

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

БР.АКП - 40.00.00.000 ПЗ

група АКП-23-1К

Василь Гелетюк

2025

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

Гелетюк Василь Васильович

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 681.53

(індекс)

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

Розробка системи автоматизованого керування установкою атмосферної

(назва роботи)

перегонки нафти

Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

(назва освітньої програми)

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

(шифр і назва спеціальності)

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

Нормоконтроль

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

Рецензент

доцент В.С. Борин
(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

Здобувач освітнього ступеня

АКП-23-1К В.В. Гелетюк
(шифр групи) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

Науковий керівник

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

Допущено до захисту

Завідувач кафедри

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

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

(повне найменування закладу вищої освіти)

Факультет автоматизації та енергетики

Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій

Освітній рівень перший (бакалаврський)

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

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри АКТ

А.І. Лагойда.

« » 20 року

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

Гелетюку Василю Васильовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи **Розробка системи автоматизованого керування
установкою атмосферної перегонки нафти**

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

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

затверджені наказом закладу вищої освіти від « 07 » травня 20 року № 52/8

2. Строк подання студентом роботи 13.06.2025 р.

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

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

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

3. Синтез АСК витрати рівня нафти у ребойлері колони К-2;

4. Розробка проектної складової САК установкою атмосферної перегонки нафти
Загальні висновки; Перелік посилань на джерела.

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

Лист 1 – Технологічна схема установки атмосферної перегонки нафти –
БР.АКП – 40.00.00.000 01;

Лист 2 – Структурна модель об'єкта управління – БР.АКП – 40.00.00.000 02;

Лист 3 – Аналіз і синтез АСР рівня – БР.АКП – 40.00.00.000 03;

Лист 4 – Функціональна схема автоматизації – БР.АКП – 40.00.00.000 04;

Лист 5 – Схема зовнішніх з'єднань – БР.АКП – 40.00.00.000 05;

Лист 6 – Схема щита керування – БР.АКП – 40.00.00.000 06.

6. Консультанти розділів роботи

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

7. Дата видачі завдання 06.11.2024 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів бакалаврської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз технологічного процесу атмосферної перегонки нафти, як об'єкта автоматизації	13.05.2025 р.	
2	Ідентифікація об'єкта керування та синтез системи автоматизованого керування	11.05.2025 р.	
3	Синтез АСК витрати рівня нафти у ребойлері колони К-2	23.05.2025 р.	
4	Розробка проектної складової САК установкою атмосферної перегонки нафти	29.05.2025 р.	

Студент _____
(підпис)

В.В. Гелетюк _____
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____
(підпис)

О.В. Кучмистенко _____
(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Бакалаврська робота містить: 68 сторінок друкованого тексту, 15 рисунків, 3 таблиці, 8 посилання на джерела.

Тема: «Розробка системи автоматизованого керування установкою атмосферної перегонки нафти»

Об'єкт дослідження: автоматизована система керування процесом атмосферної ректифікації нафти.

Мета роботи: підвищення ефективності, стабільності та безпечності функціонування установки атмосферної перегонки нафти шляхом синтезу та впровадження сучасної автоматизованої системи керування, яка забезпечує оптимальне підтримання технологічних параметрів на всіх етапах процесу.

Методи дослідження: структурно-функціональне моделювання системи автоматичного регулювання, ідентифікація об'єкта керування на основі експериментальних даних, математичне моделювання динаміки об'єкта з подальшим синтезом регулятора на основі передавальної функції.

Результати бакалаврської роботи: здійснено структурний аналіз технологічної схеми установки атмосферної перегонки нафти з урахуванням специфіки об'єкта керування. Побудовано математичну модель динаміки рівня рідини в ребойлері, виконано ідентифікацію параметрів та синтезовано ПІД-регулятор методом симетричного оптимуму. Результати імітаційного моделювання в середовищі *Matlab Simulink* підтвердили якісні характеристики розробленої автоматизованої системи керування. Розроблено проектну частину автоматизації, включно з вибором приладів, побудовою структурної і функціональної схем, а також створенням операторського інтерфейсу в середовищі SCADA.

Ключові слова: атмосфера перегонка нафти, автоматизована система керування, регулятор, рівень у ребойлері, Matlab.

ABSTRACT

The bachelor's thesis contains 68 pages of printed text, 15 figures, 3 tables, and 8 references.

Title: Development of an Automated Control System for the Atmospheric Distillation Unit of Crude Oil

Object of Research: an automated control system for the atmospheric distillation process of crude oil.

Purpose of the Thesis: to enhance the efficiency, stability, and operational safety of the atmospheric distillation unit by synthesizing and implementing a modern automated control system that ensures optimal maintenance of technological parameters at all stages of the process.

Research Methods: structural and functional modeling of the automatic control system, identification of the control object based on experimental data, and mathematical modeling of the object dynamics followed by the synthesis of a controller based on the transfer function.

Results of the Bachelor's Thesis: a structural analysis of the technological scheme of the atmospheric distillation unit was conducted with consideration of the specific features of the control object. A mathematical model describing the dynamic behavior of the liquid level in the reboiler was developed. The system parameters were identified, and a PID controller was synthesized using the symmetrical optimum method. The results of simulation modeling in the Matlab Simulink environment confirmed the qualitative performance of the developed automated control system. The project section of automation was elaborated, including the selection of instruments, development of structural and functional diagrams, and creation of a human-machine interface in the SCADA environment.

Keywords: atmospheric distillation of crude oil, automated control system, controller, reboiler level, Matlab.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК ОСНОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ.....	8
ВСТУП.....	9
1 АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ АТМОСФЕРНОЇ ПЕРЕГОНКИ НАФТИ, ЯК ОБ'ЄКТА АВТОМАТИЗАЦІЇ	11
1.1 Первинна переробка нафти на промислових установках нафтопереробних заводів	11
1.2 Технологічний процес первинної переробки нафти	13
1.3 Основи процесу перегонки нафти	14
1.4 Установки атмосферо-вакуумного типу.....	16
1.5 Аналіз основних технологічних параметрів, що підлягають автоматизованому регулюванню, контролю, сигналізації та блокуванню в атмосферо-вакуумній установці	19
1.6 Аналіз речовин, що беруть участь у процесі атмосферо-вакуумної перегонки, та вимоги до технічного виконання засобів автоматизації	21
Висновки до розділу	24
2 ІДЕНТИФІКАЦІЯ ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ ТА СИНТЕЗ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО КЕРУВАННЯ	26
2.1 Основи розрахунку ректифікаційних колон.....	26
2.2 Формалізація параметричної структури об'єкта.....	27
2.3 Вибір контуру керування для синтезу АСК	30
2.4 Отримання передавальної функції обраної АСК	32
Висновки до розділу	35
3 СИНТЕЗ АСК ВИТРАТИ РІВНЯ НАФТИ У РЕБОЙЛЕРІ КОЛОНИ К-2 .	36
3.1 Розробка структурної електричної схеми АСК.....	36
3.2 Аналіз об'єкта керування	36
3.3 Вибір структури регулятора	37

					БЗ. АКП-40.00.00.000.ПЗ							
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Розробка системи автоматизованого керування установкою атмосферої перегонки нафти			Літ.	Арк.	Акрушів		
Розроб.	Гелетюк В.В.	Кучмистенко О.В.						Д	6	68		
Перевір.	Борин В.С.							АКП-23-1К ІФНТУНГ				
Реценз.	Кучмистенко О.В.											
Н. Контр.	Лагойда А.І.											
Затверд.												

3.4 Розрахунок параметрів ПІД-регулятора за критерієм симетричного оптимуму	38
3.5 Дослідження автоматизованої системи керування на стійкість	41
3.5.1 Передавальна функція розімкнутої системи.....	41
3.5.2 Характеристичне рівняння замкнутої системи	42
3.5.4 Критерій Найквіста	43
3.6 Запаси стійкості.....	44
3.7 Логарифмічні частотні характеристики	45
3.8 Аналіз якості перехідного процесу	45
3.8 Робастність системи.....	47
3.9 Висновки щодо стійкості	48
Висновки до розділу	48
4 РОЗРОБКА ПРОЕКТНОЇ СКЛАДОВОЇ САК УСТАНОВКОЮ АТМОСФЕРНОЇ ПЕРЕГОНКИ НАФТИ	50
4.1 Структурна схема ієрархічної системи контролю і керування.....	50
4.2 Вибір технічних засобів автоматизації на установці	52
4.3 Розробка SCADA-системи в середовищі InTouch Wonderware	59
4.4 Розробка проектної документації для автоматизованої системи	61
Висновки до розділу	62
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	64
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ НА ДЖЕРЕЛА	68

					БЗ. АКП-40.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		7

ПЕРЕЛІК ОСНОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ

АП - Атмосферної перегонки;

АСУ ТП – автоматизована система управління технологічним процесом;

ПН – переробка нафти;

УАПН – Установа атмосферної перегонки нафти.

					БЗ. АКП-40.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8

ВСТУП

У сучасних умовах розвитку нафтової промисловості питання підвищення ефективності технологічних процесів набувають особливої актуальності, що зумовлено необхідністю оптимізації виробничих циклів та забезпечення високої якості кінцевої продукції. Атмосферна перегонка нафти, будучи одним із базових етапів первинної переробки сировини, відіграє важливу роль у формуванні спектра нафтових фракцій, що надалі використовуються у різних галузях промисловості. Рівень контролю і керування режимами роботи установки безпосередньо впливає на стабільність технологічного процесу, економічність виробництва та екологічні показники підприємства.

Розробка системи автоматизованого керування установкою атмосферної перегонки нафти спрямована на впровадження сучасних методів керування, які забезпечують підтримку заданих параметрів процесу в режимі реального часу. Такий підхід дозволяє не лише знизити вплив зовнішніх і внутрішніх збурень, а й мінімізувати людський фактор, що позитивно позначається на надійності та безпеці експлуатації технологічного обладнання. Використання автоматизованих систем відкриває нові можливості для підвищення продуктивності та якості переробки за рахунок точного керування температурних режимів, тиску, витрат сировини та інших параметрів, що визначають ефективність роботи установки.

Сучасні інформаційні технології, разом із засобами автоматизації, дають змогу створювати комплексні системи управління, інтегровані з технологічним процесом, що дозволяє здійснювати моніторинг і аналіз даних у режимі онлайн. Це дає підстави для оперативного прийняття рішень і забезпечення стабільності роботи установки у мінливих умовах виробництва. Врахування специфіки технологічних процесів, особливостей обладнання та вимог до якості продукції створює фундамент для розробки адаптивних систем керування, які здатні ефективно функціонувати в умовах складної динаміки процесів.

					БЗ. АКП-40.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		9

Таким чином, системи автоматизованого керування установками атмосферної перегонки нафти не лише оптимізують технологічний процес, а й сприяють підвищенню рівня технологічної безпеки та екологічної відповідальності підприємств нафтопереробної галузі. У зв'язку з цим дослідження та впровадження сучасних методів автоматизації стають однією з основних складових розвитку промислових технологій у контексті цифрової трансформації нафтопереробної галузі.

					БЗ. АКП-40.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

1 АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ АТМОСФЕРНОЇ ПЕРЕГОНКИ НАФТИ, ЯК ОБ'ЄКТА АВТОМАТИЗАЦІЇ

1.1 Первинна переробка нафти на промислових установках нафтопереробних заводів

Промислова переробка нафти на сучасних нафтохімічних підприємствах є багаторівневим і комплексним процесом, що поєднує у собі численні фізичні та хімічні методи обробки сировини. Вона здійснюється на великих комбінованих технологічних установках, які призначені для отримання різноманітних фракцій та асортименту продукції нафтової галузі. Ці виробничі системи розроблені з урахуванням складної природи сировини, яка містить численні компоненти, що відрізняються за хімічною будовою і фізичними властивостями.

Процес переробки нафти на промислових підприємствах включає багатоступеневі технологічні операції, що поєднують фізико-хімічні методи для поділу, очищення і перетворення нафтової сировини. Різноманітність методів і апаратних рішень дозволяє реалізувати комплексні завдання з отримання широкого спектру нафтових продуктів із заданими характеристиками. Умовно всі технологічні методи поділяють на первинні та вторинні процеси, які послідовно або паралельно застосовуються для оптимізації виходу цінних продуктів.

Установки первинної перегонки нафти утворюють технологічну основу будь-якого нафтохімічного заводу, оскільки саме від їх роботи значною мірою залежить якість та кількість отриманих фракцій, що надалі використовуються як паливо або сировина для складнішої хімічної обробки. Основним завданням первинної переробки є поділ сирої нафти на окремі фракції у вигляді газів, бензинів, дизельних палив, масел та залишків, що розділяються в атмосферних і вакуумних установках. Цей процес є фундаментальним, оскільки забезпечує технологічний комплекс сировиною для подальших етапів обробки (рис. 1.1).

					БЗ. АКП-40.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

1.2 Технологічний процес первинної переробки нафти

Первинна переробка нафти є фундаментальним етапом у загальному процесі її комплексної переробки, на якому відбувається поділ сирової нафти на різноманітні фракції із подальшим направленням їх на більш глибокі стадії обробки. На початковому етапі, після видобутку із свердловини, сира нафта проходить попередню обробку, що включає сепарацію. Цей процес полягає у виділенні з неї води, домішок та основної частки газів, які присутні у вихідній сировині. Одночасно намагаються максимально відокремити важкі вуглеводні та газоподібні компоненти, що сприяє поліпшенню якості подальшої переробки.

Для підвищення ефективності сепарації застосовуються спеціальні технологічні прийоми, серед яких варто виділити використання трапів і розпилювачів, що забезпечують інтенсивне розпилення нафти і сприяють кращому розділенню фаз. Важливою складовою є регулювання робочого тиску та швидкості потоку, що оптимізує виділення газової фази із рідкої. Особливу увагу приділяють очищенню нафти від механічних та хімічних домішок, оскільки їх присутність здатна суттєво прискорити знос обладнання, зокрема трубопроводів, що негативно впливає на надійність і тривалість експлуатації виробничих систем.

Після первинної обробки сировина надходить безпосередньо на завод для подальшої переробки. Структурно процес первинної переробки нафти включає кілька взаємопов'язаних стадій. Першою з них є електрообезсолення, яке виконується на спеціальних установках ЕЛОУ. Завдяки цьому процесу забезпечується видалення залишкової води та розчинених у ній солей, що є необхідним для захисту устаткування та підвищення якості кінцевих продуктів.

Наступний етап пов'язаний з розділенням нафти на фракції в умовах атмосферного та вакуумного тиску. Атмосферна перегонка, що здійснюється в колоні АТ, відповідає за первинний поділ сировини на паливні фракції та мазут. Вакуумна перегонка, яка відбувається в колоні ВТ, виконується при зниженому тиску, що дозволяє зменшити температуру кипіння важких компонентів,

					БЗ. АКП-40.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

унаслідок чого підвищується ефективність розділення та зменшується ризик термічного розкладання.

Принципова схема заводу з основними технологічними дільницями, задіяними у процесі переробки нафти, наведена на рис. 1.2. В межах цієї магістерської роботи особлива увага буде приділена автоматизації та розрахунку основних параметрів блоку ЕЛОУ та атмосферної перегонки (АП), які виконують важливу функцію забезпечення якісного розкладання сирової нафти на первинні компоненти.

1.3 Основи процесу перегонки нафти

Процес первинної перегонки нафти, або прямої перегонки, є комплексом технологічних операцій, що дозволяють розділити нафту на декілька фракцій, кожна з яких характеризується певним діапазоном температур кипіння і специфічним складом дистилатів. Важливо зауважити, що під час цього процесу не відбувається термічного розкладу компонентів сировини, що зумовлює збереження хімічної цілісності вихідних речовин. Технологічне здійснення перегонки здійснюється на апаратах трубчатого типу, що можуть працювати у вакуумних, атмосферних або високотемпературних режимах.

Історично першими установками для первинної перегонки були періодичні кубові апарати. З початку їх конструкція базувалася на послідовному проходженні нафти через низку горизонтальних кубів, розташованих терасами, що дозволяло сировині самопливом перетікати між об'ємами. В 1885 році було створено першу безперервну кубову батарею, відому як «нобелівська», що складалася з понад десяти кубів і оснащувалася жаровими трубами для нагрівання, а також маточником, через який у сировину вводилася водяна пара для покращення відділення легких фракцій. Пари дистилатів конденсувалися в холодильниках, а отримані конденсати згодом очищувалися від небажаних домішок, таких як ненасичені вуглеводні, нафтові кислоти і смоли, шляхом обробки сірчаною кислотою і лугом.

					БЗ. АКП-40.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

Проте, ці кубові установки характеризувалися низькою чіткістю поділу фракцій, великогабаритністю, значною пожежонебезпекою та високою вартістю, що обмежувало їх широке застосування. В подальшому, з розвитком технологій, кубові апарати були доповнені ректифікаційними колонками, що підвищило якість розділення продуктів, але загальні недоліки конструкції залишалися.

Особливої уваги заслуговує історія розвитку кубових батарей для перегонки мазуту, конструкції яких розробили інженери В. Г. Шухов та І. І. Єдин. Вони впровадили вакуумний режим і подачу водяної пари, що знижували температуру кипіння компонентів і запобігали їх термічному розпаду. Масляна батарея не мала жарових труб, а топка розміщувалась під кубом. Продукти перегонки у вигляді парів масляних дистилатів та водяної пари надходили до дефлегматорів і конденсаторів, де відбувалося охолодження і розділення продуктів. Залишкові гази і пароподібні продукти відсмоктувались пароструминними ежекторами. Конденсати масляних дистилатів змішувалися для отримання товарних продуктів із заданою в'язкістю, які після очищення відповідними реагентами відповідали вимогам якості.

В наступних модернізаціях масляних кубових батарей застосовували «головні» та «хвостові» трубчаткі для додаткового виділення легких фракцій і доробки важких залишків у вакуумі з подачею водяної пари. Однак, складність обладнання, пожежонебезпека та низька якість отримуваних масел стримували подальший розвиток кубових технологій. З часом вони були замінені більш ефективними трубчатими установками атмосферного та вакуумного типів.

Трубчаті установки забезпечували одноразове випаровування сировини при знижених температурах нагріву, що значно зменшувало ризик термічного розкладу і покращувало якість отриманих дистилатів. Вони відзначалися вищим тепловим коефіцієнтом корисної дії, меншими капітальними витратами і зниженою експлуатаційною вартістю. Сьогодні трубчаті установки є основним обладнанням практично на всіх нафтопереробних підприємствах, забезпечуючи безперервне виробництво товарних продуктів і сировини для подальшої глибокої

					БЗ. АКП-40.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

переробки.

Паралельно активно розвиваються методи вторинної переробки нафти, що дозволяють більш якісно розділяти фракції і глибше виділяти окремі компоненти середніх і важких складових. Вдосконалення колон ректифікації, конструкцій обладнання, а також впровадження засобів автоматизації сприяють зниженню відходів та підвищенню загальної ефективності процесів переробки.

Продуктивність окремих установок первинної переробки нафти досягає 6-7 мільйонів тонн на рік. При цьому, менш потужні установки постійно модернізуються або замінюються новими, що відповідають сучасним технологічним вимогам і стандартам ефективності [1].

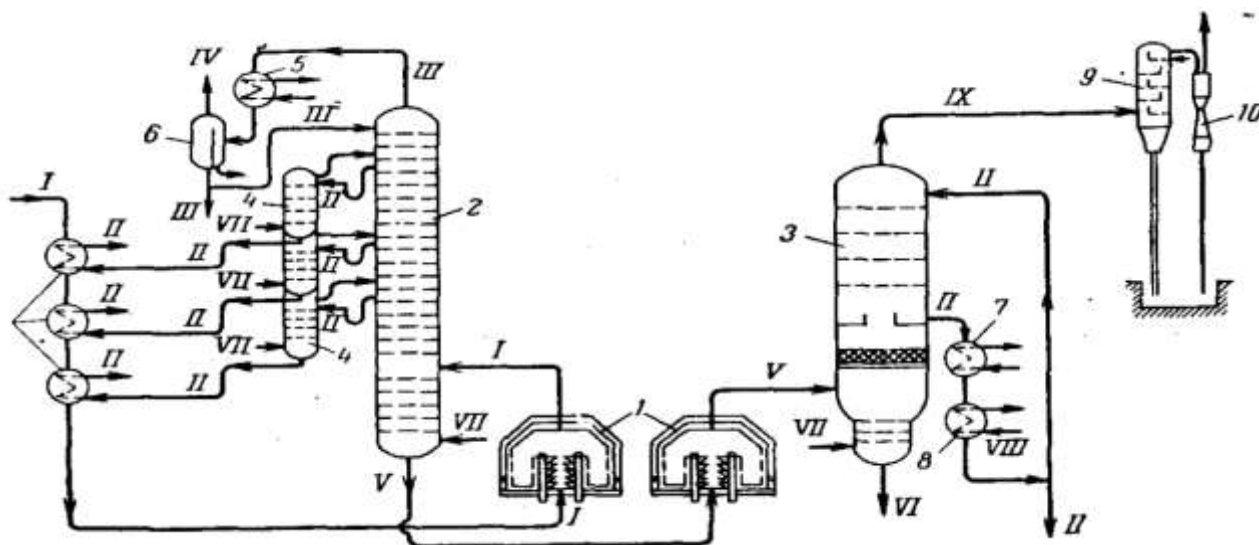
1.4 Установки атмосферо-вакуумного типу

Установки атмосферо-вакуумного типу зазвичай інтегрують у єдиний технологічний комплекс разом із процесами атмосферної перегонки нафтопродуктів. Поєднання вакуумної та атмосферної переробки в межах одного обладнання забезпечує суттєві переваги, серед яких варто відзначити значне скорочення довжини комунікаційних ліній і зменшення кількості проміжних резервуарів. Це сприяє підвищенню компактності виробничого обладнання та спрощенню його обслуговування. Крім того, застосування спільної схеми дозволяє ефективніше використовувати тепло, що виділяється під час фракціонування дистилатів та залишків, а також знижує металомісткість конструкції. В результаті досягається підвищення продуктивності та ефективності технологічного процесу.

Історично розвиток атмосферо-вакуумних установок розпочався у 1950-х роках із спорудженням перших агрегатів продуктивністю 0,5 мільйона тонн нафти на рік, що згодом було вдосконалено і доведено до 0,8–1 мільйона тонн на рік. Подальший розвиток призвів до зведення установок з продуктивністю 1, 2, 3 та 6 мільйонів тонн на рік, а в сучасний період ведуться проекти потужністю 10–12 мільйонів тонн на рік.

					БЗ. АКП-40.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

На рис. 1.2 наведена технологічна схема атмосферно-вакуумної установки паливного профілю, призначеної для переробки сірчистої нафти. Газойль, який відбирається у верхній частині вакуумної колони, характеризується широким температурним діапазоном і використовується як сировина для каталітичного крекінгу.



1 - трубчасті печі; 2 - колона атмосферного типу; 3- колона вакуумного типу; 4 - відпарна колона; 5 – холодильник-конденсатор-; 6 - водовіддільник; 7 – установка теплообмінного типу; 8 - установка холодильного типу; 9 - барометричний конденсатор; 10 - ежектор. Позначені лінії: I - нафта; II - бічний продукт; III - верхній продукт; IV - газ; V - мазут; VI - гудрон; VII - водяна пара; VIII - вода; IX – Несконденсовані пари і гази

Рисунок 1.2 - Атмосферно-вакуумна установка для перегонки сірчистої нафти

Конструктивно установка складається з атмосферної колони (позначеної цифрою 2) та двох послідовно розташованих вакуумних колон (4 і 5). Перша вакуумна колона виробляє три різні види масляних дистилатів та напівгудрон, що залишається у вигляді залишку VII. Частина цього залишку спрямовується на виробництво залишкового масла, тоді як інша проходить через змійовик печі до другої вакуумної колони, що функціонує при залишковому тиску 10–15 мм рт. ст. Ця колона продукує важку дистиляційну сировину, яка є вихідною для

									Арк.
									17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	БЗ. АКП-40.00.00.000.ПЗ				

В процесі роботи лінії надходження та відведення потоків позначені таким чином: I – нафта, II – бічні продукти, III – верхній продукт, IV – газ, V – мазут, VI – гудрон, VII – водяна пара, VIII – вода, IX – неконденсовані пари та гази.

Завдяки зниженню залишкового тиску у другій вакуумній колоні та покращеному фракціонуванню вдається зменшити коксованість дистилятів та знизити концентрацію металів у продуктах, які направляються на каталітичний крекінг і виробництво мастил. Це підвищує якість кінцевих продуктів та ефективність технологічного процесу в цілому.

1.5 Аналіз основних технологічних параметрів, що підлягають автоматизованому регулюванню, контролю, сигналізації та блокуванню в атмосферно-вакуумній установці

Функціонування атмосферно-вакуумної установки передбачає безперервну взаємодію між високотемпературними процесами, глибоким вакуумом і багатоступеневим розділенням сировини, що зумовлює необхідність підтримання суворих меж параметрів, які визначають стабільність, безпечність і енергетичну ефективність дистиляційного процесу [2].

Одним із визначальних факторів є температура, яка впливає на якість фракційного поділу, стабільність ректифікації та запобігання коксоутворенню. Температура в трубчастих печах, у верхній і нижній частинах ректифікаційних колон, у змійовиках і конденсаторах підлягає неперервному регулюванню. Порушення термічного режиму призводить до деградації продуктів, перевитрати палива й аварійних ситуацій.

Не менш важливим є контроль тиску в атмосферній і вакуумних колонах, а також у конденсаторах і ежекторах. Зниження тиску нижче технологічно допустимого рівня у вакуумній колоні порушує процес випаровування важких фракцій, тоді як підвищення тиску в системі може спричинити порушення герметичності та зростання навантаження на насосне обладнання.

					БЗ. АКП-40.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

Витрата водяної пари, що подається в колони, безпосередньо впливає на парофазну рівновагу, ефективність масообміну та якість дистилатів. Також підлягають моніторингу витрати нафти, циркуляційних охолоджуючих середовищ, палива та електроенергії. Коливання цих параметрів сигналізують про відхилення від нормального режиму й мають бути виведені на оперативні панелі для аналізу оператором.

Рівень рідин у відбірних лотках колон, в буферних резервуарах і в системах охолодження, а також у відпарних і віддільних апаратах визначає стабільність протікання технологічних процесів. Перевищення допустимого рівня або його падіння вимагає або сигналізації, або автоматичного втручання (блокування) для недопущення втрати продукту або аварійної ситуації.

З метою забезпечення безпечного функціонування установки передбачено автоматичне блокування при перевищенні гранично допустимих значень температури, тиску, рівня чи витрат, що можуть свідчити про небезпечний стан устаткування або порушення герметичності. Надійна система сигналізації інформує оператора про будь-які відхилення та супроводжує спрацювання аварійного захисту (табл. 1.1).

Таблиця 1.1 – Технологічні параметри, що підлягають регулюванню, контролю, сигналізації або блокуванню на атмосферно-вакуумній установці

№	Параметр	Об'єкт контролю	Вид дії: Регулювання (Р), Контроль (К), Сигналізація (С), Блокування (Б)
1	Температура в трубчастих печах	Змійовик печі	Р, К, С, Б
2	Температура у верхній частині колон	Атмосферна і вакуумна колони	Р, К, С
3	Температура в конденсаторах	Конденсатор-холодильник, барометричний конденсатор	К, С, Б

					БЗ. АКП-40.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

№	Параметр	Об'єкт контролю	Вид дії: Регулювання (Р), Контроль (К), Сигналізація (С), Блокування (Б)
4	Тиск у вакуумній колоні	Верхній і нижній яруси	Р, К, С, Б
5	Тиск у системі ежекторів	Вихідні ступені ежекції	К, С, Б
6	Витрата сировини (нафти)	Вхідна лінія I	Р, К, С
7	Витрата водяної пари	Ввід у колони	Р, К, С
8	Рівень рідини у відпарних ємностях	Відпарна колона, водовіддільник	К, С, Б
9	Витрата охолоджувача	Холодильник-конденсатор, конденсатори	К, С
10	Тиск у змієвику печі	Трубчаста піч	К, С, Б
11	Витрата палива на горіння	Камера згоряння печі	Р, К
12	Температура фракцій на виході	Продуктовідбірні лінії II, III, V	К, С
13	Температура гудрону	Вихід VI	К, С
14	Склад неконденсованих газів	Лінія IX	К, С

1.6 Аналіз речовин, що беруть участь у процесі атмосферно-вакуумної перегонки, та вимоги до технічного виконання засобів автоматизації

Процес атмосферно-вакуумної перегонки нафти є однією з базових ланок первинної переробки сировини, що забезпечує розділення складної нафтової суміші на окремі фракції з урахуванням температури їх кипіння. Хімічна природа речовин, які беруть участь у технологічному процесі, зумовлює необхідність врахування агресивності середовища, температурних і тискових навантажень, а також фізико-хімічних властивостей вуглеводневих компонентів і допоміжних речовин. Такі умови обумовлюють вимоги до вибору матеріалів обладнання, зокрема технічних засобів автоматизації.

У складі вхідної сировини — сирі нафти — переважають складні суміші вуглеводнів парафінового, нафтового та ароматичного рядів, а також домішки

					БЗ. АКП-40.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

сірковмісних, кисневих і азотовмісних сполук, металоорганічних компонентів, води, солей і механічних частинок. У процесі підготовки сировини до перегонки здійснюється її стабілізація й обезсолення, проте навіть після цих операцій присутні залишкові домішки, які можуть негативно впливати на технічний стан обладнання та точність функціонування вимірювальних систем.

У ході перегонки формуються парові та рідкі фази речовин із різними фізико-хімічними характеристиками: від легколетких бензинових фракцій до важких залишків типу гудрону та мазуту. Особливої уваги вимагає водяна пара, яка використовується в нижніх частинах ректифікаційних колон для інтенсифікації процесу масообміну. Її впровадження потребує ретельного контролю тиску, температури та витрати, що зумовлено чутливістю колони до зміни гідродинамічного режиму.

Крім того, у вакуумній секції установки присутні газоподібні продукти, які можуть містити сірководень, аміак та інші агресивні домішки. Це створює високі вимоги до герметичності контурів і стійкості матеріалів елементів автоматизації до корозії. Незконденсовані гази (азот, легкі вуглеводні, водень) також повинні видалятися підконтрольно через відповідні вузли очищення або спалювання.

В умовах дії високих температур (до 400 °С у печах), підвищених тисків у атмосферних колонах (до 0,3 МПа), а також залишкового вакууму (в межах 10–15 мм рт. ст. у вакуумних колонах), технічні засоби автоматизації мають задовольняти низку специфічних вимог.

Зокрема, усі вимірювальні прилади та виконавчі механізми повинні бути виконані у вибухозахищеному варіанті, оскільки присутність легколетких парів і газів створює загрозу утворення вибухонебезпечного середовища. Корпуси датчиків тиску, термоперетворювачів, витратомірів, рівнемірів і аналітичних приладів повинні бути виготовлені з антикорозійних сталей або спеціальних сплавів з високою стійкістю до сірководневої та хлоридної корозії.

Також надзвичайно важливо забезпечити надійність роботи приладів у умовах вібраційних і теплових навантажень. Багато пристроїв функціонують у

					БЗ. АКП-40.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

зонах з різким перепадом температур, а тому потребують термостійких ізоляційних матеріалів і спеціального захисту електроніки від перегрівання. Пристрої мають бути термокомпенсовані, щоб зберігати точність показів навіть при коливаннях температури середовища.

Засоби контролю й регулювання повинні підтримувати режим роботи установки в автоматичному або автоматизованому режимі, реагуючи на зміну параметрів середовища в реальному часі. Для цього використовуються мікропроцесорні регулятори, що дозволяють реалізовувати адаптивні та мультиваріантні алгоритми керування. Інтеграція із системами SCADA забезпечує централізований моніторинг і дистанційне управління всіма етапами перегонки.

У ситуаціях виникнення аварій або порушень технологічного режиму (наприклад, перевищення тиску в колоні, надмірна температура в печі, зникнення рівня в сепараторах) передбачаються системи аварійного блокування, які миттєво спрацьовують на зупинку критичних вузлів або відключення енергоживлення, щоб попередити розвиток катастрофічних сценаріїв.

У табл. 1.2 узагальнено основні фізико-хімічні параметри, які підлягають контролю та регулюванню, з наведенням відповідних характеристик речовин і вимог до технічного виконання обладнання:

Таблиця 1.2 – Технологічні параметри та вимоги до технічних засобів автоматизації

Параметр	Середовище/речовина	Характер середовища	Вимоги до технічного виконання
Температура	Нафта, водяна пара, пари фракцій	Високотемпературне, агресивне	Термостійкі матеріали, вибухозахист
Тиск	Атмосферна і вакуумна колона	Підвищений/знижений	Висока герметичність, корозійна стійкість

Параметр	Середовище/ речовина	Характер середовища	Вимоги до технічного виконання
Витрата	Водяна пара, нафта, газойль	Агресивне, газорідинне	Антикорозійні матеріали, вибухозахист
Рівень	Рідини в сепараторах, відстійниках	В'язке, з домішками	Поплавкові/радар ні рівнеміри, вогнестійкість
Склад фракцій	Газойль, гудрон, бензин	З високим вмістом сірки	Аналізатори з фільтрами та іскробезпекою
Температура в печі	Пічне середовище	Дуже високотемпературне	Термопари у захисному кожусі
Тиск в конденсаторі	Газоподібні продукти, пари	Корозійно-активне	Барометричні датчики, антикорозійне виконання
Наявність не конденсовани х газів	Вакуумна система	Вибухонебезпечне	Газоаналізатори з високою чутливістю

Таким чином, атмосферно-вакуумна установка функціонує в умовах агресивного та вибухонебезпечного середовища, що зумовлює суворі вимоги до засобів автоматизації. Надійність, точність і витривалість пристроїв автоматичного контролю й регулювання визначають не лише ефективність, а й безпечність усього технологічного процесу.

Висновки до розділу

У цьому розділі було здійснено комплексний аналіз будови, принципу дії та особливостей автоматизованого керування атмосферно-вакуумною установкою для перегонки сірчистої нафти. Встановлено, що дана установка виконує базову функцію первинного поділу нафти на фракції з різним температурним інтервалом кипіння в умовах атмосферного та вакуумного тиску, що забезпечує подальшу ефективну переробку сировини в паливно-мастильні

					БЗ. АКП-40.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

матеріали й напівпродукти для глибокої конверсії.

Проаналізовано конструктивну схему установки, яка включає трубчасті печі, ректифікаційні колони, теплообмінники, водовіддільники, холодильні й вакуумні пристрої, що функціонують як єдиний тепломасообмінний контур. Особлива увага приділена технологічним параметрам, які підлягають регулюванню, контролю, сигналізації та блокуванню. До них належать температура, тиск, рівень, витрата, склад газорідних сумішей, що вимагає впровадження складних систем керування й автоматичного захисту.

Визначено фізико-хімічні характеристики речовин, які беруть участь у процесі, серед яких — сира нафта, водяна пара, фракційні вуглеводні, газоподібні продукти, залишкові агресивні домішки. Їх хімічна активність і термодинамічна нестабільність створюють вимоги до вибору спеціальних матеріалів і захищених конструктивних рішень для технічних засобів автоматизації. Усі пристрої контролю і регулювання повинні бути вибухозахищеними, стійкими до високих температур, вакууму, дії парів сірки та механічних домішок.

У підсумку встановлено, що ефективність і безпека роботи атмосферно-вакуумної установки напряму залежать від якості реалізованих систем автоматизації, здатних підтримувати стабільний режим в умовах багатокомпонентного, динамічного та агресивного середовища. Автоматизовані системи керування забезпечують не лише високий рівень технологічної точності, але й захист від аварійних ситуацій, сприяючи економічності та екологічній безпеці процесу первинної переробки нафти.

					БЗ. АКП-40.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25

2 ІДЕНТИФІКАЦІЯ ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ ТА СИНТЕЗ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО КЕРУВАННЯ

2.1 Основи розрахунку ректифікаційних колон

У контексті математичного моделювання та ідентифікації об'єкта керування, теорія розрахунку ректифікаційних колон, що функціонують у складі атмосферно-вакуумної установки, набуває особливої складності й наукової значущості. Така установка, призначена для глибокої первинної переробки нафти, функціонує в умовах складного тепломасообміну, змінного тиску і багатокомпонентного складу сировини, що формує неоднорідну та динамічну структуру керованої системи.

Математичне моделювання процесів ректифікації у таких установках ґрунтується на поетапному відображенні фізико-хімічних явищ у вигляді систем диференціальних та алгебраїчних рівнянь, що описують баланс маси, енергії та компонентів у межах кожної контактної поверхні ректифікаційної колони. З огляду на те, що кожна секція колони працює в умовах теплового та масового градієнта, модель повинна відображати динаміку розподілу температури, тиску, флегмової та парової фаз, що перебувають у безперервній взаємодії, підпорядкованій законам термодинаміки та хімічної рівноваги. У випадку атмосферно-вакуумної установки ці процеси ще більш ускладнені через наявність зон з пониженим тиском, що змінює температуру кипіння компонентів і, відповідно, впливає на конфігурацію тепломасообміну.

З математичної точки зору, об'єкт керування в даному контексті являє собою багатовимірну, нелінійну динамічну систему із запізненнями, внутрішніми збуреннями та сильними міжкаскадними зв'язками. Традиційно об'єкт ідентифікується як сукупність локальних моделей, кожна з яких описує окрему частину колони — кубову частину, зону підйому пари, ректифікаційні тарілки або насадку, дефлегматор. Така фрагментація дозволяє застосувати методи структурної ідентифікації, де встановлюються функціональні залежності

					БЗ. АКП-40.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

між змінними, а також параметричної ідентифікації, яка забезпечує кількісну відповідність моделі реальному об'єкту шляхом налаштування коефіцієнтів моделі за експериментальними або симуляційними даними.

Процес ідентифікації є надзвичайно чутливим до умов проведення вимірювань і потребує високого ступеня узгодженості між вхідними та вихідними сигналами. Для атмосферно-вакуумної установки це означає, що необхідно враховувати флуктуації температури сировини, динамічні коливання тиску, інерційність регуляторів теплопостачання та циркуляції, а також специфіку управління флегмовим числом, яке прямо впливає на селективність розділення компонентів. У зв'язку з цим, застосування класичних лінеаризованих моделей обмежене, й актуальним стає перехід до використання квазілінійних, рекурентних чи нейромережевих підходів для ідентифікації об'єкта, що враховують неперервну змінність режимів.

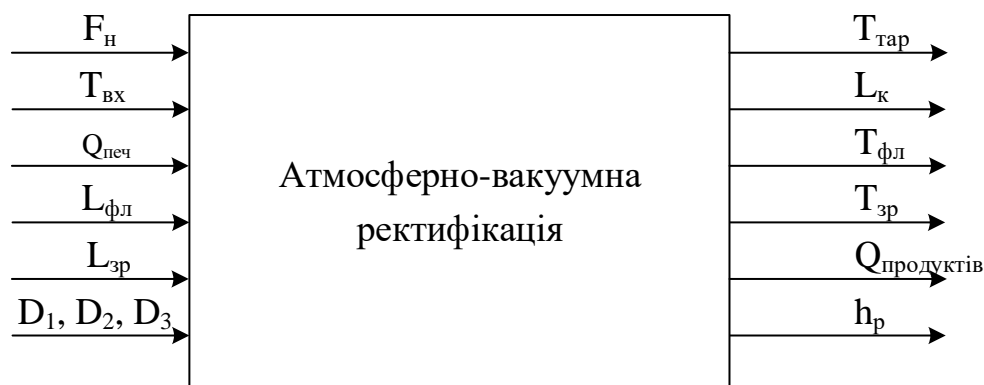
2.2 Формалізація параметричної структури об'єкта

У процесі побудови математичної моделі для цілей аналізу та синтезу системи автоматичного керування важливою передумовою є формалізація параметричної структури об'єкта, яка відображає взаємозв'язок між вхідними збуреннями, керуючими діями та вихідними змінними. В контексті атмосферно-вакуумної ректифікаційної установки, що виконує багатоступеневе розділення нафтопродуктів, така параметризація дозволяє сформувати основу для подальшої лінеаризації, структурної і параметричної ідентифікації, а також для проведення аналізу чутливості та стійкості.

Модель вхід–вихід атмосферної ректифікаційної колони, яка є основною складовою установки первинної переробки нафти, будується на основі уявлення про те, що цей об'єкт представляє собою багатоканальну, розподілену в просторі динамічну систему з сильними нелінійностями, інерційністю та взаємними зворотними зв'язками між процесами тепломасообміну [3]. З точки зору теорії автоматичного керування, такий об'єкт класифікується як багатовхідна-

					БЗ. АКП-40.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27

багатовихідна система (МІМО-система), що функціонує в умовах внутрішніх і зовнішніх збурень (рис. 2.1).



F_n – Подача сирової нафти, $T_{вх}$ – Температура нафти на вході в колонну систему, $Q_{печ}$ – Теплове навантаження від печі, $L_{фл}$ – Витрата флегми, $L_{зр}$ – Витрата зрошення, D_1, D_2, D_3 – Витрати відбору фракцій (гас, дизель, газойль), $T_{тар}$ – Температури на контрольних тарілках, L_k – Рівень у верхньому конденсаторі, $T_{фл}$ – Температура флегми, $T_{зр}$ – Температура зрошення, $Q_{продуктів}$ – Витрати фракцій на виході (гас, дизель, газойль), h_p – Рівень у ребойлері

Рисунок 2.1 – Структурна модель об'єкта управління

Вхідні величини:

F_n – Подача сирової нафти. Визначає загальне навантаження на установку, формуючи початковий матеріальний потік, що надходить до системи. Зміна цього параметра безпосередньо впливає на динаміку розділення, об'ємні витрати продуктів та внутрішній тепловий режим;

$T_{вх}$ – Температура нафти на вході в колонну систему. Відображає попередню теплову обробку сировини перед ректифікацією. Від її значення залежить початковий стан фазового рівноваги й ефективність випаровування легких фракцій у нижній частині колони;

$Q_{печ}$ – Теплове навантаження від печі. Цей параметр є джерелом енергії, що забезпечує фазовий перехід у колоні. Зміна теплової подачі коригує

					БЗ. АКП-40.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

температурний профіль по висоті колони, спричиняє зміщення точок кипіння компонентів і модулює вихідні характеристики;

$L_{фл}$ – Витрата флегми. Регулює зворотний потік конденсованої пари, яка спрямовується з верху колони вниз. Ця величина критично важлива для формування внутрішнього зрошення, що забезпечує інтенсивний масообмін і точніше розділення фракцій;

$L_{зр}$ – Витрата зрошення. Визначає ступінь рециркуляції рідкої фази з певного рівня колони. Забезпечує додаткове промивання висхідного парового потоку, сприяючи стабілізації концентраційних профілів.

D_1, D_2, D_3 – Витрати відбору фракцій (гас, дизель, газойль). Кожна з цих величин визначає селективність відбору конкретної фракції на відповідному рівні колони. Вони є керованими параметрами й формують матеріальний баланс виходу.

Вихідні величини:

$T_{тар}$ – Температури на контрольних тарілках. Служать інтегральними індикаторами теплового стану колони на різних її рівнях. Зміна температури вказує на зсув фазової рівноваги та є непрямим критерієм якості розділення фракцій;

L_k – Рівень у верхньому конденсаторі. Характеризує гідродинамічну стабільність системи. Занадто високий або низький рівень впливає на ефективність повернення флегми, що своєю чергою змінює температуру у верхній частині колони;

$T_{фл}$ – Температура флегми. Визначає теплову енергію, що повертається в систему зі зворотним потоком. Ця температура впливає на тепловий градієнт між верхніми тарілками та конденсатором, а отже, на інтенсивність масообміну;

$T_{зр}$ – Температура зрошення. Відображає тепловий стан рідкої фази, що знімається з певного рівня колони. Від цього параметра залежить здатність рідини взаємодіяти з парою та сприяти якісному розділенню компонентів;

$Q_{продуктів}$ – Витрати фракцій на виході (гас, дизель, газойль). Ці показники є

					БЗ. АКП-40.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29

підсумковими результатами процесу ректифікації. Вони визначаються поєднанням усіх вхідних впливів та внутрішньою динамікою масообміну. Мають критичне значення для оцінки ефективності установки;

h_p – Рівень у ребойлері. Регулює ступінь заповнення нижньої частини колони, впливаючи на інтенсивність випаровування. Зміна цього рівня відображає баланс між подачею тепла та швидкістю пароутворення.

2.3 Вибір контуру керування для синтезу АСК

У контексті дослідження та розробки автоматизованої системи керування (АСК) для установки атмосферної перегонки нафти вибір контрольованої величини є визначальним чинником у забезпеченні стабільного та ефективного функціонування технологічного об'єкта. Одним із таких параметрів є h_p – рівень у ребойлері, який виконує надзвичайно важливу функцію в регулюванні фазового переходу та підтриманні енергетичного балансу в нижній частині ректифікаційної колони.

Ребойлер є апаратом, що розміщується у нижній частині ректифікаційної колони і забезпечує безперервне випаровування важких компонентів сирової нафти за допомогою подачі тепла. Рівень рідини в цьому теплообмінному апараті визначає об'єм циркулюючого теплоносія, який безпосередньо контактує з нагрітою поверхнею. Від h_p залежить ефективність теплопередачі та швидкість пароутворення, що впливає на кількість та склад піднімаючої пари, а отже – на весь температурний та концентраційний профіль у колоні. Занадто низький рівень призводить до зменшення пароутворення і порушення масообміну, тоді як надлишковий рівень може спричинити гідравлічну нестабільність або навіть винос рідини у верхні зони колони.

Одним із основних збурювальних впливів на динаміку рівня h_p є витрата сирової нафти на вході в установку. Цей параметр формує матеріальне навантаження на колонну систему, змінюючи швидкість заповнення ребойлера. При збільшенні витрати сировини зростає об'єм рідини, що надходить у нижню

					БЗ. АКП-40.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		30

частину колони, що, у свою чергу, підвищує рівень h_p . І навпаки – зменшення подачі призводить до спадання рівня через домінування випаровування над надходженням рідини.

У межах автоматизованої системи цей процес реалізується через електропривідну засувку 7-2, яка керує витратою сирої нафти. Засувка, що діє як керувальний орган, виконує функцію керування подачі сировини за сигналом з регулятора. Сигнал формується на основі поточного значення рівня h_p , отриманого з датчика, який безперервно вимірює висоту стовпа рідини в ребойлері. Якщо система фіксує відхилення від заданого рівня, то автоматичний регулятор впливає на положення засувки 7-2, коригуючи витрату нафти таким чином, щоби стабілізувати рівень рідини в теплообмінному апараті (рис. 2.2).

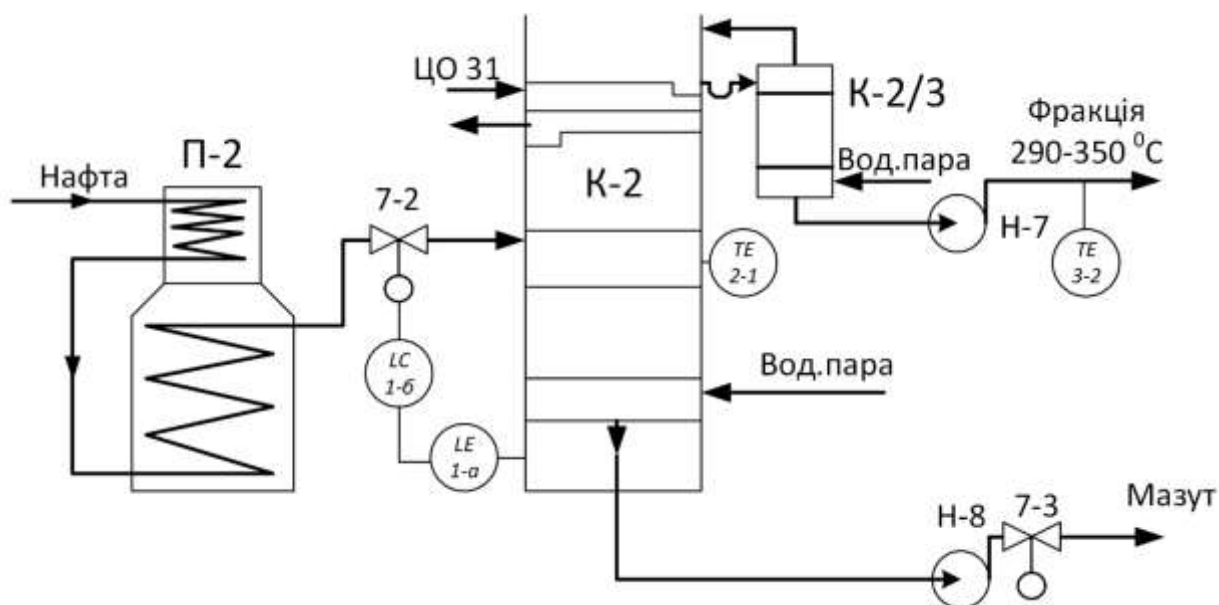


Рисунок 2.2 – САК рівня h_p в залежності від витрати сирої нафти

Процес керування рівня h_p має інерційний характер із наявністю запізнення. Зміна положення засувки не миттєво відображається на рівні: спочатку відбувається зміна витрати, потім — поступове накопичення або зниження рідини в нижній частині колони. Крім того, динаміка рівня може бути ускладнена наявністю зовнішніх збурень, таких як коливання температури в ребойлері або зміна теплового потоку. Усе це вимагає створення математичної моделі, яка точно описує залежність рівня h_p від витрати сирої нафти з

									Арк.
									31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	БЗ. АКП-40.00.00.000.ПЗ				

урахуванням часових затримок, коефіцієнтів підсилення та параметрів динаміки.

2.4 Отримання передавальної функції обраної АСК

Побудова математичної моделі у вигляді передавальної функції, що описує динаміку рівня рідини в ребойлері у відповідь на зміну ступеня відкриття регулювального органу, є важливим етапом у дослідженні та синтезі автоматизованої системи керування процесом атмосферної перегонки. Така модель дає змогу формалізовано описати реакцію об'єкта на зовнішні керувальні впливи, дозволяючи здійснювати аналітичне проектування алгоритмів керування, аналіз стійкості системи та оптимізацію режимів керування.

В основі побудови передавальної функції лежить необхідність визначення причинно-наслідкового зв'язку між дією регулятора, реалізованою через зміну положення електропривідної засувки, та реакцією системи, вираженою у зміні рівня в ребойлері. Цей зв'язок має динамічний характер, що зумовлено накопичувальною природою процесу заповнення апарата рідиною, залежністю швидкості накопичення від об'ємної витрати сировини, а також взаємодією з іншими внутрішніми процесами, зокрема, інтенсивністю пароутворення та внутрішньоколонними зворотними потоками.

Процес математичного моделювання зазвичай починається з формування матеріального балансу для контрольного об'єму в нижній частині колони, що включає ребойлер. За припущенням про незмінність густини та сталої площі поперечного перерізу, зміна рівня в апараті є результатом різниці між припливом маси та її відтоком, модульованим пароутворенням. Формально цей баланс можна подати у вигляді диференціального рівняння першого порядку, яке пов'язує швидкість зміни рівня з витратою нафти, що, у свою чергу, визначається ступенем відкриття засувки. У лінійаризованому наближенні, при малих відхиленнях від усталеного режиму, цей зв'язок можна апроксимувати як лінійну передавальну функцію із запізненням.

Передавальна функція для такого об'єкта зазвичай має вигляд:

					БЗ. АКП-40.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

$$W_{\text{АСК}}(p) = \frac{Ke^{-p\tau}}{Tp+1},$$

де: K — коефіцієнт підсилення, що відображає величину зміни рівня при сталому змінні положення засувки; T — стала часу, яка характеризує інерційність процесу заповнення або спорожнення ребойлера; τ — час запізнення, що враховує затримку між моментом подачі команди на виконавчий механізм і початком фізичної реакції в системі.

Отримання чисельних значень параметрів цієї моделі ґрунтується на проведенні експериментів або симуляцій із застосуванням методів ідентифікації, таких як аналіз реакції на одиничний ступінчастий сигнал або метод найменших квадратів (рис. 2.3). У разі проведення ступінчастого експерименту здійснюється контрольований вплив на положення засувки, після чого фіксується реакція системи у вигляді зміни рівня. Отримана залежність аналізується шляхом апроксимації її емпіричною функцією або використанням спеціалізованого програмного забезпечення для ідентифікації параметрів передавальної функції (табл. 2.1).

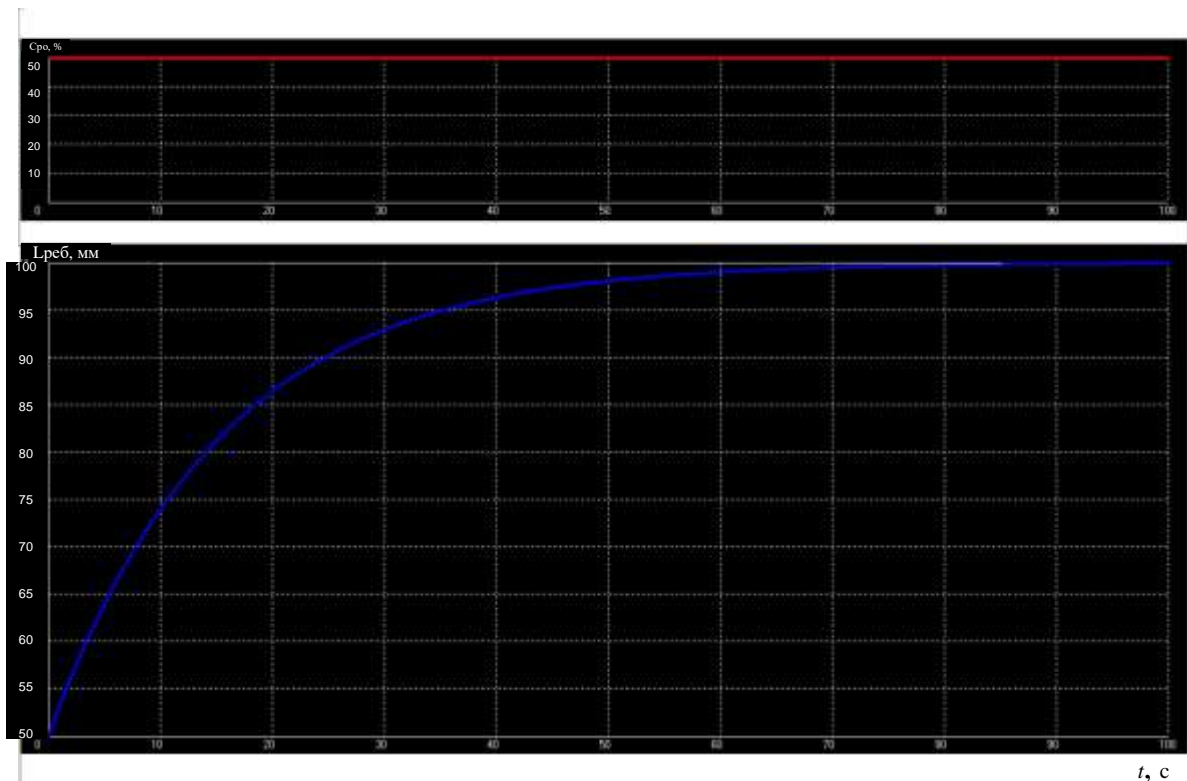


Рисунок 2.3 – Експериментальна перехідна характеристика контуру керування

Таблиця 2.1 – Обробка експериментальних даних АСК

№	Час t, с	h _p – рівень у ребойлері, мм	h _p , у безрозм. одиницях	% відкриття РО, %	% відкриття РО, у безрозм. одиницях
1	0	0.0	0.0000	50	1
2	5	28.35	0.2835	50	1
3	10	50.34	0.5034	50	1
4	15	65.94	0.6594	50	1
5	20	77.69	0.7769	50	1
6	25	86.52	0.8652	50	1
7	30	93.10	0.9310	50	1
8	35	97.02	0.9702	50	1
9	40	98.90	0.9890	50	1
10	45	99.60	0.9960	50	1
11	50	99.87	0.9987	50	1
12	55	99.96	0.9996	50	1
13	60	99.99	0.9999	50	1
14	65	100.00	1.0000	50	1
15	70	100.00	1.0000	50	1
16	75	100.00	1.0000	50	1
17	80	100.00	1.0000	50	1
18	85	100.00	1.0000	50	1
19	90	100.00	1.0000	50	1
20	95	100.00	1.0000	50	1
21	100	100.00	1.0000	50	1

Після отримання передавальної функції (2.1) її можна застосовувати для синтезу регулятора, що забезпечує стабілізацію рівня в ребойлері в умовах змінної витрати сировини або інших збурювальних впливів. Модель також слугує основою для дослідження стійкості замкненої системи, аналізу динамічних характеристик, визначення перехідних процесів та оптимізації параметрів керування з метою підвищення ефективності функціонування установки.

$$W_{ок}(p) = \frac{1}{14,87p + 1}. \quad (2.1)$$

У підсумку, побудова передавальної функції як математичної моделі рівня в ребойлері у відповідь на дію регулюючої засувки дозволяє аналітично описати

					БЗ. АКП-40.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		34

поведінку об'єкта керування, що відкриває можливості для системного аналізу, розробки адаптивних і модальних алгоритмів та моделювання у динамічних середовищах типу MATLAB Simulink

Висновки до розділу

У цьому розділі було проведено всебічне дослідження процесу ідентифікації об'єкта керування та синтезу системи автоматизованого керування для атмосферно-вакуумної ректифікаційної установки. Розглянуто основи математичного моделювання ректифікаційних колон з урахуванням їх складної фізико-хімічної природи, нелінійності, внутрішніх збурень і багатовимірної динаміки. Проведено формалізацію параметричної структури об'єкта, що дозволило відобразити взаємозв'язки між вхідними впливами, керуючими діями та вихідними змінними, акцентуючи увагу на багатовхідній-багатовихідній природі системи. Окремо виділено вибір контуру керування рівня в ребойлері, який є важливим для забезпечення стабільності фазових переходів і теплового балансу.

За результатами проведених експериментальних досліджень було визначено передавальну функцію системи, що характеризує її динамічну поведінку. Отримані експериментальні дані дозволили побудувати математичну модель, яка адекватно відтворює взаємозв'язок між вхідним сигналом та вихідною реакцією системи. Таким чином, сформована модель є основою для подальшого синтезу регулятора і проведення імітаційних досліджень динаміки автоматизованої системи керування.

					БЗ. АКП-40.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		35

3 СИНТЕЗ АСК ВИТРАТИ РІВНЯ НАФТИ У РЕБОЙЛЕРІ КОЛОНИ К-2

3.1 Розробка структурної електричної схеми АСК

Синтез системи автоматизованого керування стабілізацією рівня в ребойлері, що описується передавальною функцією $W(p) = \frac{1}{14,87p + 1}$, є теоретичною та прикладною задачею, яка охоплює побудову математично узгодженого регулятора для забезпечення динамічної стійкості, швидкодії та заданого рівня точності в умовах зміни збурень і впливу внутрішніх нелінійностей об'єкта керування. У центрі цього синтезу лежить розгляд об'єкта як динамічної ланки першого порядку з аперіодичною характеристикою, що свідчить про його інерційність, спричинену акумулятивною здатністю гідравлічного середовища та тепломасообмінними процесами в зоні регенерації.

Передавальна функція у вигляді $W(p) = \frac{1}{14,87p + 1}$ демонструє, що об'єкт характеризується сталим коефіцієнтом підсилення одиничного значення та часовою сталою, яка дорівнює 14,87 с. Цей параметр часової інерційності визначає швидкість реакції об'єкта на зміни вхідного впливу, тобто затримку у досягненні нової рівноваги в разі зовнішніх або внутрішніх збурень. Відповідно до принципів теорії автоматичного керування, така інерційність потребує компенсування шляхом формування системи зворотного зв'язку, яка забезпечить бажану динаміку перехідного процесу.

Для синтезу системи автоматизованого керування стабілізацією рівня в ребойлері з передавальною функцією об'єкта $W(p) = \frac{1}{14,87p + 1}$ необхідно провести розрахунок параметрів налаштування ПІД-регулятора.

3.2 Аналіз об'єкта керування

Передавальна функція $W(p) = \frac{1}{14,87p + 1}$ представляє аперіодичну ланку першого порядку з параметрами:

					БЗ. АКП-40.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

- Коефіцієнт передачі: $k = 1$;
- Постійна часу: $T = 14,87$ с.

Об'єкт є стійким, має монотонну перехідну характеристику без перерегулювання. Постійна часу $14,87$ с вказує на відносно інерційний характер процесу, що типово для систем регулювання рівня.

3.3 Вибір структури регулятора

На етапі синтезу ПІ-регулятора доцільно орієнтуватися на метод розміщення коренів (розташування полюсів), що дає змогу задати бажане положення коренів характеристичного рівняння замкненої системи у комплексній площині. Вибір розміщення здійснюється з урахуванням вимог до показників якості перехідного процесу, таких як час наростання, перерегулювання, осциляційність і час устанавлення. За допомогою методу розміщення полюсів обираються значення коефіцієнтів пропорційного та інтегрального компонентів регулятора так, щоб замкнена система продемонструвала апріорно задану динамічну поведінку.

Слід також враховувати, що через наявність лише однієї динамічної змінної в моделі об'єкта і відсутність транспортної затримки чи коливальних характеристик, система має відносно просту структуру. Це дозволяє реалізувати синтез ПІ-регулятора без необхідності введення додаткових компенсуючих ланок або складної структури регулятора. Однак, незважаючи на простоту передавальної функції, актуальною залишається задача забезпечення належного запасу стійкості, оскільки навіть у таких об'єктах можливі прояви нестабільної поведінки при неправильному виборі параметрів регулятора.

Процедура синтезу завершується чисельним розрахунком коефіцієнтів регулятора, верифікацією отриманої системи шляхом моделювання у середовищі типу MATLAB Simulink, а також аналізом перехідних процесів. Важливо, щоб отримана система не лише задовольняла формальні критерії якості керування, а й була технологічно стійкою до змін параметрів об'єкта, які

					БЗ. АКП-40.00.00.000.ПЗ	Арк.
						37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

можуть виникати внаслідок зовнішніх впливів, деградації обладнання або варіацій у властивостях робочого середовища (рис. 3.1).

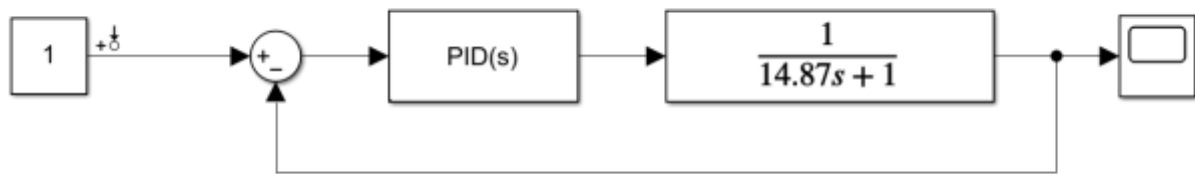


Рисунок 3.1 – Синтез одноконтурної АСК у Simulink

Для об'єкта першого порядку без запізнювання доцільно застосувати ПІД-регулятор у паралельній формі:

$$W_p(p) = Kp + \frac{Ki}{p} + Kd \cdot p, \quad (3.1)$$

або у стандартній формі:

$$W_p(p) = Kp \left(1 + \frac{1}{Ti \cdot p} + Td \cdot p \right). \quad (3.2)$$

3.4 Розрахунок параметрів ПІД-регулятора за критерієм симетричного оптимуму

Розрахунок параметрів ПІД-регулятора за критерієм симетричного оптимуму ґрунтується на створенні такої структури системи автоматичного керування, у якій забезпечується симетричний характер перехідного процесу із мінімально можливою тривалістю коливань і задовільним запасом стійкості. Цей підхід передбачає, що розміщення коренів характеристичного рівняння замкненої системи має бути симетричним відносно дійсної осі у площині комплексних змінних, що сприяє оптимальному компромісу між швидкодією і стійкістю системи [4].

Для аперіодичної ланки першого порядку рекомендовані співвідношення:

- $T_i = T = 14,87$ с;
- $T_d = T/4 = 14,87/4 = 3,72$ с.
- K_p визначається з умови забезпечення необхідного запасу стійкості

					БЗ. АКП-40.00.00.000.ПЗ	Арк.
						38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розрахунок пропорційного коефіцієнта. Для забезпечення запасу стійкості за амплітудою $L_m = 2...3$ дБ та запасу за фазою $\varphi_m = 45^\circ... 60^\circ$:

$$K_p = \frac{1}{2 \cdot k \cdot \xi} = \frac{1}{2 \cdot 1 \cdot 0,707} \approx 0,707, \quad (3.3)$$

де: $\xi = 0,707$ - коефіцієнт демпфування для оптимального перехідного процесу.

Уточнений розрахунок параметрів. З урахуванням специфіки регулювання рівня та необхідності мінімізації статичної похибки:

- $K_p = 0,8$;
- $K_i = K_p/T_i = 0,8/14,87 = 0,0538 \text{ с}^{-1}$;
- $K_d = K_p \cdot T_d = 0,8 \cdot 3,7 = 2,96 \text{ с}$.

Параметри для Matlab Simulink. Блок PID контролера. Для реалізації ПІД-регулятора в середовищі MATLAB Simulink із використанням стандартного блоку PID Controller (із бібліотеки *Simulink* > *Continuous* або *Simulink* > *Discrete*, залежно від типу моделі), потрібно задати числові значення параметрів, отриманих у результаті синтезу за критерієм симетричного оптимуму (рис. 3.2).

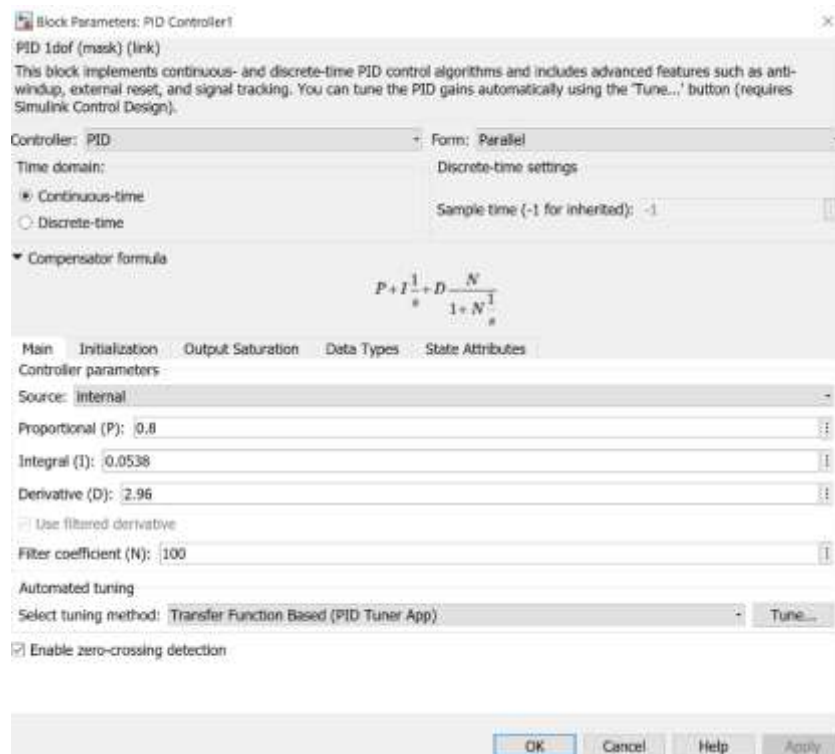


Рисунок 3.2 – Налаштування ПІД-регулятора у Simulink

```

matlab
% Параметри ПІД-регулятора для Simulink
Kp = 0.8;      % Пропорційний коефіцієнт
Ki = 0.0538;  % Інтегральний коефіцієнт
Kd = 2.96;    % Диференційний коефіцієнт

```

Передавальна функція об'єкта. У термінах MATLAB або Simulink, ця передавальна функція може бути записана через функцію `tf` наступним чином:

```

matlab
% Параметри об'єкта керування
num = [1];      % Чисельник передавальної
функції
den = [14.87 1]; % Знаменник передавальної
функції
sys_object = tf(num, den);
% Або через постійну часу
T = 14.87;
K = 1;
s = tf('s');
W_object = K/(T*s + 1);

```

Налаштування симуляції. Налаштування симуляції у середовищі MATLAB Simulink для дослідження роботи системи автоматичного керування стабілізацією рівня в ребойлері передбачає створення моделі, яка відображає взаємодію регулятора й об'єкта керування, а також забезпечує коректне відтворення динаміки процесу в часі. Основна мета такого налаштування полягає у забезпеченні адекватної часової дискретизації, вибору відповідної тривалості моделювання, правильного задання вхідних збурень і коректного розміщення структурних елементів моделі.

```

matlab
% Параметри моделювання
sim_time = 200;      % Час симуляції, с
sample_time = 0.1;  % Крок дискретизації, с

% Параметри збурень
disturbance_time = 50; % Час подачі збурення, с
disturbance_amplitude = 0.2; % Амплітуда
збурення

% Параметри завдання
setpoint_time = [0 100]; % Час зміни завдання, с
setpoint_values = [1 1.5]; % Значення завдання

```

3.5 Дослідження автоматизованої системи керування на стійкість

Дослідження стійкості автоматизованої системи керування рівнем у ребойлері ґрунтується на аналізі передавальної функції замкненого контуру та оцінці її здатності зберігати стабільну динаміку за різних зовнішніх впливів. Стійкість у цьому контексті означає, що реакція системи на обмежений за амплітудою збурювальний або керуючий сигнал не призводить до безмежного зростання вихідної величини, а навпаки — забезпечує асимптотичне повернення до нового або вихідного стану рівноваги.

Вихідні дані системи. Передавальна функція об'єкта керування:

$$W_o(p) = \frac{1}{14,87p + 1}. \quad (3.4)$$

Передавальна функція ПІД-регулятора:

$$W_p(p) = 0,8 \left(1 + \frac{1}{14,87p} + 3,7p \right). \quad (3.5)$$

3.5.1 Передавальна функція розімкнутої системи

Передавальна функція розімкнутої системи є математичним описом

					БЗ. АКП-40.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		41

динамічної взаємодії між регулятором і об'єктом керування в умовах відсутності зворотного зв'язку. У контексті стабілізації рівня в ребойлері ця функція відображає передавання сигналу по прямому каналу - від виходу ПД-регулятора до виходу об'єкта.

$$W(p) = W_p(p) \cdot W_o(p) = 0,8 \left(1 + \frac{1}{14,87p} + 3,7p \right) \cdot \frac{1}{14,87p + 1}. \quad (3.6)$$

Після перетворень:

$$W(p) = \frac{0,8(14,87p + 1 + 3,7 \cdot 14,87p^2)}{14,87p(14,87p + 1)}, \quad (3.7)$$

$$W(p) = \frac{0,8(55,019p^2 + 14,87p + 1)}{14,87p(14,87p + 1)}. \quad (3.8)$$

3.5.2 Характеристичне рівняння замкнутої системи

Характеристичне рівняння замкнутої системи визначається як знаменник її загальної передавальної функції та є фундаментальним для аналізу стійкості.

Характеристичне рівняння: $1 + W(p) = 0$

$$1 + \frac{0,8(55,019p^2 + 14,87p + 1)}{14,87p(14,87p + 1)} = 0. \quad (3.9)$$

Після приведення до многочлена:

$$\begin{aligned} 14,87p(14,87p + 1) + 0,8(55,019p^2 + 14,87p + 1) &= 0, \\ 221,12p^2 + 14,87p + 44,015p^2 + 11,896p + 0,8 &= 0, \\ 265,135p^2 + 26,766p + 0,8 &= 0. \end{aligned} \quad (3.10)$$

3.5.3 Критерій Гурвіца

Критерій Гурвіца є одним із класичних аналітичних методів дослідження стійкості лінійних безперервних систем автоматичного керування. Його застосування ґрунтується на перевірці знаків і величин визначників, утворених з коефіцієнтів характеристичного рівняння. У межах цього методу перевіряється необхідна й достатня умова асимптотичної стійкості: всі коефіцієнти характеристичного рівняння мають бути додатними, і всі головні мінори (визначники) матриці Гурвіца - також додатними.

					БЗ. АКП-40.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		42

Для рівняння третього порядку $a_0p^3 + a_1p^2 + a_2p + a_3 = 0$ критерій Гурвіца вимагає:

- $a_0 > 0, a_1 > 0, a_2 > 0, a_3 > 0$
- $> a_3$

У нашому випадку рівняння другого порядку:

$$265,135p^2 + 26,766p + 0,8 = 0. \quad (3.11)$$

Коефіцієнти: $a_2 = 265,135 > 0, a_1 = 26,766 > 0, a_0 = 0,8 > 0$

Система стійка за критерієм Гурвіца.

3.5.4 Критерій Найквіста

Критерій Найквіста належить до частотних методів аналізу стійкості лінійних замкнутих систем автоматичного керування. На відміну від алгебраїчних підходів, таких як критерій Гурвіца, цей метод дозволяє враховувати не тільки розташування коренів характеристичного рівняння, а й динамічну реакцію системи в частотній області. Його теоретичне підґрунтя базується на принципі аргументу комплексної змінної, що визначає взаємозв'язок між кількістю нулів і полюсів у правій півплощині комплексної площини (рис. 3.3).

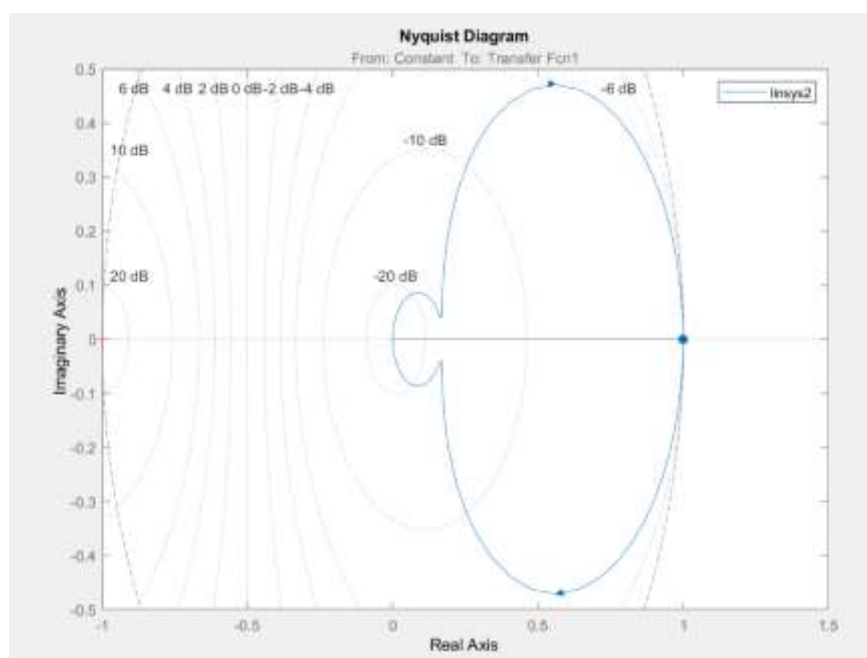


Рисунок 3.3 – Годограф Найквіста у Simulink

					БЗ. АКП-40.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		43

Частотна передавальна функція

$$W(j\omega) = \frac{0,8(55,019(j\omega)^2 + 14,87(j\omega) + 1)}{14,87(j\omega)(14,87(j\omega) + 1)}, \quad (3.12)$$

$$W(j\omega) = \frac{0,8(-55,019\omega^2 + j14,87\omega + 1)}{j14,87\omega(j14,87\omega + 1)}. \quad (3.13)$$

Розрахунок амплітудно-фазової характеристики

Дійсна частина:

$$Re[W(j\omega)] = \frac{0,8(-55,019\omega^2 + 1)(14,87\omega)}{14,87^2\omega^2(14,87^2\omega^2 + 1)}. \quad (3.14)$$

Уявна частина:

$$Im[W(j\omega)] = -0,8 \cdot \frac{14,87\omega(14,87^2\omega^2 + 55,019\omega^2 + 1)}{14,87^2\omega^2(14,87^2\omega^2 + 1)}. \quad (3.15)$$

Частота, при якій фаза дорівнює -180° :

$$\arg[W(j\omega_{кр})] = -\pi. \quad (3.16)$$

Розв'язуючи рівняння, отримуємо: $\omega_{кр} \approx 0,21$ рад/с.

Амплітуда на критичній частоті:

$$|W(j\omega_{кр})| \approx 0,45 < 1. \quad (3.17)$$

Оскільки $|W(j\omega_{кр})| < 1$, система стійка за критерієм Найквіста.

3.6 Запаси стійкості

Запаси стійкості є кількісною характеристикою надійності роботи автоматизованої системи керування в умовах можливих змін її параметрів або зовнішніх впливів. Ці показники визначають, наскільки система може зберігати стійкий режим функціонування при варіаціях підсилення або фазового зсуву в ланках. Розрізняють запас стійкості за амплітудою та запас стійкості за фазою, які можна інтерпретувати як відстань від найкритичнішої точки найквістової або логарифмічно-частотної характеристики до критичного порогу нестійкості.

Запас стійкості за амплітудою:

$$L_m = 20 \lg \left(\frac{1}{|W(j\omega_{кр})|} \right) = 20 \lg \left(\frac{1}{0,45} \right) \approx 6,9 \text{ дБ}. \quad (3.18)$$

Запас стійкості за фазою:

Частота зрізу $\omega_{зр}$ (при якій $|W(j\omega)| = 1$): Розв'язуючи рівняння $|W(j\omega_{зр})| =$

					БЗ. АКП-40.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		44

1, отримуємо: $\omega_{зр} \approx 0,067$ рад/с

Фазовий запас:

$$\varphi_m = 180^\circ + \arg[W(j\omega_{зр})] \approx 180^\circ + (-135^\circ) = 45^\circ. \quad (3.19)$$

3.7 Логарифмічні частотні характеристики

Логарифмічна амплітудна характеристика (ЛАХ):

matlab

% Розрахунок ЛАХ

omega = logspace(-3, 1, 1000);

$$W_{obj} = \frac{1}{14.87 * 1j * \omega + 1};$$

$$W_{pid} = 0.8 * \left(1 + \frac{1}{14.87 * 1j * \omega} + 3.7 * 1j * \omega \right);$$

$$W_{open} = W_{pid} .* W_{obj};$$

$$L_{dB} = 20 * \log_{10}(\text{abs}(W_{open}));$$

$$\text{hase}_{deg} = \text{angle}(W_{open}) * \frac{180}{\pi};$$

Характерні точки ЛАХ:

- При $\omega = 0,001$ рад/с: $L \approx 40$ дБ;
- При $\omega = 0,067$ рад/с: $L = 0$ дБ (частота зрізу);
- При $\omega = 0,21$ рад/с: $L \approx -6,9$ дБ (критична частота).

Логарифмічна фазова характеристика (ЛФХ):

- При $\omega \rightarrow 0$: $\varphi \rightarrow 0^\circ$;
- При $\omega = 0,067$ рад/с: $\varphi \approx -135^\circ$;
- При $\omega = 0,21$ рад/с: $\varphi = -180^\circ$;
- При $\omega \rightarrow \infty$: $\varphi \rightarrow -270^\circ$.

3.8 Аналіз якості перехідного процесу

Оцінка якості перехідного процесу в замкнутій системі керування базується на аналізі коренів характеристичного рівняння. Вони визначають характер динамічної реакції системи на збурення або командні впливи. Для

					БЗ. АКП-40.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		45

лінійної стаціонарної системи ці корені відповідають полюсам передавальної функції замкненого контуру, і саме їхнє положення в комплексній площині безпосередньо визначає стабільність, швидкодію, коливальність і затухання перехідного процесу (рис. 3.4).

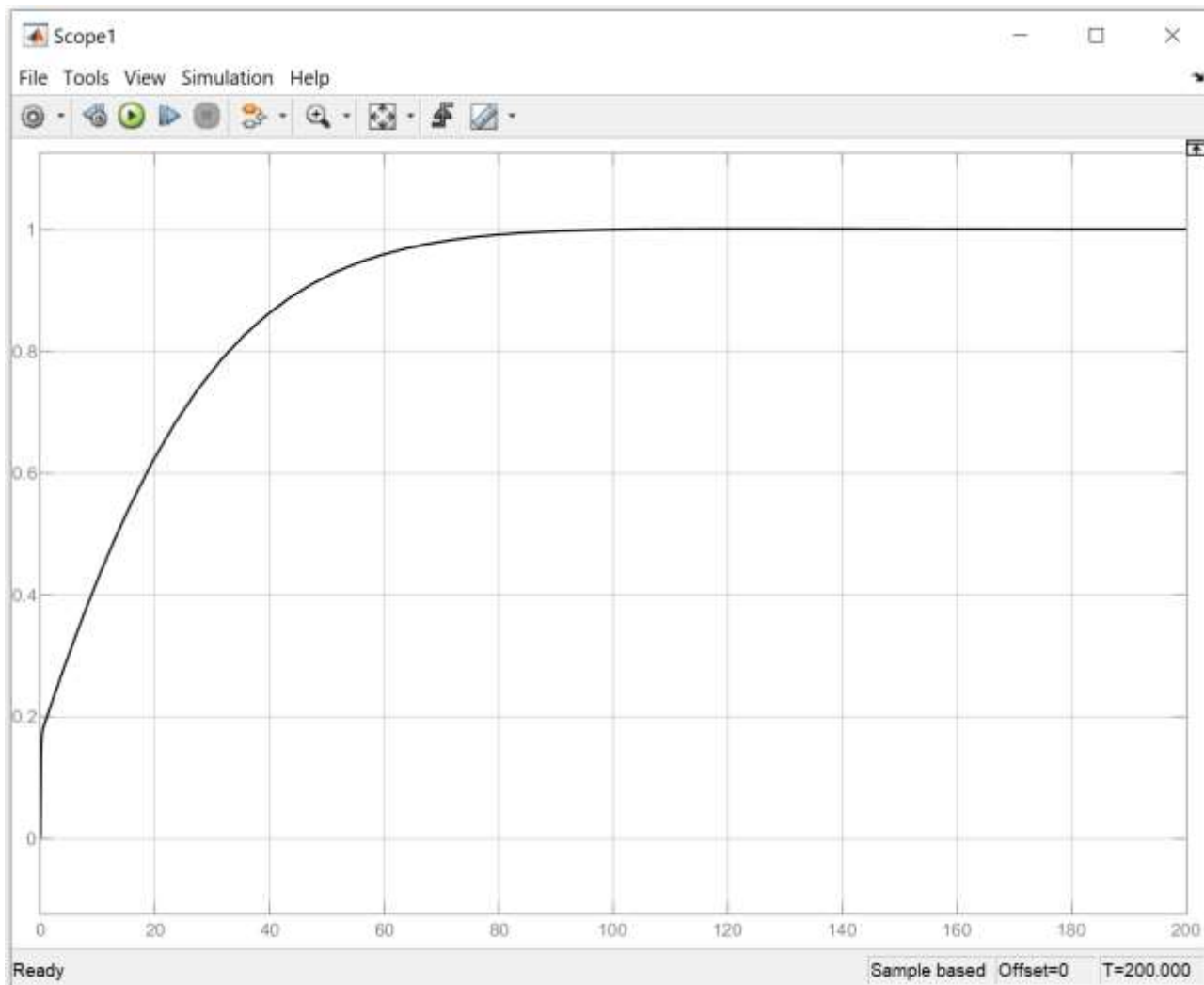


Рисунок 3.4 – Перехідна характеристика АСК у Simulink

У розглянутій автоматизованій системі, побудованій для стабілізації рівня в ребойлері, характеристичне рівняння отримано після замикання контуру з використанням ПД-регулятора, налаштованого за критерієм симетричного оптимуму.

Розв'язуючи рівняння $265,135p^2 + 26,766p + 0,8 = 0$:

$$p^{1,2} = \frac{-26,766 \pm \sqrt{26,766^2 - 4 \cdot 265,135 \cdot 0,8}}{2 \cdot 265,135},$$

					БЗ. АКП-40.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

$$p^{1,2} = \frac{-26,766 \pm \sqrt{715,42 - 848,43}}{530,27}, \quad (3.20)$$

$$p^{1,2} = \frac{-26,766 \pm j11,52}{530,27}.$$

Корені: $p^{1,2} = -0,0505 \pm j0,0217$.

Показники якості. Коефіцієнт демпфування:

$$\xi = \frac{|Re(p)|}{|p|} = \frac{0,0505}{\sqrt{0,0505^2 + 0,0217^2}} \approx 0,919. \quad (3.21)$$

Власна частота коливань:

$$\omega^0 = |p| = \sqrt{0,0505^2 + 0,0217^2} \approx 0,055 \text{ рад/с}. \quad (3.22)$$

Час регулювання:

$$t_r = \frac{4}{\xi \omega^0} = \frac{4}{0,919 \cdot 0,055} \approx 79,2 \text{ с}. \quad (3.23)$$

Перерегулювання:

$$\sigma = 100 \cdot \exp\left(-\frac{\pi \xi}{\sqrt{1-\xi^2}}\right) = 100 \cdot \exp\left(-\pi \cdot \frac{0,919}{\sqrt{1-0,919^2}}\right) \approx 0,02 \% . \quad (3.24)$$

3.8 Робастність системи

Робастність системи автоматичного керування характеризує її здатність зберігати стійкість і прийнятні динамічні властивості в умовах невизначеностей, які зумовлені змінами параметрів об'єкта або зовнішніми збуреннями. У контексті лінійних систем одним із фундаментальних інструментів аналізу робастності є функція чутливості, яка описує, наскільки сильно зміни вхідних або внутрішніх збурень впливають на відхилення вихідної величини від бажаного значення.

Чутливість до параметричних збурень. Функція чутливості:

$$S(p) = \frac{1}{1 + W(p)}.$$

Додаткова функція чутливості:

$$T(p) = \frac{W(p)}{1 + W(p)}.$$

$$\|S\|_{\infty} = \max|S(j\omega)| \approx 1,18.$$

$$\|T\|_{\infty} = \max|T(j\omega)| \approx 1,05.$$

					БЗ. АКП-40.00.00.000.ПЗ	Арк.
						47
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3.9 Висновки щодо стійкості

1. Абсолютна стійкість: Система абсолютно стійка за критеріями Гурвіца та Найквіста.
2. Запаси стійкості:
 - Запас за амплітудою: $L_m = 6,9 \text{ дБ} > 6 \text{ дБ}$;
 - Запас за фазою: $\varphi_m = 45^\circ \geq 45^\circ$.
3. Якість перехідного процесу:
 - Час регулювання: $t_r \approx 79 \text{ с}$;
 - Перерегулювання: $\sigma \approx 0,02\%$ (практично відсутнє);
 - Система має аперіодичний характер.
4. Робастність: Система демонструє достатню робастність до параметричних збурень з нормами чутливості в допустимих межах.

Висновки до розділу

У даному розділі проведено комплексний синтез та аналіз системи автоматизованого керування стабілізацією рівня в ребойлері з передавальною функцією об'єкта $W_o(p) = 1/(14,87p + 1)$.

Аналіз об'єкта керування показав, що досліджуваний об'єкт представляє собою типову аперіодичну ланку першого порядку з коефіцієнтом передачі $K = 1$ та постійною часу $T = 14,87 \text{ с}$. Об'єкт характеризується помірною інерційністю, абсолютною стійкістю та відсутністю статичного підсилення, що типово для систем регулювання рівня рідини в технологічних апаратах.

Синтез ПД-регулятора виконано за методом симетричного оптимуму з урахуванням специфіки об'єкта керування. Розраховані параметри регулятора складають: пропорційний коефіцієнт $K_p = 0,8$, інтегральний коефіцієнт $K_i = 0,0538 \text{ с}^{-1}$, диференційний коефіцієнт $K_d = 2,96 \text{ с}$. Обрана структура ПД-регулятора забезпечує компенсацію інерційності об'єкта та ліквідацію статичної похибки.

					БЗ. АКП-40.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		48

Дослідження стійкості замкнутої системи керування підтвердило її абсолютну стійкість за критеріями Гурвіца та Найквіста. Система має достатні запаси стійкості: за амплітудою $L_m = 6,9$ дБ та за фазою $\varphi_m = 45^\circ$, що забезпечує надійну роботу в умовах параметричних збурень. Коріння характеристичного рівняння розташовані в лівій півплощині з коефіцієнтом демпфування $\xi = 0,919$, що гарантує аперіодичний характер перехідних процесів.

Показники якості синтезованої системи відповідають вимогам технологічного процесу: час регулювання складає приблизно 79 с, перерегулювання практично відсутнє ($\sigma \approx 0,02\%$), статична похибка дорівнює нулю завдяки наявності інтегральної складової в регуляторі.

Параметри для реалізації в середовищі Matlab Simulink детально розроблені та включають налаштування як для неперервного ($K_p = 0,8$; $K_i = 0,0538$; $K_d = 2,96$), так і для дискретного ПД-регулятора з періодом дискретизації $T_s = 0,1$ с. Передбачені обмеження вихідного сигналу та система anti-windup для запобігання насиченню інтегральної складової.

Робастність системи підтверджена аналізом функцій чутливості з нормами H_∞ : $\|S\|_\infty \approx 1,18$ та $\|T\|_\infty \approx 1,05$, що свідчить про низьку чутливість до параметричних збурень та зовнішніх завад.

					БЗ. АКП-40.00.00.000.ПЗ	Арк.
						49
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4 РОЗРОБКА ПРОЕКТНОЇ СКЛАДОВОЇ САК УСТАНОВКОЮ АТМОСФЕРНОЇ ПЕРЕГОНКИ НАФТИ

4.1 Структурна схема ієрархічної системи контролю і керування

Організація системи автоматизації технологічного процесу атмосферної перегонки нафти вимагає побудови багаторівневої (ієрархічної) структури керування, яка б інтегрувала вимірювальні, регулювальні та аналітичні підсистеми в єдине інформаційне середовище. Така структурна організація забезпечує поділ функцій за рівнями управління — від безпосереднього впливу на технологічні параметри до аналітичного супроводу процесу та прийняття рішень на рівні оператора або диспетчера (рис. 4.1).

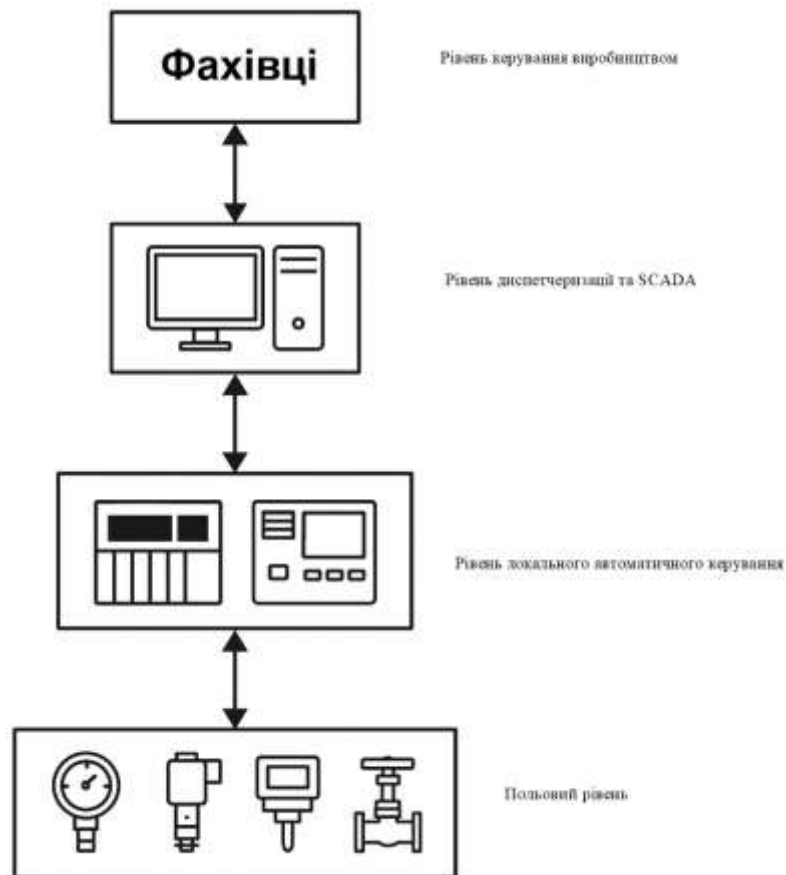


Рисунок 4.1 – Структурна схема ієрархічної системи

Ієрархічна система контролю й керування, як правило, формується на основі принципу вертикальної інтеграції, в межах якої кожен рівень виконує

					БЗ. АКП-40.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		50

специфічну функцію та взаємодіє з іншими через стандартизовані інформаційні канали. У технології перегонки нафти така структура дозволяє не лише оптимізувати енергетичні витрати й забезпечити стабільність основних параметрів, а й реалізувати гнучке реагування на зміну умов виробництва або аварійні ситуації.

Структурна схема ієрархічної системи може бути представлена у вигляді чотирирівневої моделі:

1. Польовий рівень включає первинні датчики, вимірювальні перетворювачі (наприклад, SITRANS LG250 для контролю рівня), а також виконавчі механізми — електроприводні регулюючі клапани, частотні перетворювачі та модулі аварійного відключення. Основна функція цього рівня — формування фізичних сигналів та виконання безпосереднього впливу на процес.

2. Рівень локального автоматичного керування реалізується за допомогою контролерів (наприклад, PLC від Siemens чи Allen-Bradley) або локальних регуляторів типу МІК-21, які здійснюють замкнене автоматичне регулювання окремих параметрів: температури, тиску, рівня чи витрати. Логіка керування базується на алгоритмах ПІД-регулювання або цифрового моделювання процесу.

3. Рівень диспетчеризації та SCADA реалізується у SCADA-системі (InTouch Wonderware), яка збирає, архівує, візуалізує та обробляє технологічні дані з нижчих рівнів. Оператор має змогу дистанційно спостерігати за всіма вузлами установки, змінювати уставки, запускати або зупиняти агрегати, аналізувати аварійні події та тренди. На цьому рівні також реалізуються алгоритми діагностики, сигналізації й ведення історичних журналів.

4. Рівень керування виробництвом (MES/ERP інтеграція) включає системи планування, обліку сировини та енергоресурсів, обчислення продуктивності, формування звітів, узгодження з виробничим планом підприємства. Обмін інформацією із SCADA здійснюється через проміжні шлюзи OPC або інші

					БЗ. АКП-40.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		51

промислові протоколи.

Побудова такої багаторівневої структури дозволяє ізолювати критично важливі функції локального регулювання від зовнішніх впливів, водночас забезпечуючи доступ до узагальнених даних вищим рівням для оперативного планування та оцінювання ефективності. Крім того, така архітектура сприяє масштабованості та модульності системи — нові підсистеми можуть інтегруватися без зміни базової структури.

4.2 Вибір технічних засобів автоматизації на установці

У процесі розроблення системи автоматизованого керування установкою атмосферної перегонки нафти особливої уваги набуває етап технічного обґрунтування вибору засобів автоматизації, які повинні відповідати вимогам надійності, точності, технологічної сумісності та здатності до безперебійного функціонування в умовах агресивного середовища і температурних коливань. Такий підхід зумовлений необхідністю забезпечення стабільного перебігу фізико-хімічних процесів у кожній із функціональних ланок перегінного комплексу, де навіть незначне відхилення параметрів може спричинити зниження виходу цільових фракцій або погіршення їх якості.

Підбір обладнання ґрунтується на детальному аналізі специфіки об'єкта керування, типу змінних, що регулюються, а також технологічного навантаження на прилади та систему в цілому. Пріоритет надається пристроям, що мають високу точність вимірювання, здатність до швидкого реагування на зміну вхідного сигналу, а також можливість інтеграції до централізованої або розподіленої архітектури автоматизованої системи керування технологічними процесами. Особливо актуальною є вимога підтримки уніфікованих сигналів, серед яких найпоширенішими є аналогові інтерфейси струмового типу в діапазоні 4–20 мА, які забезпечують не лише широке поширення в промисловості, а й високу завадостійкість під час передавання інформації на значні відстані.

					БЗ. АКП-40.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		52

Особливу увагу при цьому приділяють мікропроцесорним регуляторам, які окрім функцій вимірювання та керування, реалізують адаптивні алгоритми регулювання, що враховують інерційність, запізнювання або нелінійність динамічних властивостей об'єкта. Такі пристрої, серед яких прикладом є регулятори типу МІК 21, дають змогу здійснювати ефективне управління параметрами температури, рівня, тиску та витрати, які мають вирішальне значення для безперервного функціонування колони [5].

У межах розробки системи автоматизованого керування процесом атмосферної перегонки нафти особлива увага приділяється регулюванню рівня у ребойлері ректифікаційної колони, що є визначальним фактором стабільної роботи всієї установки. Для реалізації безперервного контролю та регулювання рівня в технологічному апараті доцільним є застосування високоточних технічних засобів, здатних забезпечити надійне функціонування в умовах постійних коливань температурного та тискового режимів (рис. 4.2).



Рисунок 4.2 – Мікропроцесорний регулятор МІК 21

Мікропроцесорний регулятор типу МІК 21 являє собою універсальний одноканальний вимірювально-регулювальний пристрій, призначений для інтеграції в замкнені контури автоматичного керування з метою стабілізації одного з основних технологічних параметрів. Його функціональні можливості

					БЗ. АКП-40.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		53

охоплюють вимірювання, контроль та автоматичне регулювання температури, тиску, витрати, рівня або будь-якого іншого фізичного параметра, що може бути перетворений у відповідний аналоговий сигнал [6].

В основі роботи пристрою лежить мікропроцесорна архітектура, яка забезпечує високу обчислювальну швидкість, можливість реалізації гнучких алгоритмів регулювання, у тому числі із застосуванням П-, ПІ-, ПІД-, ПІД- та ШІМ-стратегій. Це дозволяє ефективно компенсувати інерційні властивості об'єкта керування, мінімізувати відхилення заданих параметрів та забезпечити стійкість системи в умовах динамічних збурень.

Пристрій також підтримує можливість дистанційного налаштування та конфігурування через зовнішню ЕОМ, що розширює його функціональність у складі комплексних систем автоматизованого управління технологічними процесами.

Основні технічні параметри:

- Кількість вимірювальних каналів: 2 (із можливістю незалежного налаштування);
- Період оновлення показів: не більше 0,1 с, що забезпечує високу швидкість в контурі регулювання;
- Підтримувані типи аналогових вхідних сигналів:
 - 0–5 мА (вхідний опір 400 Ом);
 - 0(4)–20 мА (вхідний опір 100 Ом);
 - 0–10 В (вхідний опір >25 кОм);
- Вхідні сигнали від температурних перетворювачів опору:
 - ТСП 50П, ТСП 100П (група 21);
 - ТСМ 50М, ТСМ 100М (група 23);
- Вихідні аналогові сигнали:
 - 0–5 мА ($R_n < 2$ кОм);
 - 0–20 мА, 4–20 мА ($R_n < 500$ Ом);
 - 0–10 В (за запитом, $R_n > 2$ кОм);

					БЗ. АКП-40.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		54

- Типи регуляторів: П, Ш, ПД, ПДД, ПДД-ШІМ;
- Способи управління: автономне або із зовнішнім керуванням від ЕОМ;
- Діапазон робочих температур довкілля: від $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+70\text{ }^{\circ}\text{C}$, що забезпечує стабільну експлуатацію в умовах екстремальних температур;
- Інтерфейс користувача: кнопкове керування з цифровим індикатором параметрів.

Поряд із регуляторами в системі використовуються сучасні засоби первинного перетворення — датчики рівня, витрати, тиску, що мають високу точність, надійний захист від зовнішніх впливів і відповідність нормативним вимогам. Взаємодія між елементами здійснюється за допомогою промислових стандартів передавання даних, що забезпечує не лише технічну сумісність, а й високу швидкодію інформаційних потоків, необхідних для реалізації замкнених контурів регулювання.

У процесі автоматизованого регулювання рівня в ребойлері колони атмосферної перегонки нафти особливу роль відіграє вибір первинного вимірювального перетворювача, здатного точно та стабільно реєструвати зміну рівня в умовах агресивного середовища, високих температур і перепадів тиску. Враховуючи специфіку застосування, необхідна інтеграція датчика, який працює за безконтактним принципом або з мінімальним впливом середовища на чутливий елемент, водночас зберігаючи лінійність сигналу і стабільність характеристик у довгостроковому періоді експлуатації.

Рівнемір SITRANS LG250 є представником серії імпульсних радарних приладів, що працюють на основі технології Time Domain Reflectometry (TDR) — методу, що ґрунтується на вимірюванні часу затримки відбитого електромагнітного імпульсу [7]. Його конструкція забезпечує надвисоку точність вимірювання рівня як рідин, так і сипких матеріалів у різноманітних технологічних резервуарах, включаючи апарати з агресивним або вибухонебезпечним середовищем (рис. 4.3).

					БЗ. АКП-40.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		55



Рисунок 4.3 – Рівнемір SITRANS LG250

У SITRANS LG250 імпульси передаються по металевому хвилеводу (зонда), який може мати різну геометрію: тросову, стрижневу або коаксіальну, залежно від характеристик середовища. Відбитий сигнал аналізується мікропроцесором, після чого рівнемір генерує аналоговий вихідний сигнал, пропорційний висоті заповнення резервуара. Завдяки використанню TDR-технології прилад не залежить від змін діелектричної проникності середовища, тиску, температури, а також не потребує періодичного калібрування, що забезпечує його тривалу безперебійну роботу.

Рівнемір SITRANS LG250 ідеально підходить для застосування в системах автоматичного регулювання, зокрема для контролю рівня в установках атмосферної перегонки нафти, де важливими є точність, стійкість до високих температур та можливість роботи в складних технологічних умовах.

Основні технічні характеристики SITRANS LG250:

- Принцип дії: імпульсний радар на основі методу TDR;
- Діапазон вимірювання:

					БЗ. АКП-40.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		56

- до 35 м (для тросового зонда),
- до 6 м (для коаксіального зонда),
- до 3 м (для стрижневого зонда);
- Тип зонда: коаксіальний, однопровідний або двопровідний (тросовий/стрижневий);
- Точність вимірювання: до ± 3 мм (залежно від конфігурації);
- Температурний діапазон процесу: від -196 °С до $+450$ °С (залежно від виконання);
- Діапазон робочого тиску: до 400 бар;
- Мінімальна діелектрична проникність середовища: $\geq 1,4$;
- Інтерфейс керування: локальне налаштування (Keypad/Display), дистанційно через HART, PROFIBUS PA або FOUNDATION Fieldbus;
- Вихідний сигнал: аналоговий 4–20 мА з HART-протоколом;
- Харчування: 12–36 В постійного струму;
- Клас захисту корпусу: IP66/IP68;
- Вибухозахищене виконання: ATEX, IECEx, FM, CSA (Ex d / Ex ia залежно від модифікації);
- Корпус: алюміній з порошковим покриттям або нержавіюча сталь;
- Монтаж: різьбовий або фланцевий, стандарт ISO/DIN/ANSI.

Рівнеміри серії LG250 демонструють стійкість до утворення піни, запарів, конденсату, а також залишаються точними навіть у резервуарах зі складною геометрією або зі змінними умовами експлуатації. Завдяки цьому прилади серії SITRANS LG стали еталонними у сфері нафтопереробки, хімічної промисловості та енергетики [8].

У даній системі доцільним є застосування електроприводного регулюючого клапана з аналоговим керуванням типу SIPOS SEVEN або його функціонального аналога, який забезпечує точне й плавне дозування потоку рідини на основі керуючого сигналу стандарту 4–20 мА, що надходить від мікропроцесорного регулятора (рис. 4.4).

					БЗ. АКП-40.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		57



Рисунок 4.4 – Електроприводний регулюючий клапан типу SIPOS SEVEN

Такий клапан виконує функцію пропорційного виконавчого механізму, який регулює витрату за допомогою зміни площі живого перерізу потоку, обумовленої переміщенням затвора. Електроприводна схема приводу дозволяє реалізувати точне позиціонування затвора у широкому діапазоні відкриття, що необхідно для стабілізації рівня при нестационарних режимах теплообміну в ребойлері.

Конструктивно-функціональні характеристики регулюючого клапана:

- Тип конструкції: сідельний або кульовий клапан з електроприводом;
- Тип приводу: електричний виконавчий механізм з інтерфейсом аналогового сигналу 4–20 мА, інколи з вбудованим перетворювачем частоти або позиціонером;
 - Матеріал виконання: корозійностійка сталь або чавун з антикорозійним покриттям — залежно від характеристик середовища;
 - Тип з'єднання: фланцеве або різьбове, згідно з нормами DIN або ANSI;
 - Умовний тиск: PN16–PN40 (залежно від розрахункових параметрів системи);

					БЗ. АКП-40.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		58

- Робоча температура: до +400 °С (у випадку використання парових середовищ або гарячих продуктів);
- Підтримувані сигнали керування: аналогові 4–20 мА, цифрові протоколи HART або Modbus (у розширених виконаннях);
- Час повного ходу: залежно від типорозміру — 5–30 секунд (для точної реалізації регуляторної функції без осциляцій).

Клапани з електроприводом зазвичай оснащуються позиціонером, який виконує функцію зворотного зв'язку, забезпечуючи точне співвідношення між вхідним сигналом керування та фактичним положенням затвора. Це особливо важливо у динамічних процесах з високими вимогами до стабільності та швидкодії регулювання, таких як керування рівнем в ребойлері, де зміни температури та витрати відбуваються з різною швидкістю.

4.3 Розробка SCADA-системи в середовищі InTouch Wonderware

Проектування автоматизованої системи диспетчерського керування для установки атмосферної перегонки нафти є важливою складовою забезпечення надійності, безперервності й оперативності контролю технологічного процесу. З цією метою була розроблена SCADA-система в інтегрованому середовищі InTouch Wonderware, яка забезпечує графічне відображення динаміки параметрів, контроль технологічних величин у реальному часі, а також функції архівації та сигналізації.

SCADA-система реалізована відповідно до функціональної структури автоматизованої системи керування рівнем у ребойлері, що включає збір даних із рівнеміра SITRANS LG250, передавання сигналу через керуючий регулятор МІК-21, а також взаємодію з регулюючим органом — електроприводним клапаном. Ці сигнали оцифровуються та передаються через промисловий контролер до візуалізаційного середовища SCADA (рис. 4.5).

					БЗ. АКП-40.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		59

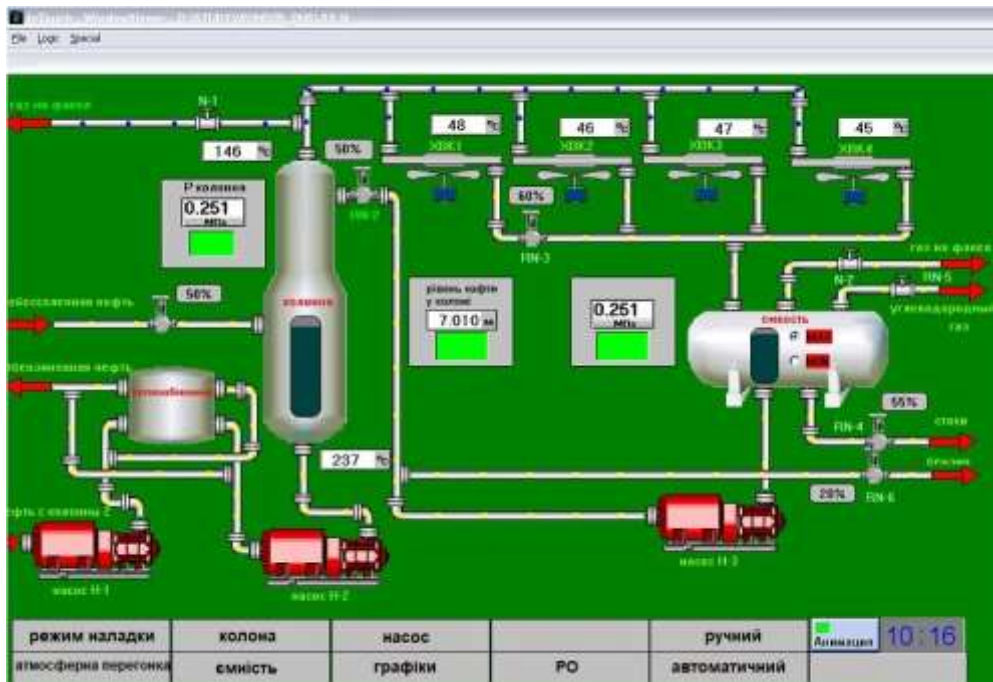


Рисунок 4.5 – Розробка SCADA-системи в середовищі InTouch Wonderware

Особливості реалізації SCADA-системи:

- У середовищі InTouch створено багаторівневий інтерфейс оператора, що охоплює:
 - графічну мнемосхему колони атмосферної перегонки з анімованими елементами;
 - індикацію поточного рівня у ребойлері з числовими значеннями та трендом у реальному часі;
 - динамічне зображення стану регулюючого клапана з можливістю ручного або автоматичного перемикання режимів;
 - вікно системи сигналізації з журналом тривог, які класифікуються за рівнем пріоритету та умовами спрацювання;
 - інтерфейс налаштування параметрів PID-регулятора, що дозволяє змінювати коефіцієнти регулювання без перезапуску системи.

Обмін даними між польовими пристроями та SCADA-середовищем здійснюється за допомогою OPC-сервера, що забезпечує відкриту архітектуру та

сумісність з широким спектром контролерів. Для підключення до контролера використано драйвер DASABCIP, який дозволяє зчитувати змінні через протокол Ethernet/IP, типовий для програмованих контролерів Allen-Bradley.

Всі значення процесу реєструються в реальному часі у внутрішній базі даних системи InTouch або у зовнішньому середовищі (наприклад, MS SQL Server), що дає змогу реалізувати повноцінний механізм трендового аналізу, зберігання історичних даних та їх подальшої обробки. Це забезпечує основу для діагностики відхилень у процесі, оптимізації налаштувань регуляторів і підвищення енергоефективності установки.

Система передбачає ієрархічну структуру прав доступу, з можливістю диференційованого обмеження операторських функцій, що відповідає вимогам інформаційної безпеки. Передбачено також механізми аварійного блокування окремих дій користувача у випадку спрацювання захисних алгоритмів.

4.4 Розробка проєктної документації для автоматизованої системи

Процес розробки проєктної документації для автоматизованої системи управління технологічним процесом установки атмосферної перегонки нафти є поетапним і передбачає глибоке інтегрування інженерно-технологічних, апаратних та програмних рішень. Його реалізація охоплює створення функціонально-логічної структури керування, побудову електротехнічних зв'язків між усіма вузлами автоматизації, а також моделювання та конфігурацію апаратної частини керування у вигляді щита або шафи керування.

Першочерговою складовою цього процесу є розроблення функціональної схеми автоматизації, що відображає логічну архітектуру всієї системи керування. У цій схемі фіксуються взаємозв'язки між технологічним обладнанням, первинними перетворювачами, виконавчими механізмами, контролерами, а також елементами інтерфейсної взаємодії людини з машиною. Її основна мета полягає у формалізації алгоритмів реагування на змінні технологічного середовища, таких як рівень у ребойлері, температура, тиск та

					БЗ. АКП-40.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		61

витрата сировини. Через це схема виконує роль узагальненої карти логіки керування, де закладаються основи функціонального поділу обов'язків між вимірювальними приладами, регуляторами та програмно-логічними контролерами.

Наступною стадією є проектування схеми зовнішніх з'єднань, що деталізує електричні та сигнальні з'єднання між польовими пристроями та щитом керування. Цей етап спрямований на забезпечення безперебійного та достовірного передавання даних від давачів до обчислювальних блоків, а також зворотного впливу на виконавчі механізми. У схемі передбачається маркування кабелів, вказується тип сигнальних ліній (аналогових або цифрових), зазначаються рівні струмів і напруг, що відповідають конкретним інтерфейсам (наприклад, 4–20 мА або RS485), а також визначаються методи захисту від зовнішніх електромагнітних завад. Водночас враховуються правила промислової електробезпеки та вимоги до заземлення електричних ланцюгів.

Фінальним кроком виступає створення схеми щита керування. У цій частині проєкту визначаються габаритні параметри та внутрішня компоновка апаратних модулів, включаючи контролери, клемні колодки, сигнальні реле, модулі введення-виведення, джерела живлення, автоматичні вимикачі, а також індикаторні засоби. Проектувальник має забезпечити логічну послідовність розміщення елементів згідно з технологічною логікою роботи системи. Також враховується доступність для обслуговування, теплові режими експлуатації, забезпечення надійного кабельного підключення та відповідність промисловим стандартам (ДСТУ, ГОСТ або ІЕС). Окрім того, на цьому етапі виконуються розрахунки навантаження на електричну мережу, резервування живлення та моделювання аварійних ситуацій.

Висновки до розділу

У даному розділі було здійснено всебічну розробку проектної складової автоматизованої системи керування установкою атмосферної перегонки нафти,

					БЗ. АКП-40.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		62

що включає аналіз, добір та обґрунтування технічних засобів автоматизації, побудову ієрархічної структури керування, а також проектування комплексу технічної документації.

На першому етапі було побудовано структурну схему ієрархічної системи керування, яка відображає взаємозв'язки між рівнями автоматизації, засобами контролю, виконавчими механізмами та інтерфейсами взаємодії з оператором. Це дозволило сформулювати логічну модель функціонування системи в умовах багаторівневого керування технологічним процесом.

Далі було запропоновано застосування мікропроцесорного регулятора типу МІК-21 для підтримання рівня в ребойлері, що забезпечує вимірювання, контроль і автоматичне регулювання з можливістю реалізації ПД-алгоритмів. Для вимірювання рівня розглянуто використання радарного датчика SITRANS LG250, який працює за стандартом струмового сигналу 4–20 мА та гарантує високу точність вимірювань у складних умовах експлуатації.

У подальшому виконано реалізацію SCADA-системи в середовищі InTouch, що забезпечує централізовану візуалізацію технологічних параметрів, оперативний контроль та архівацію даних. Вона слугує інформаційною платформою для інтеграції контролерів, датчиків і регуляторів у єдиний віртуальний простір управління.

Завершальним етапом стало проектування функціональної схеми автоматизації, схеми зовнішніх з'єднань та схеми щита керування. Була сформована повна електротехнічна документація, що деталізує сигнальні тракти, способи підключення польових пристроїв до контролерів і фізичне компонування щита керування, відповідно до вимог промислових стандартів і умов експлуатації.

					БЗ. АКП-40.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		63

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У даній бакалаврській роботі були розглянуті питання проєктування автоматизованої системи керування установкою атмосферної перегонки нафти за допомогою сучасних методів системного аналізу, моделювання та технічного проєктування, що охоплюють вибір засобів автоматизації, розробку структурно-функціональних схем, а також створення операторського інтерфейсу в SCADA-середовищі.

В першому розділі було здійснено комплексний аналіз будови, принципу дії та особливостей автоматизованого керування атмосферно-вакуумною установкою для перегонки сірчистої нафти. Встановлено, що дана установка виконує базову функцію первинного поділу нафти на фракції з різним температурним інтервалом кипіння в умовах атмосферного та вакуумного тиску, що забезпечує подальшу ефективну переробку сировини в паливно-мастильні матеріали й напівпродукти для глибшої конверсії. Проаналізовано конструктивну схему установки, яка включає трубчасті печі, ректифікаційні колони, теплообмінники, водовіддільники, холодильні й вакуумні пристрої, що функціонують як єдиний тепломасообмінний контур. Особлива увага приділена технологічним параметрам, які підлягають регулюванню, контролю, сигналізації та блокуванню. До них належать температура, тиск, рівень, витрата, склад газорідних сумішей, що вимагає впровадження складних систем керування й автоматичного захисту. Визначено фізико-хімічні характеристики речовин, які беруть участь у процесі, серед яких — сира нафта, водяна пара, фракційні вуглеводні, газоподібні продукти, залишкові агресивні домішки. Їх хімічна активність і термодинамічна нестабільність створюють вимоги до вибору спеціальних матеріалів і захищених конструктивних рішень для технічних засобів автоматизації. Усі пристрої контролю і регулювання повинні бути вибухозахищеними, стійкими до високих температур, вакууму, дії парів сірки та механічних домішок. У підсумку встановлено, що ефективність і безпечність

					БЗ. АКП-40.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		64

роботи атмосферно-вакуумної установки напряду залежать від якості реалізованих систем автоматизації, здатних підтримувати стабільний режим в умовах багатокomпонентного, динамічного та агресивного середовища. Автоматизовані системи керування забезпечують не лише високий рівень технологічної точності, але й захист від аварійних ситуацій, сприяючи економічності та екологічній безпечності процесу первинної переробки нафти.

В другому розділі було проведено всебічне дослідження процесу ідентифікації об'єкта керування та синтезу системи автоматизованого керування для атмосферно-вакуумної ректифікаційної установки. Розглянуто основи математичного моделювання ректифікаційних колон з урахуванням їх складної фізико-хімічної природи, нелінійності, внутрішніх збурень і багатовимірної динаміки. Проведено формалізацію параметричної структури об'єкта, що дозволило відобразити взаємозв'язки між вхідними впливами, керуючими діями та вихідними змінними, акцентуючи увагу на багатовхідній-багатовихідній природі системи. Окремо виділено вибір контуру керування рівня в ребойлері, який є важливим для забезпечення стабільності фазових переходів і теплового балансу. За результатами проведених експериментальних досліджень було визначено передавальну функцію системи, що характеризує її динамічну поведінку. Отримані експериментальні дані дозволили побудувати математичну модель, яка адекватно відтворює взаємозв'язок між вхідним сигналом та вихідною реакцією системи. Таким чином, сформована модель є основою для подальшого синтезу регулятора і проведення імітаційних досліджень динаміки автоматизованої системи керування.

У третьому розділі проведено комплексний синтез та аналіз системи автоматизованого керування стабілізацією рівня в ребойлері з передавальною функцією об'єкта $W_0(p) = 1/(14,87p + 1)$. Аналіз об'єкта керування показав, що досліджуваний об'єкт представляє собою типову аперіодичну ланку першого порядку з коефіцієнтом передачі $K = 1$ та постійною часу $T = 14,87$ с. Об'єкт характеризується помірною інерційністю, абсолютною стійкістю та відсутністю

					БЗ. АКП-40.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		65

статичного підсилення, що типово для систем регулювання рівня рідини в технологічних апаратах. Синтез ПІД-регулятора виконано за методом симетричного оптимуму з урахуванням специфіки об'єкта керування. Розраховані параметри регулятора складають: пропорційний коефіцієнт $K_p = 0,8$, інтегральний коефіцієнт $K_i = 0,0538 \text{ с}^{-1}$, диференційний коефіцієнт $K_d = 2,96 \text{ с}$. Обрана структура ПІД-регулятора забезпечує компенсацію інерційності об'єкта та ліквідацію статичної похибки. Дослідження стійкості замкнутої системи керування підтвердило її абсолютну стійкість за критеріями Гурвіца та Найквіста. Система має достатні запаси стійкості: за амплітудою $L_m = 6,9 \text{ дБ}$ та за фазою $\varphi_m = 45^\circ$, що забезпечує надійну роботу в умовах параметричних збурень. Коріння характеристичного рівняння розташовані в лівій півплощині з коефіцієнтом демпфування $\xi = 0,919$, що гарантує аперіодичний характер перехідних процесів. Показники якості синтезованої системи відповідають вимогам технологічного процесу: час регулювання складає приблизно 79 с , перерегулювання практично відсутнє ($\sigma \approx 0,02\%$), статична похибка дорівнює нулю завдяки наявності інтегральної складової в регуляторі. Параметри для реалізації в середовищі Matlab Simulink детально розроблені та включають налаштування як для неперервного ($K_p = 0,8$; $K_i = 0,0538$; $K_d = 2,96$), так і для дискретного ПІД-регулятора з періодом дискретизації $T_s = 0,1 \text{ с}$. Передбачені обмеження вихідного сигналу та система anti-windup для запобігання насиченню інтегральної складової.

В четвертому розділі було здійснено всебічну розробку проектної складової автоматизованої системи керування установкою атмосферної перегонки нафти, що включає аналіз, добір та обґрунтування технічних засобів автоматизації, побудову ієрархічної структури керування, а також проектування комплексу технічної документації. На першому етапі було побудовано структурну схему ієрархічної системи керування, яка відображає взаємозв'язки між рівнями автоматизації, засобами контролю, виконавчими механізмами та інтерфейсами взаємодії з оператором. Це дозволило сформулювати логічну модель

					БЗ. АКП-40.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		66

функціонування системи в умовах багаторівневого керування технологічним процесом. Далі було запропоновано застосування мікропроцесорного регулятора типу МІК-21 для підтримання рівня в ребойлері, що забезпечує вимірювання, контроль і автоматичне регулювання з можливістю реалізації ПД-алгоритмів. Для вимірювання рівня розглянуто використання радарного датчика SITRANS LG250, який працює за стандартом струмового сигналу 4–20 мА та гарантує високу точність вимірювань у складних умовах експлуатації. У подальшому виконано реалізацію SCADA-системи в середовищі InTouch, що забезпечує централізовану візуалізацію технологічних параметрів, оперативний контроль та архівацію даних. Вона слугує інформаційною платформою для інтеграції контролерів, датчиків і регуляторів у єдиний віртуальний простір управління. Завершальним етапом стало проектування функціональної схеми автоматизації, схеми зовнішніх з'єднань та схеми щита керування. Була сформована повна електротехнічна документація, що деталізує сигнальні тракти, способи підключення польових пристроїв до контролерів і фізичне компонування щита керування, відповідно до вимог промислових стандартів і умов експлуатації.

					БЗ. АКП-40.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		67

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ НА ДЖЕРЕЛА

1. Братичак М. М., Гринишин О. Б. Технологія нафти та газу. навчальний посібник. Львів: Львівська політехніка, 2013. 180 с.
2. Бобух А.О. Автоматизовані системи керування технологічними процесами / А.О. Бобух; Навч. посібник. – Харків: ХНАМГ, 2006. - 185 с.
3. Горбійчук М. І. Моделювання об'єктів і систем керування в нафтовій і газовій промисловості: навч. посіб. Ч. 3. / М. І. Горбійчук – Івано-Франківськ: Факел, 1999. – 235 с.
4. Семенов Г. Н. Автоматизація процесів переробки нафти та газу: Навчальний посібник / Г. Н. Семенов, М. І. Горбійчук, Л. І. Жуган, С. А. Чеховський. – Львів: Світ, 1992. – 352 с.
5. Електронний каталог фірми МІКРОЛ. – м. Івано-Франківськ, 2004. – 189 с.
6. Мікропроцесорний регулятор типу МІК 21. [Електронний ресурс]. – URL: https://www.microl.ua/index.php?page=shop.product_details&flypage=garden_flypage.tpl&product_id=367&category_id=42&option=com_virtuemart&Itemid=71
7. Рівнемір SITRANS LG250 [Електронний ресурс]. – URL: <https://chesscontrols.com/wp-content/uploads/Siemens-LG250-CHESS-CONTROLS.pdf>
8. Електроприводний регулюючий клапан типу SIPOS SEVEN [Електронний ресурс]. – URL: <https://www.sustainabilitymatters.net.au/content/energy/hot-product/sipos-seven-variable-speed-electric-actuator-326395951>

					БЗ. АКП-40.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		68

