

Міністерство освіти і науки України  
Західноукраїнський національний університет  
Факультет комп'ютерних інформаційних технологій  
Кафедра спеціалізованих комп'ютерних систем

БЕРНАДСЬКИЙ МИКОЛА ВІКТОРОВИЧ

АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА РЕГУЛЮВАННЯ ПРОЦЕСОМ  
РОЗДІЛЕННЯ ПРОДУКТІВ ОКИСЛЕННЯ ПРИ ВИРОБНИЦТВІ  
АДИПІНОВОЇ КИСЛОТИ/ AUTOMATED SYSTEM FOR REGULATING THE  
PROCESS OF SEPARATION OF OXIDATION PRODUCTS IN THE  
PRODUCTION OF ADIPIC ACID

спеціальність: 174 — Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та  
робототехніка  
освітньо-професійна програма - Автоматизація та програма комп'ютерно-  
інтегровані технології

Магістерська робота

Виконав студент групи АКІТм-21  
М.В.Бернадський

---

Науковий керівник:  
д.т.н., проф. Н.Я.Возна

---

Магістерську роботу допущено до захисту:  
" \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2025р.

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ А.І. Сегін

Тернопіль 2025

Факультет комп'ютерних інформаційних технологій  
Кафедра спеціалізованих комп'ютерних систем  
Ступінь вищої освіти "магістр"  
Спеціальність: 174 - Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та  
робототехніка  
Освітньо-професійна програма – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані  
технології

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри СКС

\_\_\_\_\_ Андрій СЕГІН

“ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

## ЗАВДАННЯ НА ВИПУСКНУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

БЕРНАДСЬКИЙ Микола Вікторович

(прізвище, ім'я по-батькові)

### 1. Тема випускної кваліфікаційної роботи

Автоматизована система регулювання процесом розділення продуктів окислення при виробництві адипінової кислоти/ Automated system for regulating the process of separation of oxidation products in the production of adipic acid

керівник роботи д.т.н., професор Н.Я.Возна

затверджені наказом по університету від 28 листопада 2024 р. № 938

### 2. Строк подання студентом закінченої випускної кваліфікаційної роботи:

01 грудня 2025р.

### 3. Вихідні дані до випускної кваліфікаційної роботи:

1. Структурні схеми контролю і керування

2. Плани розташування засобів автоматизації

3. Схеми автоматичного регулювання, керування, захисту, блокування, сигналізації і живлення

### 4. Основні питання, які потрібно розробити:

1. Аналіз технологічного процесу

2. Розроблення функціональної схеми автоматизації та вибір технічних засобів

3. Розрахунок параметрів системи автоматичного регулювання та аналіз її роботи

### 5. Перелік графічного матеріалу у роботі:

1. Технологічна схема процесу

2. Функціональна схема автоматизації

3. Загальна схема підключення

4. Структурна схема регулювання температури

## 6. Консультанти розділів випускної кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
1	Возна Н.Я. д.т.н., професор, професор кафедри СКС		
2	Возна Н.Я. д.т.н., професор, професор кафедри СКС		
3	Возна Н.Я. д.т.н., професор, професор кафедри СКС		

## 7. Дата видачі завдання 02 грудня 2024 р.

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назви етапів випускної кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз технологічного процесу	11.2024р. – 12.2024р.	
2	Розроблення функціональної схеми автоматизації та вибір технічних засобів	01.2025р. – 04.2025р.	
3	Розрахунок параметрів системи автоматичного регулювання та аналіз її роботи	04.2025р. – 10.2025р.	

Студент

\_\_\_\_\_ (підпис)

Бернадський М.В.

Керівник роботи

\_\_\_\_\_ (підпис)

д.т.н., проф. Возна Н.Я.

## РЕФЕРАТ

Бернадський М.В. Автоматизована система регулювання процесом розділення продуктів окислення при виробництві адипінової кислоти – Рукопис.

Дослідження на здобуття ступеня вищої освіти «магістр» за спеціальністю 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка», освітньо-професійна програма. – Західноукраїнський національний університет, Тернопіль, 2025.

Магістерська робота присвячена розробленню та впровадженню автоматизованої системи керування технологічним процесом розділення продуктів окислення при виробництві адипінової кислоти.

На основі аналізу динаміки процесу ректифікації обґрунтовано вибір структури автоматизованої системи, здійснено добір сучасних технічних засобів контролю та регулювання, зокрема вимірювачів-регуляторів ТРЦ 02 «Універсал+», що забезпечують централізований облік параметрів, дистанційне керування та скорочення втрат циклогексанону. Розроблено математичну модель об'єкта автоматизації, визначено передаточні функції контуру температурного регулювання, проведено аналіз перехідних і частотних характеристик системи.

Запропонована система дозволяє підвищити точність керування, стабільність параметрів ректифікаційної колони, зменшити експлуатаційні витрати, мінімізувати втрати циклогексанону та підвищити рівень безпеки виробництва. Отримані результати можуть бути використані для модернізації аналогічних технологічних ліній хімічних підприємств.

## ABSTRACT

Bernadsky M.V. Automated system for regulating the process of separation of oxidation products in the production of adipic acid. - Manuscript.

Research on obtaining the degree of higher education "master" in specialty 174 "Automation and computer-integrated technologies", educational and professional program. - West Ukrainian National University, Ternopil, 2025.

The master's thesis is devoted to the development and implementation of an automated control system for the technological process of separation of oxidation products in the production of adipic acid.

Based on the analysis of the dynamics of the rectification process, the choice of the structure of the automated system was justified, modern technical means of control and regulation were selected, in particular, measuring and regulating devices of the SEC 02 "Universal+", which provide centralized accounting of parameters, remote control and reduction of cyclohexanone losses. A mathematical model of the automation object was developed, the transfer functions of the temperature control circuit were determined, and the transient and frequency characteristics of the system were analyzed.

The proposed system allows to increase the control accuracy, stability of the parameters of the rectification column, reduce operating costs, minimize cyclohexanone losses and increase the level of production safety. The results obtained can be used to modernize similar technological lines of chemical enterprises.

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	6
ВСТУП .....	7
1. АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ.....	11
1.1 Технологічні особливості процесу розділення продуктів окислення...	13
1.2 Суть процесу розділення.....	16
1.3 Опис технологічного процесу очистки циклогенсанону-сирцю від спиртової фракції.....	19
1.4 Технічні характеристики обладнання та комунікації.....	24
2. РОЗРОБЛЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СХЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ ТА ВИБІР ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ.....	26
2.1 Обґрунтування вибору функціональної схеми автоматизації.....	26
2.2 Опис функціональної схеми автоматизації.....	28
2.3 Вибір технічних засобів.....	32
3 РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ТА АНАЛІЗ ЇЇ РОБОТИ.....	55
3.1 Математичний опис процесів ректифікації.....	55
3.2 Аналіз статистичних і динамічних характеристик об'єкта керування..	58
ВИСНОВКИ.....	68
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	70
ДОДАТОК А Копії публікацій.....	72

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

- АРМ – автоматизоване робоче місце;
- АСК – автоматизована система керування;
- ВКК - висококиплячі компоненти;
- ВМ - виконавчий механізм;
- ЕПП - електропневматичний перетворювач;
- ЕРС – електрорушійна сила;
- МВМ - мембранний виконавчий механізм;
- МС-П - датчик тиску;
- НКК - низькокиплячі компоненти;
- ПЕ - пневмоелектричний перетворювач;
- ПІД – пропорційно-інтегрально-диференціальний;
- ПТ – перетворювач термоелектричний;
- РО - регулюючий орган;
- САР – система автоматизованого регулювання;
- ТП - технологічний процес;
- УБ-П - рівнемір буйковий пневматичний;
- УД - уніфікований датчик;
- ФСА - функціональна схема автоматизації.

## ВСТУП

З моменту здобуття незалежності України та переходу її економіки до ринкових умов - важливим чинником розвитку стало вміння підприємств адаптуватися до нових економічних реалій. Ключову роль у цьому процесі відіграє автоматизація виробництва та технологічних процесів.

Сучасні хіміко-технологічні процеси характеризуються високою складністю, швидкістю протікання, а також значною вразливістю до відхилення режимних параметрів від нормальних значень. Крім того, вони часто пов'язані зі шкідливими умовами праці, підвищеною вибухо- та пожежонебезпечністю оброблюваних речовин. Із зростанням навантаження на апарати, потужності машин, а також необхідністю виконання процесів при високих або надвисоких температурах і тисках (поблизу критичних значень) ручне керування стає неможливим.

У таких умовах навіть досвідчений працівник не здатен вчасно втрутитися в процес у разі відхилення параметрів, що може призвести до зниження якості продукції, псування сировини чи допоміжних матеріалів, а також до аварійних ситуацій. Деякі технологічні операції взагалі можуть виконуватися лише за умови повної автоматизації.

За ступенем автоматизації хімічна промисловість посідає одне з провідних місць серед інших галузей. Для хімічних виробництв характерна безперервність технологічних процесів, що відбуваються з високою швидкістю. Більшість операцій у таких установках механізовані, а перехідні процеси розвиваються досить динамічно.

У даній роботі розглядається технологічний процес розділення продуктів окислення під час виробництва адипінової кислоти.

На сучасному етапі розвитку виробництва рівень механізації та автоматизації технологічних процесів є одним із ключових показників науково-технічного прогресу держави.

Тому, можна зробити висновок про доцільність модернізації хіміко-технологічних процесів на основі принципів комплексної автоматизації. Це вимагає впровадження сучасних автоматизованих систем управління для підвищення ефективності та надійності виробництва.

**Основною метою** магістерської роботи є проектування системи автоматизації технологічного процесу розділення продуктів окислення, зокрема очищення циклогексанону-сирцю від спиртової фракції.

Для досягнення поставленої мети передбачено виконання таких завдань:

- здійснити вибір сучасних засобів автоматизації;
- передбачити застосування вимірювачів-регуляторів ТРЦ-02 «Універсал+» у автоматизованій системі регулювання процесом розділення продуктів окислення;
- розробити математичну модель об'єкта автоматизації;
- дослідити параметри системи автоматичного регулювання.

Для побудови системи автоматизації необхідно детально проаналізувати процеси, що відбуваються в апаратах установки, а також визначити основні параметри, які підлягають контролю та регулюванню.

**Об'єкт дослідження.** Технологічний процес розділення продуктів окислення при виробництві адипінової кислоти, зокрема очищення циклогексанону-сирцю від спиртової фракції.

**Предметом дослідження** є ректифікаційна колона, у якій здійснюється процес відгонки спиртової фракції з циклогексанону.

#### **Наукова новизна одержаних результатів.**

1. Розроблена функціональна модель автоматизованої системи регулювання технологічним процесом розділення продуктів окислення при виробництві адипінової кислоти, яка враховує динаміку об'єкта та температурно-режимні залежності ректифікаційної установки.

2. Обґрунтована архітектура автоматизованої системи регулювання із застосуванням інтегрованих вимірювачів-регуляторів ТРЦ 02 «Універсал +»

та комп'ютеризованого АРМ оператора для централізованої реєстрації та аналізу параметрів технологічного процесу.

3. Синтезовано систему автоматичного регулювання режимних параметрів ректифікаційної колони з урахуванням особливостей масообмінних процесів.

4. Удосконалено алгоритми керування температурою, рівнем і витратою, що забезпечують мінімізацію втрат циклогексанону та забезпечують стабільність показників технологічного процесу.

### **Практичне значення отриманих результатів.**

1. Підвищено ефективність роботи ректифікаційної колони шляхом впровадження сучасних засобів вимірювання, контролю та регулювання, що дозволяє зменшити людський фактор та підвищити точність керування процесом

2. Передбачається скорочення витрат сировини та енергоресурсів завдяки оптимізації температурного режиму та витрати флегми, що зменшує кількість незворотних втрат циклогексанону і покращує ресурсну економічність виробництва.

3. Створена можливість архівування технологічних параметрів і їх аналітичної обробки, що підвищує оперативність прийняття рішень, дозволяє проводити діагностику відхилень і попереджати аварійні ситуації.

4. Створені можливості застосування розробленої системи для модернізації інших ректифікаційних апаратів і технологічних ліній, що робить проєкт універсальним для хімічних виробництв зі схожими процесами масообміну.

**Апробація.** 1. Формування математичної моделі автоматизованої системи регулювання процесом розділення продуктів окислення при виробництві адипінової кислоти / М.Бернадський, С.Сорока, Р.Лизун // Матеріали III Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Інтелектуальні комп'ютерні системи та мережі» (ІКСМ осінь 2025), м. Тернопіль, ЗУНУ, 25 листопада 2025 р.

Тернопіль, 2025. – С.168-169.

2. Модельно-орієнтоване керування типу Internal Model Control в системах регулювання температури / С.Сорока, М.Бернадський, О.Бурлак // Збірник матеріалів науково-практичного симпозиуму «Технології інтернету речей: системи та рішення» (ТІР:СТ – 2025), м.Тернопіль, 24 жовтня 2025, Тернопіль, 2025. - С.14-17.

## 1 АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ

Впровадження автоматизації сприяє підвищенню основних показників ефективності виробництва. Вона забезпечує контроль, регулювання, сигналізацію та блокування технологічних параметрів за допомогою спеціальних автоматичних пристроїв.

Автоматизація - це використання комплексу технічних засобів, які дозволяють здійснювати виробничі процеси без безпосередньої участі людини, але під її наглядом. Її впровадження веде до зростання обсягів виробництва, зниження собівартості продукції, покращення її якості, скорочення чисельності обслуговуючого персоналу, підвищення надійності та довговічності обладнання. Крім того, автоматизація забезпечує економію матеріальних ресурсів, покращує умови праці та підвищує рівень техніки безпеки.

Автоматизація звільняє людину від необхідності безпосередньо керувати механізмами. У системах автоматизованого виробництва функції працівника зводяться до налагодження, регулювання, технічного обслуговування засобів автоматизації та спостереження за їх роботою. Якщо механізація спрямована на полегшення фізичної праці, то автоматизація має на меті зменшити і розумові навантаження. Використання автоматизованих систем вимагає від обслуговуючого персоналу високого рівня технічної підготовки та кваліфікації [1].

Автоматизована система регулювання процесом розділення продуктів окислення при виробництві адипінової кислоти включає системи автоматичного регулювання, дистанційного керування, технологічних блокувань і сигналізації. Система автоматичного регулювання забезпечує стабільність і безперервність перебігу процесів у ректифікаційній колоні.

Дистанційне керування дає змогу оперативному персоналу запускати або зупиняти технологічний процес, а також регулювати роботу механізмів на

відстані з центрального пульта керування, де зосереджені всі прилади управління.

Автоматичний контроль за роботою процесу очищення здійснюється за допомогою показуючих і самописних приладів, що працюють у автоматичному режимі [2-5]. Вони забезпечують безперервний моніторинг параметрів, які характеризують перебіг технологічного процесу очищення. Контрольно-вимірювальні прилади розміщені на центральних пультах керування, що забезпечує зручність спостереження та обслуговування.

Технологічні блокування забезпечують виконання певної послідовності операцій під час запуску та зупинки механізмів технологічного процесу. Їхнє призначення полягає у запобіганні неправильним діям під час експлуатації обладнання, а також у забезпеченні своєчасного та послідовного відключення агрегатів у разі виникнення аварійної ситуації.

Пристрої технологічної сигналізації призначені для інформування оперативного персоналу про поточний стан обладнання (робочий режим, зупинка тощо), а також для попередження про наближення параметрів до небезпечних меж. Крім того, сигналізація повідомляє про виникнення аварійних режимів роботи колони та її допоміжного устаткування. У системі застосовується як звукова, так і світлова сигналізація, що забезпечує швидке реагування персоналу на зміни у процесі.

Основними джерелами інформації щодо перебігу технологічного процесу розділення продуктів окислення є технологічна схема виробництва адипінової кислоти. Для розроблення автоматизованої системи регулювання використовуються спеціалізовані довідкові та технічні матеріали [4-5].

Стрімкий розвиток науково-технічного прогресу спричинив інтенсивне зростання кількості розробок у сфері автоматизації виробничих процесів. Зокрема, широкого застосування набули промислові вимірювально-регулювальні прилади для контролю технологічних параметрів. Одним із таких пристроїв є вимірювач-регулятор ТРЦ-02 «Універсал+», виробництва фірми «Промприлад».

Використання цього регулятора в системі автоматичного регулювання процесом дає змогу модернізувати системи автоматизації [6]. Застосування приладу забезпечує можливість централізованого контролю та управління процесом із одного операторського місця, підвищує зручність експлуатації та точність регулювання. Крім того, його впровадження дає змогу замінити морально застаріле обладнання сучасними, більш надійними засобами автоматизації.

### 1.1 Технологічні особливості процесу розділення продуктів окислення

#### Стадія розділення продуктів окиснення (стадія «300»)

Завданням стадії «300» є виділення циклогексану, що не вступив у реакцію та його повернення на попередню стадію окиснення (стадія «200»), а також отримання чистих продуктів - циклогексанолу та циклогексанону [6, 7] (рисунок 1.2).

Продукти окиснення, що надходять зі стадії «200» після попередньої нейтралізації кислот і відгонки основної кількості циклогексану, містять не лише циклогексанон і циклогексанол, але й ряд проміжних і побічних сполук. До їх складу входять циклогексилові та діциклогексилові ефіри, моно- і дикарбонові кислоти, спирти, а також продукти конденсації циклогексанону, ефірів та інших кисневмісних органічних речовин.

З метою підвищення виходу цільових продуктів і зменшення ймовірності їх забруднення складними ефірами, останні піддають процесу омилення.

Виділення непрореагованого циклогексану, а також розділення й очищення циклогексанолу та циклогексанону здійснюється методом ректифікації у такій послідовності:

- відгонка циклогексану та води з продуктів окиснення проводиться в ректифікаційній колоні при атмосферному тиску;

- розділення кубової рідини з колони здійснюється під вакуумом у ректифікаційній колоні з отриманням циклогексанолу-сирцю (у вигляді кубового залишку) та циклогексанону-сирцю (у вигляді дистиляту);

- відгонка спиртової фракції з циклогексанону-сирцю проводиться на двох послідовно з'єднаних ректифікаційних колонах, що працюють при атмосферному тиску;

- виділення циклогексанолу-ректифікату (дистиляту) з циклогексанолу-сирцю здійснюється у вакуумній ректифікаційній колоні;

- отримання дистиляту проводиться шляхом ректифікації кубової рідини колони у вакуумній ректифікаційній колоні.

Омилення ефірів здійснюється шляхом обробки оксидату водним розчином гідроксиду натрію з масовою часткою 20–25 % під атмосферним тиском при температурі 70–95 °С. Процес омилення передбачає використання водного розчину карбонату натрію з масовою часткою  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  8–12 % для обробки продуктів окиснення, тоді як гідроксид натрію застосовується лише для приготування водно-лужного розчину.

У ході омилення піддаються перетворенню ефіри, що утворилися під час окиснення циклогексану.

В результаті реакції омилення утворюються відповідні спирти та натрієві солі органічних кислот (рисунок 1.1).

На ефективність процесу омилення суттєво впливають температура реакційної суміші, склад суміші, що омиляється та концентрація вільного лугу.

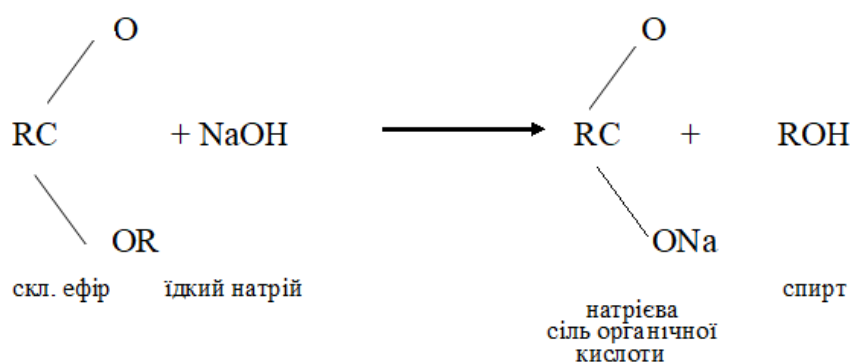


Рисунок 1.1 - Реакція омилення

Омилення ефірів у попередньо нейтралізованій суміші протікає інтенсивніше за відсутності циклогексану. Для цього у процесі омилення створюються умови, що забезпечують відгонку циклогексану із суміші у вигляді азеотропної суміші з водою. Сумарний час перебування реакційної суміші в обох реакторах складає близько 25 хвилин.

Після завершення омилення реакційна суміш розділяється на водний і органічний шари, причому з органічного шару здійснюється водна екстракція солей органічних кислот та залишків луку. Обидва процеси поєднуються в одному апараті – екстракційній колоні поз. К-344.

Процес розділення водного та органічного шарів покращується, якщо в органічному шарі масова частка циклогексану становить не менше 30 %. У разі потреби до змішувача додається циклогексан – дистилят колони для досягнення необхідної концентрації.

Другим фактором, що впливає на ефективність розділення шарів і екстракції солей із органічного шару, є температура.

При атмосферному тиску для суміші, що містить циклогексан і воду, оптимальною температурою для найбільш ефективного розділення органічного та водного шарів є 60 °С. Підвищення температури приводить до зниження якості розділення.

Розділення продуктів окислення.

Виділення циклогексану та води із реакційної суміші після омилення здійснюється в ректифікаційній колоні при атмосферному тиску.

Під час ректифікації спостерігається значна різниця у вмісті циклогексану в паровій фазі та в рідині: у парах його концентрація значно вища. Це свідчить про високу відносну легкість циклогексану порівняно з циклогексанолом і циклогексаноном.

Циклогексан, циклогексанол і циклогексанон формують з водою гетероазеотропні суміші, оскільки при конденсації пари поділяються на водний та органічний шари. Вода відділяється від циклогексану методом розшарування. Значна частина відділеного циклогексану повертається у

змішувач, а решта направляється на повторну ректифікацію в колону (стадія “200”).

Виділення із реакційної суміші спиртової фракції, циклогексанону–ректифікату та циклогексанолу–ректифікату проводиться на двох послідовно працюючих колонках для кожного продукту.

Підвищення якості продуктів та зменшення втрат.

Ефективна робота системи розділення дозволяє отримувати циклогексанол і циклогексанон підвищеної якості, а також зменшувати втрати циклогексанону із спиртової фракції. Низькокиплячі домішки, такі як бутиловий, аміловий та інші спирти, виділяються з циклогексанону-сирцю під атмосферним тиском.

При збільшенні масової частки циклогексанону у спиртовій фракції зростають втрати цільового продукту, що знижує ефективність процесу.

Циклогексанон є термічно нестійкою сполукою, яка під дією високих температур здатна до конденсації в діанон. Застосування вакуумної ректифікації знижує температуру кипіння суміші та дозволяє проводити процес у режимі, що зменшує ризик конденсації циклогексанону, забезпечуючи збереження цільового продукту.

## 1.2 Суть процесу розділення

Розділення рідких сумішей на практично чисті компоненти або фракції, що відрізняються між собою температурами кипіння, називається ректифікацією. Для здійснення цього процесу зазвичай використовують ректифікаційні колони, у яких багаторазово контактують потоки рідкої та парової фаз [4, 6. 7].

У ректифікаційній колоні процес відбувається у вигляді тепло- і масообміну між компонентами суміші: пара, що піднімається вгору, і рідина, яка стікає вниз, постійно взаємодіють між собою. Менш леткі, або

висококиплячі компоненти (ВКК), у міру підйому пари по колоні частково або повністю конденсуються й переходять у рідку фазу. Натомість більш леткі, або низькокиплячі компоненти (НКК), завдяки теплоті конденсації випаровуються і переходять із рідини в пару.

У результаті такого протиточного масообміну, який відбувається в тарілчастих або насадкових ректифікаційних колонах, пара, що рухається вгору, поступово збагачується низькокиплячими компонентами, тоді як рідина, стікаючи вниз, втрачає НКК і відповідно збагачується висококиплячими компонентами.

Рідина, поступово збіднюючись на НКК у процесі руху вниз по колоні, стікає в куб, де накопичується у вигляді практично чистого ВКК, який відводиться з колони як кубовий залишок.

У верхній частині колони пара, частково збагачена НКК, проходить крізь рідину на тарілках (барботує), утворюючи суміш, насичену леткими компонентами. У цьому процесі спочатку конденсуються ВКК, тоді як теплота конденсації сприяє випаровуванню НКК із рідини на тарілках. Таким чином відбувається поступове збагачення пари низькокиплячими компонентами.

У кінцевій стадії процесу пара, вже значно збагачена НКК, проходить через шар рідини на верхній тарілці колони. Рідина на цій тарілці є майже чистим НКК, частина якого повертається в колону у вигляді флегми.

Пара, що відводиться з верхньої частини колони, надходить у конденсатор (дефлегматор), де відбувається її часткова або повна конденсація. Отриманий конденсат розділяється на дві частини: одна повертається в колону як флегма, а інша відводиться з установки як готовий продукт ректифікації.

Конденсація продуктів, отриманих у процесі ректифікації, визначається типом суміші, кількістю тарілок у колоні та її тепловим режимом роботи. Для підтримання безперервного кипіння рідини в кубі-випаровувачі його

нагрівають водяною парою, тоді як для забезпечення конденсації пари, що надходить у дефлегматор, останній охолоджується водою.

Якщо нагріти вихідну суміш складу  $x_1$  до температури її кипіння, утворюється пара, яка перебуває в рівновазі з рідиною (точка b). При конденсації цієї пари отримують рідину складу  $x_2$ , збагачену низькокиплячими компонентами ( $x_2 > x_1$ ). Подальше нагрівання цієї суміші до температури кипіння  $t_2$  призводить до утворення нової порції пари (точка d), конденсація якої дає рідину з ще більшим вмістом НКК - складу  $x_3$ , і так далі.

Послідовно повторюючи процеси випаровування рідини та конденсації парів, можна отримати кінцевий продукт - дистилат, який практично повністю складається з низькокиплячого компонента.

Аналогічно, виходячи з парової фази, що відповідає складу рідини  $x_1$ , у результаті послідовних процесів конденсації та випаровування можна отримати рідину (залишок), яка складається переважно з ВКК.

У найпростішому випадку процес багаторазового випаровування можна реалізувати в багатоступінчастій установці. У першому ступені випаровується вихідна суміш, у другий надходить рідина, що залишилася після відділення парів на першій стадії, у третій - рідина, яка залишилася після випаровування на другому ступені, і так далі. Аналогічно може бути організований і процес багатократної конденсації, при якому на кожному наступному ступені надходять пари, що залишилися після відділення конденсату на попередній.

За достатньо великої кількості ступенів можна отримати рідку або парову фазу з високою концентрацією певного компонента, яким вона збагачена. Проте вихід такої фази буде незначним порівняно з кількістю вихідної суміші, а теплові втрати в подібних установках є значними.

Набагато ефективніше, економічніше та точніше розділення рідких сумішей на окремі компоненти досягається в процесах ректифікації, які здійснюються в компактних апаратах - ректифікаційних колонах. У таких апаратах ректифікація відбувається за рахунок багаторазового контакту між

паровою та рідкою фазами, що перебувають у стані, близькому до рівноважного, і рухаються назустріч одна одній.

Під час взаємодії парової та рідинної фаз між ними відбуваються масо- і теплообмінні процеси, зумовлені прагненням системи до рівноважного стану. У результаті кожного контакту між фазами компоненти суміші розподіляються нерівномірно: парова фаза збагачується НКК, а рідинна - ВКК.

Багаторазовий контакт фаз приводить до практично повного розділення вихідної суміші на окремі компоненти. Таким чином, наявність нерівноважного стану системи (що супроводжується різницею температур між фазами), а також рух фаз із певною відносною швидкістю і багаторазова взаємодія між ними є необхідними умовами здійснення процесу ректифікації.

Процеси ректифікації можуть проводитися періодично або безперервно і здійснюються при різних тисках:

- атмосферному для більшості рідких сумішей;
- зниженому (вакуумному) - для розділення висококиплячих речовин;
- підвищеному - для сумішей, що перебувають у газоподібному стані при нормальній температурі.

### 1.3 Опис технологічного процесу очистки циклогенсанону-сирцю від спиртової фракції

Технологічна схема стадії “300”.

Стадія “300” технологічного процесу передбачає виділення циклогексану, що не прореагував, а також очистку і розділення продуктів окислення на циклогексанол–сирець та циклогексанон–сирець. Технологічна схема включає основні вузли:

1. Омилення ефірів (оброблення продуктів окислення водним розчином лугу з метою перетворення ефірів у спирти та натрієві солі кислот).

2. Екстракція солей (видалення солей із органічного шару водним розчином у екстракційній колоні).

3. Відгонка циклогексанону та води (ректифікація для розділення циклогексану та води від органічної суміші).

4. Розділення продуктів окислення (формування фракцій циклогексанон–сирець та циклогексанол–сирець у відповідних ректифікаційних колонках).

5. Відгонка спиртової фракції (видалення низькокиплячих домішок і спиртових фракцій із циклогексанону–сирцю).

6. Отримання циклогексанону–ректифікату (очищення продукту до необхідної якості).

7. Отримання циклогексанолу–ректифікату (ректифікаційне очищення спиртової фракції).

8. Розподіл та збір затворної рідини (від сальників насосів та гідрозатворів).

9. Дренажі апаратів та трубопроводів (відведення залишкових рідин і очищення обладнання).

Відповідно до сформульованих завдань технологічний процес очистки циклогексанону-сирцю від спиртової фракції можна представити у скороченому вигляді на технологічній схемі (рисунок 1.2) [8-10], де показано:

- основні апарати та обладнання, що використовуються у процесі;
- трубопроводи для циркуляції і подачі хімічних речовин;
- входи та виходи кожного апарату;
- напрямки руху речовин по технологічним трубопроводам.



Виробництво циклогексанону є складовою частиною технологічного процесу отримання адипінової кислоти [4-6]. Адипінова кислота ( $\text{HOOC}-(\text{CH}_2)_4-\text{COOH}$ ) відноситься до дикарбонових кислот і представлена безбарвними кристалами з температурою плавлення  $152\text{ }^\circ\text{C}$ , добре розчинними у воді. Ця сполука широко застосовується в промисловості, зокрема для виробництва нейлону, інсектицидів, мастил та пластифікаторів.

Головним завданням технологічного процесу є очищення циклогексанону-сирцю від спиртових фракцій. Далі наведено короткий опис процесу згідно з існуючою технологічною схемою.

Відгонка спиртів (алилового, бутилового та інших) із циклогексанону-сирцю здійснюється у колоні поз. К-369/1. Сирець циклогексанону із ємності поз. Е-382 подається насосом Н-383/1.2 до цієї колони.

До колони К-369/1 також можуть подаватися:

- некондиційний циклогексанон (анон) із ємності Е-504. Його об'ємна витрата регулюється клапаном на лінії подачі до теплообмінника Т-352/1;
- кубова рідина з колони К-369/2.

Перед надходженням у колону суміш проходить трубний простір підігрівача Т-352/1, де міжтрубний простір підігрівається паром тиском  $1,0\text{ МПа}$ , і суміш нагрівається до температури не більше  $153\text{ }^\circ\text{C}$ . Температура суміші на виході із підігрівача підтримується автоматично регульованим клапаном, що контролює подачу пари. Об'ємна витрата суміші, що подається на колонну живлення, контролюється відповідним приладом.

Колона К-369/1 працює при тиску зверху не більше  $30\text{ кПа}$  та в кубі не більше  $60\text{ кПа}$ . Температура на верхній частині колони не перевищує  $145\text{ }^\circ\text{C}$ , при цьому контроль температури здійснюється на тарілках 10, 44, 48, 52 та 57. Необхідне для ректифікації тепло подається через виносний випарник Т-370/1 паром тиском  $1,5\text{ МПа}$ . Температурний режим у кубі колони підтримується автоматичним клапаном на лінії подачі пари, а тиск у цій лінії контролюється відповідним приладом. Для безпечного ведення процесу передбачено три схеми блокування. Парова фаза колони, що містить спирти,

воду та анон, надходить у паралельно працюючі конденсатори Т-371/1а та Т-371/1б, охолоджувані оборотною водою, де відбувається конденсація основної частини парів.

Несконденсовані пари органічних продуктів та інертні гази з конденсаторів Т-371/1а і Т-371/1б надходять у конденсатор Т-377/1, який охолоджується холодною водою, де відбувається подальша конденсація органічних парів. Інертні гази з конденсатора Т-377/1 виводяться в атмосферу через гідрозатвор Е-378/1 висотою 400 мм. У газову лінію від конденсатора до гідрозатвору подається азот під тиском 0,05 кПа для запобігання утворенню вакууму під час зупинки та охолодження колони К-369/1, що дозволяє уникнути попадання води з гідрозатвора в колону. Сконденсований продукт з конденсаторів Т-371/1а, Т-371/1б та Т-377/1 збирається у перший відсік ємності Е-372/1, де відбувається розділення водного та органічного шарів.

Рівень розділу фаз у першому відсіку ємності Е-372/1 контролюється та підтримується за допомогою дистанційно керованого клапана, який періодично відводить водний шар у ємність Е-367. Органічний шар, що складається зі спиртової фракції, переливається через вертикальну перегородку у другий відсік. Рівень у другому відсіку підтримується постійним автоматичним клапаном на лінії подачі флегми від насоса Н-373/1.2.

Частина спиртової фракції із другого відсіку насосом Н-373/1.2 повертається у колонну К-369/1 як флегма, витрата якої контролюється. Перед подачею у колонну флегма підігривається у трубному просторі підігривача Т-355/1 до температури не вище 140 °С. Температура на виході з підігривача підтримується автоматичним клапаном, який регулює подачу пари тиском 1,0 МПа у міжтрубний простір підігривача. Робоче флегмове число колони К-369/1 складає 40–50.

Залишок спиртової фракції з ємності Е-372/1 насосом Н-373/1.2 подається у колонну К-369/2 для відгонки циклогексанону та циклогексанолу

із дистилляту колони К-369/1. Об'ємна витрата спиртової фракції, що подається в колонну К-369/2, не перевищує 0,4 м<sup>3</sup>/год і підтримується автоматичним клапаном на лінії подачі через підігрівач Т-352/2.

Циклогексанон-сирець з куба колони К-369/1 відбирається за рівнем на всмоктування насоса Н-375/1.2

#### 1.4 Технічні характеристики обладнання та комунікації

Для розробки функціональної схеми автоматизації насамперед необхідно визначити параметри технологічного процесу, які підлягають контролю. Для цього складається технологічна карта контрольованих параметрів [11-13].

Карта містить наступне обладнання: підігрівачі Т-352/1 і Т-355/1, ректифікаційну колону К-369/1, випарник Т-370/1, конденсатори Т-371/1А, Т-371/1Б та Т-377/1, двокамерну ємність Е-372/1, електронасоси Н-373/1.2 та гідрозатвор Е-378/1.

У підігрівач Т-352/1 подається циклогексанон-сирець із ємності Е-382. Основними контрольованими параметрами на виході з підігрівача є температура та об'ємна витрата суміші.

Початкова суміш подається у тарілчасту ректифікаційну колонну К-369/1, яка є основним об'єктом процесу очищення циклогексанону. У колоні регулюються температура та тиск куба і верхньої частини, а також контролюється температура по висоті колони. Для цього встановлено давачі температури, які забезпечують сигнали для сигналізації, реєстрації, блокування та регулювання. Контроль тиску здійснюється за допомогою відповідних давачів.

Парова фаза колони надходить у конденсатори Т-371/1А і Т-371/1Б, де контрольованим параметром є температура конденсату на виході. Сконденсований продукт із конденсаторів Т-371/1А, Т-371/1Б та Т-377/1 збирається у ємність Е-372/1. У першому відсіку ємності періодично

відводиться водний шар, а з другого відсіку частина спиртової фракції подається у колону К-369/1 у вигляді флегми. Залишок спиртової фракції відводиться для подальшого використання в інших процесах. Регульованими параметрами є рівень розділу фаз у першому відсіку, рівень другого відсіку та об'ємна витрата відводимої спиртової фракції, а контрольованим параметром є витрата флегми, що подається у колону.

## 2 РОЗРОБЛЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СХЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ ТА ВИБІР ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ

### 2.1 Обґрунтування вибору функціональної схеми автоматизації

В результаті аналізу технологічного процесу (ТП) очистки циклогексанону-сирцю для виробництва адипінової кислоти було встановлено, що забезпечить точне регулювання параметрів [14, 15]. Якщо керування ТП здійснюється вручну, на основі показників вимірювальних приладів та досвіду обслуговуючого персоналу, то такий підхід може приводити до похибок у процесі, несвоєчасного виявлення відхилень та затримок у реагуванні на них, що підвищує ризик аварій, травмування працівників та економічних втрат.

У таких умовах впровадження сучасної системи автоматичного регулювання є необхідним та виправданим заходом для підвищення безпеки та ефективності виробництва.

Функціональна схема розроблюваної АСК наведена на рисунку 2.1.

Особливістю пропонованої АСК є централізований облік технологічного процесу. Керування здійснюється за допомогою вимірювачів-регуляторів ТРЦ 02 «Універсал+» [16] та оператора (АРМ), що забезпечує архівування важливих параметрів протягом певного часу, підвищує якість керування, інтегрує керування різними частинами процесу в єдину систему та дозволяє зменшити кількість обслуговуючого персоналу.

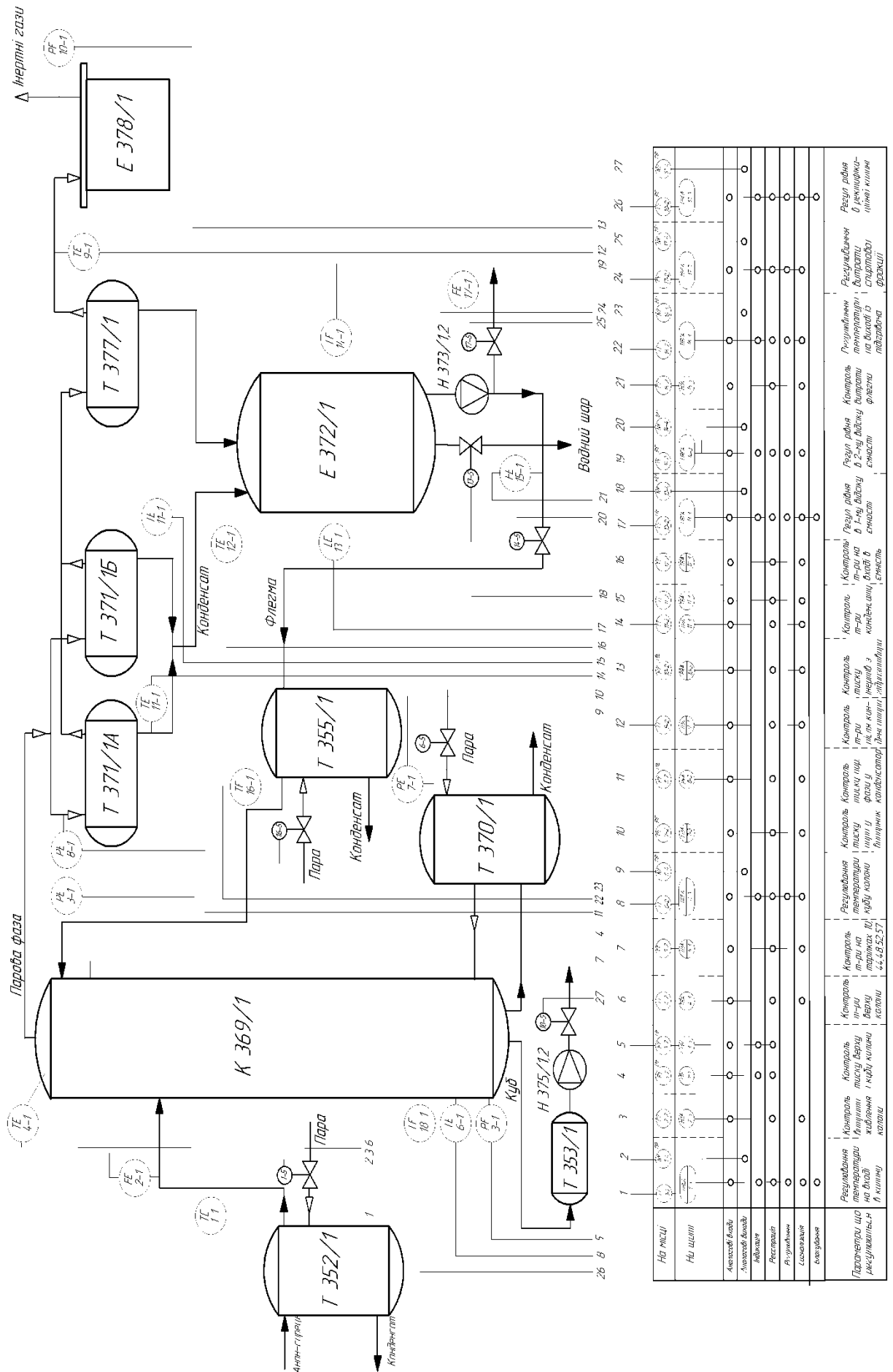


Рисунок 2.1 – Функціональна схема автоматизації

## 2.2 Опис функціональної схеми автоматизації

Функціональна схема автоматизації технологічних процесів є документом, що визначає структуру та характер систем автоматизації, а також оснащення їх відповідними приладами та засобами керування. На схемі спрощено зображені агрегати, що підлягають автоматизації, а також прилади і засоби автоматизації, позначені умовними символами згідно з чинними стандартами. Також на схемі показані лінії зв'язку між цими елементами.

Схема автоматизації технологічного вузла очищення передбачає наявність контурів індикації, регулювання, реєстрації та сигналізації параметрів, що забезпечують автоматичний контроль температури кубу колони, рівня у другому відсіку ємності, температури флегми на виході з підігрівача та витрати спиртової фракції [18-20]. Крім того, передбачено контури з блокуванням, які реагують на вихід параметрів за допустимі межі, контролюючи температуру циклогексанону-сирця на вході в колону, рівень у першому відсіку ємності та рівень у ректифікаційній колоні. Для реєстрації та сигналізації параметрів передбачено контури, що відстежують витрату циклогексанону-сирця для живлення колони, температуру верху ректифікаційної колони, температуру на тарілках 10, 44, 48, 52 і 57, тиск пари у випарнику, тиск парової фази у конденсаторі, температуру після конденсатора, тиск інертних газів з гідрозатвора, температуру конденсату, температуру на вході в ємність та витрату флегми. Додатково існує контур контролю та реєстрації тиску верху і кубу ректифікаційної колони.

Детальний опис контурів автоматизації включає регулювання ключових параметрів технологічного процесу. Контур регулювання температури кубу колони призначений для підтримки температурного режиму в межах 168–182 °С згідно з технологічним регламентом. Температура вимірюється термопарою, сигнал з якої через засоби дистанційної передачі перетворюється в уніфікований сигнал і надходить на регулятор TIRCA, що здійснює індикацію, реєстрацію, регулювання та сигналізацію. Сигнал

керування через перетворювач подається на виконавчий механізм, який регулює витрату пари, що надходить у випарник.

Контур регулювання рівня в другому відсіку ємності забезпечує підтримку постійного рівня органічного шару (спиртової фракції). Рівень вимірюється датчиком LE, сигнал з якого через перетворювач LY надходить на регулятор LIRCA, що виконує функції індикації, реєстрації, регулювання та сигналізації. Сигнал керування через перетворювач подається на виконавчий механізм, що регулює витрату флегми у підігрівач, підтримуючи потрібний рівень у ємності.

Детальний опис контурів автоматизації продовжується регулюванням ключових параметрів технологічного процесу. Контур регулювання температури флегми на виході з підігрівача забезпечує нагрівання флегми до температури не більше 140 °С перед подачею в ректифікаційну колону. Температура вимірюється термопарою, сигнал з якої через засоби дистанційної передачі надходить на регулятор TIRCA, що здійснює індикацію, реєстрацію, регулювання та сигналізацію. Керуючий сигнал через перетворювач подається на виконавчий механізм, який регулює витрату пари в підігрівач.

Контур регулювання витрати спиртової фракції підтримує об'ємну витрату фракції, що подається для відгонки циклогексанона і циклогексанолу із дистиляту колони, не більше 0,4 м<sup>3</sup>/год. Витрата вимірюється витратоміром, сигнал з якого через перетворювач надходить на регулятор FIRCA, що виконує індикацію, реєстрацію, регулювання та сигналізацію. Керуючий сигнал через перетворювач подається на виконавчий механізм, який регулює витрату спиртової фракції.

Контур регулювання температури циклогексанона-сирця на вході в ректифікаційну колону підтримує суміш на оптимальній температурі до 153 °С. Це дозволяє уникнути надмірної конденсації парів і порушення режиму ректифікації. Температура вимірюється термометром, сигнал з якого через засоби дистанційної передачі надходить на регулятор TIRCA, що

здійснює індикацію, реєстрацію, сигналізацію, блокування та автоматичне регулювання. Керуючий сигнал через перетворювач подається на виконавчий механізм, який регулює витрату пари в підігрівач.

Контур регулювання рівня в першому відсіку ємності забезпечує контроль межі розділення водної та спиртової фаз. Датчик рівня LE передає сигнал через перетворювач LY на регулятор LIRCA, який здійснює індикацію, реєстрацію, сигналізацію, блокування і автоматичне регулювання. У разі відхилення від норм технологічного процесу керуючий сигнал через перетворювач подається на виконавчий механізм, що забезпечує періодичний вивід водного шару з ємності.

Контур регулювання рівня в ректифікаційній колоні підтримує матеріальний баланс у кубі колони шляхом регулювання витрати кубового залишку. Рівень контролюється регулятором з сигналізацією та блокуванням при відхиленні від норм технологічного процесу. Датчик рівня LE передає сигнал через перетворювач LY на регулятор LIRCA, який забезпечує індикацію, реєстрацію, сигналізацію, блокування та автоматичне регулювання. При відхиленні рівня керуючий сигнал через електропневматичний перетворювач NY подається на виконавчий механізм, що здійснює періодичний вивід кубового залишку з колони.

Контур реєстрації та сигналізації витрати циклогексанона-сирця контролює об'ємну витрату суміші, що подається на живлення колони. Витрата вимірюється давачем FE, сигнал з якого через перетворювач FY надходить на вторинний прилад FRA, що виконує реєстрацію та сигналізацію при виході за межі, формуючи світлову та звукову сигналізацію.

Контур реєстрації та сигналізації температури верху колони контролює температуру, яка істотно впливає на інтенсивність ректифікації, та не повинна перевищувати 145 °С. Температура вимірюється давачем TE, сигнал з якого через засоби дистанційної передачі TT надходить на вторинний прилад TRA, що здійснює реєстрацію та сигналізацію при виході параметра за допустимі межі.

Контур реєстрації та сигналізації температури на тарілках 10, 44, 48, 52 та 57 контролює температуру на проміжних тарілках, де зміни відбуваються швидше, ніж на виході колони. Сигнал від датчика ТЕ через засоби дистанційної передачі ТТ подається на вторинний прилад TRA для реєстрації та сигналізації при виході за межі.

Контур реєстрації та сигналізації тиску пари у випарник забезпечує контроль тиску в лінії подачі пари, який не повинен перевищувати 15 кгс/см<sup>2</sup>. Тиск вимірюється датчиком РЕ, сигнал з якого через перетворювач РУ надходить на вторинний прилад PRA для реєстрації та сигналізації при виході параметра за межі.

Контур реєстрації та сигналізації тиску парової фази у конденсаторі контролює тиск у лінії подачі парової фази. Сигнал від датчика РЕ через перетворювач РУ подається на вторинний прилад PRA для реєстрації та сигналізації при виході за межі.

Контур реєстрації та сигналізації температури після конденсатора контролює температуру на вході до гідрозатвора. Температура вимірюється датчиком ТЕ, сигнал з якого через засоби дистанційної передачі ТТ надходить на вторинний прилад TRA для реєстрації та сигналізації при виході параметра за межі.

Контур реєстрації та сигналізації тиску інертів з гідрозатвора контролює тиск інертних газів, що виходять із гідрозатвора. Тиск вимірюється датчиком РЕ, сигнал з якого через перетворювач РУ подається на вторинний прилад PRA для реєстрації та сигналізації, формуючи світлову і звукову тривогу при виході параметра за допустимі межі.

Контур реєстрації та сигналізації температури конденсату контролює температуру сконденсованого продукту на виході з конденсаторів. Температура вимірюється датчиком ТЕ, сигнал з якого через засоби дистанційної передачі ТТ надходить на вторинний прилад TRA для реєстрації та сигналізації при виході за межі.

Контур реєстрації та сигналізації температури на вході в ємність контролює температуру сконденсованого продукту при подачі в двокамерну ємність. Датчик TE передає сигнал через засоби дистанційної передачі ТТ на вторинний прилад TRA для реєстрації та сигналізації при виході параметра за межі.

Контур реєстрації та сигналізації витрати флегми контролює об'єм флегми, що подається в ректифікаційну колону для зрошення. Витрата вимірюється датчиком FE, сигнал з якого через перетворювач FY надходить на вторинний прилад FRA для реєстрації та сигналізації при виході параметра за межі.

Контур індикації і реєстрації тиску верху і кубу ректифікаційної колони контролює тиск у верхній частині та кубі колони, який не повинен перевищувати  $0,3 \text{ кгс/см}^2$  для верху та  $0,6 \text{ кгс/см}^2$  для кубу. Тиск верху стабілізується подачею холодоносія в конденсатори, що впливає на інтенсивність конденсації та відбір пари, забезпечує нормальний гідродинамічний режим колони, а регулювання тиску верху одночасно стабілізує тиск у нижній частині колони. Сигнал від датчика PE через перетворювач PY подається на вторинний прилад PIR для індикації та реєстрації контрольованого параметру.

### 2.3 Вибір технічних засобів

У даній роботі пропонується у якості локальних засобів автоматизації, таких як регулятори, засоби реєстрації та сигналізації, використати вимірювачі-регулятори ТРЦ 02 Універсал + від фірми «Промприлад». У сукупності з ПЕОМ вони забезпечать опрацювання, зберігання інформації та зв'язок з оператором [16, 20, 24].

Вимірювачі-регулятори ТРЦ 02 Універсал +.

Цифровий прилад ТРЦ 02 Універсал + призначений для вимірювання та регулювання температури та інших фізичних величин технологічного

процесу. Він обробляє вхідні сигнали від термоперетворювачів опорів, термоелектричних перетворювачів (ПТ) та датчиків з уніфікованими вихідними сигналами і видає сигнали регулювання у режимах позиційного, П, ПІ, ПД або ПІД. Прилад має можливість підключення до комп'ютера через інтерфейс RS 485, роботи в мережі та реєстрації параметрів технологічного процесу, що робить його універсальним засобом для контролю й регулювання температури та інших величин у різних галузях.

Робочі умови використання приладу передбачають температуру навколишнього середовища від 5 до 40 °С та відносну вологість до 80 % при 25 °С. Під час транспортування прилад витримує температуру від -50 до +50 °С, відносну вологість до 98 % при 35 °С, синусоїдальні вібрації в діапазоні частот 10–55 Гц з амплітудою до 0,35 мм, а також транспортну тряску з прискоренням 30 м/с<sup>2</sup> при частоті 80–120 ударів за хвилину. Ступінь захищеності корпусу приладу відповідає IP 40 [9, 10].

Прилад дозволяє працювати одночасно з двома термоперетворювачами опору типів ТОП або ТОМ, двома термоелектричними перетворювачами типів ТХК, ТХА, ТПІ, ТЖК, РС-20 або двома датчиками з уніфікованими вихідними сигналами 0-5 мА, 0-20 мА, 4-20 мА, а також із будь-якою комбінацією зазначених типів датчиків. Термоперетворювачі підключаються по двопровідній схемі, а усунення похибки вимірювання через опір ліній здійснюється вручну з клавіатури приладу. Опір сполучних проводів не повинен перевищувати 5 Ом. Номінальні статичні характеристики термоелектричних перетворювачів та діапазони температурних перетворень для конкретних градувань приладу визначені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 - Номінальні статичні характеристики ПТ

Тип ПТ	Умовний номер градування приладу	Умовне позначення НСХ	Діапазон перетворення температури, °С (напруга, мВ)	
			Початкове значення	Кінцеве значення
ТХК	8	ХК(L)	10(0,646)	790 (65,560)
ТХА	9	ХА(K)	10(0,397)	1290 (52,049)
ТПІ	10	ПІ(S)	20(0,113)	1580(16,539)

ТЖК	11	ЖК(Ј)	10 (0,507)	1190(68,980)
РС-20	12	РС-20	910(2,44)	1690 (38,40)

Умовні позначення уніфікованих датчиків (УД) та діапазони перетворень фізичних величин наведені в таблиці 2.2. Початкове та кінцеве значення діапазону вимірюваної фізичної величини встановлюється користувачем за допомогою клавіатури приладу через режим конфігурації, що забезпечує функцію масштабування.

Таблиця 2.2 - Діапазон перетворень фізичних величин

Тип УД	Умовний номер градуювання приладу	Умовне позначення	Діапазон перетворення фізичних величин (Напруга, В)	
			Початкове значення	Кінцеве значення
0-5 мА	13	0-5 мА	0(0)	10-1000* (1)
0-20 мА	14	0-20 мА	0(0)	10-1000* (4)
4-20 мА	15	4-20 мА	0(0,8)	10-1000* (4)

Межі допустимої похибки приладу при перетворенні вхідних сигналів та індикації температури або іншої фізичної величини, віднесеної до різниці між верхньою та нижньою межею перетворення, складають  $\pm 1\%$ . Також допустима точність приладу при перетворенні вхідних сигналів і формуванні сигналів позиційного, П, ПІ, ПД або ПІД-регулювання відповідає  $\pm 1\%$  від різниці між верхньою та нижньою межею перетворення. Час встановлення робочого режиму приладу не перевищує 5 хв. Прилад забезпечує перетворення вхідних сигналів і видачу регулюючих сигналів у безперервному або періодичному режимі, причому час одного перетворення сигналу ТО, ПТ або УД у цифровий код не перевищує 0,1 с. Діапазон встановлення інтервалу часу регулювання становить від 1 хв до 9999 хв із дискретністю 1 хв, а відносне відхилення заданого інтервалу часу від фактичного значення не перевищує  $\pm 0,1\%$ .

Прилад забезпечує почергову індикацію на цифровому індикаторі поточного значення температури або іншої фізичної величини та заданого інтервалу часу. Номінальний час індикації для обох величин становить 1 с.

Цифровий індикатор п'ятирозрядний, з висотою знака не менше 10 мм. Ціна одиниці найменшого розряду становить 0,1 для температури та 1 хв для інтервалу часу. Конструкція приладу передбачає світлодіодну індикацію видачі сигналів позиційного, П, Ш, ПД або ПД-регулювання.

Параметри ПД-регулювання включають діапазони установки коефіцієнта пропорційності від 0 до 25,5, часу інтегрування від 0 до 8000 і часу диференціювання від 0 до 255. Період проходження імпульсів варіюється від 1 до 512 с, а мінімальна тривалість імпульсу становить 10 мс.

Принцип роботи приладу полягає у вимірюванні електричного опору термоперетворювачів, напруги термоелектричних перетворювачів або сили струму уніфікованих датчиків, що проходить через внутрішній шунт (200 Ом), та перетворенні цього сигналу у цифрову форму за допомогою АЦП. Цифровий сигнал обробляється мікроконтролером, відображається на цифровому індикаторі, порівнюється із заданими параметрами та управляє вихідними оптосимісторами або реле. Режим безперервного регулювання або регулювання в заданому інтервалі часу встановлюється вбудованим таймером.

Підготовка приладу до роботи та порядок його експлуатації передбачають використання двох режимів задатчиків: режим конфігурацій та режим установки задатчиків. У режимі конфігурацій встановлюються параметри роботи приладу, такі як кількість каналів вимірювання та регулювання (1 або 2), тип термоперетворювача, термоелектричного перетворювача або уніфікованого датчика для кожного каналу, коефіцієнти цифрової компенсації опору ліній, характеристика виходів ("прямий" або "інверсний") та логіка їх роботи, тип таймера або його відсутність, тип регулювання по кожному виходу (позиційне або ПД), режим індикації, швидкість передачі даних у мережі, період проходження імпульсів виходів при імпульсному ПД-регулюванні, кінцеві значення діапазонів вимірювань і дискретність відліку часу таймера.

У режимі установки задатчиків встановлюються конкретні значення: задатчики температури, зони повернення, заданий інтервал часу (якщо активована функція таймера) та коефіцієнти ПД-регулювання (якщо по одному або двох виходах встановлений ПД-тип регулювання) (рисунок 2.1). Для встановлення задатчиків потрібно натиснути кнопку "РЕЖИМ" і перевести прилад у режим установки задатчиків, після чого індикація поточної температури та інтервалу часу припиняється, а на цифровому індикаторі з'являється номер та значення поточного задатчика. Далі кнопку "РЕЖИМ" відпускають і повторно натискають для вибору потрібного задатчика, після чого кнопками "-1" або "+1" встановлюють необхідне значення. Через 10 секунд після останнього натискання прилад автоматично повертається в режим вимірювання.



Рисунок 2.1 - Вибір режиму

Пуск приладу здійснюється за допомогою кнопки "ПУСК", після чого починає мигати покажчик каналу (та інтервал часу, якщо активована функція таймера) і запускається процес регулювання. Контроль стану виходів ведеться за допомогою світлодіодів 1 та 2 на передній панелі приладу. Завершення циклу регулювання або його примусова зупинка здійснюється кнопкою "СТОП".

Номери задатчиків і їх призначення наступні:

- 1 - для установки значення температури або фізичної величини;
- 2 - для установки значення температури або фізичної величини;
- 3 - зона повернення 1 (гістерезис 1);

- 4 - зона повернення 2 (гістерезис 2);
- 5 - задатчик часу таймера для роботи;
- 6 - задатчик часу таймера для паузи;
- 9 - ручне керування засувкою;
- A - коефіцієнт пропорційності (Кп) 1-го виходу;
- B - час інтегрування (Ті) 1-го виходу;
- C - час диференціювання (Тд) 1-го виходу;
- D - коефіцієнт пропорційності (Кп) 2-го виходу;
- E - час інтегрування (Ті) 2-го виходу;
- F - час диференціювання (Тд) 2-го виходу.

Схема підключення приладу ТРЦ 02 Універсал + передбачає використання семісторів ВТ 137 як виходів у серійному виробництві. За індивідуальним замовленням можуть застосовуватися реле або аналогові виходи. У будь-якому випадку загальна схема підключення, включно з номерами клем та їх комутацією, залишається незмінною та відповідає наведеній на рисунку 2.2.

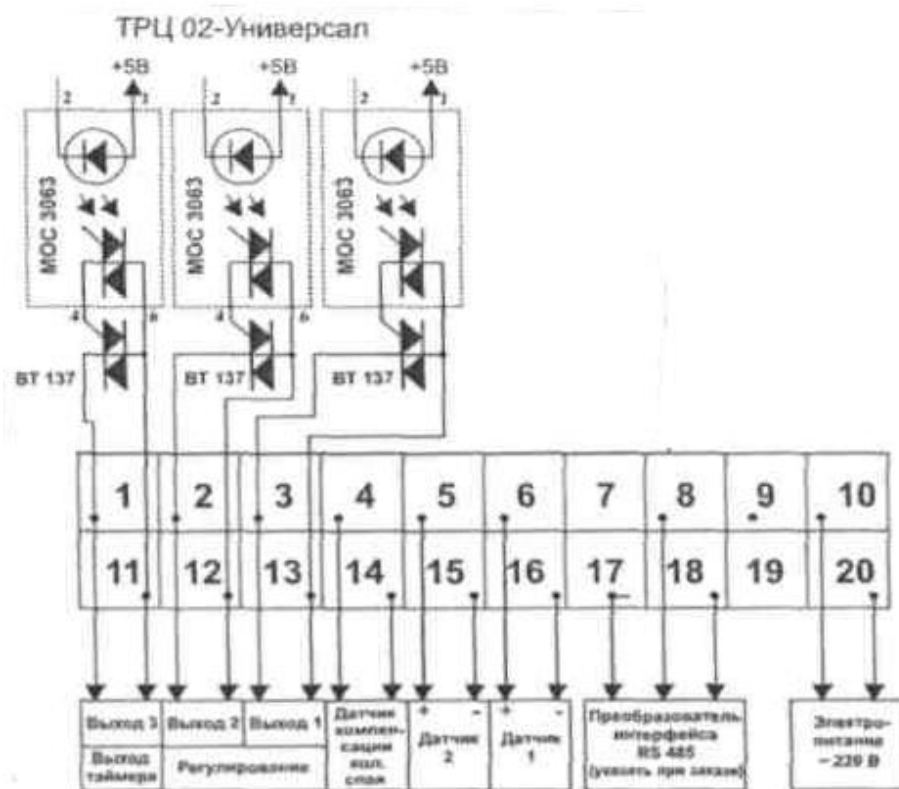


Рисунок 2.2 - Загальна схема підключення

Якщо прилад використовується в одноканальному режимі, тобто активний лише перший канал вимірювання, то в режимі конфігурацій другий датчик встановлюється рівним 0000, що відповідає відключенню другого каналу. У цьому випадку на клеми 5 та 15 необхідно встановити перемичку.

Застосування приладу для керування засувкою.

Розглянутий тип регулювання є фактично ШІМ-регулюванням, оскільки період проходження імпульсів постійний і становить 1 секунду. У режимі конфігурацій присутні датчики С та D, які визначають період проходження імпульсів (у секундах) для 1-го та 2-го виходів приладу відповідно, з діапазоном установки від 1 до 500 секунд. Значення цих датчиків обирається залежно від характеристик виконавчого механізму. Обидва датчики необхідно встановити більше 0000, щоб виключити одночасне включення обох виходів і запобігти виходу з ладу електродвигуна засувки.

Для налаштування приладу при його роботі із засувкою окрім періодів проходження імпульсів необхідно встановити відповідну конфігурацію виходів. У режимі конфігурацій датчик 5 слід встановити на 0000 (Вихід 1 – «прямий»), а датчик 6 – на 0003 (Вихід 2 – «інверсний») (рисунок 2.3). При підборі коефіцієнтів ПІД-регулювання потрібно враховувати, що при використанні засувки як регулюючого пристрою коефіцієнт часу інтегрування (Ті) встановлюється рівним 0000, оскільки інтегруючою ланкою в системі є сама засувка.



Рисунок 2.3 - Застосування приладу для керування засувкою

Ручне керування засувкою доступне, якщо встановлено ПД-регулювання на одному або обох виходах. У режимі установки задатчиків при стані «СТОП» активується задатчик 9, що відповідає за ручне керування засувкою. На цифровому індикаторі відображається значення параметра другого каналу вимірювання, де можна підключити датчик положення для візуального контролю стану засувки у відсотках. Якщо другий канал відключений, індикуюється 0000, і керування засувкою виконується без цифрового відображення. Команди «відкрити» та «закрити» реалізуються кнопками «Стоп/-1» і «Пуск/+1», а стан засувки контролюється світлодіодами 1 і 2 на передній панелі. У стані «Пуск» задатчик 9 зникає з меню, щоб уникнути порушення процесу регулювання.

Перетворювач вимірювальний НП–ТЛ1-м.

Перетворювач вимірювальний НП–ТЛ1-м призначений для перетворення електрорушійної сили (ЕРС) термопари в уніфікований струмовий сигнал. Він виконаний у вигляді нормуючого перетворювача і складається з підсилювача з випрямлячем та блоку лінеаризації (рисунок 2.4).

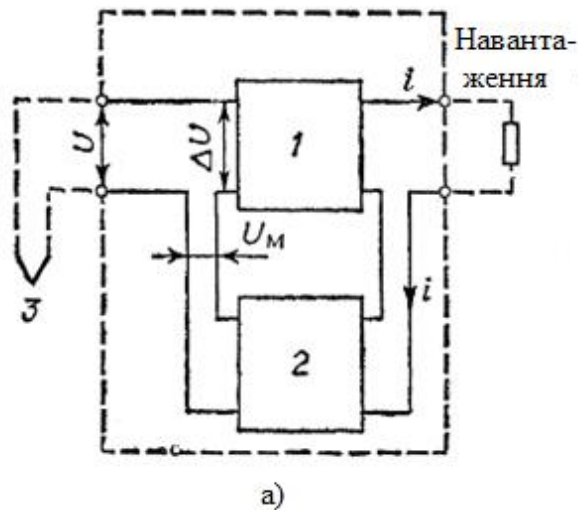


Рисунок 2.4 - Перетворювач ЕРС термопари в струм: а) схема (1 - підсилювач; 2 - блок лінеаризації; 3 - термопара); б) зовнішній вигляд;.

Описаний перетворювач НП–ТЛ1-м працює за принципом системи з безпосереднім зворотним зв'язком. Слід пояснити ключові моменти.

1. Вхідний і вихідний сигнали:

- вхід: ЕРС термопари ;

- вихід: струм , який подається на зовнішнє навантаження та одночасно на блок лінеаризації.

2. Принцип дії:

- підсилювач 1 порівнює вимірювану напругу з напругою зворотного зв'язку  $U_m$  і формує різницю  $\Delta U = U - U_m$ ;

- ця різниця підсилюється, і вихідний струм проходить через навантаження та блок лінеаризації 2;

- напруга з виходу блоку лінеаризації  $U_m$  подається назад на вхід підсилювача, замкнувши ланцюг зворотного зв'язку.

3. Статичність системи:

- перетворювач не містить інтегратора, тому це статична система стеження;

- у сталому стані існує невелика статична помилка  $\Delta U \neq 0$ , але глибина зворотного зв'язку вибрана такою, що помилкою можна знехтувати, тобто вихідна напруга зворотного перетворювача  $U_m \approx U$ .

4. Лінеаризація:

- статична характеристика вихідного струму визначається блоком лінеаризації 2;

- блок лінеаризації компенсує нелінійність термопари, забезпечуючи лінійну залежність вихідного струму від температури .

Таким чином, перетворювач забезпечує лінійний вихідний струм, пропорційний вимірюваній температурі, завдяки схемі з глибоким зворотним зв'язком та лінеаризаційному блоку.

Додаткові технічні характеристики перетворювача НП–ТЛ1-м:

- стандартні діапазони температур. Перетворювач випускається для роботи з термопарами різних типів у попередньо визначених промислових діапазонах температур, що забезпечує сумісність з поширеними термопарами та уніфіковану калібровку;

- опір зовнішнього навантаження. Максимальний опір навантаження не повинен перевищувати 2,5 кОм, інакше вихідний струм може не досягати заданого значення, що погіршить точність вимірювань;

- опір лінії зв'язку між перетворювачем і первинним перетворювачем (термопарою) має бути не більше 150 Ом. Це обмеження забезпечує точність передавання сигналу та мінімальні похибки через падіння напруги на проводах.

Отже, для правильної роботи перетворювача необхідно дотримуватися цих обмежень по опору навантаження і лінії, а також підбирати відповідний тип термопар для заданого температурного діапазону.

Термометр термоелектричний ТХК – 0515, ТХК – 1479.

Термопари (рисунок 2.5) ТХК–0515 і ТХК–1479 застосовуються для вимірювання температури різних об'єктів у промисловості, лабораторіях та автоматизованих системах керування й контролю. Вони особливо ефективні при високих температурах до 2200 °С та в агресивних середовищах, здатні вимірювати локальні температури й малі різниці температур із високою точністю до  $\pm 0,01$  °С. Термопари відзначаються надійною конструкцією, довговічністю, низькою вартістю, малою інерційністю та достатньо лінійною характеристикою, а їхню нелінійність добре вивчено та описано в спеціальній літературі. Вони генерують термоелектрорушійну силу від мікрвольт до мілівольт, що потребує стабільного підсилення для обробки. Принцип дії термопар заснований на явищі Зеебека: якщо спаї двох різнорідних металів мають різні температури, у замкненому ланцюзі виникає електричний струм, а зміна напрямку температурної різниці змінює напрямок струму. Під термоелектричним ефектом розуміють генерування термо-ЕРС через різницю

температур між спаями. У поєднанні з електровимірювальним приладом термопара утворює термоелектричний термометр, який перетворює температурну різницю на електричний сигнал. Для роботи з перетворювачем НП–ТЛ1-м термо-ЕРС перетворюється в уніфікований струмовий сигнал, придатний для цифрової обробки та регулювання.



Рисунок 2.5 - Зовнішній вигляд термоелектричного термометру типу ТХК-0515

Для вимірювання температури рідин, газів та пари використовуються одинарні та подвійні вібростійкі термоелектричні термометри типу ТХК-0515, які випускаються у трьох варіантах виконання: без штуцера, з рухливим штуцером і з нерухоМВМ штуцером.

Захисний чохол термометрів має зовнішній діаметр 10 мм і виготовляється з матеріалів 0X13 або 0X20H14C2. Термоелектроди ізольовані двоканальним порцеляновим намистом, а робочий кінець захищений порцеляновим ковпачком. Термометри оснащені водозахисною бакелітовою голівкою. Для термометрів з рухоМВМ штуцером умовний допустимий тиск середовища становить 0,4 МПа, тоді як для термометрів з нерухоМВМ штуцером або без нього він досягає 6,4 МПа. При встановленні термометрів з нерухоМВМ штуцером у захисній гільзі умовний допустимий тиск може бути

25 або 50 МПа. Монтажна довжина термометрів варіюється від 120 до 2000 мм, причому, для термометрів зі штуцером вона обмежується його положенням на чохлі. Інерційність термометра становить 10–40 секунд, а в захисній гільзі - 40–120 секунд.

При установці термометра без захисної гільзи допустима швидкість вимірюваного середовища. Для води вона становить 15 м/с, а для пари - 25 м/с. У разі використання захисної гільзи та умовного тиску 25 МПа допустима швидкість для термометра ТХК-0515 складає 20 м/с для води і 40 м/с для пари, а при тиску 50 МПа - відповідно 100 і 120 м/с.

#### Пневмоелектричний перетворювач ПЕ-55М.

Пневмоелектричний перетворювач ПЕ-55М призначений для перетворення тиску стисненого повітря в діапазоні 0,2–1,0 кгс/см<sup>2</sup> у струм 0–5 мА. До нього можна підключати декілька споживачів. Перетворювач складається з трубчастої пружини, додаткової пружини, важеля, коливального контуру, спеціального підсилювача та магнітоелектричного перетворювача (рисунок 2.6).

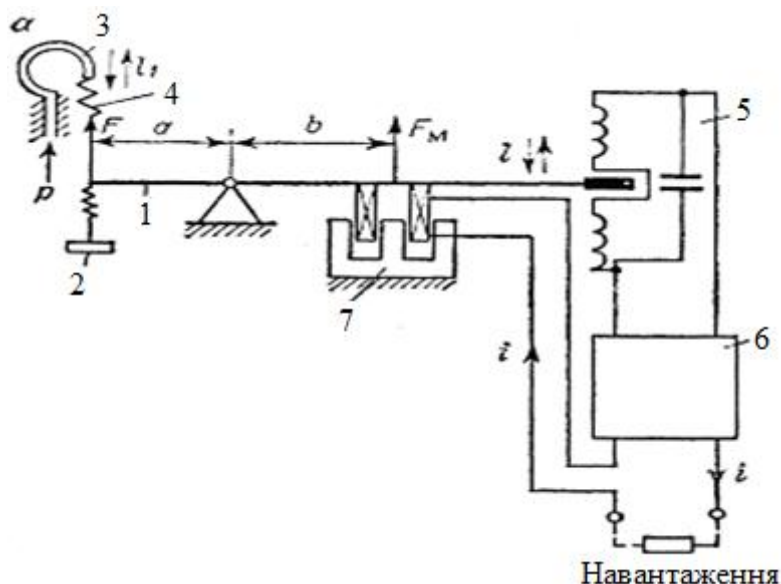


Рисунок 2.6 - Будова перетворювач тиску стисненого повітря в струм:

1 - важіль; 2 - коректор нуля; 3 - трубчата пружина; 4 - пружина; 5 - коливальний контур; 6 - підсилювач; 7 - магнітоелектричний перетворювач.

Вхідним сигналом є тиск стисненого повітря, що подається в трубчасту пружину, а вихідним - струм. Перетворювач представляє послідовну систему з трьох перетворювачів. Перший перетворює тиск у переміщення кінця трубчастої пружини, другий - це переміщення в силу, прикладену до важеля. Статичні характеристики обох перетворювачів лінійні. Третій перетворювач перетворює силу у вихідний струм через резонансну частоту коливального контуру та підсилювач; його статична характеристика визначається магнітоелектричним перетворювачем і лінійна також.

Перетворювач оснащений коректором нуля, що змінює натяг пружини і дозволяє встановити нульове значення вихідного струму при початковому тиску.

Перетворювач електропневматичний ЕПП-63.

Електропневматичний перетворювач ЕПП-63 призначений для перетворення струму 0–5 мА у тиск стисненого повітря 0,2–1,0 кгс/см<sup>2</sup>. Його метрологічні характеристики за вихідним сигналом відповідають характеристикам перетворювача сили в тиск стисненого повітря. Для перетворювача регламентується вихідний опір попереднього вимірювального перетворювача (близько 1500 Ом), оскільки від цього значення залежить додаткова похибка через ефект навантаження.

Пристрій складається з важеля, перетворювача типу «сопло-заслінка», сильфона, магнітоелектричного перетворювача та пневматичного підсилювача потужності (рисунок 2.7).

Вхідним сигналом електропневматичного перетворювача ЕПП-63 є струм у котушці магнітоелектричного перетворювача, а вихідним - тиск стисненого повітря на виході пневматичного підсилювача. Перетворювач фактично складається з двох послідовно з'єднаних ланок: перша перетворює струм у силу, а друга - цю силу у вихідний тиск. Оскільки статичні характеристики обох ланок лінійні, лінійною є й характеристика всього перетворювача струму в тиск. Початкове значення вихідного тиску, що

дорівнює  $0,2 \cdot 10^5$  Па при нульовому вхідному струмі, встановлюється за допомогою коректора нуля.

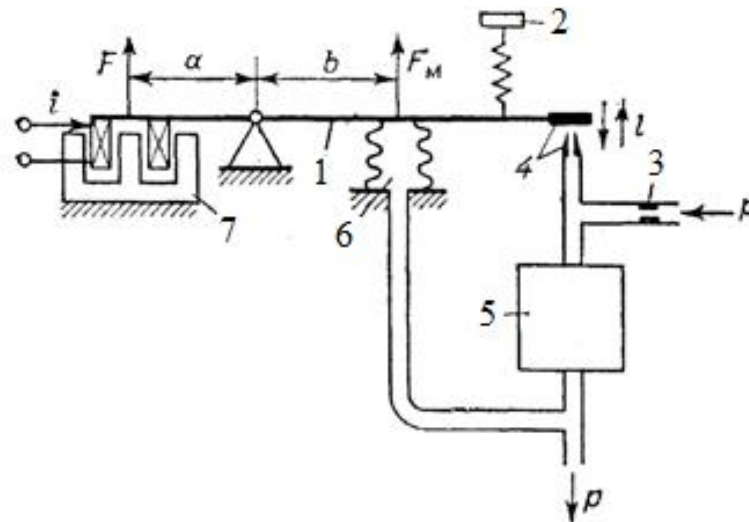


Рисунок 2.7 - Будова перетворювача струму в тиск стисненого повітря: 1 - важіль; 2 - коректор нуля; 3 - постійний дросель; 4 - сопло із заслінкою; 5 - підсилювач потужності; 6 - сиффон; 7 - магнітоелектричний перетворювач; 8 - перетворювач сили а тиск стисненого повітря.

#### Датчик тиску МС-П.

Датчики тиску МС-П призначені для безперервного перетворення абсолютного або надлишкового тиску в пропорційний уніфікований пневматичний сигнал. Кожен датчик складається з пневмосилового перетворювача та вимірювального блоку. Принцип дії базується на силевій компенсації: чутливий елемент вимірювального блоку перетворює тиск на пропорційне зусилля, яке автоматично зрівноважується зусиллям, створюваним тиском стисненого повітря у сиффоні зворотного зв'язку, що одночасно є вихідним сигналом датчика. Вимірювальні блоки уніфіковані, відрізняючись переважно розміром або розташуванням чутливого елементу. Зміною натягу пружини коректора нуля встановлюють необхідний діапазон вимірювань відносно вимірюваної величини.

На рисунку 2.8 показано загальний вигляд сиффонного манометра з пневмовиходом типу МС-П. Вимірюваний тиск подається на сиффон,

перетворюється передавальним механізмом (Т-подібним та Г-подібним важелями) у пропорційне зусилля, яке автоматично врівноважується зусиллям сільфона зворотного зв'язку. Для зміни меж виміру прилад оснащений переміщуваним кільцем. Технічні характеристики перетворювачів МС-П наведені у таблиці 2.2.

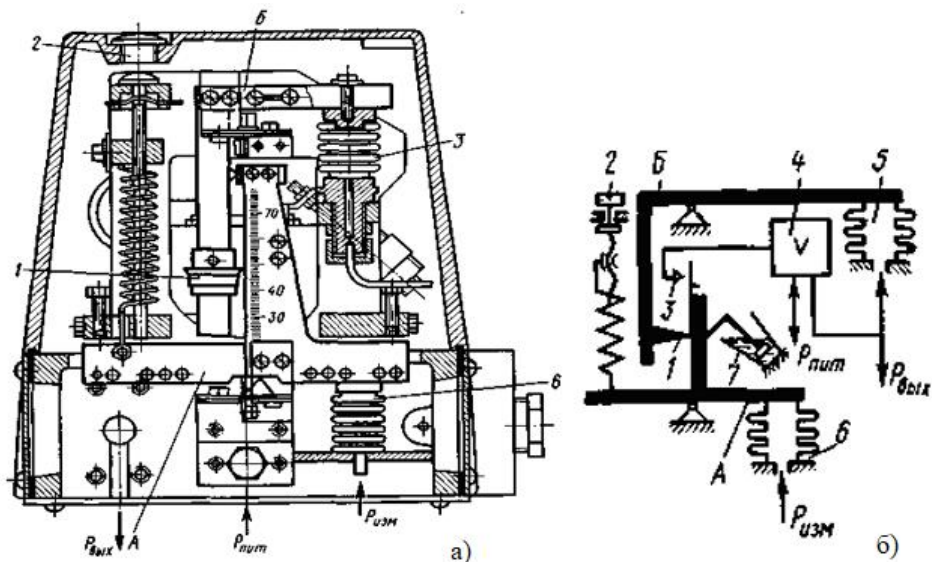


Рисунок 2.8 - Манометр із пневмовиходом типу МС-П:

а) загальний вид конструкції, б) схема пневмосилового перетворювача:

1 - кільце рухомої опори, 2 - гвинт коректора нуля, 3 - сопло-заслінка, 4 - пневмореле, 5 - сільфон зворотного зв'язку, 6 - сільфон вхідного сигналу, 7 - заспокоювач коливань (демпфер).

Місце встановлення перетворювача обирають з урахуванням зручності монтажу, налагодження та експлуатації. Під час роботи пневматичних перетворювачів тиску слід уникати трясіння та вібрацій.

Таблиця 2.2 - Технічні характеристики перетворювачів тиску МС-П

Тип перетворювача	Верхня межа вимірювання, кгс/см <sup>2</sup>	Вихідний тиск перетворювачів в залежності від верхньої межі вимірювання, кгс/см <sup>2</sup>					
		0	20	40	60	80	100
МС-П12 МС-П13 МС-П15	2; 4 6; 10						
МС-П17 МС-П18 МС-П19	16; 25 40; 60 100; 160 250; 400; 600	0,2 (0,002)	0,36 (0,036)	0,52 (0,052)	0,68 (0,068)	0,84 (0,084)	1,0 (0,1)

Зазвичай перетворювачі встановлюють поруч із місцем відбору контрольованого тиску. Сполучна лінія від точки відбору до перетворювача прокладається найкоротшим шляхом і повинна мати однобічний ухил: для газу - вгору від місця відбору до перетворювача, для рідини - вниз. У лініях необхідно встановлювати запірні вентиля для відключення перетворювачів під час ремонту або налагодження. Монтаж лінії виконується мідними, сталевими або вініловими трубками внутрішнім діаметром 6 мм. У лінії живлення стисненого повітря встановлюють фільтр і редуктор для підтримки тиску в межах 1,2-1,4 кгс/см<sup>2</sup>.

### Рівнемір буйковий пневматичний УБ-П.

Рівнемір типу УБ-П (рисунок 2.9) призначений для вимірювання рівня контрольованої рідини та має пневматичний вихідний сигнал, що дозволяє підключати його до реєструючого манометричного приладу для фіксації показань. По конструкції він схожий на манометр МС-П і використовується виключно як датчик, а не як самостійний вимірювач рівня.

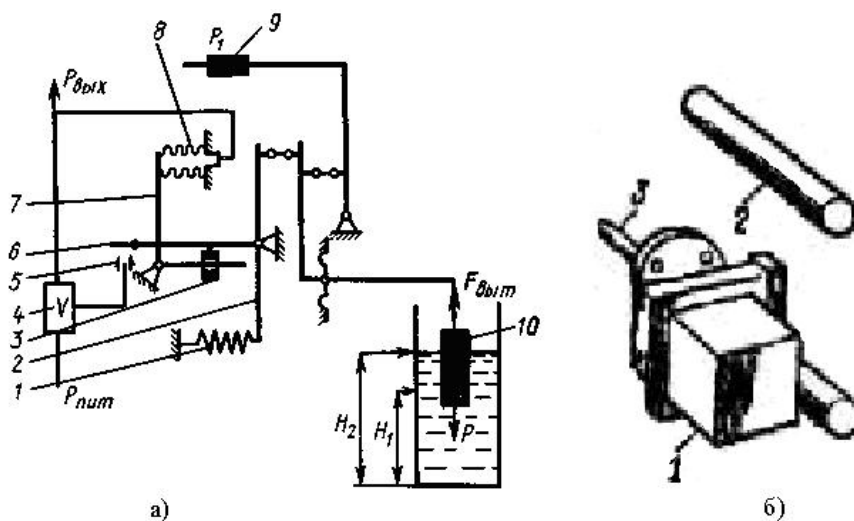


Рисунок 2.9 - а) Схема роботи рівнеміра УБ-П: 1 - пружина коректора, 2 - Т-подібний важіль, 3 - рухома опора, 4 - пневмореле, 5 - сопло, 6 - заслінка, 7 - Г-подібний важіль, 8 - сифон зворотнього зв'язку, 9 - вантаж-противага, 10 - датчик-буй; б) Загальний вигляд рівнеміра УБ-П: 1 - пневмоперетворювач, 2 - датчик, 3 - рухома опора

Принцип дії полягає в тому, що буйок, поміщений у рідину, урівноважений протидіючим вантажем через систему важелів. Зміна рівня рідини змінює виштовхувальну силу, яка порушує рівновагу системи «вантаж - противага». Це перетворюється на пропорційне зусилля на чутливому елементі, яке врівноважується зусиллям сильфона зворотного зв'язку. Отриманий тиск і є пневматичним вихідним сигналом, що змінюється в межах 0,02–0,1 МПа.

При зміні рівня від нижньої до верхньої межі вимірювання вихідний сигнал змінюється від 20 до 100 кПа (0,2–1,0 кгс/см<sup>2</sup>), а тиск повітря живлення становить  $(140 \pm 14)$  кПа ( $1,4 \pm 0,14$  кгс/см<sup>2</sup>). Вихідний сигнал передається по пневматичній лінії внутрішнім діаметром 4 мм на відстань до 150 м або 6 мм на відстань до 300 м. Рівнеміри витримують вібрацію частотою 10–55 Гц із амплітудою 0,035 мм, витрата повітря живлення у сталому режимі не перевищує 3 л/хв. Імовірність безвідмовної роботи не менше 0,97 за 2000 годин, а середній термін служби не менше 10 років.

Перетворювач вимірювальний різниці тисків пневматичний 13ДД11.

Пневматичний вимірювальний перетворювач різниці тисків 13ДД11 (рисунок 2.10) призначений для роботи в системах автоматичного контролю та керування виробничими процесами.



Рисунок 2.10 - Перетворювач вимірювальний 13ДД11

Він забезпечує подання інформації у вигляді уніфікованого пневматичного сигналу про перепад тиску, витрату рідин і газів, а також рівень рідини. Перетворювач працює у поєднанні з вторинними реєстраторами та регуляторами, що сприймають стандартний сигнал 0,2–1 кгс/см<sup>2</sup>. Принцип дії базується на пневмосилової компенсації, що забезпечує точність і надійність роботи пристрою.

Основні технічні характеристики включають межі виміру 4,0; 6,3; 10,0; 16,0; 25,0; 40,0; 63,0; 100,0 та 160,0 кПа, допустимий надлишковий тиск 2,5; 16 або 40 МПа, а похибка вимірювання складає  $\pm 0,6$  % або 1,0 %. Живлення здійснюється стислим повітрям з тиском  $140 \pm 14$  кПа, а вихідний сигнал від 20 до 100 кПа може передаватися по лінії зв'язку на відстань до 300 м. Перетворювачі широко застосовуються в хімічній, нафтопереробній, нафтохімічній промисловості та інших галузях.

Клапан регулюючий односідловий фланцевий з мембранним виконавчим механізмом.

Клапан регулюючий односідловий фланцевий з мембранним виконавчим механізмом (МВМ) 25ч41нж (НВ), 25ч42нж (НЗ) (рисунок 2.11) призначений для встановлення на трубопроводах з метою безперервного регулювання витрати робочого середовища. Клапан комплектується МВМ з позиціонером. Позиціонери, що можуть бути прямої або зворотної дії, зменшують невідповідність ходу та підвищують швидкодію мембранних виконавчих механізмів за рахунок введення зворотного зв'язку по положенню вихідного штока. МВМи комплектуються позиціонерами однобічної дії ПП-1.

Набивка сальника виконана з графлену. Гарантійне напрацювання становить 10 000 годин протягом гарантійного терміну експлуатації.

Набивка сальника виконана з графлену. Гарантійне напрацювання становить 10 000 годин протягом гарантійного терміну експлуатації.

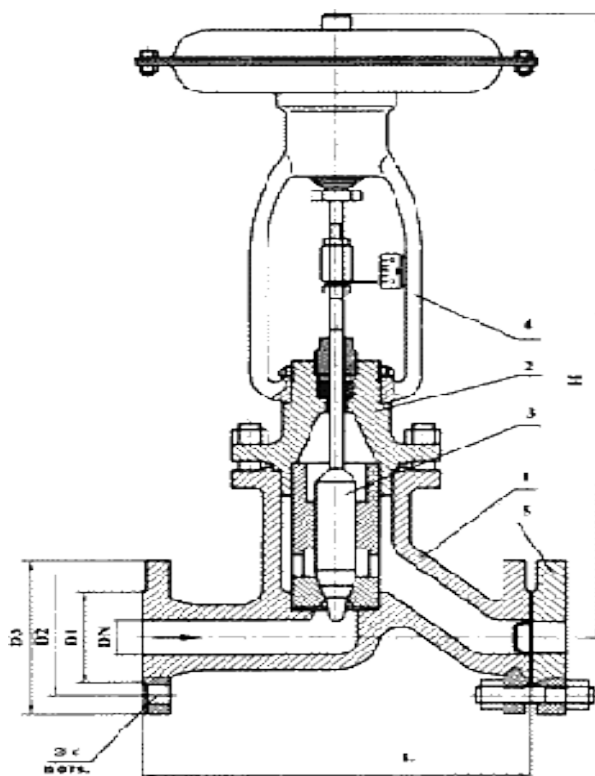


Рисунок 2.11 - Клапан 25ч42нж: 1- корпус; 2- кришка; 3- плунжер;  
4- MBM; 5- комплект монтажних частин.

Переваги: використання графітових кілець у сальниковій набивці значно подовжує термін служби вузла сальника в порівнянні з азбестовим ущільненням. Клапани виготовляються з лінійною та рівнопроцентною витратною характеристикою.

#### Перетворювач інтерфейсів RS232-RS485/RS422 I-7520AR

Конструктивні особливості та технічні характеристики модуля I-7520AR (рисунок 2.12) наведено нижче.

Пристрій виконаний у вигляді конвертера інтерфейсу RS-232. Вхідним інтерфейсом є RS-232 з роз'ємом DB9 female. Вихідний послідовний інтерфейс представлений стандартом RS-485, містить один порт із максимальною швидкістю передачі даних 115,2 кбод, а підключення здійснюється через клемну колодку. Конвертер забезпечує гальванічну ізоляцію 3000 В та передає сигнали RS-485 Data+/-.



Рисунок 2.12 - Модуль I-7520AR

Пристрій підтримує апаратне керування потоком даних і автоматичне керування напрямком передачі для RS-485. Живлення здійснюється від зовнішнього джерела PWR-24/220 В. На корпусі передбачено LED-індикатор живлення (Power).

Робоча напруга становить від +10 В до +30 В, а споживана потужність - 2,2 Вт. Модуль може експлуатуватися при температурі від -20 до +75 °С. Габаритні розміри пристрою: довжина - 142 мм, ширина - 72 мм, висота - 25 мм.

DP-1200 - промислове джерело живлення змінного струму потужністю 120 Вт.

Пристрій (рисунок 2.13) належить до типу джерел живлення змінного струму. Його вихідна потужність становить 120 Вт, а вихідна напруга - 24 В.



Рисунок 2.13 - Промислове джерело живлення змінного струму DP-1200

Джерело живлення належить до типу змінного струму та виконане в алюмінієвому корпусі, що забезпечує надійність і ефективне відведення тепла.

На вході пристрій працює з діапазоном змінної напруги від 90 до 264 В, при частоті 47–63 Гц і споживаному струмі 1 А.

Вихідна потужність джерела становить 120 Вт. Пристрій побудований за схемою імпульсного АС–DC перетворювача з вихідною напругою +24 В. Вихідні параметри становлять: напруга - 24 В, номінальний та максимальний струм навантаження - 5 А.

Охолодження здійснюється природною конвекцією, без застосування вентиляторів, що підвищує надійність роботи пристрою. Для підключення використовуються гвинтові клеми як на вході, так і на виході.

Джерело живлення може експлуатуватися при температурі навколишнього середовища від 0 до +50 °С, а зберігатися - у діапазоні температур від –20 до +85 °С.

Промисловий комп'ютер Lenze Digitec серії AL5000.

Промисловий комп'ютер Lenze Digitec серії AL5000 (рисунок 2.14) призначений для виконання функцій контролю та візуалізації технологічних процесів [25]. Він забезпечує управління, архівування, документування та контроль параметрів у виробничих системах.

Комп'ютери цієї серії використовуються для вимірювання, керування й регулювання процесів, а також можуть бути розширені за рахунок встановлення до однієї PCI-Express та п'яти PCI плат. Пристрої здатні здійснювати управління складними технологічними процесами та підтримують функції Web-терміналу, що дозволяє реалізовувати проекти на базі Windows® CE і Web-рішення з використанням Internet Explorer (HTML, Java Virtual Machine).

Крім того, комп'ютери серії AL5000 можуть функціонувати як промислові сервери.

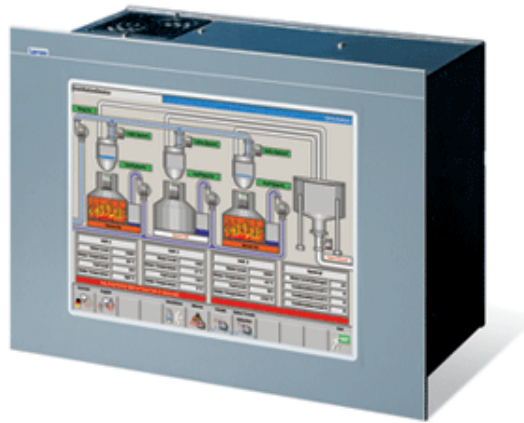


Рисунок 2.14 - Промисловий комп'ютер серії AL5000

Характеристики промислового комп'ютера серії AL5000.

Промисловий комп'ютер серії Lenze Digitec AL5000 виконаний у форматі панельного ПК. Він побудований на базі чипсета Intel® Q965 і оснащується процесорами Celeron D або Intel® Core™ 2 Duo різних модифікацій: Celeron D 3.2 GHz, Core™ 2 Duo 1.8 GHz та Core™ 2 Duo 2.13 GHz.

Комп'ютер обладнано 15-дюймовим сенсорним TFT-дисплеєм, який забезпечує зручність взаємодії з користувачем. Відеосистема інтегрована, із динамічним розподілом пам'яті об'ємом до 256 МБ. Використовується материнська плата формату ATX, що дозволяє розширювати функціональні можливості системи за допомогою одного слоту PCI-Express 4x і п'яти слотів PCI (максимальна довжина карт - 210 мм).

Комп'ютер має широкий набір інтерфейсів: два Ethernet-порти (10/100/1000 Mbit), вісім USB 2.0 портів на задній панелі та один USB-порт на передній панелі (опційно), а також аудіоінтерфейс AC97, роз'єми PS/2 для клавіатури та миші, послідовний порт RS232 (COM1) і відеовихід VGA.

Оперативна пам'ять може становити 1024 МБ, 2048 МБ або 4096 МБ, залежно від конфігурації. Як носій інформації використовується жорсткий диск об'ємом 80 ГБ і DVD-привід (читання/запис CD і DVD, інтерфейс SATA). Комп'ютер постачається з операційною системою Microsoft® Windows® XP Multilanguage, але можливе постачання без ОС.

Живлення здійснюється від мережі АС 115–230 В, 50–60 Гц, споживана потужність — 300 Вт. Додатково може використовуватись зовнішнє джерело безперебійного живлення (ИБП) на 115/230 В, 47–63 Гц, потужністю 350 Вт.

Комп'ютер відповідає вимогам електромагнітної сумісності (CE, EN 50082, EN 50081, EN 55022) і стандартам безпеки VDE 0805, EN 60950, UL. Ступінь захисту становить IP65 для передньої панелі та IP20 для задньої. Робочий температурний діапазон від 0 до +45 °С, температури зберігання від –10 до +60 °С.

Охолодження забезпечується вентилятором із фільтром примусового повітряного потоку. Допустима вологість під час експлуатації від 10 до 90 % без конденсації, максимальна висота встановлення над рівнем моря до 3000 м (для версії з сенсорним екраном).

### 3. РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ТА АНАЛІЗ ЇЇ РОБОТИ

#### 3.1 Математичний опис процесів ректифікації

Звичайна ректифікаційна колона складається з трьох основних частин: куба, колони, яка містить  $n$  тарілок, та конденсатора (рисунок 3.1).

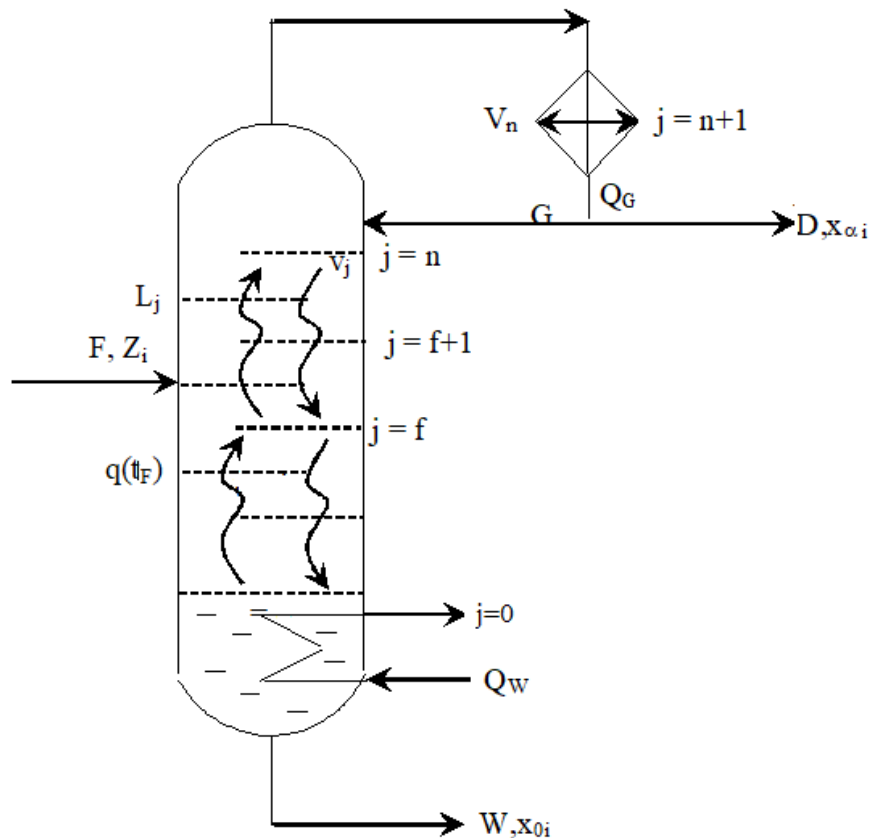


Рисунок 3.1 - Схема тарілчастої ректифікаційної колони

Основу математичного опису процесу ректифікації складають рівняння матеріального та теплового балансів, фазове рівняння та рівняння кінетики масопередачі [21, 22].

Рівняння матеріального балансу ґрунтуються на законі збереження маси, який встановлює, що маса речовини в системі змінюється лише за рахунок її надходження або витрат:  $-Ldx = Vdy$ .

Рівняння теплового балансу відображають взаємозв'язок між змінами внутрішньої енергії системи та кількістю підведеного або відведеного тепла, що визначає енергетичний стан процесу:  $\Delta H = Q$

Рівновага між компонентами в парі і рідині має вид:  $y_i^* = k_i x_i$ , причому  $k_i = k_i(t, P, x_1, \dots, x_C, y_1, \dots, y_C)$ .

Для ідеальних рівноважних систем приймаємо залежність виду:  $k_i = k_i(t, P)$ .

Кінетика процесу масопередачі зазвичай описується через коефіцієнти масопередачі або висоту одиниці переносу. Рушійною силою масообміну є різниця між фактичною та рівноважною концентрацією компонентів у фазах, що беруть участь у процесі.

Якщо рухаючи силу виражати через концентрацію компоненту в газовій фазі, основне рівняння масопередачі набуває вигляду:  $M = K_{0y} S_{ef} \Delta y_{cp}$ , де  $M$  – кількість речовини, що розподіляється між фазами.

Коефіцієнт масопередачі  $K_{0y}$  характеризує швидкість процесу масообміну і залежить від властивостей компонентів, що розподіляються, а також від параметрів режиму роботи. Об'ємний коефіцієнт масопередачі може бути виражений через часткові коефіцієнти масовіддачі, які враховують

внесок окремих фаз у загальний процес переносу речовини:  $\frac{1}{K_{0y}} = \frac{1}{k_y} + \frac{m}{k_x}$ ,

причому  $K_{0x} = m K_{0y}$ .

Ефективність процесу масопередачі в ректифікаційній колоні визначається динамікою руху потоків на тарілках. Концентраційні поля на ступені розділення можуть бути описані за допомогою різних гідродинамічних моделей: моделі повного витіснення, моделі повного перемішування або проміжного типу.

Для математичного моделювання звичайної ректифікаційної колони з одним вводом живлення і без проміжних відборів продукту зазвичай роблять такі припущення: флегма подається при температурі кипіння; тиск у колоні

постійний по всій висоті; рідина на тарілці повністю перемішана, а пар повністю витісняється через шар рідини; живлення надходить у вигляді рівноважної паро-рідинної суміші киплячої рідини або насиченої пари; винесення рідини з тарілок відсутнє; теплота змішування парової та рідинної фаз не враховується; обидві фази розглядаються як ідеальні; рідина перебуває при температурі кипіння, пара - при температурі насичення; склад флегми відповідає складу дистилляту.

Інформаційні змінні, що використовуються для математичного опису ректифікаційної колони, можна класифікувати наступним чином:

а) змінні режиму роботи - до цієї групи належать параметри, що визначають умови роботи колони. Сюди входять: кількість живлення  $L$ ; склад живильної суміші  $Z$ ; доля пару у живленні або температура живлення  $t_A$ ; теплове навантаження на дефлегматор  $Q_{ата}$  на кип'ятильник  $Q_{и}$ ; тиск у колоні  $P$ . Це незалежні вхідні змінні. До залежних вихідних змінних відносяться концентрації компонентів у паровій та рідинній фазах на тарілках  $y_{i,j}, x_{i,j}$  та температура на тарілках  $t_j$ ;

б) константи фізичних властивостей речовин - ця група включає параметри, що характеризують самі речовини: відносну летючість компонентів або константи фазової рівноваги  $\alpha_i, k_i$ ; густини компонентів у паровій та рідинній фазах  $\gamma_{yi}, \gamma_{xi}$ ; коефіцієнти дифузії в паровій та рідинній фазах  $D_{yi}, D_{xi}$ ; ентальпії компонентів у парі та рідині  $h_i, H_i$  тощо;

в) параметри обладнання - до цієї групи належать конструктивні характеристики колони: число тарілок  $N$ ; номер тарілки живлення  $N_f$ ; площа перерізу колони  $S_c$ ; ефективна площа тарілки  $S_{ef}$ ; висота переливу  $h_{пл}$  та інші;

г) кінетичні параметри процесу - ця група включає відношення та коефіцієнти, які характеризують швидкість масопередачі, зокрема коефіцієнти масопередачі  $k_{xл}$  та  $k_{yл}$ .

Якщо перевіряємо задачу, то в якості незалежних змінних зазвичай вибирають такі параметри:

1. Кількість живлення (об'єм або маса суміші, що подається до колони).
2. Склад живильної суміші  $z_i$  (концентрація компонентів у поданій суміші).
3. Доля пари у живленні або температура живлення  $t_F$  (характеристика стану живильної суміші).
4. Теплове навантаження на дефлегматор  $Q_d$  (кількість тепла, що відводиться конденсатором).
5. Теплове навантаження на кип'ятильник  $Q_w$  (кількість тепла, що підводиться до кубу- випарювача).
6. Тиск у колоні (робочий тиск, який визначає умови кипіння та конденсації).
7. Конструктивні параметри колони можуть включати: число тарілок, ефективні площі тарілок  $S_{ef}$ , висоту переливу  $h$  тощо, при умові, що вони не фіксовані.

Таким чином,  $N=c+7$ , де  $c$  – число компонентів у живленні, і саме ці параметри будуть незалежними величинами для розрахунку залежних вихідних змінних, таких як концентрації компонентів на тарілках  $x_{i,j}, y_{i,j}$  та температури  $t_j$ .

$$z_i (i = 1, \dots, c), F, t_F, G, D, P, n, f \quad \text{або} \quad z_i (i = 1, \dots, c), t_F, F, Q_d, Q_w, P, n, f .$$

### 3.2 Аналіз статистичних і динамічних характеристик об'єкта керування

Динамічні характеристики ректифікаційних установок значною мірою залежать від їх продуктивності, конструкції, складу розділюючої суміші та принципів роботи окремих апаратів [26-28]. Будь-яка ректифікаційна колона

має чотири основні джерела інерційності, що визначають поведінку перехідних процесів: інерції зміни концентрації, об'єму рідини та швидкості потоку пари.

Визначальним фактором динамічного режиму колони є динамічна характеристика найпростішого її елемента – тарілки, яка має ті ж основні інерційності, що й колона в цілому. Інерція потоків рідини зводиться до динаміки зміни потоку на окремій тарілці. Якщо знехтувати впливом зміни швидкості потоку пари, то швидкість зміни потоку рідини на тарілці визначається наступним чином:

$$F \frac{dh_{ж.сп}}{d\tau} = \Delta L_{вх} - \left( \frac{dL_{вих}}{dh_{ж.сп}} \right) h_{ж.сп} ,$$

де  $F$  – площа поперечного перерізу тарілки,  $h_{ж.сп}$  – середній рівень рідини на тарілці,  $L_{вх}$  та  $L_{вих}$  - приток та стік рідини.

Постійну часу  $\tau$  в секундах перехідного процесу можна знайти зі співвідношення:

$$\tau_i = \frac{dH}{dL} ,$$

де  $dH$  – приріст об'єму рідини на тарілці,  $dL$  – приріст швидкості потоку.

Постійна часу залежить від властивостей рідини та геометрії тарілки, тобто вона пропорційна діаметру колони та визначається наступним чином:

$$\tau_L \approx \frac{2}{3} \cdot \frac{dH}{dL}$$

Для всіх наступних тарілок (якщо їх число  $n$ ) використовується модель чистого транспортного запізнення, тобто вважається, що зміна потоку або концентрації на тарілці досягає наступної тарілки з певним часовим запізненням без додаткових динамічних ефектів.

Таким чином, передаточна функція по каналу “зміна витрати рідини – зміна рівня рідини на тарілці” в загальному вигляді має вигляд:

$$W_L(s) = \frac{k \cdot e^{-0.05(n-1)\tau_L}}{\tau_L + 1}$$

Інерція потоку парів характеризується затримкою зміни тиску пари на певній тарілці колони. Цей динамічний канал має розподілені параметри і наближено описується рівнянням:

$$F_{II} \left( \frac{dp_1}{d\tau} \right) + H_{жс} \left( \frac{d\Theta}{dp} \right) \cdot \left( \frac{C_{жс}}{\lambda_{жс}} \right) \cdot \left( \frac{dp_2}{d\tau} \right) \approx \frac{p_1 - p_2}{R_1} + \frac{p_2 - p_3}{R_2}$$

В загальному вигляді попереднє рівняння може бути записане у наступному вигляді:

$$P_2 = f(H, C, \lambda, R, \Delta p_{1..3}, \tau)$$

Але його розв'язок стає складним через складність визначення ряду коефіцієнтів та змінних.

Отже, передаточна функція каналу “витрата парів – тиск над тарілкою” має вид:

$$W_{II}(s) = \frac{K}{\tau_{II}s + 1}$$

Інерція зміни концентрації визначається характеристиками лінії фазової рівноваги, величиною джерела та часом перебування рідини на тарілці. Зі збільшенням нахилу лінії рівноваги та інтенсивності зрошення зменшується постійна часу перехідного процесу зміни концентрації як у рідині, так і в парі. Вплив тривалості перебування рідини на тарілці та зрошення на зміну концентрації низьколетючого компонента в рідині описується передаточною функцією наступного вигляду:

$$W_{\tau}(s) = \frac{x_2}{x_1} \approx \frac{K}{(\tau_a s + 1)(\tau_b s + 1)}$$

Контур регулювання температури кубового залишку ректифікаційної колони здійснює підтримку заданої температури в кубовій частині колони шляхом зміни витрати гріючої пари, що подається у випарник. Регулювання виконується за допомогою виконавчого механізму. Структурну схему цього контуру можна представити у такому вигляді (рисунок 3.2).

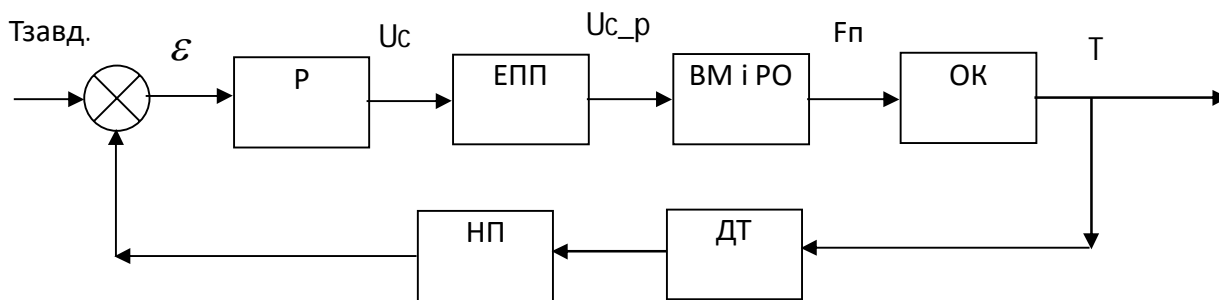


Рисунок 3.2 - СС регулювання температури у кубовій частині РК

У представленій структурній схемі контуру регулювання температури кубового залишку ректифікаційної позначення мають наступний зміст:

- Р – регулятор;
- ЕПП – електропневматичний перетворювач;
- ВМ і РО – виконавчий механізм і регулюючий орган;
- ОК – об’єкт керування (ректифікаційна колона);
- ДТ – давач температури;
- НП – нормуючий перетворювач;
- Тзавд. – сигнал завдання;
- Т – фактична температура кубового залишку;
- розузгодження між сигналом завдання та фактичним значенням;
- $U_c$  – електричний сигнал керування;
- $U_{c_p}$  – пневматичний сигнал керування;
- $F_p$  – витрата пари.

Ця схема забезпечує автоматичне підтримання заданої температури кубового залишку через зміну подачі пари у випарник.

Розрахуємо передаточні функції кожного із елементів схеми [21, 22, 26-28] (рисунок 3.2).

#### 1. Давач температури та нормуючий перетворювач.

У якості давача  $t$  кубового залишку у ректифікаційній колоні використовується термопара - ТХК-0515 із діапазоном вимірювання (-50...+600 °С). У якості нормуючого перетворювача, буде використовуватись

перетворювач НП – ТЛ1-м із вихідним сигналом 0-5 мА. Тоді, передаточна функція давача температури із нормуючим перетворювачем буде мати вигляд:

$$W_1(p) = K_1 = \frac{(5-0)мА}{(600 - (-50))°C} = \frac{5}{650} \approx 0,0079 \left( \frac{мА}{°C} \right)$$

## 2. Регулятор

Передаточна функція для ПІД регулятора буде мати вигляд:

$$W_2(p) = k_p + k_i \cdot \frac{1}{p} + k_d p$$

## 3. Електропневматичний перетворювач (ЕПП).

ЕПП використовується для перетворення електричного сигналу 0-5 мА на пневматичний 0,02-0,1 МПа. Його передаточна функція має вигляд:

$$W_3(p) = K_3 = \frac{(0.1 - 0.02)МПа}{5мА} = \frac{0,08}{5} = 0,016 \left( \frac{МПа}{мА} \right)$$

## 4. Виконавчий механізм (ВМ) і регулюючий орган (РО).

Передаточна функція виконавчого механізму (ВМ) з регулюючим органом (РО) буде описувати залежність витрати пари  $Fp(s)$  від керуючого сигналу  $Uc(s)$ .

Дані по обладнанню: регулюючий орган – односідловий клапан 25ч42нж (НЗ); виконавчий механізм – мембранний пневматичний МИМ, тип «ВО»; вхідний сигнал: 0,02–0,1 МПа, лінійна характеристика; пропускна здатність: 0,4 м<sup>3</sup>/год; час повного ходу: 10 с.

Передаточну функцію ВМ і РО представимо у вигляді:

$$W_4(p) = \frac{K_4}{T_4 p + 1}$$

$$K_4 = \frac{0,4 м^3}{(0,1 - 0,02)МПа \cdot 3600с} = \frac{0,4}{0,08 \cdot 3600} \left( \frac{м^3}{МПа \cdot с} \right) \approx 0,00139 \left( \frac{м^3}{МПа \cdot с} \right),$$

$$T_4 = 10с ;$$

$$W_4(p) = \frac{K_4}{T_4 p + 1} = \frac{0,00139}{10p + 1}.$$

## 5. Ректифікаційна колона.

Розглянемо експериментальну характеристику ректифікаційної колони

(рисунок 3.3). При зміні витрати грючої пари на  $\Delta F = 0.1 \frac{m^3}{год}$  її температура кубового залишку в колоні змінилася на  $13.33^\circ C$ . Передаточна функція ректифікаційної колони матиме вигляд:

$$W_5(p) = \frac{K_5}{T_5 p + 1} \cdot e^{-\tau p};$$

$$K_5 = \frac{\Delta T}{\Delta F} = \frac{13.33 \cdot 3600}{0.1} = 479880 \left( \frac{^\circ C \cdot c}{m^3} \right);$$

$$T_5 = 600c; \tau_5 = 180c;$$

$$W_5 = \frac{K_5}{T_5 p + 1} \cdot e^{-\tau p} = \frac{479880}{600p + 1} \cdot e^{-180p}.$$

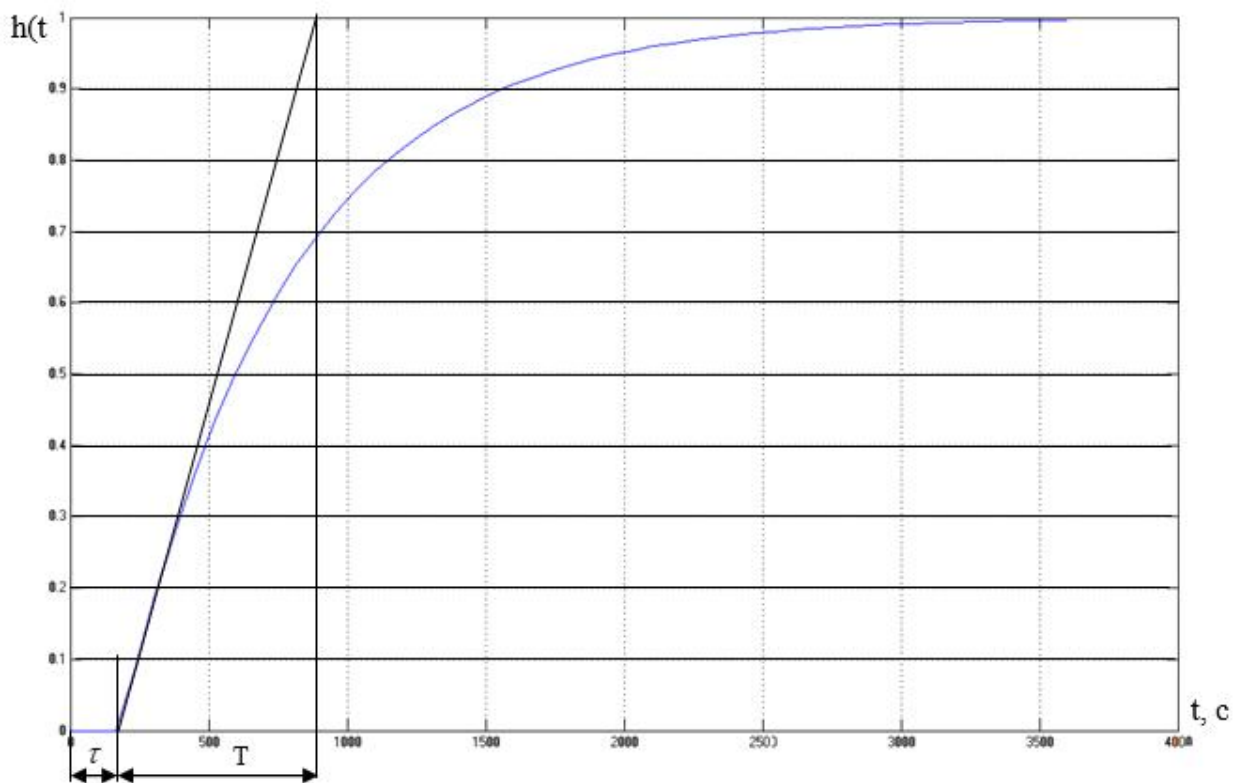


Рисунок 3.3 - Характеристика експериментальної розгінної ректифікаційної колони.

Виконаємо моделювання САР температури кубового залишку у колоні за допомогою програми Matlab. Для цього у редакторі Simulink зберемо схему (рисунок 3.4).

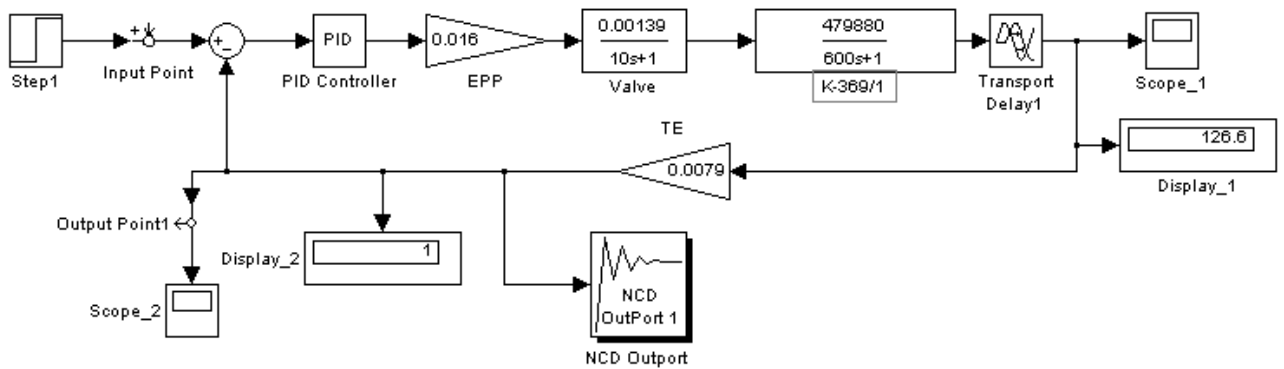


Рисунок 3.4 - САР температури кубового залишку ректифікаційної КОЛОНИ.

У якості сигналу, який ми задамо, буде використовуватись блок Step, який формуватиме стрибкоподібну зміну. Налаштування ПІД-регулятора спочатку підбирається вручну та вводяться у командний рядок MATLAB, після чого за допомогою блока NCD виконують оптимізацію значень коефіцієнтів ПІД-регулятора (рисунок 3.5).

```
>> kp=10
kp =
    10
>> ki=0.01
ki =
    0.0100
>> kd=0
kd =
    0
```

Рисунок 3.5.1 - Початкові значення коефіцієнтів ПІД регулятора.

```
>> kp
kp =
    14.3116
>> ki
ki =
    0.0297
>> kd
kd =
   -0.0364
```

Рисунок 3.5.2 - Оптимізовані значення коефіцієнтів ПІД регулятора.

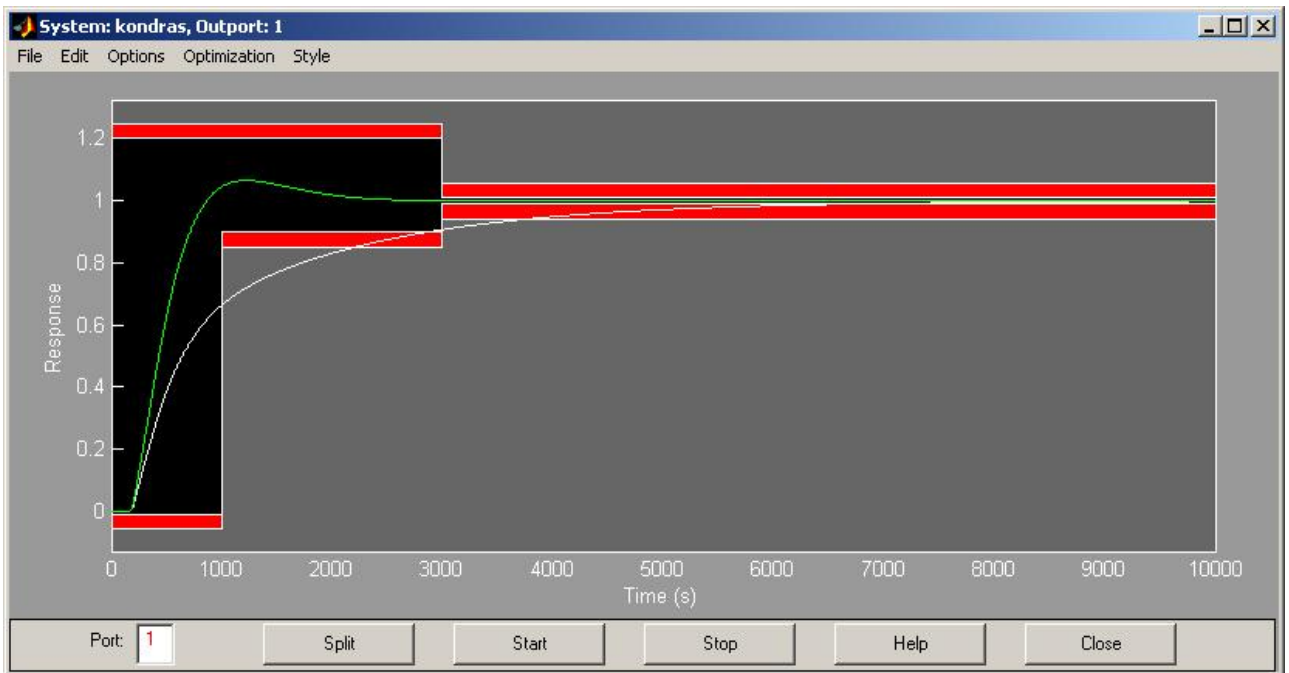


Рисунок 3.6 - Процес оптимізації коефіцієнтів ПІД регулятора за допомогою NCD блоку.

Введемо отримані значення коефіцієнтів у блок PID і проведемо моделювання системи керування (рисунок 3.7).

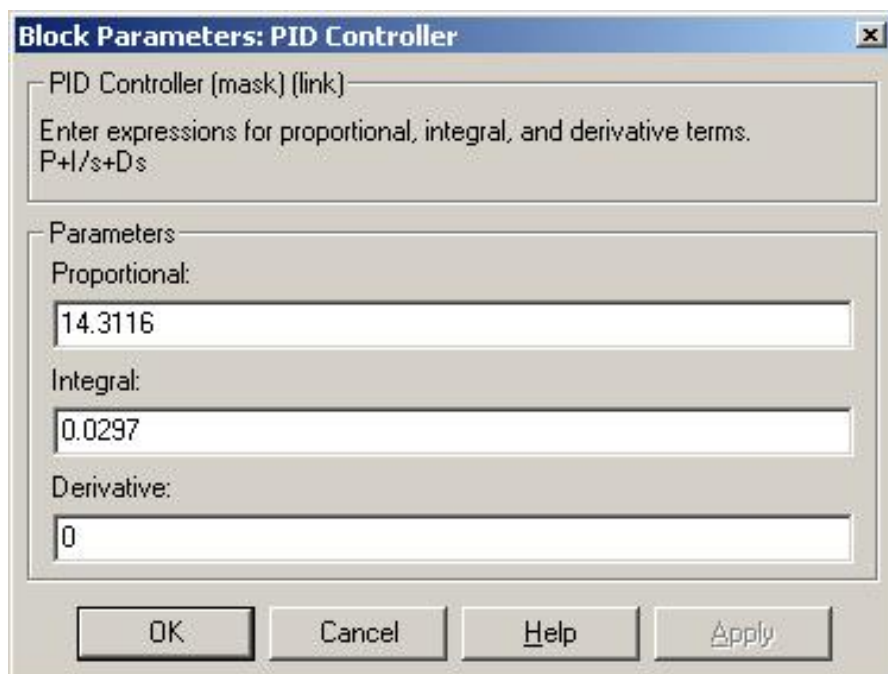
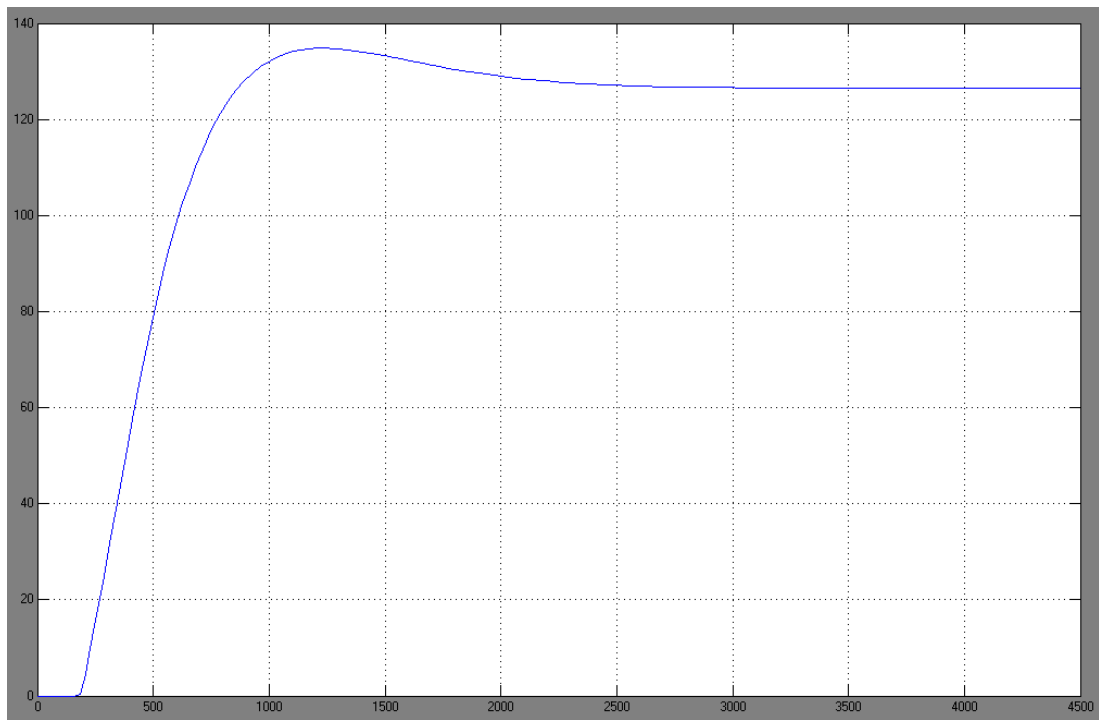
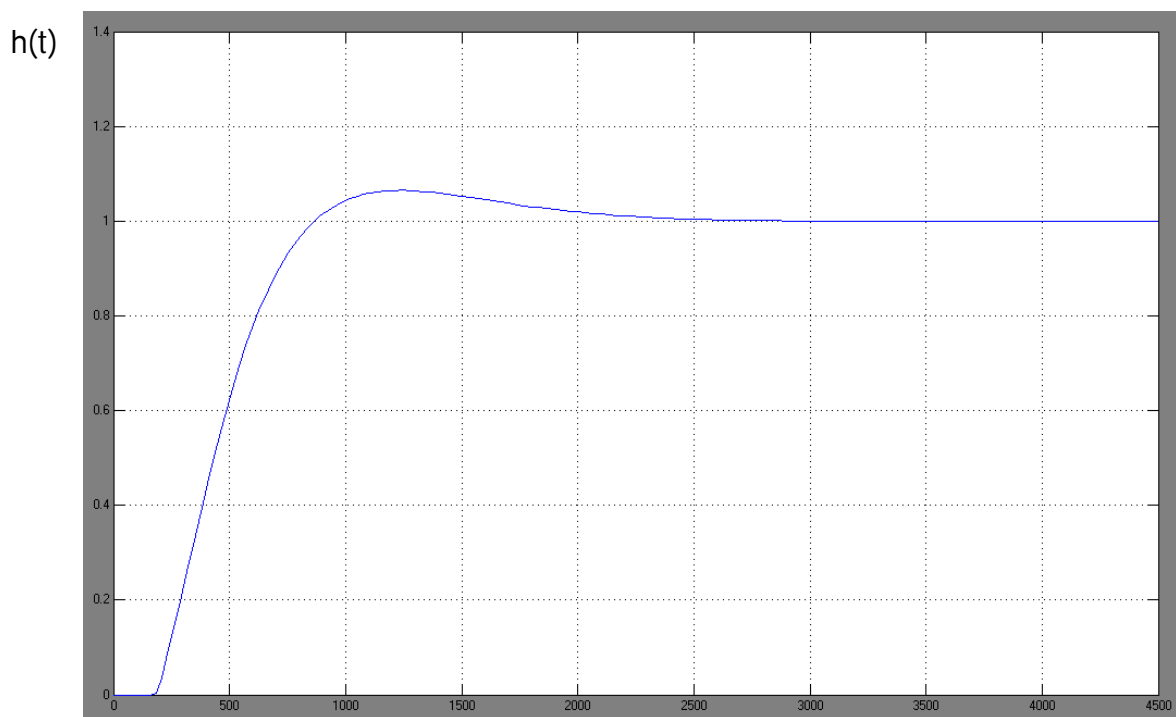


Рисунок 3.7 - Вікно налаштування блоку PID.



t,c

Рисунок 3.8 - Перехідна характеристика САР температури (у  $^{\circ}\text{C}$ ).



t,c

Рисунок 3.9 - Перехідна характеристика САР температури (у відносних одиницях)

Система керування виходить на усталене значення, отже, система стійка.  
 Параметри якості перехідного процесу такі: час регулювання  $t=2500$  с,

запізнення  $\tau = 180\text{с}$ , перерегулювання  $\sigma = \frac{1.06-1}{1} \cdot 100 = 6\%$ , коливання  $n=1$ , усталена похибка  $\delta_{уст.} = 0\%$ . Стійкість САР підтверджують також діаграми Найквіста та Боде (рисунок 3.10, 3.11).

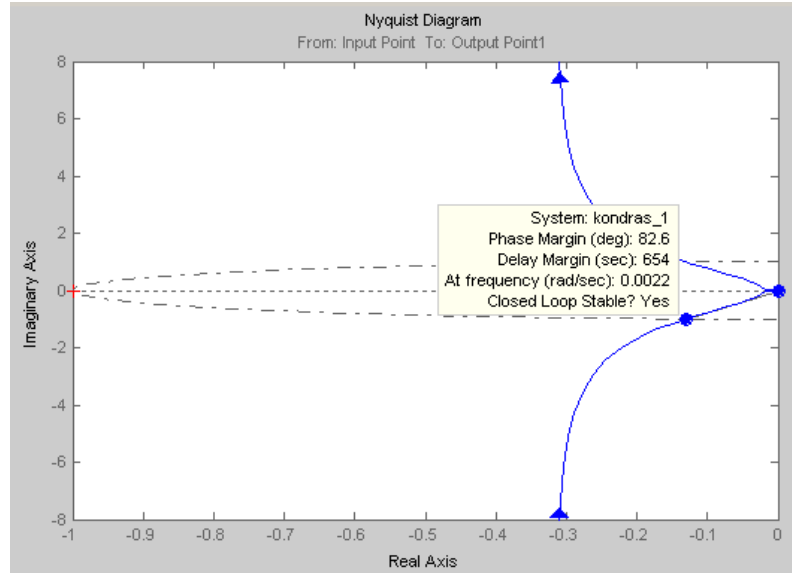


Рисунок 3.10 - Діаграма Найквіста.

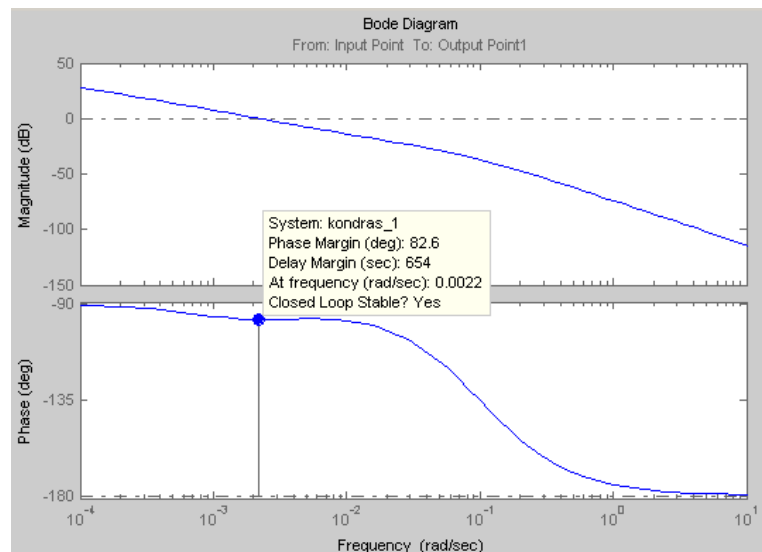


Рисунок 3.11 - Діаграма Боде.

З діаграм (рисунок 3.10, 3.11) визначаємо запаси стійкості САР.

Запас стійкості по фазі -  $\varphi_{зан.} = 82.6^0$  (мінімальна межа -  $60^0$ ), запас стійкості по амплітуді -  $A_{зан.} = 1$ .

## ВИСНОВОК

Під час дослідження процесу розділення продуктів окислення при виробництві адипінової кислоти, а саме очистки циклогексанону-сирцю від спиртової фракції було детально вивчено технологічну схему та послідовність руху реагентів через апарати, визначено основний об'єкт дослідження – ректифікаційну колонку.

Для всіх апаратів процесу визначено параметри, які підлягають регулюванню, моніторингу та відображенню на екрані, а також їхні номінальні та критичні значення. Було підібрано відповідні датчики та первинні перетворювачі для вимірювання цих параметрів із подальшою обробкою сигналів за допомогою вимірювача-регулятора ТРЦ 02 Універсал +. Для засобів автоматизації наведено їх основні характеристики та принцип роботи.

Окремо розглянуто процеси, необхідні для побудови математичної моделі, та сформульовано модель процесів ректифікаційної колони як ключового апарату технологічного циклу. Проаналізовано контур регулювання температури кубу колони, визначено його передаточну функцію та розраховано динамічні характеристики (АЧХ, ФЧХ, годограф).

Розроблено систему автоматизованого керування процесом, обґрунтовано вибір регулятора, а також наведено опис роботи вимірювачів-регуляторів ТРЦ 02 Універсал +.

Таким чином, у магістерській роботі виконано всі поставлені завдання щодо автоматизації процесу розділення продуктів окислення при виробництві адипінової кислоти.

В цілому робота містить як наукову, так і прикладну цінність, оскільки вирішує актуальну для хімічної промисловості проблему модернізації систем автоматизації з переходом на більш гнучкі, точні та цифрові засоби керування. Отримані результати можуть бути використані безпосередньо на

підприємстві або слугувати основою для подальших досліджень у сфері автоматизації складних хіміко-технологічних процесів.

## ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Автоматизація технологічних процесів і виробництв / За ред. В. М. Капітонової. – Київ : Либідь, 2019. – 512 с.
2. Бесека О. В. Системи автоматичного керування: підручник. – Львів : Новий Світ–2000, 2018. – 468 с.
3. Бойко В. С. Засоби вимірювальної техніки та автоматики / Бойко В.С., Левченко Г.І. – Харків : ХНУРЕ, 2020. – 372 с.
4. Вайтман В. Л. Процеси та апарати хімічної технології. – Одеса : Астропринт, 2016. – 640 с.
5. Гнатюк С. М. Автоматизація хімічних виробництв: навч. посіб. – Вінниця : ВНТУ, 2017. – 284 с.
6. Габринєць О.М. Процеси та апарати хімічних виробництв / О.М. Габринєць, М.В. Калюжний – Львів : Вид-во Львівської політехніки, 2019. – 584 с.
7. Жидецький В. Ц. Хімічна технологія органічних речовин. – Львів : Видавництво ЛНУ, 2018. – 528 с.
8. Гребенюк С. М. Системи автоматичного регулювання / С.М. Гребенюк, М.О. Євтушенко – Київ : КНУТД, 2021. – 312 с.
9. ДСТУ 3411-96. Метрологія. Терміни та визначення. – Київ : Держстандарт України, 1997. – 45 с.
10. ДСТУ 3135.0–95. Система забезпечення якості. – Київ : Держстандарт, 1995. – 62 с.
11. Занєвський В. А. Програмовані логічні контролери в автоматизації виробництва. – Київ : Кондор, 2020. – 364 с.
12. Кобилінська А. Б. Процеси масообміну та ректифікації. – Київ : Видавництво КПІ ім. І. Сікорського, 2019. – 307 с.
13. Кожухов В.І. Промислові прилади і засоби автоматизації / В.І. Кожухов, П.І. Мороз – Харків : ХНАМГ, 2015. – 395 с.

14. Мельник С. Г. Автоматизація виробничих процесів: навч. посіб. – Львів : Сполом, 2022. – 358 с.
15. Савін В.А. Системи керування хіміко-технологічними процесами / В.А. Савін, В.П. Романов – Київ: Видавництво КПІ ім. І.Сікорського, 2020. – 452 с.
16. Промприлад. Вимірювач-регулятор ТРЦ 02 Універсал+. Технічний опис та інструкція з експлуатації. – Івано-Франківськ : ТОВ «Промприлад», 2021. – 56 с.
17. Рум'янцев В. В. Тепломасообмін у хімічній технології. – Київ : НТУУ «КПІ», 2017. – 364 с.
18. Системи автоматичного регулювання хімічних процесів / За ред. М.С. Рибачука. – Дніпро : ДНУ, 2019. – 412 с.
19. Тарасенко Ю. М. Ректифікаційні колони та їх автоматизація. – Харків : ХТУ, 2022. – 288 с.
20. Хімічне обладнання та апаратура: навч. посіб. / За ред. В.О. Томашевського. – Львів : Вид-во ЛП, 2020. – 465 с.
21. Корсунський М. П. Теорія автоматичного керування. – Київ : Вища школа, 2016. – 410 с.
22. Куліш А. П. Математичне моделювання технологічних процесів. – Одеса : ОНАХТ, 2021. – 292 с.
23. Нестеренко В. І. Основи метрології та вимірювальної техніки. – Київ : НАУ, 2019. – 240 с.
24. Офіційний сайт ПАТ «РівнеАзот». – Електронний ресурс. Режим доступу: <https://rivneazot.com> (дата звернення: 12.01.2025).
25. Попов С. Б. Промислові контролери та системи керування. – Київ : Кондор, 2020. – 318 с.
26. Бойко М.Д. Теорія автоматичного керування / М.Д. Бойко, Л.Г. Квасній – Львів : Вид-во Львівської політехніки, 2020. – 396 с.
27. Дегтярьов В.М. Системи автоматичного регулювання / В.М. Дегтярьов, М.Д. Бойко – Київ : НАУ-друк, 2018. – 312 с.

28. Сидоренко В. К. Теорія автоматичного керування: сучасні методи та застосування. – Харків : ХНУРЕ, 2019. – 340 с.