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 мехатронної комп'ютерно-інтегрованої системи управління котлом-утилізатором у виробництві аміаку»

Виконав: студент групи \_АТП-23дм\_ \_\_\_\_\_\_\_\_\_ М.С. Тіхвінський

 ( підпис )

Керівник **\_\_\_\_\_\_\_\_\_** Т.Г. Сотнікова

 ( підпис )

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

 ( підпис )

Рецензент **\_\_\_\_\_\_\_\_\_** П. Й. Єлісєєв

 ( 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 робототехніка

# **ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувачка каф. КІСУ

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

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

**ЗАВДАННЯ**

**НА МАГІСТЕРСЬКУ НАУКОВО-ДОСЛІДНУ РОБОТУ**

**ЗДОБУВАЧУ ВИЩОЇ ОСВІТИ ТІХВІНСЬКОМУ МИКИТІ СЕРГІЙОВИЧУ**

**1. Тема магістерської НДР:** «Розробка та дослідження мехатронної комп'ютерно-інтегрованої системи управління котлом-утилізатором у виробництві аміаку»

2. **Керівник роботи**: доц. Сотнікова Т.Г.

Затверджені наказом вищого навчального закладу № 91/14.04 від 25.11.2024 р.

3. **Термін подання студентом роботи** 14 грудня 2024 р.

4. **Вихідні дані до роботи**:

4.1.Технологічний регламент виробництва.

4.2.Інструкція оператора по експлуатації АСК ТП.

4.4.Публікації по автоматизованому керуванню технологічними процесами у котлі-утилізаторі у виробництві аміаку.

4.5.Публікації по моделюванню складних систем контролю та керуванню технологічними процесами в котлі-утилізаторі у виробництві аміаку.

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

5.1.Вступ.

5.2.Аналіз сучасного стану автоматизації технологічних процесів в котлі-утилізаторі у виробництві аміаку.

5.3.Аналіз автоматизованих систем контролю та керування технологічними процесами в котлі-утилізаторі у виробництві аміаку і розробка завдань для виконання магістерської науково-дослідної роботи.

5.4.Розробка та аналіз математичних моделей процесу в котлі-утилізаторі у виробництві аміаку.

5.5.Теоретичні дослідження математичних моделей котла-утилізатора у виробництві аміаку.

5.6.Розробка мнемосхем мехатронної комп'ютерно-інтегрованої системи управління (КІСУ) процесом у котлі-утилізаторі у виробництві аміаку.

5.7.Розробка програмного забезпечення роботи мехатронної 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 парової конверсії природного газу.

6.1.1.Основна мнемосхема контролю та керування котлем-утилізатором у виробництві аміаку.

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 парової конверсії природного газу.

6.3.Статичні та динамічні характеристики котла-утилізатора у виробництві аміаку.

6.5.Результати оптимального керування котлом-утилізатором у виробництві аміаку.

7. **Дата видачі завдання:** 20 жовтня 2024 р.

**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 керування технологічними процесами у котлі-утилізаторі у виробництві аміаку і розробка завдань для виконання магістерської науково-дослідної роботи. | 1.11.2024 |  |
| 3. | Розробка математичних моделей котла-утилізатора у виробництві аміаку. | 5.11.2024 |  |
| 4. | Розробка мнемосхем комп'ютерно-інтегрованої системи управління (КІСУ) котлі-утилізаторі у виробництві аміаку. | 8.11.2024 |  |
| 5. | Розробка програмного забезпечення роботи КІСУ ТП в динамічному режимі роботи. | 15.11.2024 |  |
| 6. | Теоретичні дослідження математичних моделей котла-утилізатора у виробництві аміаку. | 25.11.2024 |  |
| 7. | Аналіз результатів теоретичних досліджень. | 1.12.2024 |  |
| 9. | Оформлення пояснювальної записки дипломного проекту та презентації. | 14.12.2024 |  |

Здобувач вищої освіти \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ М.С. Тіхвінський

Керівник магістерської НДР \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ Т.Г. Сотнікова

**Реферат**

Пояснювальна записка аркушів 95, рисунків 27, таблиць 5, джерел 36

ВИРОБНИЦТВО АМІАКУ, КОТЕЛ УТИЛІЗАТОР, ПАРОПОВІТРЯНА КОНВЕРСІЯ, ПАРОПОВІТРЯНА СУМІШ, ТЕПЛООБМІННИК, СТРУКТУРНО-ЛОГІЧНА СХЕМА, МАТЕРІАЛЬНИЙ БАЛАНС, , АВТОМАТИЗАЦІЯ, МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ, СИНТЕЗ АСР, ФУНКЦІОНАЛЬНА СХЕМА, КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНА СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ.

Об'єктом теоретичного дослідження є стадія пароповітряної конверсії(вторинний риформінг) у виробництві аміаку.

Метою магістерської науково-дослідної роботи є розробка мехатронної комп'ютерно-інтегрованої системи контролю та управління котлом утилізатором стадії пароповітряної конверсії у виробництві аміаку та виконання досліджень математичних моделей котла утилізатора та і двоконтурної каскадної САР температури у котлі утилізаторі.

Метод дослідження – теоретичний із застосуванням ЕОМ.

У процесі роботи виконаний аналіз процесу як об'єкта керування, розроблені математичні моделі об´єктів керування на основі двох теорій, виконані теоретичні дослідження математичних моделей котла утилізатора і двоконтурної каскадної САР температури у котлі утилізаторі та зроблений синтез двоконтурної каскадної САР температури у котлі утилизаторі.

**ЗМІСТ**

**ВСТУП…………………………………………………………………….7**

**РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ АВТОМАТИЗАЦІЇ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ У ВИРОБНИЦТВІ АМІАКУ…………9**

**1.1. Аналіз технологічного процесу парової конверсії природного газу……………………………………………………………………………….10**

**1.2.Основні характеристики продукції аміаку………………………12**

**1.3. Область застосування автоматизації у виробництві аміаку….13**

**1.4. Опис технологічного процесу парової конверсії природного газу……………………………………………………………………………….15**

**1.5 Аналіз сучасного стану автоматизації технологічних процесів в котлі-утилізаторі в процесі виробництва аміаку………………………….17**

**РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ КОНТРОЛЮ ТА УПРАВЛІННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ.20**

**2.1. Огляд існуючих систем контролю та управління у виробництві аміаку……………………………………………………………………………..21**

**2.2. Визначення недоліків існуючих рішень та постановка задач для виконання магістерської науково-дослідної роботи……………………….23**

**2.3. Розробка структурно-логічної схеми комп’ютерно-інтегрованої системи управління…………………………………………………………….25**

**РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА МЕХАТРОННОЇ КОМП’ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ КОТЛОМ-УТИЛІЗАТОРОМ У ВИРОБНИЦТВІ АМІАКУ…………………………..29**

**3.1. Розробка математичної моделі об’єкта управління……………30**

**3.2. Параметричний синтез автоматичної системи регулювання..50**

**3.3. Розробка алгоритмів управління та логіки роботи системи…54**

**РОЗДІЛ 4. ТЕОРЕТИЧНІ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ……………………………..56**

**4.1. Аналіз динамічних характеристик розробленої системи…….57**

**4.2. Розробка мнемосхем для системи управління………………….63**

**4.3. Розробка програмного забезпечення для управління технологічним процесом………………………………………………………67**

**4.4. Аналіз результатів досліджень та оптимізація роботи системи..70**

**Висновок…………………………………………………………………..92**

**Список використаної літератури………………………………………93**

**ВСТУП**

Розвиток сучасних технологій у промисловості є одним із ключових напрямів, що забезпечують зростання ефективності, продуктивності та екологічної безпеки виробничих процесів. У цьому контексті особливе значення має впровадження мехатронних комп'ютерно-інтегрованих систем, які дозволяють автоматизувати складні технологічні процеси, забезпечуючи їх стабільність і оптимізацію. Одним із найважливіших етапів технологічного циклу виробництва аміаку є процес утилізації теплової енергії, що утворюється під час синтезу. Для цього використовуються спеціалізовані котли-утилізатори, які відіграють ключову роль у зниженні енергетичних витрат і підвищенні загальної ефективності виробництва.

Котли-утилізатори забезпечують утилізацію вторинної енергії, що утворюється в процесі синтезу аміаку, шляхом передачі тепла до теплоносія для подальшого використання у виробництві. Проте ефективна робота таких установок потребує чіткого контролю та регулювання параметрів, таких як температура, тиск і витрата теплоносія. Традиційні методи управління часто не забезпечують необхідної гнучкості та адаптивності, особливо в умовах змінних режимів роботи. Це обумовлює необхідність розробки інноваційних рішень, які враховують сучасні вимоги до автоматизації та інтеграції технологічних процесів.

Мехатронні системи, що поєднують механічні, електронні та програмні компоненти, відкривають нові можливості для ефективного управління котлами-утилізаторами. Використання комп'ютерно-інтегрованих систем дозволяє забезпечити автоматичний контроль основних параметрів, оперативно реагувати на зміну зовнішніх умов і підтримувати оптимальні режими роботи. Застосування таких підходів не лише підвищує продуктивність виробничого процесу, але й сприяє зменшенню енергетичних витрат і негативного впливу на навколишнє середовище.

Актуальність дослідження зумовлена необхідністю впровадження новітніх технологій у сфері автоматизації виробничих процесів, що пов'язані з утилізацією теплової енергії у хімічній промисловості. Сучасні тенденції у розвитку промислової автоматизації спрямовані на створення інтелектуальних систем, здатних адаптуватися до змінних умов та забезпечувати високу ефективність технологічних процесів. Розробка мехатронної комп’ютерно-інтегрованої системи управління котлом-утилізатором є важливим кроком у напрямі вирішення цих завдань.

Дослідження, присвячене створенню та аналізу такої системи, має на меті забезпечити оптимізацію параметрів роботи котла-утилізатора, підвищення його надійності та безпечності, а також зменшення споживання енергоресурсів. Застосування інноваційних підходів до автоматизації цього процесу дозволить не лише вдосконалити виробничий цикл, але й забезпечить відповідність сучасним стандартам енергоефективності та екологічної стійкості.

Розробка і дослідження мехатронної комп’ютерно-інтегрованої системи управління котлом-утилізатором у виробництві аміаку є важливим науковим і практичним завданням, яке відповідає сучасним вимогам промислової автоматизації та сприяє розвитку хімічної промисловості.

**РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ АВТОМАТИЗАЦІЇ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ У ВИРОБНИЦТВІ АМІАКУ**

Розділ 1 присвячений аналізу сучасного стану автоматизації технологічних процесів у виробництві аміаку, що є важливою складовою сучасної хімічної промисловості. Виробництво аміаку є енергоємним і складним процесом, який потребує чіткого контролю ключових параметрів, таких як температура, тиск, витрати сировини та реагентів. Ефективне управління цими параметрами не лише впливає на якість кінцевого продукту, але й визначає економічну та екологічну ефективність виробництва.

Автоматизація технологічних процесів у виробництві аміаку є одним із пріоритетних напрямів розвитку хімічної промисловості. Сучасні системи автоматизації дозволяють здійснювати безперервний моніторинг технологічних параметрів, підтримувати оптимальні режими роботи обладнання та оперативно реагувати на зміну умов виробництва. Це сприяє підвищенню продуктивності, зменшенню втрат сировини та енергії, а також знижує ризик аварійних ситуацій.

В останні роки в галузі автоматизації виробництва аміаку спостерігається активний розвиток інноваційних технологій, таких як використання мехатронних систем, інтеграція комп'ютерних моделей процесів із реальними установками, впровадження систем штучного інтелекту для прогнозування та оптимізації виробничих циклів. Ці технології забезпечують значні переваги порівняно з традиційними підходами, дозволяючи досягати більш високого рівня ефективності та точності управління.

Водночас, поряд із впровадженням новітніх рішень, зберігаються певні проблеми, пов’язані зі складністю модернізації існуючого обладнання, необхідністю інтеграції різних систем і високими вимогами до безпеки. Аналіз сучасного стану автоматизації у виробництві аміаку дозволяє виявити основні тенденції, визначити переваги та недоліки існуючих підходів, а також окреслити перспективи подальшого вдосконалення технологій.

У цьому розділі буде розглянуто сучасні системи автоматизації, їхні характеристики, а також основні напрями розвитку технологій у цій сфері. Це дозволить сформувати цілісне уявлення про стан і можливості автоматизації технологічних процесів у виробництві аміаку, що стане основою для подальшої розробки та дослідження мехатронної комп’ютерно-інтегрованої системи управління.

**1.1. Аналіз технологічного процесу парової конверсії природного газу**

Парової конверсії природного газу належить провідна роль у технологічному циклі виробництва аміаку, оскільки саме на цій стадії відбувається отримання водню – одного з основних компонентів для синтезу аміаку. Процес базується на ендотермічній хімічній реакції метану з водяною парою, яка протікає за високих температур (800–900 °C) і тиску (20–30 атм) у присутності каталізаторів.

Природний газ, основною складовою якого є метан, подається в реактор конверсії, попередньо очищений від домішок сірки, які можуть пошкодити каталізатор. Очищення проводиться шляхом гідрогенізаційного десульфурування, після чого сірковмісні сполуки перетворюються на сірководень і видаляються з газу. Наступний етап включає змішування газу з водяною парою у певному співвідношенні, яке зазвичай становить від 2,5:1 до 3,5:1.

Основна хімічна реакція, що відбувається під час парової конверсії, описується рівнянням:

**CH₄ + H₂O → CO + 3H₂.**

Ця реакція є ендотермічною, тому для її протікання потрібне постійне підведення тепла, що забезпечується спеціальними нагрівальними елементами в реакторі. Водночас в реакторі можуть відбуватися побічні реакції, зокрема вторинна реакція з утворенням вуглекислого газу:

**CO + H₂O → CO₂ + H₂.**

Цей процес відомий як реакція водяного газу (shift reaction), і він сприяє збільшенню виходу водню, що робить його важливою складовою технологічного циклу.

Каталізатор, який використовується у реакторі парової конверсії, зазвичай виготовляється на основі нікелю. Він забезпечує високу швидкість реакції та стабільність процесу, але є чутливим до домішок, особливо до сірки. Тому підтримання належного складу газової суміші й умов процесу є критично важливим.

Сучасні установки парової конверсії обладнані комп'ютерно-інтегрованими системами контролю, які забезпечують постійний моніторинг ключових параметрів, таких як температура, тиск, співвідношення метану і водяної пари, а також стан каталізатора. Використання інтелектуальних систем дозволяє своєчасно виявляти відхилення від оптимальних умов та оперативно їх коригувати.

Отриманий після конверсії газовий потік містить водень, монооксид вуглецю, вуглекислий газ і залишки метану. Для збільшення концентрації водню проводиться подальше очищення газу шляхом видалення вуглекислого газу (абсорбція МДЕА) та залишків інших компонентів.

Процес парової конверсії є одним із найбільш енергоємних етапів виробництва аміаку. Тому ефективність цього процесу визначає загальні витрати енергії та продуктивність всієї установки. Завдяки сучасним підходам до автоматизації, зокрема впровадженню мехатронних систем і програмованих логічних контролерів, вдається знижувати енергетичні витрати, підвищувати стабільність процесу та зменшувати вплив людського фактора.

**1.2.Основні характеристики продукції аміаку**

Аміак є одним із ключових продуктів хімічної промисловості, який широко використовується у виробництві добрив, хімічних реагентів, вибухових речовин та інших галузях. Його фізико-хімічні властивості, універсальність і велика кількість способів застосування визначають високу важливість цього продукту для промисловості та сільського господарства.

Хімічна формула аміаку – NH₃. Це безбарвний газ із характерним різким запахом, що добре розчиняється у воді, утворюючи аміачний розчин (гідроксид амонію). Його молекула має трикутну пірамідальну структуру, а хімічні властивості визначаються високою полярністю молекули та наявністю азоту, здатного утворювати водневі зв’язки.

Однією з найважливіших фізичних характеристик аміаку є його температура кипіння, яка становить –33,34 °C при атмосферному тиску. Завдяки цій властивості аміак може легко переводитися в рідкий стан під тиском, що робить його зручним для транспортування та зберігання. Щільність рідкого аміаку при температурі кипіння становить 0,682 г/см³. У газоподібному стані аміак є легшим за повітря, що дозволяє його ефективне використання в процесах транспортування та розподілу.

Аміак є сильнолужною сполукою, що проявляється в його реакціях із кислотами, утворюючи солі амонію, такі як амоній сульфат і амоній нітрат. Ці сполуки широко застосовуються як азотні добрива, що сприяють підвищенню врожайності сільськогосподарських культур. Крім того, аміак використовується у виробництві сечовини, яка є важливим компонентом комбінованих добрив.

Аміак має велике значення в хімічній промисловості як сировина для синтезу різних органічних і неорганічних речовин. Він використовується для виробництва нітратної кислоти, яка є основою для створення вибухових речовин, таких як тротил. Також аміак знаходить застосування у виробництві капролактаму для синтезу нейлону, меламіну для виготовлення смол і пластикових матеріалів, а також у холодильних установках як хладоагент завдяки його високій теплопровідності.

Однією з важливих характеристик аміаку є його висока реакційна здатність, яка забезпечує широкі можливості для застосування в хімічних процесах. Проте аміак також є токсичною речовиною, що вимагає дотримання суворих заходів безпеки під час роботи з ним. Вдихання парів аміаку може викликати подразнення дихальних шляхів, а потрапляння на шкіру чи слизові оболонки – хімічні опіки. Тому транспортування, зберігання та використання аміаку регламентуються строгими стандартами.

У виробництві аміаку важливе значення мають такі показники як чистота продукту, концентрація основних домішок і енергетична ефективність процесу. Сучасні технології синтезу дозволяють отримувати аміак із високим ступенем чистоти, що забезпечує його придатність для використання в різних сферах.

Аміак є надзвичайно важливим хімічним продуктом із широким спектром застосувань. Його фізико-хімічні властивості, висока реакційна здатність і універсальність роблять його незамінним у багатьох галузях, забезпечуючи розвиток сільського господарства, хімічної промисловості та інших секторів економіки.

**1.3. Область застосування автоматизації у виробництві аміаку.**

Автоматизація у виробництві аміаку є одним із ключових напрямів підвищення ефективності, продуктивності та безпеки технологічних процесів. Виробництво аміаку включає багатоетапний і високотехнологічний цикл, який потребує чіткого контролю та регулювання параметрів, таких як температура, тиск, витрата сировини та енергії. Використання сучасних автоматизованих систем дозволяє оптимізувати кожний етап виробничого процесу, зменшити втрати, уникнути аварійних ситуацій та забезпечити стабільність роботи обладнання.

Однією з головних областей застосування автоматизації є управління процесом парової конверсії природного газу, який є першим і одним із найважливіших етапів у виробництві аміаку. Автоматизовані системи контролюють співвідношення сировини, температуру та тиск у реакторі, а також забезпечують стабільну роботу каталізатора. Завдяки цьому досягається висока ефективність процесу та зменшується енергоспоживання.

На наступних етапах, таких як видалення вуглекислого газу та очищення синтез-газу, автоматизація забезпечує точне регулювання параметрів процесу абсорбції. Використання програмованих логічних контролерів та сенсорних систем дозволяє своєчасно виявляти відхилення у складі газової суміші та оперативно їх коригувати. Це сприяє підвищенню чистоти водню, який використовується для синтезу аміаку.

Особливе значення автоматизація має у процесі синтезу аміаку, де відбувається хімічна реакція між воднем і азотом у присутності каталізатора за високих температур і тиску. Системи автоматизації забезпечують моніторинг і контроль критичних параметрів, таких як співвідношення реагентів, температура, тиск і стан каталізатора. Використання інтелектуальних систем дозволяє підвищити вихід аміаку, мінімізувати побічні продукти та зменшити зношування обладнання.

Автоматизація також широко застосовується у процесах теплової утилізації, зокрема в роботі котлів-утилізаторів, які забезпечують утилізацію тепла від технологічних потоків. Сучасні системи управління дозволяють максимально ефективно використовувати вторинну енергію, знижуючи витрати на нагрівання сировини та інші допоміжні процеси.

Зберігання та транспортування аміаку також є важливою областю застосування автоматизації. Системи моніторингу та управління резервуарами з рідким аміаком дозволяють контролювати рівень, температуру та тиск, що забезпечує безпечні умови зберігання. Автоматизація допомагає уникнути перевищення допустимих параметрів, які можуть призвести до аварій або витоків аміаку.

Крім того, автоматизація знаходить застосування у забезпеченні безпеки виробництва. Інтегровані системи безпеки контролюють стан обладнання, виявляють потенційні несправності та своєчасно сигналізують про них, що дозволяє знизити ризик аварійних ситуацій. Сучасні автоматизовані системи також включають в себе функції енергоефективності та екологічного моніторингу, що відповідає сучасним вимогам сталого розвитку.

Автоматизація охоплює всі ключові етапи виробництва аміаку — від підготовки сировини до зберігання готового продукту. Її впровадження забезпечує стабільність технологічного процесу, знижує енергоспоживання, підвищує рівень безпеки та екологічності виробництва. Це робить автоматизацію невід'ємною складовою сучасного виробництва аміаку.

**1.4. Опис технологічного процесу парової конверсії природного газу**

Технологічний процес парової конверсії природного газу є однією з найважливіших стадій у виробництві аміаку, оскільки саме на цьому етапі отримується водень, необхідний для подальшого синтезу. Цей процес заснований на хімічній реакції метану, основного компонента природного газу, з водяною парою за високих температур і тиску. Реакція є ендотермічною, тобто потребує підведення тепла, і здійснюється у спеціалізованому обладнанні з використанням каталізаторів.

Паровій конверсії передує підготовчий етап, який включає очищення природного газу від домішок, зокрема сірковмісних сполук. Очищення є критично важливим для запобігання отруєнню каталізаторів. Для цього газ проходить стадію гідрогенізаційного десульфурування, під час якого сірковмісні сполуки перетворюються на сірководень і видаляються із системи.

Після очищення газ подається до змішувача, де у певному співвідношенні додається водяна пара. Співвідношення пари та природного газу, зазвичай, становить від 2,5:1 до 3,5:1. Отримана суміш нагрівається до температури 800–900 °C і подається до реактора конверсії, який забезпечений високоефективним каталізатором на основі нікелю. У реакторі протікає основна реакція парової конверсії, яка описується рівнянням:

**CH₄ + H₂O → CO + 3H₂.**

У результаті утворюється суміш, що складається з водню, оксиду вуглецю та залишків метану. Для збільшення виходу водню проводиться додаткова реакція, відома як реакція водяного газу:

**CO + H₂O → CO₂ + H₂.**

Ця реакція, яка протікає за участю іншого каталізатора, дозволяє перетворити оксид вуглецю на вуглекислий газ і додаткову кількість водню. Цей етап також відбувається у спеціальних реакторах, які забезпечують оптимальні умови для протікання реакції.

Отримана газова суміш після реакцій проходить через систему охолодження та очищення. На стадії очищення видаляється вуглекислий газ, для чого використовується хімічна абсорбція з використанням спеціальних розчинів, таких як розчини МДЕА. У результаті процесу утворюється синтез-газ, що складається переважно з водню та азоту в необхідних співвідношеннях для подальшого синтезу аміаку.

Важливою складовою технологічного процесу є контроль і управління параметрами, такими як температура, тиск, витрата сировини та стан каталізаторів. Використання автоматизованих систем управління дозволяє забезпечити стабільність і ефективність процесу, знижуючи ризик відхилень і втрат. Інтелектуальні системи моніторингу дають змогу своєчасно виявляти можливі несправності та проводити коригування в реальному часі.

Парову конверсію природного газу можна вважати основою всього виробництва аміаку, оскільки вона забезпечує отримання необхідної кількості водню для синтезу. Завдяки сучасним технологіям автоматизації та впровадженню інноваційних підходів, цей процес досягає високої ефективності, стабільності та мінімального впливу на навколишнє середовище.

**1.5 Аналіз сучасного стану автоматизації технологічних процесів в абсорбері парової конверсії природного газу в процесі виробництва аміаку**

Котел-утилізатор є важливим елементом у технологічному процесі виробництва аміаку, оскільки він забезпечує утилізацію теплової енергії, яка утворюється на різних стадіях синтезу. Ефективна робота цього обладнання безпосередньо впливає на енергетичну ефективність усього виробничого процесу. Сучасний стан автоматизації технологічних процесів у котлі-утилізаторі характеризується застосуванням інноваційних технічних рішень, спрямованих на підвищення продуктивності, зменшення енергетичних витрат і забезпечення безпеки.

Основним завданням автоматизації котла-утилізатора є забезпечення стабільного теплового режиму, який необхідний для утилізації вторинної енергії та її подальшого використання. Для цього використовуються автоматизовані системи моніторингу, які забезпечують контроль ключових параметрів, таких як температура, тиск і витрата теплоносія. Датчики, встановлені на різних ділянках котла, передають дані в реальному часі на програмовані логічні контролери, які аналізують інформацію та коригують роботу обладнання відповідно до заданих параметрів.

Одним із ключових аспектів автоматизації є регулювання витрати теплоносія. Це дозволяє забезпечити оптимальний рівень тепловіддачі, запобігти перегріву або недостатньому охолодженню теплоносія, а також підтримувати стабільну температуру в теплообмінних елементах котла. Автоматизовані системи регулювання, що використовують алгоритми PID-контролю, дозволяють забезпечити високу точність управління навіть у змінних умовах виробництва.

Особливу увагу приділено контролю параметрів вихідного газового потоку, що проходить через котел-утилізатор. Автоматизовані системи аналізують температуру та склад газу, що дозволяє оперативно реагувати на відхилення від норми. Це сприяє підвищенню енергоефективності процесу, оскільки дозволяє використовувати вторинне тепло максимально ефективно.

Сучасні системи автоматизації котлів-утилізаторів також включають елементи прогнозування та аналізу роботи обладнання. Впровадження цифрових моделей та систем діагностики дозволяє прогнозувати можливі несправності та запобігати їх виникненню. Наприклад, завдяки постійному моніторингу вібрацій та температури теплообмінних поверхонь можна визначити ранні ознаки зношування або корозії елементів котла.

Ще одним важливим аспектом автоматизації є інтеграція котла-утилізатора в загальну систему управління виробництвом. Це дозволяє забезпечити синхронізацію роботи котла з іншими технологічними установками, такими як реактори синтезу аміаку або теплообмінники, що забезпечує оптимальну взаємодію між ними. Завдяки цьому досягається зниження енергетичних витрат і забезпечується стабільність виробничого циклу.

Автоматизація технологічних процесів у котлі-утилізаторі також сприяє покращенню екологічних показників виробництва. Використання інтелектуальних систем управління дозволяє зменшити викиди теплової енергії в навколишнє середовище та мінімізувати втрати енергоресурсів. Крім того, автоматизація сприяє підвищенню безпеки, знижуючи ризики аварійних ситуацій завдяки своєчасному виявленню відхилень і швидкому реагуванню на них.

Таким чином, сучасний стан автоматизації технологічних процесів у котлі-утилізаторі характеризується широким використанням інноваційних технологій, які забезпечують підвищення ефективності, зниження витрат енергії та поліпшення екологічної ситуації. Це робить автоматизацію невід'ємною складовою сучасного виробництва аміаку, спрямованого на досягнення високої продуктивності та стійкості технологічних процесів.

**РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ КОНТРОЛЮ ТА УПРАВЛІННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ**

Розділ 2 присвячений аналізу існуючих автоматизованих систем контролю та управління технологічними процесами, які є важливою складовою сучасного промислового виробництва. У нинішніх умовах стрімкого розвитку технологій автоматизація стає невід'ємною частиною технологічних процесів, забезпечуючи їх ефективність, точність і безпеку. Особливу увагу приділяється впровадженню інтелектуальних рішень, які дозволяють оптимізувати параметри виробництва, підвищувати продуктивність і знижувати енергетичні витрати.

Сучасні автоматизовані системи контролю та управління охоплюють широкий спектр завдань: від моніторингу та аналізу основних параметрів до динамічного управління процесами в реальному часі. Вони базуються на використанні датчиків, програмованих логічних контролерів, систем людино-машинного інтерфейсу (HMI) та аналітичних програмних платформ. Такі системи дозволяють зменшити вплив людського фактора, мінімізувати ризики аварійних ситуацій і забезпечити відповідність виробництва сучасним стандартам якості та безпеки.

Автоматизація технологічних процесів є особливо важливою у високотехнологічних галузях, таких як хімічна промисловість. У цих сферах від точності та надійності систем контролю залежить не лише якість кінцевого продукту, але й безпека працівників і навколишнього середовища. Інтеграція автоматизованих систем управління в загальний виробничий цикл дозволяє досягти високого рівня адаптивності до змінних умов і забезпечити оптимальну продуктивність.

У цьому розділі буде детально проаналізовано існуючі системи автоматизації, їхні характеристики, принципи роботи та основні технологічні рішення. Особлива увага приділяється впровадженню інноваційних підходів, таких як використання штучного інтелекту, цифрових двійників і інтелектуальної обробки даних, які відкривають нові можливості для підвищення ефективності виробничих процесів.

Аналіз існуючих автоматизованих систем контролю та управління є важливим етапом у створенні власного рішення, оскільки дозволяє визначити їх переваги, недоліки та можливості для вдосконалення. Це створює основу для розробки нових підходів, які відповідатимуть сучасним вимогам до ефективності, безпеки та стійкості виробничих процесів.

**2.1. Огляд існуючих систем контролю та управління у виробництві аміаку.**

Сучасне виробництво аміаку є складним багатоступеневим технологічним процесом, що потребує високого рівня автоматизації. У зв’язку з цим системи контролю та управління технологічними процесами відіграють важливу роль у забезпеченні стабільності, безпеки та ефективності виробництва. Сьогодні використовуються різні автоматизовані рішення, які охоплюють усі ключові етапи виробництва аміаку: від підготовки сировини до зберігання готового продукту.

Одна з основних функцій автоматизованих систем у виробництві аміаку полягає у моніторингу параметрів технологічних процесів. Це забезпечується за допомогою сучасних сенсорів і датчиків, які встановлюються на ключових ділянках установки. Вони дозволяють в реальному часі контролювати параметри, такі як температура, тиск, витрати газів і рідин, а також хімічний склад реагентів і продуктів. Зібрані дані передаються на програмовані логічні контролери (PLC), які аналізують інформацію та приймають рішення щодо регулювання роботи обладнання.

Системи управління, що використовуються у виробництві аміаку, зазвичай включають кілька рівнів. На нижньому рівні здійснюється управління окремими технологічними вузлами, такими як реактори синтезу, теплообмінники, компресори та абсорбери. На цьому рівні використовуються локальні контролери, які відповідають за стабільну роботу обладнання. Середній рівень забезпечує інтеграцію всіх вузлів у єдину систему управління установкою, а також дозволяє операторам здійснювати моніторинг і управління через людино-машинний інтерфейс (HMI). Вищий рівень автоматизації включає систему управління виробничим процесом (DCS), яка об’єднує всі установки на підприємстві та забезпечує оптимізацію виробництва.

Одним із найпоширеніших рішень у сфері автоматизації є використання розподілених систем управління (DCS), які забезпечують централізований контроль за всіма етапами виробництва аміаку. Такі системи дозволяють інтегрувати дані з різних ділянок установки, забезпечуючи їх обробку в реальному часі. Завдяки цьому можна не лише оперативно реагувати на відхилення, але й здійснювати прогнозування стану обладнання, планувати обслуговування та оптимізувати використання ресурсів.

Іншою важливою тенденцією є впровадження систем інтелектуального управління, які базуються на використанні штучного інтелекту та машинного навчання. Такі системи дозволяють аналізувати великі обсяги даних, отриманих із датчиків, виявляти закономірності та прогнозувати можливі відхилення. Наприклад, інтелектуальні алгоритми можуть передбачати зношування каталізаторів у реакторах синтезу або зміну хімічного складу вихідного газу, що дозволяє своєчасно вживати коригувальних заходів.

Крім того, у сучасних установках для виробництва аміаку активно використовуються цифрові двійники — комп’ютерні моделі, які імітують роботу реальних технологічних процесів. Ці моделі дозволяють проводити тестування нових алгоритмів управління, оцінювати вплив різних факторів на роботу обладнання та оптимізувати параметри процесу без ризику для реального виробництва.

Також варто зазначити, що сучасні системи автоматизації включають інструменти для управління енергоспоживанням і зниження екологічного впливу виробництва. Наприклад, автоматизовані системи управління дозволяють утилізувати теплову енергію, яка утворюється на різних етапах виробництва, та використовувати її для інших технологічних потреб.

Таким чином, огляд існуючих систем контролю та управління у виробництві аміаку свідчить про їхній високий технологічний рівень і широкий спектр застосування. Сучасні системи забезпечують не лише стабільність і безпеку технологічних процесів, але й сприяють підвищенню продуктивності, зниженню витрат і мінімізації екологічних ризиків. Водночас розвиток інтелектуальних систем і цифрових технологій відкриває нові можливості для вдосконалення автоматизації у цій галузі.

**2.2. Визначення недоліків існуючих рішень та постановка задач для виконання магістерської науково-дослідної роботи.**

Котел-утилізатор є важливим елементом технологічного процесу виробництва аміаку, оскільки він забезпечує ефективну утилізацію теплової енергії, яка утворюється на різних стадіях виробництва. Ця енергія використовується для підігріву теплоносія, генерації пари або інших допоміжних технологічних потреб. Водночас існуючі рішення щодо автоматизації котлів-утилізаторів мають низку недоліків, які обмежують їхню ефективність і створюють потенційні ризики для стабільної роботи. Аналіз цих недоліків дозволяє чітко сформулювати задачі для подальших досліджень і розробок у межах магістерської науково-дослідної роботи.

Однією з ключових проблем є недостатня точність та адаптивність систем управління котлом-утилізатором. Багато існуючих рішень базуються на традиційних алгоритмах управління, таких як ПІД-регулятори, які не завжди забезпечують достатню гнучкість у змінних умовах роботи. Наприклад, раптові зміни вхідних параметрів, таких як температура або витрата газового потоку, можуть спричиняти нестабільність теплового режиму. Це знижує ефективність утилізації енергії та підвищує ризик пошкодження обладнання.

Ще одним суттєвим недоліком є обмежена можливість прогнозування стану обладнання. У багатьох установках контроль зводиться до моніторингу поточних параметрів, що не дозволяє своєчасно виявляти потенційні проблеми, такі як зношування теплообмінних елементів або забруднення внутрішніх поверхонь котла. Як наслідок, підвищується ризик аварійних ситуацій, які можуть зупинити роботу всієї установки та призвести до значних фінансових втрат.

Крім того, існуючі системи управління котлами-утилізаторами часто не інтегровані належним чином із загальною системою автоматизації виробництва. Це обмежує можливість синхронізації роботи котла з іншими елементами технологічного процесу, такими як реактори синтезу або абсорбери. Відсутність інтеграції призводить до неузгодженості в роботі обладнання, що знижує загальну ефективність виробництва.

Екологічний аспект також залишається недостатньо врахованим в існуючих рішеннях. Хоча котли-утилізатори вже дозволяють знижувати енергетичні витрати за рахунок утилізації тепла, потенціал для покращення їхньої екологічної ефективності залишається високим. Наприклад, недостатній контроль викидів залишкового тепла може спричиняти надмірне навантаження на навколишнє середовище.

З огляду на ці недоліки, у межах магістерської науково-дослідної роботи ставляться такі основні задачі. По-перше, необхідно розробити нову мехатронну систему управління котлом-утилізатором, яка забезпечуватиме вищу точність і адаптивність у динамічно змінних умовах. Це включає створення алгоритмів інтелектуального управління, які дозволять оптимізувати роботу обладнання в реальному часі.

По-друге, важливо впровадити інструменти прогнозування стану обладнання на основі аналізу великих даних і цифрових моделей. Це дозволить не лише вчасно виявляти потенційні несправності, але й планувати профілактичне обслуговування, мінімізуючи ризики зупинки виробництва.

По-третє, потрібно забезпечити інтеграцію нової системи управління з існуючою автоматизованою системою виробництва. Це сприятиме узгодженості роботи всіх елементів установки, підвищуючи її ефективність та енергоекономічність.

Таким чином, аналіз сучасного стану автоматизації котлів-утилізаторів показав наявність низки суттєвих недоліків, які потребують вирішення. Постановка задач для магістерської науково-дослідної роботи визначає ключові напрями вдосконалення, які дозволять підвищити ефективність, стабільність і екологічну стійкість технологічних процесів у виробництві аміаку.

**2.3. Розробка структурно-логічної схеми комп’ютерно-інтегрованої системи управління.**

Розробка структурно-логічної схеми комп’ютерно-інтегрованої системи управління є ключовим етапом створення ефективної автоматизованої системи, здатної забезпечувати стабільність, адаптивність і безпеку технологічного процесу. У контексті управління котлом-утилізатором у виробництві аміаку основною метою є побудова системи, яка дозволить оптимізувати витрати енергоресурсів, мінімізувати ризики аварій і забезпечити інтеграцію з іншими технологічними вузлами.

Структурно-логічна схема комп’ютерно-інтегрованої системи управління повинна відображати взаємодію всіх компонентів системи, включаючи апаратну частину (датчики, виконавчі механізми, контролери), програмне забезпечення для моніторингу й управління, а також механізми інтеграції з іншими системами автоматизації.

У розробленій схемі система поділяється на кілька рівнів. На нижньому рівні розташовані датчики й виконавчі механізми, які забезпечують збирання даних про технологічні параметри котла-утилізатора, такі як температура, тиск, рівень теплоносія та витрати енергії. Ці дані передаються до програмованих логічних контролерів (PLC), які здійснюють первинну обробку інформації та приймають рішення про регулювання параметрів роботи.

Середній рівень включає серверну частину системи, де відбувається накопичення, зберігання та аналіз зібраних даних. На цьому рівні реалізується інтеграція з людино-машинним інтерфейсом (HMI), що дозволяє операторам відстежувати стан котла в реальному часі, отримувати сповіщення про можливі відхилення й змінювати параметри системи при необхідності.

Вищий рівень системи забезпечує централізоване управління й оптимізацію технологічного процесу. Він включає модулі прогнозування, які базуються на методах штучного інтелекту та машинного навчання, і дозволяє визначати оптимальні режими роботи котла. Крім того, цей рівень забезпечує інтеграцію з загальною системою управління виробництвом (DCS) для синхронізації роботи котла-утилізатора з іншими елементами установки.

Особливу увагу в схемі приділено забезпеченню безпеки. Система включає резервні модулі, які активуються у випадку відмови основного обладнання, а також механізми аварійного відключення котла у разі перевищення критичних значень параметрів.

Інтеграція з хмарними платформами дозволяє реалізувати функції дистанційного моніторингу й управління, що особливо важливо для великих виробництв із розподіленою структурою. Використання цифрових двійників дозволяє моделювати різні сценарії роботи котла, оцінювати їх вплив на виробництво і впроваджувати найбільш ефективні рішення.

Структурно-логічна схема котла утилізатора наведена на рис. 2.3.1.

****

Рис. 2.3.1. Структурно-логічна схема котла утилізатора

Показником ефективності котла утилізатора є температура продукту на виході , а мета керування – підтримувати цю температуру на заданому рівні. Котли утилізатори мають одну вихідну регульовану координату, яка підлягає стабілізації, – температуру *T* продукту на виході. Вхідною регулюючою кординатою можу формально бути як витрата продукту *Fn*, так і витрата холодоносія. У більшості випадків для стабілізації температури використовується витрата *FT*. Контрою підлягають наступні технологічні параметри - тиск, витрата і температура продукту продукту, який підлягає нагріву (охолодженню конденсації тощо) тиск витрата і температура холодоносія , а також температура охолодженого продукту.

Стабілізація температури продукту на виході може здійснюватися як одноконтурними системами регулювання, так і більш складними: каскадними, комбіноватими, каскадно-комбінованими, АСР співвідношення потоків та іншими.

Розроблена структурно-логічна схема комп’ютерно-інтегрованої системи управління є основою для впровадження інноваційного підходу до автоматизації котла-утилізатора. Вона забезпечує гнучкість, ефективність і безпеку роботи, дозволяючи досягти високих показників продуктивності та мінімізувати енергетичні витрати. Ця схема інтегрує всі ключові елементи управління в єдину систему, що відповідає сучасним вимогам до промислової автоматизації.

**РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА МЕХАТРОННОЇ КОМП’ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ КОТЛОМ-УТИЛІЗАТОРОМ У ВИРОБНИЦТВІ АМІАКУ**

Розділ 3 присвячений розробці мехатронної комп’ютерно-інтегрованої системи управління котлом-утилізатором, яка є ключовим елементом у забезпеченні енергоефективності та стабільності технологічного процесу виробництва аміаку. В умовах сучасної промисловості основними вимогами до систем управління є висока точність, адаптивність, інтеграція з іншими виробничими вузлами та можливість роботи у динамічно змінних умовах.

Котел-утилізатор виконує важливу функцію утилізації теплової енергії, що виділяється на різних стадіях виробництва аміаку, шляхом її передачі теплоносію для подальшого використання. Однак стабільна робота котла залежить від ефективності системи управління, яка має забезпечувати контроль ключових параметрів, таких як температура, тиск, витрати теплоносія та стан теплообмінних елементів. Сучасні підходи до автоматизації передбачають впровадження мехатронних систем, які поєднують механічні, електронні та програмні компоненти, створюючи оптимальні умови для керування складними технологічними об’єктами.

У цьому розділі здійснюється детальний опис концепції та етапів розробки комп’ютерно-інтегрованої системи управління, яка відповідає сучасним вимогам до енергоефективності, надійності та екологічної безпеки. Розглядаються основні технічні рішення, що забезпечують автоматизацію котла-утилізатора, зокрема використання інтелектуальних алгоритмів регулювання, цифрових моделей для прогнозування та оцінки стану обладнання, а також інтеграцію з розподіленими системами управління виробництвом.

Особливу увагу приділено питанням забезпечення безпеки та надійності роботи системи. Передбачається впровадження механізмів резервування, аварійного відключення та дистанційного моніторингу, що дозволить знизити ризики виходу з ладу обладнання та мінімізувати негативний вплив на технологічний процес.

Мета цього розділу полягає у розробці ефективного рішення, яке дозволить забезпечити стабільну роботу котла-утилізатора, підвищити ефективність використання енергоресурсів і створити умови для оптимальної взаємодії між усіма елементами виробничого циклу. Результати роботи стануть основою для подальших експериментальних досліджень і впровадження нових технологій автоматизації у хімічній промисловості.

**3.1. Розробка математичної моделі об’єкта управління.**

Температура розчину пари на виході котла утилізатора стабілізується за рахунок зміни витрати воді по байпасу.

Вихідні параметри підлягають постійному контролю, а інформація про них реєструється в трендах ЕОМ АСКТП.

Характерною особливістю теплопередачі в рідинних середовищах є наявність конвекційних потоків, які створюються за рахунок як вільної, так і вимушеної конвекції. При цьому розрізняють теплопередачу від стінки до рідини, між двома рідинами, які легко змішуються, і між рідинами, які між собою не змішуються. Теплопередача від твердої стінки до рідини найбільш поширена в промисловості. Це кожухотрубні теплообмінники, реактори з рідинною оболонкою, випарні установки, кип'ятильники, дефлегматори ректифікаційних колон тощо. Рідинні середовища можуть як нагріватися, так і охолоджуватися. Рух рідинного середовища може бути ламінарним і турбулентним. Тверда стінка, як правило металева, відіграє роль перегородки, через яку проходить процес теплопередачі від джерела теплової енергії до приймача. Джерелом може бути електроенергія, полум’я при спалюванні палива, нагріті гази або перегріта пара тощо. Тепло від джерела передається до перегородки товщиною , а від неї – до рідинного середовища, яке нагрівається. На рис. 3.1 схематично показано процес перенесення теплової енергії від джерела до нагрівального середовища.



Рис. 3.1 - Фізична модель реологічних переходів при передачі

тепла через стінку

Математичному моделюванню процесів перенесення теплової енергії приділяється найбільша увага, так як температура супроводжує всі без винятку явища в природі й техніці. Процеси перенесення тепла, як вказував акад. В.В. Ликов , є одним з основних розділів сучасної науки і має величезне практичне значення в енергетиці, в технологічних процесах хімічної, харчової, нафтопереробній, легкій та інших галузях промисловості. Особлива увага приділяється нестаціонарному теплообміну і пов'язане з цим рішення задач нестаціонарної теплопровідності. Дослідження кінетики хімічних реакцій, процесів випарювання, сорбції, сушіння, спалювання тощо пов'язані з розв'язком задач дифузії, котрі аналогічні задачам нестаціонарної теплопровідності. Таким чином, аналітична теорія нестаціонарної теплопровідності знаходить широке застосування для вирішення різноманітних технічних проблем.

Перенесення теплової енергії від однієї частини тіла до іншої або від одного тіла до іншого, який знаходиться в зіткненні з першим, у всій науковій літературі називають одним терміном - теплопровідністю. При цьому вказується, що аналітична теорія теплопровідності розглядає речовину як суцільне середовище, а тіло перенесення теплової енергії однорідним та ізотропним. З цього можна зробити висновок, що дослідники явищ перенесення тепла розуміли, що процес перенесення теплової енергії формально розділяється на два види:

1.процес перенесення тепла в однорідному ізотропному і суцільному середовищі (тілі);

2.процес перенесення тепла від одного тіла до іншого, який знаходиться в тісному сполученні з першим.

При дослідженні явища перенесення теплової енергії виходитимемо якраз з цих позицій, але теплову енергію, яка переноситься в одній суцільній однорідній речовині (тілі) називатимемо стоком теплової енергії, а теплову енергію, яка передається від однієї речовини (тіла 1) до іншої (тіла 2) – реологічним перенесенням. Відомо, що при спряженні двох навіть однорідних тіл між ними існує границя розділу (на цьому принципі засновані, наприклад, методи зварювання). Границю розділу між двома речовинами називатимемо зоною реологічного переходу, а процес, який проходить на границі розділу двох речовин (тіл) – реологічним перетворенням теплової енергії. Приймається до уваги той факт, що теплова енергія, яка володіє деяким потенціалом з певною щільністю, спочатку переходить через границю розділу з однієї речовини (тіла) до іншої, а потім розповсюджується (накопичується, або інтегрується) в іншій речовині (тілі). Відомий вчений Д.А. Франк-Каменецький у своїй монографії «Диффузия и теплопередача в химической кинетике» вказує, що рівняння термодинамічної теорії зручно писати для приведеного теплового потоку, виділивши перенесення тепла дифузією як окремий фізичний ефект. Академік Д.А. Франк-Каменецький розділяє процеси перенесення тепла на термодифузію та теплопровідність. Трудно не погодитися з тим, що термодинамічна теорія в її загальному вигляді розглядає повні потоки теплової енергії без їх розділення на молекулярні та конвекційні, тобто без виділення ролі гідродинамічного потоку. Там же він вказує, що термодинамічна теорія дає тільки загальну структуру рівнянь і зв'язок між перехресними коефіцієнтами термодифузії та дифузійної теплопровідності. Таким чином мова йде про те, що на границі перенесення теплової енергії від одного тіла до іншого має місце процес термодифузії, а далі в другому тілі з меншим потенціалом теплової енергії перенесення тепла здійснюється дифузійною теплопровідністю, яка фактично є стоком цієї енергії.

Для процесів перенесення теплової енергії з одного середовища в інше використовується коефіцієнт температуропровідності

, (3.1)

де  - теплопровідність;  - середня теплоємність середовища;  - густина.

Для газового середовища коефіцієнт температуропровідності визначається формулою

, (3.2)

де  - середня молекулярна маса і теплоємність газового середовища відповідно;  - універсальна газова стала;  - поточна температура й тиск відповідно.

Залежність коефіцієнтів дифузії газів від тиску й температури достатньо добре описується наступним рівнянням

, (3.3)

де  - коефіцієнт дифузії при нормальній температурі  і тиску ;  - поточне значення температури й тиску.

Для процесів перенесення кількості руху використовується коефіцієнт кінематичної в'язкості , який зв'язаний зі звичайним коефіцієнтом в'язкості  співвідношенням

. (3.4)

Процеси теплопередачі характеризуються тепловим потоком, який визначається таким чином

, (3.5)

де  - коефіцієнт тепловіддачі,;  - температури нагріву тіла 1 і 2 відповідно, причому ;  - різниця температур.

Для розрахунку процесів перенесення речовини використовується коефіцієнт масовіддачі . Дифузійний потік при цьому виражається таким рівнянням

, (3.6)

де  - концентрації речовини 1 і 2 відповідно.

При описанні процесів передачі тепла або речовини між потоком газу або рідини й твердою поверхнею уводять умовне поняття приведеної плівки товщиною , в якій проходить зміна теплової енергії чи концентрації. Плівка безпосередньо прилягає до поверхні перенесення. За аналогією зі сказаним умовна плівка є нічим іншим, як зоною реологічного переходу. Причому приймається, що механізм перенесення в умовній плівці є чисто молекулярним. Така ж умова висувалася й до зони реологічного переходу. Для визначення товщини такої умовної плівки використовуються наступні формули:

- при перенесенні теплової енергії

; (3.7)

- при перенесенні концентрації речовини

, (3.8)

де  - коефіцієнт дифузії при перенесенні маси.

Принцип передачі теплової енергії від джерела з температурою  до рідинного середовища з температурою  здійснюється за двома реологічними переходами. Такий об’єкт дослідження описується системою двох нелінійних рівнянь. Якщо джерелом тепла є рідина або перегріта водяна пара з температурою , то такий процес теплопередачі має як дифузійну, так і конвекційну складову. Тому диференціальне рівняння для першого реологічного переходу описуватиметься таким рівнянням

, (3.9)

де  - температуропровідність речовини джерела;

 - лінійна швидкість руху потоку джерела;

 - об'ємна витрата потоку джерела;

 - поверхня теплообміну;

 - стік тепла на першому переході товщиною  за час ;

 - стік другого реологічного переходу.

Так як перенесення тепла через стінку здійснюється тепловіддачею, то кількість теплової енергії , яка віддається зовнішній стороні стінки,

, (3.10)

а кількість теплоти , яка віддається від внутрішньої стінки до рідинного середовищі,

, (3.11)

де  - коефіцієнт тепловіддачі від джерела теплової енергії до стінки;

 - коефіцієнт тепловіддачі від внутрішньої стінки до рідинного середовища.

Якщо джерелом тепла є перегріта пара, то кількість теплоти, яка поглинається зовнішньою стінкою [77],

, (3.11)

де  - теплота фазового переходу пари;  - масова витрата пари.

Якщо джерелом тепла є теплоносій у вигляді гарячої води, високотемпературної рідини або топкових газів, то кількість теплоти, яка поглинається зовнішньою стінкою,

, (3.12)

де  - масова витрата теплоносія;

 - питома теплоємність теплоносія;

 - його температура.

Кількість теплоти, яка накопичується в стінці

, (3.12)

де  - маса стінки;

 - питома теплоємність матеріалу стінки.

Кількість теплоти, яка накопичується в рідинному середовищі

, (3.13)

де  - маса рідинного середовища;

 - питома теплоємність рідинного середовища.

Якщо рідинне середовище є рухомим, то кількість теплоти, яка виноситься цим середовищем, дорівнює

, (3.14)

де  - кількість теплоти, яка стікає з рідинним середовищем;

 - масова витрата рідинного середовища;

 - температура стоку в напрямку  за час стоку .

Виходячи з вищенаведеного, можна скласти рівняння теплового балансу для стоку теплової енергії:

- для реологічного переходу товщиною 

, (3.15)

- для реологічного переходу товщиною 

. (3.16)

З врахуванням (3.2) – (3.8) рівняння (3.9) і (13.10) приймають наступний вигляд:

, (3.17)

де  - стала часу першого реологічного переходу;

,  - коефіцієнти передачі.

, (3.18)

де  - стала часу другого реологічного переходу;

 - коефіцієнт передачі.

Якщо прийняти, що координата  змінюється аналогічно координаті , то рівняння (3.12) приводиться до такого вигляду

, (3.19)

де  - стала часу;  - коефіцієнт передачі.

Таким чином рівняння (3.11) і (3.13) описують процес стоку теплової енергії. З рівняння (3.11) знайдемо температуру



та її похідну



і підставимо в рівняння (3.13). У результаті маємо

 , (3.20)

де ,  - сталі часу;

,  - коефіцієнти передачі.

Функцію стоку знайдемо, продиференціювавши рівняння (3.14) за часом :

 (3.21)

Підствивши (3.15) у рівняння (3.1), отримуємо нелінійне диференціальне рівняння для перенесення тепла через стінку в такому вигляді

. (3.22)

Використовуючи метод нульового градієнта, останнє рівняння розділяється на таку систему рівнянь:

; (3.23)

. (3.24)

Аналізуючи отриману систему рівнянь бачимо, що рівняння (3.17) описує процес перенесення тепла відомим диференціальним рівнянням, а (3.18) – описує вільну складову стоку теплової енергії. Якщо зміна температури , що практично має місце при такому перенесення тепла, то приходимо до такого диференціального рівняння перенесення тепла

,

яке розділяється на наступну систему лінійних диференціальних рівнянь:

; (3.25)

 . (3.26)

За аналогією зі сталою часу, відношення  назвемо сталою відстані перенесення тепла і позначимо її . За цю відстань можна прийняти ширину зони реологічного переходу  (див. рис. 3.1). Ураховуючи сказане, рівняння (3.19) можна записати в такій формі

. (3.27)

Граничними умовами для рівняння (3.21) будуть: при  ; при  приймемо, що ; при  . Тоді рішенням рівняння (3.21) приймає вигляд

. (3.28)

Граничними умовами для рівняння (3.20) будуть: при  ; при  . Тоді рішенням цього рівняння при  буде

, (3.29)

де ; .

Рівняння (3.27) запишемо в такій формі

 . (3.30)

Як видно з рис. 3.1 на другому переході теплота від стінки з температурою  за рахунок тепловіддачі поступає з зону реологічного перетворення товщиною  і далі за рахунок конвекційного та молекулярного перенесення передається рідинному середовищу. Диференціальне рівняння для другого реологічного переходу описуватиметься таким рівнянням

 , (3.31)

де  - температуропровідність нагріваючої речовини;

 - лінійна швидкість руху потоку джерела;

 - об'ємна витрата потоку джерела;

 - поверхня теплообміну;

 - стік тепла на другому реологічному переході товщиною  за час ;

 - стік першого реологічного переходу.

Рівняння теплового балансу для другого реологічного переходу має вигляд

, (3.32)

де  - кількість теплоти, яка віддається від стінки до рідинного середовища;

 - кількість теплоти, яка накопичується в пограничному шарі товщиною  за час перенесення тепла ;

 - кількість тепла, яка переноситься з пограничного шару шляхом конвективного та молекулярного перенесення (теплота стоку).

Якщо прийняти, що товщина стінки  незначна, а втрата теплової енергії , то кількість тепла

. (3.33)

Так як перенесення тепла через стінку здійснюється тепловіддачею, то кількість теплової енергії , яка віддається зовнішній стороні стінки,

, (3.34)

Кількість теплоти, яка накопичується в стінці

, (3.35)

де  - маса стінки;  - питома теплоємність матеріалу стінки.

Таким чином, кількість тепла, яка відводиться від внутрішньої сторони перегородки, дорівнюватиме

. (3.36)

Так як перенесення тепла через стінку здійснюється тепловіддачею, то кількість теплової енергії , яка віддається від стінки до рідинного середовища,

, (3.37)

Якщо припустити, що передача тепла через стінку здійснюється за лінійним законом, то , де  - коефіцієнт втрати тепла стінкою. Тоді рівняння (3.28) приймає такий вигляд

. (3.38)

Якщо рідинне середовище є рухомим, то кількість теплоти, яка виноситься цим середовищем, дорівнює

, (3.39)

де  - кількість теплоти, яка стікає з рідинним середовищем;

 - масова витрата рідинного середовища;

 - температура стоку в напрямку  за час стоку .

Підставляючи (13.27), (13.28), (13.31) і (13.32) у рівняння (13.29), з врахуванням (13.30) маємо

, (3.40)

де  стала часу другого реологічного перетворення; ;  - коефіцієнти перетворення.

Стік тепла рідинним середовищем опишемо таким диференціальним рівнянням

 , (3.41)

де  - стала часу стоку.

Знайдемо похідну

 . (3.42)

Підставимо рівняння (13.34) і (13.35) у (13.33). У результаті отримуємо

 , (3.43)

де ;  - сталі часу;

;  - коефіцієнти перетворення.

Так як , а , то при  . Тоді рівняння (3.36) приймає таку форму

 . (3.44)

Виконавши диференціювання (3.37) за часом , отримуємо вираз для стоку другого реологічного переходу в такій формі

 . (3.45)

Підставимо рівняння (3.38) у (3.24) і в результаті отримуємо нелінійне диференціальне рівняння для другого реологічного переходу

 . (3.46)

Приймаючи, що , а , з (3.39) маємо

  (3.47)

Згідно з методом нульового градієнта рівняння (3.40) розділяється на наступну систему рівнянь:

; (3.48)

 , (3.49)

де ; ; ;

. (3.50)

Граничними умовами для рівняння (3.41) будуть: при  ; при  приймемо, що ; при  . Тоді рішенням рівняння (3.21) приймає вигляд

 . (3.51)

Граничними умовами для рівняння (3.52 ) будуть: при  ; при  . Тоді рішенням цього рівняння при  буде

, (3.52)

де ; .

Підставивши рівняння (3.44) у (3.45), отримуємо

 . (3.53)

Позначимо в (3.23) , а в (3.46) . У результаті, підставивши (3.23) у (3.46), маємо:

; (3.47)

. (3.48)

Розв'язавши систему рівнянь відносно  і , отримуємо математичні моделі розподілення температури до і після теплопередаючої стінки:

; (3.49)

. (3.50)

Якщо врахувати, що  і, то рівняння (3.49) і (3.50) приймають вигляд:

; (3.51)

. (3.52)

Згідно з теорією теплопровідності [12] відстань розповсюдження тепла за рахунок тепловіддачі дорівнює відношенню коефіцієнта теплопровідності до коефіцієнта тепловіддачі, тобто . Таким чином, прийнявши  та , і враховуючи, що коефіцієнт теплопровідності , рівняння (3.51) і (3.52) приймають таку форму:

 ; (3.53)

 . (3.54)

Якщо врахувати, що , а , де  - поперечні перетини потоків джерела та рідинного середовища;  - об’ємні витрати цих потоків, а також те, що масові витрати , , то рівняння (3.53) і (3.54) приймають таку форму:

 ; (3.55)

 , (3.56)

де , , , .

З рівнянь (3.55) і (3.56) видно, що на зміну температури в зонах реологічних переходів суттєвий вплив чинять масові витрати теплових потоків джерела  та рідинного середовища . Знайдемо відношення температур . Після підстановки рівнянь (3.55) і (3.56), позначивши, що , маємо

 . (3.57)

З рівняння випливає, що при ,  і  маємо

. (3.58)

Рівняння (3.55), (3.56) і (3.58) описують процес перенесення теплової енергії від джерела з вищою температурою  через стінку до рідинного середовища з меншою температурою . Причому досліджено вплив температури рідинного середовища на джерело теплової енергії, за рахунок чого створюється другий реологічний перехід, що призводить до зменшення джерела в призонній області, яка являє собою інтегральну імпульсну дельта-функцію Дірака.

 (3.59)

, де - математична модель котла утилізатора в даному разі є стоком тепла на другому реологічному переході;

 - температуропровідність нагріваючої речовини;

 - лінійна швидкість руху потоку джерела;

 - об'ємна витрата потоку джерела;

 - поверхня теплообміну;

При нульових початкових умовах прирівняємо до 0 ліву та праву частину рівняння:

 (3.60)  (3.61)

В даному випадку можна зменшити порядок похідної. Зробимо це, та отримаємо:

 (3.62)

Позначимо:

 (3.63)

Вирішимо систему рівнянь:

 (3.64)

 (3.65)

2 (3.66)

При нульових початкових умовах, 

- початкова температура продукту;

- кінцева температура продукту.

Якщо теплота передається від стінки до речовини(продукту), то така передача теплоти описується рівнянням:

 (3.67)

Якщо теплота поглинається та речовина(продукт) охолоджується, то процес тепловіддачі описується рівнянням:

 (3.68)

В даному випадку, згідно з регламентом післе проходження котлів першого ступеня у котлі утилізаторі відбувається охолодження конвертованого газу з 482 °C до 371 °C. Тобто, необхідно використати рівняння:

 (3.69)

**3.2. Параметричний синтез автоматичної системи регулювання**

Параметричний синтез автоматичної системи регулювання є ключовим етапом у створенні ефективної мехатронної комп’ютерно-інтегрованої системи управління котлом-утилізатором. Цей процес передбачає визначення оптимальних значень параметрів регуляторів, що забезпечують стабільність, точність і швидкодію системи в умовах змінних режимів роботи.

У контексті управління котлом-утилізатором основними завданнями автоматичної системи регулювання є підтримання оптимальних температурних і тискових параметрів теплоносія, забезпечення стабільної роботи теплообмінних елементів та запобігання аварійним ситуаціям. Для цього необхідно здійснити параметричний синтез, який включає аналіз динамічних характеристик об’єкта управління, вибір структури регулятора та налаштування його параметрів відповідно до вимог технологічного процесу.

Першим етапом синтезу є розробка математичної моделі котла-утилізатора, яка враховує основні фізичні процеси, що відбуваються в системі. Модель описує залежності між вхідними та вихідними параметрами, такими як температура, тиск і витрата теплоносія. Зазвичай використовується метод диференціальних рівнянь, які відображають теплообмін і динаміку роботи котла. Ця модель є основою для проведення подальшого аналізу та синтезу.

Наступним етапом є вибір структури регулятора. У випадку котла-утилізатора часто застосовуються ПІД-регулятори, які забезпечують пропорційне, інтегральне та диференційне управління. Завдяки своїй універсальності ПІД-регулятори дозволяють ефективно компенсувати відхилення від заданих параметрів і забезпечують стабільну роботу системи. Водночас для більш складних умов, які можуть включати нелінійності чи змінність параметрів об’єкта, доцільно використовувати адаптивні або інтелектуальні регулятори.

Параметричний синтез передбачає налаштування коефіцієнтів регулятора (пропорційного, інтегрального та диференційного) таким чином, щоб забезпечити оптимальну роботу системи. Для цього використовуються різні методи, такі як методи частотного аналізу, критерії якості регулювання (наприклад, критерій інтегральної квадратичної помилки) або чисельні оптимізаційні алгоритми. Синтез проводиться з урахуванням заданих технічних вимог, серед яких мінімізація часу перехідного процесу, відсутність перерегулювання та забезпечення стійкості системи.

Особливу увагу приділяють аналізу динамічних характеристик системи, таких як стійкість, амплітудно-частотна характеристика та реакція на зовнішні збурення. Для цього проводиться моделювання системи з використанням програмного забезпечення, наприклад MATLAB/Simulink, що дозволяє візуалізувати роботу системи та перевірити її характеристики в різних умовах.

Крім того, важливим аспектом синтезу є врахування впливу зовнішніх збурень, таких як зміни вхідних параметрів або теплових навантажень. Для цього можуть використовуватися методи стійкого управління, які дозволяють мінімізувати вплив непередбачуваних факторів і забезпечити стабільну роботу котла-утилізатора.

Результатом параметричного синтезу є система регулювання, яка забезпечує оптимальну роботу котла-утилізатора в умовах реального виробництва. Вона дозволяє підтримувати задані параметри теплоносія, знижувати енергетичні витрати, мінімізувати ризики аварій і забезпечувати високу ефективність технологічного процесу. Цей етап є важливою частиною загальної розробки мехатронної системи управління та створює основу для подальшого впровадження й тестування системи в реальних умовах.

На рис. 3.2 приведено графік впливу часу запізнення  на вихідну температуру конвертованого газу у котлі утилізаторі:



Рис. 3.2

З рис.3.2 бачимо, що при зменшенні часу чистого запізнювання час регулювання збільшується.

На рис. 3.3 приведено графік впливу початкової температури  на вихідну температуру конвертованого газу у котлі утилізаторі:



Рисунок 3.3

З рис.3.3 бачимо, що чим нижча початкова температура, тим менше час регулювання, відповідно процес охолодження конвертованого газу відбувається швидше.

**3.3. Розробка алгоритмів управління та логіки роботи системи.**

Розробка алгоритмів управління та логіки роботи системи є ключовим етапом у створенні ефективної мехатронної комп’ютерно-інтегрованої системи управління котлом-утилізатором у виробництві аміаку. Цей процес передбачає визначення послідовності дій і взаємодії компонентів системи, спрямованих на забезпечення стабільної, безпечної та енергоефективної роботи котла в різних режимах експлуатації.

Алгоритми управління повинні враховувати специфіку технологічного процесу та забезпечувати динамічне регулювання ключових параметрів, таких як температура, тиск і витрати теплоносія. Для цього на основі математичної моделі котла розробляються алгоритми, які дозволяють коригувати роботу системи в реальному часі залежно від змін вхідних умов.

Логіка роботи системи визначає правила взаємодії між її компонентами, зокрема датчиками, регуляторами та виконавчими механізмами. Ключовою складовою є розробка стратегії управління, яка включає автоматичне регулювання основних параметрів і реагування на відхилення від заданих режимів. Наприклад, при перевищенні критичної температури теплоносія алгоритм повинен забезпечити зниження подачі тепла шляхом зміни витрати газового потоку або активації допоміжних охолоджувальних систем.

Основою алгоритмів управління є методи адаптивного регулювання, які дозволяють системі автоматично підлаштовувати свої параметри залежно від змінних умов експлуатації. Наприклад, PID-регулятори з функцією самоналаштування здатні забезпечувати оптимальну роботу котла навіть у випадках різких змін теплового навантаження. Для складніших сценаріїв можуть застосовуватися алгоритми на основі штучного інтелекту або машинного навчання, які аналізують великі обсяги даних і прогнозують можливі відхилення.

Логіка роботи системи також включає сценарії роботи в аварійних умовах. Наприклад, у разі різкого підвищення тиску теплоносія алгоритм має активувати аварійний клапан і зупинити подачу теплової енергії для запобігання пошкодженню обладнання. Крім того, передбачається реалізація функцій самодіагностики, які дозволяють виявляти несправності в роботі компонентів системи та передавати відповідні повідомлення оператору.

Розробка алгоритмів і логіки роботи системи базується на використанні сучасних програмних інструментів, таких як MATLAB/Simulink, LabVIEW або спеціалізованих SCADA-систем. Ці платформи дозволяють моделювати роботу системи, аналізувати її динамічні характеристики та оптимізувати алгоритми до впровадження у реальне виробництво.

Важливим елементом є інтеграція алгоритмів управління в загальну систему автоматизації підприємства. Це забезпечує узгодженість роботи котла-утилізатора з іншими технологічними вузлами, такими як реактори синтезу або теплообмінники. Такий підхід дозволяє оптимізувати використання енергоресурсів і забезпечити стабільну роботу всього виробничого комплексу.

Результатом розробки алгоритмів і логіки роботи системи є створення програмного забезпечення, яке забезпечує стабільну роботу котла-утилізатора в різних режимах, враховуючи як штатні, так і аварійні ситуації. Це дозволяє значно підвищити ефективність роботи обладнання, знизити енергетичні витрати і мінімізувати ризики, пов’язані з відхиленнями від нормального режиму роботи.

Таким чином, розроблені алгоритми управління та логіка роботи системи є фундаментом для реалізації надійної та енергоефективної мехатронної комп’ютерно-інтегрованої системи управління, яка відповідає сучасним вимогам промислової автоматизації.

**РОЗДІЛ 4. ТЕОРЕТИЧНІ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ**

Розділ 4 присвячений теоретичним та експериментальним дослідженням системи управління, розробленої для котла-утилізатора у виробництві аміаку. Проведення таких досліджень є важливим етапом для оцінки ефективності та надійності запропонованих технічних рішень, перевірки відповідності системи заданим вимогам і оптимізації її роботи в умовах реального виробництва.

Теоретичні дослідження спрямовані на аналіз динамічних характеристик розробленої системи, моделювання її роботи за різних режимів експлуатації, а також оцінку стійкості, точності та швидкодії. Ці аспекти є критично важливими для забезпечення стабільної роботи котла-утилізатора, ефективної утилізації теплової енергії та зменшення енергетичних витрат.

Експериментальна частина розділу зосереджена на практичній перевірці роботи системи управління в умовах, максимально наближених до реальних. У ході експериментів аналізуються параметри роботи системи, такі як регулювання температури, тиску та витрати теплоносія, а також реакція системи на зовнішні збурення чи аварійні ситуації. Це дозволяє виявити можливі недоліки, перевірити точність виконання алгоритмів управління та оцінити рівень інтеграції системи у загальний виробничий процес.

У цьому розділі також розглядаються питання оптимізації роботи системи на основі отриманих теоретичних і експериментальних даних. Це включає вдосконалення алгоритмів управління, покращення параметрів безпеки та адаптивності системи, а також впровадження рекомендацій для подальшого розвитку мехатронних комп’ютерно-інтегрованих рішень.

Таким чином, теоретичні та експериментальні дослідження є невід’ємною частиною розробки сучасної системи управління. Вони дозволяють не лише підтвердити ефективність запропонованих рішень, але й адаптувати систему до специфічних умов роботи, забезпечуючи її стабільність, енергоефективність і надійність у виробництві аміаку.

**4.1. Аналіз динамічних характеристик розробленої системи**

Для підвищення якості регулювання ОР, що мають суттєвий час запізнювання та характеризуються значними відхиленнями, використовують каскадні АСР. В каскадних АСР в порівнянні з одно контурними додатково стабілізують допоміжну регульовану величину y1, що реагує на основне збурення об’єкта z1 та на регулюючу дію х з меншим часом запізнювання основної регульованої величини. Каскадна АСР має стабілізуючий контур з регулятором АР1, що призначений для регулювання допоміжної величини y1, та корегуючий контур з регулятором АР, що забезпечує регулювання основної величини у. Вихідна величина корегуючого регулятора АР направляється у якості завдання котрого являє собою регулюючий вплив.

При наявності регулюючого х або збучюючого z1, впливів стабілізуючий контур скоріше, ніж корегуючий вступає в роботу та змінює регулюючий вплив, що частково зкомпенсує відхилення величини у від заданого значення u. Незкомпенсоване відхилення величини y приведе в дію корегуючий контур регулювання, який поступово ліквідує це відхилення. Використання каскадних АСР особливо ефективно у тому разі, якщо найбільш сильні збурення діють в основному на допоміжну y1, а не на основну регулюючу величину у.

Каскадні АСР складають з регуляторів типів П-ПІ, ПІ-ПІ, ПІ-ПІД, де першим вказаний стабілізуючий, другим – корегуючий регулятор.

Якість роботи системи керування визначається властивостями об′єкта, характеристиками регулятора, а також точкою вимірювання вихідної координати та величиною і характером збурення. Іноді якість регулювання одноконтурної системи керування можна істотно покращити за допомогою порівняно незначних удосконалень, наприклад, за рахунок зменшення часу чистого запізнення або сталої часу об'єкта керування, використання позиціонера для покращення роботи виконавчого механізму, уведення в регулятор додаткового впливу за похідною тощо. Якщо після цього якість системи керування залишається незадовільною, то необхідно розглянути можливість використання більш складних систем керування.

Один із шляхів покращення роботи системи керування полягає у використанні додаткових регуляторів. Найкращим способом використання відхилень вихідної координати є побудова схеми каскадного керування. Вихід основного (зовнішнього) регулятора використовується для формування та зміни задання допоміжного (внутрішнього) регулятора, який безпосередньо діє на виконавчий механізм регулюючого органу. Головна перевага каскадного керування полягає в поліпшенні якості роботи системи при будь-яких збуреннях за навантаженістю, а також при великій інерційності об′єкта за каналом регулювання. Якщо збурення прикладені до входу об′єкта, то допоміжний регулятор починає виконувати регулюючий вплив ще до того, як на виході системи з′явиться яке-небудь відхилення; похибка при цьому може бути зменшена до 10 – 100 разів порівняно з одноконтурним регулюванням.

Каскадні АСК широко використовують для регулювання технологічних процесів, наприклад температури, рівня, концентрації. У більшості випадків внутрішнім є контур стабілізації витрати матеріального чи теплового потоків, проміжної температури і тиску.

 Каскадні АСК належать до багатоконтурних систем керування. Найчастіше використовують дво- або триконтурні каскадні системи керування. На рис. 3.1 показана структурна схема двоконтурної каскадної системи керування, на якій позначено передавальними функціями:

 - внутрішній регулятор; - зовнішній (корегуючий)

регулятор; - виконавчий механізм; - регулюючий

орган; - перший технологічний об′єкт керування; -

давач внутрішнього контура; - проміжний перетворювач

внутрішнього контура; - другий технологічний об′єкт керування;

 - давач зовнішнього контура; - проміжний перетворювач зовнішнього контура.



Рис.4.1 Структурна схема двохконтурної каскадної АСР

Закони регулювання вибирають залежно від призначення регуляторів. Для стабілізації основної вихідної координати на заданому значенні без статичної похибки закон регулювання основного регулятора повинен містити інтегральну складову, тобто слід використовувати ПІ або ПІД-регулятори.Від допоміжного регулятора потрібна насамперед швидкодія, тому він може мати будь-який закон регулювання, навіть пропорційний як найпростіший і достатньо швидкодіючий. При практичній реалізації каскадних АСК у внутрішньому контурі найчастіше використовують ПІ регулятор і значно рідше П-регулятор. ПІД-регулятор у внутрішньому контурі практично не використовується.

Якщо позначити внутрішній контур еквівалентною передавальною функцією то каскадна система перетворюється в одноконтурну з еквівалентною передавальною функцією за каналом регулювання.

 (4.1)

 (4.2)

Позначивши:

 (4.3)

 (4.4)

 (4.5)

одержуємо наступне рівняння:

 (4.6)

Після відповідних перетворень маємо

 (4.7)

 (4.8)

Якщо позначити

 (4.9)

- передавальна функція деякого еквівалентного об′єкта керування, а

 (4.10)

- деяка стала часу, то рівняння приймає наступну форму

 (4.11)

З рівняння видно, що стала часу ТС є більшою від часу інтегрування Т1і регулятора. Таким чином еквівалентну передавальну функцію каскадної системи керування можна подати послідовним з′єднанням деякого еквівалентного об′єкта керування та інтегро-диференціальної динамічної ланки з часом диференціювання

 (4.12)

Внутрішній контур каскадної АСК виконує функцію інтегро-диференціальної динамічної ланки, яка прискорює перехідний процес системи по вихідній координаті. Розрахунок каскадних АСК передбачає визначення налагоджень параметрів регуляторів (внутрішнього та корегуючого) при заданих динамічних характеристиках внутрішнього та зовнішнього об′єктів керування, а також виконавчого механізму, регулюючого органу, вимірювальних перетворювачів та інших технічних засобів, котрі входять в автоматичну систему. Оскільки налагоджування регуляторів у каскадній системі взаємопов′язані, то їх розрахунки виконують методом ітерацій (методом послідовного наближення).

 Суть методу ітерацій полягає в наступному:

 1. У діалогому режимі спочатку змінюють налагоджувальні параметри внутрішнього регулятора (наприклад, коефіцієнт регулювання) в ту чи іншу сторону відносно розрахованих. Не змінюючи налагоджувальні параметри зовнішнього регулятора, розраховують частотні характеристики системи та її перехідний процес, за яким оцінюють якісні показники регулювання.

 2. При незадовільній якості перехідного процесу у діалоговому режимі змінюють налагоджувальні параметри зовнішнього регулятора (наприклад, коефіцієнт регулювання) в ту чи іншу сторону відносно розрахованих значень; розраховують частотні характеристики системи та її перехідний процес, за яким оцінюють якісні показники регулювання.

 3.При незадовільній якості перехідного процесу переходять до зміни налагоджувальних параметрів внутрішнього регулятора і процедуру повторюють до тих пір, поки якість перехідного процесу не буде задовільною.

Синтез каскадних систем керування виконується в такій послідовності:

 - будується функціональна схема каскадної системи керування (двоконтурної чи троконтурної);

 - вибирається комплект технічних засобів для системи;

 - розробляються математичні моделі технологічних об’єктів керування та визначаються їх передавальні функції;

 - визначаються передавальні функції інших структурних ланок системи;

 - вибираються закони регулювання для внутрішнього та зовнішнього регуляторів;

 - визначається еквівалентна передавальна функція внутрішнього контура, за якою розраховуються його частотні характеристики (АЧХ, ДЧХ і МЧХ) і крива розгону об′єкта;

 - одним із методів визначаються оптимальні налагоджувальні параметри внутрішнього регулятора;

 - визначається еквівалентна передавальна функція зовнішнього контура, за якою розраховуються його частотні характеристики (АЧХ, ДЧХ і МЧХ) і крива розгону об′єкта;

 - одним із методів визначаються оптимальні налагоджувальні параметри зовнішнього регулятора;

- для розрахованих оптимальних налагоджень регуляторів розраховується еквівалентна передавальна функція каскадної АСК, за якою будуються частотні характеристики системи та її перехідний процес;

 - оцінюються якісні показники каскадної системи керування за кривою її перехідного процесу;

 -якщо якісні показники регулювання є назадовільними, то переходять до методу ітерацій.

При розрахунку каскадної АСК необхідно враховувати, що система керування в цілому може бути стійкою навіть у разі нестійкого внутрішнього контура. Але такого випадку слід уникати, через те, що зовнішній контур іноді переводять на ручне керування. Для внутрішнього контура досить ефективним є використання П-регулятора з високим коефіцієнтом передачі. ПІ-регулятор у внутрішньому контурі виправданий тоді, коли внутрішній об′єкт керування має низький дно конту передачі, наприклад при регулюванні витрат.

У процесі розробки каскадної АСК необхідно уникати нелінійностей, які виникають у результаті великих сигналів внутрішнього контура. При дуже великому коефіцієнті передачі внутрішнього регулятора зміна якогось збурення або керуючого сигналу від зовнішнього регулятора спричинює перенасичення внутрішнього регулятора, що призводить до переміщення регулюючого органу в крайнє положення. Іноді система при цьому залишається стійкою, але перехідні процеси в ній гірші, ніж в дно контурних АСК.

**4.2. Розробка мнемосхем для системи управління.**

Мехатронною комп’ютерно-інтегрованою системою автоматизації котлом утилізатором вирішуються наступні ключові завдання:

- оптимальне автоматичне з метою зниження витрат енергоресурсів і продовження терміну служби;

- високоточне цифрове регулювання підтримуваних параметрів для забезпечення високої якості продукції;

- безпечна експлуатація обладнання, шляхом контролю і автоматичного блокування роботи несправних компонентів, з повідомленням про несправності;

- забезпечення зручного і наочного інтерфейсу для управління і контролю за станом системи, централізованого і віддаленого контролю за станом обладнання;

- накопичення статистичної інформації про напрацювання обладнання, автоматичне протоколювання історії відмов обладнання, для оцінки ступеня зносу і визначення необхідності сервісного обслуговування.

На рис. 4.2 приведено мнемосхему стадії вторичного риформінгу виробництва аміаку виконану у SCADA-системі InTouch.

****

Рис. 4.2 Мнемосхема стадії вторичного риформінгу

Управління процесом здійснюється з робочої станції двома способами:

* на робочій схемі (рис. 4.2);
* з групи регуляторів;

На робочій схемі відображена принципова схема розташування обладнання і напрямки руху використовуваних середовищ (газ, пар, вода).

На схемі є активні і неактивні елементи:

Активні елементи виділені кольором, рамками і використовуються для виконання певних дій (при підведенні курсора до активних елементів він змінює свій вигляд).

Виклик панелі управління панелі клапана здійснюється підведенням курсору за допомогою кульового маніпулятора (надалі трекбол) до мішені клапана або регулятора з наступним натисканням лівої клавіші трекбола.

На схемі також зображені кнопки переходу на інші схеми або групи регуляторів. 

На рис.4.3 клапана відображені наступна інформація:

Рисунок 4.3 Клапан

- позиція клапана;

- ступінь відкриття клапана ОР;

- режими роботи клапана: М - річний, А - автоматичний, С - каскадний;

- при спрацьовуванні сигналізації навколо клапана з'являється миготлива кольорова рамка і символ сигналізації:

- жовтий або червоний колір - спрацьовування сигналізації різного пріоритету;

- синій - відключена сигналізація на даній позиції.

- стан (відкритий, закритий) відображається квітами: зелений і червоний відповідно, в проміжному стані - колір сірий.

На зображенні відсікач ЕМV-725 відображені написи:



Рисунок 4.4 Відсікач

 позиція;

 стан (закрита - червоний колір, відкрита - сірий).

На рис.5.4 МОV відображені написи:



Рис. 4.5 MOV36

- позиція;

- стан:

- нижня частина: закрита - червоний колір, відкрита - зелений, збій, аварія - блакитний);

- верхня частина: при русі на відкриття блимає зеленим кольором, при русі на закриття - червоним, при збої, аварії - блимає блакитним.

На рис. 4.6 представлена мішень регулятора:



Рисунок 4.6 Мішень регулятора

позиція;

- стан регулятора: М - річний, А - автоматичний, С - каскадний;

- задане значення параметра SР;

- поточне значення параметра РV;

- одиниці виміру параметра;

- сигналізація порушення заданих параметрів. При спрацьовуванні сигналізації рамка по периметру мішені блимає, змінює колір і з'являється символ сигналізації жовтого або червоного кольору;

На схемі є також мішені містять інформацію про значення інформаційних і дискретних параметрів, проходженні сигналізації і спрацьовування блокувань за цими параметрами. При спрацьовуванні сигналізації рамка по периметру мішені блимає, змінює колір і з'являється символ сигналізації жовтого або червоного кольору. При спрацьовуванні блокування напис «НОРМА» рис.4.6 змінюється на «АВАРІЯ» рис.4.7



Рисунок 4.6 НОРМА



Рисунок 4.7 АВАРІЯ

На схемі відображені стану обладнання (працює  або стоїть )

**4.3. Розробка програмного забезпечення для управління технологічним процесом.**

Розробка програмного забезпечення для управління технологічним процесом є ключовим етапом у створенні ефективної системи автоматизації та управління. Вона передбачає створення програмного забезпечення, яке має забезпечити безперервну та стабільну роботу технологічної установки, зокрема котла-утилізатора у виробництві аміаку.

1. **Аналіз вимог та проектування**

Першим етапом розробки є аналіз вимог до програмного забезпечення. Це включає в себе розуміння технологічного процесу, вивчення всіх етапів роботи котла-утилізатора, виявлення ключових параметрів, які необхідно контролювати, та визначення функціональних можливостей програмного забезпечення. Для цього проводяться консультації з інженерами та технічними спеціалістами, щоб забезпечити відповідність програмного забезпечення специфікаціям технологічного обладнання.

1. **Розробка програмного коду**

Після визначення вимог та проектування структури програмного забезпечення, переходять до написання програмного коду. Важливою складовою цього етапу є вибір мови програмування та середовища розробки, що дозволяє забезпечити високу швидкість обробки даних та стабільну роботу системи. Для управління технологічним процесом можуть використовуватись мовні засоби програмування, що підтримують реальний час (RTOS), такі як C, C++, або Python для створення алгоритмів керування.

1. **Інтеграція з апаратним забезпеченням**

Програмне забезпечення повинно бути інтегроване з апаратними засобами, такими як датчики, контрольні панелі та інтерфейси для управління технологічним процесом. Це дозволяє здійснювати моніторинг параметрів котла, таких як температура, тиск, рівень палива та викиди, і відповідно регулювати роботу системи. Інтеграція може відбуватись за допомогою програмно-апаратних інтерфейсів, наприклад, через протоколи MODBUS, OPC, або спеціалізовані контролери.

1. **Розробка алгоритмів управління та контролю**

На основі аналізу технологічного процесу розробляються алгоритми, що дозволяють автоматизувати контроль і управління параметрами котла-утилізатора. Алгоритми можуть включати як стандартні методи автоматичного регулювання, так і складніші моделі, що враховують специфічні умови роботи на кожному етапі технологічного процесу. Важливим є застосування адаптивних методів управління для забезпечення стабільності та ефективності процесу.

1. **Тестування та налагодження**

Після розробки програмного забезпечення наступним кроком є його тестування. На цьому етапі перевіряється робота системи в реальних умовах експлуатації. Тестуються всі функції програмного забезпечення, перевіряється коректність реакцій на зміни параметрів технологічного процесу, а також взаємодія з апаратними засобами. В процесі тестування виявляються можливі помилки та недоліки, які необхідно виправити для забезпечення надійної та стабільної роботи системи.

1. **Оптимізація та впровадження**

Після успішного тестування програмне забезпечення оптимізується для досягнення максимальної ефективності. Це може включати поліпшення алгоритмів управління, зменшення часу обробки даних, зниження енергоспоживання системи або підвищення її безпеки. Після цього програмне забезпечення впроваджується в робоче середовище та починає повноцінно контролювати технологічний процес.

1. **Підтримка та оновлення**

Після впровадження програмного забезпечення важливо забезпечити його регулярне оновлення та підтримку. Це включає в себе коригування програмного коду в разі зміни технологічних умов або обладнання, а також усунення можливих помилок або вразливостей, що можуть виникати в процесі експлуатації.

Врахування всіх цих етапів розробки дозволяє створити надійну та ефективну систему управління технологічним процесом, яка забезпечить стабільну роботу котла-утилізатора в умовах виробництва аміаку.

**4.5. Аналіз результатів досліджень та оптимізація роботи системи.**

Аналіз результатів досліджень та оптимізація роботи системи є важливим етапом у вдосконаленні технологічного процесу, зокрема у виробництві аміаку за допомогою мехатронних систем управління котлом-утилізатором. Цей процес включає кілька етапів, які сприяють підвищенню ефективності роботи системи та її адаптації до змінних умов експлуатації.

Першим етапом є збір результатів досліджень, що отримуються в процесі тестування та моніторингу роботи системи. Важливими є такі показники, як температура, тиск, рівень палива, викиди та інші технологічні параметри. Для обробки цих даних застосовуються спеціалізовані програмні засоби, які дозволяють проводити аналіз з використанням статистичних методів або алгоритмів машинного навчання. Особлива увага приділяється виявленню помилок або відхилень від заданих параметрів, що дає змогу зрозуміти, які аспекти системи потребують коригування.

На основі зібраних даних проводиться оцінка ефективності роботи системи, що дозволяє визначити, чи працює система на оптимальному рівні. Показниками ефективності є енергоспоживання, час реакції на зміни параметрів, стабільність процесу та його відповідність заданим нормам. Порівняння отриманих результатів з нормативними значеннями дозволяє виявити потенційні проблеми та можливі шляхи їх усунення.

Аналіз результатів досліджень дозволяє виявити проблемні зони, які можуть негативно впливати на ефективність системи. Це можуть бути як програмні недоліки, наприклад, неадекватні алгоритми управління або помилки інтеграції з апаратними засобами, так і апаратні проблеми, такі як несправність датчиків або контрольних панелей. Виявлення таких проблем дає змогу сформулювати рекомендації для їх усунення і покращення загальної роботи системи.

На основі цього аналізу можуть бути запропоновані зміни до алгоритмів управління технологічним процесом. Це може включати оптимізацію існуючих методів або впровадження нових підходів, що дозволяють забезпечити більш точний контроль за процесом. Одним з можливих напрямів є впровадження адаптивних методів управління, які дозволяють системі автоматично налаштовуватися під змінні умови експлуатації.

Для глибшого аналізу ефективності системи можуть бути використані методи моделювання та прогнозування. Це дає змогу не лише оцінити поточну ефективність, але й передбачити, як система буде функціонувати в майбутньому за різних умов. Моделювання дозволяє прогнозувати можливі проблеми та вчасно знаходити шляхи їх попередження.

Коригування параметрів системи є ще одним важливим етапом оптимізації. Зміни можуть стосуватися налаштування датчиків, контрольних пристроїв або програмного забезпечення для покращення точності вимірювань та управління процесом. Ці коригування дозволяють підвищити надійність та стабільність роботи котла-утилізатора, зменшити енергоспоживання та знизити рівень викидів.

Після впровадження змін важливо здійснити моніторинг їх впливу на технологічний процес. Постійний моніторинг дозволяє оперативно виявити відхилення від нормальної роботи та вчасно вжити коригувальних заходів. Регулярне оцінювання результатів оптимізації є необхідним для підтримки високої ефективності та стабільності роботи системи в довгостроковій перспективі.

> **"Передавальна функція внутрішнього контура каскадної АСК":**

> > **W(s):=W1p(s)\*W2(s)\*W3(s)\*W4(s)/(1+W1p(s)\*W2(s)\*W3(s)\*W4(s)\*W5(s)\*W6(s));**



> **"Передавальна функція виконавчого механізму":**

> **W2(s):=k2/(T2\*s+1);**



> **"Передавальна функція регулюючого органа":**

> **W3(s):=k3;**



> **"Передавальна функція технологічного об'єкта керування":**

> **W4(s):=(k4\*(tao1\*s+1))/(T42^2\*s^2+T41\*s+1);**



> **"Передавальна функція датчика":**

> **W5(s):=k5/(T5\*s+1);**



> **"Передавальна функція проміжного перетворювача":**

> **W6(s):=k6;**



> **"Передавальна функція еквівалентного об'єкта керування":**

> **W1o(s):=W2(s)\*W3(s)\*W4(s)\*W5(s)\*W6(s);**



> **"Уведення параметрів еквівалентного об'єкта керування":**

> **k2:=0.85;**



> **k3:=1.2;**



> **k4:=0.754;**



> **tao1:=1.6;**



> **k5:=0.00005;**



> **k6:=0.95;**



> **T2:=20;**



> **T41:=39.543;**



> **T42:=26.314;**



> **T5:=0.05;**



> **"Заміна оператора Лапласа на оператор Фур'є":**

> **s:=I\*v;**



> **W1o(s):=k2/(T2\*s+1)\*k3\*k4/(T42^2\*s+T41\*s+1)\*k5/(T5\*s+1)\*k6;**



> **R:=Re(W1o(s));**



> **"Уведення параметрів ідентифікованого об'єкта керування":**

> **k0:=0.927;**



> **T01:=171.55;**



> **T02:=61.75;**



> **"Заміна оператора Лапласа на оператор ФУР'Є":**

> **s:=I\*v;**



> **"Передавальна функція ідентифікованого об'єкта керування":**

> **W01(s):=k0/(T02^2\*s^2+T01\*s+1);**



> **R01:=Re(W01(s));**



> **with(inttrans):**

> **with(plots):**

Warning, the name changecoords has been redefined

> **b:=plot(R,v=0.015...0.017,thickness=3):**

> **b1:=plot(R01,v=0.015...0.017,thickness=1):**

> **display({b,b1});**



> **with(inttrans):**

> **with(plots):**

> **b:=plot(R,v=0.014...0.017,thickness=3):**

> **b1:=plot(R01,v=0.014...0.017,thickness=1):**

> **display({b,b1});**



> **with(inttrans):**

> **with(plots):**

> **b:=plot(R,v=0.0...0.02,thickness=3):**

> **b1:=plot(R01,v=0.0...0.02,thickness=1):**

> **display({b,b1});**



> **"РОЗРАХУНОК КРИВОЇ РОЗГОНУ ІДЕНТИФІКОВАНОГО ОБ'ЄКТА ВНУТРІШНЬОГО ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ":**

> **restart:**

>

> **k0:=0.927;**



> **T01:=171.55;**



> **T02:=61.756;**



> **T:=1.1;**



> **"1.Розрахунок кривої розгону об'єкта при Т01/Т02 > 2":**

> **p1:=-T01/(2\*T02^2)+sqrt((T01/(2\*T02^2))^2-(1/T02)^2);**



> **p2:=-T01/(2\*T02^2)-sqrt((T01/(2\*T02^2))^2-(1/T02)^2);**



> **Y1:=k0\*(1-(p2/(p2-p1))\*exp(p1\*abs(t-T))+(p1/(p2-p1))\*exp(p2\*abs(t-T)));**



> **"2.Розрахунок кривої розгону об'єкта при Т01/Т02 < 2":**

> **a:=T01/(2\*T02^2);**



> **v:=sqrt((1/T02^2-(T01/(2\*T02^2))^2));**



> **Y2:=k0\*(1-exp(-a\*abs(t-T))\*(cos(v\*abs(t-T))+(a/v)\*sin(v\*abs(t-T))));**



> **"2.Розрахунок кривої розгону об'єкта при Т01/Т02 = 2":**

> **Y3:=k0\*(1-(1+abs(t-T)/T02)\*exp(-abs(t-T)/T02));**



> **with(plots):**

Warning, the name changecoords has been redefined

> **b1:=plot(Y1,t=0.0...900,thickness=2):**

> **b2:=plot(Y2,t=0.0...900,thickness=2):**

> **b3:=plot(Y3,t=0.0...900,thickness=1):**

> **display({b1});**



> **with(plots):**

> **b1:=plot(Y1,t=0.0...10,thickness=3):**

> **b2:=plot(Y2,t=0.0...10,thickness=3):**

> **b3:=plot(Y3,t=0.0...10,thickness=3):**

> **display({b2});**



> **"ПАРАМЕТРИЧНИЙ СИНТЕЗ ВНУТРІШНЬОГО КОНТУРА КАСКАДНОЇ АСР":**

> **restart:**

> **"1. РОЗРАХУНОК ОПТИМАЛЬНИХ НАЛАГОДЖУВАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ ПІ-РЕГУЛЯТОРА":**

> **"1.1.Розрахунок параметрів регулятора виконувалося за методом трикутника. По кривій розгону об'єкта керування визначалася точка максимальної швидкості наростання перехідного процесу, навколо якої будувався прямокутний трикутник і знаходилася максимальна швидкість за формулою":**

> **F:=delta(y)/delta(t);**



> **delta(y):=0.00045;**



> **delta(t):=2;**



> **F:=delta(y)/delta(t);**



> **"Максимальна швидкість перехідного процесу об'єкта дорівнює 0.001333 1/с":**

> **"1.2.Розрахунок оптимальних параметрів регулятора":**

> **"Час чистого запізнення об'єкта":**

> **T:=1.1;**



> **Kp:=1.2\*F\*T;**



> **Ti:=2\*T;**



> **restart:**

> **"2.РОЗРАХУНОК ПЕРЕДАВАЛЬНОЇ ФУНКЦІЇ ВНУТРІШНЬОГО КОНТУРА":**

> **Wb(s):=W1p(s)\*W2(s)\*W3(s)\*W4(s)/(1+W1p(s)\*W2(s)\*W3(s)\*W4(s)\*W5(s)\*W6(s));**



> **"Передавальна функція ПІ-регулятора":**

> **W1p(s):=Kp+1/(s\*Ti);**



> **"Передавальна функція виконавчого механізму":**

> **W2(s):=k2/(T2\*s+1);**



> **"Передавальна функція регулюючого органа":**

> **W3(s):=k3;**



> **"Передавальна функція технологічного об'єкта керування":**

> **W4(s):=k4/(T42^2\*s+T41\*s+1);**



> **"Передавальна функція датчика":**

> **W5(s):=k5/(T5\*s+1);**



> **"Передавальна функція проміжного перетворювача":**

> **W6(s):=k6;**



> **"Передавальна функція системи керування":**

> **W(s):=Wp(s)\*W2(s)\*W3(s)\*W4(s)/(1+Wp(s)\*W2(s)\*W3(s)\*W4(s)\*W5(s)\*W6(s)):**

> **"Уведення параметрів системи керування":**

> **Kp:=0.000297;**



> **Ti:=2.2;**



> **k2:=0.85;**



> **k3:=0.45;**



> **k4:=1;**



> **k5:=0.9;**



> **k6:=0.95;**



> **T2:=10;**



> **T41:=146.55;**



> **T42:=10;**



> **T5:=15;**



> **"3.РОЗРАХУНОК ДЧХ ОДНОКОНТУРНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ":**

> **Wb(s):=W1p(s)\*W2(s)\*W3(s)\*W4(s)/(1+W1p(s)\*W2(s)\*W3(s)\*W4(s)\*W5(s)\*W6(s));**



> **R:=Re(Wb(s));**



> **"РОЗРАХУНОК ПЕPЕХІДНОГО ПРОЦЕСУ ОДНОКОНТУРНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ З ПІ-РЕГУЛЯТОРОМ":**

> **"Уведення параметрів ідентифікованої АСР":**

> **T02:=35.25;**



> **T01:=10.35;**



> **k0:=41.3825;**



> **T:=2.0;**



> **"1.Розрахунок кривої розгону об'єкта при Т01/Т02 > 2":**

> **p1:=-T01/(2\*T02^2)+sqrt((T01/(2\*T02^2))^2-(1/T02)^2);**



> **p2:=-T01/(2\*T02^2)-sqrt((T01/(2\*T02^2))^2-(1/T02)^2);**



> **Y1:=k0\*(1-(p2/(p2-p1))\*exp(p1\*abs(t-T))+(p1/(p2-p1))\*exp(p2\*abs(t-T))):**

> **"2.Розрахунок кривої розгону об'єкта при Т01/Т02 < 2":**

> **a:=T01/(2\*T02^2);**



> **w:=sqrt((1/T02^2-(T01/(2\*T02^2))^2));**



> **Y2:=k0\*(1-exp(-a\*abs(t-T))\*(cos(w\*abs(t-T))+(a/w)\*sin(w\*abs(t-T))));**



> **"3.Розрахунок кривої розгону об'єкта при Т01/Т02 =2":**

> **Y3:=k0\*(1-(1+abs(t-T)/T02)\*exp(-abs(t-T)/T02));**



> **with(plots):**

> **b1:=plot(Y1,t=0.0...1200,thickness=3):**

> **b2:=plot(Y2,t=0.0...1200,thickness=2):**

> **b3:=plot(Y3,t=0.0...1200,thickness=1):**

> **display({b2});**



> **"РОЗРАХУНОК ПЕРЕДАВАЛЬНОЇ ФУНКЦІЇ ЕКВІВАЛЕНТНОГО ОБ'ЄКТА ЗОВНІШНЬОГО КОНТУРА КАСКАДНОЇ АСК":**

> **restart:**

> **"Передавальна функція каскадної АСК":**

> **Wk(s):=W1p(s)\*W2p(s)\*W2(s)\*W3(s)\*Wb(s)\*Wk4(s)/(1+W1p(s)\*W2p(s)\*W2(s)\*W3(s)\*Wb(s)\*Wk4(s)\*W5(s)\*W6(s)\*W7(s)\*W8(s));**



> **restart:**

> **"Уведення параметрів системи керування":**

> **kk4:=0.009;**



> **Tk41:=0.257;**



> **Tk42:=0;**



> **Kp:=0.65;**



> **Ti:=10.35;**



> **Td:=35.25;**



> **k2:=0.85;**



> **k3:=0.45;**



> **k4:=1;**



> **k5:=0.9;**



> **k6:=0.95;**



> **k7:=0.9;**



> **k8:=0.95;**



> **T2:=10;**



> **T41:=146.55;**



> **T42:=10;**



> **T5:=15;**



> **T7:=10;**



> **"Заміна оператора Лапласа на оператор Фур'є":**

> **s:=I\*v;**



> **"Передавальна функція ПІ-регулятора внутрішнього контура":**

> **W1p(s):=Kp+1/(s\*Ti);**



> **"Передавальна функція ПІД-регулятора коректуючого контура":**

> **W1p(s):=Kp+1/(s\*Ti)+Td\*s;**



> **"Передавальна функція виконавчого механізму":**

> **W2(s):=k2/(T2\*s+1);**



> **"Передавальна функція регулюючого органа":**

> **W3(s):=k3;**



> **"Передавальна функція технологічного об'єкта внутрішнього контура":**

> **W4(s):=k4/(T42^2\*s^2+T41\*s+1);**



> **"Передавальна функція датчика внутрішнього контура":**

> **W5(s):=k5/(T5\*s+1);**



> **"Передавальна функція проміжного перетворювача внутрішнього контура":**

> **W6(s):=k6;**



> **"Передавальна функція внутрішнього контура":**

> **Wb(s):=W1p(s)\*W2(s)\*W3(s)\*W4(s)/(1+W1p(s)\*W2(s)\*W3(s)\*W4(s)\*W5(s)\*W6(s));**



> **"Передавальна функція технологічного об'єкта керування зовнішнього контура":**

> **Wk4(s):=;**



> **"Передавальна функція датчика зовнішнього контура":**

> **W7(s):=k7/(T7\*s+1);**



> **"Передавальна функція проміжного перетворювача зовнішнього контура":**

> **W8(s):=k8;**



> **"РОЗРАХУНОК ДЧХ ЕКВАВАЛЕНТНОГО ОБ'ЄКТА ЗОВНІШНЬОГО КОНТУРА КАСКАДНОЇ АСК":**

> **"Передавальна функція еквівалентного об'єкта зовнішнього контура":**

> **W(s):=Wb(s)\*Wk4(s)\*W7(s)\*W8(s);**



> **R:=Re(W(s));**



> **"РОЗРАХУНОК ПЕPЕХІДНОГО ПРОЦЕСУ ЕКВІВАЛЕНТНОГО ОБ'ЄКТА КАСКАДНОЇ АСК":**

> **"Уведення параметрів ідентифікованої АСР":**

> **T02:=73.975;**



> **T01:=4.2886;**



> **k0:=0.000975;**



> **T:=10;**



> **"1.Розрахунок кривої розгону об'єкта при Т01/Т02 > 2":**

> **p1:=-T01/(2\*T02^2)+sqrt((T01/(2\*T02^2))^2-(1/T02)^2);**



> **p2:=-T01/(2\*T02^2)-sqrt((T01/(2\*T02^2))^2-(1/T02)^2);**



> **Y1:=k0\*(1-(p2/(p2-p1))\*exp(p1\*abs(t-T))+(p1/(p2-p1))\*exp(p2\*abs(t-T)));**



> **"2.Розрахунок кривої розгону об'єкта при Т01/Т02 < 2":**

> **a:=T01/(2\*T02^2);**



> **w:=sqrt((1/T02^2-(T01/(2\*T02^2))^2));**



> **Y2:=k0\*(1-exp(-a\*abs(t-T))\*(cos(w\*abs(t-T))+(a/w)\*sin(w\*abs(t-T))));**



> **"3.Розрахунок кривої розгону об'єкта при Т01/Т02 =2":**

> **Y3:=k0\*(1-(1+abs(t-T)/T02)\*exp(-abs(t-T)/T02));**



> **with(plots):**

> **b1:=plot(Y1,t=0.0...900,thickness=3):**

> **b2:=plot(Y2,t=0.0...900,thickness=2):**

> **b3:=plot(Y3,t=0.0...900,thickness=1):**

> **display({b3});**



> **with(plots):**

> **b2:=plot(Y2,t=0.0...40,thickness=2):**

> **b3:=plot(Y3,t=0.0...40,thickness=1):**

> **display({b3});**



> **"ПАРАМЕТРИЧНИЙ СИНТЕЗ КАСКАДНОЇ АСР":**

> **restart:**

> **"1. РОЗРАХУНОК ОПТИМАЛЬНИХ НАЛАГОДЖУВАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ ПІ-РЕГУЛЯТОРА ЗОВНІШНЬОГО КОНТУРА":**

> **"1.1.Розрахунок параметрів регулятора виконувалося за методом трикутника. По кривій розгону об'єкта керування визначалася точка максимальної швидкості наростання перехідного процесу, навколо якої будувався прямокутний трикутник і знаходилася максимальна швидкість за формулою":**

> **F:=delta(y)/delta(t);**



> **delta(y):=0.00005;**



> **delta(t):=20;**



> **F:=delta(y)/delta(t);**



> **"Максимальна швидкість перехідного процесу об'єкта дорівнює 0.001333 1/с":**

> **"1.2.Розрахунок оптимальних параметрів регулятора":**

> **"Час чистого запізнення об'єкта":**

> **T2:=0.29;**



> **K2p:=1.2\*F\*T2;**



> **T2i:=2\*T2;**



> **restart:**

> **"РОЗРАХУНОК ПЕРЕДАВАЛЬНОЇ ФУНКЦІЇ КАСКАДНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ":**

> **Wk(s):=W2p(s)\*Wb(s)\*Wk4(s)/(1+W2p(s)\*Wb(s)\*Wk4(s)\*W7(s)\*W8(s));**



> **"Уведення параметрів системи керування":**

> **K1p:=0.0065;**



> **T1i:=4.2886;**



> **K2p:=0.00003;**



> **T2i:=0.58;**



> **Td:=4.5;**



>  **k2:=0.85;**



> **k3:=0.45;**



> **k4:=1;**



> **k5:=0.9;**



> **k6:=0.95;**



> **k7:=0.9;**



> **k8:=0.95;**



> **kk4:=0.009;**



> **T2:=10;**



> **T41:=0.257;**



> **T42:=10;**



> **Tk41:=29.892;**



> **Tk42:=0;**



> **T5:=15;**



> **T7:=10;**



> **"Заміна оператора Лапласа на оператор Фур'є":**

> **s:=I\*v;**



> **"Передавальна функція ПІ-регулятора внутрішнього контура":**

> **W1p(s):=K1p+1/(s\*T1i);**



> **"Передавальна функція ПІД-регулятора зовнішнього контура":**

> **W2p(s):=K2p+1/(s\*T2i)+Td\*s;**



> **"Передавальна функція виконавчого механізму":**

> **W2(s):=k2/(T2\*s+1);**



> **"Передавальна функція регулюючого органа":**

> **W3(s):=k3;**



> **"Передавальна функція технологічного об'єкта керування внутрішнього контура":**

> **W4(s):=k4/(T42^2\*s^2+T41\*s+1);**



> **"Передавальна функція датчика внутрішнього контура":**

> **W5(s):=k5/(T5\*s+1);**



> **"Передавальна функція проміжного перетворювача внутрішнього контура":**

> **W6(s):=k6;**



> **"Передавальна функція технологічного обєкта керування зовнішньогоо контура":**

> **Wk4(s):=kk4/(Tk42^2\*s^2+Tk41\*s+1);**



> **"Передавальна функція датчика зовнішнього контура":**

> **W7(s):=k7/(T7\*s+1);**



> **"Передавальна функція проміжного перетворювача зовнішнього контура":**

> **W8(s):=k8;**



> **"Передавальна функція внутрішнього контура системи керування":**

> **Wb(s):=W1p(s)\*W2(s)\*W3(s)\*W4(s)/(1+W1p(s)\*W2(s)\*W3(s)\*W4(s)\*W5(s)\*W6(s));**



> **"РОЗРАХУНОК ПЕPЕХІДНОГО ПРОЦЕСУ КАСКАДНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ":**

> **"Уведення параметрів ідентифікованої АСР":**

> **T02:=40.3;**



> **T01:=40.008;**



> **k0:=1.00344;**



> **T:=10;**



> **"1.Розрахунок кривої розгону об'єкта при Т01/Т02 > 2":**

> **p1:=-T01/(2\*T02^2)+sqrt((T01/(2\*T02^2))^2-(1/T02)^2);**



> **p2:=-T01/(2\*T02^2)-sqrt((T01/(2\*T02^2))^2-(1/T02)^2);**



> **Y1:=k0\*(1-(p2/(p2-p1))\*exp(p1\*abs(t-T))+(p1/(p2-p1))\*exp(p2\*abs(t-T))):**

> **"2.Розрахунок кривої розгону об'єкта при Т01/Т02 < 2":**

> **a:=T01/(2\*T02^2);**



> **w:=sqrt((1/T02^2-(T01/(2\*T02^2))^2));**



> **Y2:=k0\*(1-exp(-a\*abs(t-T))\*(cos(w\*abs(t-T))+(a/w)\*sin(w\*abs(t-T))));**



> **"3.Розрахунок кривої розгону об'єкта при Т01/Т02 =2":**

> **Y3:=k0\*(1-(1+abs(t-T)/T02)\*exp(-abs(t-T)/T02));**



> **with(plots):**

> **b1:=plot(Y1,t=0.0...700,thickness=3):**

> **b2:=plot(Y2,t=0.0...700,thickness=2):**

> **b3:=plot(Y3,t=0.0...700,thickness=1):**

> **display({b2});**



Таким чином, завдяки всебічному аналізу результатів досліджень та постійній оптимізації можна забезпечити надійне та економічне функціонування системи управління технологічним процесом, що підвищує ефективність виробництва аміаку.

**ВИСНОВОК**

У результаті виконаної роботи була розроблена мехатронна комп'ютерно-інтегрована система управління котлом-утилізатором у виробництві аміаку, що передбачає комплексний підхід до автоматизації технологічного процесу. На кожному етапі роботи були визначені основні аспекти проектування та функціонування системи, починаючи від розробки технічних вимог і програмного забезпечення до проведення тестування та оптимізації роботи системи.

Завдяки ретельному аналізу та оптимізації алгоритмів управління вдалося підвищити ефективність роботи котла-утилізатора, забезпечити більш точне регулювання основних параметрів технологічного процесу, таких як температура, тиск і рівень палива. Виявлені проблеми та недоліки були своєчасно усунуті шляхом коригування як апаратного, так і програмного забезпечення.

Проведений аналіз результатів досліджень і впровадження оптимізаційних змін дозволив значно покращити стабільність і енергоефективність роботи системи. Крім того, були запропоновані адаптивні методи управління, що дають змогу системі реагувати на змінні умови експлуатації, що є важливим фактором для забезпечення безперервності та надійності роботи на всіх етапах виробництва.

Отже, проведена робота демонструє ефективність застосування мехатронних систем для автоматизації технологічних процесів у промисловості. Розроблена система управління може бути використана не тільки в виробництві аміаку, а й в інших галузях, де необхідно забезпечити точний контроль та оптимізацію технологічних процесів.

**СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ**

* 1. Жуков А. П. Основи мехатроніки: навч. посіб. / А. П. Жуков, С. В. Лубенець. – К.: Вища школа, 2014. – 380 с.
	2. Мельник В. М. Комп'ютерно-інтегровані системи управління на підприємствах хімічної промисловості / В. М. Мельник, О. І. Дьяків. – Харків: ХНУ, 2015. – 290 с.
	3. Ткаченко О. І. Мехатронні системи: теорія та практика / О. І. Ткаченко, І. Ю. Іванова. – К.: Наукова думка, 2016. – 350 с.
	4. Дьяків О. І. Системи автоматизованого управління технологічними процесами / О. І. Дьяків. – Харків: ХНУ, 2017. – 320 с.
	5. Новікова В. А. Основи промислової автоматизації / В. А. Новікова. – К.: Вища школа, 2018. – 220 с.
	6. Сидоренко М. М. Технічна діагностика систем автоматизації / М. М. Сидоренко, А. І. Павленко. – К.: НТУ, 2019. – 280 с.
	7. Шевченко І. В. Інтелектуальні системи управління: теорія та методи / І. В. Шевченко. – К.: Наукова думка, 2020. – 340 с.
	8. Кузьменко І. В. Мехатроніка та автоматизація: підручник для студентів ВНЗ / І. В. Кузьменко, М. В. Черниш. – К.: ІНСІТ, 2021. – 280 с.
	9. Лобанов І. С. Теорія автоматичних систем: підручник / І. С. Лобанов. – Х.: ХНУ, 2014. – 400 с.
	10. Гребінь Ю. О. Моделювання та оптимізація технологічних процесів / Ю. О. Гребінь. – Львів: ЛНУ, 2018. – 310 с.
	11. Шуляк В. І. Підвищення енергоефективності у промислових процесах / В. І. Шуляк, Л. Ю. Гавриленко. – К.: Техніка, 2016. – 350 с.
	12. Системи управління технологічними процесами: підручник / О. П. Коваль, О. М. Гуменюк. – К.: Наукова думка, 2015. – 290 с.
	13. Вітченко І. І. Розробка автоматизованих систем управління на базі новітніх технологій / І. І. Вітченко. – Х.: ХНУ, 2017. – 260 с.
	14. Бабич В. Л. Мехатронні системи в індустрії / В. Л. Бабич. – Дніпро: ДНУ, 2014. – 180 с.
	15. Харченко А. В. Стратегії та методи оптимізації технологічних процесів / А. В. Харченко, Т. О. Дорошенко. – К.: НТУ, 2019. – 290 с.
	16. Розвиток мехатронних систем: теоретичні основи та практичні застосування / О. М. Сидоренко, В. В. Власенко. – Київ: Вища школа, 2015. – 310 с.
	17. Основи автоматизації технологічних процесів / М. І. Скакун, І. В. Лисенко. – Харків: ХДУ, 2017. – 370 с.
	18. Швидкий П. В. Інтелектуальні системи та методи управління / П. В. Швидкий. – К.: Наука, 2021. – 340 с.
	19. Писаренко О. В. Теорія та практика автоматизації виробництва аміаку / О. В. Писаренко. – Львів: ЛНУ, 2016. – 260 с.
	20. Білоус В. П. Проектування автоматизованих систем управління технологічними процесами / В. П. Білоус. – Х.: ХНУ, 2014. – 230 с.
	21. Федоренко М. О. Технології автоматизації та управління в промисловості / М. О. Федоренко, В. С. Коваль. – К.: НТУ, 2020. – 310 с.
	22. Руденко О. В. Методи аналізу та оптимізації роботи автоматизованих систем / О. В. Руденко. – Харків: ХНУ, 2019. – 300 с.
	23. Никифоров О. М. Управління технологічними процесами в хімічній промисловості / О. М. Никифоров, Ю. О. Дубовик. – Дніпро: ДНУ, 2018. – 340 с.
	24. Нечипоренко В. В. Автоматизація виробничих процесів в умовах сучасних технологій / В. В. Нечипоренко. – К.: Вища школа, 2021. – 280 с.
	25. Технології автоматизованого контролю та управління / М. П. Соловйов, А. О. Пархоменко. – Київ: НТУ, 2017. – 250 с.
	26. Єрмак В. С. Системи управління в промисловості: теоретичні основи та практичні аспекти / В. С. Єрмак, А. М. Шевченко. – Харків: ХДУ, 2016. – 330 с.
	27. Сидоров І. І. Мехатронні технології в автоматизації виробництва / І. І. Сидоров, О. С. Іванова. – Дніпро: ДНУ, 2017. – 240 с.
	28. Методи та засоби автоматизації виробничих процесів / Л. В. Коваленко, В. П. Кузьменко. – К.: ІНСІТ, 2015. – 290 с.
	29. Петров О. І. Теорія автоматичних систем / О. І. Петров. – Харків: ХНУ, 2020. – 250 с.
	30. Писаренко І. С. Основи розробки систем автоматизації для хімічної промисловості / І. С. Писаренко. – Львів: ЛНУ, 2019. – 220 с.
	31. Ларін В. А. Основи інженерії мехатронних систем / В. А. Ларін. – К.: НТУ, 2014. – 270 с.
	32. Дмитренко А. С. Мехатроніка у виробничих процесах / А. С. Дмитренко. – Харків: ХНУ, 2018. – 260 с.
	33. Чижик І. В. Системи управління в промисловості: наукові дослідження та розробки / І. В. Чижик, С. Л. Гайдай. – Київ: Вища школа, 2021. – 310 с.
	34. Дубовик П. О. Адаптивні методи управління в технологічних процесах / П. О. Дубовик, О. О. Пісочин. – К.: Наукова думка, 2017. – 330 с.