

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

ЛЕГЕТА Віталій Миколайович

**АВТОМАТИЗАЦІЯ УСТАНОВКИ РЕКТИФІКАЦІЇ ПРИ
ВИРОБНИЦТВІ СТИРОЛУ / AUTOMATION OF A
RECTIFICATION UNIT IN STYRENE PRODUCTION**

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

Випускна кваліфікаційна робота

Виконав студент групи АКІТ-41
В.М.Легета

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

Випускну кваліфікаційну роботу
допущено до захисту:
"___" _____ 20__ р.

Завідувач кафедри
_____ А.І.Сегін

Тернопіль 2025

Факультет комп'ютерних інформаційних технологій
Кафедра спеціалізованих комп'ютерних систем
Ступінь вищої освіти "бакалавр"
Спеціальність: 151 - Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
Освітньо-професійна програма – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

“ЗАТВЕРДЖУЮ”

Завідувач кафедри СКС

_____ А.І.Сегін
“ ____ ” _____ 2024 р.

З А В Д А Н Н Я
НА ВИПУСКНУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ
ЛЕГЕТА Віталій Миколайович

(прізвище, ім'я по-батькові)

1. Тема випускної кваліфікаційної роботи

_____ Автоматизація установки ректифікації при виробництві стиролу /
Automation of a rectification unit in styrene production
_____ керівник роботи _____ д.т.н., проф. Возна Н.Я.

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

2. Строк подання студентом закінченої кваліфікаційної роботи:

06 травня 2025р.

3. Вихідні дані до випускної кваліфікаційної роботи:

1. Вакуумна ректифікаційна колона насадкового типу для виділення стиролу з вуглеводневого конденсату
2. Температура на контрольній тарілці (діапазон: 90–120 °C)
3. Тиск у колоні: 0,25–0,35 атм

4. Основні питання, які потрібно розробити:

1. Аналіз технології виготовлення стиролу
2. Обґрунтування вибору технічних засобів та мікропроцесорної техніки
3. Розрахунок системи автоматизації установки ректифікації при виробництві стиролу

5. Перелік графічного матеріалу у роботі:

1. Технологічна схема виробництва стиролу
2. Структура технологічного процесу ректифікації
3. Структура розподіленої системи керування

4. Структурна схема системи автоматизації установки ректифікації при виробництві стиролу

6. Консультанти розділів випускної кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
1	Возна Н.Я.		
2	Возна Н.Я.		
3	Возна Н.Я.		

7. Дата видачі завдання 28 листопада 2024 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назви етапів випускної кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз технології виготовлення стиролу	12.2024р. – 01.2025р.	
2	Обґрунтування вибору технічних засобів та мікропроцесорної техніки	02.2025р. – 03.2025р.	
3	Розрахунок системи автоматизації установки ректифікації при виробництві стиролу	04.2025р. – 05.2025р.	

Студент

(підпис)

Легета В.М.

Керівник роботи

(підпис) д.т.н, проф. Возна Н.Я.

АНОТАЦІЯ

Легета В.М. Автоматизація установки ректифікації при виробництві стиролу. – Рукопис.

Дослідження на здобуття освітнього ступеня «бакалавр» за спеціальністю 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології», освітньо-професійна програма. – Західноукраїнський національний університет, Тернопіль, 2025.

У кваліфікаційній роботі розглянуто питання важливого етапу в хімічній промисловості - автоматизації ректифікаційного процесу при виробництві стиролу. Проаналізовано технологічну схему установки, обґрунтовано вибір контрольованих параметрів, збурень та виконавчих механізмів. Проведено ідентифікацію об'єкта за експериментальними даними та побудовано математичні моделі. Розроблено каскадну систему автоматичного регулювання з використанням ПІ- та ПІД-регуляторів. Розрахунок параметрів регуляторів здійснено методом розширених частотних характеристик. Результати імітаційного моделювання підтвердили ефективність запропонованої системи керування щодо стабілізації технологічних параметрів, зменшення впливу збурень та покращення якості продукції.

ABSTRACT

Legeta V.M. Automation of a rectification unit in styrene production. - Manuscript.

Research on obtaining a bachelor's degree in the specialty 151 "Automation and computer-integrated technologies", educational and professional program. – West Ukrainian National University, Ternopil, 2025.

This thesis addresses the automation of the rectification process in styrene production - a crucial stage in the chemical industry. The technological scheme of the unit is analyzed, and the selection of control parameters, disturbances, and actuating mechanisms is justified. The process object is identified based on experimental data, and mathematical models are developed. A cascade automatic control system is designed using PI and PID controllers. The controller parameters are calculated using the Extended Frequency Response (EFR) method. The results of simulation modeling confirm the effectiveness of the proposed control system in stabilizing technological parameters, reducing the impact of disturbances, and improving product quality.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	6
ВСТУП.....	7
1. АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ СТИРОЛУ.....	9
1.1 Аналіз характеристик виробництва стиролу.....	9
1.2 Загальна характеристика установки для виробництва стиролу...	11
1.3 Опис технологічного процесу ректифікації при виробництві стиролу.....	13
1.4 Аналіз технологічного процесу, як об'єкту автоматизації.....	15
2. ОБГРУНТУВАННЯ ВИБОРУ ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ ТА МІКРОПРОЦЕСОРНОЇ ТЕХНІКИ	19
2.1 Обґрунтування вибору технічних засобів контролю параметрів технологічного процесу.....	19
2.2 Опис мікропроцесорної техніки.....	23
2.3 Вибір модулів введення-виведення.....	28
2.4 Розроблення структури системи керування.....	31
3. РОЗРАХУНОК СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ УСТАНОВКИ РЕКТИФІКАЦІЇ ПРИ ВИРОБНИЦТВІ СТИРОЛУ.....	35
3.1 Обґрунтування вибору об'єкту регулювання.....	35
3.2 Математичний опис об'єкту автоматизації.....	41
3.3 Результати розрахунку системи автоматизації.....	45
ВИСНОВОК.....	50
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	52
ДОДАТКИ.....	55

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

DCS - distributed control system;
ENG - engineering workstations - інженерні станції;
ESB - ethernet-based system bus;
FCS - field control station;
HIS - human interface stations - робочі станції оператора;
АСУ ТП - автоматизована система управління технологічного процесу;
БТФ - бензол-толуольна фракція;
ВК - вуглеводневий конденсат;
КЗРС - кубовий залишок ректифікації стиролу;
КОРС - кубовий залишок ректифікації стиролу;
PCY - розподіленою системою управління;
РЧХ - методу розширених частотних характеристик;
ПЕУ - пароструминна ежекторна установка;
САР - система автоматичного регулювання;
СК - система керування.

ВСТУП

У сучасних умовах розвитку хімічної промисловості автоматизація технологічних процесів набуває особливої актуальності. Одним із таких процесів є ректифікація, що використовується для поділу рідинних сумішей з метою отримання чистих компонентів. Особливо це важливо при виробництві стиролу - речовини, що є стратегічно важливою сировиною для виробництва полімерів, пластмас та синтетичних каучуків. Забезпечення високої якості продукції, стабільності процесу та енергоефективності установки можливе лише за умов впровадження ефективної системи автоматичного керування.

Актуальність теми зумовлена необхідністю підвищення ефективності та надійності роботи ректифікаційних колон шляхом застосування сучасних методів автоматичного регулювання. Коливання температури, тиску, витрати сировини та енергоресурсів призводять до нестабільної роботи установки, що, у свою чергу, негативно впливає на якість кінцевого продукту та економічні показники виробництва. Впровадження автоматизованих систем регулювання дозволяє не лише мінімізувати вплив збурень, але й оптимізувати технологічний режим роботи обладнання, забезпечуючи економію енергії та зниження втрат сировини.

Об'єктом дослідження є установка ректифікації, що використовується у технологічному процесі виробництва стиролу.

Предмет дослідження - процес автоматичного регулювання параметрів ректифікаційної колони з метою покращення динамічних характеристик системи та підвищення якості продукції.

Метою випускної роботи є розробка та дослідження системи автоматичного керування для установки ректифікації стиролу, що забезпечує стабільність параметрів технологічного процесу та підвищення якості регулювання за рахунок застосування каскадної системи керування з ПІ та ПІД-регуляторами.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- провести аналіз технологічного процесу ректифікації стиrolу;
- обґрунтувати вибір основних координат та збурень, що впливають на якість процесу;
- побудувати математичну модель об'єкта керування на основі кривих розгону;
- розробити каскадну систему автоматичного регулювання з використанням ПІ та ПІД-регуляторів;
- здійснити розрахунок параметрів регуляторів на основі методу розширених частотних характеристик (РЧХ);
- провести імітаційне моделювання та проаналізувати динаміку перехідних процесів при збуреннях;
- оцінити ефективність запропонованої системи автоматизації.

Практичне значення роботи полягає у можливості впровадження розробленої системи керування на реальних промислових об'єктах з метою стабілізації режиму роботи ректифікаційної колони, підвищення якості продукції та зниження витрат енергоресурсів. Отримані результати можуть бути використані при модернізації існуючих систем автоматизації, а також при підготовці фахівців у галузі автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій.

Апробація. Віталій Легета Автоматизація установки ректифікаційного відділення при виробництві стиrolу / В.Легета // Збірник матеріалів всеукраїнської науково-практичної конференції «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» (АКІТ - 2025), Тернопіль, 2025. -С. 51-54.

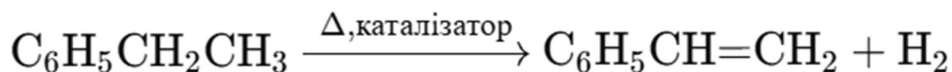
1. АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ СТИРОЛУ

1.1 Аналіз характеристик виробництва стиролу

Стирол ($C_6H_5CH=CH_2$) — це безбарвна летка рідина з характерним запахом, що є ароматичним ненасиченим вуглеводнем. Його також називають вінілбенzenом або фенілетиленом. Стирол характеризується подвійним зв'язком, що робить його активним у реакціях полімеризації. Він є основною сировиною для виробництва полістиролу, а також сополімерів (наприклад, АБС-пластиків, синтетичного каучуку), легко полімеризується при зберіганні, тому потребує стабілізаторів [1-5].

Бензол-толуольна фракція (БТФ) - це побічний продукт виробництва стиролу, який використовують як компонент для моторного бензину. Кубовий залишок ректифікації стиролу (КЗРС) - побічний продукт, що утворюється під час очищення стиролу, і застосовується як добавка до котельного палива.

Існує декілька способів виготовлення стиролу. Найбільш розповсюдженим є дегідрогенізація етилбензолу:



при температурі $\sim 600^\circ C$ та тиску - близькому до атмосферного. Каталізаторами виступають оксид заліза з добавками оксидів калію та магнію. Процес є ендотермічним, тому потребує значного теплопостачання.

До альтернативних методів виготовлення стиролу відносяться окисне дегідрування етилбензолу (з використанням кисню), декомпозиція етилбензену у плазмі або при дії електронного пучка (високоенергетичні методи) та каталітичне гідрування бензолу до циклогексану з подальшим крекінгом (висока енергозатратність).

Технологічний процес виробництва стиролу (дегідрогенізація етилбензолу) передбачає кілька етапів [1-4]:

1. Підготовка сировини.

2. Дегідрогенізація етилбензолу.
3. Охолодження та конденсація продуктів.
4. Сепарація (розділення компонентів).
5. Очищення стиrolу..
6. Рециркуляція незреагованого етилбензолу.

Узагальнена технологічна схема виробництва стиrolу показана на рисунку 1.1.

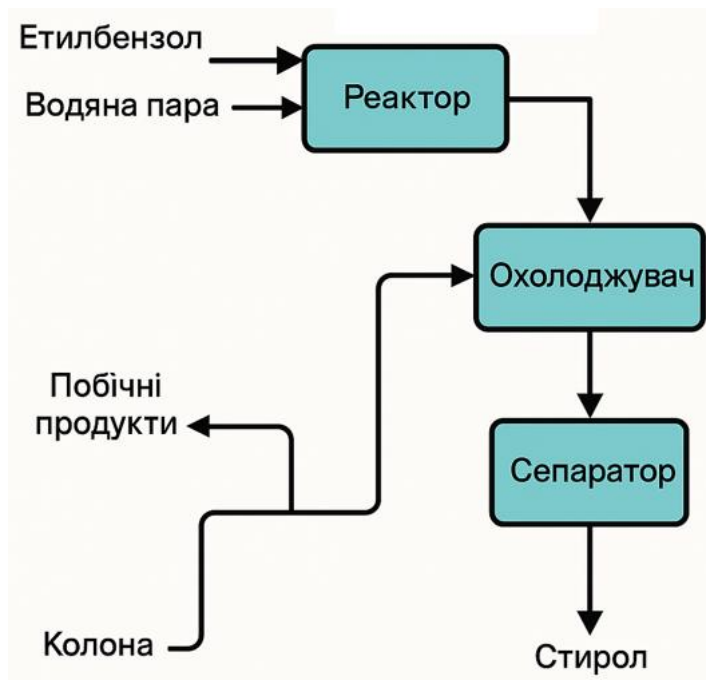


Рисунок 1.1 - Технологічна схема виробництва стиrolу

Підготовка сировини. Етилбензол очищується від домішок і подається в реактор у парорідинному стані. Далі змішується з перегрітою водяною парою, яка служить для зниження парціального тиску реагенту, як переносник тепла і для пригнічення побічної полімеризації стиrolу.

Дегідрогенізація етилбензолу відбувається в трубчастому реакторі при температурі 550–650 °С. Реакція: $\text{C}_6\text{H}_5\text{CH}_2\text{CH}_3 \rightarrow \text{C}_6\text{H}_5\text{CH}=\text{CH}_2 + \text{H}_2$. Каталізатором є оксид заліза (Fe_2O_3) з добавками (K_2O , MgO). Оскільки реакція ендотермічна, тому необхідне постійне теплопостачання.

Охолодження та конденсація. Газоподібна суміш з реактора (стирол, етилбензол, водяна пара, водень та побічні продукти) охолоджується. Частина компонентів конденсується. Це дозволяє розділити фази.

Сепарація. На установці фракційної перегонки відбувається відокремлення стиrolу від незреагованого етилбензолу. Побічні продукти (толуол, бензол, полімерні домішки) видаляються або йдуть на переробку.

Очищення стиrolу. Остаточне очищення відбувається шляхом дистиляції у вакуумі. Часто ще додають інгібітори полімеризації (наприклад, трет-бутилкатехол), щоб запобігти самополімеризації стиrolу під час зберігання.

Рециркуляція. Незреагований етилбензол повертається у цикл процесу (відбувається регенерація).

Побічні продукти. Водень (може використовуватись як енергоносіє або для гідрування). Толуол, бензол іноді вилучаються як цінна побічна продукція. Важкі смоли стають відходами або паливом.

1.2 Загальна характеристика установки для виробництва стиrolу

Установка для виробництва стиrolу методом дегідрогенізації етилбензолу є складним технологічним комплексом безперервної дії, який забезпечує високу ефективність та стабільність процесу [6, 7]. Продуктивність таких установок залежить від потреб виробництва і може досягати від 100 до 600 тисяч тонн стиrolу на рік.

Основною сировиною для цього процесу є етилбензол, який перед подачею до реактора змішується з водяною парою. Пара виконує кілька важливих функцій: знижує парціальний тиск етилбензолу, запобігає утворенню побічних продуктів і сприяє кращому теплопереносу. Процес дегідрогенізації відбувається в трубчастому реакторі, заповненому каталізатором на основі оксиду заліза з добавками оксидів калію та магнію. Температура в зоні реакції становить 550–650 °C, а тиск — близький до

атмосферного або трохи знижений. Через ендотермічний характер реакції в установці передбачено постійне подавання тепла.

Після виходу з реактора газоподібна суміш, яка містить стирол, незреагований етилбензол, водень, водяну пару та побічні продукти, підлягає охолодженню та конденсації. Далі в сепараторах і колонах ректифікації проводиться поділ суміші: стирол очищується, а незреагований етилбензол повертається у процес повторно. Для запобігання самополімеризації стиrolу під час зберігання до нього додаються стабілізатори.

Установки виробництва стиrolу обладнані сучасними системами автоматизації, які забезпечують контроль за температурою, тиском, витратою сировини та якістю готового продукту. Для цього використовуються датчики, контрольно-вимірювальні прилади, а також комп'ютеризовані SCADA-системи.

Окрема увага приділяється екологічній та техногенній безпеці. На установках передбачені системи уловлювання летких органічних сполук, очищення викидів, а також протипожежні й вибухозахисні заходи. Усе це забезпечує не лише ефективну роботу установки, а й дотримання сучасних екологічних стандартів.

Установка виробництва стиrolу призначена для переробки етилбензолу на стирол [6, 7]. Вона складається з відділення дегідрогенізації етилбензолу та відділення ректифікації вуглеводневого конденсату.

Призначення установки виробництва стиrolу:

- отримання основного продукту, який використовується для виробництва полімерів і пластмас;
- дегідрогенізація етилбензолу - здійснення основної хімічної реакції перетворення етилбензолу на стирол з виділенням водню;
- очищення стиrolу - видалення побічних продуктів та домішок для отримання товарного стиrolу високої чистоти;
- рециркуляція незреагованого етилбензолу - повернення етилбензолу у процес для повторного використання, що підвищує економічну ефективність;

- уловлювання та утилізація побічних продуктів, зокрема водню, бензолу, толуолу та кубових залишків, які можуть бути використані як паливо або сировина для інших виробництв;
- забезпечення безперервного технологічного процесу - стабільна робота з автоматичним контролем параметрів;
- зменшення негативного впливу на довкілля за рахунок очищення викидів, запобігання втратам летких органічних сполук та використання інгібіторів полімеризації.

Відділення ректифікації у виробництві стиролу призначене для розділення вуглеводневого конденсату (ВК) на окремі фракції. Розділення здійснюється поетапно у трьох ректифікаційних колонах. Процес проходить під вакуумом, що дозволяє знизити температуру кипіння компонентів, присутніх у вуглеводневому конденсаті. Це, у свою чергу, уповільнює процес полімеризації стиролу і сприяє збереженню його якості.

1.3 Опис технологічного процесу ректифікації при виробництві стиролу

Відділення ректифікації в процесі виробництва стиролу призначене для поділу ВК на окремі фракції. Цей поділ відбувається в три етапи — у трьох послідовно з'єднаних вакуумних ректифікаційних колонах. Використання вакууму дозволяє знизити температуру кипіння компонентів, що входять до складу ВК, а це, в свою чергу, уповільнює полімеризацію стиролу [6, 7].

Структура технологічного процесу ректифікації при виробництві стиролу представлена на рисунку 1.2 [8, 9].

З парку ємностей подається через фільтр (один робочий, другий резервний) до першої ректифікаційної колони. Попереднє підігрівання відбувається у теплообміннику за допомогою хімічно забрудненої води 09.

Щоб запобігти небажаній полімеризації стиролу в процесі ректифікації, до куба колони насосами через фільтр подається інгібітор.



Рисунок 1.2 - Структура технологічного процесу ректифікації

Колона є насадковою вакуумною колоною, оснащеною чотирма незалежними блоками насадки, виготовленими з перфорованої нержавіючої сталі. Подавання сировини здійснюється між третім і четвертим блоками насадки.

Вакуум створюється за допомогою двох пароструминних ежекторних установок (ПЕУ). Температура внизу колони підтримується за допомогою кип'ятильника, через який циркулює кубова рідина за допомогою насосів. Обігрів здійснюється паром з тиском $1,5 \text{ кгс/см}^2$, редукованим із $3,5 \text{ кгс/см}^2$.

Верхні пари БТФ конденсуються у теплообмінниках (охолоджуються низькотемпературною рідиною). Щоб уникнути замерзання БТФ, передбачене періодичне відтаювання цих конденсаторів. Отриманий конденсат подається

насосом: частково — назад у колонну систему як флегма, частково — у виробництво етилбензолу та на інші виробничі потреби. Водяний шар періодично drenується до підземної ємності.

Кубова рідина з однієї колони передається до другої. Вона також є насадковою вакуумною колоною з п'ятьма незалежними насадками. Вакуум утворюється установками. Тут з кубової рідини виділяється повернений етилбензол. Обігрів здійснюється двома кип'ятильниками, які працюють на пару з тиском 1,5 кгс/см².

Пари етилбензолу з вершини проходять через теплообмінники, а конденсат повертається частково у вигляді флегми, а частково подається на склад або у виробничу систему. Для запобігання полімеризації в подачу також вводиться інгібітор через фільтри.

Кубова рідина надходить до третьої колони, яка виконує остаточне виділення стиролу-ректифікату. Колона має два блоки насадки. Температурний режим підтримується кип'ятильником з подачею пари тиском до 0,5 кгс/см².

Пари стиролу проходять через теплообмінники, після чого охолоджений стирол-ректифікат подається насосом: частково назад у колонну як флегма, а основна частина — на зберігання в ємність. Залишкова рідина з куба колони спрямовується до роторно-плівкового апарата для виділення смолистого залишку КОРС (кубовий залишок ректифікації стиролу).

Конденсат від усіх кип'ятильників збирається в окремий колектор і направляється до окремих ємностей.

На випадок аварійної або планової зупинки установки, усі продукти відводяться в ємності складу промислових продуктів.

1.4 Аналіз технологічного процесу, як об'єкту автоматизації

Досліджуваний технологічний об'єкт - це ректифікаційна установка безперервної дії. Основною метою її роботи є отримання цільового продукту -

стиролу-ректифікату, який виділяється з ВК.

Ключовими апаратами у складі установки є вакуумні ректифікаційні колони насадкового типу. У їх функції також входять теплообмінне обладнання, а саме: кип'ятильники, конденсатори, теплообмінники, а також трубопроводи, якими здійснюється транспортування речовин за допомогою насосів.

Основним технологічним процесом у цьому відділенні є масообмін (ректифікація), що відбувається у колонах. У кожній з колон поступово виділяються майже чисті побічні та цільові компоненти: БТФ, етилбензол, стирол-ректифікат та КОРС.

Крім того, в установці мають місце гідродинамічні процеси (переміщення рідин трубопроводами) та теплові процеси (нагрівання, охолодження, конденсація парів і кипіння рідин у теплообмінниках).

Для контролю якості продукту використовується непрямий метод контролю концентрацій продуктів у колоні за температурним профілем. Залежно від висоти колони і фракційного складу суміші, температура змінюється, що дозволяє судити про правильність розподілу компонентів.

Оптимальний температурний профіль кожної колони визначається значенням флегмового числа відповідно до технологічного регламенту, а його розміщення по висоті регулюється температурою на контрольній тарілці.

Стабільність процесу та матеріальний баланс у колоні забезпечуються за рахунок контролю та регулювання рівнів рідин у кубах колон і в конденсаторах-збірниках.

Розподілена система управління значно розширює можливості керування. Завдяки використанню процесорної техніки можливо впроваджувати складні алгоритми управління, забезпечити високу надійність, передбачити резервування. Така система легко адаптується до змін у технологічних схемах і контурах регулювання без необхідності заміни обладнання.

Контури регулювання процесу ректифікації описуються наступним

чином [7-12].

1. Витрата живлення – це кількість вхідної сировини (етилбензолу або іншого компоненту), що подається на обробку в процес. Регулювання цього параметра допомагає підтримувати стабільність процесу і забезпечує належну кількість матеріалу для подальшої обробки.

2. Витрата пари – це кількість пари, що використовується в процесі для нагрівання або створення необхідного тиску в установці. Пара може бути використана для нагрівання рідин або для забезпечення роботи теплообмінників.

3. Витрата флегми – це кількість флегми, яка циркулює в системі. Флегма – це частина рідини, яка повторно повертається в колонну, сприяючи подальшій ректифікації і очищенню продукту.

4. Витрата БТФ – це об'єм бензолтолуольної фракції, що виділяється з суміші в процесі ректифікації. Регулювання цього параметра необхідне для контролю чистоти та складу отриманих фракцій.

5. Температура живлення – температура сировини, що подається в установку або колонну. Вона впливає на ефективність процесу ректифікації та може допомогти в запобіганні полімералізації або в іншому коригуванні технології.

6. Витрата води – кількість води, яка використовується для охолодження або для циркуляції в теплообмінниках. Вода може також використовуватися для конденсації пари.

7. Температура на виході – температура кінцевого продукту, що виходить з процесу. Контроль цієї температури важливий для забезпечення якості і чистоти кінцевого продукту.

8. Витрата стиролу-ректификату – кількість очищеного стиролу, який виділяється з ректифікаційної колони. Регулювання цього параметра важливе для отримання продукту заданої чистоти і кількості.

Загалом, ці контури регулювання забезпечують точний контроль за параметрами, що впливають на ефективність і якість процесу ректифікації

стиролу. Кожен з цих параметрів впливає на кінцевий результат, тому вони повинні бути точно налаштовані для досягнення оптимального результату.

2. ОБГРУНТУВАННЯ ВИБОРУ ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ ТА МІКРОПРОЦЕСОРНОЇ ТЕХНІКИ

2.1 Обґрунтування вибору технічних засобів контролю параметрів технологічного процесу

Відповідно до переліку технологічних параметрів та вимог до режиму роботи установки, здійснюється підбір первинних вимірювальних перетворювачів для контролю необхідних параметрів процесу.

При виборі обладнання враховуються його вартість, кліматичне виконання та виробник. Для пристроїв, які встановлюються поза межами приміщень, обов'язковою є здатність працювати при температурі навколишнього середовища до -45°C . У випадках, коли таке обладнання не витримує низьких температур, передбачається встановлення шаф з підігрівом [13-15].

Оскільки виробництво стиролу належить до вибухо- та пожежонебезпечних, усі прилади мають бути у вибухозахищеному виконанні. Перевага надається іскробезпечному обладнанню, оскільки воно є менш громіздким і значно економнішим, ніж пристрої з вибухонепроникною оболонкою.

Для передачі сигналів від датчиків і виконавчих механізмів застосовується уніфікований струмовий сигнал 4–20 мА, який найкраще підходить для побудови розподіленої системи керування на базі мікропроцесорної техніки [16-18].

2.1.1 Вибір давачів для вимірювання температури

Діапазон температур на автоматизованому об'єкті становить від -50 до $+180^{\circ}\text{C}$. Тому для вимірювання температур обираються термометри опору з уніфікованим сигналом ТСМУ Метран–274 у виконанні: ExiaIICT6, IP65, У1.1, V1, за винятком термометрів, які вимірюють температуру підшипників

насосів (рисунок 2.1). Для цих цілей використовується Метран–2700 у виконанні (рисунок 2.2): 0ЕхіаІІСТ5Х, ІР65, У2, G1 — через підвищену стійкість до вібрацій. Вихідний сигнал: 4–20 мА.



Рисунок 2.1 - Термометр опору
ТСМУ Метран–274

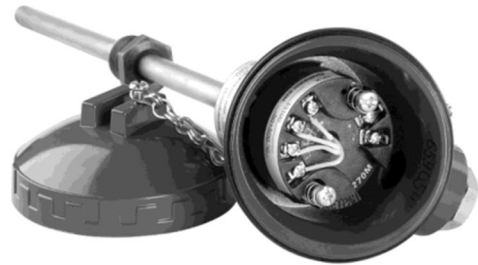


Рисунок 2.2 - Термометр опору
Метран–2700

2.1.2 Вибір датчиків для вимірювання тиску

Для вимірювання тиску в колоні обрано датчик абсолютного тиску МЕТРАН-150ТА з діапазоном $P = 3,2...30,4$ кПа у вибухозахищеному виконанні 0ЕхіаІІСТ5Х, ступінь захисту ІР66, кліматичне виконання V2. Діапазон температур навколишнього повітря: від -55 до $+80$ °С. Вихідний сигнал - уніфікований струмовий 4–20 мА (рисунок 2.3).

Для контролю тиску в масляних баках насосів застосовується датчик надлишкового тиску МЕТРАН-150TG, також у вибухозахищеному виконанні 0ЕхіаІІСТ5Х, ступінь захисту ІР66, кліматичне виконання V2. Діапазон температур навколишнього повітря: від -55 до $+80$ °С. Вихідний сигнал — 4–20 мА.



Рисунок 2.3 - Датчик тиску МЕТРАН-150

2.1.3 Вибір давачів для вимірювання витрати

Для вимірювання витрати всіх потоків обрані вимірювальні комплекти з діафрагмою Rosemount 405C та датчиком Rosemount 3051S (рисунок 2.4). Таке рішення обґрунтоване їх компактністю, відносно невеликою вартістю та невибагливістю до умов монтажу, зокрема щодо простору та положення установки. Виконання: 0ExiaIICT4, IP66. Вихідний сигнал: 4–20 мА.

Для обліку стиrolу-ректифікату застосовуються багатопараметричні перетворювачі Rosemount 3051SMV, які призначені для вимірювання абсолютного або надлишкового тиску (в тому числі розрідження), перепаду тиску, температури, а також для розрахунку об'ємної або масової витрати та кількості пари, рідин і газів у робочих умовах. Крім того, вони дозволяють визначати об'ємну витрату та кількість газу, приведені до стандартних умов (температура 20 °С, тиск 101325 Па), а також теплову енергію й питому теплоту згоряння (для вуглеводнів).



Рисунок 2.4 - Датчики вимірювання витрати Rosemount

2.1.4 Вибір давачів для вимірювання рівня

Замість буйкових рівнемірів найбільш оптимальним варіантом є хвильоводний радарний рівнемір Rosemount 5300 (рисунок 2.5), який встановлюється на виносну камеру замість штатного. Він оснащений одиничним жорстким зондом для вимірювання рівня нафтопродуктів та коаксіальним зондом для вимірювання рівня парового конденсату, відповідно до рекомендацій виробника. Виконання: 0ExiaIICT4X, IP67. Вихідний сигнал:

4-20 мА.

Крім того, для контролю рівня в маслобаках насосів застосовується вібраційний сигналізатор рівня Rosemount 2120 (рисунок 2.6). Вихідний сигнал: 4-20 мА. Виконання: 0ExiaIICT5, IP67.



Рисунок 2.5 - Рівнемір Rosemount
5300



Рисунок 2.6 - Рівнемір Rosemount
2120

2.1.5 Вибір газоаналізатора

Для аналізу повітряного середовища в приміщеннях та на відкритій території обрано газоаналізатор вибухонебезпечних концентрацій СТМ-30-03 (рисунок 2.7). Діапазон сигналізованих концентрацій становить 0-100 % НКПР. Виконання: 1ExibIICT6. Вихідний сигнал: 4...20 мА. Цей прилад здатний працювати в умовах знижених температур і несприятливих кліматичних умовах.



Рисунок 2.7 - Газоаналізатор вибухонебезпечних концентрацій СТМ-30

2.1.6 Вибір виконавчого механізму

Для регулювання ряду параметрів використовуються регулювальні та

запірні клапани SAMSON-3241–1 (рисунок 2.8). З огляду на агресивність середовища, виконавчий механізм виготовлений з корозійностійкого литого сталі. Оскільки від контролера надходить вихідний струмовий сигнал 4-20 мА, його необхідно перетворити в пневматичний універсальний сигнал 0.2-1 кгс/см², для цього використовується позиціонер SAMSON-4763-1, який впливає на регулювальний клапан.

В якості відсічного клапана обрано SAMSON-3351 Ду100 (рисунок 2.9), Ру16, кл.герм. VI, корпус з нержавної сталі, Кву 100, «НЗ», виробництво Samson AG, м. Франкфурт-на-Майні, Німеччина. Він керується електромагнітним клапаном, вбудованим в індуктивний сигналізатор кінцевих положень. Повітря для живлення: Р=1,4...6,0 кгс/см². Вихідний сигнал сигналізатора: NAMUR (EN 60947-5-6). Керуючий сигнал соленоїда: 12В. Виконання: EExiaIICT6 X, IP65. Температура навколишнього повітря: Т= - 45...+80°С.



Рисунок 2.8 - Регулювальні та запірні клапани SAMSON-3241–1



Рисунок 2.9 - Регулювальний клапан SAMSON-3351

2.2 Опис мікропроцесорної техніки

На сьогодні існує велика кількість різноманітних контролерів як вітчизняного, так і закордонного виробництва.

Вибір контролерів має ґрунтуватися на таких основних критеріях [19]:

- функціональні можливості контролера повинні повністю відповідати

завданням автоматизації конкретного технологічного процесу;

- технічні характеристики, що визначають швидкодію пристрою, мають відповідати вимогам системи автоматичного керування;

- кількість та типи входів/виходів контролера повинні оптимально відповідати інформаційним потокам у процесі;

- важливими є також комунікаційні можливості: тип мережі, підтримувані протоколи зв'язку, а також сумісність із вже наявним або запланованим обладнанням;

- обсяг постійної та оперативної пам'яті контролера повинен забезпечувати розміщення програмного забезпечення і його стабільну роботу. При цьому важливо враховувати не лише технічні параметри, а й вартість самого контролера та супутнього обладнання.

Серед доступних варіантів було обрано програмований контролер CENTUM CS3000R3 виробництва японської компанії Yokogawa. Ці контролери вже досить широко використовуються, що дозволяє спиратися на набутий досвід у їхньому підключенні та обслуговуванні.

Розподілена система керування відкриває новий етап у розвитку автоматизованих систем управління для великотоннажного виробництва. Системи від компанії Yokogawa, які зарекомендували себе як надійні, відмовостійкі та зручні в експлуатації рішення.

На рисунку 2.10 зображено типову конфігурацію розподіленої системи керування CENTUM CS3000R3.

Система керування (СК) розробляється для автоматизації промислових об'єктів [13-15]. Вона дозволяє будувати дійсно розподілену архітектуру керування. Основні завдання СК:

- безпечне ведення технологічних процесів, із мінімізацією ризиків аварій чи відмов;

- реалізація стратегій оптимального керування для підвищення ефективності виробництва;

- забезпечення стійкої роботи регуляторів та стабільності процесів;

- керування періодичними (циклічними) процесами;
- інтеграція з підсистемами верхнього та нижнього рівнів автоматизації (наприклад, ERP або польові пристрої);
- збирання, збереження та архівація даних для подальшого аналізу.

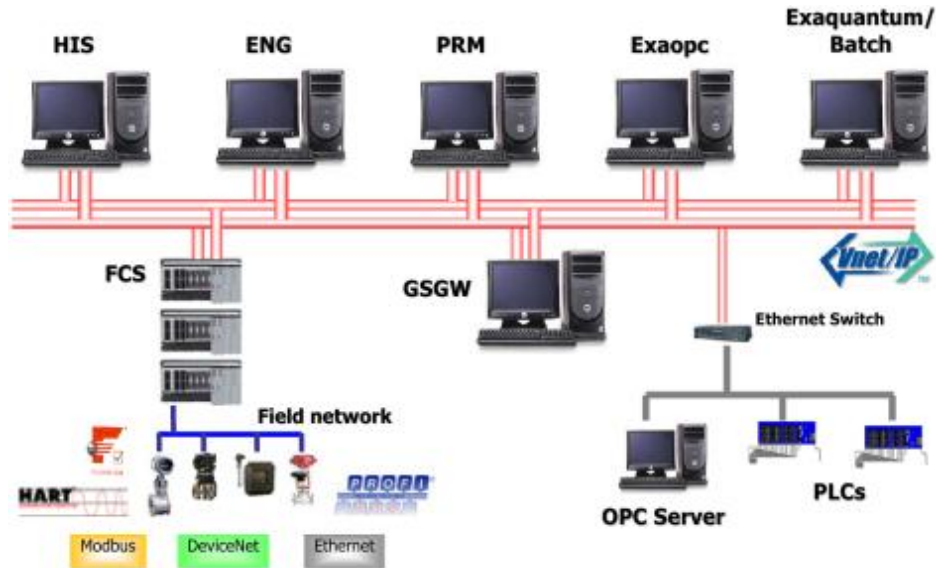


Рисунок 2.10 – Типова структура PCU CENTUM CS3000R3

Система управління, наприклад, CENTUM CS3000R3 має низку важливих переваг, які забезпечують її ефективне функціонування у великих промислових масштабах. Однією з головних переваг є гнучка система резервування, яка дозволяє дублювати ключові елементи, такі як процесори, системні інтерфейси та модулі введення/виведення. Це забезпечує високу надійність і безперервність роботи навіть у разі виходу з ладу окремих компонентів.

Крім того, робочі місця операторів можуть бути сконфігуровані індивідуально, із можливістю незалежного накопичення історичної інформації, що дозволяє ефективно аналізувати хід технологічного процесу. Завдяки доменному принципу організації, система реалізує справжнє розподілене управління, що підвищує гнучкість та масштабованість.

Ще однією суттєвою перевагою є висока щільність модулів введення/виведення, зокрема 64-канальні модулі для обробки дискретних сигналів, що дозволяє зекономити місце у шафах автоматизації. Передача

даних у системі здійснюється через високошвидкісну внутрішню шину ESB зі швидкістю 128 Мбіт/с, що гарантує оперативність реагування на зміни в технологічному процесі.

Контролери системи мають велику, до 32 МБ, оперативну пам'ять, що дозволяє обробляти складні алгоритми керування. Операторські станції можуть бути обладнані двома екранами - як з ЖК-дисплеями, так і з ЕЛТ-моніторами, і сенсорною клавіатурою, яка забезпечує швидкий доступ до будь-якого вікна керування завдяки функціональним клавішам.

Система також підтримує інтеграцію з підсистемами верхнього та нижнього рівнів, що дозволяє створювати комплексні рішення в галузі автоматизації. CENTUM CS3000R3 має функцію віртуального тестування, яка дозволяє налагоджувати прикладне програмне забезпечення як з підключенням контролерів, так і без нього, що суттєво спрощує етапи розробки та впровадження.

Система керування є сучасною розподіленою системою управління (PCU; DCS - distributed control system), яка розроблена для автоматизації великих виробничих об'єктів із високими вимогами до надійності, точності й безпеки. Її архітектура базується на модульному принципі, що дозволяє гнучко адаптувати конфігурацію під потреби конкретного об'єкта. Кожен елемент системи виконує окрему функцію, але разом вони утворюють єдиний інформаційно-керуючий комплекс.

Центральною ланкою є контролери (Field Control Station – FCS), які забезпечують безпосереднє керування процесами. Саме вони отримують сигнали від датчиків, обробляють їх відповідно до закладених алгоритмів і формують команди для виконавчих механізмів. Для забезпечення безперервності роботи, контролери можуть мати резервування: встановлюються два процесори, один з яких є активним, а інший — резервним. Усі сигнали технологічного процесу надходять через модулі введення/виведення (I/O-модулі), які підключаються до контролера та можуть бути аналоговими або цифровими.

Для взаємодії оператора з технологічним процесом використовуються робочі станції оператора (HIS). Це спеціалізовані комп'ютери, обладнані сенсорними клавіатурами та моніторами, через які оператори можуть контролювати параметри процесу, змінювати уставки, запускати або зупиняти окремі ділянки виробництва. Інтерфейс станцій дозволяє переглядати тренди, історичні дані, журнали аварій та подій, що значно полегшує управління та аналіз роботи об'єкта.

Усі компоненти об'єднані між собою високошвидкісною системною мережею, яка базується на шині ESB (Ethernet-based System Bus) з пропускнуою здатністю до 128 Мбіт/с. Завдяки цьому забезпечується оперативний обмін даними між елементами системи. Окрім того, підтримується інтеграція з іншими мережами та протоколами, такими як Foundation Fieldbus, Modbus, Profibus, що дозволяє з'єднувати CENTUM CS3000R3 з широким спектром обладнання.

Окреме місце в системі займає інженерна станція (ENG). Вона використовується для розробки, налаштування й обслуговування програмного забезпечення автоматизації. Через неї фахівці створюють логіку керування, задають параметри комунікацій, налаштовують мережеві протоколи, а також проводять діагностику всієї системи.

Дані, що надходять у систему, зберігаються на системному сервері (SMS). Цей сервер виконує функції архівації, зберігання та аналізу історичної інформації, подій, аварій, звітів і рецептур. Він також відповідає за централізовану підтримку цілісності даних і адміністрування системи.

Однією з особливостей CENTUM CS3000R3 є можливість віртуального тестування. Це функція, що дозволяє створювати й перевіряти логіку керування навіть без підключення до фізичного обладнання. Така можливість особливо корисна на етапах розробки, впровадження та навчання персоналу.

Завдяки своїй модульності, система легко інтегрується з іншими рівнями автоматизації. Вона може взаємодіяти з верхнім рівнем – системами планування виробництва, а також з нижнім рівнем – польовими пристроями,

такими як датчики, регулятори, частотні перетворювачі тощо.

Загалом, система CENTUM CS3000R3 поєднує в собі гнучкість, високу надійність, масштабованість і простоту в експлуатації, що робить її ефективним рішенням для керування складними технологічними процесами в реальному часі.

2.3 Вибір модулів введення-виведення

Далі в таблиці 2.1 наведено зведені дані щодо сигналів, відповідно до яких здійснюється підбір модулів введення-виведення.

Таблиця 2.1 – Узагальнена таблиця сигналів

Тип сигналу
Аналогові входні сигнали (з іскрозахистом)
Аналогові вихідні сигнали (з іскрозахистом)
Дискретні входні сигнали (з іскрозахистом)
Дискретні входні сигнали (без іскрозахисту)
Дискретні вихідні сигнали (з іскрозахистом)
Дискретні вихідні сигнали (без іскрозахисту)

Виходячи з кількості аналогових і дискретних входних та вихідних сигналів, наведених у таблиці 2.1, було обрано таку конфігурацію системи:

В якості керуючого блоку використовується AFV10D — резервований блок із двома процесорами CP451 з тактовою частотою 133 МГц і оперативною пам'яттю 32 МБ. Для збереження даних при знеструмленні встановлюються дві батареї PW482, які забезпечують підтримку пам'яті до 72 годин.

Для розширення кількості модулів введення/виведення використовується блок ANB10D, також обладнаний двома батареями PW482 для збереження даних.

Для організації зв'язку між центральним і розширювальним блоками

застосовуються модулі мережі EC401 (установлюються в центральному блоці AFV10D) та SB401 (установлюються в розширювальному блоці ANB10D), по два кожного типу.

Електроживлення забезпечується за допомогою центрального блоку живлення AEP7D, який працює від мережі 220 В та має два незалежні контури живлення.

Модулі для збору аналогових сигналів: ASI133 — модуль аналогового введення зі вбудованим бар'єром іскрозахисту, 8 ізольованих каналів, вхідний сигнал 4–20 мА, підтримка протоколу HART. Інший ASI133 — аналогічний модуль без підтримки HART.

Для виводу аналогових сигналів використовується: ASI533 — модуль аналогового виводу, також зі вбудованим іскрозахистом, 8 ізольованих каналів, вихідний сигнал 4–20 мА.

Модулі дискретного введення: ASD143 — з вбудованим бар'єром іскрозахисту, 16 ізольованих каналів, вхідний сигнал стандарту NAMUR; ADV151 — без бар'єру іскрозахисту, 32 канали, напруга сигналу 24 В.

Для дискретного виводу застосовуються: ASD533 — модуль з бар'єром іскрозахисту, 8 ізольованих каналів, номінальна напруга 12 В, ADV551 — модуль без бар'єру іскрозахисту, 32 канали, номінальна напруга 24 В.

Також використовується: EC401-10 та SB401-10 — додаткові мережеві модулі ESB для функціональних блоків керування (FCU) та вузлових блоків (NodeUnit), T9083NA — ізолювальна перегородка, що розділяє комунікаційні модулі від модулів зі вбудованим іскрозахистом, ADCV01 — заглушки для невикористаних слотів у стійках.

Ця конфігурація забезпечує гнучкість, масштабованість і надійність автоматизованої системи керування відповідно до потреб технологічного процесу.

Далі сформуємо необхідний перелік мікропроцесорної техніки. Серед основних позицій — резервований керуючий блок AFV10D-S41201 виробництва Yokogawa, який є серцем системи, та чотири модулі розширення

введення-виведення ANB10D-420 того ж виробника. Для забезпечення зв'язку між модулями передбачено промислові комутатори (L2-switch) у кількості двох штук.

Система передбачає значну кількість модулів введення та виведення сигналів. Так, для збору аналогових сигналів використовується 18 модулів ASI133-S00/SA3S0 зі вбудованим бар'єром іскрозахисту та один модуль ASI133-H00/SA3S0 з підтримкою протоколу HART. Відповідні клеми ATSA3S-0 - 19 штук.

Для аналогового виводу передбачено 4 модулі ASI533-S00/SA3S0, також зі вбудованим захистом, і до них додаються 4 клеми типу ATSS3S-0. Щодо дискретних сигналів: для введення використовуються як 4 модулі ASD143-P00/SB4S0 з бар'єром захисту, так і 1 модуль ADV151-P10/B5S00 без нього. Клеми типів ATSB4S-0 (4 шт.) та ATB5S-00 (1 шт.) призначені для підключення відповідно.

Серед модулів дискретного виводу зазначаються: 1 модуль ASD533-S00/SD3S0 зі вбудованим захистом та 2 модулі ADV551 без нього. Для підключення використовуються відповідні клеми: ATSD3S-0 (1 шт.) та ATD5S-00 (2 шт.). Для організації підключення безпечних сигналів застосовуються термінальні плати AED5D-00 (2 шт.) та кабелі AKB331 (3 шт.).

Для організації мережевої структури встановлюються модулі ESB: EC401-10 для функціональних контролерів (FCU) та SB401-10 для вузлів NodeUnit. Кабелі YCB301-C020 використовуються для з'єднання мережі — 8 штук.

З метою ізоляції комунікаційних ліній передбачено 4 перегородки T9083ND, а 3 заглушки ADCV01 потрібні для незаповнених слотів. Усе обладнання монтується у 19-дюймову шафу Rittal TS8 (розміром 600×2200×600 мм) з вентиляцією та ступенем захисту IP 55.

Живлення подається через резервований центральний модуль AEP7D-20 з 14 виходами та двома входами на 220 В. Для організації робочих місць передбачено два операторських столи YAX101-S02, а також персональні

комп'ютери HP Compaq із процесором Хеон 2 ГГц, 2 ГБ ОЗУ та 23-дюймовими моніторами — по два на операторську та інженерну станції.

Програмне забезпечення, а також електронну інструкцію (LHS5495-V11). Для безперебійної роботи передбачено 2 джерела живлення APC Smart-UPS RT 6000VA RM 230V та 2 ліцензії Windows Vista від Microsoft.

Цей комплекс мікропроцесорного обладнання дозволяє забезпечити надійну та ефективну роботу автоматизованої системи керування в рамках виробничого процесу.

2.4 Розроблення структури системи керування

Запропонована структура СК побудована за принципом розподіленої архітектури, що забезпечує високу надійність, гнучкість та масштабованість. Система складається з кількох основних рівнів та компонентів, кожен з яких виконує певну функцію у процесі керування (рисунок 2.11) [9-11, 13].

Рівень контролерів включає польові пристрої (датчики, виконавчі механізми, перетворювачі тощо), які безпосередньо взаємодіють з технологічним процесом. Вони підключаються до модулів введення/виведення (I/O), які обробляють сигнали та передають їх до контролерів.

Контролери відповідають за збирання даних з польових приладів, виконання логіки керування, а також формування команд для виконавчих пристроїв. У CS3000R3 передбачена можливість резервування контролерів для підвищення надійності.

На рівні оператора розміщуються операторські робочі місця (HIS — Human Interface Stations). Вони призначені для моніторингу та керування процесами в реальному часі. Оператори можуть переглядати технологічні схеми, тренди, сигнали тривоги, а також змінювати параметри керування через зручний графічний інтерфейс.

Кожне робоче місце має можливість незалежного зберігання історичних

даних, що полегшує аналіз процесу. Також передбачена підтримка сенсорних клавіатур для швидкого виклику функцій керування.

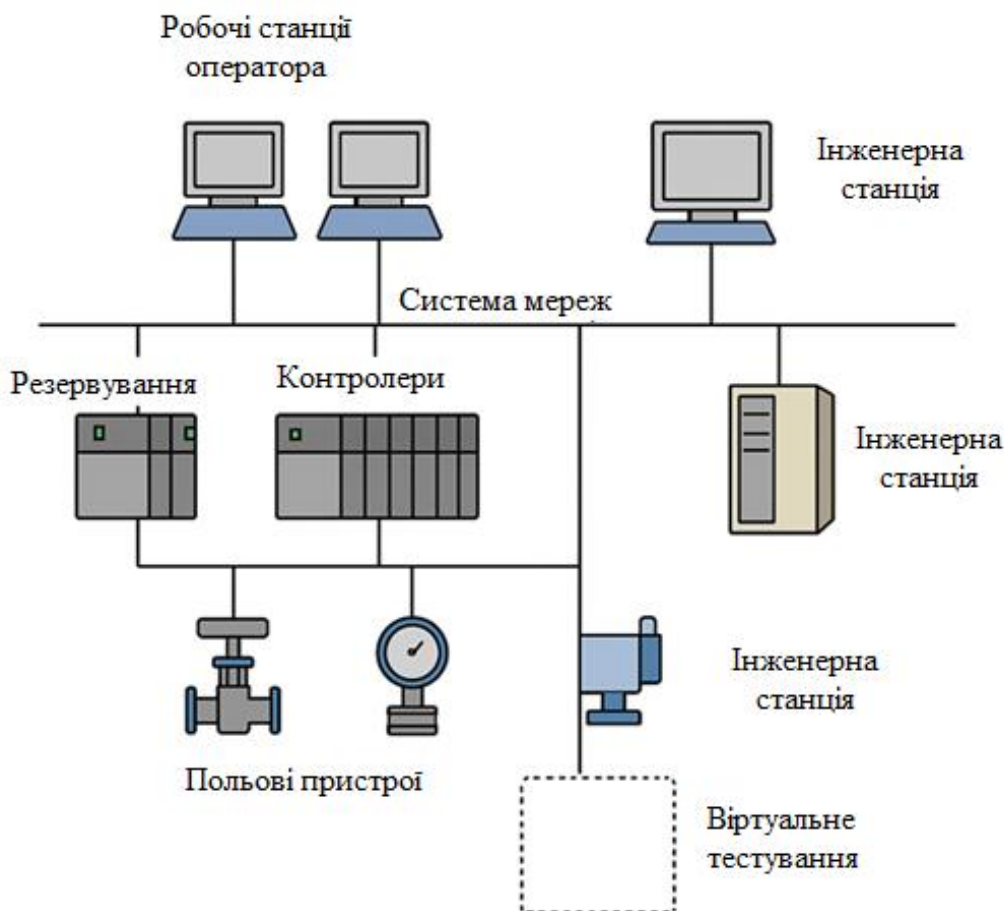


Рисунок 2.11 - Узагальнена структура розподіленої системи керування

Зв'язок між усіма елементами системи забезпечується через високошвидкісну внутрішню шину ESB. Вона дозволяє обмінюватися даними зі швидкістю до 128 Мбіт/с. Мережева структура дозволяє легко масштабувати систему та забезпечує надійний обмін даними між контролерами, HIS, архівними станціями та іншими компонентами.

Верхній рівень відповідає за взаємодію з іншими інформаційними та керуючими системами підприємства — наприклад, ERP-системами, MES-системами, лабораторними або технічними підсистемами. Таке з'єднання забезпечується через відкриті протоколи зв'язку (наприклад, OPC, Modbus, Profibus тощо).

У системі передбачено використання архівних серверів, які займаються

накопиченням даних, веденням журналів подій, збереженням трендів. Інженерні станції (ENG — Engineering Workstations) використовуються для розробки, конфігурації, модифікації та обслуговування системи.

Завдяки розподіленій архітектурі СК забезпечує високу гнучкість, можливість модернізації без зупинки процесу, а також ефективно та безпечно керування складними виробничими об'єктами. Усі рівні системи працюють у тісному взаємозв'язку, створюючи цілісну, надійну та зручну у використанні автоматизовану систему управління.

У таблиці 2.2 перераховані вибрані модулі, їх призначення, кількість каналів та загальна кількість модулів.

Таблиця 2.2 – Таблиця модулів введення-виведення

Тип сигналу	К-ть каналів	К-ть сигналів	К-ть модулів
ASI133 модуль аналогового введення (з вбудованим бар'єром іскрозахисту)	8	147	19
ASI533 модуль аналогового виводу (з вбудованим бар'єром іскрозахисту)	8	26	4
ASD143 модуль дискретного введення (з вбудованим бар'єром іскрозахисту)	16	50	4
ADV151 модуль дискретного введення (без бар'єру)	32	23	1
ASD533 модуль дискретного виводу (з вбудованим бар'єром іскрозахисту)	8	5	1
ADV551 модуль дискретного виведення (без бар'єру)	32	46	2

На рисунку 2.12 зображено структурну схему АСУ ТП побудовану на базі контролера Centum3000.

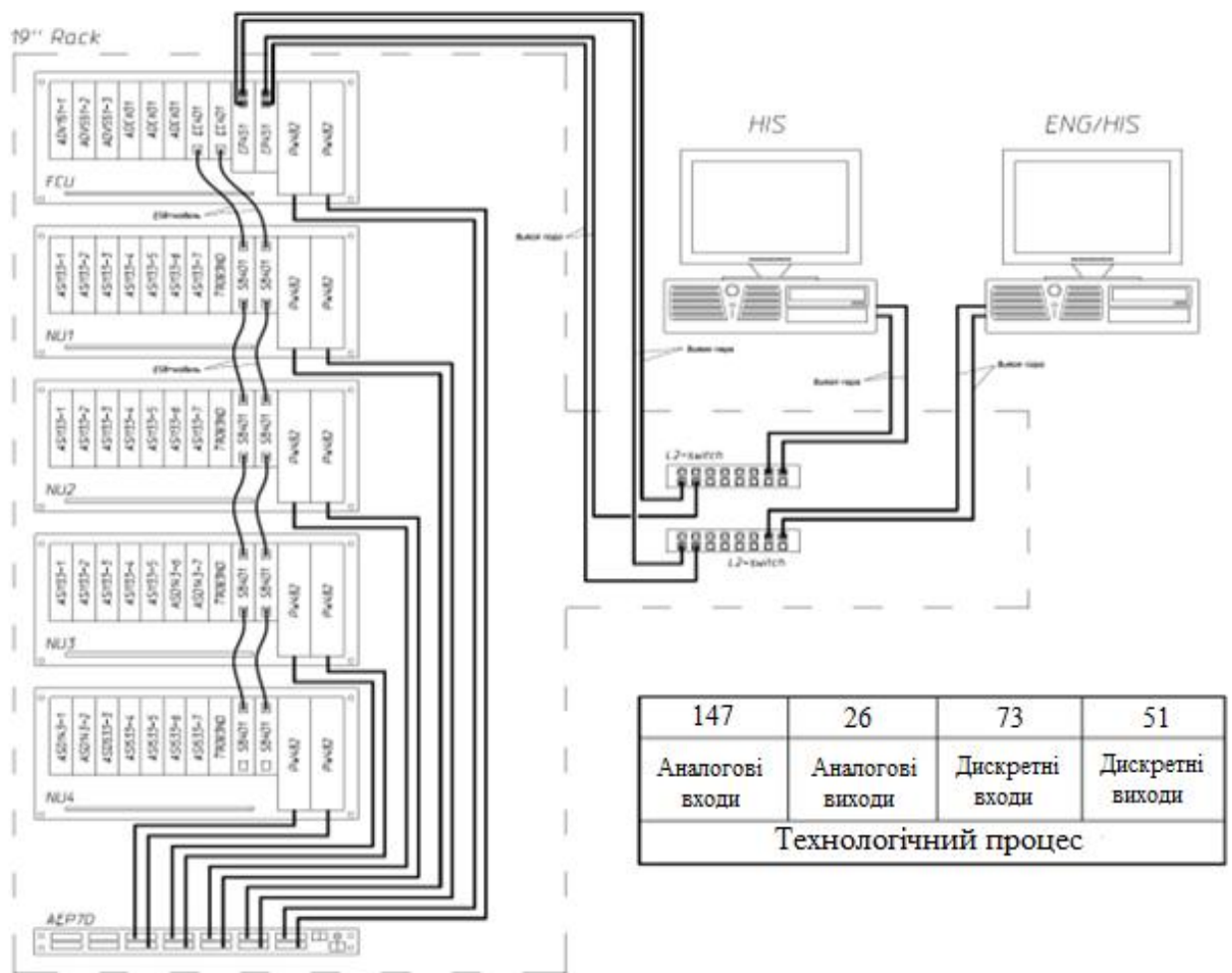


Рисунок 2.12 - Структурна схема системи автоматизації установки
ректифікації при виробництві стирулу

На рисунку 2.12 використані наступні позначення: HIS – станція оператора, ENG/HIS- інженерна станція, 19''Rack- монтажна стійка, FCU – блок керування, NU1, NU2, NU3, NU4 – стійка розширення введення-виведення, L2-switch – промисловий комутатор, AEP7D – центральний модуль живлення, PW482 – блок живлення, CP451 – центральний процесор, EC401 – модуль мережі ESO для FCU, SB401 - модуль мережі ESO для NU, ASI133 – модуль введення аналогових сигналів, AS/S33 - модуль виведення аналогових сигналів, ASD143 - модуль введення дискретних сигналів, ASDS33 - модуль виведення дискретних сигналів.

3. РОЗРАХУНОК СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ УСТАНОВКИ РЕКТИФІКАЦІЇ ПРИ ВИРОБНИЦТВІ СТИРОЛУ

3.1 Обґрунтування вибору об'єкту регулювання

Як основний технологічний апарат, що виступає об'єктом регулювання, обрано ректифікаційну колону без збірника-конденсатора. У ній відбувається безперервний процес ректифікації.

Основна мета цього процесу полягає у досягненні заданого складу продуктів, що відбираються у вигляді дистилляту з верху колони та залишку знизу. У верхній частині колони виділяється БТФ, тоді як у нижній частині накопичуються стирол та етилбензол.

З метою стабілізації якості кінцевих продуктів у верхній та нижній частинах колони застосовано схему стабілізації температурного профілю, оскільки температура по висоті колони опосередковано відображає розподіл компонентів суміші (фракційний склад).

Форма температурного профілю (рисунок 3.1) залежить від флегмового числа — відношення між витратою флегми та дистилляту. Положення цього профілю по висоті колони (рисунок 3.2) визначається температурою контрольної тарілки, яка, у свою чергу, регулюється витратою пари в кип'ятильник.

Такий підхід дозволяє системі автоматичного регулювання оперативно реагувати на основні збурення процесу, зокрема: зміну фракційного складу або температури сировини, коливання витрати живлення, а також температури й витрати флегми.

На рисунках 3.1, 3.2 використано такі літерні позначення:

- h_n — низ колони;
- h_v — верх колони;
- h_{kt} — контрольна точка;
- $t_{нк}$ — температура кипіння низькокиплячого компонента суміші;

- $t_{вк}$ – температура кипіння висококиплячого компонента суміші;
- $t_{кт}$ – температура кипіння суміші компонентів на контрольній тарілці

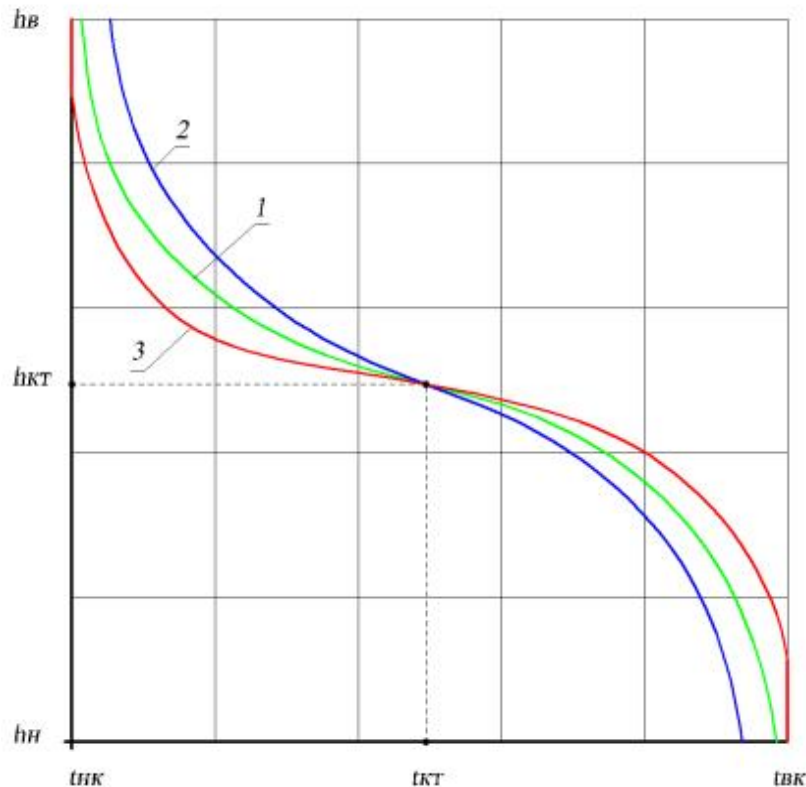


Рисунок 3.1 - Графіки залежності форми температурного профілю від флегмового числа

На рисунку 3.1 цифрами зазначено графіки температурних профілів:

- 1 – при оптимальному флегмовому числі (дотримується необхідний рівень якості верху та куба);
- 2 – при заниженому флегмовому числі (недостатній поділ компонентів, спостерігається незадовільна якість верху та куба);
- 3 – при підвищеному (надлишковому) флегмовому числі (дотримується необхідний рівень якості верху і куба, але при цьому відбувається перевитрата пари).

На рисунку 3.2 цифрами позначено графіки температурних профілів:

- 1 – при оптимальній температурі на контрольній точці (дотримується необхідний рівень якості верху та куба);
- 2 - при завищеній температурі у контрольній точці (спостерігається

підвищений вміст низькокиплячого компонента вгорі колони, при цьому дотримується необхідна якість куба);

З – при заниженій температурі на контрольній точці (спостерігається підвищений вміст висококиплячого компонента внизу колони, при цьому дотримується необхідна якість зверху).

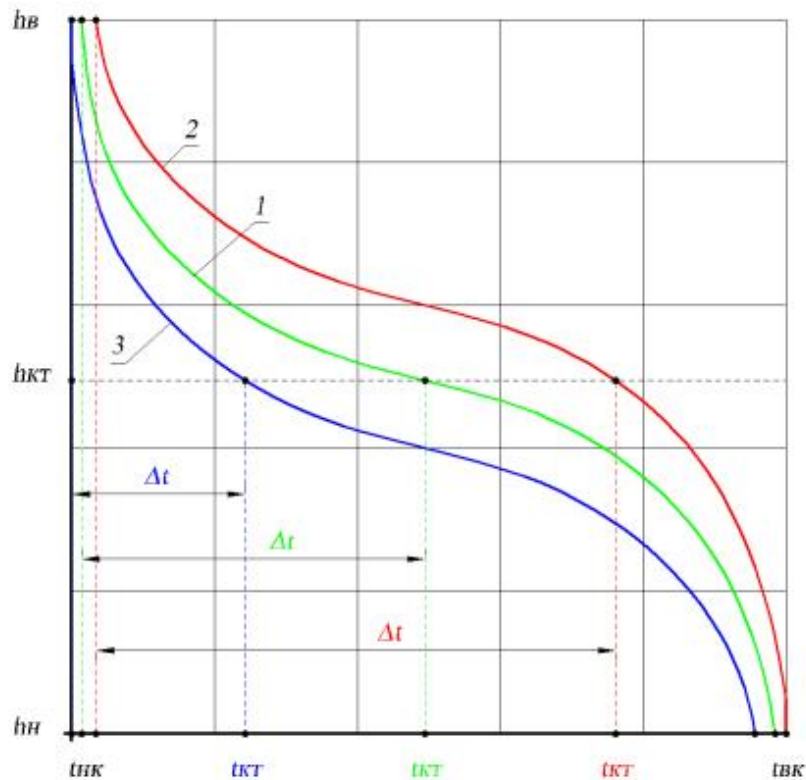


Рисунок 3.2 - Графіки положення температурного профілю за висотою колони

Тиск у колоні також виступає як одне з основних збурень, що впливають на стабільність процесу. Якщо система регулювання побудована на основі стабілізації температурного профілю колони, тобто контролюється температура на контрольній тарілці, то будь-які зміни тиску спричиняють зміну температури по всій висоті колони, зокрема і на контрольній точці. При цьому склад речовини на контрольній тарілці залишається незмінним, однак система автоматичного регулювання (САР) сприймає це як відхилення від заданої температури і намагається його компенсувати. У результаті вона змінює температуру, яка насправді не потребує коригування, що призводить

до зсуву температурного профілю і, як наслідок, до погіршення якості продукції.

Щоб уникнути цієї ситуації, потрібно стабілізувати не саму абсолютну температуру на контрольній тарілці, а різницю між температурою на контрольній тарілці та температурою у верхній частині колони. Оскільки при зміні тиску обидві ці температури змінюються одночасно, їх різниця залишається практично сталою. Для САР це означає відсутність збурення, і система практично не реагує на коливання тиску, що дозволяє зберегти стабільність процесу.

Окрім цього, рівень рідини в кубі колони регулюється шляхом відведення кубового залишку, який потім подається на живлення колони. Цей рівень служить індикатором дотримання матеріального балансу процесу. При цьому сам куб виконує роль буферної ємності, яка згладжує коливання потоку живлення в наступну колонну установку.

Після проведеного аналізу об'єкта керування можна виділити три основні регульовальні впливи [20, 21]:

- регулювання витрати флегми (цей параметр визначає флегмове число, тобто співвідношення між кількістю флегми, що повертається в колону, та кількістю дистиляту, що відводиться);
- регулювання витрати пари впливає на різницю температур між верхньою частиною колони та контрольною тарілкою, яка є показником положення температурного профілю;
- регулювання витрати кубової рідини забезпечує стабільність рівня в кубовій частині колони, що свідчить про підтримку матеріального балансу.

До збурюючих впливів, які можуть порушувати стабільність процесу, належать:

- витрата живлення. Це стабілізоване збурення, на яке система може реагувати менш активно;
- фракційний склад живлення. Це контрольоване збурення, що відстежується засобами аналітичного контролю;

- температура живлення. Також контрольоване збурення, на яке система може адаптивно реагувати;
- тиск у колоні. Змінна, що контролюється, і впливає на температурний режим по висоті колони;
- температура флегми. Стабілізоване збурення, яке, впливає на якість поділу компонентів;
- коефіцієнт теплопровідності у теплообміннику. Неконтрольоване збурення, що може впливати на ефективність теплопередачі і, відповідно, на динаміку процесу.

На рисунку 3.4 зображено структурну схему ректифікаційної колони як об'єкта управління [22-24].

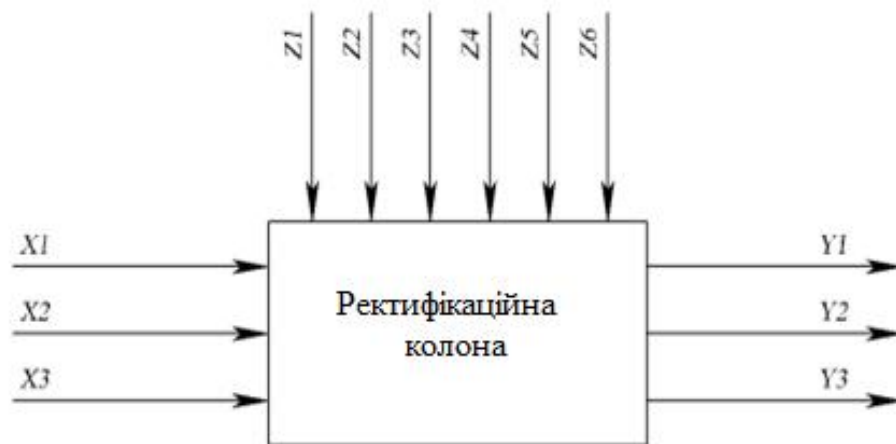


Рисунок 3.4 Структурна схема ректифікаційної колони

Вхідними впливами є:

X_1 – витрата флегми;

X_2 - витрата пари;

X_3 – витрата кубової рідини.

Вихідними параметрами є:

Y_1 – флегмове число;

Y_2 – різниця температур між верхом та контрольною тарілкою;

Y_3 – рівень у кубі.

Збурюючими впливами є:

- Z_1 - витрата живлення;
- Z_2 – температура живлення;
- Z_3 – фракційний склад живлення;
- Z_4 – тиск у колоні;
- Z_5 – температура флегми;
- Z_6 – коефіцієнти тепло- та масообміну.

Одним із ключових завдань автоматизації технологічних процесів є автоматичне регулювання, яке спрямоване на підтримання стабільного значення контрольованих параметрів або їх зміну відповідно до заданого у часі алгоритму (програмне регулювання) з необхідною точністю. Це дозволяє досягти належної якості продукції, а також забезпечити безпечну та економічно ефективну роботу технологічного обладнання.

Автоматичне регулювання реалізується за допомогою САР [22-24]. У замкнутому контурі керування привід для зміни виникає тоді, коли з'являється різниця між фактичним і заданим значенням. Регулятор реагує на цю похибку, змінюючи керуючий вплив таким чином, щоб звести похибку до нуля (в ідеальному випадку). Тобто завдання САР полягає у підтримуванні заданого значення контрольованої величини, незважаючи на вплив зовнішніх збурень. Інакше кажучи, головна роль регулятора полягає в усуненні відхилення шляхом корекції впливу на об'єкт.

До основних етапів, які виконуються при розрахунку САР, належать:

1. Побудова математичної моделі об'єкта регулювання.
2. Вибір та обґрунтування структури САР, типу регулятора, а також формування вимог до якості регулювання.
3. Визначення параметрів налаштування регулятора.
4. Оцінка якості регулювання в обраній системі.

Кінцева мета розрахунку замкнутої САР полягає у досягненні бажаної якості регулювання, тобто стабільної та точної роботи всієї системи.

3.2 Математичний опис об'єкту автоматизації

Передавальну функцію конкретного об'єкта керування зазвичай визначають на основі кривої розгону (або перехідної характеристики). Ця крива відображає зміну регульованого параметра у відповідь на подачу на вхід об'єкта стрибкоподібного сигналу. Отримати таку характеристику можна експериментальним шляхом.

Процес визначення характеристик об'єкта керування на основі експериментальних даних називається ідентифікацією.

Під час подачі на вхід об'єкта стрибкоподібного сигналу з амплітудою: $du = u(\infty) - u(0)$ вихідний сигнал $y(t)$ змінюється плавно у часі і досягає нового рівня: $dy = y(\infty) - y(0)$.

Тут $u(0)$ і $y(0)$ - початкові значення вхідної та вихідної величин відповідно, а $u(\infty)$ і $y(\infty)$ кінцеві значення цих параметрів.

Після побудови кривої розгону можна визначити наступні характеристики об'єкта:

- коефіцієнти передавальної функції;
- постійну часу об'єкта;
- час запізнення системи.

Отримані параметри є основою для подальшого розрахунку і налаштування регулятора системи автоматичного керування.

3.2.1 Розрахунок параметрів налаштування регулятора

Для розрахунку параметрів налаштування регуляторів існує велика кількість графічних та аналітичних методів [25-27]. Одні з них є більш точними, але вимагають значних обчислювальних зусиль, інші - простіші у використанні, однак дають лише наближені результати. Найчастіше застосовується метод РЧХ, який вважається одним із найточніших.

Цей метод дозволяє визначити налаштування регулятора таким чином, щоб усі корені характеристичного полінома замкненої системи розміщувалися

в межах певного сектора на комплексній площині. Ширина цього сектора визначається заданим рівнем коливальності системи m , а отже, і ступенем її затухання f .

Розрахунок параметрів регулятора методом РЧХ виконується за наступною послідовністю:

1. Визначення передавальної функції $W(p)$ розімкненої системи:

$$W(p) = W_o(p) \cdot W_p(p) \quad (3.1)$$

де $W_o(p)$ - передавальна функція об'єкта регулювання, а $W_p(p)$ - передавальна функція регулятора.

2. Отримання розширеної частотної характеристики розімкненої системи $W_{pc}(j\omega, m)$ шляхом підстановки $p = (j - m)\omega$. Такий підхід дозволяє забезпечити розташування коренів характеристичного полінома замкненої системи всередині допустимого сектора на комплексній площині.

3. На основі критерію Найквіста обираються оптимальні параметри регулятора з умови, що побудована характеристика $W_{pc}(j\omega, m)$ не охоплює точку з координатами $(-1; j0)$ на комплексній площині. Це гарантує стійкість замкненої системи.

3.2.2 Розрахунок каскадних САР

Каскадні системи регулювання застосовуються для автоматизації технологічних об'єктів з високою інерційністю у каналі регулювання [25]. Такі системи доцільно використовувати, якщо можна виділити проміжну керовану величину (координату), яка має меншу інерційність по відношенню до найнебезпечніших збурень, і при цьому вона регулюється тим самим впливом, що й основний вихід об'єкта.

У такій структурі використовуються два регулятори: основний (зовнішній), який відповідає за підтримання заданого значення основного виходу об'єкта та допоміжний (внутрішній), який регулює проміжну координату. Вхідним сигналом для нього є вихід зовнішнього регулятора.

У каскадній системі обидва регулятори взаємозалежні: зміна

налаштувань одного впливає на параметри іншого. Тому параметри регуляторів визначають ітераційно, тобто по черзі налаштовують кожен з них із поверненням до попереднього, доки не досягнуто необхідної точності.

На кожному етапі ітераційного процесу розглядається спрощена одноконтурна система автоматичного регулювання, в якій один із регуляторів умовно враховується як частина еквівалентного об'єкта.

Налаштування параметрів регуляторів виконується за наступною методикою:

1. Розрахунок основного регулятора.

Під час розрахунку параметрів кожного регулятора, інші елементи схеми автоматичного регулювання слід розглядати як еквівалентний об'єкт, тобто перетворити решту системи у нову передаточну функцію, яка характеризує поведінку об'єкта регулювання з урахуванням впливу допоміжного контуру [26, 27].

Передатна функція цього еквівалентного об'єкта визначається як:

$$W(p) = \frac{R1 \cdot W1(p)}{1 + R \cdot W(p)} \cdot \frac{W(p)}{W1(p)} = \frac{R1 \cdot W(p)}{1 + R1 \cdot W1(p)} \quad (3.2)$$

де: $R1$ - допоміжний (внутрішній) регулятор;

$W1(p)$ - передатна функція об'єкта по допоміжному (внутрішньому) каналу регулювання (допоміжній координаті);

$W(p)$ - передатна функція об'єкта по основному каналу регулювання.

2. Розрахунок допоміжного регулятора:

Еквівалентним об'єктом для допоміжного регулятора виступає паралельне з'єднання допоміжного каналу регулювання та основної розімкненої системи.

Передатна функція такого еквівалентного об'єкта має вигляд:

$$W1 = W1(p) + R \cdot W(p) \quad (3.3)$$

де:

$W1(p)$ – передатна функція об'єкта по допоміжному каналу

регулювання;

$W(p)$ – передатна функція об'єкта по основному каналу регулювання;

R – основний регулятор.

Метод розрахунку.

На першому етапі розрахунку припускається, що внутрішній контур регулювання має значно вищу швидкодію порівняно з зовнішнім. Інакше кажучи, добуток $R1 \cdot W1 \gg 1$. У такому випадку передатна функція еквівалентного об'єкта, наведена у формулі (3.2), набуває спрощеного вигляду:

$$W(p) = \frac{R1 \cdot W(p)}{R1 \cdot W1(p)} = \frac{W(p)}{W1(p)} \quad (3.4)$$

де:

$R1$ – допоміжний регулятор;

$W1(p)$ – передатна функція об'єкта по допоміжному каналу регулювання;

$W(p)$ – передатна функція об'єкта по основному каналу регулювання.

На другому етапі розрахунку знайдені параметри налаштування основного регулятора підставляють у формулу (3.3) та обчислюють значення для допоміжного регулятора.

Далі отримані налаштування внутрішнього регулятора підставляють у передатну функцію еквівалентного об'єкта (3.2), після чого процес коригування параметрів повторюється. Розрахунки виконують доти, доки значення налаштувань, отримані на двох послідовних ітераціях, не будуть збігатися в межах заданої точності.

Під час першого кроку розрахунку допоміжного регулятора передбачається, що зовнішній контур регулювання розімкнутий, тобто відключений. У цьому випадку передатна функція еквівалентного об'єкта для допоміжного регулятора дорівнює передатній функції самого об'єкта: $W1e(p) = W1(p)$. Після цього виконують розрахунок налаштувань допоміжного

регулятора.

На другому кроці знайдені параметри допоміжного регулятора підставляють у формулу 3.2 для розрахунку налаштувань основного регулятора.

На третьому кроці знайдені параметри основного регулятора знову підставляють у формулу (3.3), щоб уточнити налаштування внутрішнього регулятора.

Розрахунки повторюють доти, доки параметри налаштування на двох послідовних кроках не почнуть збігатися в межах допустимої похибки.

Вибір закону регулювання.

Вибір типу регулювання визначається функціональним призначенням кожного регулятора.

1. Для того щоб основний регулятор міг підтримувати головний параметр на заданому рівні без постійної похибки, його закон регулювання повинен обов'язково включати інтегральну складову.

2. Від допоміжного регулятора, насамперед, вимагається висока швидкодія. Тому його структура може базуватись на будь-якому типі регулювання. Оскільки об'єкт у зовнішньому контурі має велику інерційність, доцільним є використання ПІД-регулятора в основному контурі.

3. Внутрішній контур регулювання здійснює управління за витратою орошення. Через невелику інерційність цього параметра використання диференціальної складової у допоміжному регуляторі є недоцільним. Водночас, для забезпечення необхідної точності регулювання слід застосовувати інтегральну складову. Тож для внутрішнього контуру достатньо буде використати ПІ-регулятор.

3.3 Результати розрахунку системи автоматизації

Розрахунок САР було виконано з використанням програмного

комплексу MathCad [28]. У процесі моделювання побудовані криві розгону, отримані в результаті 5% зміни положення клапана витрати пари. На основі цих експериментальних даних визначено передаточні функції, які далі використано для розрахунку коефіцієнтів регуляторів у каскадній САР.

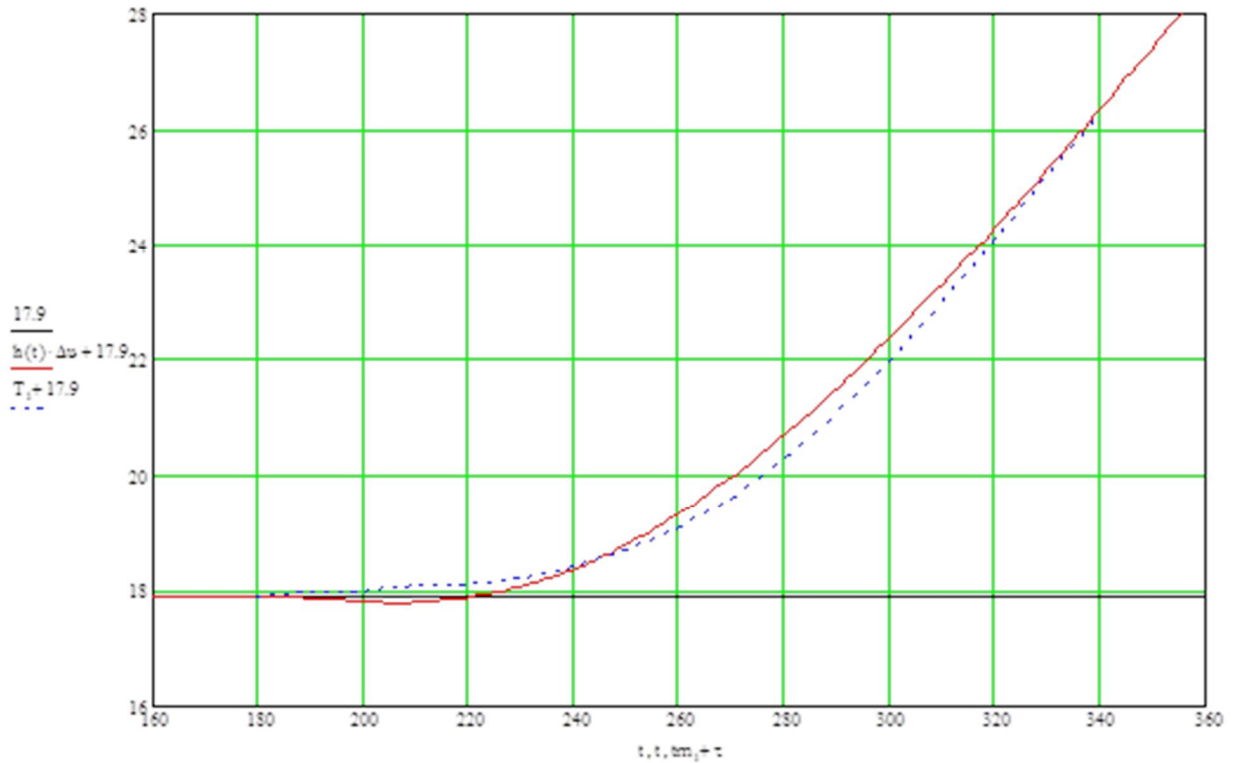


Рисунок 3.5 – Експериментальна (синя) та розрахункова (червона) криві розгону різниці температур

На рисунку 3.5 зображено порівняння експериментальної та змодельованої кривих розгону без самовирівнювання температурної різниці між верхом ректифікаційної колони та контрольним рівнем (тарілкою). На основі цієї характеристики отримано передаточну функцію основного каналу управління для побудови каскадної САР:

$$W(p) = 1.84 \cdot \left(\frac{0.012}{p} - \frac{19.042p + 1}{1593p^2 + 66.868p + 1} \right) \cdot e^{-180p} \quad (3.6)$$

На рисунку 3.6 зображено криві реакції на 5% збільшення положення клапана витрати пари в кип'ятильник Т-303.

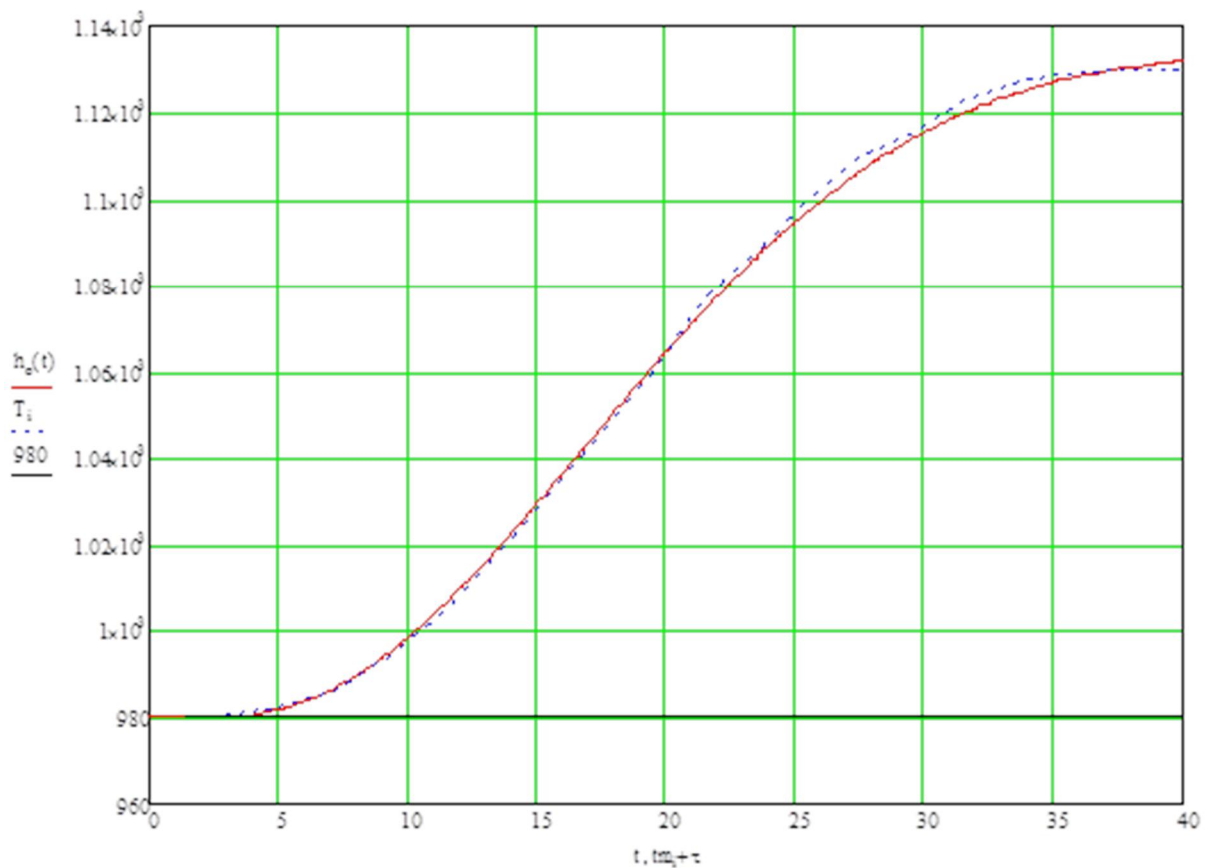


Рисунок 3.6 – Експериментальна (синя) та розрахункова (червона) криві розгону витрати пари в кип'ятильник Т-303

Результатом стала передаточна функція допоміжного (внутрішнього) каналу для розрахунку каскадної САР:

$$W_1(p) = \left(\frac{1.2 \cdot e^{-1.5p}}{446p^3 + 126p^2 + 17.45p + 1} \right) \quad (3.7)$$

Розраховані налаштування регуляторів.

Допоміжний ПІ-регулятор:

$K_p = 0,739$,

$T_i = 55,9$ с.

Основний ПД-регулятор:

$K_p = 0,155$,

$T_i = 789$ с,

$T_d = 64$ с.

На рисунку 3.7 зображено графік перехідного процесу при зміні завдання.

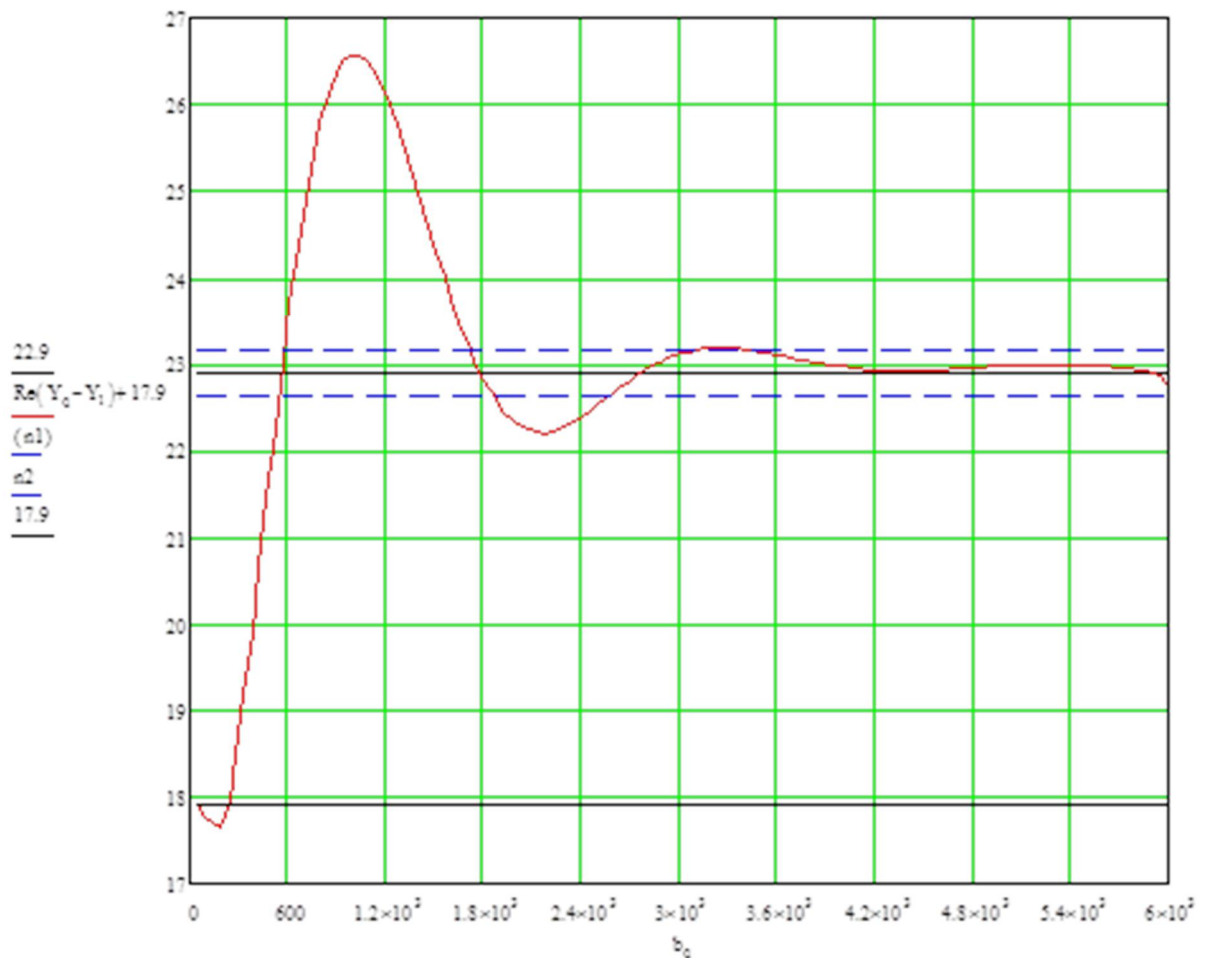


Рисунок 3.7 – Перехідний процес за завданням

Основні показники якості регулювання:

- перерегулювання: $\delta=73\%$;
- час врегулювання: $T_{рег}=3543,3$ с;
- час першого узгодження: $T_{1сог}=1771,7$ с;
- кількість коливань: $n=2$.

На рисунку 3.8 показано перехідний процес при впливі збурення.

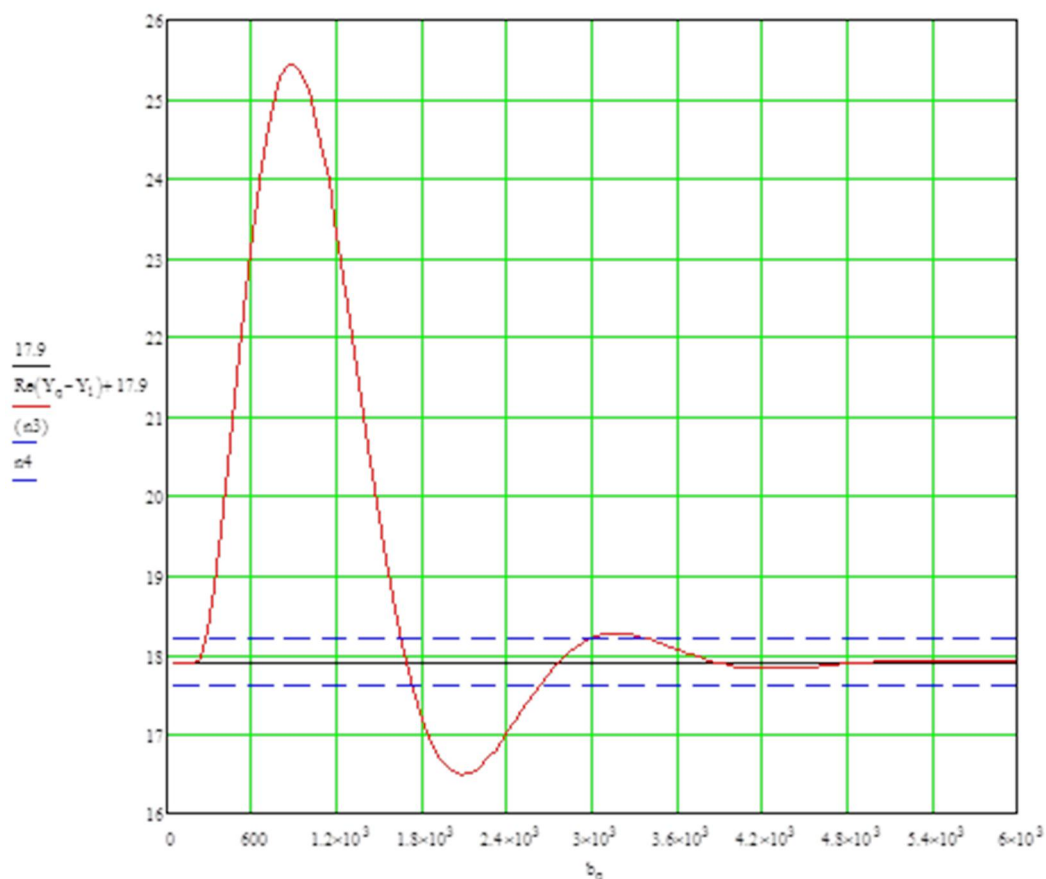


Рисунок 3.8 – Перехідний процес при зовнішньому збуренні

Показники якості перехідного процесу при дії збурення:

- перерегулювання: $\delta=19\%$;
- час врегулювання: $T_{\text{рег}}=3346,5$ с;
- час першого узгодження: $T_{1\text{сог}}=1692,9$ с;
- кількість коливань: $n=1$;
- ступінь затухання: $\psi=0,95$.

Отримані налаштування регуляторів забезпечують високу якість перехідних процесів у системі. Незначне перевищення перерегулювання при зміні завдання не є критичним фактором, оскільки в експлуатації завдання змінюється вкрай рідко (як правило, лише при запуску або зупинці установки). Тому першочергове значення має якість регулювання при впливі збурень, яка в даному випадку є задовільною. Отже, побудована каскадна САР відповідає вимогам до точності та стабільності технологічного процесу.

ВИСНОВОК

У дипломній роботі розглянуто актуальне питання автоматизації регулювання тиску в резервуарі, зокрема установки ректифікації при виробництві стиролу, що є важливим етапом у технологічному процесі хімічної промисловості. Проведене дослідження дозволило сформувати цілісне уявлення про методи стабілізації параметрів ректифікаційної колони та підвищення ефективності роботи установки.

У процесі роботи виконано аналіз об'єкта керування, виявлено основні координати та чинники, що впливають на якість регулювання. Особливу увагу приділено розробці математичної моделі системи, яку отримано шляхом експериментального визначення кривих розгону. Це дало змогу визначити передаточні функції основного та допоміжного каналів регулювання.

В межах дослідження було розроблено каскадну систему автоматичного регулювання з використанням ПІ та ПІД-регуляторів. Для обчислення параметрів регуляторів застосовано метод РЧХ, який забезпечує високу точність налаштувань та стійкість замкненої системи. Особливістю обраної структури є розділення регулювання на два взаємопов'язані контури: внутрішній (допоміжний) та зовнішній (основний), що дозволяє досягти більшої чутливості та швидкодії системи при збуреннях.

Проведене імітаційне моделювання у середовищі MathCad підтвердило ефективність запропонованого підходу. Перехідні процеси, отримані при збуреннях і змінах завдання, свідчать про високу якість регулювання: система демонструє мале перерегулювання, достатню швидкодію та високу ступінь затухання коливань. Зокрема, процес за збуренням характеризується кращими показниками якості, що особливо важливо в умовах рідкісних змін завдання під час експлуатації колони.

Отримані результати дозволяють зробити висновок про доцільність впровадження каскадної системи автоматичного регулювання в установках ректифікації. Практичне застосування результатів дослідження сприятиме

підвищенню енергоефективності, зниженню витрат сировини та покращенню якості кінцевої продукції. Крім того, розроблений підхід може бути використаний як основа для подальшої модернізації систем автоматизації на аналогічних промислових об'єктах.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Яворський В. Т., Перекупко Т. В., Знак З. О., Савчук Л. В. Загальна хімічна технологія : підручник. – Львів. : Львівська політехніка, 2009. – 552 с.
2. Янушевська О.І., Літинська М.І., Кримець Г.В., Лапінський А.В. Загальна хімічна технологія. Практикум. Частина 1 : навч. посібник. – К.: КПІ ім.Ігоря Сікорського, 2023. – 147 с.
3. Гончаров А. І., Серeda І. П. Хімічна технологія : підручник. Ч.1.– К.: Вища школа, 1979. – 288с.
4. Гончаров А., Серeda І. Хімічна технологія : підручник. Ч.2 – К.: Вища школа, 1980. – 281 с.
5. Шкідливі речовини та їх небезпека. Лекція з дисципліни «Основи охорони праці» [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://library.if.ua/book/9/938.html>
6. Коток В.А., Мізін В.А., Снар І.В. Виробництво стиролу каталітичним дегідруванням етилбензолу : методичні вказівки. – Дніпро: ДВНЗ УДХТУ, 2017. –20 с.
7. Мізін В.А., Рудницький А.Г. Виробництво стиролу каталітичним дегідруванням етилбензолу : методичні вказівки. – Дніпропетровськ: УДХТУ, 2003. – 20 с.
8. Лукінюк М. В. Автоматизація типових технологічних процесів: технологічні об'єкти керування та схеми автоматизації: навч. посіб. / М. В. Лукінюк; Національний технічний ун-т України «Київський політехнічний ін-т». – К.: НТУУ «КПІ», 2008. – 236 с.
9. Проектування систем керування: навч. посібн. / М. З. Кваско, Я. Ю. Жураковський, А. І. Жученко, В. В. Миленький – К. : НТУУ «КПІ», 2014. – 342 с.
10. Трегуб В.Г. Проектування систем автоматизації / В.Г.Трегуб - Ліра-К, 2019. – 344с.

11. Ельперін І. В. Автоматизація виробничих процесів. Київ : Ліра – К, 2021.
12. Ладанюк А.П., Заєць Н.А., Власенко Л.О. Сучасні технології конструювання систем автоматизації складних об'єктів (мережеві структури, адаптація, діагностика та прогнозування). Київ : Ліра – К, 2020.
13. Ладієва Л.Р. Оптимальне керування системами.: Навчальний посібник. - К.:НМЦ ВО, 2000. - 187с. – С. 7–12.
14. Пупена О. М., Ельперін І. В., Луцька Н. М., Ладанюк А. П. Промислові мережі та інтеграційні технології в автоматизованих системах. Навчальний посібник. — К.: Ліра-К, 2011. — 500с.
15. Автоматизація виробничих процесів / І.В.Ельперін, О.М.Пупена, В.М.Сідлецький [та ін.] / Вид. 2-ге, виправлене. - К.: Ліра-К, 2021. – 378 с. ISBN 978-966-2609-81-3
16. Бочков В.М. Обладнання автоматизованого виробництва / В.М.Бочков, Р.І.Сілін. - Львів: В-во Львівської політехніки, 2015. - 404 с.
17. Методи та засоби автоматичного керування технологічними процесами: Навчальний посібник / І. В. Дубінін, М. І. Дорошенко, М. В. Руднева та ін. – К.: ВПЦ “Київський університет”, 2011. – 536 с.
18. Поліщук Є.С., Ванько В.М. Вимірювальні перетворювачі (сенсори). – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2015. – 584с.
19. Intelligent Control of Robotic Systems / Laxmidhar Behera [and others]. CRC Press, 2020. – 696 p.
20. Жученко А.І. Ладієва Л.Р., Дубік Р.М. Динамічна оптимізація з використанням MATLAB та SIMULINK Київ, СПД Моляр, 2010 - 230 С.
21. Коржик М. В. Моделювання об'єктів та систем керування засобами MatLab: навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл. / М. В. Коржик. – Київ : НТУУ “КПІ”, 2016. – 174 с.
22. Ладанюк, А. П. Теорія автоматичного керування технологічними об'єктами : навч. посіб. / А. П. Ладанюк, К. С. Архангельська , Л. О. Власенко — К.: НУХТ, 2014. — 274 с.

23. Приклади застосування теорії керування в промисловості / О.С. Івахненко, І.В. Плаксін // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – 2018. – № 37 (1292). – С. 109-117.

24. Синєглазов В.М. Автоматизація технологічних процесів / В.М.Синєглазов, І.Ю.Сергєєв - К.: Київ, 2015. – 444 с.

25. Попович М.Г. Теорія автоматичного керування. / М.Г. Попович, О.В. Ковальчук - К.: Либідь, 2007. - 656 с.

26. Жученко А.І., Ярощук Л.Д. Спеціальні розділи математики для дослідження комп'ютерних систем: Навч. посіб. - К.: ІВЦ «Видавництво “Політехніка”», 2002. -208 с.

27. Жученко А. І., Ярощук Л. Д., Попович Н. В., Попович О. В. Задачі автоматизації технологічних процесів при створенні системи ISO // Вісник національного технічного університету «КПІ» серія «Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження», 2020, №3 (19). - С. 42 - 51.

28. Жученко А.І. Ладієва Л.Р.,Дубік Р.М. Динамічна оптимізація з використанням MATLAB та SIMULINK Київ, СПД Моляр, 2010 - 230 С.