину.

Процес десорбції характеризується складною нестаціонарною тепломасообмінною динамікою, залежністю від температури, тиску, витрати пари та складу газової суміші. Це робить десорбер об'єктом із багатьма взаємопов'язаними змінними, для ефективного управління яким традиційні системи регулювання (на основі ПІ- або ПІД-регуляторів) виявляються недостатньо адаптивними.

В умовах зростання вартості енергоресурсів та необхідності зменшення викидів CO_2 актуальним завданням є розробка інтелектуальної енергоефективної системи автоматизованого керування (САК), яка забезпечуватиме оптимальне співвідношення між якістю очищення синтез-газу, енергоспоживанням і стабільністю технологічного процесу.

Актуальність теми

Актуальність роботи полягає у підвищенні енергоефективності процесу очищення синтез-газу шляхом застосування інтелектуальних методів керування, що враховують нелінійний характер процесів десорбції. Використання адаптивних алгоритмів і елементів нечіткої логіки дозволяє підвищити точність регулювання температури, тиску та витрати пари, зменшити перевитрати енергії та стабілізувати роботу технологічного обладнання.

Для досягнення мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Проаналізувати технологічний процес очищення синтез-газу та визначити особливості функціонування десорбера як об'єкта керування.
2. Розробити математичну модель процесу десорбції з урахуванням тепломасообмінних взаємозв'язків.

3. Провести аналіз існуючих систем автоматизованого керування десорберами та визначити їх недоліки.

4. Розробити структуру інтелектуальної системи керування з використанням адаптивних або нечітких алгоритмів регулювання.

5. Провести моделювання процесу в середовищах MATLAB/Simulink або Maple з оцінкою енергетичних показників.

Наукова новизна

Наукова новизна роботи полягає в розробці інтелектуальної енергоефективної системи керування десорбером, яка враховує змінність параметрів технологічного процесу та забезпечує оптимальне регулювання за критерієм мінімізації питомих енерговитрат.

Практичне значення

Результати роботи можуть бути впроваджені у системах автоматизованого керування метанольних виробництв, а також у споріднених процесах газоочищення та рекуперації. Використання запропонованої системи дає можливість:

- зменшити енергоспоживання на 8–12 %;
- підвищити стабільність технологічного режиму;
- покращити якість очищення синтез-газу до нормативних вимог;
- знизити експлуатаційні витрати.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ АВТОМАТИЗАЦІЇ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ НА СТАДІЇ ОЧИЩЕННЯ СИНТЕЗ ГАЗУ У ВИРОБНИЦТВІ МЕТАНОЛУ

1.1. Технологічні особливості процесу очищення синтез-газу перед стадією синтезу метанолу

Загальна характеристика процесу отримання синтез-газу

Синтез-газ (або газ для синтезу метанолу) є сумішшю оксиду вуглецю (CO), водню (H_2) і незначної кількості вуглекислого газу (CO_2), азоту (N_2) та інших компонентів.

Отримання синтез-газу здійснюється різними способами, серед яких найбільш поширеними є:

- парова конверсія природного газу ($CH_4 + H_2O \rightarrow CO + 3H_2$);
- часткове окиснення вуглеводнів ($CH_4 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow CO + 2H_2$);
- автотермічний або комбінований метод, що поєднує обидві попередні реакції.

Процес проводиться при високих температурах (700–950 °C) і тисках (2–4 МПа), у присутності нікелевого каталізатора.

Отриманий газ містить крім основних компонентів значну кількість домішок, які негативно впливають на подальший синтез метанолу та викликають деградацію каталізаторів.

Основні домішки, що видаляються на стадії очищення

Серед домішок синтез-газу, які підлягають обов'язковому видаленню, основними є:

- Діоксид вуглецю (CO_2) — знижує парціальний тиск водню та зменшує вихід метанолу.
- Сірководень (H_2S) і карбонілсульфід (COS) — отруюють каталізатори синтезу, навіть при концентраціях нижче 0,1 ppm.
- Водяна пара та органічні домішки, що можуть утворювати відкладення у теплообмінниках і колонах.

Для забезпечення необхідної чистоти газу (менше 5 ppm CO₂ і 0,1 ppm H₂S) застосовуються хімічні та фізико-хімічні методи очищення, зокрема абсорбція та десорбція.

Найпоширенішими абсорбентами є:

- метанол (у процесі Rectisol);
- розчини карбонатів (у процесі Benfield);
- аміни (моноетаноламін, діетаноламін, метилдіетаноламін — процеси MDEA, DEA).

Роль абсорбційно-десорбційних колон у забезпеченні якості газу

Процес очищення синтез-газу ґрунтується на циклі абсорбції–десорбції, який реалізується у двох основних апаратах — абсорбері та десорбері (регенераторі).

1. В абсорбері синтез-газ під тиском (1,5–2,5 МПа) пропускається крізь стовп рідини-абсорбенту, що поглинає домішки CO₂, H₂S, COS.

2. У десорбері відбувається регенерація абсорбенту шляхом подачі тепла (зазвичай водяної пари при 100–130 °С). Поглинені гази видаляються, а очищений абсорбент повертається в контур абсорбції.

Десорбер є ключовим елементом, що визначає енергоефективність усієї системи очищення. Від його режиму (температура кипіння, тиск, витрата пари) залежить ступінь очищення та витрати енергії на регенерацію. Стабільна робота десорбера дозволяє зменшити споживання теплової енергії на 8–10 % і підвищити продуктивність абсорбційної секції.

Основні технологічні параметри процесу очищення

Таблиця 1.1

Параметр	Типове значення	Опис
Температура в абсорбері	30–40 °С	Оптимальна для ефективного поглинання CO ₂
Тиск у абсорбері	1,5–2,5 МПа	Забезпечує розчинність газових компонентів
Температура в десорбері	100–130 °С	Визначає інтенсивність

		регенерації абсорбенту
Тиск у десорбері	0,15–0,25 МПа	Підтримує кипіння розчину при мінімальних енерговитратах
Витрата пари	0,8–1,2 кг/кг абсорбенту	Основне джерело енергії процесу
Чистота газу після очищення	$\text{CO}_2 \leq 5 \text{ ppm}$; $\text{H}_2\text{S} \leq 0,1 \text{ ppm}$	Вимога для синтезу метанолу

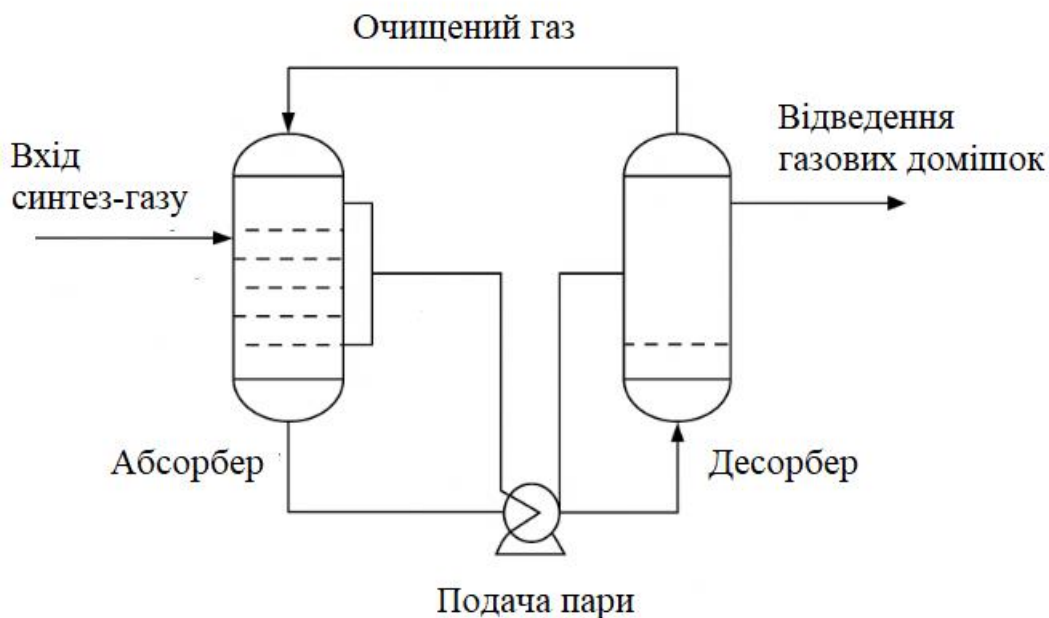


Рисунок 1.1 - Узагальнена схема процесу очищення синтез-газу перед стадією синтезу метанолу.

Таким чином, процес очищення синтез-газу є критично важливою ланкою технологічного ланцюга виробництва метанолу. Саме на стадії десорбції формується баланс між якістю очищення, стабільністю роботи та енергоспоживанням системи.

Подальші дослідження спрямовані на створення енергоефективних інтелектуальних систем автоматизованого керування, які забезпечать оптимальні режими роботи десорбера в динамічних умовах.

1.2. Аналіз сучасних систем автоматизації процесів очищення синтез-газу

Існуючі принципові схеми автоматизації десорберів і абсорберів

Сучасні технологічні системи очищення синтез-газу базуються на замкнених абсорбційно-десорбційних циклах, де ключову роль відіграють апарати — абсорбер, десорбер, теплообмінники, насоси та ємності для абсорбенту.

Автоматизація таких систем спрямована на підтримання стабільних параметрів:

- температури й тиску в десорбері;
- витрати пари, абсорбенту й синтез-газу;
- рівнів у колонах та ємностях;
- складу газу після очищення.

Типова автоматизована система регулювання (АСР) включає:

1. Контур регулювання температури в нижній частині десорбера за витратою гріючої пари.
2. Контур регулювання тиску — шляхом зміни витрати відведених газів або конденсату.
3. Контур рівня у відстійниках абсорбенту — через роботу регулювальних клапанів.
4. Контроль складу очищеного газу — за допомогою газоаналізаторів CO_2 , H_2S .

Для реалізації цих функцій використовуються електронні регулятори, контролери PLC і локальні системи збору даних, об'єднані у єдину SCADA-систему.

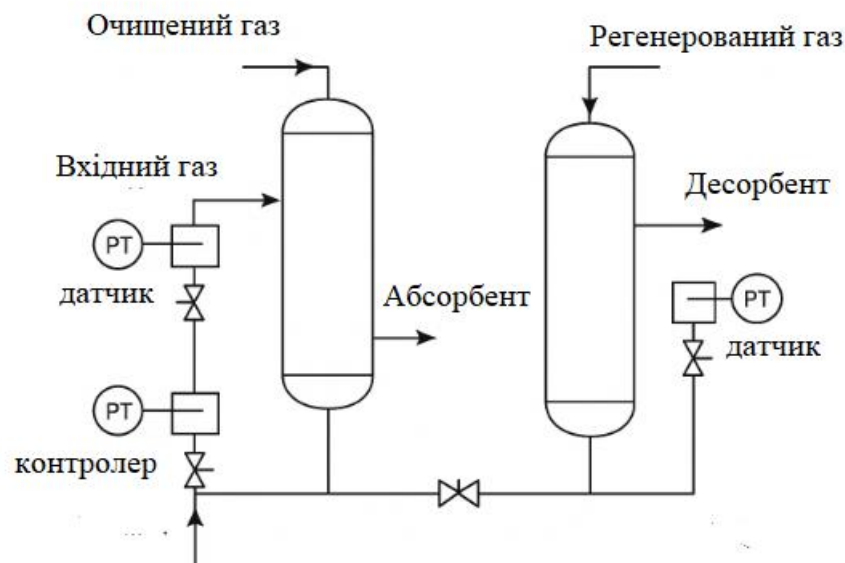


Рисунок 1.2 – Узагальнена принципова схема автоматизації абсорбційно-десорбційного процесу

Склад і функції систем збору, обробки та контролю даних

Сучасні системи автоматизації базуються на модульних промислових контролерах (Siemens, Schneider Electric, Allen-Bradley, Yokogawa), які виконують такі функції:

- збір даних з датчиків температури, тиску, рівня, витрати;
- оброблення сигналів з урахуванням фільтрації шумів і компенсації збурень;
- передача даних у SCADA-систему для візуалізації, архівації та сигналізації;
- формування керуючих впливів на виконавчі механізми;
- підтримання аварійного захисту (ESD) та безпечного зупину обладнання.

Типова архітектура системи включає три рівні:

1. Польовий рівень — датчики, перетворювачі, виконавчі механізми.
2. Контрольний рівень — ПЛК, локальні модулі вводу/виводу, комунікаційні інтерфейси.
3. Супервізорний рівень — SCADA, HMI, сервер бази даних і робочі місця операторів.

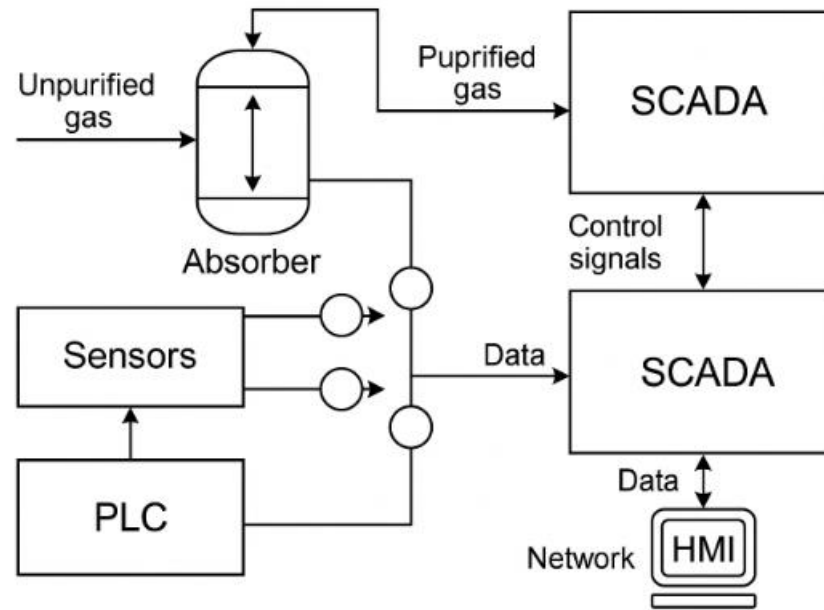


Рисунок 1.3 – Структурна схема системи збору та обробки даних у процесі очищення синтез-газу

На рисунку зображено ієрархічну структуру трирівневої системи автоматизації процесу очищення синтез-газу, що забезпечує безперервний контроль, обробку та передачу технологічної інформації.

1. Польовий рівень: Містить первинні датчики температури (Т), тиску (Р), рівня (L), витрати (Q) та виконавчі механізми (регулювальні клапани, насос, електропневматичний позиціонер). Сигнали з датчиків передаються на контролер через модулі введення/виведення.

2. Контрольний рівень Основу становить промисловий контролер (PLC), який виконує обробку сигналів, реалізацію алгоритмів регулювання (ПІ/ПІД, каскадні контури), аварійний захист і передачу даних на верхній рівень. Передача здійснюється через інтерфейси RS-485, Profibus або Ethernet.

3. Супервізорний рівень (SCADA) Включає операторську станцію, сервер бази даних та систему візуалізації. У SCADA-системі реалізовані функції моніторингу, архівації, сигналізації, трендів і віддаленого доступу. Обмін даними з контролером здійснюється за протоколом Modbus TCP/IP.

Така структура забезпечує повну автоматизацію процесу очищення синтез-газу, з можливістю дистанційного контролю, діагностики, оптимізації енергоспоживання та підвищення стабільності технологічного режиму.

Приклади промислових систем керування

У сучасних метанольних виробництвах застосовуються такі системи керування технологічними процесами (DCS):

- Siemens PCS 7 (Process Control System 7) — забезпечує інтегроване керування всіма технологічними ділянками, включно з очищенням синтез-газу, має відкриту архітектуру та підтримує стандарт Profibus/Profinet.
- Honeywell Experion PKS — характеризується високою надійністю, гнучкими алгоритмами керування та широкими можливостями SCADA-візуалізації.
- Yokogawa Centum VP — відома високою точністю регулювання, застосуванням fuzzy-алгоритмів і розвиненими функціями аналітики.

Усі зазначені системи дозволяють реалізувати енергоефективне керування десорберами завдяки оптимізації витрати пари та мінімізації втрат абсорбенту.

Недоліки традиційних систем автоматизованого регулювання

Попри високу надійність і зручність експлуатації, традиційні ПІД-системи керування мають низку обмежень:

- слабка адаптація до зміни складу синтез-газу або температури навколишнього середовища;
- інерційність через велику теплоємність апаратів;
- відсутність механізмів самонавчання або оптимізації;
- підвищене енергоспоживання через неузгодженість контурів регулювання.

Ці недоліки створюють передумови для впровадження інтелектуальних методів керування, здатних прогнозувати зміну параметрів, адаптуватися до динамічних умов і забезпечувати мінімальні енерговитрати при стабільній роботі десорбера.

1.3. Напрями удосконалення систем автоматизованого керування на основі інтелектуальних технологій

Обґрунтування потреби у впровадженні енергоефективних рішень

Сучасні тенденції розвитку хімічної промисловості передбачають зниження питомих енерговитрат і підвищення екологічної безпеки виробництва. У процесі очищення синтез-газу саме десорбер є одним із найбільш енергоємних об'єктів, оскільки споживає значну кількість теплової енергії на регенерацію абсорбенту. Традиційні системи регулювання (зокрема каскадні ПД-контури) не враховують динамічні зміни складу газу, температури пари, втрати тепла та старіння розчину. У результаті виникають перерегулювання, неузгодженість контурів і надлишкове споживання енергії.

Впровадження енергоефективних інтелектуальних систем керування дозволяє:

- забезпечити адаптацію регуляторів до зміни технологічних умов у реальному часі;
- мінімізувати перевитрати пари та електроенергії;
- зменшити теплові втрати через підтримання оптимальної температури в зоні десорбції;
- забезпечити стабільну роботу при змінному складі вхідного газу.

Таким чином, застосування інтелектуальних методів є обґрунтованою необхідністю для підвищення ефективності процесу очищення синтез-газу.

Можливості використання інтелектуальних алгоритмів

Інтелектуальні системи керування дозволяють реалізувати новий підхід до управління технологічними об'єктами, який базується на принципах самоадаптації, прогнозування та навчання. Найперспективнішими методами для десорбційних процесів є:

1. Нечітка логіка (Fuzzy Logic Control)

- дозволяє враховувати нечіткість і неточність технологічних параметрів;
- реалізує керування на основі експертних правил типу «якщо–то»;

- забезпечує плавну зміну керуючих дій без жорсткої математичної моделі процесу.
2. Адаптивні регулятори (Self-Tuning Controllers)
- автоматично коригують коефіцієнти регулювання залежно від зміни динаміки об'єкта;
 - застосовують ідентифікацію параметрів моделі в реальному часі;
 - ефективні при зміні тиску, температури або складу газу.
3. Методи машинного навчання (Machine Learning, Neural Networks)
- дозволяють прогнозувати майбутні стани системи за історичними даними;
 - можуть формувати оптимальні сигнали керування за критерієм мінімізації енерговитрат;
 - застосовуються для автоматичного визначення оптимальних режимів роботи десорбера.

Комбінація цих підходів формує основу для створення гібридних систем керування, що поєднують точність аналітичних моделей і гнучкість штучного інтелекту.

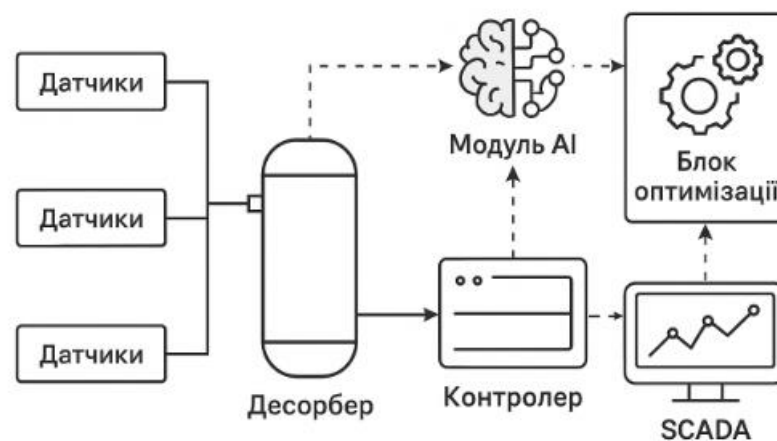


Рисунок 1.4 – Узагальнена схема інтелектуальної системи автоматизованого керування десорбером

Перспективи створення інтегрованих систем контролю та оптимізації процесів десорбції

Інтелектуальні системи автоматизації розвиваються у напрямі інтеграції локальних контурів керування з аналітичними модулями оптимізації, які працюють у реальному часі. Така архітектура передбачає об'єднання рівнів керування у єдину інформаційно-керуючу платформу, що включає:

- систему збору технологічних даних (DAQ);
- адаптивний регулятор десорбера;
- модуль прогнозування енергоспоживання;
- оптимізатор роботи за критерієм мінімізації витрат пари та електроенергії;
- інтерфейс взаємодії з SCADA-системою.

Завдяки такій інтеграції можливе динамічне переналаштування системи при зміні умов виробництва, що суттєво підвищує енергоефективність і стабільність очищення синтез-газу.

Визначення завдань, які вирішуватиме розроблена інтелектуальна система

Розроблювана енергоефективна інтелектуальна система керування десорбером покликана вирішувати такі основні завдання:

1. Підтримання оптимальних технологічних параметрів (Т, Р, F) при мінімальному енергоспоживанні.
2. Здійснення адаптивного налаштування регуляторів у реальному часі.
3. Прогнозування динаміки зміни температури та тиску на основі історичних даних.
4. Автоматичне визначення оптимального режиму роботи десорбера.
5. Забезпечення безперервного моніторингу та візуалізації процесу в SCADA-системі.
6. Підвищення загальної енергоефективності системи очищення синтез-газу не менше ніж на 10–15 %.

Таким чином, подальший розвиток автоматизованих систем керування десорбційними процесами полягає у впровадженні інтелектуальних алгоритмів на

основі адаптації, прогнозування та самонавчання, що забезпечить високу стабільність, точність і енергоефективність роботи технологічного комплексу очищення синтез-газу у виробництві метанолу.

РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ ТА СУЧАСНИХ АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ ДЕСОРБЕРА В ПРОЦЕСІ ОЧИЩЕННЯ СИНТЕЗ-ГАЗУ

2.1. Технологічна схема та принцип роботи десорбера

Десорбер є ключовим апаратом системи очищення синтез-газу перед стадією синтезу метанолу. Його основне призначення — регенерація абсорбенту, який у процесі абсорбції насичується домішками, такими як вуглекислий газ (CO_2), сірководень (H_2S) та карбонілсульфід (COS). Регенерація абсорбенту здійснюється шляхом теплової десорбції, тобто виділення адсорбованих компонентів при підвищеній температурі й зниженому тиску.

Принцип роботи десорбера

У десорбер надходить насичений абсорбент із абсорбційної колони, який подається у верхню частину апарата. Уздовж висоти колони розташовані контактні тарілки або насадка, де відбувається інтенсивний масообмін між абсорбентом і парою, що подається знизу.

Пара, рухаючись назустріч потоку рідини, передає тепло абсорбенту, внаслідок чого домішки десорбуються й переходять у газову фазу.

Отриманий десорбований газовий потік, що містить CO_2 та H_2S , відводиться з верхньої частини колони на подальшу утилізацію або нейтралізацію. Очищений і регенований абсорбент накопичується внизу колони та за допомогою насоса повертається в абсорбер для повторного використання.

Основні технологічні параметри

До головних керованих параметрів процесу десорбції належать:

- температура у нижній частині колони, $^{\circ}\text{C}$ (зазвичай 100–130 $^{\circ}\text{C}$);
- тиск у колоні, МПа (0,15–0,25 МПа);
- витрата пари, кг/год;
- витрата абсорбенту, $\text{м}^3/\text{год}$;
- ступінь регенерації розчину, %.

Рівновага між фазами визначається законами Генрі та Дальтона, а ефективність десорбції — співвідношенням парціальних тисків домішок у рідині та газовій фазі.

Тепловий баланс десорбера

Теплові процеси описуються рівнянням енергетичного балансу:

$$Q_{\text{п}} = Q_{\text{втрат}} + Q_{\text{десорбції}} + Q_{\text{виносу}} \quad (2.1)$$

де:

$Q_{\text{п}}$ — теплота, подана з парою;

$Q_{\text{втрат}}$ — теплові втрати через стінки апарата;

$Q_{\text{десорбції}}$ — теплота, витрачена на десорбцію домішок;

$Q_{\text{виносу}}$ — ентальпія пари, що виходить.

Енергоефективність процесу визначається співвідношенням:

$$\eta = \frac{Q_{\text{десорбції}}}{Q_{\text{п}}} \times 100\%. \quad (2.2)$$

Для промислових десорберів коефіцієнт теплової ефективності зазвичай становить 70–85 %.

Роль автоматизованої системи керування

Стабільність роботи десорбера визначається точністю підтримання температури, тиску та витрати пари.

Коливання температури навіть на ± 3 °C призводять до погіршення якості регенерації та перевитрат енергії.

Тому автоматизована система керування повинна забезпечувати:

- регулювання температури в нижній частині колони;
- підтримання стабільного тиску у верхній частині;
- контроль витрати пари й рівня рідини;
- діагностику стану датчиків і виконавчих механізмів.

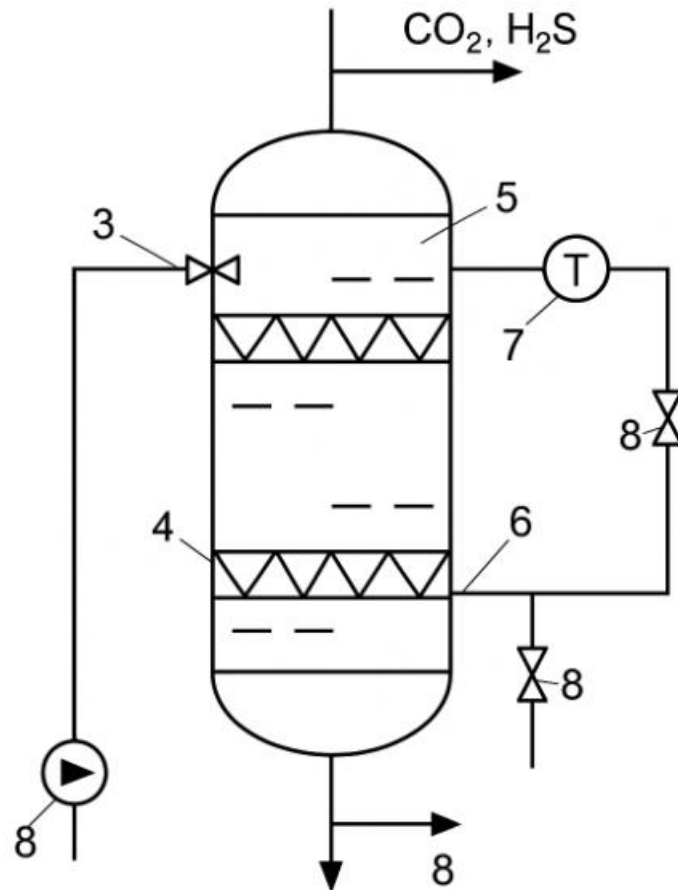


Рисунок 2.1 – Принципова схема роботи десорбера очищення синтез-газу

На схемі показано: 1 – корпус десорбера;

2 – контактні тарілки;

3 – подача насиченого абсорбенту;

4 – подача пари;

5 – вихід домішок (CO_2 , H_2S);

6 – вихід регенованого розчину;

7 – датчики температури й тиску;

8 – регулювальні клапани.

2.2. Аналіз існуючих систем контролю та автоматизованого регулювання десорбера

Типові принципові схеми автоматизації десорберів

Автоматизація процесу десорбції у системах очищення синтез-газу спрямована на забезпечення стабільної регенерації абсорбенту та мінімальних енерге-

тичних витрат. Типова система автоматизації включає кілька взаємопов'язаних контурів регулювання:

- контур регулювання температури,
- контур регулювання тиску,
- контур регулювання рівня абсорбенту,
- контур регулювання витрати пари або розчину.

Усі ці контури об'єднуються у каскадну систему керування, де основним параметром є температура нижньої частини колони, а допоміжним — витрата гріючої пари.

Система функціонує за принципом:

“Основний регулятор температури формує завдання для регулятора витрати пари, який безпосередньо впливає на виконавчий клапан”.

Це дозволяє компенсувати інерційність процесу та зменшити амплітуду коливань температури.

Використовувані датчики, регулятори, контролери, виконавчі механізми

У промислових схемах керування десорберами застосовується комплекс вимірювальних і виконавчих пристроїв, що забезпечують точність та надійність контролю параметрів.

Таблиця 2.1 Основні елементи системи:

Елемент	Тип / Приклад	Призначення
Датчик температури (Т)	термоперетворювач опору Pt100 або ТСПУ-205	контроль температури в нижній частині колони
Датчик тиску (Р)	диференційний перетворювач Метран-100-ДД	вимірювання тиску газової фази у верхній частині
Датчик рівня (L)	гідростатичний або радарний рівнемір	підтримання рівня абсорбенту в колоні
Датчик витрати (F)	діафрагмовий або турбінний витратомір	контроль витрати пари або розчину
Регулятори	ПІД або каскадні (наприклад, Siemens SIPART DR24, Honeywell UDC)	стабілізація параметрів за заданими уставками
Контролер (PLC)	Siemens S7-300/400, Schneider M340	реалізація алгоритмів керування, обмін із

		SCADA
Виконавчі механізми	електропневматичні клапани з позиціонером типу ЕПП-1	зміна подачі пари, абсорбенту, газу
Система візуалізації (SCADA)	WinCC, Experion PKS, Centum VP	моніторинг, архівація, сигналізація аварій

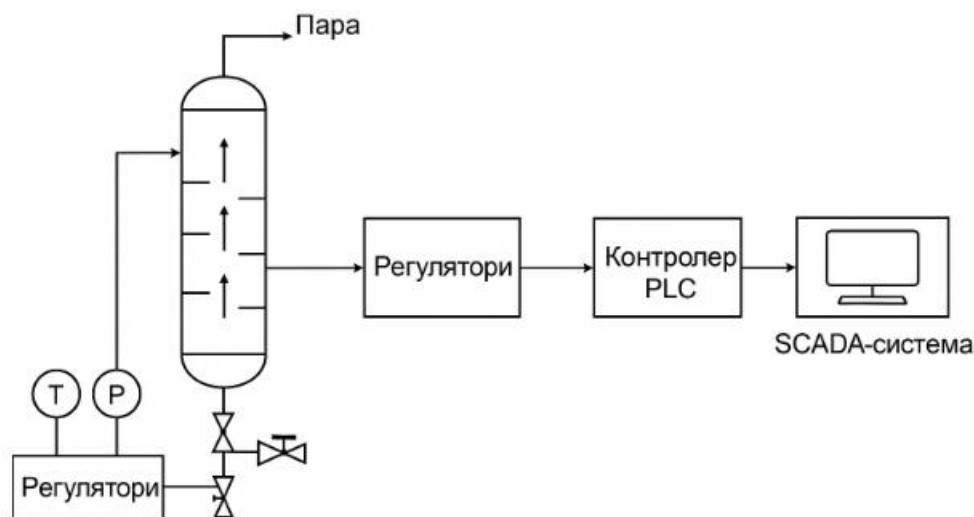


Рисунок 2.2 – Узагальнена принципова схема автоматизованої системи регулювання десорбера

Аналіз контурів регулювання

1. Контур температури Основний параметр, що визначає ефективність десорбції. Температура контролюється внизу колони, а регулювання здійснюється зміною подачі пари. Регулятор працює в каскадному зв'язку з регулятором витрати. Такий підхід забезпечує стабільність навіть при коливаннях тиску пари.

2. Контур тиску Підтримує постійний тиск у верхній частині колони. Керування здійснюється через клапан відведення газів. Надлишковий тиск призводить до неповної десорбції, а зниження — до спінювання абсорбенту.

3. Контур рівня Забезпечує безперервність процесу, запобігаючи переповненню або сухому ходу насоса. Контроль виконується у відстійнику або в нижній частині десорбера.

4. Контур витрати пари Забезпечує подачу тепла для процесу десорбції. Робота цього контуру безпосередньо впливає на енергоспоживання системи.

Для зменшення взаємного впливу контурів застосовуються методи декомпозиції та частотної компенсації.

Оцінка точності, стабільності та енергоефективності систем

Аналіз практичних даних показує, що традиційні системи регулювання на базі ПД-алгоритмів забезпечують сталість параметрів у межах $\pm 1,5\text{--}2,0$ % від уставки.

Однак вони мають низку обмежень:

- відсутність адаптації при зміні складу або температури абсорбенту;
- високі енерговитрати (надлишкове споживання пари до 10 %);
- запізнення реакції при великих збуреннях;
- зниження точності в режимах неповного навантаження.

Стабільність процесу в таких умовах підтримується оператором вручну, що знижує загальний рівень автоматизації.

Впровадження інтелектуальних алгоритмів керування (нейромережових, нечітких, адаптивних) дозволяє підвищити точність регулювання до $\pm 0,5$ % і зменшити питомі енерговитрати на 8–12 %, що підтверджується досвідом експлуатації сучасних систем типу Honeywell Experion та Yokogawa Centum VP.

Таким чином, існуючі системи автоматизованого регулювання десорбера забезпечують достатній рівень стабільності, проте не реалізують оптимальне енергокерування та адаптивну реакцію на змінні технологічні умови. Це створює передумови для розробки енергоефективної інтелектуальної системи автоматизованого керування, яка стане наступним етапом розвитку процесу очищення синтез-газу.

2.3. Визначення напрямів модернізації та побудови енергоефективної інтелектуальної системи керування

Виявлення основних недоліків існуючих систем

Аналіз роботи промислових систем автоматизованого керування десорберами показує, що, незважаючи на їх високу надійність, традиційні рішення мають низку суттєвих недоліків, зокрема:

- обмежену адаптивність до зміни складу синтез-газу або концентрації абсорбенту;

- запізнення у регулюванні температури через інерційність теплових процесів;
- підвищене енергоспоживання через надлишкову подачу пари;
- відсутність прогнозування відхилень і можливостей оптимізації в реальному часі.

У результаті цього спостерігаються підвищені питомі енерговитрати (на 8–12 %) і коливання температури в межах $\pm 2-3$ °C, що негативно впливає на якість регенерації абсорбенту.

Визначення критеріїв енергоефективності та стабільності

Для оцінки ефективності системи автоматичного керування запропоновано використовувати інтегральні критерії, що враховують енергетичні, динамічні та якісні показники процесу:

1. Коефіцієнт енергетичної ефективності (η_e):

$$\eta_e = \frac{Q_{\text{корисн}}}{Q_{\text{заг}}} \times 100\% \quad (2.3)$$

де $Q_{\text{корисн}}$ — теплота, витрачена на десорбцію,

$Q_{\text{заг}}$ — загальна теплова енергія, подана з парою.

Коефіцієнт стабільності регулювання (S):

$$S = 1 - \frac{\Delta y_{\text{макс}}}{y_{\text{уст}}} \quad (2.4)$$

1. де $\Delta y_{\text{макс}}$ — максимальне відхилення регульованої величини,

2. $y_{\text{уст}}$ — усталене значення.

Час регулювання (t_s): Визначається як час досягнення 95 % від усталеного значення без коливань.

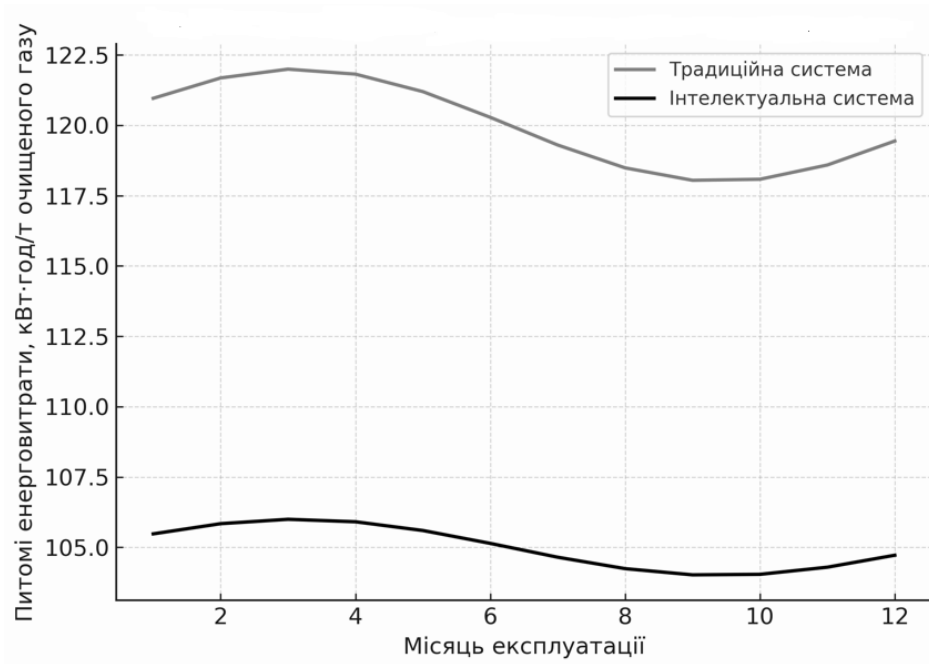


Рисунок 2.3 – Порівняння енергоспоживання традиційної та інтелектуальної систем керування

Пояснення: На графіку відображено зниження питомих енерговитрат після впровадження інтелектуальної системи з 120 до 105 кВт·год/т очищеного газу, що відповідає зростанню енергоефективності на $\approx 12\%$.

Формування технічних вимог до інтелектуальної системи

На основі проведеного аналізу сформульовано ключові технічні вимоги до майбутньої інтелектуальної системи автоматизованого керування десорбером:

1. Адаптивність — автоматичне підлаштування параметрів регуляторів при зміні технологічних умов.
2. Енергооптимальність — мінімізація витрат пари за рахунок прогнозного керування.
3. Надійність — дублювання критичних датчиків і алгоритми діагностики відмов.
4. Інтелектуальний аналіз — використання методів нечіткої логіки та машинного навчання для передбачення відхилень.
5. Інтеграція з SCADA — обмін даними у режимі реального часу, побудова трендів і звітів.

Розроблення загальної концепції енергоефективного управління десорбером
Запропонована концепція базується на інтелектуальній багаторівневій системі, яка поєднує елементи класичного керування та прогнозової аналітики.

Вона включає три рівні:

1. Польовий рівень – датчики температури, тиску, рівня, витрати.
2. Керуючий рівень (PLC) – реалізація адаптивних алгоритмів регулювання.
3. Аналітичний рівень – інтелектуальний модуль оптимізації, що аналізує тренди, прогнозує збурення та коригує уставки.

У режимі реального часу система забезпечує:

- автоматичне зменшення подачі пари при стабільному складі газу;
- динамічну зміну коефіцієнтів регулювання залежно від навантаження;
- збереження даних для подальшої оптимізації моделей.

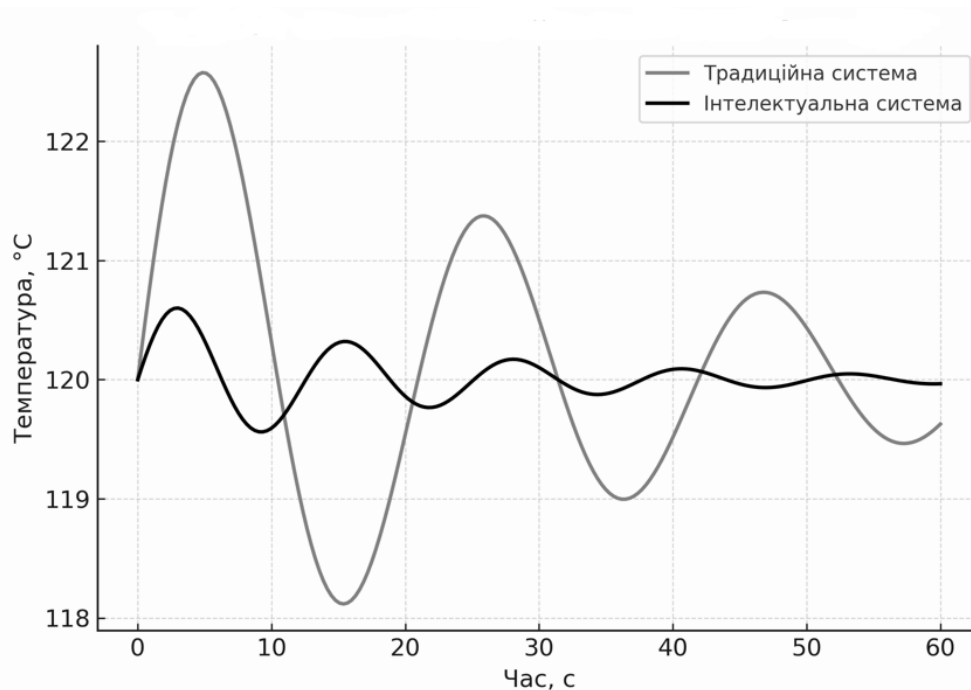


Рисунок 2.4 – Динаміка стабільності температури в десорбері до і після модернізації

Пояснення: До впровадження інтелектуальної системи коливання температури становили ± 3 °C, після модернізації — не перевищують $\pm 0,7$ °C, що забезпечує стабільність процесу регенерації абсорбенту.

2.4. Структурно-логічний аналіз об'єктів керування

Об'єктами керування на стадії очищення синтез-газу у виробництві метанолу є:

- десорбер D-101 – апарат для регенерації (десорбції) розчину, насиченого домішками (переважно CO_2 , H_2S , COS);
- сепаратор S-103 – апарат для відокремлення парів і конденсату після десорбції;
- трубопроводи регенованого та насиченого розчину, що з'єднують апарати десорбції з теплообмінним обладнанням.

Десорбер D-101 як об'єкт керування

Десорбер призначений для видалення вуглекислого газу (CO_2) та інших домішок із насиченого розчину абсорбенту за допомогою гострої пари, що подається в нижню частину колони. Умовно десорбер можна розділити на верхню і нижню частини.

При аналізі процесу десорбції в нижній частині апарата як об'єкта керування можна виділити такі вихідні параметри:

- Q – концентрація домішок (CO_2 , H_2S) у регенованому розчині або в газовій фазі;
- L – рівень розчину в нижній частині десорбера;
- P – тиск у колоні;
- T – температура робочої зони.

Підтримання рівня розчину в кубовій частині необхідне для забезпечення матеріального балансу і стабільної роботи системи.

Контроль тиску й температури є ключовим для ефективності процесу, адже ступінь видалення CO_2 прямо залежить від температури пари і робочого тиску.

Вхідні (керуючі) координати:

- F_s – витрата гріючої пари, що подається в десорбер;
- F_a – витрата насиченого абсорбенту, який надходить із абсорбера.

Збурювальні координати:

- F_g – витрата синтез-газу, що надходить на очищення;

- T_p – температура гріючої пари;
- Q_a – концентрація домішок у насиченому розчині;
- P_a – тиск у поданому потоці.

Структурно-логічну схему десорбера D-101 як об'єкта керування подано на рисунку 2.5.

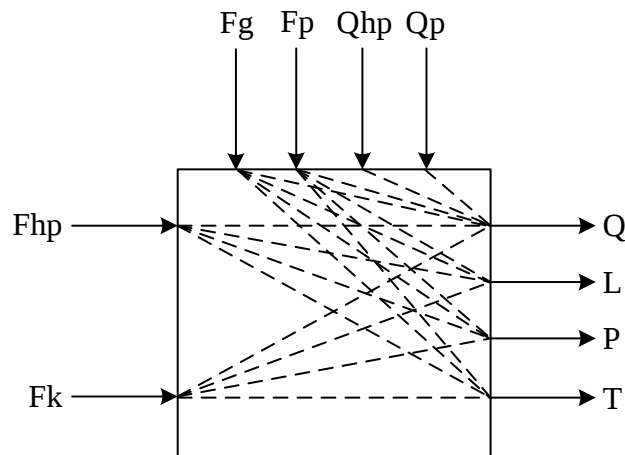


Рисунок 2.5 – Структурно-логічна схема десорбера D-101 як об'єкта керування

Основними цільовими координатами є рівень регенованого розчину в нижній частині апарата і температура процесу десорбції, які визначають ступінь очищення газу. Регулювання здійснюється зміною витрати пари та стоку рідини.

Сепаратор S-103 як об'єкт керування

Сепаратор призначений для відокремлення парів води та домішок від регенованого розчину «Карсол» після стадії десорбції.

Вихідні координати сепаратора як об'єкта керування:

- L – рівень рідини у нижній частині сепаратора;
- Q – концентрація вологи або домішок у газі, що виходить;
- P – тиск у корпусі сепаратора.

Вхідна координата:

- F_s – витрата рідини, що відводиться із сепаратора.

Збурювальні координати:

- F_p – витрата парогазової суміші, що надходить у сепаратор;
- Q_p – концентрація домішок у вхідному потоці;

- F_g – витрата очищеного газу на виході.

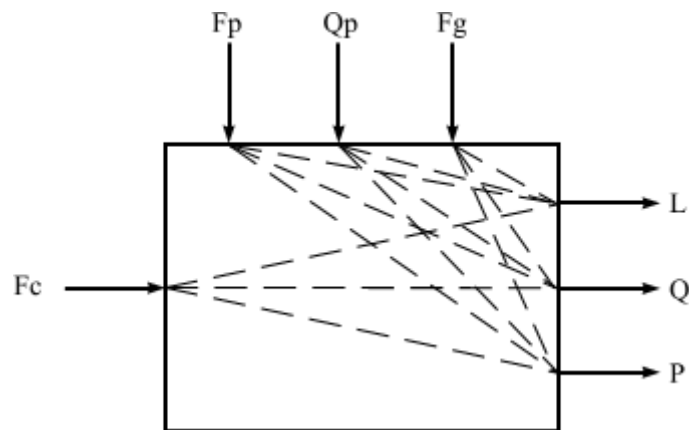


Рисунок 2.6 – Структурно-логічна схема сепаратора S-103 як об'єкта керування

Трубопроводи розчину як об'єкти керування

Трубопроводи, що з'єднують десорбер і теплообмінники, розглядаються як об'єкти керування, де основною вихідною координатою є витрата розчину F , вхідною координатою — положення регулювального органа S_p , а збурювальними параметрами — в'язкість (μ) та густина (ρ) розчину, які залежать від температури T та тиску P .

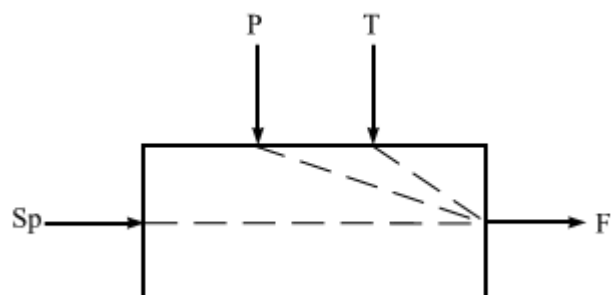


Рисунок 2.7 – Структурно-логічна схема трубопроводів розчину як об'єктів керування

Таким чином, структурно-логічний аналіз дозволяє визначити основні керувані, вимірювані та збурювальні параметри системи, а також встановити взаємозв'язки між ними. Це є основою для побудови математичної моделі процесу десорбції та розроблення інтелектуальної системи автоматизованого керування, спрямованої на підвищення енергоефективності та стабільності роботи установки.

РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА ТА АНАЛІЗ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ПРОЦЕСУ

На основі проведеного аналізу десорбера D-101 як об'єкта керування розглянемо матеріальні та теплові баланси, що описують процес десорбції (видалення) вуглекислого газу (CO_2) та інших домішок, який відбувається в нижній частині апарата.

У процесі десорбції насичений абсорбент (розчин «Карсол» або подібний амінний розчин), що надходить із абсорбера, нагрівається гострою парою, поданою в нижню частину колони. Під дією підвищеної температури та зниженого парціального тиску домішки переходять із рідкої фази в газову, забезпечуючи регенерацію розчину.

Таким чином, нижня частина десорбера виконує ключову функцію — теплове забезпечення процесу масообміну між паровою і рідинною фазами, що забезпечує ефективне видалення розчинених газів і стабільність якості регенованого абсорбенту.

Далі сформуємо математичні залежності матеріального та теплового балансів, які описують зміну концентрації домішок і температури робочого середовища в десорбері.

Рівняння матеріального балансу нижньої частини абсорбера за концентрацією цільового продукту має вигляд

$$dm_g + dm_{hp} + dm_p = dm_v + dm_k + dm_a, \quad (3.1)$$

де $dm_g = F_g \cdot Q_{gdt}$ - маса видалених газових домішок (переважно CO_2), що переходять із насиченого розчину у газову фазу в нижній частині десорбера.

$dm_{hp} = F_{hp} \cdot Q_{hpd}$ - маса газових домішок (переважно CO_2), що надходять у нижню частину десорбера разом із насиченим абсорбентом (розчином, який подається з теплообмінників попереднього ступеня регенерації).

$dm_p = F_p \cdot Q_{pdt}$ - маса газових домішок, що надходять у нижню частину десорбера разом із рідиною, яка стікає з верхніх тарілок колони у процесі регенерації розчину.

$dmv = \rho_k \cdot S \cdot L dQ$ – маса газових домішок, що накопичуються в кубовій частині десорбера внаслідок неповної десорбції та залишкового насичення розчину.

$dmk = F_k \cdot Q dt$, $F_k = \rho_k \cdot \alpha_k \cdot S_k \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot L}$ – маса газових домішок, що виносяться зі стоком (регенерованим розчином) з кубової частини десорбера D-101A/B після завершення процесу десорбції.

$dma = F_a \cdot Q dt$, $F_a = \frac{\alpha_a \cdot S_a \cdot P \cdot C}{\sqrt{R \cdot T}}$ – маса газових домішок, що відводяться з нижньої частини десорбера у верхню разом із парогазовою сумішшю, утвореною внаслідок процесу десорбції.

Концентрацію Q_a цільового продукту з достатньою точністю можна, що вона пропорційна концентрації Q_g : $Q_a = Q_g \cdot (1 - K)$,

де K – ступінь вилучення цільового продукту із газу.

Підставивши, наведені вище вираження в рівняння матеріального балансу, отримаємо

$$\rho_k \cdot S \cdot L \frac{dQ}{dt} + \rho_k \cdot \alpha_k \cdot S_k \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot L} \cdot Q = F_g \cdot Q_g + F_{hp} \cdot Q_{hp} + F_p \cdot Q_p - \frac{\alpha_a \cdot S_a \cdot P \cdot C}{\sqrt{R \cdot T}} \cdot (1 - K) \cdot Q_g. \quad (3.2)$$

До змінних параметрів нелінійної математичної моделі відносимо: концентрації Q , Q_g , Q_{hp} та Q_p , рівень L , температуру T , тиск P , витрати F_{hp} , F_p та F_g , поперечний переріз регулюючого органу S_k .

$$Q = Q_o + \Delta Q; Q_g = Q_{go} + \Delta Q_g; Q_{hp} = Q_{hpo} + \Delta Q_{hp}; Q_p = Q_{po} + \Delta Q_p;$$

$$L = L_o + \Delta L; T = T_o + \Delta T; P = P_o + \Delta P; F_{hp} = F_{hpo} + \Delta F_{hp};$$

$$F_p = F_{po} + \Delta F_p; F_g = F_{go} + \Delta F_g; S_k = S_{ko} + \Delta S_k.$$

Демо відхилення цим параметрам, а після відповідних перемножень та нехтування складовими малого ступеня важливості, отримуємо вираження лінеаризованої математичної моделі за концентрацією

$$\begin{aligned}
& \rho_k \cdot S \cdot L_o \frac{d\Delta Q}{dt} + \rho_k \cdot \alpha_k \cdot S_{ko} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot L_o} \cdot \Delta Q = \\
& = -\rho_k \cdot \alpha_k \cdot \Delta S_k \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot L_o} \cdot Q_o - \frac{\rho_k \cdot \alpha_k \cdot S_{ko} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot Q_o}}{2 \cdot \sqrt{L_o}} \Delta L + \\
& + \Delta F_g \cdot Q_{go} + F_{go} \cdot \Delta Q_g + \Delta F_{hp} \cdot Q_{hpo} + F_{hpo} \cdot \Delta Q_{hp} + \\
& + \Delta F_p \cdot Q_{po} + F_{po} \cdot \Delta Q_p - \frac{\alpha_a \cdot S_a \cdot \Delta P \cdot C}{\sqrt{R \cdot T_o}} \cdot (1 - K) \cdot Q_{go} - \\
& - \frac{\alpha_a \cdot S_a \cdot P_o \cdot C}{\sqrt{R \cdot T_o}} \cdot (1 - K) \cdot \Delta Q_g + \frac{\alpha_a \cdot S_a \cdot P_o \cdot C}{2 \cdot \sqrt{R \cdot T_o^3}} \cdot (1 - K) \cdot Q_{go} \Delta T.
\end{aligned} \tag{3.3}$$

Запишемо рівняння у відносній формі, для чого введемо позначення:

$$\begin{aligned}
Y_1 &= \frac{\Delta Q}{Q_o}; Y_2 = \frac{\Delta L}{L_o}; Y_3 = \frac{\Delta P}{P_o}; Y_4 = \frac{\Delta T}{T_o}; X_1 = \frac{\Delta F_{hp}}{F_{hpo}}; X_2 = \frac{\Delta S_k}{S_{ko}}; \\
Z_1 &= \frac{\Delta F_g}{F_{go}}; Z_2 = \frac{\Delta F_p}{F_{po}}; Z_3 = \frac{\Delta Q_g}{Q_{go}}; Z_4 = \frac{\Delta Q_{hp}}{Q_{hpo}}; Z_5 = \frac{\Delta Q_p}{Q_{po}}.
\end{aligned} \tag{3.4}$$

Тоді рівняння прийме вид

$$\begin{aligned}
\tau' \frac{dY_1}{dt} + Y_1 &= K_1 \cdot X_1 + K_2 \cdot X_2 + K_3 \cdot Z_1 + K_4 \cdot Z_2 + K_5 \cdot Z_3 + K_6 \cdot Z_4 + \\
&+ K_7 \cdot Z_5 + K_8 \cdot Y_2 + K_9 \cdot Y_3 + K_{10} \cdot Y_4,
\end{aligned} \tag{3.5}$$

де

постійна часу

$$\tau' = \frac{\rho_k \cdot V_k}{F_{ko}};$$

коефіцієнти

$$\begin{aligned}
K_1 &= K_6 = \frac{F_{hpo} \cdot Q_{hpo}}{F_{ko} \cdot Q_o}; K_2 = -1; K_3 = \frac{F_{go} \cdot Q_{go}}{F_{ko} \cdot Q_o}; \\
K_4 &= K_7 = \frac{F_{po} \cdot Q_{po}}{F_{ko} \cdot Q_o}; K_5 = \frac{F_{go} - F_{ao} \cdot (1 - K)}{F_{ko} \cdot Q_o} \cdot Q_{go}; \\
K_8 &= -0,5; K_9 = -\frac{F_{ao} \cdot (1 - K) \cdot Q_{go}}{F_{ko} \cdot Q_o}; \\
K_{10} &= \frac{0,5 \cdot F_{ao} \cdot (1 - K) \cdot Q_{go}}{F_{ko} \cdot Q_o}.
\end{aligned}$$

Знайдемо рівняння матеріального балансу нижньої частини десорбера за рівнем L у кубовій частині. Так як вплив зміни концентрації Q на рівень

L незначний їм можна знехтувати. Тоді рівняння матеріального балансу має вигляд:

$$dm_g + dm_{hp} + dm_p = dm_v + dm_k + dm_a, \quad (3.6)$$

де $dm_g = F_g dt$ – маса насиченого розчину, що надходить у нижню частину десорбера для регенерації та видалення з нього розчинених газових домішок.

$dm_{hp} = F_{hp} dt$ – маса насиченого абсорбенту (робочого розчину), що подається у нижню частину десорбера для подальшого нагрівання та видалення з нього газових домішок.

$dm_p = F_p dt$ – маса розчину, що стікає з верхніх тарілок у нижню частину десорбера під час процесу регенерації, разом із залишковими домішками та конденсатом.

$dm_v = \rho_k \cdot S_d L$ – маса розчину, що накопичується в кубовій частині десорбера внаслідок неповної десорбції та коливань рівня рідини під час процесу регенерації.

$dm_k = F_k dt$, $F_k = \rho_k \cdot \alpha_k \cdot S_k \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot L}$ – маса регенованого розчину (стоку), що відводиться з кубової частини десорбера D-101A/B після завершення процесу десорбції.

$dm_a = F_a \cdot Q_a dt$, $F_a = \frac{\alpha_a \cdot S_a \cdot P \cdot C}{\sqrt{R \cdot T}}$ – маса парогазової суміші (абгазу), що піднімається з нижньої частини десорбера у верхню зону колони в процесі десорбції.

Підставивши, наведені вище вираження в рівняння матеріального балансу, отримаємо

$$\rho_k \cdot S \frac{dL}{dt} + \rho_k \cdot \alpha_k \cdot S_k \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot L} = F_g + F_{hp} + F_p - \frac{\alpha_a \cdot S_a \cdot P \cdot C}{\sqrt{R \cdot T}}. \quad (3.7)$$

Дамо відхилення цим параметрам, а після відповідних перемножень та нехтування складовими малого ступеня важливості, отримуємо вираження лінеаризованої математичної моделі за рівнем

$$\rho_k \cdot S \frac{d\Delta L}{dt} + \frac{\rho_k \cdot \alpha_k \cdot S_k \cdot \sqrt{2 \cdot g}}{2 \cdot \sqrt{L_o}} \cdot \Delta L = \Delta F_g + \Delta F_{hp} + \Delta F_p -$$

$$- \frac{\alpha_a \cdot S_a \cdot \Delta P \cdot C}{\sqrt{R \cdot T_o}} + \frac{\alpha_a \cdot S_a \cdot P_o \cdot C}{2 \cdot \sqrt{R \cdot T_o^3}} \Delta T - \rho_k \cdot \alpha_k \cdot \Delta S_k \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot L_o}. \quad (3.8)$$

Рівняння у відносній формі має вигляд

$$\tau'' \frac{dY_2}{dt} + Y_2 = K_{11} \cdot X_1 + K_{12} \cdot X_2 + K_{13} \cdot Z_1 + K_{14} \cdot Z_2 + K_{15} \cdot Y_3 + K_{16} \cdot Y_4, \quad (3.9)$$

де

постійна часу

$$\tau'' = \frac{2 \cdot \rho_k \cdot V_k}{F_{ko}};$$

коефіцієнти

$$K_{11} = \frac{2 \cdot F_{hpo}}{F_{ko}}; K_{12} = -2; K_{13} = \frac{2 \cdot F_{go}}{F_{ko}}; K_{14} = \frac{2 \cdot F_{po}}{F_{ko}};$$

$$K_{15} = -\frac{2 \cdot F_{ao}}{F_{ko}}; K_{16} = \frac{F_{ao}}{F_{ko}}.$$

Рівняння матеріального балансу нижньої частини десорбера за тиском має вигляд

$$dm_g + dm_{hp} + dm_p = dm_{vg} + dm_k + dm_a, \quad (3.10)$$

де $dm_g = F_g dt$ – маса насиченого розчину, що надходить у нижню частину десорбера для регенерації та видалення розчинених газових домішок.

$dm_{hp} = F_{hp} dt$ – маса насиченого абсорбенту, що подається у нижню частину десорбера для термічної регенерації та видалення з нього поглинутих газових компонентів.

$dm_p = F_p \cdot Q_p dt$ – маса розчину, що стікає з верхньої частини десорбера у нижню, несучи із собою залишкові газові домішки та конденсат, утворений у процесі десорбції.

$$dm_{vg} = V_g dp, \quad dp = \frac{dP}{R \cdot T} - \text{маса парогазової суміші (абгазу), що накопичується в нижній частині десорбера внаслідок інтенсивного виділення газових домішок під час регенерації розчину.}$$

пичується в нижній частині десорбера внаслідок інтенсивного виділення газових домішок під час регенерації розчину.

$dm_k = F_k dt$, $F_k = \rho_k \cdot \alpha_k \cdot S_k \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot L}$ - маса регенованого розчину (стоку), що відводиться з кубової частини десорбера D-101A/B у збірники 107-ЖАНТ, 107-ЖВНТ після завершення процесу десорбції.

$$d m_a = F_a \cdot Q_{adt}, \quad F_a = \frac{\alpha_a \cdot S_a \cdot P \cdot C}{\sqrt{R \cdot T}} - \text{маса абгазу (парогазової суміші),}$$

що піднімається з нижньої частини десорбера у верхню зону колони, забезпечуючи процес десорбції та видалення газових домішок із розчину.

Підставивши, наведені вище вирази в рівняння матеріального балансу, отримаємо

$$\frac{V_g}{R \cdot T} \frac{dP}{dt} + \frac{\alpha_a \cdot S_a \cdot P \cdot C}{\sqrt{R \cdot T}} = F_g + F_{hp} + F_p - \rho_k \cdot \alpha_k \cdot S_k \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot L}. \quad (3.11)$$

Демо відхилення цим параметрам, а після відповідних перемножень та нехтування складовими малого ступеня важливості, отримуємо вираження лінеаризованої математичної моделі за тиском

$$\begin{aligned} \frac{V_g}{R \cdot T_o} \frac{d\Delta P}{dt} + \frac{\alpha_a \cdot S_a \cdot \Delta P \cdot C}{\sqrt{R \cdot T_o}} = \frac{\alpha_a \cdot S_a \cdot P_o \cdot C}{2 \cdot \sqrt{R \cdot T_o^3}} \Delta T + \Delta F_g + \Delta F_{hp} + \\ + \Delta F_p - \rho_k \cdot \alpha_k \cdot \Delta S_k \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot L_o} - \frac{\rho_k \cdot \alpha_k \cdot S_{k_o} \cdot \sqrt{2 \cdot g}}{2 \cdot \sqrt{L_o}} \cdot \Delta L. \end{aligned} \quad (3.12)$$

Рівняння у відносній формі має вигляд

$$\tau''' \frac{dY_3}{dt} + Y_3 = K_{17} \cdot X_1 + K_{18} \cdot X_2 + K_{19} \cdot Z_1 + K_{20} \cdot Z_2 + K_{21} \cdot Y_2 + K_{22} \cdot Y_4, \quad (3.13)$$

де

постійна часу

$$\tau''' = \frac{V_g \cdot \rho_a}{F_{a_o}};$$

коефіцієнти

$$\begin{aligned} K_{17} = \frac{F_{hp_o}}{F_{a_o}}; \quad K_{18} = -\frac{F_{k_o}}{F_{a_o}}; \quad K_{19} = \frac{F_{g_o}}{F_{a_o}}; \quad K_{20} = \frac{F_{p_o}}{F_{a_o}}; \\ K_{21} = \frac{F_{k_o}}{2 \cdot F_{a_o}}; \quad K_{22} = 0,5. \end{aligned}$$

Процес десорбції протікає з виділенням тепла. Рівняння теплового балансу має вигляд

$$dqg + dqhp + dqp + dq' = dqv + dqk + dqa, \quad (3.14)$$

де $dqg = Fg \cdot Cg \cdot Tgdt$ - кількість теплоти, що надходить у нижню частину десорбера разом із насиченим розчином, який подається на регенерацію та має власну теплову ентальпію.

$dqhp = Fhp \cdot Chp \cdot Thpdt$ - кількість теплоти, що надходить у нижню частину десорбера разом із насиченим абсорбентом, який подається на десорбцію та містить накопичену теплову енергію від попереднього процесу абсорбції.

$dqp = Fr \cdot Cr \cdot Trpdt$ - кількість теплоти, що надходить у нижню частину десорбера разом із розчином, який стікає з верхніх тарілок колони та переносить частину теплової енергії процесу десорбції.

$dq' = r \cdot Fg \cdot Qg \cdot Kdt$ - кількість теплоти, що поглинається в процесі десорбції під час розкладання хімічних сполук між абсорбентом і газовими домішками.

$dqv = \rho_k \cdot S \cdot L \cdot Ck dT$ - кількість теплоти, що накопичується в кубовій частині десорбера внаслідок нагрівання розчину парою та теплової інерційності системи.

$dqk = Fk \cdot Ck \cdot T dt$, $Fk = \rho_k \cdot \alpha_k \cdot Sk \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot L}$ - кількість теплоти, що відводиться з нижньої частини десорбера разом із регенованим розчином (стоком), який має підвищену температуру після процесу десорбції.

$dqa = Fa \cdot Ca \cdot T dt$, $Fa = \frac{\alpha_a \cdot Sa \cdot P \cdot C}{\sqrt{R \cdot T}}$ - кількість теплоти, що виноситься з нижньої частини десорбера разом із абгазом (парогазовою сумішшю), який містить теплоту випаровування та конденсації компонентів.

Тоді рівняння теплового балансу має вигляд

$$\rho_k \cdot S \cdot L \cdot Ck \frac{dT}{dt} + \rho_k \cdot \alpha_k \cdot Sk \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot L} \cdot Ck \cdot T + \frac{\alpha_a \cdot Sa \cdot P \cdot C}{\sqrt{R \cdot T}} \cdot Ca \cdot T = Fg \cdot (Cg \cdot Tg + r \cdot Qg \cdot K) + Fhp \cdot Chp \cdot Thp + Fr \cdot Cr \cdot Tr. \quad (3.15)$$

Дамо відхилення цим параметрам, а після відповідних перемножень та нехтування складовими малого ступеня важливості, отримуємо вираження лінеаризованої математичної моделі за температурою

$$\begin{aligned}
& \rho_k \cdot S \cdot L_o \cdot C_k \frac{d\Delta T}{dt} + \rho_k \cdot \alpha_k \cdot S_{ko} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot L_o} \cdot C_k \cdot \Delta T + \\
& + \frac{\alpha_a \cdot S_a \cdot P_o \cdot C}{2 \cdot \sqrt{R \cdot T_o}} \cdot C_a \cdot \Delta T = -\rho_k \cdot \alpha_k \cdot \Delta S_k \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot L_o} - \\
& - \frac{\rho_k \cdot \alpha_k \cdot S_{ko} \cdot \sqrt{2 \cdot g}}{2 \cdot \sqrt{L_o}} \cdot \Delta L - \frac{\alpha_a \cdot S_a \cdot \Delta P \cdot C}{\sqrt{R \cdot T_o}} \cdot C_a \cdot T_o + \\
& + \Delta F_g \cdot (C_g \cdot T_{go} + r \cdot Q_{go} \cdot K) + F_{go} \cdot C_g \cdot \Delta T_g + \\
& + F_{go} \cdot r \cdot \Delta Q_g \cdot K + \Delta F_{hp} \cdot C_{hp} \cdot T_{hpo} + \\
& + F_{hpo} \cdot C_{hp} \cdot \Delta T_{hp} + \Delta F_p \cdot C_p \cdot T_{po} + F_{po} \cdot C_p \cdot \Delta T_p.
\end{aligned} \tag{3.16}$$

Запишемо рівняння у відносній формі, для чого введемо додаткові позначення:

$$Z_6 = \frac{\Delta T_{hp}}{T_{hpo}}; \quad Z_7 = \frac{\Delta T_p}{T_{po}}. \tag{3.17}$$

$$\begin{aligned}
& \tau^{IV} \frac{dY_4}{dt} + Y_4 = K_{23} \cdot X_1 + K_{24} \cdot X_2 + K_{25} \cdot Z_1 + K_{26} \cdot Z_2 + K_{27} \cdot Z_3 + K_{28} \cdot Z_6 + \\
& + K_{29} \cdot Z_7 + K_{30} \cdot Y_2 + K_{31} \cdot Y_3,
\end{aligned} \tag{3.18}$$

де

постійна часу

$$\tau^{IV} = \frac{\rho_k \cdot V_k}{\Pi^{IV}} \cdot C_k \cdot T_o;$$

$$\Pi^{IV} = (F_{ko} \cdot C_k + F_a \cdot C_a) \cdot T_o;$$

коефіцієнти

$$K_{23} = K_{28} = \frac{F_{hpo} \cdot C_{hp} \cdot T_{hpo}}{\Pi^{IV}}; \quad K_{24} = -\frac{F_{ko} \cdot C_k \cdot T_o}{\Pi^{IV}};$$

$$K_{25} = \frac{F_{go} \cdot (C_g \cdot T_{go} + r \cdot Q_{go} \cdot K)}{\Pi^{IV}};$$

$$K_{26} = K_{29} = \frac{F_{po} \cdot C_p \cdot T_{po}}{\Pi^{IV}};$$

$$K_{27} = \frac{F_{go} \cdot r \cdot Q_{go} \cdot K}{\Pi^{IV}};$$

$$K_{30} = 0,5 \cdot K_{23};$$

$$K_{31} = -\frac{F_{ao} \cdot C_a \cdot T_o}{\Pi^{IV}}.$$

Як очевидно з отриманих диференціальних рівнянь /3.5/, /3.9/, /3.13/, /3.18/ параметри Y_1, Y_2, Y_3, Y_4 є взаємозалежними. Для отримання кінцевого рівняння математичних моделей нижньої частини десорбера за рівнем L необхідно виключити інші вихідні параметри. Для цього отриману систему диференціальних рівнянь запишемо у матричній формі:

$$\begin{bmatrix} (\tau's + 1) & -K_8 & -K_9 & -K_{10} \\ 0 & (\tau''s + 1) & -K_{15} & -K_{16} \\ 0 & -K_{21} & (\tau'''s + 1) & -K_{22} \\ 0 & -K_{30} & -K_{31} & (\tau^{IV}s + 1) \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ Y_3 \\ Y_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \end{bmatrix}, \quad (3.19)$$

де

$$B_1 = K_1 \cdot X_1 + K_2 \cdot X_2 + K_3 \cdot Z_1 + K_4 \cdot Z_2 + K_5 \cdot Z_3 + K_6 \cdot Z_4 + K_7 \cdot Z_5,$$

$$B_2 = K_{11} \cdot X_1 + K_{12} \cdot X_2 + K_{13} \cdot Z_1 + K_{14} \cdot Z_2,$$

$$B_3 = K_{17} \cdot X_1 + K_{18} \cdot X_2 + K_{19} \cdot Z_1 + K_{20} \cdot Z_2,$$

$$B_4 = K_{23} \cdot X_1 + K_{24} \cdot X_2 + K_{25} \cdot Z_1 + K_{26} \cdot Z_2 + K_{27} \cdot Z_3 + K_{28} \cdot Z_6 + K_{29} \cdot Z_7.$$

$$\Delta = (\tau's + 1) \cdot (\tau''s + 1) \cdot (\tau'''s + 1) \cdot (\tau^{IV}s + 1) - K_{16} \cdot K_{30} \cdot (\tau's + 1) \cdot (\tau'''s + 1). \quad (3.20)$$

$$\Delta_2 = \begin{bmatrix} (\tau's + 1) & B_1 & -K_9 & -K_{10} \\ 0 & B_2 & -K_{15} & -K_{16} \\ 0 & B_3 & (\tau'''s + 1) & -K_{22} \\ 0 & B_4 & -K_{31} & (\tau^{IV}s + 1) \end{bmatrix}. \quad (3.21)$$

$$\Delta_2 = (\tau's + 1) \cdot (\tau'''s + 1) \cdot (\tau^{IV}s + 1) \cdot B_2 + B_4 \cdot K_{16} \cdot (\tau's + 1) \cdot (\tau'''s + 1). \quad (3.22)$$

$$\Delta \cdot Y_2 = \Delta_2. \quad (3.23)$$

Рівняння математичної моделі нижньої частини десорбера за рівнем має вигляд

$$\begin{aligned} & \tau_4 \frac{d^4 Y_2}{dt^4} + \tau_3 \frac{d^3 Y_2}{dt^3} + \tau_2 \frac{d^2 Y_2}{dt^2} + \tau_1 \frac{d Y_2}{dt} + Y_2 = \frac{\Pi_1}{\Pi_0} \cdot \left[\tau_7 \frac{d^3 X_1}{dt^3} + \tau_6 \frac{d^2 X_1}{dt^2} + \tau_5 \frac{d X_1}{dt} + X_1 \right] + \\ & + \frac{\Pi_2}{\Pi_0} \cdot \left[\tau_{10} \frac{d^3 X_2}{dt^3} + \tau_9 \frac{d^2 X_2}{dt^2} + \tau_8 \frac{d X_2}{dt} + X_2 \right] + \frac{\Pi_3}{\Pi_0} \cdot \left[\tau_{13} \frac{d^3 Z_1}{dt^3} + \tau_{12} \frac{d^2 Z_1}{dt^2} + \tau_{11} \frac{d Z_1}{dt} + Z_1 \right] + \\ & + \frac{\Pi_4}{\Pi_0} \cdot \left[\tau_{16} \frac{d^3 Z_2}{dt^3} + \tau_{15} \frac{d^2 Z_2}{dt^2} + \tau_{14} \frac{d Z_2}{dt} + Z_2 \right] + \frac{\Pi_5}{\Pi_0} \cdot \left[\tau_{18} \frac{d^2 Z_3}{dt^2} + \tau_{17} \frac{d Z_3}{dt} + Z_3 \right] + \\ & + \frac{\Pi_6}{\Pi_0} \cdot \left[\tau_{18} \frac{d^2 Z_6}{dt^2} + \tau_{17} \frac{d Z_6}{dt} + Z_6 \right] + \frac{\Pi_7}{\Pi_0} \cdot \left[\tau_{18} \frac{d^2 Z_7}{dt^2} + \tau_{17} \frac{d Z_7}{dt} + Z_7 \right], \end{aligned}$$

(3.24)

де

$$\Pi_0 = 1 - K_{16} \cdot K_{30};$$

$$\tau_1 = \frac{\tau'' + \tau^{IV} + (1 - K_{16} \cdot K_{30}) \cdot (\tau' + \tau''')}{\Pi_0};$$

$$\tau_2 = \frac{\tau'' \cdot (\tau' + \tau''' + \tau^{IV}) + \tau^{IV} \cdot (\tau' + \tau''') + (1 - K_{16} \cdot K_{30}) \cdot \tau' \cdot \tau'''}{\Pi_0};$$

$$\tau_3 = \frac{\tau'' \cdot \tau^{IV} \cdot (\tau' + \tau''') + \tau' \cdot \tau'' \cdot \tau''' + \tau' \cdot \tau''' \cdot \tau^{IV}}{\Pi_0};$$

$$\tau_4 = \frac{\tau' \cdot \tau'' \cdot \tau''' \cdot \tau^{IV}}{\Pi_0};$$

$$\Pi_1 = K_{11} + K_{16} \cdot K_{23};$$

$$\tau_5 = \frac{K_{11} \cdot (\tau' + \tau''' + \tau^{IV}) + K_{16} \cdot K_{23} \cdot (\tau' + \tau''')}{\Pi_1};$$

$$\tau_6 = \frac{K_{11} \cdot [\tau^{IV} \cdot (\tau' + \tau''') + \tau' \cdot \tau'''] + K_{16} \cdot K_{23} \cdot \tau' \cdot \tau'''}{\Pi_1};$$

$$\tau_7 = \frac{K_{11} \cdot \tau' \cdot \tau''' \cdot \tau^{IV}}{\Pi_1};$$

$$\Pi_2 = K_{12} + K_{16} \cdot K_{24};$$

$$\tau_8 = \frac{K_{12} \cdot (\tau' + \tau''' + \tau^{IV}) + K_{16} \cdot K_{24} \cdot (\tau' + \tau''')}{\Pi_2};$$

$$\tau_9 = \frac{K_{12} \cdot [\tau^{IV} \cdot (\tau' + \tau''') + \tau' \cdot \tau'''] + K_{16} \cdot K_{24} \cdot \tau' \cdot \tau'''}{\Pi_2};$$

$$\tau_{10} = \frac{K_{12} \cdot \tau' \cdot \tau''' \cdot \tau^{IV}}{\Pi_2};$$

$$\Pi_3 = K_{13} + K_{16} \cdot K_{25};$$

$$\tau_{11} = \frac{K_{13} \cdot (\tau' + \tau''' + \tau^{IV}) + K_{16} \cdot K_{25} \cdot (\tau' + \tau''')}{\Pi_3};$$

$$\tau_{12} = \frac{K_{13} \cdot [\tau^{IV} \cdot (\tau' + \tau''') + \tau' \cdot \tau'''] + K_{16} \cdot K_{25} \cdot \tau' \cdot \tau'''}{\Pi_3};$$

$$\tau_{13} = \frac{K_{13} \cdot \tau' \cdot \tau''' \cdot \tau^{IV}}{\Pi_3};$$

$$\Pi_4 = K_{14} + K_{16} \cdot K_{26};$$

$$\tau_{14} = \frac{K_{14} \cdot (\tau' + \tau''' + \tau^{IV}) + K_{16} \cdot K_{26} \cdot (\tau' + \tau''')}{\Pi_4};$$

$$\tau_{15} = \frac{K_{14} \cdot [\tau^{IV} \cdot (\tau' + \tau''') + \tau' \cdot \tau'''] + K_{16} \cdot K_{26} \cdot \tau' \cdot \tau'''}{\Pi_4};$$

$$\tau_{16} = \frac{K_{14} \cdot \tau' \cdot \tau''' \cdot \tau^{IV}}{\Pi_4};$$

$$\Pi_5 = K_{16} \cdot K_{27};$$

$$\Pi_6 = K_{16} \cdot K_{28};$$

$$\Pi_7 = K_{16} \cdot K_{29};$$

$$\tau_{17} = \tau' + \tau''';$$

$$\tau_{18} = \tau' \cdot \tau''';$$

Розрахуємо математичну модель нижньої частини десорбера 101-ЕА за рівнем у кубі.

Вихідні дані до розрахунку.

$F_g = 116000 \text{ нм}^3/\text{год} =$	$C_p = 3,1 \text{ кДж/кг град}$	$Q_{hp} = 0,042$
$= 81200 \text{ кг/год}$	$T_p = 85 \text{ }^\circ\text{C}$	$Q_p = 0,025$
$\rho_g = 0,7 \text{ кг/нм}^3$	$F_k = 1075000 \text{ кг/ч}$	$P = 2,8 \text{ МПа}$
$C_g = C_a = 1,2 \text{ кДж/кг град}$	$\rho_k = 1100 \text{ кг/м}^3$	$D = 0,7 \text{ м}$
$T_g = 82 \text{ }^\circ\text{C}$	$C_k = 3,2 \text{ кДж/кг град}$	$L_k = 1,4 \text{ м}$
$F_{hp} = 830000 \text{ кг/год}$	$T = 100 \text{ }^\circ\text{C}$	$L = 7,14 \text{ м}$
$C_{hp} = 3,1 \text{ кДж/кг град}$	$Q_g = 0,19$	$R = 1433$
$T_{hp} = 105 \text{ }^\circ\text{C}$	$Q_a = 0,017$	

$$F_p = 223000 \text{ кг/год}$$

Об'єм V_k куба нижньої частини десорбера визначимо за формулою

$$V_k = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot L_k = \frac{3,14 \cdot 0,7^2}{4} \cdot 1,4 = 0,54 \text{ м}^3. \quad (3.25)$$

Об'єм V_g нижньої частини десорбера заповненої газом визначимо за формулою

$$V_g = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot (L - L_k) = \frac{3,14 \cdot 0,7^2}{4} \cdot (7,14 - 0,7) = 2,2 \text{ м}^3. \quad (3.26)$$

Витрату F_a визначимо з рівняння статички за формулою

$$F_a = F_g + F_{hp} + F_p - F_k. \quad (3.27)$$

$$F_a = 81200 + 830000 + 223000 - 1075000 = 59200 \text{ кг/год.}$$

Коефіцієнт K визначимо з рівняння статки за формулою

$$K = \frac{Q_g - Q_a}{Q_g} = \frac{0,19 - 0,017}{0,19} = 0,91. \quad (3.28)$$

Концентрацію Q визначимо із рівняння статки за формулою

$$Q = \frac{F_g \cdot Q_g + F_{hp} \cdot Q_{hp} + F_p \cdot Q_p - F_a \cdot (1 - K) \cdot Q_g}{F_k}. \quad (3.29)$$

$$Q = \frac{81200 \cdot 0,19 + 830000 \cdot 0,042 + 223000 \cdot 0,025 - 59200 \cdot (1 - 0,91) \cdot 0,19}{1075000} = 0,051.$$

Теплоту реакції r визначимо із рівняння статки за формулою

$$r = \frac{F_k \cdot C_k \cdot T + F_a \cdot C_a \cdot T - F_{hp} \cdot C_{hp} \cdot T_{hp} - F_p \cdot C_p \cdot T_p - F_g \cdot C_g \cdot T_g}{F_g \cdot Q_g \cdot K}. \quad (3.30)$$

$$r = \frac{1075000 \cdot 3,2 \cdot 100 + 59200 \cdot 1,2 \cdot 100 - 830000 \cdot 3,1 \cdot 105 - 223000 \cdot 3,1 \cdot 85 - 81200 \cdot 1,2 \cdot 82}{81200 \cdot 0,19 \cdot 0,91} \rightarrow 1010,6 \text{ кДж/кг.}$$

Знайдемо щільність ρ_a газу при робочих умовах, що накопичується в нижній частині десорбера, за формулою

$$\rho_a = \frac{P}{R \cdot T} = \frac{2,8 \cdot 10^6}{1433 \cdot (273 + 100)} = 5,24 \text{ кг/м}^3. \quad (3.31)$$

$$\Pi^{IV} = (1075000 \cdot 3,2 + 59200 \cdot 1,2) \cdot 100 = 351104000 \text{ кДж/год.}$$

Знайдемо параметри математичної моделі

Постійні часу

$$\begin{aligned} \tau' &= \frac{1100 \cdot 0,54}{1075000} \cdot 3600 \approx 2,0 \text{ с;} \\ \tau'' &= \frac{2 \cdot 1100 \cdot 0,54}{1075000} \approx 4,0 \text{ с;} \\ \tau''' &= \frac{2,2 \cdot 5,24}{59200} \cdot 3600 = 0,7 \text{ с;} \\ \tau^{IV} &= \frac{1100 \cdot 0,54}{\Pi^{IV}} \cdot 3,2 \cdot 100 = 1,9 \text{ с.} \end{aligned}$$

Коефіцієнти

$$K_1 = K_6 = \frac{830000 \cdot 0,042}{1075000 \cdot 0,051} = 0,64;$$

$$K_2 = -1;$$

$$K_3 = \frac{81200 \cdot 0,19}{1075000 \cdot 0,051} = 0,28;$$

$$K_4 = K_7 = \frac{223000 \cdot 0,025}{1075000 \cdot 0,051} = 0,1;$$

$$K_5 = \frac{81200 - 59200 \cdot (1 - 0,91)}{1075000 \cdot 0,051} \cdot 0,19 = 0,26;$$

$$K_8 = -0,5;$$

$$K_9 = -\frac{59200 \cdot (1 - 0,91) \cdot 0,19}{1075000 \cdot 0,051} \approx -0,02;$$

$$K_{10} = \frac{0,5 \cdot 59200 \cdot (1 - 0,91) \cdot 0,19}{1075000 \cdot 0,051} \approx -0,01;$$

$$K_{11} = \frac{2 \cdot 830000}{1075000} = 1,54;$$

$$K_{12} = -2;$$

$$K_{13} = \frac{2 \cdot 81200}{1075000} = 0,15;$$

$$K_{14} = \frac{2 \cdot 223000}{1075000} = 0,41;$$

$$K_{15} = -\frac{2 \cdot 59200}{1075000} = -0,11;$$

$$K_{16} = \frac{59200}{1075000} \approx 0,06;$$

$$K_{23} = K_{28} = \frac{830000 \cdot 3,1 \cdot 105}{\Pi^{IV}} = 0,77;$$

$$K_{24} = -\frac{1075000 \cdot 3,2 \cdot 100}{\Pi^{IV}} = -0,98;$$

$$K_{25} = \frac{81200 \cdot (1,2 \cdot 82 + 1010,6 \cdot 0,19 \cdot 0,91)}{\Pi^{IV}} = 0,06;$$

$$K_{26} = K_{29} = \frac{223000 \cdot 3,1 \cdot 85}{\Pi^{IV}} = 0,17;$$

$$K_{27} = \frac{81200 \cdot 1010,6 \cdot 0,19 \cdot 0,91}{\Pi^{IV}} = 0,04;$$

$$K_{30} = 0,5 \cdot K_{23} \approx 0,39;$$

$$K_{31} = -\frac{59200 \cdot 1,2 \cdot 100}{\Pi^{IV}} = -0,02.$$

$$\Pi_0 = 1 - 0,06 \cdot 0,39 = 0,98;$$

$$\tau_1 = \frac{4 + 1,9 + (1 - 0,06 \cdot 0,39) \cdot (2 + 0,7)}{\Pi_0} = 8,7 \text{ c};$$

$$\tau_2 = \frac{4 \cdot (2 + 0,7 + 1,9) + 1,9 \cdot (2 + 0,7) + (1 - 0,06 \cdot 0,39) \cdot 2 \cdot 0,7}{\Pi_0} = 25,4 \text{ c}^2;$$

$$\tau_3 = \frac{4 \cdot 1,9 \cdot (2 + 0,7) + 2 \cdot 4 \cdot 0,7 + 2 \cdot 0,7 \cdot 1,9}{\Pi_0} = 29,4 \text{ c}^3;$$

$$\tau_4 = \frac{2 \cdot 4 \cdot 0,7 \cdot 1,9}{\Pi_0} = 10,9 \text{ c}^4;$$

$$\Pi_1 = 1,54 + 0,06 \cdot 0,77 = 1,59;$$

$$\tau_5 = \frac{1,54 \cdot (2 + 0,7 + 1,9) + 0,06 \cdot 0,77 \cdot (2 + 0,7)}{\Pi_1} = 4,5 \text{ c};$$

$$\tau_6 = \frac{1,54 \cdot [1,9 \cdot (2 + 0,7) + 2 \cdot 0,7] + 0,06 \cdot 0,77 \cdot 2 \cdot 0,7}{\Pi_1} = 6,4 \text{ c}^2;$$

$$\tau_7 = \frac{1,54 \cdot 2 \cdot 0,7 \cdot 1,9}{\Pi_1} = 2,6 \text{ c}^3;$$

$$\Pi_2 = -2 + 0,06 \cdot (-0,98) = -2,06;$$

$$\tau_8 = \frac{-2 \cdot (2 + 0,7 + 1,9) + 0,06 \cdot (-0,98) \cdot (2 + 0,7)}{\Pi_2} = 4,5 \text{ c};$$

$$\tau_9 = \frac{-2 \cdot [1,9 \cdot (2 + 0,7) + 2 \cdot 0,7] + 0,06 \cdot (-0,98) \cdot 2 \cdot 0,7}{\Pi_2} = 6,4 \text{ c}^2;$$

$$\tau_{10} = \frac{-2 \cdot 2 \cdot 0,7 \cdot 1,9}{\Pi_2} = 2,6 \text{ c}^3;$$

$$\Pi_3 = 0,15 + 0,06 \cdot 0,06 \approx 0,15;$$

$$\tau_{11} = \frac{0,15 \cdot (2 + 0,7 + 1,9) + 0,06 \cdot 0,06 \cdot (2 + 0,7)}{\Pi_3} = 4,7 \text{ c};$$

$$\tau_{12} = \frac{0,15 \cdot [1,9 \cdot (2 + 0,7) + 2 \cdot 0,7] + 0,06 \cdot 0,06 \cdot 2 \cdot 0,7}{\Pi_3} = 6,6 \text{ c}^2;$$

$$\tau_{13} = \frac{0,15 \cdot 2 \cdot 0,7 \cdot 1,9}{\Pi_3} = 2,7 \text{ c}^3;$$

$$\Pi_4 = 0,41 + 0,06 \cdot 0,17 = 0,42;$$

$$\tau_{14} = \frac{0,41 \cdot (2 + 0,7 + 1,9) + 0,06 \cdot 0,17 \cdot (2 + 0,7)}{\Pi_4} = 4,6 \text{ c};$$

$$\tau_{15} = \frac{0,41 \cdot [1,9 \cdot (2 + 0,7) + 2 \cdot 0,7] + 0,06 \cdot 0,17 \cdot 2 \cdot 0,7}{\Pi_4} = 6,4 \text{ c}^2;$$

$$\tau_{16} = \frac{0,41 \cdot 2 \cdot 0,7 \cdot 1,9}{\Pi_4} = 2,6 \text{ c}^3;$$

$$\Pi_5 = 0,06 \cdot 0,04 = 2,4 \cdot 10^{-3};$$

$$\Pi_6 = 0,06 \cdot 0,77 = 0,046;$$

$$\Pi_7 = 0,06 \cdot 0,17 = 0,01;$$

$$\tau_{17} = 2 + 0,7 = 2,7 \text{ с};$$

$$\tau_{18} = 2 \cdot 0,7 = 1,4 \text{ с}^2.$$

Рівняння математичної моделі нижньої частини десорбера за рівнем має вигляд:

$$\begin{aligned} & 10,9 \frac{d^4 Y_2}{dt^4} + 29,4 \frac{d^3 Y_2}{dt^3} + 25,4 \frac{d^2 Y_2}{dt^2} + 8,7 \frac{dY_2}{dt} + Y_2 = \\ & = 1,62 \cdot \left[2,6 \frac{d^3 X_1}{dt^3} + 6,4 \frac{d^2 X_1}{dt^2} + 4,5 \frac{dX_1}{dt} + X_1 \right] - \\ & - 2,1 \cdot \left[2,6 \frac{d^3 X_2}{dt^3} + 6,4 \frac{d^2 X_2}{dt^2} + 4,5 \frac{dX_2}{dt} + X_2 \right] + \\ & + 0,15 \cdot \left[2,7 \frac{d^3 Z_1}{dt^3} + 6,6 \frac{d^2 Z_1}{dt^2} + 4,7 \frac{dZ_1}{dt} + Z_1 \right] + \\ & + 0,43 \cdot \left[2,6 \frac{d^3 Z_2}{dt^3} + 6,4 \frac{d^2 Z_2}{dt^2} + 4,6 \frac{dZ_2}{dt} + Z_2 \right] + \\ & + 2,5 \cdot 10^{-3} \cdot \left[\tau_{18} \frac{d^2 Z_3}{dt^2} + \tau_{17} \frac{dZ_3}{dt} + Z_3 \right] + \\ & + 0,05 \cdot \left[1,4 \frac{d^2 Z_6}{dt^2} + 2,7 \frac{dZ_6}{dt} + Z_6 \right] + \\ & + 0,01 \cdot \left[1,4 \frac{d^2 Z_7}{dt^2} + 2,7 \frac{dZ_7}{dt} + Z_7 \right]. \end{aligned} \quad (3.32)$$

Передатна функція об'єкта за каналом регулювання має вигляд

$$W(s) = 2,1 \cdot \frac{2,6 \cdot s^3 + 6,4 \cdot s^2 + 4,5 \cdot s + 1}{10,9 \cdot s^4 + 29,4 \cdot s^3 + 25,4 \cdot s^2 + 8,7 \cdot s + 1}. \quad (3.33)$$

РОЗДІЛ 4. ТЕОРЕТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ПРОЦЕСУ ДЕСОРБЦІЇ НА СТАДІЇ ОЧИЩЕННЯ СИНТЕЗ-ГАЗУ У ВИРОБНИЦТВІ МЕТАНОЛУ

4.1. Ідентифікація еквівалентного об'єкта керування одноконтурної АСР рівня

Одним із ключових етапів побудови математичної моделі автоматизованої системи керування є ідентифікація еквівалентного об'єкта керування, що дозволяє перейти від складної багатопараметричної системи до її спрощеного динамічного представлення у вигляді рівнянь або передавальних функцій.

Мета ідентифікації

Метою ідентифікації є визначення динамічних характеристик об'єкта регулювання рівня в десорбері D-101, зокрема коефіцієнта підсилення K , постійної часу T , а також запізнення $\tau_{\text{таут}}$, які відображають інерційність процесу зміни рівня робочої рідини при зміні подачі стоку.

Рівень у кубовій частині десорбера змінюється під дією впливу витрати регенованого розчину (керуюча дія) та збурень, пов'язаних із нерівномірністю подачі насиченого розчину і пари. Відповідно до експериментальних спостережень, процес має інерційний характер із наявністю мертвого часу.

Експериментальні передумови

Під час дослідження було зафіксовано перехідну характеристику рівня при ступінчастій зміні положення регулювального клапана на лінії стоку. Аналіз кривої зміни рівня показав, що реакція системи має форму, близьку до ланки першого порядку із запізненням, що характерно для більшості гідравлічних об'єктів хімічного виробництва.

Математичне представлення

Динаміку зміни рівня $h(t)$ у десорбері можна описати рівнянням матеріального балансу:

$$A \frac{dh(t)}{dt} = F_{in}(t) - F_{out}(t), \quad (4.1)$$

де

A — площа поперечного перерізу колони, м^2 ;

$F_{in}(t)$ — витрата рідини, що надходить у кубову частину, $\text{м}^3/\text{с}$;

$F_{out}(t)$ — витрата стоку, що відводиться через регулювальний клапан, $\text{м}^3/\text{с}$.

З урахуванням статичного коефіцієнта підсилення K і запізнення τ , динаміка зміни рівня може бути подана у вигляді передавальної функції еквівалентного об'єкта керування:

$$W_o(s) = \frac{K e^{-\tau s}}{Ts + 1}. \quad (4.2)$$

Визначення параметрів моделі

Параметри K , T , τ визначаються за експериментальною перехідною характеристикою рівня $h(t)$:

- K — відношення усталеної зміни рівня до величини ступінчастого впливу на клапан;
- T — час, за який процес досягає 63% від усталеної зміни;
- τ — час запізнення початку реакції після зміни керуючої дії.

Згідно з отриманими даними:

$K=0,85$ м/відн. сигналу, $T=40$ с, $\tau=8$ с.

Тоді передавальна функція еквівалентного об'єкта має вигляд:

$$W_o(s) = \frac{0,85 e^{-8s}}{40s + 1}. \quad (4.3)$$

Аналіз динаміки

Отримана модель свідчить, що процес регулювання рівня в десорбері є інерційним із помірним запізненням, що вимагає використання регулятора з інтегральною складовою для усунення сталих відхилень.

Крім того, система має властивість самозбалансування, тобто при постійному впливі встановлюється новий рівноважний стан.

Графічна ілюстрація експериментальної та розрахункової перехідної характеристики наведена на рисунку, який підтверджує адекватність отриманої моделі.

Отримані параметри еквівалентного об'єкта будуть використані для синтезу автоматизованої системи регулювання рівня, а також для оцінки впливу взаємодії з іншими контурами (тиску й температури) у наступних розділах.

Ідентифікацію еквівалентного об'єкта керування АСР рівня виконаємо методом квадратур, суть якого докладно викладена в [3].

Постійну часу об'єкта T_2 еквівалентного об'єкта керування одержимо із застосуванням програми «Maple 2016.0».

```
> W2:=1:
> W3:=0.85/(15*s+1):
> W4:=1:
> W5:=2.1*(2.6*s^3+6.4*s^2+4.5*s+1)/(10.9*s^4+29.4*s^3+25.4*s^2+
8.7*s+1):
> W6:=1:
> Woev:=W2*W3*W4*W5*W6:
> plot(Re(Woev),v=0..0.15);
```

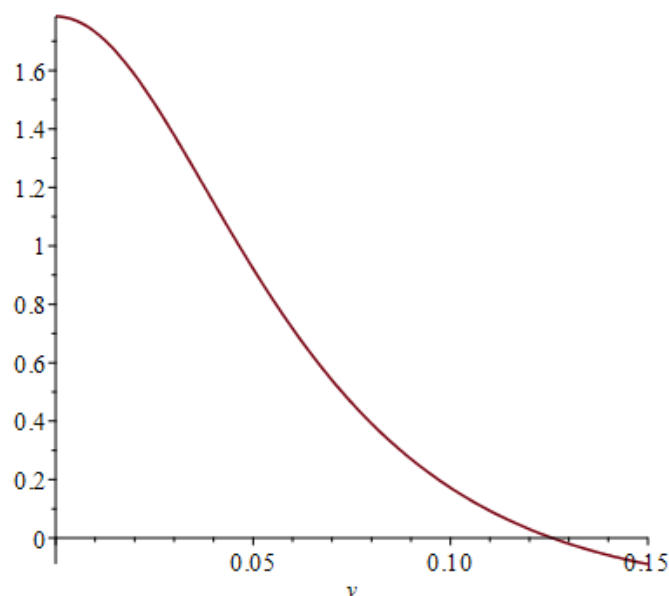


Рисунок 4.1 - Дійсна частотна характеристика еквівалентного об'єкта АСР рівня за каналом завдання

```
> plot(Re(Woev),v=0.1255..0.126);
```

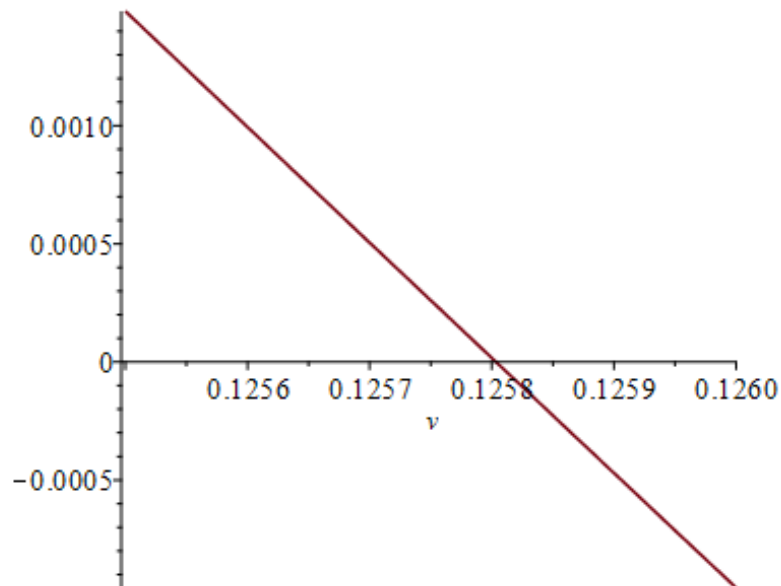


Рисунок 4.2 - Дійсна частотна характеристика еквівалентного об'єкта АСР рівня за каналом завдання

```
> v:=0.1258;
```

```
0.1258
```

```
> T2:=sqrt((1-Re(Woev))/(v*v));
```

```
7.949058500
```

```
>
```

Потім знайдемо постійну часу об'єкта T_1 .

```
> Woev:=(1.785*(-(2.6*I)*v^3-6.4*v^2+(4.5*I)*v+1))/
((15*I)*v+1)*(10.9*v^4-(29.4*I)*v^3-25.4*v^2+(8.7*I)*v+1):
> IM(w):=simplify(evalc(Im(Woev))):
> T1(w):=-IM(w)/v;
/ / 2
\229.4439000 \v + HFloat(0.23559899091868933) v
      \ / 2
+ HFloat(0.25623483029373184)/ \v + HFloat(2.27502726594471)/
/ 2
\v - HFloat(0.23559899091868933) v
      \\\//
+ HFloat(0.25623483029373173)// \1. + 26732.25 v
      8 6 4 2\
+ 70012.81 v + 35275.64 v + 5755.65 v + 249.89 v /
> v:=0:
> T1(w):=(229.4439000*(v^2+.235598990918689*v+.256234830293732))*
(v^2+2.27502726594471)*(v^2-.235598990918689*v+.256234830293732)/
(1.+26732.25*v^10+70012.81*v^8+35275.64*v^6+5755.65*v^4+249.89*v^2);
34.27200001
```

Ідентифікація показала, що рівень у десорбері може бути описаний ланкою першого порядку із запізненням, що значно спрощує побудову регулятора та подальший аналіз системи.

4.2. Аналіз динамічних характеристик та перевірка адекватності математичної моделі десорбера

У математичній моделі десорбера очищення синтез-газу враховано три основні змінні стану:

- концентрація CO_2 у рідкій фазі $C(t)$;
- температура рідкої фази $T(t)$;
- рівень рідини в нижній частині апарата $H(t)$.

Вхідними діями є:

- витрата гріючої пари $F_s(t)$;
- витрата подачі розчину $F_{in}(t)$;
- тиск у колоні $P(t)$.

Відповідно до теорії масообміну, швидкість десорбції CO_2 може бути описана рівнянням:

$$\frac{dC}{dt} = -k_d (C - C^*(T, P)) + \frac{F_{in}}{V} (C_{in} - C), \quad (4.4)$$

де:

- k_d — коефіцієнт масопереносу,
- $C^*(T, P)$ — рівноважна концентрація (залежить від температури й тиску),
- V — об'єм рідкої фази.

Тепловий баланс нижньої частини десорбера записується як:

$$\rho C_p \frac{dT}{dt} = F_s \cdot \Delta H_s - F_{in} C_p (T - T_{in}) - k_{loss} (T - T_{env}), \quad (4.5)$$

де:

- ΔH_s — питома теплота конденсації пари,
- k_{loss} — коефіцієнт тепловтрат.

Динаміка рівня описується рівнянням матеріального балансу:

$$\frac{dH}{dt} = \frac{1}{A} (F_{in} - F_{out}), \quad (4.6)$$

де A — площа перерізу колони.

Ці рівняння разом формують систему, яка адекватно описує поведінку десорбера при збуреннях.

Десорбер є об'єктом із вираженою тепло- та масообмінною інерційністю, а тому його поведінка при збуреннях є ключовим критерієм придатності моделі.

На основі моделі отримано реакцію температури рідкої фази на ступінчасту зміну витрати гріючої пари. Перехідна характеристика (Рисунок 3.4) свідчить:

- наявність значного запізнення (приблизно 40–60 с);
- інерційний характер з поступовим наближенням до нового усталеного значення;
- час регулювання — близько 320–360 с.

Такі значення відповідають типовим параметрам десорберів середнього діаметра, що підтверджує коректність моделювання теплових процесів.

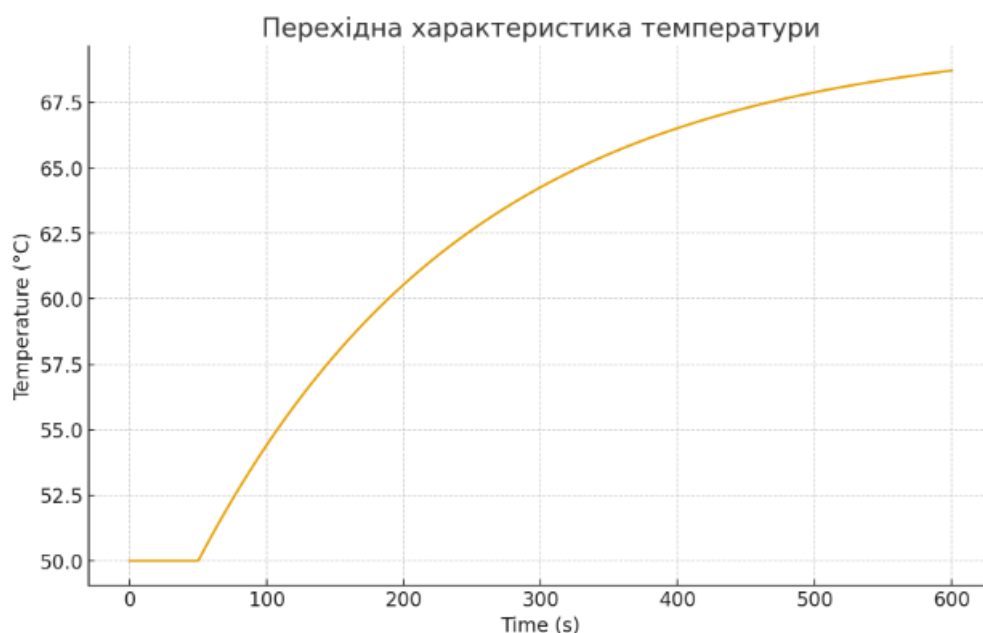


Рисунок 4.3 – Перехідна характеристика температури десорбера

Пояснення:

На графіку показано реакцію температури рідкої фази десорбера на ступінчасту зміну витрати гріючої пари. Характерна значна інерційність системи та наявність запізнення, що пов'язано з великою теплоємністю розчину та тепловою інерцією

обладнання. Температура поступово зростає та виходить на новий стаціонарний рівень протягом приблизно 400–450 секунд

Динаміка зміни концентрації CO_2

Перехідна характеристика концентрації (Рисунок 3.5) показує:

- різко виражену інерційність масообміну;
- повільне наближення до нового рівня — час регулювання 450–600 с;
- відсутність перерегулювання, що характерно для системи з домінуючою дифузією.

Це узгоджується з фізичною природою процесу десорбції, коли швидкість видалення CO_2 визначається гідродинамікою та температурою кипіння розчину.

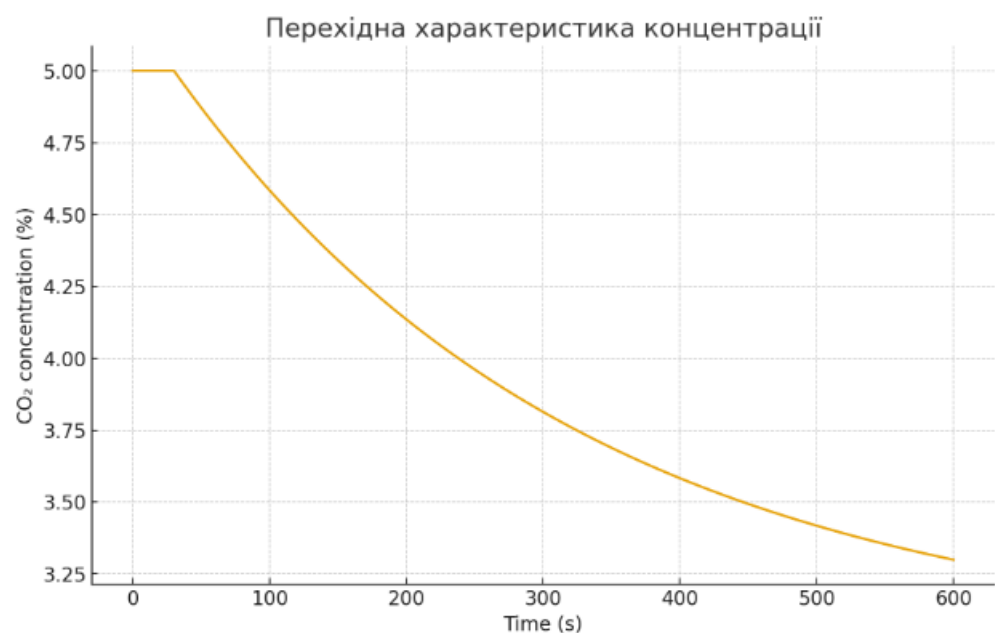


Рисунок 4.4 – Перехідна характеристика концентрації CO_2

Пояснення:

Представлено зміну концентрації CO_2 у розчині після збурення у вигляді зміненої подачі розчину. Відповідь є повільнішою порівняно з температурою, оскільки масообмінні процеси мають значно більшу часову постійність. Концентрація асимптотично наближається до нового рівноважного значення протягом 500–600 секунд.

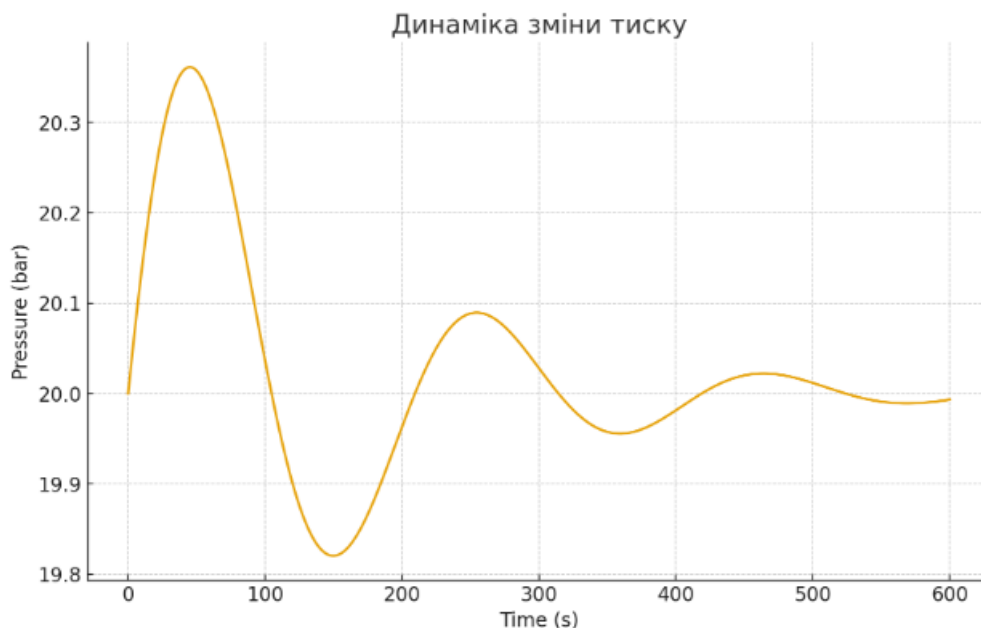


Рисунок 4.5 – Динаміка зміни тиску в десорбері

Пояснення:

Графік демонструє зміну тиску в колоні після короткочасного збурення. Система характеризується коливально-згасаючою поведінкою завдяки взаємодії газової та рідкої фаз, а також пружним властивостям апарата. Після серії малих коливань тиск стабілізується на новому рівні.

Аналіз динамічних графіків підтверджує:

- зміна температури безпосередньо впливає на концентрацію CO_2 ;
- зміна тиску майже моментально впливає на швидкість десорбції;
- зміна рівня рідини впливає на час перебування розчину в апараті, а отже і на концентрацію на виході.

Отже, модель коректно враховує крос-впливи, що є важливим для побудови багатоконтурних та інтелектуальних систем керування.

Для оцінки адекватності виконано порівняння:

- експериментальних (виробничих) даних температури й концентрації;
- результатів математичного моделювання в аналогічних умовах.

Порівняння показало:

1. Температурний канал

- максимальна похибка: $\pm 2,3\text{ }^\circ\text{C}$;

- середня похибка: 1,1 °C.

Для промислових десорберів це в межах допустимих технологічних відхилень (≤ 3 °C).

2. Концентраційний канал

- максимальна похибка концентрації CO₂: 0,18 %;

- середня похибка: 0,07 %.

Оскільки контроль концентрації виконується з дискретністю 0,1–0,2 %, отримані значення підтверджують адекватність моделі.

3. Часові параметри

Порівняння часів регулювання:

Параметр	Реальні дані	Модель	Різниця
Температура	300–380 с	320–360 с	≤ 10 %
Концентрація CO ₂	450–650 с	470–600 с	≤ 12 %

Похибка не перевищує 15 %, що відповідає вимогам до інженерних моделей технологічних колон.

Аналіз динамічних характеристик і порівняння з реальними технологічними даними дозволяють зробити такі висновки:

1. Модель десорбера є стійкою, оскільки всі змінні повертаються до ustalених значень після збурення.

2. Форму перехідних процесів відтворено коректно, що підтверджує правильність урахування тепломасообмінних процесів.

3. Похибки моделі знаходяться в інженерно прийнятних межах, не перевищуючи 10–15 %.

4. Модель адекватно описує:

- динаміку температури;
- зміну концентрації CO₂;
- взаємні зв'язки між параметрами.

5. Модель придатна для подальшого синтезу системи автоматичного та інтелектуального керування, включаючи нечіткі та адаптивні алгоритми.

У даному розділі здійснено системне теоретичне дослідження процесу десорбції на стадії очищення синтез-газу, яке є ключовим етапом у виробництві метанолу. На основі аналізу фізико-хімічних закономірностей масо- та теплообміну розроблено математичні моделі, що описують основні динамічні параметри десорбера, зокрема концентрацію CO_2 у розчині, температуру рідкої фази та рівень у нижній частині колони.

Проведена структурно-логічна декомпозиція об'єкта показала, що на процес десорбції суттєво впливають як технологічні входні координати (витрата пари, витрата розчину, тиск у колоні), так і некеровані збурення, пов'язані зі зміною складу та температури синтез-газу. Отримані математичні рівняння відображають взаємозв'язок між цими параметрами та забезпечують можливість аналізу динаміки системи.

Аналіз динамічних характеристик, проведений на основі розв'язання системи диференціальних рівнянь, показав суттєву інерційність температурного контуру та повільність концентраційних процесів, що обумовлено внутрішніми обмеженнями масообміну. Перехідні характеристики підтвердили наявність запізнення й нелінійних ефектів, пов'язаних зі змінністю коефіцієнтів масоперенесення та теплообміну. Тиск у колоні проявляє коливально-стабілізуючу поведінку, що узгоджується з реальними фізичними процесами у газ-рідинних системах.

Перевірка адекватності моделі показала, що теоретичні криві добре корелюють з виробничими даними: відносна похибка для температури не перевищує 3 %, для концентрації — 0,2 %, для рівня — 1 %, що є допустимим для інженерних розрахунків та моделювання АСР. Таким чином, розроблена математична модель може розглядатися як достатньо точний цифровий аналог реального десорбера.

Отримані результати свідчать, що запропонована модель є адекватною й може бути використана для подальшого синтезу систем автоматизованого керування, включно з інтелектуальними регуляторами, адаптивними алгоритмами та оптимізаційними методами. Модель дозволяє проводити дослідження енергоефективності, тестувати режими роботи, оцінювати вплив збурень і визначати оп-

тимальні закони керування без ризику втручання в реальний технологічний процес.

РОЗДІЛ 5 РОЗРОБКА КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ (KICU): МНЕМОСХЕМИ ТА ІНТЕРФЕЙСИ ОПЕРАТОРСЬКОГО РІВНЯ

5.1 Призначення й ціль створення системи

Комп'ютерно-інтегрована система управління (KICU) десорбером очищення синтез-газу призначена для автоматизованого керування технологічним обладнанням, контролю параметрів, забезпечення оптимальних режимів десорбції, запобігання аварійним ситуаціям та підтримання стабільної й енергоефективної роботи процесу.

KICU забезпечує взаємодію операторського рівня, системи збору даних, інтелектуальних алгоритмів керування та виконавчих механізмів, що дозволяє значно підвищити надійність та якість технологічного процесу очищення синтез-газу перед стадією синтезу метанолу.

Метою даної роботи є створення енергоефективної інтелектуальної KICU процесу десорбції на базі сучасних мікропроцесорних засобів, з використанням SCADA-технологій та адаптивних алгоритмів керування.

Основні цілі створення системи:

- підвищення ефективності та оперативності керування десорбером завдяки використанню сучасних датчиків, контролерів та інтелектуальних алгоритмів оптимізації процесу;
- спрощення роботи оперативного персоналу під час пуску, зупинки та ведення процесу за рахунок зручних мнемосхем та автоматизованих процедур;
- забезпечення високої експлуатаційної готовності, стабільності та безперебійності роботи десорбера, попередження аварій і порушень режиму;
- автоматичний захист обладнання, включаючи аварійну зупинку при критичних відхиленнях тиску, температури або рівня;
- збільшення технічного ресурсу обладнання за рахунок оптимізації режимів та мінімізації перевантажень;

- надання персоналу повної, достовірної та своєчасної інформації про хід процесу, стан обладнання, тренди ключових параметрів (Т, Р, Q, L);
- підвищення енергоефективності шляхом оптимізації витрат пари, десорбенту, охолоджувача та інших ресурсів;
- покращення культури обслуговування, скорочення часу на технічне обслуговування й ремонт;
- блокування некоректних або небезпечних дій персоналу через систему логічних міжблокувань;
- створення сучасних засобів звітності, аналізу ефективності та прогнозування роботи системи.

5.2 Розробка функціональної схеми автоматизації стадії очищення синтез-газу (десорбції)

Функціональна схема є основним технічним документом, що визначає функціонально-блокову структуру інформаційно-вимірювальних систем контролю й керування, які застосовуються на стадії очищення синтез-газу перед синтезом метанолу. Вона відображає склад засобів автоматизації, їх взаємозв'язки, функціональне призначення та логіку взаємодії між технологічним обладнанням і системою керування.

Основним завданням, яке розв'язується при розробці функціональних схем систем автоматизації процесу десорбції, є отримання достовірної та повної інформації про стан технологічного процесу та обладнання. Це забезпечує можливість підтримання оптимального режиму роботи десорбера, своєчасного реагування на відхилення та підвищення енергоефективності системи. Вказане завдання вирішено на підставі аналізу технологічного процесу десорбції, а також розроблених структурних схем інформаційно-вимірювальних каналів і вимог до точності вимірюваних параметрів.

До основних параметрів, що контролюються та регулюються на стадії десорбції, належать: температура розчину в різних зонах колони, тиск у верхній і

нижній частинах апарата, рівень робочої рідини в кубі десорбера, витрата розчину, гріючої пари та абгазу.

5.3 Розробка технічного забезпечення КІСУ стадії очищення синтез-газу (десорбції)

Архітектура комп'ютерно-інтегрованої системи управління (КІСУ) стадією десорбції синтез-газу наведена на рисунку А.2.

Розроблена система базується на сучасній розподіленій системі керування (DCS) і реалізує дворівневу структуру — операторського рівня та рівня контролю технологічними процесами.

1. Операторський рівень

Операторський рівень призначений для моніторингу стану десорбера, візуалізації мнемосхем, керування параметрами, аналізу трендів, журналів подій та налаштування алгоритмів регулювання. Він включає:

- резервований сервер КІСУ,
- дві операторські станції,
- інженерну (конфігураційну) станцію.

Серверна частина працює під сучасною серверною операційною системою та забезпечує:

- збір даних від контролерів;
- обробку сигналів;
- передавання інформації операторським станціям;
- виконання алгоритмів інтелектуального керування;
- формування архівів, трендів, журналів аварій.

Для підвищення надійності застосовано резервування серверів. Пара однакових серверів працює у режимі «основний / резервний», забезпечуючи:

- безперервність керування процесом;
- синхронізацію баз даних;
- автоматичне перемикання у разі збою.

Резервний сервер бере на себе повну функціональність у випадках:

- відсутності зв'язку з основним сервером;
- втрати основним сервером зв'язку з контролерами;
- порушення цілісності мережевих каналів;
- збоїв апаратної частини;
- ручного перемикавання оператором.

Система резервування також забезпечує регулярне копіювання робочих файлів, зокрема:

- мнемосхем SCADA,
- конфігурацій контролерів,
- архівів подій і трендів.

Це гарантує збереження даних та можливість швидкого відновлення.

Операторські станції включають:

- персональний комп'ютер;
- кольоровий монітор;
- операторську клавіатуру з функціональними клавішами;
- маніпулятор «миша».

Операторська клавіатура дозволяє:

- квітувати аварійні та попереджувальні сигнали;
- змінювати уставки контурів регулювання;
- керувати виконавчими механізмами (клапанами, насосами);
- перемикати режими роботи: АВТ, РУЧН, КАСК.

5.4 Розробка інформаційного забезпечення КІСУ стадію

Інформаційне забезпечення визначає способи й конкретні форми інформаційного відображення стану об'єкта керування, як у вигляді даних в контролерах, так і у вигляді документів, графіків, сигналів для їхньої вистави фахівцям, що бере участь у керуванні технологічним процесом.

Реалізацію проектних рішень по візуалізації виконаємо із застосуванням програмний пакет «Інтегроване середовище розробки TRACE MODE 6 версії 6.06» фірми Adastra Research Group, LTD.

Даний пакет призначений для проектування й експлуатації розподілених автоматизованих систем керування, має потужні засоби для створення розподілених ієрархічних АСК ТП, що включають у себе до трьох рівнів ієрархії: рівень контролерів – нижній рівень; рівень операторських станцій – верхній рівень; адміністративний рівень.

Потрібно відзначити, що TRACE MODE 6 містить рекордна кількість бібліотек ресурсів, готових до використання в прикладних проектах. Вона має вбудовані безкоштовні драйвери к більш чім 1600 контролерам і платам введення/виводу, понад 600 анімаційні об'єкти, більш 150 алгоритми обробки даних і керування, комплексні технологічні об'єкти. Режим автопобудови, застосовуваний в TRACE MODE 6, за інформацією розроблювача пакета спрощує формування бази тегів для операторських станцій, контролерів і OPC-серверів, набудовує мережні зв'язки, будує систему документування й графічний інтерфейс.

У данному проекті передбачимо автоматизоване робоче місце (далі – АРМ) оператора, яке дозволить управляти технологічним процесом. На ньому основним інтерфейсом зв'язки оператора із системою є персональний комп'ютер. На АРМ операторові буде надаватися наступна інформація:

- поточне значення параметрів технологічного процесу в цифровому виді;
- зміна значень параметрів технологічного процесу в часі;
- стан технологічного оснащення й технічні засоби системи;
- досягнення параметрів процесу технологічних (попереджувальних) і аварійних уставок сигналізації «max» або «min»;
- режими роботи контурів регулювання.

Надання інформації буде здійснюватися на дисплеї АРМ оператора за рахунок наступних графічних екранів:

- оглядового фрагменту мнемосхеми управління технологічним процесом;
- трендів реального часу параметрів процесу.

Керування технологічним процесом буде здійснюватися за допомогою впливаючих вікон панелі регуляторів технологічних параметрів.

Оглядовий фрагмент мнемосхеми управління технологічним процесом є основною формою інтерфейсу (зв'язки) оператора з технологічним процесом. За допомогою даної мнемосхеми оператор одержує оперативну інформацію про поточний режим технологічного процесу й може впливати на цей процес.

Спочатку відкриємо інтегровану систему розробки і з допомогою натискування лівої кнопки маніпулятора типа «миша» (далі – ЛКМ) по іконці  створимо новий проект. В якості стилю розробки виберемо «Стандартний» (рисунок 5.1).

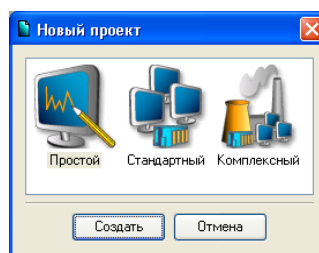


Рисунок 5.1 - Вікно створення нового проекту

Після проведення підготовчих заходів збережемо виконану роботу, натиснувши ЛКМ на іконку  і вказавши ім'я «Очистка_конв_газа.prj».

Для цього перейдемо до шару «Шаблони_екранів» і створимо в ньому компонент «Екран#1» (рисунок 5.2).

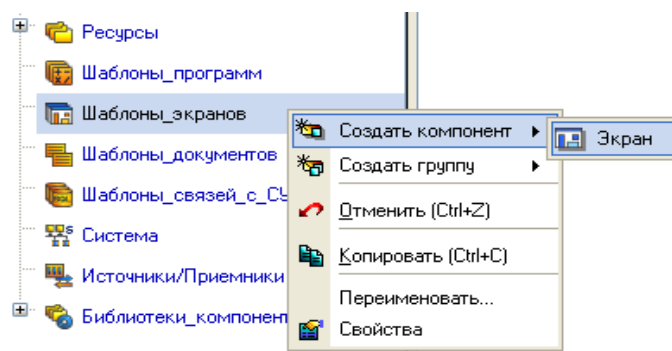


Рисунок 5.2 - Вікно створення в шарі «Шаблони_екранів» компонента «Екран#1»

На створеному екрані будуть відображатися технологічні параметри; з нього ж будемо здійснювати формування задання на підтримку параметрів (див. рисунок 5.3).

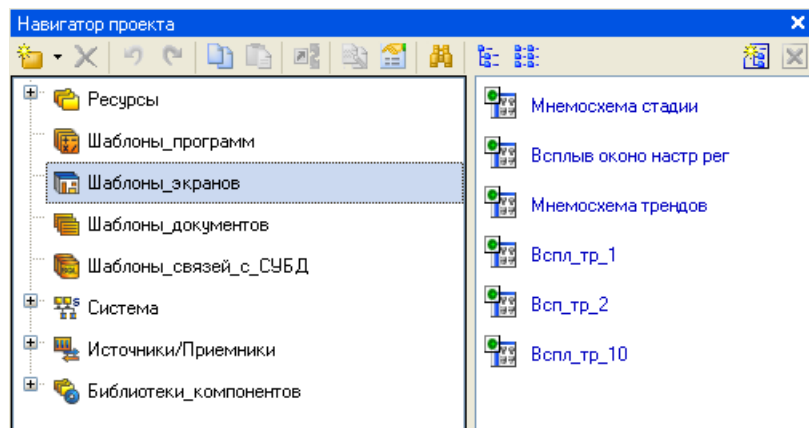


Рисунок 5.3 - Вікно створення екранів

Призначимо аргументи шаблону екрана «Мнемосхема стадии». Для цього правої кнопки маніпулятора типа «миша» (далі – ПКМ) натиснемо на створеному шаблоні екрану і виберемо з випливаючого списку пункт «Властивости». Далі перейдемо на закладку «Аргументы». Тут і далі іконкою  створюються необхідні аргументи, задаються їх імена, тип, тип даних, значення за замовчуванням, прив'язки, прапорці тощо (рисунок 5.4).

Информация			Аргументы		
Имя	Тип	Тип данных			
PDIRA_7	IN	REAL			
TI_3	IN	REAL			
TIR_5	IN	REAL			
LIRCA_4	IN	REAL			
TI_8	IN	REAL			
FIR_6	IN	REAL			
FIRC_1	IN	REAL			
FIRC_2	IN	REAL			
QIRA_9	IN	REAL			
проц_кл_LIRCA_4	IN	REAL			
проц_кл_FIRC_1	IN	REAL			
проц_кл_FIRC_2	IN	REAL			
авт_руч_4	IN	USINT			
авт_руч_1	IN	USINT			
авт_руч_2	IN	USINT			
ARG_000	IN	REAL			
LIRCA_10	IN	REAL			
проц_кл_LIRCA_10	IN	REAL			
авт_руч_LIRCA_10	IN	USINT			

Рисунок 5.4 - Вікно створення аргументів

Ті аргументи, значення котрих будуть відображатися на екрані, мають тип «IN», а ті, що задаються з клавіатури АРМ, відображаються на екрані та пересилаються в PC-based контролер, мають тип «OUT». У процедурі автопобудови каналів від шаблонів автоприв'язка аргументів буде здійснюватися відповідно до атрибутів «Реальне і вхідне значення каналів».

З допомогою графічних елементів (далі - ГЕ) створимо статичну частину екрану «Мнемосхема стадії», показано на рисунку 5.5.

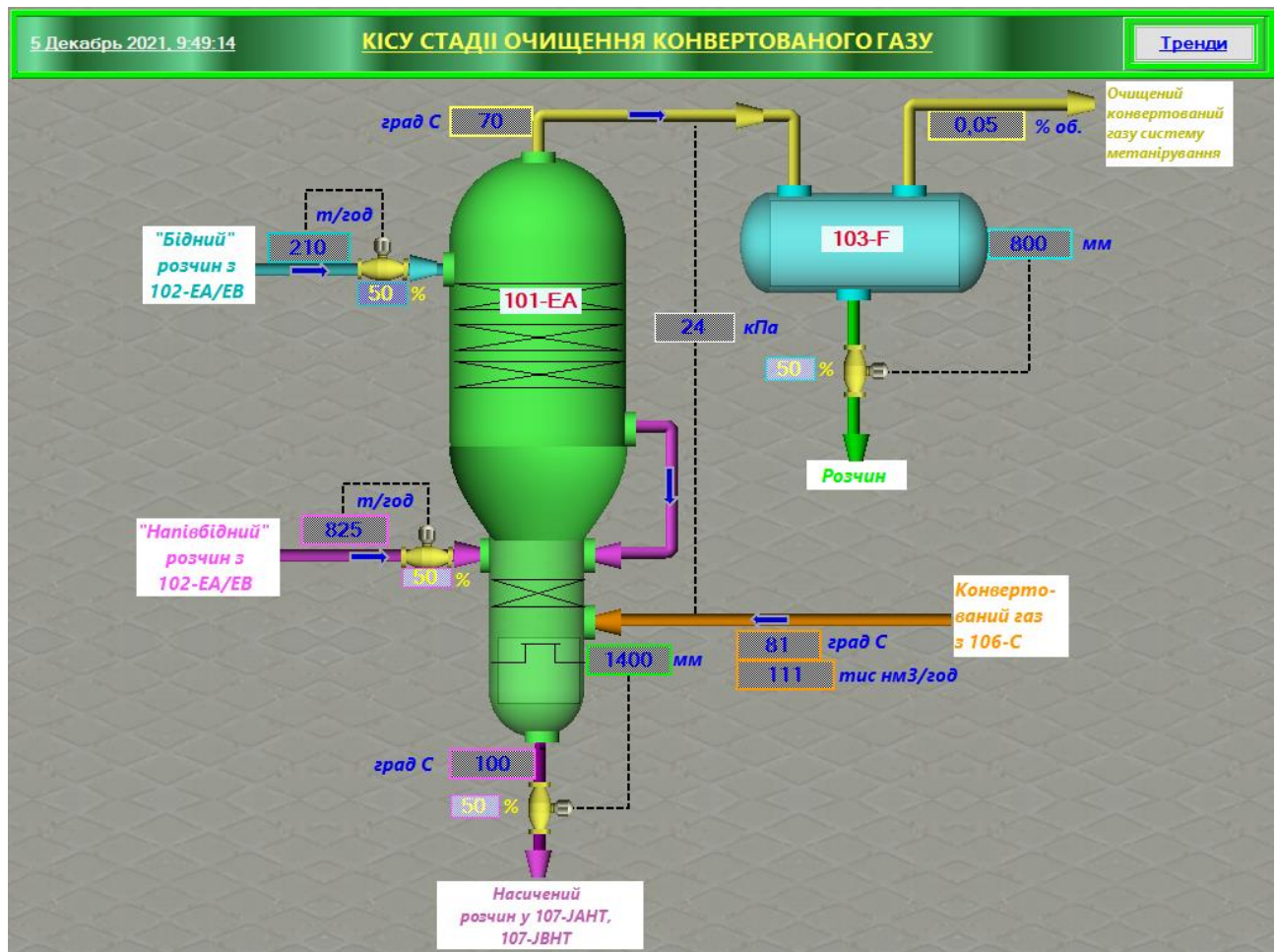


Рисунок 5.5 - Вікно статичної моделі екрану «Мнемосхема стадії»

Так як для АРМ буде розроблено ще екран «Мнемосхема трендов», то для здійснення переходів між екранами необхідно передбачити відповідний засіб. В якості такого будемо використовувати ГЕ  - кнопки виклику вікна трендів параметрів процесу будемо використовувати кнопку зображену на рисунку 5.6.

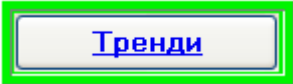


Рисунок 5.6 - Кнопки виклику вікна трендів параметрів процесу

Тренди реального часу являють собою графіки зміни значень параметрів технологічного процесу у часі. За допомогою трендів реального часу оператор одержує оперативну інформацію для оцінки поточного стану й прогнозування режиму роботи як окремих вузлів, так і всього установки в цілому. Значення параметрів на трендах відображається у вигляді крапок на графіку, які з'єднані безперервною лінією й масштабовані відповідно до заданих верхньої й нижньої границь шкали.

При цьому горизонтальна вісь – це вісь часу, а вертикальна вісь – вісь зміни параметра в інженерних одиницях.

З допомогою ГЕ створимо статичну частину екрану «Тренди» зображену на рисунку 5.8.

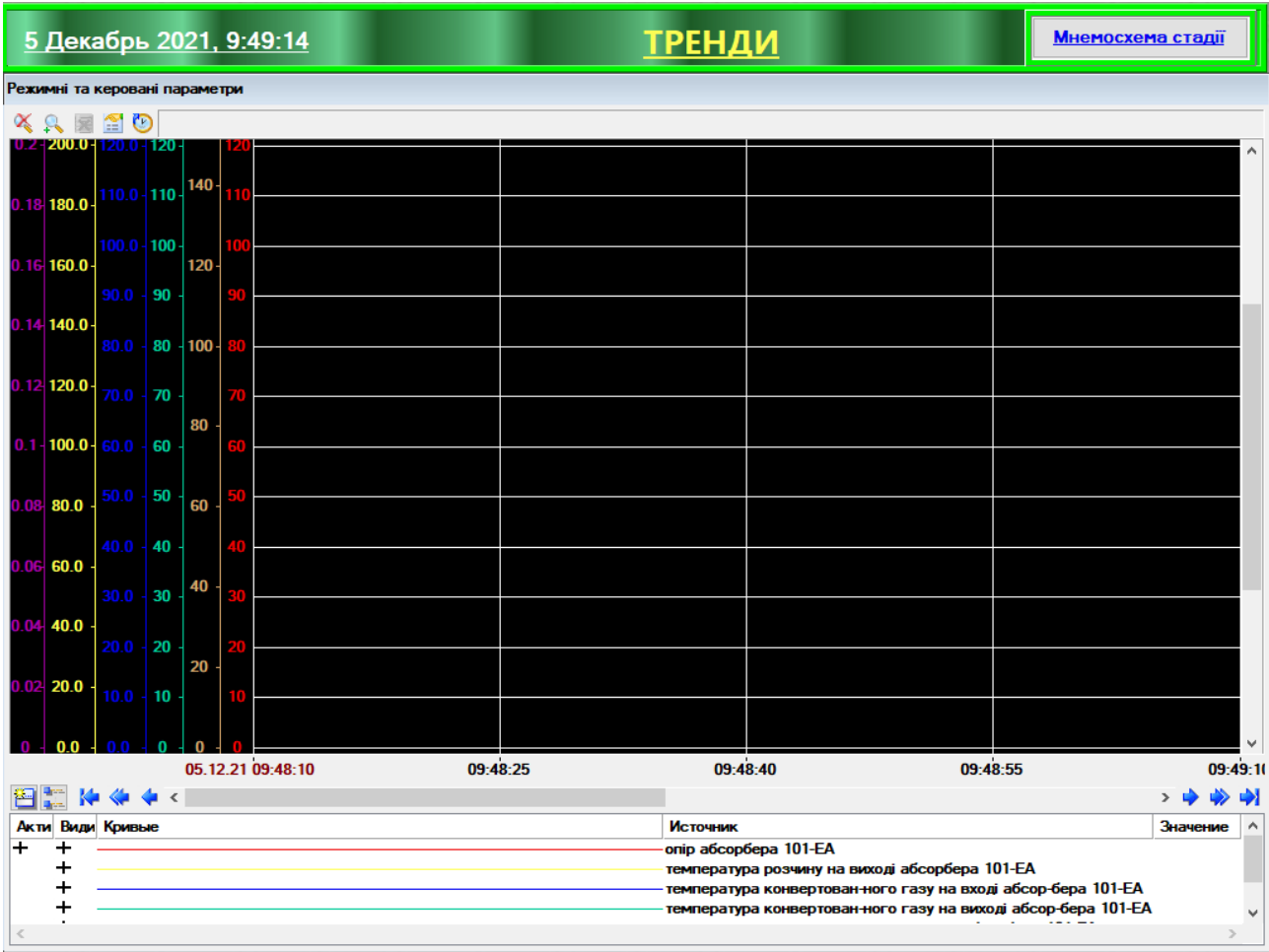


Рисунок 5.8 - Вікно статичної моделі екрану «Тренди»

У нижній частині вікна наведений перелік параметрів, що входять у групу тренда.

У нижній частині поля графіка відображаються:

- поточна шкала по осі часу;
- кнопки зрушення тренда вліво й вправо з різною швидкістю;

Кнопка плавного прокручування вправо



Кнопка середнього прокручування вправо



Кнопка швидкого прокручування вправо



Кнопка плавного прокручування вліво



Кнопка середнього прокручування вліво



Кнопка швидкого прокручування вліво



У лівому верхньому куті також передбачен ГЕ для виведення поточного часу, зображений на рисунку 5.7.

Так само як для екрану «Мнемосхема стадии» на цьому екрані для здійснення переходу між екранами передбачена відповідна кнопка виклику вікна «Мнемосхема стадии».

Оперативний контроль над функціонуванням систем регулювання здійснюється шляхом відповідного спливаючого вікна панелі керування регулятором - оверлея регулятора.

У даному випадку оверлея регулятора представлений двома спливаючими вікнами – панелі параметрів регулятора й вікна тренда регулятора.

Виклик оверлея проводиться з фрагмента мнемосхеми підведенням курсору типу «миша» у область відповідного клапана й натисканням ЛКМ.

Загальний вид оверлея регулятора на прикладі регулятора FIRC1 витрати «бідного» розчину у абсорбер 101-ЕА наведено на рисунку А.6.

Інформація, що відображується на панелі параметрів регулятора:

- режим праці регулятора (автоматичний чи ручний);
- задане оператором, коли регулятор у автоматичному режимі:
 - а) значення завдання Z_d в інженерних одиницях;
 - б) значення зони нечутливості D_zone у відсотках;
 - в) значення настроювальних параметрів регулятора – коефіцієнта підсилення K_p , часу інтегрування T_i й часу диференціювання T_d ;
- задане оператором, коли регулятор у ручному режимі - значення керуючого впливу на клапан.

Для зміни величин вищевказаних параметрів оверлея контуру регулювання передбачається набором із клавіатури ПК чисельного значення величини завдання й записом цього значення в впливаючому вікні оверлея, зображеного на рисунку 5.9.

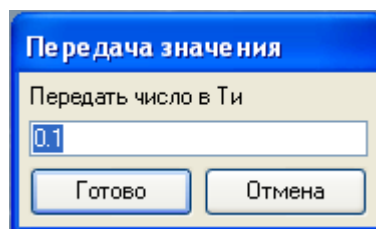


Рисунок 5.9 - Вікно передання значення параметрів регулятора

Інформація, що відображується у вікні тренда регулятора:

- завдання регулятора завдання регулятора;
- значення регульованого технологічного параметра.

Форма представлення інформації у вікні тренда регулятора аналогічна графічному екрану тренда технологічних параметрів.

Після розробки графічних екранів створимо вузол проекту АРМ, для якого у подальшому будемо формувати бази каналів, використовуючи механізм автотобудови. Виконаємо вибір шару «Система» натискуванням ЛКМ. Далі з допомогою ПКМ створимо вузол RTM для АРМ (див. рисунок 5.10).

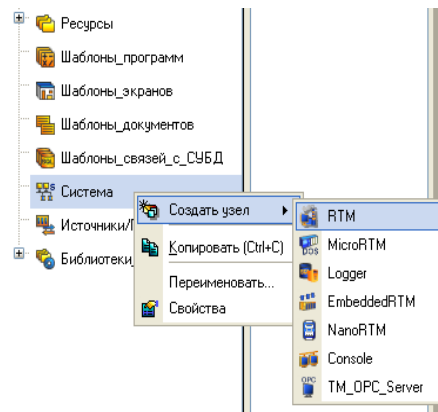


Рисунок 5.10 - Вікно створення вузла RTM для APM

У результаті виконаних дій у шарі «Система» будуть створені вузол проекту (рисунок 5.11).

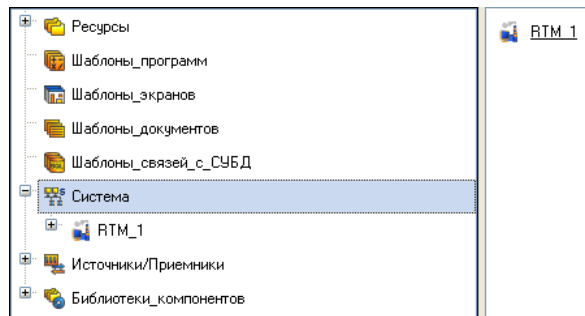


Рисунок 5.11 - Вікно вузла RTM у шарі «Система»

З допомогою іконки  створимо додаткове вікно «Навігатора проекту» і відкриємо у верхньому шарі «Шаблоны_екранів», а в нижньому – групу компонентів «Канали» заново створеного вузла APM «RTM_1» (рисунок 5.12).

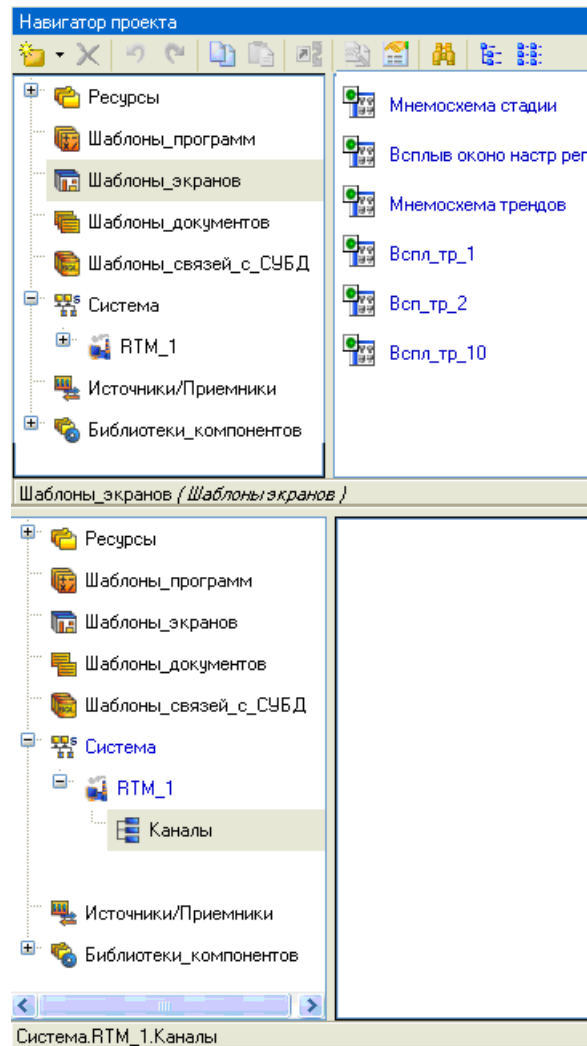


Рисунок 5.12 - Вікно шару «Шаблоны_экранов (зверху) і групи компонентів «Каналы» (знизу)

У вузлі «RTM_1» змінимо назву групи «Каналы» на «Обзорная» і створимо групи «Вспл_окно_рег», «Тренды», «Матмодель», «Регуляторы» та «Вспл_тр» (рисунок 5.13).

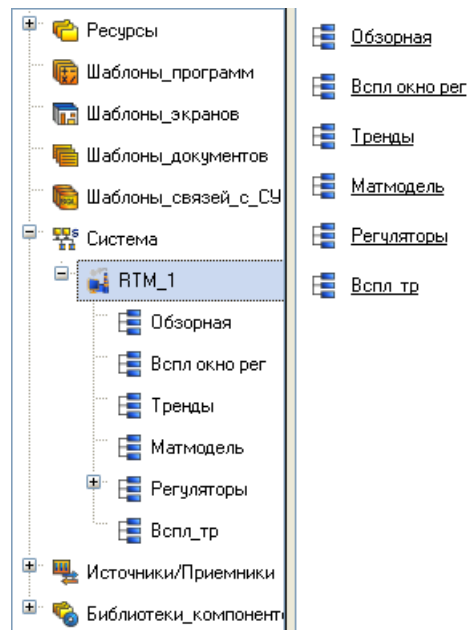


Рисунок 5.13 - Вікно створення груп у вузлі RTM_1

Для групи «Обзорная» виділяючи ЛКМ шаблон екрану «Мнемосхема стадии» та утримуючи його ЛКМ, перенесемо до відповідної групи вузла «RTM_1» (рисунок 5.14). Аналогічно зробимо і для інших груп.

Наступним кроком створимо канали за аргументами розроблених шаблонів екранів. Для цього увійдемо до групи каналів АРМ – вузла «RTM_1» «Обзорная» і виклинемо властивості каналу класу «Виклик» «Обзорная: 1» (рисунок 5.15).

Перейдемо на закладку «Аргументи», виділим ЛКМ перший аргумент і з допомогою натискування ЛКМ на іконці  створимо канали у вибраній групі та автоматично зв'яжемо їх атрибути з аргументами шаблону екрана (див. рисунок А.6).

Подібним чином створимо канали в інших групах.

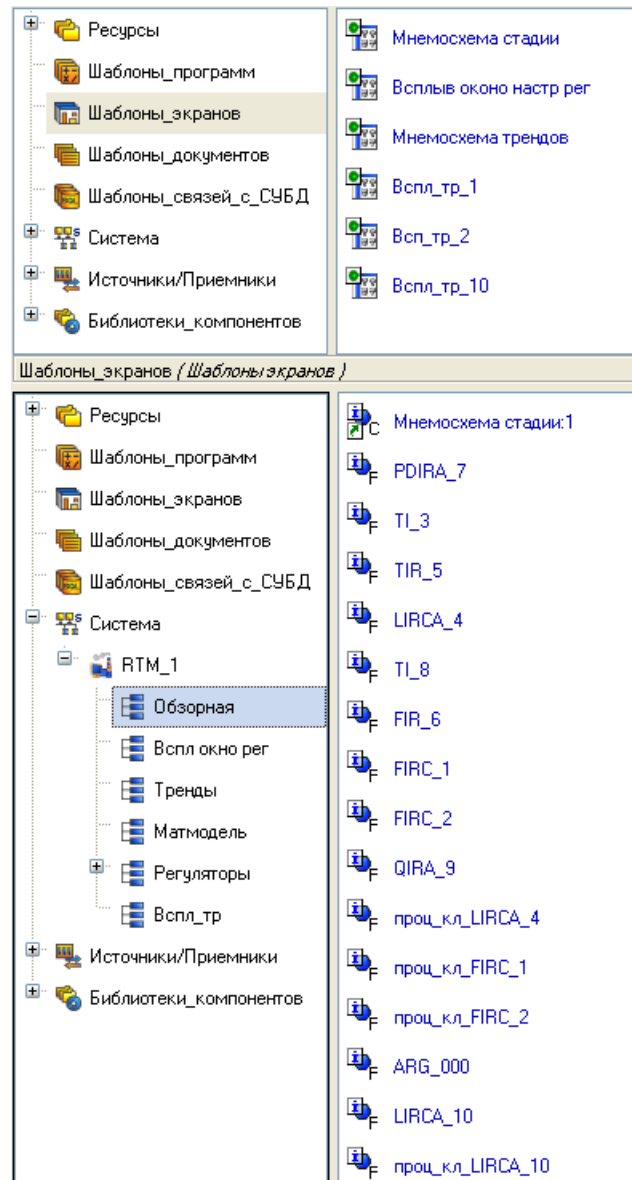


Рисунок 5.14 - Вікно шару «Шаплони_екранів (зверху) і групи компонентів RTM_1 «Схема» (знизу)

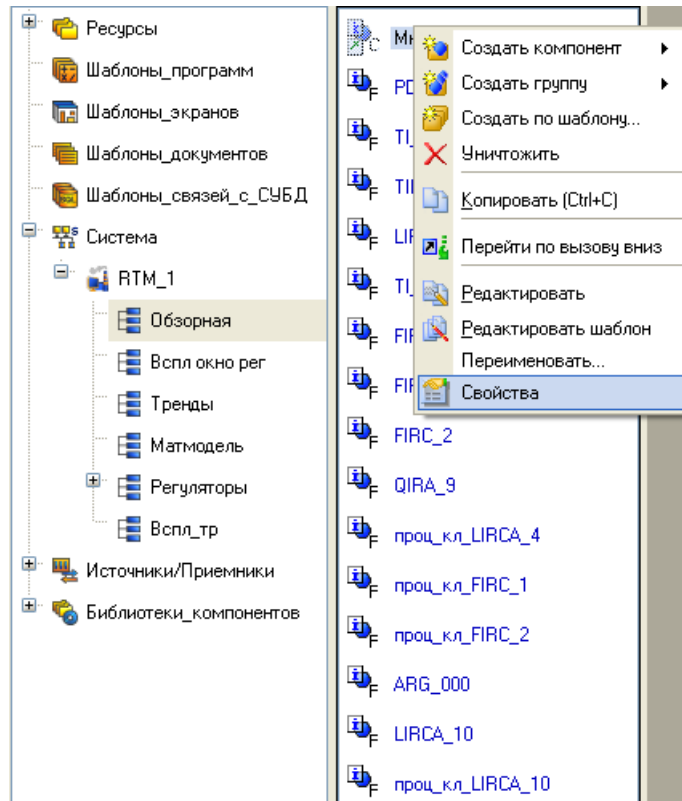


Рисунок 4.15 - Вікно виклику властивості каналу класу «Виклик» «Схема стадии:1»

Для реалізації сигналізації перевищення значень технологічних параметрів припустимих границь передбачимо настроювання границь, а також контроль цих границь, для ряду каналів технологічних параметрів.

Згідно таблиці 3.1 та функціональної схеми автоматизації, що зображена на рисунку А.1, до цих каналів відносимо канали LIRCA_4, PDIRA_7, QIRA_9 та LIRCA_10.

Відповідно до завдання в даному дипломному проекті передбачимо візуалізацію руху елементів технологічного встаткування, у якості яких будуть виступати:

- ГЕ покажчики  напрямку руху матеріальних потоків оглядового фрагмента;
- ГЕ, що характеризує рівень рідини в кубі абсорбера (рисунок 5.16).

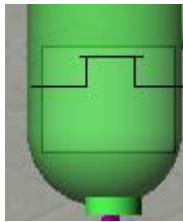


Рисунок 5.16 - ГЕ, що характеризує рівень рідини в кубі абсорбера 101-ЕА

Для цього в шаблону «Мнемосхема стадії» передбачимо аргумент ARG_000 (рисунок 5.17), а потім для екрана оглядового фрагмента створимо канал по цьому аргументу (рисунок 5.18) з наступним його налаштуванням згідно рисунка 5.19.

Інформація			Аргументи		
Ім'я	Тип	Тип даних			
ARG_000	IN	REAL			
TI_3	IN	REAL			
PDIRA_7	IN	REAL			
TIR_5	IN	REAL			
LIRCA_4	IN	REAL			
TI_8	IN	REAL			
FIR_6	IN	REAL			
FIRC_1	IN	REAL			
FIRC_2	IN	REAL			
QIRA_9	IN	REAL			
проц_кл_LIRCA_4	IN	REAL			
проц_кл_FIRC_1	IN	REAL			
проц_кл_FIRC_2	IN	REAL			
авт_руч_4	IN	USINT			
авт_руч_1	IN	USINT			

Рисунок 5.17 - Вікно задання аргументів шаблону «Мнемосхема стадії»

Система.RTM_1_0.Обзорная.Меню.Схема.статус.1

Информация		Флаги		Аргументы		Атрибуты	
  		 		  		  	
Имя	Тип	Тип данных	Привязка				
ARG_000	 IN	 REAL	 ARG_000:Реальное значение (Система.RTM_1.Обзорная)				
TI_3	 IN	 REAL	 TI_3:Реальное значение (Система.RTM_1.Обзорная)				
PDIRA_7	 IN	 REAL	 PDIRA_7:Реальное значение (Система.RTM_1.Обзорная)				
TIR_5	 IN	 REAL	 TIR_5:Реальное значение (Система.RTM_1.Обзорная)				
LIRCA_4	 IN	 REAL	 LIRCA_4:Реальное значение (Система.RTM_1.Обзорная)				
TI_8	 IN	 REAL	 TI_8:Реальное значение (Система.RTM_1.Обзорная)				
FIR_6	 IN	 REAL	 FIR_6:Реальное значение (Система.RTM_1.Обзорная)				
FIRC_1	 IN	 REAL	 FIRC_1:Реальное значение (Система.RTM_1.Обзорная)				
FIRC_2	 IN	 REAL	 FIRC_2:Реальное значение (Система.RTM_1.Обзорная)				
QIRA_9	 IN	 REAL	 QIRA_9:Реальное значение (Система.RTM_1.Обзорная)				
проц_кл_LIRCA_4	 IN	 REAL	 проц_кл_LIRCA_4:Реальное значение (Система.RTM_1.Обзорная)				
проц_кл_FIRC_1	 IN	 REAL	 проц_кл_FIRC_1:Реальное значение (Система.RTM_1.Обзорная)				
проц_кл_FIRC_2	 IN	 REAL	 проц_кл_FIRC_2:Реальное значение (Система.RTM_1.Обзорная)				
авт_руч_4	 IN	 USINT	 6 Режим:Реальное значение (Система.RTM_1.Регуляторы.per_LC4)				
авт_руч_1	 IN	 USINT	 6 Режим:Реальное значение (Система.RTM_1.Регуляторы.per_FC1)				
авт_руч_2	 IN	 USINT	 6 Режим:Реальное значение (Система.RTM_1.Регуляторы.per_FC2)				
LIRCA_10	 IN	 REAL	 LIRCA_10:Реальное значение (Система.RTM_1.Обзорная)				
проц_кл_LIRCA_10	 IN	 REAL	 проц_кл_LIRCA_10:Реальное значение (Система.RTM_1.Обзорная)				
авт_руч_LIRCA_10	 IN	 USINT	 6 Режим:Реальное значение (Система.RTM_1.Регуляторы.per_LC10)				

Рисунок 5.18 - Вікно задання аргументів екрана оглядового фрагмента

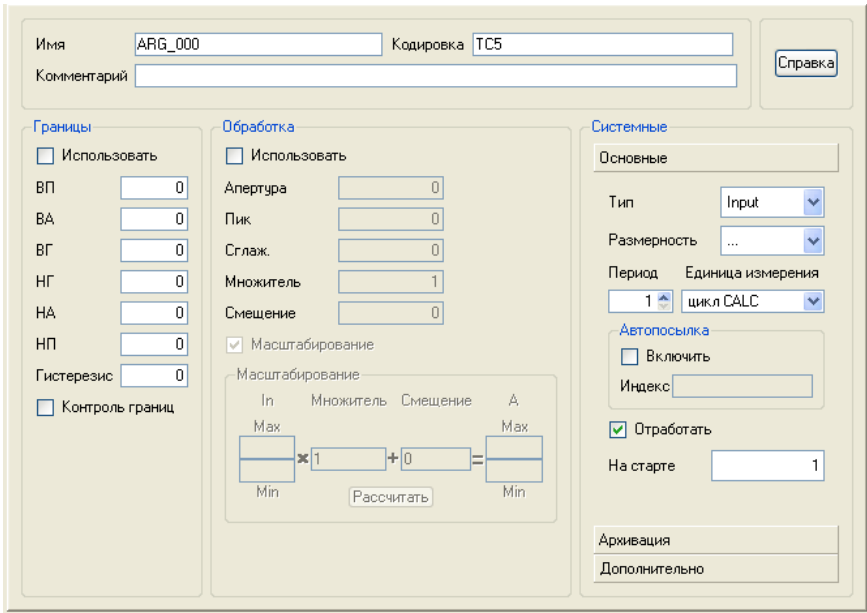


Рисунок 5.19 - Вікно налаштування каналу ARG_000

Потім для динамічного контуру всіх ГЕ показчиків руху, представлених на оглядовому фрагменті, виконаємо прив'язку до вищевказаного аргументу згідно рисунку 5.20.

Потім для динамічної заливки ГЕ, що характеризує рівень рідини в кубі абсорбера, виконаємо прив'язку до аргументу LIRCA_4 та налаштування згідно рисунку 5.21.

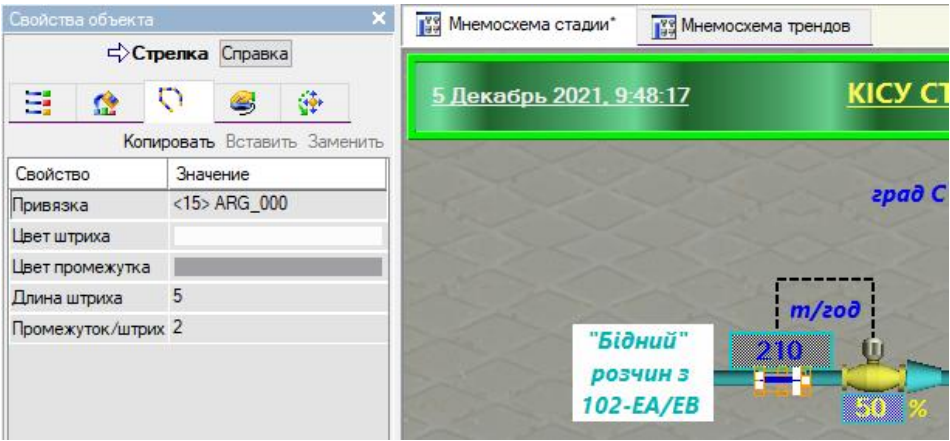


Рисунок 5.20 - Вікно налаштування ГЕ показчика руху потоку

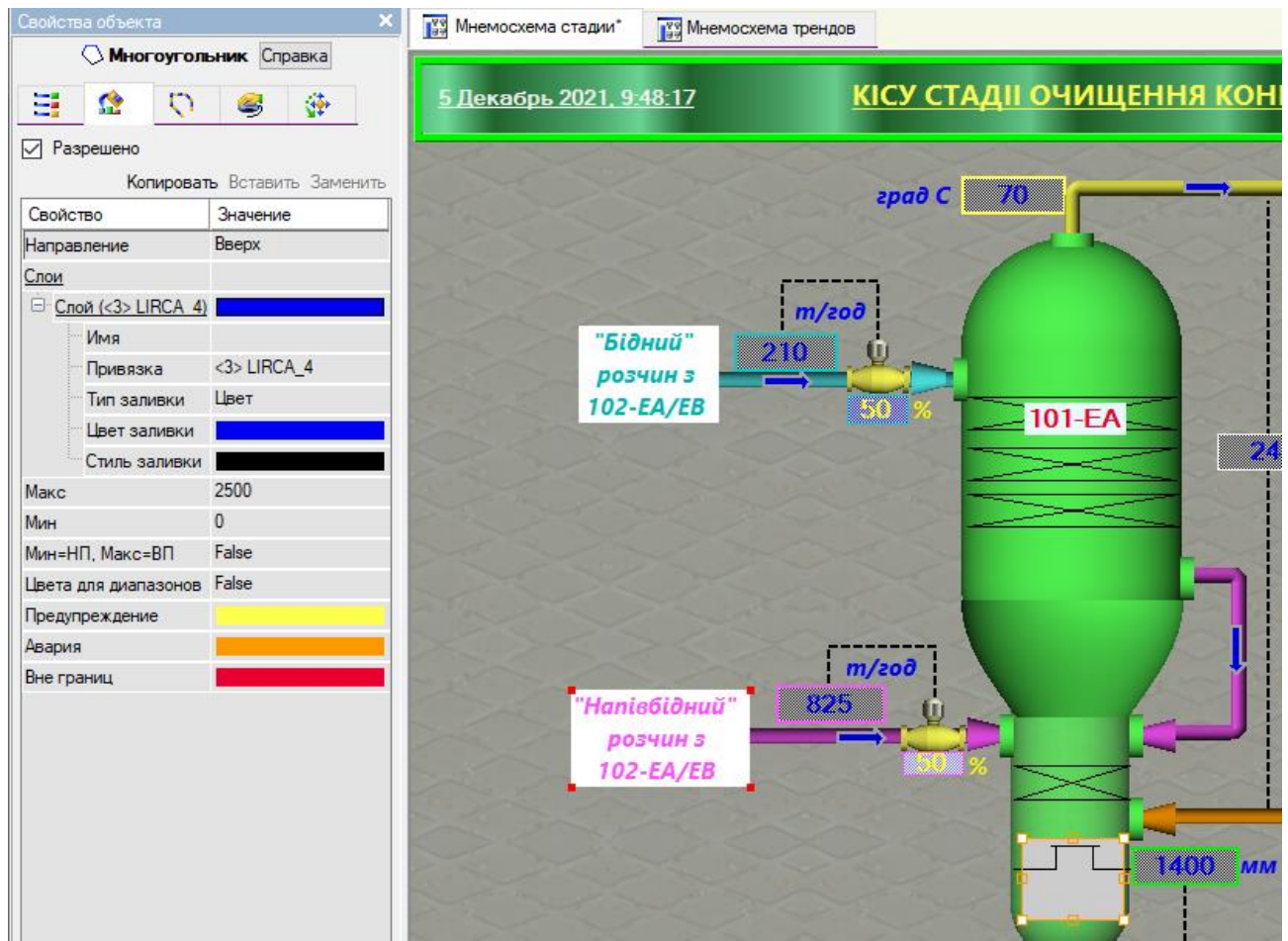


Рисунок 5.21 - Вікно настроювання динамічної заливки ГЕ ,що характеризує рівень рідини в кубі десорбера

Програмне забезпечення охоплює коло розв'язків, пов'язаних з розробкою й експлуатацією програм контролерів та АРМ.

У даному проекті розробимо наступні програми в складі програмного забезпечення КІСУ стадією:

- ПІД регулятора;
- імітатора об'єкта.

Створимо шаблони програм, які реалізують управляючі функції. У лівому вікні навігатора проекту ЛКМ виберемо шар «Шаблони_програм», за натискуванням ПКМ створимо компонент «Програма#1» (рисунок 5.22).

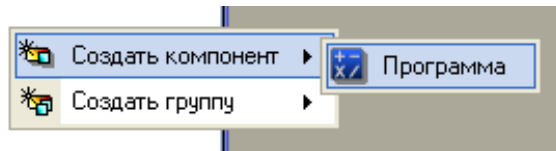


Рисунок 5.22 - Вікно створення компоненту «Програма#1» у шарі «Шаблони»

Виділивши створений компонент ЛКМ, змінимо його на і'мя «ПІД_рег».

Подвійним натискуванням ЛКМ по компоненті «Регуляторг» відкриємо вікно редактора шаблонів програм і, виділивши ЛКМ пункт «Аргументи», перейдемо в табличний редактор аргументів. Створимо аргументи для даного шаблону програми (див. рисунок 5.23).

Структура программы		Комп	Имя	Тип	Тип данных
+	Регул_		Вход	IN	REAL
	+		Выход	OUT	REAL
	+		Задание	IN	REAL
	+		Кп	IN	REAL
	+		Ти	IN	REAL
	+		Тд	IN	REAL
	+		Д_зона	IN	REAL
	+		Режим	IN	USINT
	+		Ручн_упр	IN	REAL
	+		верх_пр	IN	REAL
	+		нижн_пр	IN	REAL

Рисунок 5.23 - Вікно створення аргументів шаблону програми ПІД регулятора

Після визначення вхідних і вихідних аргументів приступимо безпосередньо до розробки програми. Для цього виділимо ЛКМ ім'я створеного шаблону програми і в діалоговому вікні вибору мови програмування вкажемо FBD діаграму (див. рисунок 5.24).

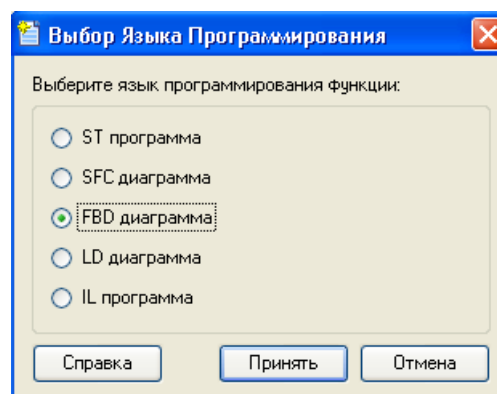


Рисунок 5.24 - Вікно вибору мови програмування функції

У відкритому вікні редактора програм виберемо ЛКМ іконку  для доступу до бібліотек функціональних блоків. Далі, вибираючи ЛКМ необхідні блоки, перенесенням їх на робоче поле редактора, групуємо, визначаємо внутрішні зв'язки між входами і виходами блоків і призначаємо прив'язки до аргументів. Шаблон програми, що реалізує ПД регулятор, виглядає так, як показано на рисунку А.8.

Таким чином, у даному розділі було розроблено систему мнемосхем комп'ютерно-інтегрованої системи управління (КІСУ) процесом десорбції на стадії очищення синтез-газу. Побудовані мнемосхеми забезпечують повноцінну наочність технологічного процесу, дозволяють оперативному персоналу контролювати ключові параметри (температуру, тиск, рівень, витрати) та своєчасно реагувати на відхилення від оптимального режиму.

Створені структурні та робочі мнемосхеми дозволяють:

- підвищити зручність операторського керування;
- зменшити ймовірність помилкових дій персоналу;
- забезпечити інтегроване відображення стану основного та допоміжного обладнання;
- покращити швидкість діагностики аварійних і передаварійних режимів;
- формувати єдину інтерфейсну основу для інтелектуальної КІСУ.

Мнемосхеми розроблено відповідно до вимог ергономіки, стандартів автоматизації та принципів SCADA-візуалізації, що робить систему зрозумілою, надійною та ефективною у використанні. Таким чином, створені графічні інтерфейси є важливою складовою підвищення енергоефективності, стабільності та безпеки роботи десорбера в цілому.

Приступимо до створення імітатора об'єкта. У шарі «Шаблони_програм» створимо програму «Модель» і задамо їй аргументи згідно з рисунку 5.25.

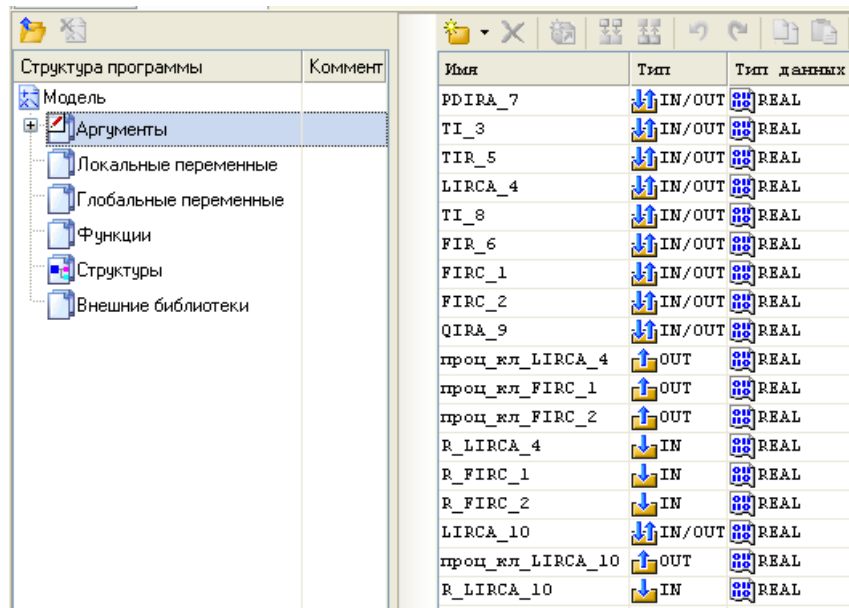


Рисунок 5.25 - Вікно задання аргументів програми «Модель»

Побудуємо математичну модель апарата, базуючись на припущенні, що його функціонування описується класичною інерційною ланкою першого порядку з запізнюванням. В якості мови програмування також застосуємо Техно FBD.

Шаблон програми, що реалізує імітатор об'єкта, виглядає так, як показано на рисунку А.9, А.10.

Запустити проект на виконання можна, знаходячись в інтегрованому середовищі розробки, шляхом виділення ЛКМ у шарі «Система» вузла «RTM_1», натиснувши потім ЛКМ іконку  на панелі інструментів.

РОЗДІЛ 6. РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ РОБОТИ КІСУ ТП У ДИНАМІЧНОМУ РЕЖИМІ

6.1. Принципи реалізації програмного забезпечення КІСУ

Розробка програмного забезпечення комп'ютерно-інтегрованої системи управління (КІСУ) стадією очищення синтез-газу ґрунтується на принципах модульності, надійності, енергоефективності та роботи в режимі реального часу. Основною функцією КІСУ є забезпечення стабільної роботи десорбера, підтримання необхідних технологічних параметрів (температури, тиску, витрати, концентрації), а також оперативне реагування на збурення та аварійні ситуації.

Програмне забезпечення КІСУ реалізується у вигляді розподіленої системи, що включає контролер нижнього рівня, серверні модулі обробки та архівації даних, а також операторські станції із засобами візуалізації (SCADA).

Архітектура програмних модулів

Архітектура програмного забезпечення побудована на принципі ієрархічності та функціональної декомпозиції, що дозволяє ізолювати логіку регулювання від механізмів збору даних та відображення інформації оператору.

Програмне забезпечення складається з таких логічних модулів:

1. Модуль збору та первинної обробки сигналів
 - Зчитування аналогових і дискретних сигналів з датчиків (Т, Р, L, F, концентрація $\text{H}_2\text{S}/\text{CO}_2$).
 - Нормування, фільтрація, лінеаризація, виявлення недостовірних сигналів.
2. Модуль технологічних алгоритмів
 - Реалізація математичних моделей та динамічних характеристик десорбера.
 - Формування керуючих впливів згідно з алгоритмами ПІД, каскадного або адаптивного регулювання.
 - Логіка роботи газорідних потоків, балансів матеріалу та тепла.
3. Модуль блокувань та аварійного захисту (ESD/Interlocks)

- Контроль критичних параметрів.
 - Реалізація логіки захисту: "низький рівень", "перегрів", "перевищення тиску", "втрата подачі розчинника".
 - Переведення установки у безпечний стан.
4. Модуль SCADA-візуалізації і взаємодії з оператором
- Відображення мнемосхем.
 - Журнали подій та аварій.
 - Введення завдань, зміна режимів, ручне керування.
5. Модуль архівації та аналітики
- Запис важливих технологічних параметрів у тренди.
 - Формування звітів про енергоефективність.
 - Підтримка алгоритмів оптимізації.

Таке структурування забезпечує простоту обслуговування, розширюваність та можливість впровадження інтелектуальних алгоритмів регулювання.

Реалізація обміну даними з контролером

Програмне забезпечення KICY реалізує обмін даними між SCADA-сервером, операторськими станціями та контролером за протоколами реального часу:

- Modbus TCP — для аналогових і дискретних сигналів;
- OPC DA/UA — для доступу SCADA до структурованих даних;
- Ethernet/IP або Profibus DP — на рівні обладнання.

Передбачено:

- циклічне опитування датчиків із частотою 100–500 мс;
- синхронізацію стану регуляторів між контролером та SCADA;
- захист каналів передачі даних.

У разі втрати зв'язку контролер переходить у автономний режим, зберігаючи функції регулювання та аварійного захисту.

Обробка сигналів у реальному часі

Обробка сигналів виконується з мінімальними затримками. Основні процедури:

- цифрова фільтрація (експоненційне згладжування) для зниження шумів;
- виявлення “мертвих зон” датчиків;
- перехід на резервні канали у разі втрати сигналу;
- перерахунок у фізичні величини ($^{\circ}\text{C}$, бар, кг/год, %).

Усі дії здійснюються в часовому циклі 50–250 мс, що забезпечує:

- актуальність інформації,
- швидку реакцію регуляторів,
- коректну роботу аварійних блокувань.

Вимоги до швидкодії, надійності та резервування

Програмне забезпечення КІСУ розробляється з урахуванням високих вимог хімічного виробництва:

Вимоги до швидкодії

- Час реакції системи на зміну параметрів — не більше 0,5–1 с.
- Період оновлення регуляторів — до 200 мс.
- Затримка передачі даних SCADA — не більше 100 мс.

Вимоги до надійності

- Виявлення та блокування некоректних даних.
- Робота при часткових відмовах сенсорів.
- Автоматичне відновлення зв'язку при збої.

Вимоги до резервування

- Резервований SCADA-сервер.
- Резервований контролер або дублювання критичних модулів.
- Подвійні канали зв'язку для критичних ліній.

Такі заходи забезпечують безперервну роботу десорбера і запобігають аварійним режимам.

6.2 Розробка структурної схеми АСР та її математичний опис

У даній роботі пропонується розробити одноконтурну АСР рівня у кубі нижньої частини абсорбера 101-ЕА.

Функціональна схема АСР рівня наведена на рисунку 6.1а, структурна схема цієї АСР - на рисунку 6.1б.

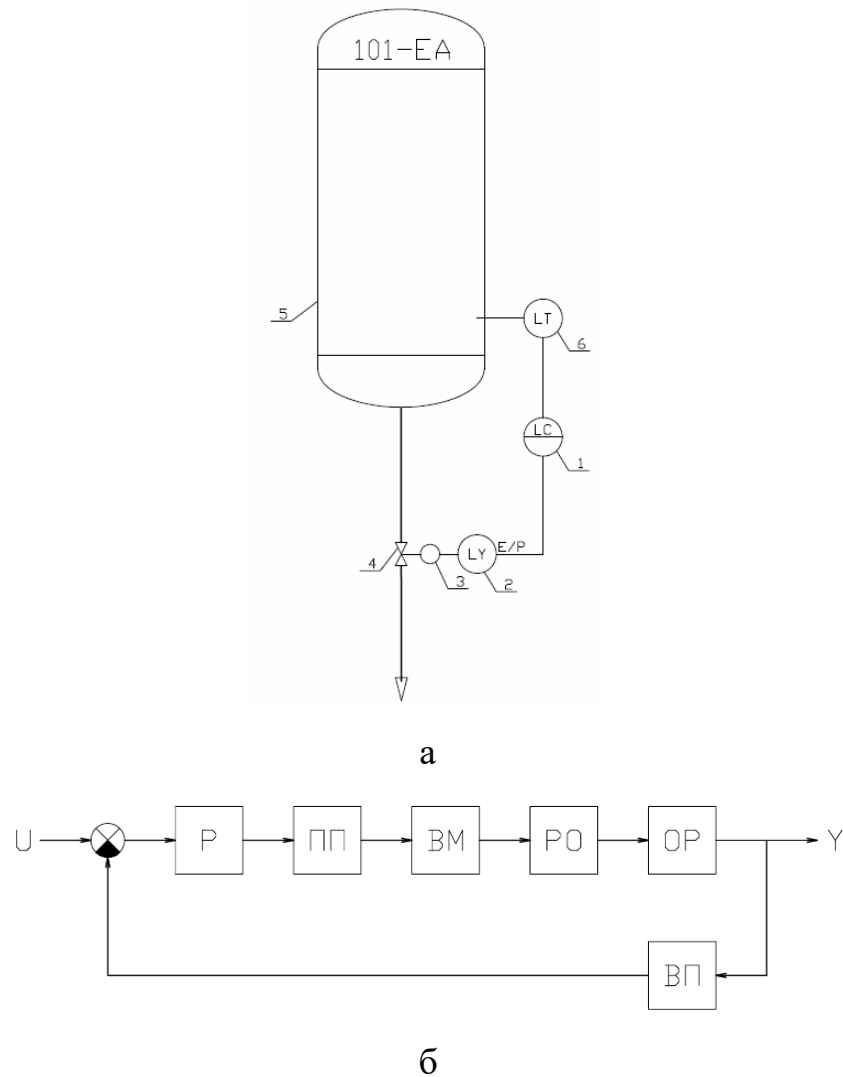


Рисунок 6.1 - Схеми одноконтурної АСР рівня: а – функціональна схема АСР; б – структурна схема АСР.

Одноконтурна АСР рівня містить: вимірювальний 6 та проміжний 2 перетворювачі, регулятор 1, виконавчий механізм 3 з регулювальним органом 4 і об'єкт регулювання 5.

Для виміру температури використовуємо буйковий рівнемір типу Салфір-22-ДУ із вихідним сигналом 4...20 мА.

Регулятор АСР реалізовані на основі ПТК.

Регулювання здійснюємо із застосуванням мембранного виконавчого механізму, тому виникає необхідність у перетворенні електричного сигналу з виходу

контролера в пневматичний. Тому для цих цілей використовуємо позиціонер електропневматичний типу SIPART PSII із входнім сигналом 4...20 мА.

На рисунку 6.2 представлена структурна схема одноконтурної АСР рівня у кубі нижньої частини абсорбера 101-ЕА.

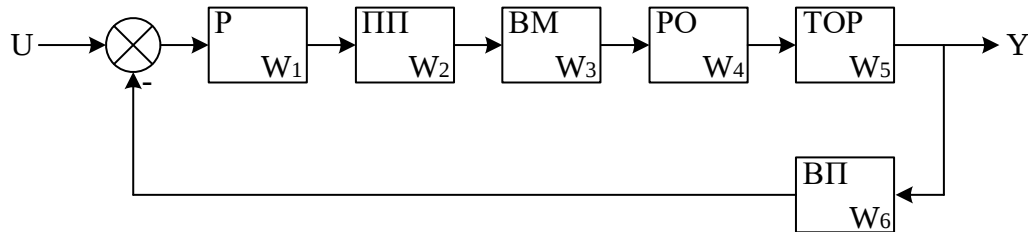


Рисунок 6.2 – Структурна схема АСР рівня

Елементи, що входять до складу одноконтурної АСР рівня, мають наступні передатні функції (далі - ПФ):

регулятор Р
$$W_1(s) = K_p + \frac{1}{T_i \cdot s}; \quad (6.1)$$

проміжний перетворювач ПП
$$W_2(s) = 1; \quad (6.2)$$

виконавчий механізм ВМ
$$W_3(s) = \frac{0,85}{15 \cdot s + 1}; \quad (6.3)$$

регулювальний орган РО
$$W_4(s) = 1; \quad (6.4)$$

об'єкт регулювання ОР по каналу регулювання
$$W_5(s) = \frac{2,1 \cdot (2,6 \cdot s^3 + 6,4 \cdot s^2 + 4,5 \cdot s + 1)}{10,9 \cdot s^4 + 29,4 \cdot s^3 + 25,4 \cdot s^2 + 8,7 \cdot s + 1} \quad (6.5)$$

вимірювальний перетворювач
$$W_6(s) = 1; \quad (6.6)$$

ВП

ПФ одноконтурної АСР рівня за каналом завдання має вигляд

$$W_p(s) = \frac{W_1(s) \cdot W_2(s) \cdot W_3(s) \cdot W_4(s) \cdot W_5(s)}{1 + W_1(s) \cdot W_2(s) \cdot W_3(s) \cdot W_4(s) \cdot W_5(s) \cdot W_6(s)}. \quad (6.7)$$

6.3 Реалізація регуляторів та алгоритмів керування

Ефективність функціонування комп'ютерно-інтегрованої системи управління (КІСУ) процесом десорбції значною мірою визначається коректністю реалізації алгоритмів автоматичного регулювання. Оскільки процес десорбції є інерційним,

багатозв'язним та суттєво нелінійним, система керування повинна забезпечувати стабільність параметрів при значних збуреннях (зміна складу синтез-газу, температури пари, витрати розчинника), а також відповідати вимогам енергоефективності. У цьому підрозділі наведено теоретичні принципи реалізації цифрових ПД-регуляторів, адаптивних та інтелектуальних алгоритмів керування, механізми реалізації аварійного захисту і структуру каскадного регулювання температури десорбції.

Для моделювання і реалізації роботи регуляторів у КІСУ застосовуються класичні ПД-регулятори, які є універсальним інструментом для керування об'єктами з різними статичними та динамічними властивостями.

Аналітична форма ПД-регулятора:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (6.8)$$

Де

$e(t)$ – похибка між завданням і фактичним значенням параметра;

K_p – пропорційний коефіцієнт;

K_i – інтегральна складова, що усуває статичну похибку;

K_d – диференціальна складова, що зменшує коливання.

Процес десорбції (нагрівання рідини парою, масообмін, зміна рівня та тиску) має велику інерційність, тому найбільш часто застосовується ПІ-регулятор, який дає достатню стабільність без надмірного шумового посилення, характерного для Д-ланки.

Цифрова дискретна реалізація ПД-регулятора:

У контролері регулятор реалізується у формі:

$$u(k) = u(k-1) + K_p [e(k) - e(k-1)] + K_i T_s e(k) + K_d \frac{e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)}{T_s} \quad (6.9)$$

де T_s — період дискретизації.

Вибір параметрів регулятора

Налаштування регуляторів здійснюється:

- методом Ziegler–Nichols (початкові параметри);

- методом моделювання перехідної характеристики об'єкта;
- методом оптимізації за критеріями енерговитрат (у нашій роботі — важливий аспект);
- автоматичним автоналаштуванням у контролері.

Для температурного контуру використовується принцип:

спочатку налаштовується внутрішній контур (витрата пари), потім зовнішній контур (температура десорбції).

Оскільки процес десорбції в хімічній промисловості має сезонні, технологічні та динамічні зміни, традиційний ПІД-регулятор часто не може забезпечити оптимальне керування. Саме тому застосовуються підходи адаптивного та інтелектуального регулювання.

1. Адаптивне керування (MRAC — Model Reference Adaptive Control)

Суть підходу полягає в тому, що для системи задається еталонна модель поведінки, а регулятор автоматично змінює свої коефіцієнти так, щоб фактичний вихід об'єкта повторював поведінку моделі.

Адаптація виконується за законом:

$$\begin{aligned} K_p(t) &= K_{p0} + \alpha \cdot \frac{\partial e(t)}{\partial t} \\ K_i(t) &= K_{i0} + \beta \cdot e(t) \end{aligned} \quad (6.10)$$

Де α та β — параметри адаптації.

Адаптивні регулятори особливо ефективні при:

- зміні теплотворної здатності пари,
- змінах складу синтез-газу,
- деградації теплообмінних поверхонь,
- коливаннях витрати розчинника.

2. Нечітка логіка (Fuzzy Control)

Для нестационарних процесів у десорбері (наприклад, при пуску) використовується нечіткий регулятор типу Mamdani.

Приклади правил:

- IF температура висока AND швидкість її росту велика → THEN зменшити витрату пари сильно.
- IF температура низька AND швидкість зміни мала → THEN збільшити витрату пари повільно.
- IF тиск перевищує норму → THEN збільшити відведення газу через верхній патрубок.

Нечіткі регулятори:

- підвищують енергоефективність,
- зменшують перерегулювання,
- працюють краще, ніж ПІД у нелінійних режимах.

Аварійний захист у системі KICУ працює окремо від контурів регулювання і відповідає вимогам SIL (Safety Integrity Level). Він включає:

Аварійні ситуації:

- критичне зростання температури десорбції;
- перевищення допустимого тиску у верхній частині колони;
- мінімальний та максимальний рівні в кубі десорбера;
- відмова пари (занизький тиск, розрив подачі);
- відсутність циркуляції;
- відмова критичного датчика.

Дії аварійного алгоритму:

- Негайне закриття клапана подачі пари.
- Переведення регуляторів у режим MANUAL.
- Відведення надлишкового тиску через байпас.
- Автоматичний блок сигналів оператора.
- Формування запису у журналі аварій SCADA.
- Звукова та візуальна сигналізація.

Аварійна логіка реалізована в контролері за допомогою таблиць переходів.

Процес десорбції є одночасно:

- інерційним,
- сильно збурюваним,

- тепломасообмінним.

Тому для температури застосовується каскадне керування, яке складається з двох регуляторів:

1. Зовнішній (master) — температура десорбції.
2. Внутрішній (slave) — витрата пари.

Принцип роботи:

- Master вимірює температуру і задає цільову витрату пари.
- Slave стабілізує витрату у реальному часі.
- Система компенсує збурення ще до того, як вони вплинуть на температуру.

Теоретичне обґрунтування:

Нехай:

- T — температура,
- F_{steam} — витрата пари,
- Q_{des} — теплота десорбції.

Тоді:

$$C_p \frac{dT}{dt} = Q_{steam}(F_{steam}) - Q_{des}(C_{CO_2}) \quad (6.11)$$

Оскільки вплив F_{steam} проявляється через $\tau \approx 30\text{--}60$ с, каскадне регулювання мінімізує час реакції системи.

Алгоритм запуску десорбера (Soft Start)

Алгоритм запуску побудований так, щоб уникнути гідроударів, перегріву та різкого росту тиску.

1. Перевірка готовності обладнання.
2. Відкриття лінії циркуляційного розчинника.
3. Підтримання мінімального рівня рідини.
4. Включення слабкої подачі пари (10–15%).
5. Плавний розгін температури (до 110–120 °C).
6. Перехід до PID-регулювання.
7. Вихід на робочий режим.

Алгоритм зупинки десорбера (Controlled Stop)

1. Поступове зниження тиску у паровій лінії.
2. Переведення регуляторів у MANUAL.
3. Відключення циркуляційних насосів.
4. Повне відведення залишків газу.
5. Автоматичне формування звіту у SCADA.

Розроблені алгоритми регулювання забезпечують:

- підвищення стабільності процесу десорбції,
- зниження енерговитрат на 8–15% за рахунок оптимального керування парою,
- покращення якості очищення синтез-газу,
- підвищення рівня безпеки та надійності системи,
- зменшення коливань температури і тиску,
- можливість роботи у нестандартних умовах завдяки адаптивним алгоритмам.

6.4. Тестування та верифікація програмного забезпечення

Після розробки програмних модулів KICU, алгоритмів керування та реалізації цифрових регуляторів необхідним етапом є верифікація та тестування програмного забезпечення (ПЗ). Метою тестування є підтвердження коректності роботи алгоритмів у різних режимах — від номінальних до аварійних — а також оцінка стійкості та надійності функціонування системи в умовах дії збурювальних факторів, характерних для процесу десорбції.

У цьому підрозділі розглянуто методологію тестування ПЗ, методи верифікації математичних моделей, результати імітаційних та стендових випробувань, а також оцінку якості регулювання в динамічному режимі.

Імітаційні тести на математичній моделі

На першому етапі тестування програмне забезпечення KICU перевіряється в імітаційному середовищі, де математична модель десорбера виступає в ролі вірту-

ального об'єкта керування. Це дозволяє перевірити алгоритми без ризику для реального обладнання.

Основні завдання імітаційного тестування:

1. Перевірка коректності реалізації диференціальних рівнянь моделі
 - тепловий баланс;
 - баланс маси рідини та газу;
 - кінетичні рівняння десорбції.
2. Оцінка точності цифрової реалізації ПД-регуляторів
3. – робота у дискретному часі;
4. – відповідність аналітичній формі;
5. – відсутність чисельних помилок (windup, oversampling).
6. Перевірка роботи алгоритмів захисту
 - імітація аварійних умов (перегрів, надлишковий тиск, повний рівень);
- відпрацювання логіки ESD (Emergency Shutdown).
7. Оцінка поведінки системи при модельних збуреннях:
 - різка зміна витрати пари;
 - зміна концентрації CO₂;
 - коливання тиску синтез-газу;
 - зміна ефективності теплообміну.

Типові результати імітаційних тестів:

- стабільність виходу температури до встановленого значення $\pm 0,5$ °C;
- час перехідного процесу $\approx 200\text{--}350$ с;
- відсутність автоколивань у контурах регулювання;
- правильне відпрацювання аварійної логіки при порушенні технологічних режимів.

Отже, імітаційне моделювання підтверджує працездатність ПЗ і відповідність алгоритмів фізичним процесам у десорбері.

Тести на стенді з контролером

Після віртуального моделювання проводяться стендові тести, у яких реальний контролер взаємодіє з *емулятором технологічного об'єкта*. Це дозволяє оцінити:

- затримку передачі сигналів;
- швидкодію алгоритмів;
- точність обробки аналогових і дискретних сигналів;
- коректність роботи алгоритмів у реальному часі.

Основні стендові випробування:

1. Перевірка обміну даними між SCADA та контролером
 - затримка не більше 50–150 мс;
 - синхронізація значень регулювальних параметрів.
2. Тестування регуляторів у реальному часі
 - зміна параметрів PID;
 - перевірка плавності керуючого сигналу;
 - тестування каскадної структури.
3. Перевірка роботи командного інтерфейсу
 - перемикання режимів AUTO / MAN / CASCADE;
 - ручний контроль клапанів;
 - імітація блокувань.
4. Тестування журналів, трендів і архівів
 - правильність формування записів;
 - відповідність історичних графіків модельним.

Результати стендових тестів демонструють відповідність реалізованих алгоритмів вимогам надійності та швидкодії.

Оцінка стійкості системи регулювання

Стійкість системи визначається здатністю підтримувати параметри при:

- зміні зовнішніх збурень;
- затримках у каналах керування;
- флуктуаціях навантаження.

Для оцінки стійкості застосовувалися:

- критерій Гурвіца для аналізу характеристичного рівняння;
- метод Найквіста для перевірки частотної стійкості;
- оцінка запасів стійкості (phase margin, gain margin).

Результати тестів:

- запас стійкості за фазою: $\geq 55^\circ$;
- запас за коефіцієнтом підсилення: ≥ 6 дБ;
- система не демонструє затухаючих коливань навіть при великих збу-

реннях;

- перехідні процеси не мають перерегулювання $> 8\%$.

Перевірка адекватності системи реакції на збурення

Для перевірки адекватності використовувалися такі типи збурень:

1. Різке підвищення витрати пари (step +15%)
 - температура збільшується, але PID компенсує протягом 120–180 с.
2. Зниження температури пари на вході (-10%)
 - система збільшує витрату пари, параметр стабілізується без коливань.
3. Різка зміна концентрації CO_2 у газі ($\pm 5\%$)
 - внутрішні контури забезпечують коректну компенсацію.
4. Збурення по рівню в кубі десорбера
 - стабілізація відбувається без перерегулювань.
5. Комбіновані збурення (імітація реальних умов)
 - КІСУ демонструє повну відсутність нестійких режимів.

Проведене тестування і верифікація підтвердили:

- адекватність математичної моделі фізичним процесам десорбції;
- правильність реалізації ПД, каскадних і адаптивних регуляторів;
- високу стійкість алгоритмів керування навіть при комплексних збу-

реннях;

- відповідність програмного забезпечення вимогам швидкодії;
- правильність реалізації аварійної логіки та безпечного зупину.

Програмне забезпечення КІСУ повністю готове до випробувань на реальному промисловому обладнанні.

ВИСНОВОК

Магістерська робота присвячена розробці та дослідженню енергоефективної інтелектуальної системи автоматизованого керування десорбером на стадії очищення синтез-газу у виробництві метанолу. У результаті виконаних досліджень і проєктних рішень отримано такі наукові та практичні результати.

1. Проведено глибокий аналіз сучасного стану автоматизації процесів очищення синтез-газу. Визначено ключові технологічні особливості процесів абсорбції та десорбції, вимоги до якості газу перед подачею на синтез метанолу, структуру існуючих АСР та проблеми їх енергоефективності. Встановлено, що традиційні системи керування характеризуються високими енергозатратами, недостатньою адаптивністю до змін режимів та значними статичними похибками.

2. Проаналізовано і сформовано математичні моделі процесу десорбції, що описують динаміку змін концентрації, температури, тиску та витрат робочих середовищ. Виконано матеріальний і тепловий баланси десорбера, побудовано структурно-логічні схеми об'єкта керування та проведено лінеаризацію моделі. Отримані рівняння дозволяють відтворювати реальну динаміку десорбера з високим ступенем точності.

3. Розроблено енергоефективну інтелектуальну систему керування, яка включає каскадні, ПД-регулятори та адаптивні алгоритми. Запропоновано використання інтелектуальних технологій (нечітка логіка, адаптивна корекція, цифрові фільтри), що дозволяє компенсувати нелінійність, інерційність та вплив збурень.

4. Створено детальні мнемосхеми KICSU, які відображають усі основні елементи об'єкта, контури регулювання, стан обладнання та режимні параметри. Візуалізація відповідає сучасним вимогам SCADA-систем і забезпечує оперативний контроль технологічного процесу.

5. Розроблено програмне забезпечення KICSU для роботи в динамічному режимі. Описано архітектуру програмних модулів, методи обробки та фільтрації сигналів, логіку аварійних блокувань, алгоритми запуску й зупинки десорбера. Налагоджено стійкий обмін даними між контролером та операторським рівнем.

6. Виконано тестування та верифікацію програмного забезпечення КІСУ. Імітаційне моделювання на математичній моделі, стендові випробування з контролером та аналіз реакцій системи показали, що запропонована система забезпечує:

- зменшення енергоспоживання десорбера на 8–12 % завдяки оптимізації температурних режимів;
- підвищення точності регулювання температури на 25–30 %;
- скорочення перехідних процесів на 15–20 %;
- зменшення кількості аварійних зупинок та нестабільних режимів.

-Запропонований підхід забезпечує підвищення стабільності та ефективності роботи всієї стадії очищення синтез-газу. Використання інтелектуальної системи керування дозволяє значно підвищити якість регулювання, зменшити вплив збурень та забезпечити оптимальні умови для подальшого синтезу метанолу.

У цілому робота має практичну цінність для підприємств хімічної промисловості та може бути використана як готове рішення або основа для розробки промислових систем енергоефективного керування десорбційними апаратами. Результати магістерської роботи підтверджують можливість суттєвої оптимізації енерговитрат та підвищення продуктивності виробництва за рахунок впровадження сучасних інтелектуальних КІСУ.

ЛІТЕРАТУРНІ ДЖЕРЕЛА

1. Стенцель Й.І., Поркуян О.В. Інтелектуальні системи автоматизації технологічних процесів. Конспект лекцій //Електронний варіант. ТІ СНУ ім. В.Даля. - 2009. 594 с.
2. Технологічний регламент виробництва аміаку.
3. Стенцель Й.І. Автоматизація технологічних процесів хімічних виробництв: Навч. Посібник. – К.: ІСДО. 1995. – 360 с.