Шаблон (версія 01)

Затверджений наказом ректора СНУ ім. В. Даля

10.07.2019 № 199/17

СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ІМЕНІ ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ

# Факультет інформаційних технологій та електроніки

# Кафедра комп’ютерно-інтегрованих систем управління

## ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до магістерської науково-дослідної роботи

освітній ступінь: магістр

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

(шифр і назва спеціальності)

спеціалізація \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

(назва спеціалізації)

на тему «Розробка та дослідження комп'ютерно-інтегрованої системи контролю та управління економайзером у процесі ректифікації етанолу»

Виконав: студент групи \_АТП-23дм\_ \_\_\_\_\_\_\_\_\_ А.В. Раков

( підпис )

Керівник **\_\_\_\_\_\_\_\_\_** М.Г. Лорія

( підпис )

Завідувачка кафедри \_\_\_\_\_\_\_\_\_ М.Г. Лорія

( підпис )

Рецензент \_\_\_\_\_\_\_\_\_ О.Б. Целіщев

( підпис )

Київ 2024

**СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

**імені ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ**

# Факультет: Інформаційних технологій та електроніки

# Кафедра: Комп’ютерно-інтегрованих систем управління

Освітньо-кваліфікаційний рівень: Магістр

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

# ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач каф. КІСУ

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ М.Г.Лорія

«\_\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ 2024 року

**ЗАВДАННЯ**

**НА МАГІСТЕРСЬКУ НАУКОВО-ДОСЛІДНУ РОБОТУ**

**ЗДОБУВАЧУ ВИЩОЇ ОСВІТИ**

**РАКОВУ АНДРІЮ ВОЛОДИМИРОВИЧУ**

1. **Тема магістерської НДР:** «Розробка та дослідження комп'ютерно-інтегрованої системи контролю та управління економайзером у процесі ректифікації етанолу»

2. **Керівник роботи**: проф.. Лорія М.Г.

Затверджені наказом вищого навчального закладу №91\_14.04 від 25.11.2024 р.

3. **Термін подання студентом роботи** 11 грудня 2024 р.

4. **Висхідні дані до роботи**:

4.1.Технологічний регламент виробництва.

4.2.Інструкція оператора по експлуатації АСУ ТП.

4.4.Публікації по автоматизованому управлінню технологічними процесами\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_.

4.5.Публікації по моделюванню складних систем контролю та управлінню технологічними процесами \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_.

5. **Зміст розрахунково-пояснювальної записки** (перелік питань, які потрібно розробити):

5.1.Вступ.

5.2.Аналіз сучасного стану автоматизації технологічних процесів \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_.

5.3.Аналіз автоматизованих систем контролю та управління технологічними процесами \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ і розробка завдань для виконання магістерської науково-дослідної роботи.

5.4.Розробка та аналіз математичних моделей процесу \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_.

5.5.Теоретичні дослідження математичних моделей \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_.

5.6.Розробка мнемосхем комп'ютерно-інтегрованої системи управління (КІСУ) процесом \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_.

5.7.Розробка програмного забезпечення роботи КІСУ ТП в динамічному режимі роботи.

5.8.Аналіз результатів теоретичних досліджень.

5.9. Висновки.

6. **Перелік графічного матеріалу** (з точним зазначенням обов’язкових креслень)

6.1. Мнемосхеми КІСУ процесом \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_.

6.1.1.Основна мнемосхема контролю та управління \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_.

6.1.2.Архітектура КІСУ ТП.

6.1.3.Мнемосхеми рапортів і повідомлень.

6.2.Мнемосхема роботи КІСУ ТП в динамічному режимі роботи.

6.4.Математичні моделі \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_.

6.3.Статичні та динамічні характеристики \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_.

6.5.Результати оптимального управління \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_.

7. **Дата видачі завдання:** 11 жовтня 2024р.

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| №  з/п | Назва етапів дипломного роботи | Термін виконання етапів роботи | Примітка |
| 1 | Аналіз сучасного стану автоматизації технологічних процесів. | 1.11.2024 |  |
| 2. | Аналіз автоматизованих систем контролю та управління технологічними процесами \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ і розробка завдань для виконання магістерської науково-дослідної роботи. | 1.11.2024 |  |
| 3. | Розробка математичних моделей процесу \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_. | 5.11.2024 |  |
| 4. | Розробка мнемосхем комп'ютерно-інтегрованої системи управління (КІСУ) процесом \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_. | 8.11.2024 |  |
| 5. | Розробка програмного забезпечення роботи КІСУ ТП в динамічному режимі роботи. | 15.11.2024 |  |
| 6. | Теоретичні дослідження математичних моделей процесу \_\_\_\_\_\_\_\_\_. | 25.11.2024 |  |
| 7. | Аналіз результатів теоретичних досліджень. | 1.12.2024 |  |
| 8. | Оформлення пояснювальної записки дипломного проекту та презентації. | 14.12.2024 |  |

Здобувач вищої освіти \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ А.В. Раков

Керівник магістерської НДР \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ М.Г. Лорія

# РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка 80 сторінок, 10 рисунків, 10 літературних джерел.

КОМП’ЮТЕРНА СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ, ВІДПАРЮВАННЯ ПРОЦЕСНОГО КОНДЕНСАТУ, АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ, АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОБ’ЄКТА КЕРУВАННЯ, ВХІДНІ-ВИХІДНІ КООРДИНАТИ, СТРУКТУРНО-ЛОГІЧНА СХЕМА, МНЕМОСХЕМА, ПЕРЕДАВАЛЬНА ФУНКЦІЯ, МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ, РІВЕНЬ, ЧАСТОТНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ, НАСТРОЮВАННЯ РЕГУЛЯТОРА ПЕРЕХІДНИЙ ПРОЦЕС, СИНТЕЗ САР.

Об’єктом дослідження є економайзер для ректифікації в виробництві етанолу.

Мета магістерської роботи проекту: розробка та дослідження комп'ютерно-інтегрованої системи контролю та управління економайзером для ректифікації в виробництві етанолу.

Метод дослідження – теоретичний з використанням персонального комп’ютера, пакета Maple, SCADA-додатку TRACE MODE.

У ході виконання проекту отримані наступні результати: аналіз сучасного стану автоматизації технологічних процесів, аналіз виробництва етилену, аналіз технологічного процесу у відпарюванні процесного конденсату, аналіз процесу у відпарюванні конденсату як об’єкта керування, розроблена математична модель, побудовані частотні характеристики та перехідні процеси.

**ЗМІСТ**

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ……………………………………………6

ВСТУП…………………………………………………………………………….7

1.ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД…………………………………………..………....10

2. ОПИС ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ……………………………………..23

3. АПАРАТУРНЕ ОФОРМЛЕННЯ ПРОЦЕСУ ВІДПАРЮВАННЯ ПРОЦЕСНОГО КОНДЕНСАТУ………………………………………………. 28

4**.** АНАЛІЗ АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ КОНТРОЛЮ ТА КЕРУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ ВИРОБНИЦТВА ЕТАНОЛУ……………………………..………………………….……………...28

5.СИНТЕЗ АВТОМАТИЧНОЇ СИСТЕМИ РЕГУЛЮВАННЯ.........................32

6.РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ОБ’ЄКТА КЕРУВАННЯ…...45

ВИСНОВОК……………………………………………………………………...79

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ………………………………………….....80

# ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

АСУ ТП – автоматизована система керування технологічними процесами;

ФЧХ – фазочастотна характеристика;

АЧХ – амплітудно-частотна характеристика;

УЧХ – уявна частотна характеристика;

ДЧХ – дійсна частотна характеристика;

ПФ – передавальна функція;

АСР – автоматична система регулювання;

САР – система автоматичного регулювання;

ПІ – пропорційне-інтегральний;

АР – автоматичний регулятор;

ОР – об’єкт регулювання;

ВП – вимірювальний перетворювач.

КІСУ – комп’ютерно-інтегровані системи управління;

ФСА – функціональна схема автоматизації;

РО – регулюючий орган.

**ВСТУП**

Автоматизація є фундаментальним компонентом сучасного науково-технічного прогресу, що охоплює комплекс методологічних, технічних і програмних засобів для автоматичного контролю, моніторингу та управління технологічними процесами без прямої участі людини. В умовах четвертої промислової революції автоматизація відіграє вирішальну роль у підвищенні продуктивності праці, оптимізації витрат ресурсів і забезпеченні стабільного розвитку підприємств.

#### Інтегровані Системи Автоматизації

Сучасні системи автоматизації базуються на складних комп'ютерних системах та інформаційних технологіях, які забезпечують взаємодію різних компонентів у режимі реального часу. Це не просто набір незалежних елементів, а цілісні рішення, орієнтовані на досягнення певних цілей, таких як підвищення ефективності виробничих процесів, зниження затрат та поліпшення якості продукції.

Основні типи структур автоматизованих систем визначаються їхніми функціями та задачами:

* **Функціональні структури** забезпечують автоматизацію процесів збору, обробки, передачі та зберігання даних. Це дозволяє оперативно реагувати на зміни в технологічному процесі та приймати оптимальні управлінські рішення.
* **Алгоритмічні структури** реалізують конкретні алгоритми обробки даних, що дозволяє адаптувати систему до різних виробничих сценаріїв та вимог.
* **Технічні структури** складаються з апаратних засобів та програмного забезпечення, що забезпечують стабільну роботу всіх компонентів системи в єдиній інтегрованій мережі.

#### Інтелектуалізація Автоматизованих Систем Управління

Останніми роками з'явилася тенденція до інтелектуалізації автоматизованих систем управління (АСУ). Використання технологій штучного інтелекту, машинного навчання та великих даних дозволяє створювати більш адаптивні, самоналагоджувальні системи, які здатні самостійно оптимізувати роботу без втручання людини. Це відкриває нові можливості для управління складними техніко-економічними об'єктами, такими як промислові виробництва, транспортні системи та енергетичні мережі.

Інтелектуальні системи управління мають значні переваги перед традиційними методами, зокрема:

* **Предиктивне обслуговування та управління**: Використання аналітики великих даних та моделей машинного навчання для прогнозування поломок та оптимізації витрат на технічне обслуговування.
* **Адаптивні рішення в реальному часі**: Автоматичне налаштування параметрів виробничих процесів для досягнення максимальної продуктивності та мінімізації витрат.
* **Гнучкі виробничі лінії**: Здатність швидко адаптуватися до змін ринку, виробляючи продукти, що відповідають вимогам споживачів, без значних затрат на перепланування виробничих процесів.

#### Виклики та Перспективи Автоматизації

Інтенсивний розвиток автоматизації створює як нові можливості, так і певні виклики. Наприклад, інтеграція інтелектуальних компонентів в автоматизовані системи потребує значних інвестицій у дослідження та розробку. Окрім того, необхідність забезпечення кібербезпеки таких систем стає ключовим завданням, оскільки інтегровані мережі стають більш вразливими до кіберзагроз.

Водночас, розвиток технологій автоматизації сприяє створенню робочих місць нового типу, що вимагають висококваліфікованих спеціалістів у галузі програмування, аналітики даних, робототехніки та кібербезпеки. Це відкриває нові можливості для професійного розвитку та підвищення кваліфікації фахівців.

Автоматизація залишається ключовим фактором у підвищенні ефективності виробничих процесів і оптимізації використання ресурсів. Інтеграція інтелектуальних технологій, таких як штучний інтелект, предиктивна аналітика та машинне навчання, значно розширює можливості автоматизованих систем управління, роблячи їх ще більш гнучкими, надійними та ефективними. Водночас, розвиток таких систем потребує уваги до питань кібербезпеки, інвестицій у навчання персоналу та адаптації до нових умов ринку. Усе це разом забезпечує стійкий розвиток галузі в умовах сучасних викликів та змін.

**1 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД**

**1.1 Загальна характеристика виробництва етанолу в Україні** Етанол (C₂H₅OH), або етиловий спирт, є важливим продуктом для харчової, хімічної, фармацевтичної та паливної промисловості. В Україні виробництво етанолу має давню історію і продовжує відігравати значну роль в економіці країни, особливо завдяки розвитку аграрного сектору та експорту біоетанолу. У цій статті розглянемо сучасний стан виробництва етанолу в Україні, ключові підприємства, технологічні процеси та проблеми галузі, а також перспективи її розвитку.

Виробництво етанолу в Україні розпочалося ще в ХІХ столітті, але найбільш інтенсивно галузь розвивалася в радянські часи, коли було створено велику кількість спиртових заводів для харчових, технічних та промислових потреб. Після здобуття незалежності виробництво етанолу стикнулося з численними викликами, такими як реструктуризація економіки, зміна форм власності та проблеми з нелегальним виробництвом. Однак, попри ці труднощі, Україна залишається одним із провідних виробників етанолу в Європі, з великим потенціалом для розвитку, особливо в контексті біоетанолу.

На сьогоднішній день виробництво етанолу в Україні здійснюється як державними, так і приватними підприємствами. Однією з провідних структур у цій галузі є Державне підприємство "Укрспирт", яке об’єднує близько 40 спиртових заводів. "Укрспирт" є найбільшим виробником етанолу в країні, на його долю припадає близько 90% загального виробництва.

До основних заводів, що входять до складу ДП "Укрспирт", належать:

1. **Лужанський спиртзавод** (Чернівецька область) – один із найстаріших виробників етанолу в Україні.
2. **Зарубинський спиртзавод** (Тернопільська область) – спеціалізується на виробництві харчового спирту.
3. **Новоселицький спиртзавод** (Чернівецька область) – виробляє харчовий та технічний етанол.

Також є ряд приватних підприємств, які активно розвивають виробництво етанолу, особливо біоетанолу. Серед таких підприємств можна відзначити:

* **Гнідавський спиртзавод** (Волинська область) – спеціалізується на виробництві біоетанолу, має сучасне обладнання і є одним із найактивніших підприємств в секторі відновлюваних джерел палива.
* **Дубов’язівський спиртзавод** (Сумська область) – приватне підприємство, що також зосереджується на виробництві біоетанолу.
* **Барський спиртзавод** (Вінницька область) – виробляє етанол високої якості для харчової промисловості.

Виробництво етанолу в Україні базується на традиційних та сучасних технологіях, зокрема на основі ферментації вуглеводневих продуктів. Основними джерелами сировини є зернові культури (пшениця, кукурудза, ячмінь), картопля, а також цукрові буряки.

### Основні етапи технологічного процесу:

1. **Ферментація** – перетворення цукрів (вуглеводів) у спирт під дією дріжджів. Це найбільш критичний етап, під час якого сировина перетворюється на етанол.
2. **Дистиляція** – процес виділення етанолу із суміші води та продуктів ферментації шляхом нагрівання. Дистиляція дозволяє отримати чистий спирт.
3. **Ректифікація** – повторне очищення етанолу для досягнення необхідної концентрації. Для отримання харчового спирту потрібна висока чистота продукту.

У контексті виробництва біоетанолу також використовуються спеціальні технології, що дозволяють отримувати спирт із сировини, яка не конкурує з продуктами харчування. Біоетанол активно використовується як екологічне паливо, оскільки дозволяє знижувати викиди парникових газів.

Виробництво етанолу має важливе значення для економіки України з кількох причин:

* **Економічний ефект**: виробництво етанолу забезпечує робочі місця, особливо в сільських регіонах, де розташовані спиртові заводи. Багато підприємств є важливими роботодавцями та джерелом податкових надходжень для місцевих бюджетів.
* **Експортний потенціал**: Україна є важливим експортером етанолу до країн Європи. Зростаючий попит на біоетанол у ЄС відкриває нові можливості для українських виробників.
* **Енергетична незалежність**: виробництво біоетанолу може сприяти зниженню залежності України від імпорту викопних палив, оскільки біоетанол можна використовувати як додаток до бензину.

Окрім економічної вигоди, виробництво біоетанолу сприяє екологічній безпеці. Біоетанол є відновлюваним джерелом енергії, що допомагає знижувати викиди СО₂ і покращувати якість повітря.

Незважаючи на позитивні перспективи, виробництво етанолу в Україні стикається з низкою проблем:

* **Тіньовий ринок**: нелегальне виробництво етанолу залишається серйозною проблемою, що спричиняє недоотримання податкових надходжень.
* **Застарілі виробничі потужності**: більшість спиртових заводів, особливо державних, потребують модернізації для підвищення енергоефективності.
* **Нестача інвестицій**: для розвитку біоетанолу та модернізації підприємств потрібні значні капіталовкладення, які не завжди є доступними.
* **Сировинна база**: стабільне забезпечення підприємств сировиною, зокрема зерновими культурами, залежить від врожаїв та світових цін, що створює ризики для стабільності виробництва.

Перспективи розвитку виробництва етанолу в Україні пов'язані з кількома ключовими напрямами:

* **Модернізація підприємств**: впровадження новітніх технологій та модернізація старих заводів дозволить підвищити ефективність виробництва та знизити витрати.
* **Розвиток біоетанолу**: зростаючий попит на біоетанол у Європі та світі створює нові можливості для експорту та заміщення імпортних нафтопродуктів.
* **Інвестиції**: залучення іноземних та внутрішніх інвестицій для розвитку галузі, зокрема для покращення виробничих потужностей та розвитку нових продуктів.

Виробництво етанолу є важливою галуззю економіки України з великим потенціалом для розвитку, особливо в контексті біоетанолу. Попри наявні проблеми, пов'язані із застарілими потужностями, нестачею інвестицій та нелегальним ринком, модернізація та розвиток екологічно чистих технологій може значно покращити ситуацію в галузі.

Подальше нарощування виробництва етанолу та біоетанолу може сприяти енергетичній незалежності країни

.

**1.2 Виробництво етанолу**

Етанол (C₂H₅OH) є важливим продуктом для багатьох галузей, включаючи харчову, хімічну, фармацевтичну промисловість, а також для виробництва біопалива. В Україні етанол використовується як сировина для алкогольних напоїв, у медичній і косметичній продукції, та як біоетанол, що має перспективу як джерело чистої енергії. У статті розглянуто основні аспекти виробництва етанолу, ключові хімічні реакції, технологічні процеси, виклики та перспективи розвитку в Україні.

Виробництво етанолу зазвичай базується на процесі ферментації. Основна хімічна реакція, що лежить в основі цього процесу, — це перетворення глюкози (C₆H₁₂O₆) в етанол і вуглекислий газ під дією дріжджів:

C6H12O6→2C2H5OH+2CO2

Цей процес є екзотермічним і відбувається при кімнатних температурах, за умов анаеробного середовища.

Для отримання етанолу використовуються різні типи сировини, такі як зернові культури (пшениця, кукурудза) та цукрові буряки. Ці ресурси містять вуглеводи, які через ряд хімічних і біохімічних процесів перетворюються на етанол.

1. **Гідроліз крохмалю:** Для зернових культур спочатку потрібно перетворити крохмаль у ферментовані цукри. Це досягається через гідроліз, де крохмаль (C₆H₁₀O₅)ₙ під дією ферментів або кислот розкладається до глюкози:

(C6H10O5)n+nH2O→nC6H12O6

1. **Ферментація:** Після гідролізу отримані цукри (наприклад, глюкоза) зброджуються дріжджами. Ця реакція описана вище, де глюкоза перетворюється в етанол і CO₂.
2. **Дистиляція:** Після ферментації етанол утворюється в суміші з водою та іншими побічними продуктами. Для відділення етанолу застосовується процес дистиляції, при якому розчин нагрівають, а етанол випаровується при температурі 78.37°C, оскільки його температура кипіння є нижчою за воду.
3. **Ректифікація:** Для підвищення концентрації етанолу використовують ректифікацію, де за допомогою колони етанол додатково очищується від домішок і підвищується його вміст до необхідного рівня — 96% або більше, залежно від кінцевого застосування.

В Україні основними джерелами сировини для етанолу є зернові культури та цукрові буряки. Ці джерела є досить доступними завдяки сприятливим кліматичним умовам та розвинутому сільському господарству.

Окрім харчового етанолу, виробляється також біоетанол, який є частиною паливного сектора. Біоетанол змішується з бензином і використовується для зменшення викидів парникових газів та зниження залежності від викопного палива.

1. **Висока енергоємність процесу:** Ферментація та дистиляція потребують значної кількості енергії. Основна частина витрат припадає на дистиляцію, оскільки для відділення етанолу від води необхідно значне нагрівання.
2. **Зношування обладнання:** У процесі виробництва, особливо під час дистиляції, обладнання піддається зносу через високі температури і хімічний вплив. Це потребує регулярного обслуговування та інвестицій у модернізацію.
3. **Екологічні аспекти:** Виробництво етанолу може мати негативний вплив на довкілля через викиди вуглекислого газу під час ферментації та забруднення стічних вод. Впровадження сучасних систем очищення і контролю за стічними водами є необхідним для мінімізації шкоди.
4. **Утилізація побічних продуктів:** Під час виробництва утворюються великі обсяги CO₂ та залишкової біомаси. Використання вуглекислого газу в інших промислових процесах, таких як виробництво газованих напоїв, може підвищити ефективність виробництва та зменшити екологічний вплив.

Виробництво етанолу в Україні має значний потенціал для подальшого зростання, особливо завдяки розвитку біоетанолу як частини зеленої енергетики.

Модернізація технологічних процесів, таких як більш ефективний гідроліз крохмалю та впровадження енергозберігаючих систем дистиляції, дозволить підвищити ефективність виробництва. Використання нових ферментів та технологій для прискорення ферментації дозволить знизити витрати і підвищити рентабельність.

Підвищення частки біоетанолу в складі палива може суттєво зменшити викиди CO₂ у транспортному секторі, що відповідає глобальним тенденціям декарбонізації. Україна, як аграрна країна, має можливість розширити свої виробничі потужності з біоетанолу для внутрішнього споживання та експорту.

Ефективне управління побічними продуктами, такими як CO₂ та біомаса, є важливою складовою підвищення екологічної безпеки виробництва. Використання побічних газів для промислових потреб і біомаси як добрива або палива дозволить знизити екологічний вплив та підвищити стійкість виробничих процесів.

Виробництво етанолу є важливим напрямком розвитку української хімічної та енергетичної промисловості. Технології ферментації та дистиляції є основними процесами для отримання етанолу, причому кожен з них має свої специфічні виклики і вимоги.

Застосування новітніх технологій, модернізація обладнання та впровадження екологічно чистих рішень допоможуть зробити виробництво більш ефективним та екологічно відповідальним.

**1.3 Сфери застосування етанолу**

Етанол (C₂H₅OH) є одним з найпоширеніших органічних сполук, відомих людству протягом тисячоліть. Його універсальність обумовлена як хімічними властивостями, так і відносною легкістю виробництва з різних джерел сировини. Етанол широко застосовується у харчовій промисловості, хімічній індустрії, фармацевтиці, медицині, а також як біопаливо.

## 1. Харчова промисловість

### 1.1 Виробництво алкогольних напоїв

Етанол є головним компонентом алкогольних напоїв, таких як пиво, вино, горілка, коньяк та інші. У процесі ферментації дріжджі перетворюють цукри на етанол і вуглекислий газ:

C6H12O6→2C2H5OH+2CO2

Алкогольна промисловість є однією з найстаріших форм використання етанолу, і на сьогодні вона продовжує займати значну частку у світовій економіці.

### 1.2 Консервування та ароматизатори

Етанол також використовується як консервант у виробництві харчових продуктів, оскільки він має антисептичні властивості. Він дозволяє зберігати продукти тривалий час, запобігаючи розвитку мікроорганізмів. Додатково, етанол входить до складу багатьох ароматичних добавок та екстрактів (наприклад, ванільний екстракт).

## 2. Фармацевтика та медицина

### 2.1 Антисептики та дезінфікуючі засоби

Етанол є потужним антисептиком і дезінфікуючим засобом, що використовується для знищення бактерій, вірусів і грибків. Він є основним компонентом багатьох антисептичних розчинів, таких як медичний спирт (70% розчин етанолу), що застосовується для стерилізації шкіри перед хірургічними операціями або ін’єкціями.

### 2.2 Фармацевтична сировина

Етанол використовується як розчинник у виробництві ліків та медичних препаратів. Він дозволяє розчиняти як активні інгредієнти, так і допоміжні речовини, забезпечуючи однорідність і стабільність ліків. Багато сиропів, настоянок та рідких ліків містять етанол як розчинник.

## 3. Хімічна промисловість

### 3.1 Розчинник та сировина для синтезу

Етанол є універсальним розчинником у хімічній промисловості. Його використовують для розчинення смол, жирів, олій, фарб та багатьох інших сполук. Окрім того, він є важливою сировиною для виробництва таких сполук, як етилен, етиловий ефір, етилацетат, оцтовий альдегід та інші.

Наприклад, етанол може перетворюватись на етилен (C₂H₄) через дегідратацію:

C2H5OH→C2H4+H2O

Етилен, у свою чергу, є базовою сировиною для виробництва поліетилену, одного з найбільш поширених пластмас.

### 3.2 Виробництво косметичних продуктів

Етанол широко використовується в косметології для виробництва парфумерії, лосьйонів, дезодорантів і косметичних засобів. Він діє як розчинник для ефірних олій, ароматичних речовин, барвників і стабілізаторів. Завдяки своїй легкій леткості, етанол сприяє швидкому випаровуванню косметичних продуктів з поверхні шкіри, не залишаючи слідів.

## 4. Енергетика: біоетанол як паливо

### 4.1 Біоетанол як замінник бензину

Однією з найважливіших сфер застосування етанолу в сучасному світі є його використання як альтернативного палива для автомобілів. Біоетанол виробляється з рослинної сировини, такої як кукурудза, цукрова тростина або цукровий буряк, і використовується як компонент для виробництва паливних сумішей.

Суміш бензину з етанолом (E10 або E85, де цифра позначає відсотковий вміст етанолу) є поширеним біопаливом у багатьох країнах, оскільки вона дозволяє знизити викиди вуглекислого газу та інших шкідливих речовин.

### 4.2 Відновлювальна енергія та екологічні переваги

Використання біоетанолу як палива дозволяє скоротити залежність від викопних палив та зменшити викиди парникових газів. Завдяки циклічності процесу фотосинтезу, рослини, що використовуються для виробництва етанолу, поглинають CO₂, тим самим компенсуючи викиди, що виникають під час його спалювання.

## 5. Лабораторні дослідження та наукові розробки

Етанол широко використовується в лабораторних умовах як розчинник для різних хімічних та біохімічних реакцій. Його застосовують для очищення та екстрагування речовин, а також для стерилізації обладнання. У мікробіологічних лабораторіях етанол використовують для зберігання біологічних зразків та дезінфекції.

### 5.1 Етанол у біотехнології

Етанол відіграє ключову роль у процесах біотехнологічного виробництва, включаючи ферментацію для отримання різних біопродуктів. У генетичній інженерії та молекулярній біології етанол використовується для осадження ДНК під час ізоляції нуклеїнових кислот.

## 6. Побутове використання

Етанол також знаходить широке застосування у побуті. Його використовують як очищувач для скла, поверхонь, а також як розчинник у домашніх хімічних продуктах. Його антисептичні властивості роблять етанол ефективним засобом для санітарної обробки в домашніх умовах.

Етанол — це багатофункціональна речовина з широким спектром застосувань, що охоплює харчову, хімічну, фармацевтичну, енергетичну та інші промисловості. Він є важливим компонентом у виробництві алкогольних напоїв, лікарських засобів, косметики, а також як екологічно чисте паливо для автомобілів.

Завдяки універсальним хімічним властивостям і можливості виробництва з відновлювальних ресурсів, етанол залишається важливим елементом у стратегіях переходу до сталого розвитку, зменшення викидів парникових газів та досягнення енергетичної незалежності.

**1.3 Хімічна та принципова схеми виробництва етанолу**

## Хімічна схема виробництва етанолу

Основним методом промислового виробництва етанолу є гідратація етилену, яка полягає у реакції етилену з водою у присутності каталізатора. Ця реакція відбувається за високих температур і тиску. Окрім того, значну роль відіграє ферментація вуглеводнів, особливо у виробництві біоетанолу.

### 1. Гідратація етилену

Цей метод є найбільш поширеним у промисловості. Етилен (C₂H₄), отриманий шляхом крекінгу нафтопродуктів, реагує з водою за наступною реакцією:

C2H4+H2O→C2H5OH

Реакція відбувається в присутності фосфорної кислоти як каталізатора за температури 300°C і тиску 6-7 МПа. Вона забезпечує високий вихід етанолу і є економічно вигідною для масового виробництва.

### 2. Ферментація цукрів

Цей метод широко використовується у виробництві біоетанолу з відновлювальних джерел, таких як кукурудза, цукрова тростина або пшениця. Ферментація ґрунтується на перетворенні цукрів у етанол за допомогою дріжджів. Загальна реакція виглядає так:

C6H12O6→2C2H5OH+2CO2​

Ферментація проходить при температурі 30-35°C в анаеробних умовах. Після ферментації етанол виділяється через дистиляцію.

### 3. Основні етапи хімічної схеми гідратації етилену:

1. **Подача етилену:** Газоподібний етилен подається у реактор разом з водою.
2. **Каталітична реакція:** Етилен проходить через реакційну зону за температури 300°C та тиску 6-7 МПа, де відбувається гідратація у присутності фосфорної кислоти.
3. **Охолодження продукту:** Отриманий етанол охолоджується і відокремлюється від неперетвореного етилену, води та інших домішок.
4. **Ректифікація:** Етанол очищується за допомогою дистиляції.

## Принципова схема виробництва етанолу

Принципова схема виробництва етанолу відображає ключові етапи технологічного процесу та обладнання, яке використовується для його реалізації. Залежно від джерела сировини, схеми можуть дещо відрізнятися, проте основні етапи є універсальними.

### 1. Зона підготовки сировини

Для гідратації етилену або ферментації необхідна відповідна сировина. У випадку з гідратацією етилен надходить з крекінг-установок, де попередньо очищується від домішок. Для ферментації цукрова сировина (наприклад, меласа) попередньо обробляється і готується для подачі у ферментаційні резервуари.

### 2. Реактор для гідратації етилену

У процесі гідратації етилен подається у реактор разом з водою. Реактор працює при високих температурах і тиску. Каталізатор (фосфорна кислота) сприяє перетворенню етилену в етанол. Готовий продукт виходить із реактора у газоподібному стані.

### 3. Ферментаційний резервуар

Для виробництва біоетанолу у ферментаційні резервуари додають дріжджі та сировину з високим вмістом цукрів. В анаеробних умовах відбувається ферментація, яка триває від кількох годин до кількох днів, залежно від температури і типу сировини.

### 4. Дистиляція та ректифікація

Продукти реакції (етанол і вода) або ферментації подаються до дистиляційних колон для виділення етанолу. У випадку ферментації додатково виділяються вуглекислий газ і побічні продукти. Після первинної дистиляції етанол проходить ректифікацію для досягнення високого ступеня чистоти (до 96%).

### 5. Охолодження та зберігання

Очищений етанол охолоджується і подається у резервуари для зберігання або відправляється на додаткову обробку (наприклад, денатурацію у випадку технічного етанолу).

### 6. Енергозбереження та утилізація тепла

Як і у випадку виробництва етилену, процес отримання етанолу супроводжується значними витратами енергії. Тому для підвищення ефективності на підприємствах використовуються системи рекуперації тепла. Це дозволяє зменшити загальні енергетичні витрати на підігрів сировини та охолодження продукту.

Етанол є важливим хімічним продуктом, який можна отримати кількома методами. Найпоширенішим є гідратація етилену, що використовується у хімічній промисловості, та ферментація, яка лежить в основі виробництва біоетанолу. Кожен метод має свої технологічні особливості, проте обидва забезпечують високий вихід етанолу та відіграють ключову роль у різних галузях економіки.

На рисунку 1.1 показана принципова схема виробництва етанолу, що відповідає наведеній вище хімічній схемі.

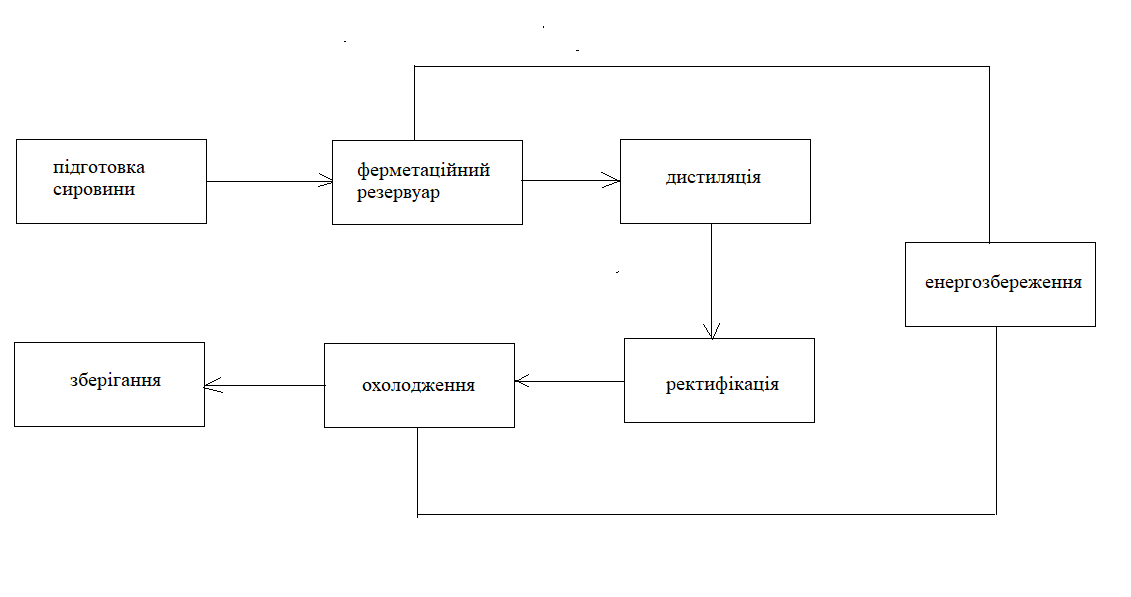


Рисунок 1.1 – Принципова схема виробництва етанолу.

**2 ОПИС ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ**

**Виробництво етанолу** — це складний багатостадійний процес, який передбачає ферментацію та ректифікацію сировини для отримання високоякісного етанолу. Етанол використовується як паливо, хімічна сировина і в харчовій промисловості. Потужність виробництва залежить від технології та масштабу установки, але може досягати сотень тисяч літрів на рік. У цій статті розглянуто процес ректифікації етанолу.

### Опис технологічного процесу виробництва етанолу

Основні етапи виробництва етанолу охоплюють ферментацію цукристих матеріалів і подальшу ректифікацію для очищення та виділення чистого етанолу.

#### 1. Підготовка та ферментація сировини

Процес починається з підготовки сировини — таких як цукрові буряки, кукурудза або інші крохмалисті культури. Сировина подрібнюється і обробляється ферментами, які розщеплюють крохмаль на цукри. Потім цукри піддаються ферментації за допомогою дріжджів, що перетворюють їх на етанол та вуглекислий газ. Ферментація триває 24–72 години при температурі 25-35°C.

#### 2. Перегонка (дистиляція)

Після завершення ферментації отриману спиртову суміш, яка містить етанол, воду та інші домішки, подають на першу стадію очищення — перегонку. Перегонка видаляє значну частину води та інших компонентів, дозволяючи отримати спирт із концентрацією близько 40-50%. Однак цього рівня чистоти недостатньо для більшості промислових або харчових застосувань, тому наступним етапом є ректифікація.

### Процес ректифікації етанолу

Ректифікація є критичним етапом для отримання високоякісного етанолу, що застосовується в харчовій промисловості, фармацевтиці або як паливо. Процес полягає у багатоступінчастій перегонці, під час якої відбувається розділення суміші за допомогою різниці у температурах кипіння компонентів.

#### Основні етапи ректифікації:

1. **Подача на ректифікаційну колону:** Суміш спирту та води після перегонки подається на ректифікаційну колону, яка є спеціалізованим апаратом з великою кількістю тарілок або насадок, що дозволяє ефективно розділяти рідину за допомогою тепла.
2. **Нагрівання і розділення компонентів:** Нижня частина колони підігрівається до температури, за якої вода залишається в рідкому стані, а етанол починає випаровуватися. Внаслідок того, що етанол має нижчу температуру кипіння (78,3°C) порівняно з водою, пари етанолу підіймаються вверх по колоні, де відбувається їх охолодження та конденсація.
3. **Очищення етанолу:** На кожному рівні колони відбувається випаровування та конденсація, що дозволяє поступово підвищувати чистоту етанолу, видаляючи домішки, зокрема вищі спирти, метанол та залишки води. В результаті на верхньому виході колони отримують етанол високої чистоти — до 96–97% концентрації.
4. **Відведення домішок і води:** Вода та важкі домішки збираються в нижній частині колони і відводяться як побічні продукти, які можуть бути використані для інших цілей або утилізовані. Деякі установки також передбачають додаткові стадії очищення, наприклад, адсорбцію на вугіллі або додаткову фракційну перегонку.

### Системи охолодження та рекуперації тепла

Для забезпечення енергоефективності процесу ректифікації застосовуються сучасні системи рекуперації тепла. Частина теплової енергії, що виділяється під час охолодження конденсованих парів, використовується для підігріву сировини або живлення інших технологічних процесів. Це дозволяє значно знизити споживання енергії.

#### Переваги рекуперації тепла:

* **Економія енергоресурсів:** Зменшення витрат на підігрівання сировини та перегонку.
* **Зменшення впливу на довкілля:** Зниження викидів тепла в атмосферу та економічне використання енергії.

### Зберігання та транспортування етанолу

Після завершення процесу ректифікації чистий етанол з концентрацією 96-97% зберігається в спеціальних резервуарах під тиском або при низькій температурі для уникнення втрат через випаровування. Етанол транспортується на подальші виробничі етапи або безпосередньо на ринок для використання у виробництві біопалива, харчових продуктів чи фармацевтичних засобів.

### Допоміжні установки та процеси

Крім основних технологічних стадій, виробництво етанолу також потребує наявності допоміжних установок, що забезпечують стабільність і безперервність роботи:

* **Установки підготовки води:** Вода, яка використовується в процесах перегонки та ректифікації, має бути очищена для запобігання корозії обладнання та впливу домішок на якість етанолу.
* **Системи очищення парів:** Системи для очищення викидів від залишкових парів спирту та інших продуктів після ректифікації для зменшення забруднення повітря.
* **Контроль за температурою та тиском:** Автоматизовані системи контролю, що забезпечують точність умов ректифікації та стабільність процесу.

Ректифікація етанолу є ключовим етапом у виробництві цього продукту. За допомогою багатоступінчастого процесу очищення досягається високий рівень чистоти етанолу, що дозволяє використовувати його в різних галузях. Системи рекуперації тепла та допоміжні установки підвищують ефективність процесу, знижують енергоспоживання та мінімізують негативний вплив на навколишнє середовище.

Ефективна ректифікація етанолу забезпечує високу якість продукту, що особливо важливо для різних сфер його застосування. Наприклад, у харчовій та фармацевтичній промисловості необхідно отримати етанол високої чистоти, що відповідає суворим стандартам. Водночас у біопаливі допускається менша чистота продукту, оскільки його основною функцією є згорання для отримання енергії.

### Вплив на екологію та стале виробництво

Окрім економічних вигод від зменшення енергоспоживання завдяки рекуперації тепла та оптимізації процесів, важливим фактором є екологічна складова виробництва етанолу. У сучасному виробництві використовуються такі методи, як зниження викидів парникових газів і утилізація побічних продуктів, щоб мінімізувати негативний вплив на навколишнє середовище.

**Основні екологічні переваги сучасних технологій:**

* **Зменшення викидів CO₂:** Біоетанол, отриманий з відновлюваних джерел, сприяє зниженню викидів парникових газів порівняно з викопними видами палива.
* **Утилізація відходів:** Побічні продукти ферментації та ректифікації можуть бути використані для виробництва кормів для тварин або як добрива.
* **Замкнуті системи водопостачання:** Використання очищених конденсатів та систем рекуперації води дозволяє значно зменшити водні ресурси, що використовуються у процесі.

### Перспективи розвитку технологій ректифікації

Інноваційні технології у сфері виробництва етанолу постійно розвиваються. Вже сьогодні на ринку з'являються технології, що спрямовані на зниження енергоспоживання під час ректифікації та максимізацію виходу етанолу з сировини.

**Основні напрямки вдосконалення процесів:**

1. **Енергозберігаючі технології:** Удосконалення теплових насосів, використання низькотемпературних процесів та впровадження нових систем рекуперації тепла.
2. **Оптимізація колон для ректифікації:** Нові конструкції ректифікаційних колон з більш ефективними тарілками та насадками, що зменшують витрати енергії на нагрівання та охолодження.
3. **Інтеграція з біоенергетикою:** Використання залишкових біомас у процесі виробництва етанолу для виробництва додаткової енергії.

Такі технологічні рішення не лише підвищують економічність виробництва, але й роблять його більш екологічним і сталим, сприяючи зменшенню залежності від викопних ресурсів та зниженню шкідливих викидів у атмосферу.

Ректифікація етанолу є ключовою стадією, яка дозволяє отримати високоякісний етанол для широкого спектра застосувань, від харчової промисловості до палива. Сучасні технології очищення, рекуперації тепла та зниження енергоспоживання забезпечують не лише економічну ефективність, але й мінімізацію впливу на навколишнє середовище. Тенденції розвитку в цьому секторі вказують на подальше вдосконалення процесів з акцентом на енергозбереження та екологічну стійкість виробництва.

**3 АПАРАТУРНЕ ОФОРМЛЕННЯ ПРОЦЕСУ ВІДПАРЮВАННЯ ПРОЦЕСНОГО КОНДЕНСАТУ**

Характеристика технологічного обладнання процесу відпарювання процесного конденсату представлена у табл. 3.1.

Таблица 3.1.

Характеристика технологічного обладнання

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| № об'єкта | Найменування об'єкта управління | Характеристика |
|
| 1 | 2 | 3 |
| 1 | Паровий економайзер Е–132 | Апарат кожухотрубний Діаметр DН = 500 мм Довжина трубок l = 3000 мм Поверхня трубок SТР = 41.7 м2 Умови в апараті: Міжтрубний простір:  Тиск: РРАБ = 4.0 МПа, РРАСЧ = 4.8 МПа Температура: ТРАБ ВХ = 380 оС, ТРАБ ВЫХ = 300 оС, ТРАСЧ = 440 оС Середа: пар Трубчатий простір:  Тиск: РРАБ = 3.8 МПа, РРАСЧ = 4.3 МПа Температура: ТРАБ ВХ = 240 оС, ТРАБ ВЫХ = 320 оС, ТРАСЧ = 440 оС Середа: відпарний газ Матеріал: 12Х18Н10Т, 20Х13 |

Регламентні номінальні значення технологічних параметрів процесу відпарювання процесного конденсату представлені в табл. 3.2.

Таблиця 3.2.

Регламентні номінальні значення технологічних параметрів

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| № объекта | Найменування об'єкта управління | Найменування технологічного параметра | Значення параметра | | |
| Номінальне | Допустиме відхилення | Сигналізація, блокування |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 1 | Паровий економайзер Е–132 | витрата пари на вході | 30 т / г | ±5 т / г |  |
| температура пари на вході | 380 оС | ±5 оС |  |
| тиск пари на вході | 4.0 МПа | ±0.05 МПа |  |
| витрати відпарного газу на виході | 30 т / г | ±5 т / г |  |
| температура відпарного газу на виході | 320 оС | ±5 оС |  |
| 2 | Колонна відпарки процессного конденсата С–131 | температура пари на вході | 300 оС | ±5 оС |  |
| тиск пари на вході | 3.8 МПа | ±0.1 МПа |  |
| тиск відпарного газа на виході | 3.8 МПа | ±0.05 МПа |  |
| температура відпарного газа на виході | 240 оС | ±5 оС |  |
| температура процессного конденсата на вході | 230 оС | ±5 оС |  |
| температура процессного конденсата в кубі | 250 оС | ±5 оС |  |
| колонна відпарки процессного конденсата | 16 КПа | ±1.0 КПа |  |
| рівень процессного конденсата в кубі | 2510 мм от дна (70 %) | ±150 мм от дна (±10 %) | вище 2810 (90 %) |
| нижче 2210 (50 %) |

**4. АНАЛІЗ АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ КОНТРОЛЮ ТА КЕРУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ ВИРОБНИЦТВА етанолу**

**4.1 Побудова Інформаційно-логічна схеми кожухотрубного теплообмінника**

Fn (z) Tn1(z) Tt1(z)

Tст(у)

Fт (х)

Тп2(у)

Рис.4.1 Інформаційно-логічна схема кожухотрубного теплообмінника

В теплообміннику відбувається нагрів газу, який витратою з температурою потрапляє у внутрішньо трубний простір теплообмінника. У між трубний простір подається теплоносій – відпарений газ витратою з температурою . На виході теплообмінника продукт має температуру , а теплоносій .

Процес теплообміну відбувається через стінки труб теплообмінника. Зміна витрат потоків або їх температур на вході призводить до зміни температури стінок трубок теплообмінника, а, відповідно, змінює інтенсивність процесу теплообміну. До вихідних координат слід віднести температуру стінок труб теплообмінника (мається на увазі усереднене значення) та температуру продукту на виході теплообмінника.

Температура продукту на виході теплообмінника регулюється зміною витрати теплоносія .

Витрату продукту частіше за все регулювати не має можливості. Ця витрата (навантаження на теплообмінник) є збурюючою координатою. Крім того, до збурюючих координат слід віднести температуру продукту та теплоносія на вході в теплообмінник та відповідно.

**4.2 Побудова Інформаційно-технологічної схеми трубопровода**

Розглянемо трубопровід як об’єкт керування. Оскільки витрата речовини, що транспортується по трубопроводу, визначається перепадом тиску на ділянці трубопроводу, тому саме ця величина є вихідною координатою. Перепад тиску може змінюватися за рахунок зміни витрати . В цьому випадку витрата є вхідною регулюючою координатою. До збурюючих координат трубопроводу слід віднести параметри, зміна яких має випадковий характер. Такими параметрами є тиск , що утворює насос або компресор, коефіцієнт динамічної в’язкості та густина речовини .

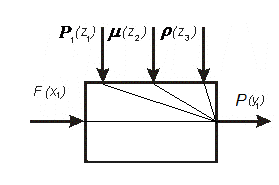


Рис. 4.2. Інформаційно-логічна схема трубопроводу

**5. СИНТЕЗ АВТОМАТИЧНОЇ СИСТЕМИ РЕГУЛЮВАННЯ**

Синтез систем автоматичного керування є фундаментальним етапом у процесі розробки автоматизованих систем, спрямованим на забезпечення виконання певних вимог, таких як стійкість і конкретні показники якості керування. Основними характеристиками якості систем керування є перерегулювання (overshoot) і час перехідного процесу. Синтез систем може виконуватися як за частотними, так і за часовими методами.

### Частотні методи синтезу

Частотні методи синтезу базуються на аналізі частотних характеристик системи, що дозволяє візуалізувати її поведінку у частотній області. Основним інструментом цього підходу є діаграми Боде, що відображають частотні характеристики системи у вигляді амплітудно-фазових залежностей. Такі методи дозволяють здійснювати аналіз за допомогою:

* **Амплітудно-частотної характеристики (АЧХ):** Відображає зміну амплітуди вихідного сигналу системи в залежності від частоти вхідного сигналу.
* **Фазочастотної характеристики (ФЧХ):** Показує зміну фази вихідного сигналу відносно вхідного при зміні частоти.

Аналіз частотних характеристик дає можливість визначити основні параметри для покращення показників якості системи: максимальну амплітуду частотної характеристики, резонансну частоту, смугу пропускання та запас стійкості системи за амплітудою і фазою. Такий підхід дозволяє оцінити динамічні властивості системи та забезпечити її коректну роботу в широкому діапазоні частот.

### Часові методи синтезу

Часові методи синтезу засновані на аналізі показників якості системи в часовій області, що дозволяє оцінити поведінку системи на основі перехідних процесів. Основна увага приділяється розташуванню полюсів та нулів передавальної функції системи, що визначають її динамічні властивості. Ключовими показниками, що враховуються при часовому аналізі, є:

* **Час перехідного процесу:** Час, за який система досягає стійкого стану після подачі збурення на вхід.
* **Перерегулювання (overshoot):** Максимальне відхилення вихідного сигналу від бажаного значення під час перехідного процесу.

Ці характеристики визначаються розташуванням полюсів системи у комплексній площині. Система є стійкою, якщо всі полюси знаходяться в лівій півплощині комплексної площини. Розташування полюсів ближче до уявної осі може спричиняти збільшення часу перехідного процесу та перерегулювання.

### Параметри налаштування регуляторів

Ефективне налаштування регуляторів є важливим аспектом синтезу систем автоматичного керування. Найчастіше використовуються ПІ (пропорційно-інтегральні) та ПІД (пропорційно-інтегрально-диференціальні) регулятори. Правильне налаштування їх параметрів забезпечує досягнення необхідних показників якості керування.

* **ПІ-регулятори:** Застосовують пропорційну та інтегральну складові для мінімізації стаціонарної помилки і підвищення стійкості системи.
* **ПІД-регулятори:** Крім пропорційної та інтегральної складових, використовують диференціальну складову для забезпечення більш точного контролю швидкості зміни помилки і зменшення часу перехідного процесу.

Параметри налаштування ПІД-регуляторів зазвичай визначаються через аналіз полюсів системи на комплексній площині, що дозволяє оптимізувати їх шляхом розв'язку системи рівнянь. Це підвищує точність налаштування і забезпечує досягнення необхідних характеристик керування.

### Синтез систем автоматичного керування

Синтез систем автоматичного керування є складним завданням, яке включає частотний та часовий аналіз для отримання бажаних характеристик якості. Частотні методи дозволяють оптимізувати частотні характеристики системи, зокрема запас стійкості, а часові методи — удосконалювати перехідні процеси. Правильний вибір та налаштування регуляторів, таких як ПІ та ПІД, забезпечує високоточне досягнення показників якості керування.

Синтез систем автоматичного керування вимагає систематичного підходу, де ключовими етапами є вибір відповідної стратегії управління, параметричне налаштування системи та забезпечення її стійкості в умовах впливу зовнішніх збурень і зміни параметрів об'єкта керування. У процесі синтезу необхідно враховувати як стійкість системи, так і показники якості керування, такі як точність, швидкодія, перерегулювання і стійкість до зовнішніх впливів.

### Баланс між стійкістю і швидкодією

Одним з основних викликів у процесі синтезу є досягнення оптимального компромісу між стійкістю і швидкодією системи. Підвищення швидкодії може призвести до зменшення запасу стійкості, що робить систему більш вразливою до нестабільності при зміні умов роботи або появі зовнішніх збурень. З іншого боку, підвищення запасу стійкості часто супроводжується збільшенням часу перехідного процесу, що негативно впливає на оперативність реакції системи.

Для досягнення цього балансу використовуються такі техніки, як:

* **Корекція фазових зсувів:** Це дозволяє покращити фазочастотні характеристики системи і підвищити запас стійкості без значного зниження швидкодії.
* **Застосування частотних компенсаторів:** За допомогою введення додаткових контурів у систему можна покращити поведінку системи на високих частотах і зменшити перерегулювання, що підвищує загальну стабільність системи.
* **Оптимізація розташування полюсів:** Зміна розташування полюсів у комплексній площині шляхом налаштування ПІД-регуляторів або використання більш складних адаптивних регуляторів може допомогти знайти баланс між швидкістю реакції системи та її стійкістю.

### Робастні системи керування

Для багатьох інженерних застосувань важливо забезпечити робастність системи, тобто її здатність зберігати стійкість і якісні характеристики в умовах невизначеності та варіацій параметрів об'єкта керування. Стандартні методи синтезу можуть не забезпечити бажаних результатів при значних відхиленнях параметрів об'єкта. У таких випадках застосовуються робастні методи керування, що дозволяють системі працювати стабільно в широкому діапазоні зміни параметрів або при наявності збурень.

Одним із найбільш відомих підходів у робастному керуванні є використання **методів H∞-синтезу**, які мінімізують максимальний вплив збурень на систему. Іншим поширеним підходом є застосування **μ-аналізу** для оцінки чутливості системи до зміни її параметрів і для розробки стратегії компенсації цих змін.

### Адаптивні системи керування

Адаптивні системи керування є одним із сучасних напрямків розвитку автоматичного керування, який дозволяє системі самостійно змінювати свої параметри в залежності від поточного стану об'єкта керування. Цей підхід забезпечує високу ефективність в умовах змінних режимів роботи та складної динаміки об'єкта.

Класичні методи адаптації передбачають **пряме** або **непряме адаптивне керування**. Прямі методи ґрунтуються на безпосередньому регулюванні параметрів регулятора, тоді як непрямі використовують ідентифікацію об'єкта для подальшого налаштування параметрів керування.

### Проблема субоптимальності

У реальних системах повна оптимізація всіх характеристик, зокрема стійкості, швидкодії та точності, може бути неможливою через наявність протиріч між різними показниками. У зв’язку з цим використовуються субоптимальні стратегії керування, що дозволяють досягти компромісу між різними критеріями. Зокрема, застосовуються методи оптимізації за критерієм Ляпунова або методи мінімізації функціоналів втрат для вибору найбільш ефективної структури регулятора і його параметрів.

### Перспективи розвитку

Синтез систем автоматичного керування продовжує активно розвиватися завдяки появі нових математичних методів та обчислювальних технологій. Перспективними напрямками є застосування **штучного інтелекту** та **методів машинного навчання** для адаптивного керування складними динамічними системами, а також використання **нейромережевих підходів** для вдосконалення синтезу систем керування, що дозволяє забезпечити підвищену стійкість та робастність в умовах невизначеності.

Таким чином, синтез систем автоматичного керування є комплексною задачею, яка вимагає інтеграції різних підходів — від класичних частотних і часових методів до сучасних адаптивних і робастних стратегій. Успішне рішення цієї задачі дозволяє створювати високоефективні системи, здатні працювати стабільно і надійно навіть у складних і змінних умовах експлуатації.

**6.1 Синтез каскадних систем керування**

Підвищення ефективності систем керування шляхом застосування багатоконтурних регуляторів

Якість системи автоматичного керування визначається комплексом характеристик, які залежать від динаміки об’єкта керування, структури регулятора, точності вимірювання початкових параметрів, а також від впливу зовнішніх збурень. У одноконтурних системах підвищення якості управління може бути досягнуто шляхом модифікації окремих елементів або параметрів системи. Наприклад, зменшення часу чистої затримки, зниження часу стабілізації вихідного сигналу або використання спеціальних виконавчих механізмів (позиціонерів) можуть значно покращити точність і чутливість системи. Введення диференціальних компонентів у регулятор також сприяє підвищенню швидкодії та загальної ефективності управління.

Однак, якщо внесені зміни не забезпечують необхідного рівня якості, доцільно розглянути застосування складніших структур керування, таких як багатоконтурні системи.

### Багатоконтурні системи керування

Одним із найбільш поширених підходів до підвищення якості систем керування є впровадження багатоконтурних або каскадних регуляторів. Основна ідея каскадної структури полягає в тому, що вихід зовнішнього контуру використовується для корекції вхідного сигналу внутрішнього контуру, створюючи додатковий рівень керування. У такій системі зовнішній контур забезпечує формування цільових параметрів, тоді як внутрішній контур відповідає за корекцію поведінки виконавчих органів.

### Переваги багатоконтурних систем

Основною перевагою багатоконтурної системи керування є підвищення точності та стійкості в умовах зовнішніх збурень і високої інерційності об'єкта. Внутрішній контур дозволяє реагувати на зовнішні збурення до того, як вони спричинять значні зміни на виході системи, забезпечуючи тим самим більш швидке і точне реагування. Це значно зменшує похибки управління, часто на порядок величини, у порівнянні з традиційними одноконтурними системами.

### Використання каскадних систем в автоматизованих технологічних процесах (АСУ ТП)

Багатоконтурні системи керування знайшли широке застосування в автоматизованих системах керування технологічними процесами (АСУ ТП), де необхідно контролювати такі параметри, як температура, тиск, рівень, витрата або концентрація. У таких системах внутрішній контур зазвичай відповідає за стабілізацію швидкозмінних параметрів (матеріальні або теплові потоки), тоді як зовнішній контур регулює більш інерційні показники процесу.

### Вибір регуляторів для багатоконтурних систем

Ключовим аспектом для забезпечення оптимальної роботи багатоконтурної системи є правильний вибір законів регулювання для кожного з контурів. Для стабілізації основних параметрів процесу зовнішній контур зазвичай використовує ПІ або ПІД-регулятори. Це дозволяє усунути статичну помилку та забезпечити точне досягнення цільового значення параметрів системи.

Внутрішній контур, навпаки, має бути максимально швидкодійним, оскільки його основне завдання полягає в миттєвій реакції на зміни вхідного сигналу. Тому для внутрішнього контуру часто застосовуються П-регулятори або ПІ-регулятори. Хоча пропорційні регулятори забезпечують високу швидкодію, вони не завжди гарантують стабільність системи, тому використання ПІ-регуляторів є більш поширеним для балансування швидкодії і стабільності.

Застосування багатоконтурних систем керування є ефективним підходом до підвищення якості керування, особливо в умовах значних зовнішніх збурень або високої інерційності об'єкта керування. Правильний вибір законів регулювання для кожного з контурів дозволяє значно підвищити точність, стабільність та ефективність роботи системи. Багатоконтурні системи успішно використовуються в АСУ ТП для регулювання критичних параметрів технологічних процесів, що робить їх незамінним інструментом у сучасній промисловій автоматизації.

### Інтеграція адаптивних та оптимальних методів в багатоконтурні системи управління

Подальший розвиток багатоконтурних систем управління пов'язаний із застосуванням адаптивних та оптимальних методів керування. Такі підходи забезпечують додаткову гнучкість та можливість адаптації системи до зміни зовнішніх умов, що дозволяє суттєво покращити її динамічні характеристики і якість управління.

#### Адаптивні системи керування

Адаптивні методи керування базуються на здатності системи автоматично змінювати свої параметри в залежності від динамічних змін об’єкта керування або зовнішніх збурень. У випадку багатоконтурних систем, це може означати налаштування параметрів як зовнішнього, так і внутрішнього контурів у реальному часі.

Один із класичних підходів до адаптивного керування полягає у використанні ідентифікаційних алгоритмів для оцінки параметрів моделі об'єкта управління. На основі цієї інформації можна оперативно налаштовувати параметри регуляторів таким чином, щоб система залишалася стабільною і забезпечувала бажану якість керування незалежно від змін у характеристиках об'єкта.

Адаптивні регулятори можуть особливо ефективно використовуватись у випадках, коли характеристики об'єкта управління зазнають суттєвих змін під час експлуатації, що типово для складних технологічних процесів. В таких умовах застосування стандартних фіксованих параметрів регулятора може призвести до погіршення якості управління або навіть втрати стабільності системи. Адаптивні системи усувають цю проблему за рахунок постійного налаштування параметрів регуляторів.

#### Оптимальні методи керування

Оптимальні методи керування використовують математичні алгоритми для знаходження такого набору параметрів системи, який мінімізує або максимізує певну цільову функцію (критерій оптимальності). Для багатоконтурних систем такі методи дозволяють знаходити оптимальні налаштування регуляторів, враховуючи обмеження на керуючі сигнали, динаміку об’єкта і необхідні показники якості управління.

Зокрема, застосування методів квадратичного регулювання (LQR) або методів прогнозного керування (MPC) дозволяє забезпечити високий рівень ефективності, оскільки вони дозволяють передбачати майбутню поведінку об'єкта на основі поточних даних і оптимізувати управління в реальному часі.

### Перспективи розвитку багатоконтурних систем управління

З огляду на сучасні тенденції в автоматизації та індустрії 4.0, багатоконтурні системи управління поступово інтегруються з системами штучного інтелекту (ШІ) та машинного навчання. Це відкриває нові можливості для підвищення ефективності управління, зокрема через аналіз великих даних та передбачення можливих збурень і змін у поведінці об'єкта.

Застосування інтелектуальних систем управління дозволить досягати вищого рівня автономності у технологічних процесах, підвищуючи точність керування, зменшуючи витрати енергії та матеріалів, а також покращуючи безпеку експлуатації.

Синтез і впровадження багатоконтурних систем управління з адаптивними та оптимальними методами є важливим напрямом розвитку сучасних автоматизованих систем. Такий підхід дозволяє не лише підвищити якість управління, але й забезпечити стійкість і надійність у складних і змінних умовах експлуатації. Взаємодія каскадних систем з адаптивними алгоритмами та оптимізаційними методами відкриває нові горизонти в області автоматизації технологічних процесів, роблячи їх більш ефективними, гнучкими та автономними.

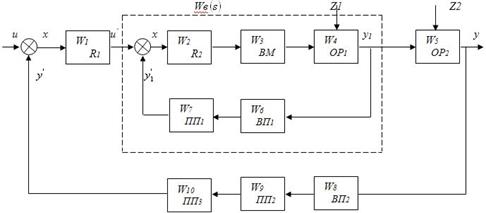


Рис.5.1. Структурна схема двоконтурної каскадної АСК

Синтез каскадних систем керування, що включає двоконтурні або триконтурні структури, відбувається у кілька послідовних етапів. Цей процес охоплює проектування, вибір технічних засобів, математичне моделювання, аналіз частотних характеристик та налаштування регуляторів. Синтез каскадної системи керування реалізується у наступній послідовності:

1. Розробка функціональної схеми системи: На початковому етапі формується функціональна схема каскадної системи керування. Ця схема може бути двоконтурною або триконтурною залежно від складності об'єкта керування та вимог до точності й стабільності процесу регулювання. Необхідно врахувати взаємодію внутрішніх і зовнішніх контурів, а також передбачити місця підключення регуляторів і вимірювальних пристроїв.
2. Вибір технічних засобів: Після створення функціональної схеми здійснюється вибір технічних засобів для реалізації системи, включаючи сенсори, виконавчі механізми, контролери та інші необхідні компоненти. Вибір здійснюється на основі динамічних характеристик об'єкта керування, діапазону регулювання та вимог до точності і швидкодії системи.
3. Моделювання об'єктів керування: На цьому етапі розробляються математичні моделі технологічних об'єктів керування. Визначаються передавальні функції об'єктів та інших структурних елементів системи, які описують їхню динамічну поведінку. Це дозволяє представити систему у вигляді блок-схеми для подальшого аналізу.
4. Вибір законів регулювання: Внутрішні та зовнішні контури системи отримують відповідні закони регулювання. Внутрішні контури, як правило, налаштовуються на швидкодію та стабілізацію проміжних змінних (наприклад, тиску або потоку), а зовнішні контури спрямовані на регулювання основних параметрів (наприклад, температури або рівня). Застосовуються пропорційно-інтегральні (ПІ) або пропорційно-інтегрально-диференціальні (ПІД) регулятори, залежно від конкретних вимог.
5. Розрахунок еквівалентної передавальної функції внутрішнього контуру: Визначається еквівалентна передавальна функція внутрішнього контуру, яка дозволяє оцінити його частотні характеристики, включаючи амплітудно-частотну (АЧХ), фазо-частотну (ФЧХ) та логарифмічну частотну (ЛЧХ) характеристики. Також будується перехідна крива для аналізу динамічної поведінки системи.
6. Оптимізація параметрів внутрішнього регулятора: Налаштування внутрішнього регулятора оптимізується із застосуванням методів кореневого місцезнаходження, частотних характеристик або інших підходів. Основною метою є мінімізація перерегулювання і часу перехідного процесу для досягнення необхідної якості керування.
7. Розрахунок еквівалентної передавальної функції зовнішнього контуру: Після оптимізації внутрішнього контуру виконується розрахунок еквівалентної передавальної функції зовнішнього контуру. Ці розрахунки дозволяють отримати частотні характеристики зовнішнього контуру та побудувати його перехідний процес.
8. Оптимізація параметрів зовнішнього регулятора: Для зовнішнього регулятора також проводиться оптимізація налаштувальних параметрів. Це здійснюється з метою забезпечення стабільної роботи системи за умов змінних навантажень та динамічних змін характеристик об'єкта.
9. Розрахунок еквівалентної передавальної функції каскадної системи: Використовуючи оптимальні налаштування обох регуляторів, розраховується еквівалентна передавальна функція всієї каскадної системи. На її основі будуються частотні характеристики та криві перехідних процесів для оцінки динамічної стійкості системи.
10. Оцінка якості системи: На основі аналізу перехідного процесу та частотних характеристик визначаються основні якісні показники системи, такі як перерегулювання, час встановлення та запас стійкості. Це дозволяє зробити висновки щодо відповідності системи поставленим технічним вимогам.
11. Ітераційна корекція системи: Якщо якісні показники виявляються незадовільними, проводиться ітераційна корекція параметрів системи. Це передбачає повторне налаштування регуляторів до досягнення необхідної якості керування.

Синтез каскадних систем керування є багатоступеневим процесом, що вимагає детального аналізу та оптимізації на кожному етапі. Застосування таких систем дозволяє суттєво покращити динамічні характеристики та стійкість складних технологічних процесів, що є важливим аспектом сучасних автоматизованих систем управління.

Застосування каскадних систем керування забезпечує підвищення ефективності та надійності керування складними об'єктами, особливо в умовах змінних навантажень та збурень. Такий підхід дозволяє розподілити завдання між кількома контурами, де кожен контур відповідає за регулювання окремих параметрів системи. Внутрішні контури, зазвичай, мають швидшу динаміку, забезпечуючи стабілізацію проміжних параметрів, тоді як зовнішні контури здійснюють точне регулювання основних технологічних показників.

Інтеграція каскадних систем у промислові процеси дозволяє вирішувати низку важливих завдань. По-перше, вони значно підвищують точність керування завдяки розділенню процесів стабілізації та регулювання. По-друге, забезпечують підвищену стійкість системи до зовнішніх збурень, оскільки внутрішній контур швидко реагує на зміни, а зовнішній контур стабілізує основні параметри. По-третє, каскадні системи поліпшують загальні показники динаміки системи, зменшуючи час перехідних процесів і перерегулювання.

Одним із ключових аспектів при розробці таких систем є правильний вибір налаштувань регуляторів. Від оптимізації параметрів регулювання залежить, наскільки ефективно буде компенсовано динамічні зміни об'єкта керування. Крім того, важливим є питання стійкості системи в умовах змін навантажень та зовнішніх збурень, що вимагає застосування сучасних методів оптимізації та математичного моделювання.

З огляду на швидкий розвиток технологій автоматизації та систем керування, каскадні системи стають невід’ємною складовою багатьох галузей, включаючи нафтову, газову, хімічну промисловість, енергетику та транспорт. Використання таких систем дозволяє не тільки підвищити ефективність керування, але й забезпечити надійність і безпеку роботи технологічних процесів, що особливо важливо в критично важливих інфраструктурах.

Подальший розвиток каскадних систем керування може бути пов’язаний з впровадженням нових підходів до аналізу великих даних, штучного інтелекту та машинного навчання. Завдяки цим технологіям можливе автоматичне налаштування і корекція параметрів системи в реальному часі без необхідності ручного втручання, що значно підвищує гнучкість і адаптивність систем керування до змінних умов. Таким чином, каскадні системи керування будуть продовжувати відігравати важливу роль у розвитку сучасних промислових автоматизованих процесів, забезпечуючи високу якість, ефективність і стабільність керування складними технологічними об'єктами.

**6. РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНЫХ МОДЕЛЕЙ ОБ’ЕКТА КЕРУВАННЯ**

Трубопровід призначено для транспортування речовин. Транспортування здійснюється за рахунок перепаду тиску на ділянці трубопроводу. Перепад тиску визначає витрату речовини в трубопроводі.

Відповідно до закону Гайгена-Пуазейля, при ламінарній течії перепад тиску на ділянці трубопроводу визначається за формулою

де – перепад тиску на ділянці трубопроводу ( – тиск на нагнітанні насосу (компресору), – тиск після (регулюючого органу) РО), ;

– довжина ділянки трубопроводу, ;

– коефіцієнт динамічної в’язкості, ;

– лінійна швидкість потоку, ;

– діаметр трубопроводу, .

Лінійну швидкість потоку можна визначити як відношення об’ємної витрати до площі поперечного перетину

де – об’ємна витрата, ;

– площа поперечного перерізу, .

З рівняння (7.2) визначимо витрату

Здійснимо перехід до масової витрати, для чого праву частину рівняння (7.3) помножимо на густину .

Знайдемо з рівняння (7.1) та підставимо у (7.5):

Розглянемо складання ММ трубопроводу з рідиною та з газом (парою).

Для того, щоб скласти ММ трубопроводу з рідиною, слід скласти рівняння матеріального балансу. Воно матиме вигляд

де – маса рідини, що надходить у трубопровід;

– маса рідини, що накопичується в об’ємі трубопроводу;

– маса рідини, що виходить із трубопроводу.

Визначимо складові рівняння (8.6) через технологічні параметри.

де – витрата рідини, що надходить у трубопровід, ;

– зміна часу, .

де – зміна ваги рідини в об’ємі трубопроводу, ;

– прискорення вільного падіння, .

Вага рідини визначається як

де – площа поперечного перерізу трубопроводу, ;

– перепад тиску у трубопроводі, .

Так як площа поперечного перетину трубопроводу є постійною величиною, то

Отже, з урахуванням (7.10) рівняння (8.8) набуде вигляду

де – зміна витрати рідини на виході трубопроводу (визначається за рівнянням (7.5), .

Отже з урахуванням означеного, рівняння матеріального балансу набуде вигляду

Поділимо рівняння (7.13) на .

Рівняння (7.14) є нелінійною ММ трубопроводу із рідиною. Змінними параметрами моделі є витрата та перепад тиску .

Зміна тиску спричиняє зміну перепаду тиску на ділянці трубопроводу і, як наслідок цього, зміну витрати . Отже вплив зміни тиску буде враховано впливом зміни витрати . Зміна густини та коефіцієнту динамічної в’язкості може відбуватися у випадку, якщо в трубопроводі змінюється температура потоку або його склад. При практичних розрахунках ММ трубопроводу вважатимемо, що ці величини є постійними. Площа поперечного перетину трубопроводу (отвору РО) на проміжку часу також слід вважати сталою величиною.

Виконаємо лінеаризацію нелінійної ММ використовуючи розкладення в ряд Тейлора.

Вилучимо з рівняння (7.15) сталі величини.

Рівняння (7.16) є рівнянням статики або статичною моделлю трубопроводу. Вилучимо рівняння (7.16) з рівняння (7.15).

Рівняння (7.17) є розмірною ММ трубопроводу. Виконаємо перехід до безрозмірної форми.

Відповідно до інформаційно-логічної схеми позначимо:

З урахуванням (7.18), рівняння (7.17) набуде вигляду

Приведемо рівняння (7.19) до канонічного вигляду, поділивши праву та ліву частини рівняння на

де – стала часу;

– коефіцієнт моделі.

Рівняння (7.20) є динамічною ММ трубопроводу.

Використовуючи перетворення Лапласу знайдемо передаточну функцію (ПФ) (без урахування часу запізнення) трубопроводу.

Час запізнення за каналом впливу визначається тільки транспортним запізненням:

де – час транспортного запізнення, ;

– довжина ділянки трубопроводу, ;

– лінійна швидкість потоку (визначається рівнянням (7.2), .

В остаточному варіанті ПФ трубопроводу має вигляд:

Вивід ММ трубопроводу з газом буде відрізнятися складовою матеріального балансу (рівняння (6.8). Гази, на відміну від рідин, при зміні тиску суттєво змінює свою густину, тому цією зміною нехтувати не можна. Для технічних розрахунків з достатньою точністю цю залежність описує закон Менделєєва - Клапейрону:

де – тиск у трубопроводі, ;

– газова стала, що визначається відношенням універсальної газової сталої до молекулярної маси газу, ;

– температура в трубопроводі, .

Тиск у трубопроводі визначимо через тиск після РО та перепад тиску на ділянці трубопроводу : . Вважатимемо, що тиск є сталою величиною, тобто при зміні тиску буде змінюватися тільки перепад тиску , і .

Отже маса газу, що накопичується в трубопроводі, визначається:

Подальший вивід ММ аналогічний виводу ММ трубопроводу з рідиною, а диференційне рівняння, що описує трубопровід із газом, матиме вигляд (6.20), в якому:

**6.1 Розрахунок параметрів математичної моделі трубопроводу**

АСР розташована на трубопроводі відпарених газів. Обиремо фізичні параметри середовища.

Температура відпарених газів – .

Динамічна в'язкість відпарного газу – .

Густина відпарного газу – .

Довжина трубопроводу – .

Витрати відпарних газів – .

Діаметр DН = 500 мм.

Номінальний перепад тиску – .

Індивідуальна газова стала відпарного газу:

де – універсальна газова стала ;

– молярна маса відпарного газу = .

Діаметр трубопроводу визначимо з рівняння статики (6.16). Будемо виходити з того, що у статичному режимі зміни положення клапана регулюючого органу не відбувається, отже будемо вважати, що прохідний діаметр вентиля дорівнює діаметру трубопроводу, тоді

Звідси

Розрахуємо час транспортного запізнення з рівняння (6.22)

Таким чином, передавальна функція об’єкту набуде вигляду

Час запізнення апроксимуємо першою степеню розкладення у ряд Маклорена

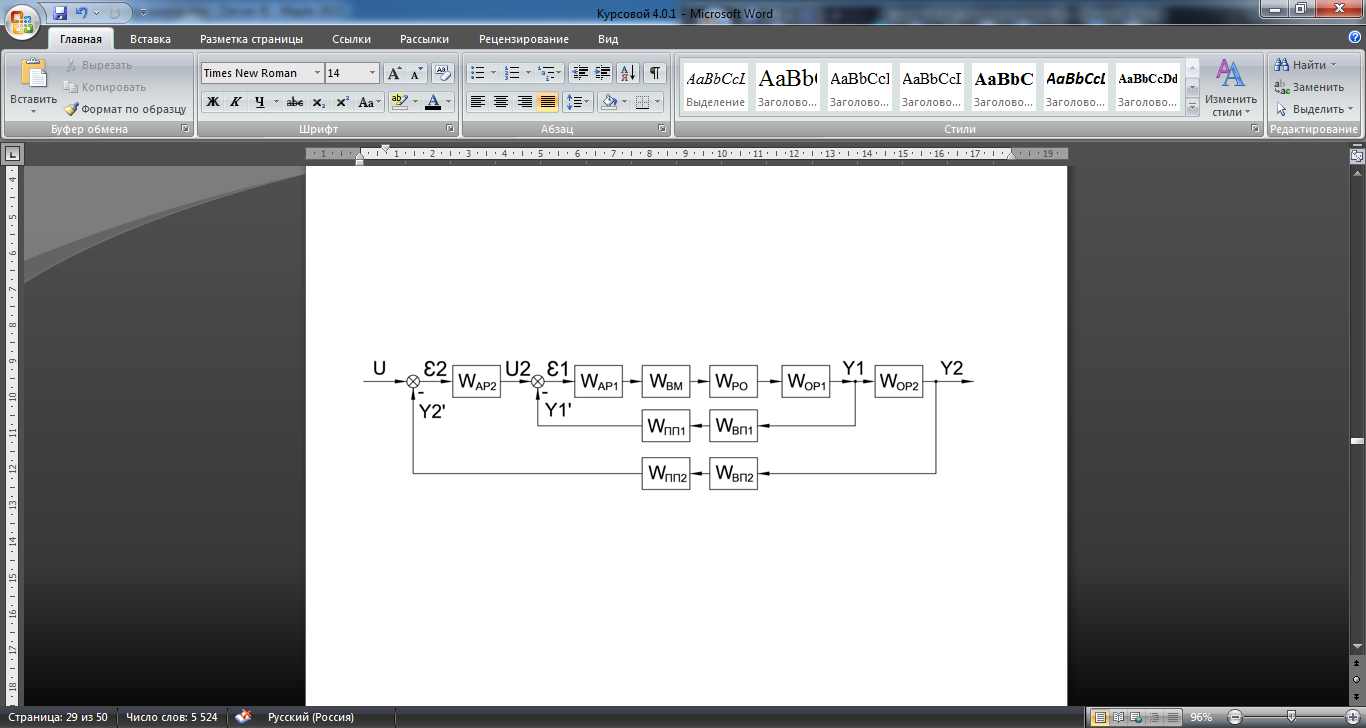


Рисунок 6.1 – Структурна схема каскадної АСР. Передавальні функції блоків:

– об’єкт регулювання внутрішнього контуру,

– об’єкт регулювання зовнішнього контуру,

– вимірювальний перетворювач внутрішнього контуру,

– вимірювальний перетворювач зовнішнього контуру,

– проміжний перетворювач внутрішнього контуру,

– проміжний перетворювач зовнішнього контуру,

– автоматичний регулятор внутрішнього контуру,

– автоматичний регулятор зовнішнього контуру,

– виконавчий механізм,

– регулюючий орган.

Побудуємо еквівалентний об’єкт для розімкненої системи внутрішнього контуру:

Із застосуванням розрахункових та довідникових даних, одержимо:

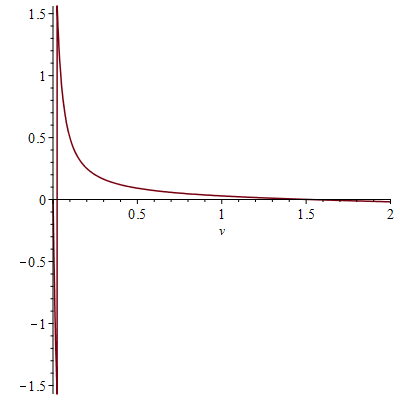


Рисунок 6.1 – Фазочастотна характеристика

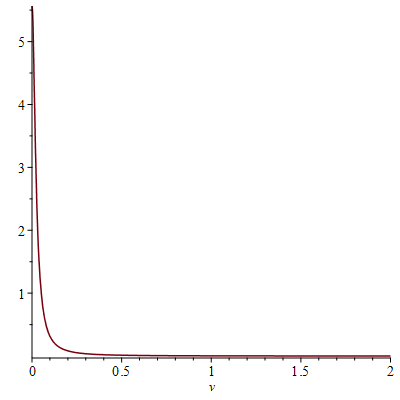


Рисунок 6.2 – Амплітудно-частотна характеристика

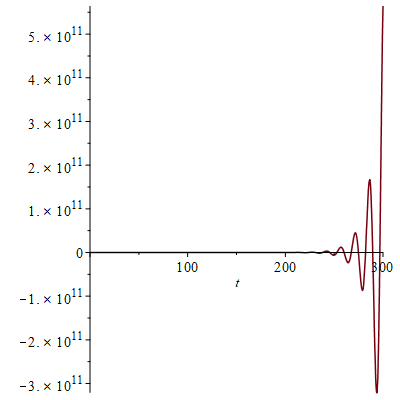


Рисунок 6.3 – Реакція внутрішнього контуру АСР на одиничне східчасте збурення з розрахунковими налаштуваннями ПІ-регулятора

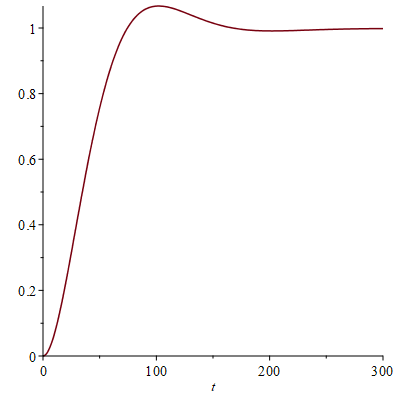


Рисунок 6.4 – Реакція внутрішнього контуру АСР на одиничне східчасте збурення після редагування налаштувань ПІ-регулятора

**6.2 Розробка математичної моделі кожухотрубного теплообмінника**

Схематично кожухотрубний теплообмінник зображено на рис. 6.5.

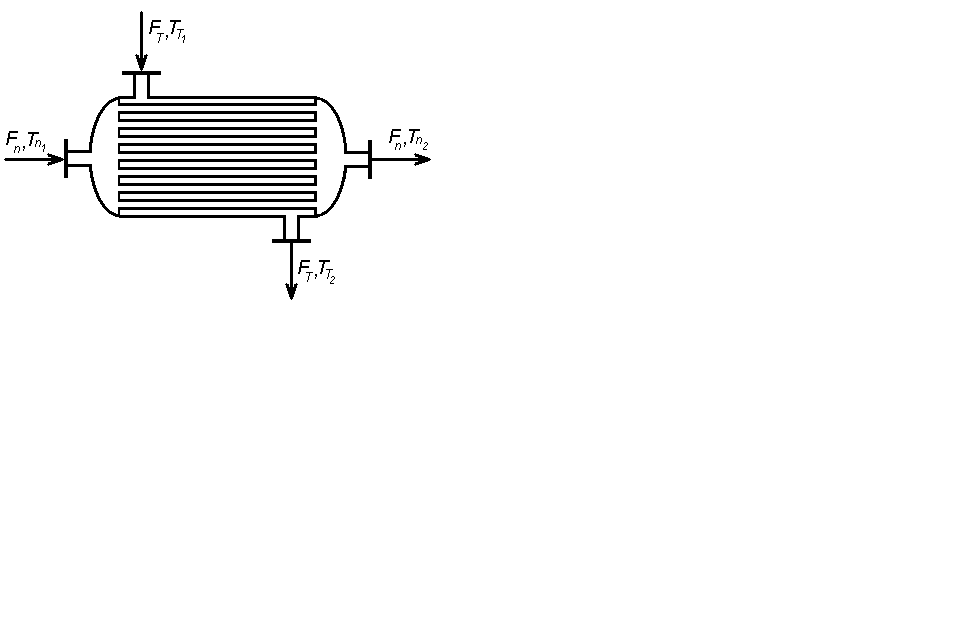


Рис. 6.5 Кожухотрубний теплообмінник

Розглянемо випадок коли в теплообміннику відбувається нагрів продукту, який витратою з температурою потрапляє у внутрішньо трубний простір теплообмінника. У між трубний простір подається теплоносій – відпарний газ витратою з температурою . На виході теплообмінника продукт має температуру , а теплоносій .

Процес теплообміну відбувається через стінки труб теплообмінника. Зміна витрат потоків або їх температур на вході призводить до зміни температури стінок трубок теплообмінника, а, відповідно, змінює інтенсивність процесу теплообміну. До вихідних координат слід віднести температуру стінок труб теплообмінника (мається на увазі усереднене значення) та температуру продукту на виході теплообмінника.

Як правило, температура продукту на виході теплообмінника регулюється зміною витрати теплоносія .

Витрату продукту частіше за все регулювати не має можливості. Ця витрата (навантаження на теплообмінник) є збурюючою координатою. Крім того, до збурюючих координат слід віднести температуру продукту та теплоносія на вході в теплообмінник та відповідно.

Інформаційно-логічну схему кожухотрубного теплообмінника наведено на рис. 6.6



Рис. 6.6. Інформаційно-логічна схема кожухотрубного теплообмінника

Розглянемо як відбувається передача тепла від теплоносія до продукту. Для цього скористаємося схемою, яка наведено на рис. 6.7.

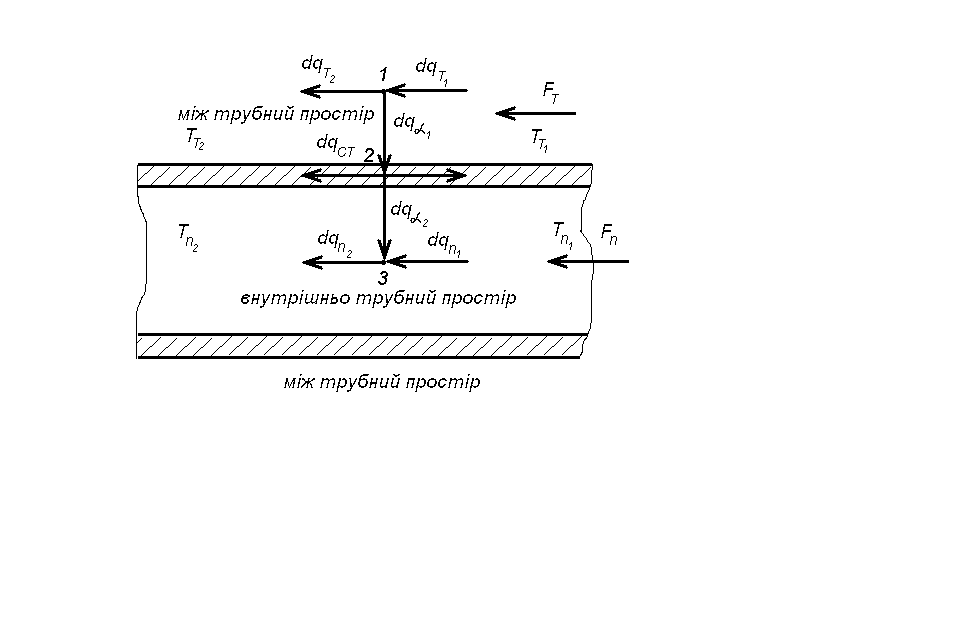


Рис. 6.7. Процес теплообміну в кожухотрубному теплообміннику

У цьому розрахунку не акцентується увага на напрям руху потоків теплоносія та продукту (прямоток, противоток, комбінований). При зміні напряму потоку буде змінюватися температура стінок теплообмінника та відповідно температура продукту на його виході. Ці температури визначаються за відповідними формулами, а їх номінальні значення можуть бути підставлені у формули для визначення коефіцієнтів моделі та постійних часу.

Складемо рівняння теплових балансів для точок 1, 2 та 3. Ці точки умовно визначають: 1 – процес віддачі тепла теплоносієм трубкам теплообмінника, 2 – процес розповсюдження тепла повздовж трубок теплообмінника та передача тепла у внутрішньо трубний простір, 3 – процес нагріву продукту.

Для точки 1 рівняння теплового балансу має вигляд

де – кількість теплоти, що надходить у кожухотрубний теплообмінник із потоком теплоносія ;

– кількість теплоти, що накопичується в між трубному просторі кожухотрубного теплообмінника;

– кількість теплоти, що віддає теплоносій трубкам теплообмінника;

– кількість теплоти, що відводиться із апарату з потоком теплоносія.

Напишемо рівняння (7.28) в технологічних змінних.

де – витрата теплоносія, ;

– теплоємність теплоносія, ;

– температура теплоносія на вході теплообмінника, ;

– зміна часу, .

де – густина теплоносія, ;

– об’єм між трубного простору, ;

– теплоємність теплоносія, ;

– зміна температури теплоносія в між трубному просторі, .

де – коефіцієнт тепловіддачі від теплоносія до трубок теплообмінника, ;

– площа теплообміну між теплоносієм та трубками (зовнішня поверхня теплообмінних труб), ;

– температура теплоносія на вході теплообмінника, ;

– температура стінок теплообмінних труб, .

де – кількість труб;

– зовнішній діаметр теплообмінної трубки, ;

– довжина трубки, .

де – витрата теплоносія, ;

– теплоємність теплоносія, ;

– температура теплоносія на виході теплообмінника,;

– зміна часу, .

З урахуванням означеного, рівняння (6.28) в технологічних змінних набуде вигляду

Складемо рівняння теплового балансу для точки 2.

де – кількість тепла, що надходить від теплоносія;

– кількість тепла, що накопичується в матеріалі стінок;

– кількість тепла, що віддається від труб у внутрішньо трубний простір.

Визначимо складові та рівняння (6.35) через технологічні параметри.

де – маса матеріалу стінок, ;

– теплоємність матеріалу стінок, ;

– зміна температури стінки, *.*

Маса труб може бути визначена з паспорту теплообмінника або розрахунком через об’єм матеріалу труб та його густину.

. (6.37)

, (6.38)

де  – коефіцієнт тепловіддачі від трубок теплообмінника до продукту, ;

 – площа теплообміну між трубками та продуктом (внутрішньо трубна поверхня теплообмінних труб), ;

 – температура стінки, *0К*;

 – температура продукту на виході теплообмінника, *0К.*

, (6.39)

де  – кількість труб;

 – внутрішній діаметр теплообмінної трубки, ;

 – довжина трубки, .

Складемо рівняння теплового балансу для точки 3.

, (6.40)

де  – кількість теплоти, що надходить у кожухотрубний теплообмінник з потоком продукту ;

 – кількість теплоти, що віддається від труб теплообмінника до продукту;

 – кількість теплоти, що накопичується у внутрішньо трубному просторі кожухотрубного теплообмінника;

 – кількість теплоти, що відводиться із апарату з потоком продукту.

Запишемо рівняння (6.40) в технологічних змінних.

, (6.41)

де  – витрата продукту, ;

 – теплоємність продукту, ;

 – температура продукту на вході теплообмінника, ;

, (6.42)

де  – коефіцієнт тепловіддачі від трубок теплообмінника до продукту, ;

 – площа теплообміну між трубками та продуктом (внутрішня поверхня теплообмінних труб), ;

 – температура стінок теплообмінних труб, ;

 – температура продукту на виході теплообмінника, .

, (6.43)

де  – густина продукту, ;

 – об’єм внутрішньо трубного простору, ;

 – теплоємність продукту, ;

 – зміна температури продукту у внутрішньо трубному просторі, .

, (6.44)

де  – витрата продукту, ;

 – теплоємність продукту, ;

 – температура продукту на виході теплообмінника, .

Підставимо рівняння () в ().

. (6.45)

Рівняння (7.46) та (7.41), що записано в технологічних змінних, утворюють систему рівнянь, що описує тепловий баланс кожухотрубного теплообмінника. Запишемо її відразу в технологічних параметрах

. (6.46)

Розділимо кожне з цих рівнянь на .

. (6.47)

Виконаємо процедуру лінеаризації та переходу до безрозмірної ММ для кожного з цих рівнянь окремо.

У першому рівнянні системи (6.46) змінними параметрами є , , , . Після розкладення в ряд Тейлора (обмежимося лінійною частиною), маємо





. (6.48)

Вилучимо з рівняння (6.48) сталі частини

. (6.49)

Вилучимо рівняння (6.48) з рівняння (6.49). Отримане рівняння запишемо в такій спосіб:



. (6.50)

Відповідно до інформаційно-логічної схеми введемо позначення:

; ; ; ; .

З урахуванням цих позначень, рівняння набуде вигляду



. (6.51)

Приведемо рівняння (6.51) до канонічного вигляду, поділивши праву та ліву частини рівняння на .

. (6.52)

де ;  – сталі часу, ;

; ;

 – коефіцієнти моделі.

При практичних розрахунках , тому що , . Зазвичай приймають, що .

Виконаємо процедуру лінеаризації та переходу до безрозмірної ММ для другого рівняння системи (6.46).

В цьому рівнянні змінними параметрами є , , , . Після розкладення в ряд Тейлора (обмежимося лінійною частиною), маємо



. (6.53)

Вилучимо з рівняння (3.180) сталі складові

. (6.54)

Система рівнянь (6.49) та (6.54) є статичною моделлю кожухотрубного теплообмінника. Вона може бути використана для знаходження невідомих параметрів моделі або для визначення режимних параметрів об’єкту керування.



. (6.55)

Перейдемо до безрозмірного вигляду

Відповідно до інформаційно-логічної схеми введемо позначення:

Приведемо подібні складові та напишемо отримане рівняння в такий спосіб:

Приведемо рівняння (7.59) до канонічного вигляду. Для цього розділимо праву та ліву частини на .

де – стала часу, ;

– коефіцієнти моделі.

Рівняння (6.52) та напишемо як систему

Розв’яжемо систему рівнянь (6.60) відносно . Для цього скористаємося методом підстановки. Визначимо з другого рівняння системи .

Продиференцюємо (7.62) за часом.

Підставимо (6.61) та (6.62) в перше рівняння системи (). Після відповідних перетворень отримуємо

Приведемо рівняння (6.63) до канонічного вигляду. Для цього поділимо праву та ліву часини рівняння на .

де – стала часу, ;

– сталі часу, ;

– коефіцієнти моделі.

Рівняння (6.64) є ММ кожухотрубного теплообмінника за температурою продукту на виході.

Використовуючи принцип суперпозиції, напишемо диференційне рівняння для кожного каналу.

Використовуючи перетворення Лапласу знайдемо ПФ (без урахування часу запізнення) кожухотрубного теплообмінника за кожним каналом впливу на температуру.

Після визначення часу запізнення в остаточному варіанті ПФ кожухотрубного теплообмінника за температурою за каналами впливу мають вигляд

**Розрахунок параметрів математичної моделі кожухотрубного теплообмінника**

Оберемо фізичні параметри середовища.

Коефіцієнт тепловіддачі від трубок до повіря: = 1639 [кВт/ м² К];

Витрата теплоносія: ;

Теплоємність теплоносія: = 2.54 [Дж/кг К];

Теплоємність стінок теплообмінних труб: = 562 [Дж/кг К];

Температура теплоносія на вході теплообмінника: = 653 [];

Густина теплоносія: ;

Густина матеріалу стінок теплообмінних труб: ;

Oб’єм міжтрубного простору: 2.8 ];

Oб’єм стінок теплообмінних труб: 0.569 ];

Температура стінок теплообмінних труб: 953 [];

Температура теплоносія на виході теплообмінника: 573 [];

Площа теплообміну між трубками та продуктом: ];

Витрата продукту: ;

Теплоємність продукту: = 2.99[Дж/кг К];

Температура продукту на вході теплообмінника: = 513 [К];

Температура продукту на виході теплообмінника:593 [К];

Густина продукту: ;

Oб’єм внутрішньо трубного простору: 0.5631 ]

При практичних розрахунках тому що , .

Зазвичай приймають, що

Виконаємо процедуру лінеаризації та переходу до безрозмірної ММ для другого рівняння системи (7.47).

В цьому рівнянні змінними параметрами є . Після розкладення в ряд Тейлора (обмежимося лінійною частиною), маємо

(6.77)

Вилучимо з рівняння (7.78) сталі складові

(6.78)

Система рівнянь (6.49) та (6.78) є статичною моделлю кожухотрубного теплообмінника. Вона може бути використана для знаходження невідомих параметрів моделі або для визначення режимних параметрів об’єкту керування.

. (6.79)

Перейдемо до безрозмірного вигляду

. (6.80)

Відповідно до інформаційно-логічної схеми введемопозначення:

;; ; .

Приведемо подібні складові та запишемо отримане рівняння в такий спосіб:

(6.81)

Приведемо рівняння (6.81) до канонічного вигляду. Для цього розділимо праву та ліву частини на .

(6.82)

Де

– коефіцієнти моделі.

Рівняння (6.52) та (6.82) запишемо як систему

(6.83)

Розв’яжемо систему рівнянь (6.83) відносно Для цього скористаємося методом підстановки. Визначимо з другого рівняння системи .

(6.84)

Продиференцюємо (6.84) за часом.

(6.85)

Підставимо (6.84) та (6.85) в перше рівняння системи (6.83). Після відповідних перетворень отримуємо

(6.86)

Приведемо рівняння (6.86) до канонічного вигляду. Для цього поділимо праву та ліву частини рівняння (6.86) на .

(6.87)

де стала часу, ;

; сталі часу, с;

коефіцієнти моделі.

Рівняння (6.87) є ММ кожухотрубного теплообмінника за температурою продукту на виході.

Використовуючи принцип суперпозиції, запишемо диференційне рівняння для кожного каналу.

*.* (6.88)

*.* (6.89)

*.* (6.90)

*.* (6.91)

Використовуючи перетворення Лапласу знайдемо ПФ (без урахування часу запізнення) кожухотрубного теплообмінника за кожним каналом впливу на температуру.

(6.92)

(6.93)

(6.94)

(6.95)

Після визначення часу запізнення в остаточному варіанті ПФ кожухотрубного теплообмінника за температурою за каналами впливу мають вигляд

(6.96)

(6.97)

(6.98)

(6.99)

Побудуємо еквівалентний об’єкт для розімкненої системи зовнішнього контуру:

Із застосуванням розрахункових та довідникових даних, одержимо:

**ВИСНОВОК**

У ході магістерської науково-дослідної роботи була розроблена та досліджена комп'ютерно-інтегрована система контролю та управління економайзером у процесі відпарювання конденсату для виробництва етанолу, а також проаналізовано перспективи автоматизації технологічних процесів у хімічній промисловості та тенденції виробництва етанолу. Було детально розглянуто технологічний процес обробки конденсату парою, визначено вхідні та вихідні параметри, а також побудовано структурно-логічну схему системи.

Було створено математичну модель об'єкта управління, розраховано параметри теплообмінника і трубопроводу кожухотрубного типу, сформульовано рівняння матеріального та теплового балансу при зміні температури вздовж робочого каналу, визначено коефіцієнт теплопередачі та отримано диференціальне рівняння ланки автоматичної системи регулювання (АСР).

Розроблено структурну схему каскадної системи керування процесом і проведено розрахунок перехідних процесів та частотних характеристик еквівалентних об'єктів для системи з розімкнутим внутрішнім контуром.

На підставі проведених досліджень можна зробити висновок, що технологічний процес у виробництві етанолу під час відпарювання конденсату має аперіодичний характер перехідного процесу, що вказує на необхідність точного налаштування регуляторів для досягнення стабільної роботи системи.

**ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ**

1. Стенцель Й.І. Математичне моделювання технологічних об’єктів керування. Навч. посібник. – К.: IСДО, 1993. – 328 с

2. Стенцель Й.І., Поркуян О.В. Автоматизація технологічних процесів хімічних виробництв: Підручник. – Луганськ: Вид-во Східноукр. нац. ун-ту ім. В.Даля, 2010. – 300 с

3. А.О. Бобух. Автоматизовані системи керування технологічними процесами: Навч. посібник. – Харків: ХНАМГ, 2006. – 185 с.

4. Towler, G., Sinnott, R. Chemical Engineering Design: Principles, Practice and Economics of Plant and Process Design. – Elsevier, 2012. – 1320 p

5. Peters, M. S., Timmerhaus, K. D., West, R. E. Plant Design and Economics for Chemical Engineers. – McGraw-Hill Education, 2003. – 988 p.

6. Luyben, W.L. Process Modeling, Simulation, and Control for Chemical Engineers. – McGraw-Hill, 1990. – 768 p.

7. Turton, R., Bailie, R. C., Whiting, W. B., Shaeiwitz, J. A. Analysis, Synthesis, and Design of Chemical Processes. – Prentice Hall, 2008. – 1200 p.

8. Smith, R. Chemical Process Design and Integration. – Wiley, 2005. – 714 p.

9. Seider, W. D., Seader, J. D., Lewin, D. R., Widagdo, S. Product and Process Design Principles: Synthesis, Analysis, and Evaluation. – Wiley, 2016. – 768 p.

10. Douglas, J. M. Conceptual Design of Chemical Processes. – McGraw-Hill, 1988. – 605 p.