

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

ГОВЕНКО ВІТАЛІЙ ОЛЕГОВИЧ

АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМ
ПРОЦЕСОМ УТИЛІЗАЦІЇ НІТРОЗНИХ ГАЗІВ / AUTOMATED CONTROL
SYSTEM FOR THE TECHNOLOGICAL PROCESS OF NITROUS GAS
ABSORPTION

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

Магістерська робота

Виконав студент групи АКІТм-21
В.О.Говенко

Науковий керівник:
д.т.н., проф. Я.М.Николайчук

Магістерську роботу допущено до захисту:
"___" _____ 2025р.

Завідувач кафедри
_____ А.І. Сегін

Тернопіль 2025

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

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри СКС

_____ Андрій СЕГІН

“ ____ ” _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ
НА ВИПУСКНУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ
ГОВЕНКО Віталій Олегович

(прізвище, ім'я по-батькові)

1. Тема випускної кваліфікаційної роботи

Автоматизована система керування технологічним процесом утилізації
нітрозних газів / Automated Control System for the Technological Process of Nitrous
Gas Absorption

керівник роботи _____ д.т.н., професор Я.М.Николайчук

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

2. Строк подання студентом закінченої випускної кваліфікаційної роботи:

01 грудня 2025р.

3. Вихідні дані до випускної кваліфікаційної роботи:

1. Технологічний процес утилізації

2. Технологічна схема

4. Основні питання, які потрібно розробити:

1. Опис технологічного процесу утилізації нітрозних газів

2. Функціональна схема автоматизації та вибір технічних засобів

3. Розрахунок параметрів системи автоматичного регулювання

5. Перелік графічного матеріалу у роботі:

1. Технологічна схема

2. Карта технологічних параметрів

3. Функціональна схема автоматизації технологічного процесу

6. Консультанти розділів випускної кваліфікаційної роботи

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

7. Дата видачі завдання 02 грудня 2024.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назви етапів випускної кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Опис технологічного процесу утилізації нітрозних газів	11.2024р. – 12.2024р.	
2	Функціональна схема автоматизації та вибір технічних засобів	01.2025р. – 04.2025р.	
3	Розрахунок параметрів системи автоматичного регулювання	04.2025р. – 10.2025р.	

Студент

_____ (підпис)

Говенко В.О.

Керівник роботи

_____ (підпис)

д.т.н., проф. Николайчук Я.М.

РЕФЕРАТ

Говенко В.О. Автоматизована система керування технологічним процесом утилізації нітрозних газів. – Рукопис.

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

Магістерська робота присвячена розробленню автоматизованої системи керування процесом абсорбції нітрозних газів у виробничих умовах хімічних підприємств. У роботі проаналізовано технологічні особливості процесу абсорбційного очищення NO_x , визначено умови стабільного протікання масообмінних процесів та чинники, що впливають на ефективність поглинання нітрозних сполук. На основі аналізу побудовано функціональну схему автоматизації, виконано вибір оптимальних технічних засобів та промислового контролера.

У рамках роботи сформовано структуру системи керування з використанням сучасних технічних засобів, а також розроблено алгоритми автоматичного регулювання ключових технологічних параметрів. Особливу увагу приділено забезпеченню безпеки, підвищенню енергоефективності та зниженню викидів токсичних сполук у довкілля.

Отримані результати можуть бути використані для модернізації існуючих абсорбційних установок, підвищення рівня автоматизації хімічних виробництв та впровадження екологічно орієнтованих технологічних рішень на промислових підприємствах.

ABSTRACT

ГОВЕНКО V.O. Automated Control System for the Technological Process of Nitrous Gas Absorption. - Manuscript.

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

This thesis focuses on the development of an automated control system for the absorption of nitrogen oxides (NO_x) in chemical production processes. The work presents an analysis of the technological features of NO_x absorption, the key parameters influencing mass-transfer efficiency, and the conditions required for stable operation of the absorption unit. Based on this analysis, a functional automation scheme has been designed, and optimal instrumentation, control equipment, actuators, and industrial controllers have been selected.

The thesis develops the structural architecture of the control system using modern automation technologies and proposes algorithms for automatic regulation of critical process variables. Special attention is given to improving operational safety, enhancing energy efficiency, and reducing emissions of toxic nitrogen compounds into the environment.

The obtained results can be applied to the modernization of existing absorption systems, the enhancement of automation levels in chemical production, and the implementation of environmentally oriented technological solutions at industrial facilities.

ЗМІСТ

ВСТУП	6
1. ОПИС ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ УТИЛІЗАЦІЇ НІТРОЗНИХ ГАЗІВ.....	10
1.1 Аналіз технологічної схеми процесу абсорбції нітрозних газів.....	12
1.2 Норми технологічного процесу.....	16
2. ФУНКЦІОНАЛЬНА СХЕМА АВТОМАТИЗАЦІЇ ТА ВИБІР ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ.....	18
2.1 Розроблення функціональної схеми автоматизації	18
2.1.1 Карта технологічних параметрів.....	20
2.1.2 Опис функціональної схеми автоматизації.....	24
2.2 Вибір технічних засобів автоматизації	27
3. РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ.....	48
3.1 Розрахунок параметрів САР.....	48
3.2 Особливості налаштування та компонування АСУ ТП	60
ВИСНОВКИ.....	66
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	68
ДОДАТОК А Технологічна схема процесу.....	70
ДОДАТОК Б Технологічна карта.....	71
ДОДАТОК В Функціональна схема автоматизації.....	72
ДОДАТОК Г Копії публікацій.....	73

ВСТУП

Сучасний розвиток хімічної промисловості супроводжується постійним ускладненням технологічних процесів, зростанням вимог до якості продукції та підвищенням стандартів екологічної безпеки. Однією з ключових проблем галузі є мінімізація викидів шкідливих речовин, зокрема оксидів азоту, які утворюються у процесах виробництва азотної кислоти, нітратів, амонійних сполук та інших продуктів неорганічного синтезу. Викиди нітрозних газів (NO , NO_2 , N_2O_3 , N_2O_4) є значним джерелом забруднення атмосфери, оскільки вони спричиняють утворення кислотних дощів, фотохімічного смогу та негативно впливають на здоров'я людини.

Одним із найефективніших методів зниження концентрації цих шкідливих компонентів є утилізація газів, іншими словами їх абсорбційне очищення, яке ґрунтується на хімічному або фізико-хімічному поглинанні нітрозних сполук спеціальними рідкими абсорбентами. Однак ефективність процесу абсорбції значною мірою залежить від стабільності режимів, температури, тиску, концентрації реагентів і швидкості потоків. Будь-які коливання цих параметрів можуть призвести до зниження ступеня очищення, збільшення витрат реагентів або порушення екологічних норм.

У зв'язку з цим актуальним завданням є розроблення сучасної автоматизованої системи керування технологічним процесом утилізації нітрозних газів, яка забезпечувала б оптимальні умови протікання масообмінних і хімічних реакцій, підвищувала ефективність роботи технологічної установки та гарантувала екологічну безпеку виробництва. Використання мікропроцесорних засобів у керуванні дає можливість підвищити точність вимірювань та покращити динаміку регулювання.

Актуальність теми дослідження зумовлена потребою у зниженні техногенного навантаження на навколишнє середовище та вдосконаленні систем автоматичного керування хімічними процесами. Автоматизація процесу абсорбції (утилізації) нітрозних газів дозволяє не лише зменшити

шкідливі викиди, але й підвищити економічну ефективність виробництва за рахунок стабілізації технологічних параметрів, зменшення втрат реагентів і енергії.

Удосконалення систем регулювання є також важливим чинником підвищення промислової безпеки, адже автоматичне реагування на нештатні ситуації, аварійне блокування та сигналізація дозволяють запобігти аваріям і забезпечити захист обслуговуючого персоналу.

Метою роботи є розробка автоматизованої системи керування процесом утилізації нітрозних газів, яка забезпечує підвищення ефективності очищення газових потоків, стабільність технологічних режимів і зниження шкідливих викидів у навколишнє середовище.

Для досягнення поставленої мети у роботі необхідно вирішити такі основні задачі:

- проаналізувати фізико-хімічні основи процесу абсорбції нітрозних газів і визначити фактори, що впливають на його ефективність;
- розробити математичну модель процесу утилізації з урахуванням динаміки зміни концентрацій та параметрів системи;
- визначити критерії оптимального регулювання процесу та вибрати структуру системи автоматичного керування;
- обґрунтувати вибір технічних засобів автоматизації — датчиків, виконавчих механізмів, контролерів та системи візуалізації;
- розробити алгоритми керування.

Об'єктом дослідження є технологічний процес абсорбції нітрозних газів у системі очищення відхідних газових потоків.

Предметом дослідження є методи та засоби автоматичного регулювання параметрів процесу абсорбції (температури, тиску, концентрації, витрати рідини й газу), а також побудова математичної моделі для оптимізації роботи системи керування.

Наукова новизна роботи полягає у розробці математичної моделі процесу абсорбції нітрозних газів, яка враховує взаємозв'язок

гідродинамічних, теплових і масообмінних процесів, що відбуваються в системі. Запропоновано алгоритм оптимального регулювання, який забезпечує підвищену точність підтримання параметрів та зменшення енергетичних витрат. Удосконалено структурну схему системи автоматичного керування шляхом інтеграції підсистем контролю, сигналізації та візуалізації у єдине інформаційно-керуюче середовище.

Практичне значення одержаних результатів полягає у можливості впровадження розробленої системи на діючих виробництвах для автоматизації процесів очищення газів, що містять нітрозні сполуки. Використання запропонованої системи дає змогу: підвищити ступінь очищення газів до нормативних показників; забезпечити стабільність технологічних параметрів і зменшити втрати реагентів; знизити енерговитрати завдяки оптимізації режимів роботи апаратів; покращити умови праці персоналу та рівень промислової безпеки; забезпечити відповідність екологічним стандартам України та ЄС.

Таким чином, виконана магістерська робота має як теоретичне, так і практичне значення, оскільки об'єднує принципи математичного моделювання, системного аналізу та сучасні засоби автоматизації для розв'язання актуальної проблеми підвищення ефективності процесу абсорбції нітрозних газів у хімічній промисловості.

Апробація. 1. Оптимізація системи автоматичного регулювання процесу абсорбції нітрозних газів / Ю.Бойко, В.Говенко, Н.Возна // Матеріали III Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Інтелектуальні комп'ютерні системи та мережі» (ІКСМ осінь 2025), м. Тернопіль, ЗУНУ, 25 листопада 2025 р. Тернопіль, 2025. – С.176-177.

2. Обґрунтування вибору технічних засобів автоматизації для лінії нанесення порошкового покриття / Ю.Бойко, В.Говенко, О.Циквас, В.Підганюк // Збірник матеріалів науково-практичного симпозиуму

«Технології інтернету речей: системи та рішення » (ТІР:СТ – 2025),
м.Тернопіль, 24 жовтня 2025, Тернопіль, 2025. - С.98-101.

1. ОПИС ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ УТИЛІЗАЦІЇ НІТРОЗНИХ ГАЗІВ

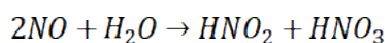
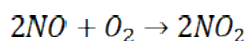
Утилізація (абсорбція) нітрозних газів є одним із ключових процесів у хімічній технології, спрямованим на вилучення оксидів азоту з газових сумішей шляхом їх поглинання рідкими абсорбентами. Цей процес має важливе екологічне та технологічне значення, оскільки дозволяє зменшити викиди токсичних сполук у навколишнє середовище, а також забезпечує утилізацію цінних компонентів газової фази для подальшого використання у виробництві азотної кислоти, нітратів та інших сполук.

Абсорбція - це процес вибіркового поглинання (утилізації) газоподібних компонентів суміші рідиною [1-4]. У випадку нітрозних газів основними компонентами є оксид азоту (NO) та діоксид азоту (NO₂), які можуть перебувати в різних співвідношеннях залежно від умов утворення. При контакті газової фази з рідким абсорбентом (зазвичай водою або водним розчином лугу) відбувається фізико-хімічна взаємодія, у результаті якої газоподібні оксиди переходять у розчинену форму або вступають у хімічну реакцію з утворенням розчинних сполук, зокрема нітритів і нітратів.

Процес утилізації може бути фізичним або хімічним. У фізичній абсорбції розчинення відбувається без утворення нових речовин, тоді як у хімічній абсорбції - за рахунок реакцій взаємодії компонентів газової та рідинної фаз. Для нітрозних газів більш характерною є саме хімічна абсорбція, оскільки діоксид азоту активно реагує з водою з утворенням азотної та азотистої кислот [4-7].

Основою процесу є масообмін між газовою і рідинною фазами, що відбувається через міжфазну поверхню. Ефективність перенесення маси залежить від різниці парціальних тисків газу над поверхнею рідини, температури, тиску, ступеня турбулентності потоку та площі контакту фаз. Для підвищення ефективності процесу застосовують інтенсифікацію масообміну шляхом збільшення питомої поверхні контакту, використання насадок, розпилення рідини або створення багатоступеневих апаратів.

Процес розчинення оксидів азоту у воді супроводжується низкою послідовних хімічних реакцій:



У результаті утворюються нітритна та нітратна кислоти, які можуть взаємодіяти з іншими речовинами, що містяться в абсорбенті, з утворенням солей. Тому вибір складу та властивостей абсорбенту має суттєвий вплив на глибину очищення газу та економічність процесу [4, 5, 7].

Процес утилізації нітрозних газів має не лише технологічне, а й значне екологічне значення. Оксиди азоту належать до основних забруднювачів атмосфери, які спричиняють утворення кислотних дощів, фотохімічного смогу та озонового шару тропосфери. Ефективне вилучення цих сполук з відхідних газів дозволяє не лише знизити негативний вплив на довкілля, але й повернути азот у господарський обіг у вигляді корисних продуктів.

У сучасній практиці для зменшення енергоспоживання та підвищення ступеня вилучення нітрозних газів широко застосовують комбіновані схеми очищення, які поєднують абсорбцію з каталітичним окисненням або адсорбцією. Крім того, активно впроваджуються системи автоматичного контролю технологічних параметрів, що забезпечують стабільність процесу та безпечну експлуатацію обладнання.

Таким чином, абсорбція нітрозних газів є складним багатофакторним процесом, у якому взаємодіють фізичні, хімічні та гідродинамічні явища. Від правильного вибору абсорбенту, конструкції апарата і режиму роботи залежить ефективність очищення газів, економічність процесу та екологічна безпечність виробництва. Розуміння загальних принципів абсорбції створює основу для подальшого проектування і вдосконалення технологічних схем очищення газових потоків у різних галузях хімічної промисловості.

Описані закономірності процесу абсорбції нітрозних газів становлять теоретичну основу для побудови практичних технологічних схем. На основі цих принципів розробляються конкретні апаратурні рішення, які

забезпечують ефективне очищення газових потоків, стабільність режимів роботи та оптимальне використання енергетичних і матеріальних ресурсів. У подальшому підрозділі розглянемо технологічну схему процесу абсорбції нітрозних газів, її основні елементи, послідовність операцій і взаємодію апаратів у складі системи.

На території західних регіонів України розташована низка підприємств хімічної промисловості, у технологічних процесах яких утворюються або використовуються нітрозні гази. До таких належать виробництва мінеральних добрив, азотної кислоти, вибухових речовин та лакофарбових матеріалів, що функціонують у Львівській, Рівненській, Тернопільській та Івано-Франківській областях. Зокрема, у цих регіонах діють потужні підприємства азотної та органічної хімії, які застосовують системи абсорбції для очищення відхідних газів з метою зниження шкідливих викидів у довкілля. Розміщення таких об'єктів у промислових зонах з розвинутою інфраструктурою сприяє раціональному використанню енергетичних ресурсів і впровадженню сучасних технологій очищення газових потоків відповідно до екологічних норм України та Європейського Союзу.

1.1 Аналіз технологічної схеми процесу абсорбції нітрозних газів

Для здійснення процесу абсорбції застосовують апарати, що забезпечують інтенсивний контакт газової і рідинної фаз. Найбільш поширеними є насадкові, тарілчасті, барботажні та плівкові абсорбери. Вибір типу апарата залежить від об'єму газів, які підлягають очищенню, від необхідного ступеня вилучення нітрозних компонентів, а також від фізико-хімічних властивостей газової та рідинної фаз [8, 9].

У промисловій практиці часто використовують вертикальні баштові абсорбери, в яких газ подається знизу, а рідина зверху назустріч потоку газу по протитечійній схемі. Такий режим сприяє максимальному використанню поверхні контакту та забезпечує високий коефіцієнт масопередачі.

Особливу увагу приділяють матеріалам виготовлення апаратів, оскільки нітрозні гази та продукти їх взаємодії з водою є корозійно-активними. Тому використовують стійкі до дії кислот матеріали, зокрема нержавіючу сталь, емальовані або полімерні покриття, кераміку.

Основними технологічними параметрами, що визначають ефективність абсорбції, є температура, тиск, співвідношення фаз, швидкість потоків та концентрація оксидів азоту у вхідному газі [1-4].

Температура впливає на розчинність газів у рідині. Зі зростанням температури розчинність зменшується, тому процес зазвичай проводять при помірних температурах (до 50 °С).

Тиск підвищує розчинність компонентів у рідині. Тому в окремих випадках використовують абсорбери високого тиску.

Швидкість потоку газу та рідини визначає турбулентність, а отже - інтенсивність масообміну.

Склад абсорбенту може бути модифікований для підвищення хімічної активності - додають луги (NaOH, Ca(OH)₂), окисники (H₂O₂) або інші реагенти, що сприяють глибшому зв'язуванню оксидів азоту.

Нітрозні гази з віддувної колони, вихлопні гази вакуум-насосів, а також гази з дихальних трубопроводів усіх збірників, що містять азотну кислоту, спрямовуються на компримування, а далі - на абсорбцію оксидів азоту. Абсорбція проводиться знесолоною водою або конденсатом сокової пари, отриманим після ректифікаційної колони. У результаті абсорбції утворюється розчин азотної кислоти з масовою часткою HNO₃ від 50% до 65%, який повертається в цикл окислення. Основна реакція утворення азотної кислоти: $3 NO_2 + H_2O \rightarrow 2 HNO_3 + NO + 136.2 \text{ кДж}$.

Оксид азоту, що утворюється в процесі, надалі окислюється киснем, присутнім у складі нітрозних газів: $2 NO + O_2 \rightarrow 2 NO_2 + 123.5 \text{ кДж}$.

Швидкість утворення азотної кислоти в процесі абсорбції визначається швидкістю реакції окислення оксидів азоту. Підвищення тиску та зниження температури сприяють прискоренню цієї реакції. Абсорбція оксидів азоту

здійснюється під тиском від 0,28 до 0,33 МПа (2,8–3,3 кгс/см²) і за температури не вище ніж 40 °С.

Для ефективного відведення теплоти, що виділяється під час реакції, в абсорбційній колоні на кожній із тарілок встановлено охолоджувальні змійовики. Відведення теплоти організовано таким чином:

- з нижніх тарілок - за допомогою оборотної води;
- з середніх тарілок - за допомогою відпрацьованої заохолодженої води;
- з верхніх тарілок - за допомогою заохолодженої води.

При необхідності, до змійовиків тарілок також може подаватися оборотна вода.

Для подачі газів в абсорбційну колону, у відділенні компресії встановлено відцентрові компресори, які забезпечують розрідження у діапазоні від 10 до 15 кПа (0,1–0,15 кгс/см²) на вході. Завдяки цьому все обладнання, де можливе утворення оксидів азоту, працює під розрідженням, що унеможливує їх потрапляння в повітря виробничих приміщень.

Після проходження абсорбційної колони газу, що містять переважно повітря з домішками оксидів азоту та вуглекислого газу, надходять на установку термічного знешкодження виробничих викидів.

Нітрозні газу з віддувної колони, а також так звані "бідні" нітрозні газу після гідрозатвора спрямовуються на всмоктування компресора.

Для запобігання підвищенню тиску в колекторі "бідних" нітрозних газів понад 3 кПа (0,3 кгс/м²), встановлено гідрозатвор. Вакуум у цьому колекторі підтримується автоматично за допомогою регулятора з клапаном, розташованим на лінії між гідрозатвором і колектором нітрозних газів від колони, що також подаються на всмоктування компресора.

Компресор працює з розрідженням на всмоктуванні в діапазоні від 9,8 до 14,7 кПа (0,1–0,15 кгс/см²). Завдяки цьому всі апарати, в яких присутні робочі розчини азотної кислоти, функціонують під розрідженням. Це унеможливує витік оксидів азоту в атмосферу через потенційні нещільності обладнання.

У разі аварійної зупинки компресора, колектор "бідних" нітрозних газів автоматично від'єднується від всмоктувального трубопроводу шляхом закриття відповідного клапана. Одночасно здійснюється переключення на скидання газоповітряної суміші в атмосферу через інжектор. Для цього відкривається клапан на лінії подачі повітря з цехового колектора - після сітчастого газосепаратора, а також електрозасувка на лінії подачі "бідних" нітрозних газів до інжектора.

У випадку тривалої зупинки компресора передбачено альтернативний маршрут відведення "бідних" нітрозних газів: із цехового колектора, після інжектора, вони направляються в лінію нітрозних газів колони на установку термічного знешкодження відходів виробництва адипінової кислоти.

Оксиди азоту з відділення компресії нітрозних газів надходять в абсорбційну колону під тиском, що не перевищує 0,35 МПа (3,5 кгс/см²), та температурою не вище 40 °С. Абсорбція здійснюється знесолоною водою або конденсатом сокової пари після колони, який подається насосом.

Витрата флегми регулюється автоматично за допомогою регулятора, а її охолодження відбувається оборотною або заохолодженою водою в теплообміннику.

У колоні встановлено ковпачкові тарілки, на яких змонтовані охолоджувальні змійовики для ефективного відведення тепла, що виділяється під час абсорбції.

В якості холодоагенту використовується оборотна або заохолоджена вода. Для більш ефективного уловлення оксидів азоту, у змійовики верхніх чотирьох тарілок подається заохолоджена вода, яка після цього використовується для охолодження п'яти наступних нижче тарілок. Змійовики нижніх тарілок охолоджуються оборотною водою. Крім того, для змійовиків верхніх тарілок передбачена також подача оборотної води.

Рівень азотної кислоти в кубі колони підтримується автоматично за допомогою регулятора з клапаном, який керує лінією подачі азотної кислоти з куба колони в збірник або безпосередньо у збірник.

Схемою передбачено автоматичне закриття клапану на лінії відбору азотної кислоти з куба колони у разі зниження рівня азотної кислоти до мінімального.

Гази, що містять непоглинуті оксиди азоту, після колони направляються на установку термічного знешкодження відходів виробництва адипінової кислоти. Тиск у верхній частині колони автоматично регулюється за допомогою регулятора з клапаном, установленим на лінії подачі газів до зазначеної установки.

Технологічна схема досліджуваного процесу абсорбції нітрозних газів представлена у додатку А.

1.2 Норми технологічного процесу

Процес абсорбції нітрозних газів здійснюється в абсорбційній колоні поз. К-706 (рисунок 1.1), куди подаються знесолена вода (конденсат сокової пари) та нітрозні гази.

Для забезпечення стабільної роботи апарата та отримання продукту необхідної концентрації встановлюються наступні норми основних параметрів технологічного режиму:

1. Знесолена вода (конденсат сокової пари) подається на вхід абсорбційної колони К-706 з об'ємною витратою в межах 0,5–1,5 м³/год.

2. Нітрозні гази, що надходять на вхід у колону, повинні характеризуватися наступними параметрами:

- об'ємна витрата - 3000–6200 м³/год;
- температура - не вище 40 °С;
- об'ємна частка діоксиду азоту (NO₂) - 8,0–8,4 %;
- об'ємна частка оксиду азоту (NO) - 1,0–1,4 %.



Рисунок 1.1 - Зовнішній вигляд пристрою - колони

3. Абсорбційна колона поз. К-706. У кубовій частині колони контролюються наступні показники:

- рівень азотної кислоти - 480–960 мм (30–60 %);
- температура кислоти - 30–40 °С;
- густина розчину - 1,23–1,34 г/см³.

На тарілках колони температура азотної кислоти підтримується в межах 30–40 °С. У верхній частині колони тиск становить 0,26–0,33 МПа.

4. Нітрозні гази на виході з колони повинні мати температуру 10–40 °С, а об'ємна частка оксидів азоту не повинна перевищувати 0,5 %.

5. Нітрозні гази на виході з гідрозатвора поз. Е-773 підтримуються при розрідженні 1–3 кПа (100–300 кгс/м²).

2. ФУНКЦІОНАЛЬНА СХЕМА АВТОМАТИЗАЦІЇ ТА ВИБІР ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ

2.1 Розроблення функціональної схеми автоматизації

У ході аналізу технологічного процесу абсорбції нітрозних газів під час виробництва адипінової кислоти було виявлено, що негативні наслідки можна усунути шляхом впровадження сучасної функціональної схеми автоматизації, яка забезпечить точне та стабільне регулювання параметрів технологічного процесу. За таких умов модернізація системи керування є доцільною та має економічне підґрунтя.

Функціональна схема автоматичної системи керування (АСК), розроблена в межах цього проєкту, представлена у додатку В.

Основною особливістю запропонованої АСК є впровадження сучасних промислових контролерів (РС) і організація централізованого збору та обліку параметрів технологічного процесу [10, 11].

Децентралізоване керування впроваджується з використанням мікропроцесорних засобів, тобто контролера та персонального комп'ютера. Такий підхід забезпечує низку переваг, зокрема:

- архівація основних технологічних параметрів протягом визначеного часу;
- підвищення точності і стабільності процесу керування;
- інтеграція окремих ділянок керування в єдину систему;
- скорочення потреби в обслуговуючому персоналі.

Після проведення аналізу структурних схем взаємозв'язку параметрів, типових схем автоматизації та вимог технологічного регламенту, слід визначити основні контури системи (вимірювання, регулювання, блокування, захисту, сигналізації).

Під час розробки зазначених контурів необхідно враховувати, що система автоматизації повинна не лише повністю відповідати вимогам

технологічного процесу, але й гарантувати безпечні умови праці для обслуговуючого персоналу.

Для ефективного контролю за перебігом виробничого процесу доцільно передбачити виведення інформації про технологічні параметри на операторські пульти або дисплеї автоматизованих робочих місць (АРМ). Це забезпечить можливість оперативного моніторингу процесу в режимі реального часу та дозволить своєчасно реагувати на будь-які відхилення від заданих режимів.

Запровадження дискретного керування замість ручного, а також інтеграція систем захисту й автоматичного блокування дають змогу знизити ймовірність помилок, зумовлених людським фактором; підвищити рівень надійності та безпеки експлуатації обладнання; забезпечити безперервність і стабільність технологічного процесу; покращити загальну ефективність функціонування виробничої системи [12].

Реалізація запропонованої АСК дозволить зменшити втрати сировини більш точному дотриманню технологічних параметрів. У результаті очікується підвищення продуктивності виробництва адипінової кислоти.

Окрім досягнення економічного ефекту, впровадження АСК забезпечить низку важливих технічних і соціальних переваг, зокрема:

- зменшення кількості аварійних та потенційно небезпечних ситуацій;
- скорочення часу, необхідного на проведення як планових, так і позапланових ремонтних робіт;
- покращення умов праці завдяки зниженню потреби у перебуванні персоналу в зонах з високим рівнем впливу шкідливих факторів.

У сукупності ці переваги сприятимуть підвищенню рівня техногенної безпеки, надійності технологічного процесу та загальної ефективності виробництва.

2.1.1 Карта технологічних параметрів

Першим етапом у розробці функціональної схеми автоматизації є визначення технологічних параметрів, які підлягають контролю, блокуванню, регулюванню, сигналізації та дистанційному керуванню [1, 4, 7].

З цією метою була складена карта технологічних параметрів, у якій наведено перелік ключових величин і способи їх автоматизованого впливу. Зазначена карта розміщена у додатку Б.

У технологічній карті відображено параметри, що підлягають контролю в таких апаратах і елементах обладнання:

- абсорбційна колона - К-706;
- гідрозатвор - Е-773;
- інжектор - ВН-701;
- теплообмінник - Т-706;
- компресори нітрозних газів - КНГ-1, КНГ-2, КНГ-3.

Основним об'єктом автоматизації в процесі абсорбції нітрозних газів є абсорбційна колона К-706, оскільки саме в ній відбувається основний масообмінний процес, що має визначальний вплив на ефективність виробництва.

У колоні здійснюється постійний контроль ряду основних технологічних параметрів, які забезпечують стабільність процесу абсорбції нітрозних газів та отримання азотної кислоти заданої концентрації.

Рівень азотної кислоти в кубі колони підтримується в межах 30–60 % з допустимою похибкою $\pm 2,5$ %. Цей параметр контролюється, реєструється, регулюється автоматично, має систему сигналізації та виводиться на центральний пульт управління (ЦПУ).

Тиск пари в нижній частині колони не повинен перевищувати 0,35 МПа при допустимій похибці $\pm 0,015$ МПа. Покази цього параметра фіксуються та передаються на ЦПУ. У верхній частині колони тиск підтримується в діапазоні 0,28–0,33 МПа (похибка $\pm 0,011$ МПа). Параметр контролюється,

реєструється, регулюється та супроводжується системою сигналізації з відображенням на ЦПУ.

Об'ємна витрата нітрозних газів на вході в колону становить 3000–6200 м³/год при допустимій похибці ± 400 м³/год. Вона контролюється та реєструється з передачею даних на ЦПУ.

Витрата оборотної води, що надходить у змієвики колони, підтримується в межах 100–160 м³/год (похибка ± 10 м³/год). Параметр контролюється, регулюється і виводиться на ЦПУ.

Об'ємна витрата азотної кислоти, що відводиться з куба колони, становить 0,8–3 м³/год з допустимою похибкою $\pm 0,07$ м³/год. Контроль і реєстрація цього параметра здійснюються з передачею на ЦПУ.

Подача знесоленої води на вхід у колону відбувається з витратою 0,5–1,5 м³/год (похибка $\pm 0,03$ м³/год). Параметр контролюється, реєструється, регулюється автоматично та виводиться на ЦПУ.

Температура нітрозних газів, що подаються в колону, не повинна перевищувати 40 °С, при похибці вимірювання ± 1 °С. На виході з колони температура безнітрозних газів підтримується в межах 10–40 °С (похибка $\pm 3,5$ °С), а дані щодо цього параметра контролюються, реєструються і передаються на ЦПУ. Температура оборотної води, що подається у змієвики колони, підтримується в діапазоні 20–28 °С, а температура води, що виходить зі змієвиків, - 28–34 °С (обидва параметри з похибкою ± 1 °С). Температура азотної кислоти на виході з колони також підтримується в межах 28–34 °С (похибка ± 1 °С).

Концентрація азотної кислоти на виході з колони повинна становити 50–65 % при допустимій похибці $\pm 1,5$ %. Параметр контролюється, реєструється, і дані передаються на центральний пульт управління.

На трубопроводі відведення азотної кислоти з куба колони встановлено відсічний клапан, який забезпечує можливість дистанційного керування та аварійного блокування потоку.

Знесолена вода подається до абсорбційної колони через теплообмінник Т-706, де відбувається відведення тепла за рахунок прямої оборотної води. Такий режим теплової взаємодії забезпечує підтримання оптимальної температури перед подачею води в колону, що є критично важливим для ефективного перебігу процесу абсорбції.

Технологічні параметри, які контролюються в теплообміннику Т-706, наведені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Параметри контролю в Т-706

Апарат	Параметр	Допустимі значення	Допустима похибка	Покази	Реєстрація	Регулювання	Сигналізація	Дистанційне управління	Блокування	Вивід на ЦПУ
Теплообмінник Т-706	Температура знесоленої води на виході з теплообмінника (°C)	20-40	±0,1	+		+				+

Для запобігання підвищенню тиску в колекторі бідних нітрозних газів використовується гідрозатвор Е-773. Перелік технологічних параметрів, що контролюються в гідрозатворі Е-773, наведений у таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 - Параметри контролю у Е-773

Апарат	Параметр	Допустимі значення параметрів	Допустима похибка	Покази	Реєстрація	Регулювання	Сигналізація	Дистанційне управління	Блокування	Вивід на ЦПУ
Гідрозатвор Е-773	Тиск нітрозних газів на виході з гідрозатвора, (кПа)	1-3	± 0,1	+		+				+
	Клапан регулюючий на трубопроводі нітрозних газів на виході з гідрозатвора							+		+

У разі аварійної зупинки компресора передбачено відведення нітрозних газів в атмосферу за допомогою інжектора ВН-701. Для забезпечення надійної та безпечної роботи цього обладнання здійснюється контроль низки основних технологічних параметрів.

Тиск нітрозних газів перед інжектором підтримується в межах 1–4 кПа з допустимою похибкою $\pm 0,2$ кПа. Параметр контролюється, а його покази відображаються та передаються на ЦПУ.

Тиск повітря перед інжектором становить 0,6–0,8 МПа, при допустимій похибці вимірювання $\pm 0,015$ МПа. Значення параметра фіксуються та виводяться на ЦПУ.

На трубопроводі подачі нітрозних газів в інжектор встановлена електрозасувка, яка забезпечує можливість дистанційного керування та автоматичного блокування у разі відхилення параметрів від норми чи виникнення аварійної ситуації.

Аналогічно, на лінії подачі повітря в інжектор передбачено відсічний клапан, що також має функції дистанційного управління та аварійного блокування для запобігання неконтрольованому надходженню повітря в систему.

Нітрозні гази з віддувної колони, вихлопні гази вакуумних насосів та гази дихальних трубопроводів, що містять азотну кислоту, спрямовуються для компримування, а потім - на абсорбцію оксидів азоту. Для компримування цих газів використовуються компресори КНГ-1, КНГ-2 та КНГ-3.

Основним параметром, що підлягає постійному контролю, є стан електродвигунів компресорів.

Система забезпечує дистанційне керування, автоматичне блокування у разі виникнення аварійних ситуацій, а також вивід показників на ЦПУ. Це дозволяє оперативно відстежувати роботу компресорів, своєчасно реагувати на відхилення та гарантувати безперебійну подачу нітрозних газів у технологічну систему.

2.1.2 Опис функціональної схеми автоматизації

Функціональна схема систем автоматизації технологічних процесів - це документ, який визначає структуру та характеристики систем автоматизації технологічних процесів, а також оснащення їх приладами та засобами автоматизації. На схемі спрощено зображено агрегати, що підлягають автоматизації, а також прилади, засоби автоматизації і керування, які позначені умовними символами згідно з чинними стандартами. Також показані лінії зв'язку між ними [10-12].

Схема автоматизації технологічного процесу абсорбції нітрозних газів включає:

1. Контур регулювання, реєстрації, сигналізації та блокування:
 - автоматичне регулювання, реєстрація, сигналізація і блокування рівня в кубі колони.
2. Два контури регулювання, сигналізації та реєстрації:
 - автоматичне регулювання, сигналізація і реєстрація тиску у верхній частині колони;
 - автоматичне регулювання, сигналізація і реєстрація концентрації оксидів азоту на виході з колони.
3. Два контури регулювання параметрів:
 - регулювання тиску після гідрозатвора;
 - регулювання температури знесоленої води на виході з теплообмінника.
4. Три контури показу і реєстрації параметрів:
 - показ і реєстрація витрати нітрозних газів на вході в колону;
 - показ і реєстрація витрати азотної кислоти з куба колони;
 - показ і реєстрація концентрації азотної кислоти на виході з колони.
5. Один контур показу і сигналізації параметрів:
 - показ і сигналізація витрати оборотної води на вході в змієвики колони.

6. Вісім контурів показу параметрів:

- тиску пари в нижній частині колони;
- температури нітрозних газів на вході в колону;
- температури оборотної води в змієвики колони;
- температури азотної кислоти на виході з колони;
- температури оборотної води з змієвиків колони;
- температури газу на виході з колони;
- тиску повітря перед інжектором;
- тиску нітрозних газів перед інжектором.

7. Один контур сигналізації і блокування параметрів:

- сигналізація і блокування стану електродвигунів компресорів.

Детальний опис контурів регулювання.

Контур №1. Регулювання концентрації оксидів азоту на виході з колони К-706.

Концентрація нітрозних газів на виході з колони вимірюється концентратоміром. З нього надходить сигнал на перетворювач, який формує уніфікований сигнал і передає його до блоку аналогового вводу.

Паралельно витрата знесоленої води вимірюється витратоміром, сигнал з якого також проходить через перетворювач і надходить до блоку аналогового вводу.

Обробка цих сигналів здійснюється в контролері за допомогою спеціальної програми. На основі отриманих даних формується регулюючий сигнал, який через блок аналогового виводу надходить на виконавчий механізм. Виконавчий механізм коригує подачу знесоленої води, забезпечуючи підтримання заданого рівня концентрації нітрозних газів на виході з колони.

У разі перевищення концентрації встановлених нормативів система активує сигналізацію верхнього рівня параметра.

Контур №2. Регулювання рівня азотної кислоти в кубі колони К-706.

Рівень азотної кислоти вимірюється рівнеміром. Сигнал з нього надходить на перетворювач, який формує уніфікований сигнал і передає його до блоку аналогового вводу. Звідти сигнал надходить до контролера, де отримане значення обробляється за допомогою програми та порівнюється із заданим рівнем.

У разі виходу рівня за встановлені межі формується регулюючий сигнал, який через блок аналогового виводу передається на виконавчий механізм для корекції рівня.

Якщо рівень азотної кислоти знижується нижче допустимого граничного значення, система активує сигналізацію. Крім того, сигнал із контролера передається на дискретний блок, який здійснює блокування для запобігання подальшому зниженню рівня.

У разі критичного зниження рівня спрацьовує відсічний клапан на трубопроводі подачі азотної кислоти з куба колони, що забезпечує безпеку технологічного процесу.

Контур №3. Контур регулювання тиску в верхній частині колони К-706.

Тиск у верхній частині колони вимірюється давачем тиску. Сигнал з давача надходить на перетворювач, який формує уніфікований сигнал і передає його до блоку аналогового вводу. Звідти сигнал передається до контролера, де він обробляється за допомогою програми і порівнюється із заданим значенням.

У разі виходу тиску за встановлені межі формується регулюючий сигнал, який через блок аналогового виводу направляється на виконавчий механізм для корекції параметра.

Крім того, передбачена сигналізація при досягненні нижньої межі допустимого тиску.

Контур №4. Регулювання температури знесоленої води на виході з теплообмінника Т-706.

Температура знесоленої води вимірюється давачем температури. Сигнал з давача надходить на перетворювач, який формує уніфікований сигнал і передає його до блоку аналогового вводу. Звідти сигнал надходить до контролера, де отримане значення обробляється за допомогою програми та порівнюється із заданими межами.

У разі виходу температури за встановлені межі формується регулюючий сигнал, який через блок аналогового виводу направляється на виконавчий механізм для коригування параметра.

Контур №5. Контур регулювання тиску після гідрозатвора Е-773.

Тиск після гідрозатвора вимірюється давачем тиску. Сигнал з давача надходить на перетворювач, який формує уніфікований сигнал і передає його до блоку аналогового вводу. Звідти сигнал передається до контролера, де він обробляється за допомогою програми та порівнюється із заданими межами.

У разі виходу тиску за допустимі межі формується регулюючий сигнал, який через блок аналогового виводу направляється на виконавчий механізм для корекції параметра.

Функціональна схема також передбачає контроль стану електродвигунів компресорів нітрозних газів. У разі зупинки будь-якого компресора активується схема блокування. Це призводить до відкриття заслінок на трубопроводах нітрозних газів і повітря перед інжектором, а також до закриття клапана після гідрозатвора.

Одночасно вмикається сигналізація спрацювання системи блокування для оповіщення персоналу.

2.2 Вибір технічних засобів автоматизації

Для забезпечення контролю, регулювання та автоматизованого управління процесом абсорбції нітрозних газів у колоні і допоміжному обладнанні підібрано відповідні технічні засоби автоматизації [13-16].

Контроль концентрації оксидів азоту на виході з колони здійснюється за допомогою концентратоміра типу SWG 200, який забезпечує точне вимірювання в діапазоні до 0,5 %. Для визначення концентрації азотної кислоти на виході з колони використовується концентратомір КВЧ-5М, що забезпечує стабільність вимірювання в межах 50–65 %.

Вимірювання витрат знесоленої води на вході в колону, нітрозних газів, азотної кислоти з куба, а також оборотної води в змієвиках колони здійснюється вихровими витратомірами типу VFM 3100. Прилади цього типу забезпечують високу точність вимірювання витрат у широкому діапазоні (від 0,5 до 6200 м³/год) і стійкі до агресивного середовища.

Контроль тиску в різних зонах технологічної системи (у верхній та нижній частинах колони, на виході з гідрозатвора, перед інжектором тощо) виконується давачами тиску типу Cerabar M PMP 48, які характеризуються високою надійністю і точністю (у межах 0,28–0,33 МПа для основних вузлів).

Вимірювання температури технологічних потоків - знесоленої води, нітрозних газів, оборотної води та азотної кислоти - здійснюється термодавачами опору з перетворювачами T1518 і TMT-180. Ці прилади забезпечують точне визначення температур у межах 20–40 °С залежно від контрольованої ділянки процесу.

Рівень азотної кислоти в кубі колони контролюється рівнеміром типу LMK 358/358H, який дозволяє підтримувати заданий рівень (30–60 %) і передає сигнал на систему автоматичного регулювання.

Для контролю стану електродвигунів компресорів КНГ-1, КНГ-2 та КНГ-3 застосовуються проміжні реле, що забезпечують індикацію та дистанційне управління з можливістю блокування у разі аварійної ситуації.

Вибрані засоби автоматизації забезпечують надійне функціонування системи контролю та управління, своєчасне реагування на відхилення параметрів від нормативних значень, а також передавання інформації на ЦПУ для моніторингу всього процесу в реальному часі.

Коротка характеристика та опис ТЗА

Інтелектуальний датчик Cerabar M PMP 48 (рисунок 2.1) з фланцевим або різьбовим з'єднанням, призначений для вимірювання тиску в діапазоні від 10 мбар до 400 бар.



Рисунок 2.1 – Давач тиску Cerabar M PMP 48

Цей перетворювач тиску має різьбовий хвостовик і фланці, може комплектуватися з подовженою або стандартною діафрагмою, а також оснащується аналоговою або цифровою електронікою. Його особливості та переваги у високій точності: лінійність не гірша за 0,3% від встановленої шкали, діапазон переналаштування 10:1, стабільність показників не гірша за 0,1%.

Сенсор являє собою п'єзорезистивний металевий датчик з діапазоном вимірювань до 400 бар. Електроніка представлена у двох варіантах: аналогова версія забезпечує економічне рішення для швидкоплинних процесів, а цифрова версія є інтелектуальною та підтримує протокол HART. Корпус Cerabar M виготовлений з нержавіючої сталі і відповідає вимогам харчової та фармацевтичної промисловості. Підключення до процесу дозволяє змінювати матеріал змочуваних частин шляхом простої заміни сенсорного модуля з розділовою діафрагмою.

Основні технічні характеристики Cerabar M PMP 48 наведені в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 - Технічні характеристики перетворювача тиску Cerabar M
PMP 48

Діапазони вимірювання	Металевий сенсор: 10 мбар...400 бар
Статичний тиск	Металевий сенсор: 4 бар...600 бар
Варіанти електроніки	4...20 мА (Аналогова електроніка) 4...20 мА (HART)
Підключення до процесу	Всі загальні варіанти розділової діафрагми
Температура процесу	-40 °С...+350 °С, (залежить від типу рідини-заповнювача і ширини діафрагми)
Навколишня температура	-40 °С...+85 °С
Сертифікати	РБ 0304 0180 99 DMT CSA FM TIS

Термоелектричні датчики температури Т1518 (рисунок 2.2) з захисною гільзою, призначені для вимірювання температури в діапазоні від -50°C до $+650^{\circ}\text{C}$, оснащені вбудованим у головку перетворювачем ТМТ180.



Рисунок 2.2 – Термоелектричний датчик температури Т1518

Термоелектричні давачі температури Т1018 (на опорах, з конусною гільзою), призначені для дистанційного вимірювання температури газів та рідин у промислових системах автоматизації.

Основні характеристики датчика включають міряючий опір Pt100 з діапазоном вимірювання від -50°C до $+650^{\circ}\text{C}$ та клас точності В відповідно до стандарту ІЕС 751. Головка виконана типу В згідно з DIN-стандартами,

корпус має ступінь захисту IP54, а конусна гільза забезпечує швидку реакцію на зміну температури. Монтаж здійснюється на опорах, що спрощує встановлення у трубопровід або обладнання.

Функціональні можливості датчика передбачають вбудований програмований перетворювач у головці з вихідним сигналом 4–20 мА, лінійну вихідну характеристику залежно від температури або опору, а також можливість переналаштування діапазону вимірювання під час експлуатації без демонтажу. Пристрої забезпечують індикацію несправності, наприклад, при обриві або пошкодженні чутливого елемента, і можуть постачатися як з перетворювачем, так і без нього залежно від потреб користувача.

Основним елементом давача є один вимірювальний резистор, розташований у ніжці вимірювальної вставки. Через внутрішню проводку він з'єднаний із клемною колодкою, розміщеною в головці типу В відповідно до стандарту DIN.

Принцип роботи давача ґрунтується на зміні електричного опору залежно від температури. У моделях із перетворювачем сигналу зміна опору перетворюється в стандартизований лінійний струмовий сигнал у діапазоні від 4 до 20 мА.

Монтаж давачів здійснюється за допомогою різьбового з'єднання на прямий або косий приварний патрубок. Внутрішня проводка виконана за двопровідною схемою. Діапазон вимірювання температури становить від -50 до +650 °С, а для моделей з перетворювачем ТМТ180 доступні діапазони від -50 до +600 °С (діапазон 0) та від -30 до +200 °С (діапазон 1). Вимірювальний струм давача досягає 5 мА, а допустимі навантаження на гільзу складають тиск до 12 МПа, швидкість потоку газу до 70 м/с і рідини до 5 м/с.

Конструкційно головка виконана з алюмінієвого сплаву, гільза з нержавіючої сталі, а внутрішня проводка виготовлена зі срібла. Максимальна температура головки становить до +150 °С без перетворювача та від -30 до +80 °С для моделей з перетворювачем ТМТ180. Ступінь захисту корпусу

IP54, а електромагнітна сумісність відповідає стандартам EN 50081-2 (емісія) та EN 50082-2 (стійкість).

Базові діапазони перетворювача відповідають 0 (-50...+600 °С) та 1 (-30...+200 °С), вихідний сигнал може бути 4–20 мА або 20–4 мА. Межі вимірювання налаштовуються від +20 °С до +650 °С (або до 230 °С для окремих діапазонів) з кроком 0,1 °С, початкове значення встановлюється в межах базового діапазону також з кроком 0,1 °С. Час реакції перетворювача регулюється від 1 до 60 секунд з кроком 0,1 секунди.

Живлення здійснюється від 9 до 36 В постійного струму, вплив зміни напруги становить менше $\pm 0,1\%$ від верхньої межі базового діапазону, а обмеження вихідного струму близько 24 мА. Індикація несправностей налаштовується для сигналів >20 мА або <4 мА. Похибка аналогового виходу складає $\pm(0,1\% \text{ ВПБД} + 0,05\% \text{ УД})$, де ВПБД – верхня межа базового діапазону, а УД – встановлений діапазон у °С.

Перетворювач ТМТ 180 призначений для вбудовування у головку типу В і використовується з термометрами опору Pt100. Налаштування здійснюється через персональний комп'ютер або ручний комунікатор, підтримується протокол HART, що забезпечує зручну інтеграцію у системи автоматизації та програмування пристрою. Перетворювач сумісний з різними вхідними сигналами, включаючи термоопір (RTD), термопари (ТП), опір (Ом) та потенціометр (мВ).

Монтаж виконується безпосередньо у головку типу В. Налаштування можна проводити за допомогою ПК із сервісним програмним забезпеченням, таким як COMMUWIN II або ReadWin 2000, або через ручний комунікатор DXR 275. Пристрій забезпечує двопровідну технологію з аналоговим вихідним сигналом 4...20 мА, високу точність у всьому діапазоні температур навколишнього середовища та сигналізацію несправностей (розрив або коротке замикання ланцюга давача) згідно з NAMUR NE 43.

Перетворювач має електромагнітну сумісність відповідно до NAMUR NE 21, гальванічну ізоляцію, можливість моделювання вихідного сигналу,

лінеаризацію під потреби замовника та індикацію граничних значень (min/max). Підтримується настройка діапазону вимірювань, підбір кривої лінеаризації та розширений режим SETUP. Корпус пристрою має захист IP66 і відповідає сертифікатам вибухозахищеності ATEX, FM та CSA.

Вихідний сигнал становить 4–20 мА, а вхідний сигнал може бути RTD, ТП, Ом або мВ. Завдяки протоколу HART можливе дистанційне програмування та інтеграція з автоматизованими системами управління.

Погружний зонд LMK 358/358 (версія «Н» – з підтримкою HART-протоколу) для вимірювання рівня рідини.

Цей зонд призначений для безперервного вимірювання рівня рідини в різних технологічних середовищах. Основу датчика становить надійний керамічний чутливий елемент, який забезпечує високу механічну міцність та стійкість до довготривалих навантажень, навіть при вимірюванні дуже низьких рівнів.

Завдяки спеціальній конструкції з омиваною діафрагмою, яка не схильна до забруднення чи налипання, зонд ефективно працює у високов'язких середовищах.

Для зниження експлуатаційних витрат застосовано роз'ємне з'єднання кабелю із зондом, що дозволяє швидко та легко замінити кабель без додаткових витрат.

Особливості комплектації та функціональності погрузного зонда LMK 358 (рисунок 2.3) є кабель, який може поставлятися у захисній трубці з неіржавної сталі або як стандартний кабель.



Рисунок 2.3 - Погружний зонд LMK 358/358

Погружний зонд LMK 358 доступний у версії з підтримкою HART-протоколу, вбудований мікропроцесор забезпечує високоточну компенсацію характеристик чутливого елемента, компенсацію нелінійностей або температурною компенсацією.

Аналоговий вихідний сигнал (4...20 мА) модулюється цифровим сигналом за HART-протоколом, що дозволяє здійснювати дистанційне налаштування таких параметрів, як: діапазон вимірювання, коефіцієнт демпфування (згладжування коливань сигналу), нульове зміщення (зсув).

Завдяки широким функціональним можливостям зонд легко адаптується до конкретних вимог користувача та умов експлуатації, забезпечуючи надійність, гнучкість і простоту інтеграції в існуючі системи автоматизації.

Переваги та особливості зонда LMK 358:

- широкий вибір діапазонів тиску — від 0...0,6 м вод. ст. до 0...200 м вод. ст.;

- індивідуальне налаштування діапазону на вимогу замовника (наприклад, 0...55 м вод. ст.).

Висока точність вимірювання згідно IEC 60770 – це стандартна від 0,50% або 0,25% FSO (нелінійність 0,175% або 0,125% FSO), або –"Н" від 0,1% FSO, з нелінійністю 0,05% FSO.

Підтримка HART-протоколу у версії "H":

- можливість налаштування нульового зсуву, діапазону вимірювань, дешифрування;

- вихідні сигнали – 2-провідна схема 4...20 мА та – 4...20 мА + HART;

- роз'ємне з'єднання датчика з кабелем — це зручність при монтажі та обслуговуванні;

- можливість захисту кабелю трубкою з нержавіючої сталі — для експлуатації у важких умовах;

- сумісність з водою та іншими рідинами, неагресивними до матеріалів корпусу (нержавіюча сталь);

- торцева мембрана — стійка до засмічення, забезпечує надійний контакт із середовищем;
- довготривала стабільність калібрувальних характеристик;
- захист електроніки від неправильного підключення, короткого замикання та стрибків напруги;
- міцна конструкція, розрахована на роботу в складних умовах експлуатації, тривалий термін служби;
- можливість виготовлення датчиків за індивідуальними технічними вимогами замовника.

Вихровий витратомір VFM 3100

Вихровий витратомір VFM 3100 (рисунок 2.4) призначений для вимірювання об'ємної витрати чистих рідин, газів або пари при температурах до +430 °С та використовується в системах обліку, контролю технологічних процесів і енерго-менеджменту.



Рисунок 2.4 - Вихровий витратомір VFM 3100

Клас точності становить 0,5 % для рідин та 1,0 % для газів і пари, максимальний робочий тиск досягає 100 бар, а температурний діапазон середовища – від -20 °С до +430 °С. Контактуючі частини виконані з нержавіючої сталі.

Приєднання може бути фланцевим для діаметрів DN15...DN300 або міжфланцевим для DN15...DN200. Витратомір оснащений РК-дисплеєм для відображення поточної витрати та сумарного об'єму, а також забезпечує

аналоговий вихідний сигнал 4–20 мА. Для застосування у вибухонебезпечних зонах доступне вибухозахищене виконання (Ex).

Переваги витратоміра включають широкий діапазон температур і тисків, високу точність і стабільність вимірювань, надійну конструкцію з нержавіючої сталі, універсальність для різних середовищ та зручний інтерфейс для контролю й обліку даних.

Концентратомір кондуктометричний КВЧ 5М.

Концентратомір кондуктометричний КВЧ 5М (рисунок 2.5) призначений для вимірювання електропровідності водних розчинів та пульп, а також для визначення концентрації кислот, лугів і солей у водному середовищі. Широко застосовується у хімічній промисловості для контролю виробництва та технологічних процесів із використанням агресивних речовин. Його основні переваги:

- безелектродний чутливий елемент штирьового або тороїдального типу (не потребує постійного обслуговування);
- можливість підключення до двох давачів одночасно;
- захисне кислотолужне покриття чутливого елемента для роботи в агресивних середовищах;
- вбудована температурна компенсація, що підвищує точність вимірювань;
- аналогові вихідні сигнали: 0–5 мА, 4–20 мА або 0–20 мА;
- опціональний цифровий вихід RS-485 для інтеграції в системи автоматизації;
- до 8 незалежних порогів сигналізації по температурі, провідності або концентрації;
- зручне налаштування через клавіатуру на вимірювальному блоці;
- дворядний РК-дисплей з підсвічуванням забезпечує чітке відображення показників у будь-яких умовах.



Рисунок 2.5 - Концентратомір кондуктометричний КВЧ 5М

Кондуктометр КВЧ має гнучке встановлення та можливість розміщення вимірювального блоку безпосередньо в трубопроводі або резервуарі, а глибина занурення чутливого елемента – до 2500 мм. Його сумісність з АСУ ТП це – повна інтеграція у сучасні системи автоматизованого управління технологічними процесами.

Кондуктометри типу КВЧ-5М широко застосовуються у хімічній промисловості для контролю концентрації кислот, лугів, сольових розчинів та інших агресивних рідин. Прилади цього типу забезпечують високоточне вимірювання електропровідності, концентрації та температури середовища, що робить їх незамінними в автоматизованих технологічних процесах виробництва неорганічних речовин. Діапазон вимірювання відбувається за електропровідністю - у межах від 0,5 до 100 См/м; за температурою - 0–50 °С або 0–100 °С; за концентрацією - для таких речовин, як:

- NaCl (натрій хлористий),
- H₂SO₄ (сірчана кислота),
- HCl (соляна кислота),
- H₂SiF₆,
- HNO₃ (азотна кислота),
- H₃PO₄ (фосфорна кислота),
- пульпа в екстракторі фосфорної кислоти,
- NaOH (їдкий натрій),
- SO₃ (вільний у складі олеуму),
- Al₂(SO₄)₃ (сульфат алюмінію),
- Al₂Cl₃ (хлорид алюмінію),

- FeCl₃ (хлорне залізо),
- KCl (калій хлористий).

Похибка вимірювання становить від 0,4 до 4% (залежно від середовища та діапазону вимірювання) і $\pm 0,5$ °C - за температурою.

Градувальна температура ($t_{гр}$) встановлюється в межах від 15–85 °C за вимогами замовника, а діапазон автоматичної термокомпенсації здійснюється при $t_{гр} \pm 15$ °C або за індивідуальними налаштуваннями.

Кондуктометр КВЧ-5М забезпечує аналоговий вихідний сигнал від 0–5 мА або 4–20 мА постійного струму. Індикація параметрів здійснюється дворядним буквено-цифровим індикатором, що відображає концентрацію, провідність та температуру. Сигналізація за концентрацією та температурою реалізована світловими індикаторами з «сухими» контактами.

Робочі умови приладу включають тиск аналізованого середовища до 0,5 МПа (за потреби до 1,2 МПа), живлення від мережі 220 В, 50 Гц та споживану потужність не більше 15 В·А. Надійність забезпечується середнім напрацюванням на відмову не менше 21 000 годин та середнім терміном служби не менше 10 років.

Габаритні розміри приладу становлять: проточний давач - 214 × 376 мм, погрузний давач - 214 × 376 × 2500 мм, блок - 157 × 141 × 200 мм. Кондуктометр КВЧ-5М є універсальним і надійним вимірювальним приладом, що забезпечує точний контроль параметрів у хімічно агресивних середовищах і відповідає сучасним вимогам промислової автоматизації.

Газоаналізатор SWG 200.

Газоаналізатор SWG 200 (рисунок 2.6) - це універсальний прилад для промислового контролю газових середовищ, який призначений для точного вимірювання концентрації газів у складних промислових умовах. Оснащений великим графічним дисплеєм та сучасними сенсорами різного типу, він забезпечує високоточний аналіз навіть у вологих, запилених або високотемпературних середовищах.



Рисунок 2.6 - Газоаналізатор SWG 200

Завдяки гнучкій модульній архітектурі, цей прилад дозволяє одночасно використовувати до 6 сенсорів, а також адаптується під конкретні вимоги користувача: як за типами газів, так і за діапазонами вимірювань. Його основні функції та переваги полягають у можливості розширення діапазонів вимірювання в сотні разів (наприклад, до 500× по CO), використанні різних типів сенсорів для одного газу (електрохімічні, інфрачервоні тощо) для максимальної точності у відповідному діапазоні. Широкі можливості зондового вимірювання: застосування промислових зондів різної довжини, варіанти з обігрівачем або без нього, придатності для аналізу газів у запиленому чи вологому середовищі.

Зручний інтерфейс, це великий графічний дисплей 9×13 см з підсвічуванням та його одночасна індикація до 10 параметрів. У газоаналізатор вбудований блок пробопідготовки з автоматичним відбором конденсату. Інтерфейси та виводи від 8 аналогових виходів до 4–20 мА; RS-485 передача даних на великі відстані; цифрові інтерфейси для інтеграції в АСУ ТП.

Є такі типи сенсорів: інфрачервоні (NDIR), електрохімічні, цирконієві, парамагнітні, теплопровідні (термокондуктивні). Максимальна кількість одночасно встановлених сенсорів - 6 шт.

Гази та параметри, що вимірюються наведено у таблиці 2.4.

Таблиця 2.4 - Параметри, що вимірюються газоаналізатором SWG

Газ / параметр	Діапазон вимірювання	Тип сенсора
CO	0...50 % об.	Інфрачервоний
CO ₂	0...1 % об. та 0...50 % об.*	Інфрачервоний
CH ₄	0...1 % об. та 0...50 % об.	Інфрачервоний
NO	0...100 ppm / 0...4000 ppm	Електрохімічний

NO ₂	0...1000 ppm	Електрохімічний
Температура	0...1700 °С	Термопара / датчик температури

* залежно від конфігурації

Газоаналізатор SWG 200 призначений для вимірювання газових компонентів у промислових і лабораторних умовах. Похибка вимірювань не перевищує $\pm 5\%$, прилад оснащений вісьмома аналоговими виходами 4–20 мА і підтримує інтерфейс зв'язку RS-485. Максимальна кількість підключених сенсорів становить 6 штук. Дисплей газоаналізатора має розмір 9 × 13 см з підсвічуванням для зручності читання даних, передбачено автоматичний відбір конденсату. Прилад виконаний у промисловому корпусі, що дозволяє працювати в агресивних середовищах.

SWG 200 широко застосовується у хімічній промисловості, металургії, енергетиці, на теплогенеруючих установках, для контролю викидів, в очисних спорудах та у лабораторіях екологічного моніторингу.

Односідельчастий запірно-регулюючий клапан ГА 68003 з електричним виконавчим механізмом МЕРК-2500.

Клапан ГА 68003 у комплекті з електричним виконавчим механізмом МЕРК-2500 (рисунок 2.7) призначений для автоматичного регулювання або повного перекриття потоку рідких або газоподібних середовищ у трубопровідних системах. Він застосовується у системах теплопостачання, водопідготовки, нафтогазовій, хімічній та інших галузях промисловості.

Односідельчастий запірно-регулюючий клапан ГА 68003 оснащений електричним виконавчим механізмом МЕРК-2500 і призначений для роботи з рідинами або газами.

Корпус і кришка клапана виготовлені з чавуна, плунжер - зі сталі 20Х13. Виконавчий механізм МЕРК-2500 живиться однофазною напругою 220/230/240 В, 50 Гц або 220 В, 60 Гц. Пристрій оснащений двома кінцевими вимикачами та здвоєним реостатним датчиком положення із номінальним опором 100 Ом, напругою 50 В і струмом 100 мА.



Рисунок 2.7 - Односідельчастий запірно-регулюючий клапан ГА 68003

Клапан виконаний у кліматичному виконанні «У», категорія 2, зі ступенем захисту IP65 згідно з ДСТ 14254. У комплекті поставляється блок БУ-30 для перетворення сигналу від реостатного датчика у уніфікований аналоговий сигнал 0–5 мА, 0–20 мА або 4–20 мА.

Серед переваг клапана: надійне перекриття та точне регулювання потоку, уніфікований аналоговий вихід для інтеграції в системи автоматизації, захищене виконання для роботи в складних умовах, можливість роботи з різними стандартами електроживлення, висока ремонтпридатність та простота обслуговування.

I-7017 8-канальний модуль аналогового вводу з ізоляцією

Модуль I-7017 є 8-канальним пристроєм аналогового вводу з гальванічною ізоляцією (рисунок 2.8), призначеним для збору та обробки аналогових сигналів у системах промислової автоматизації та диспетчеризації. Він забезпечує перетворення аналогових сигналів у цифрову форму з високою точністю, із захистом каналів та шини зв'язку.

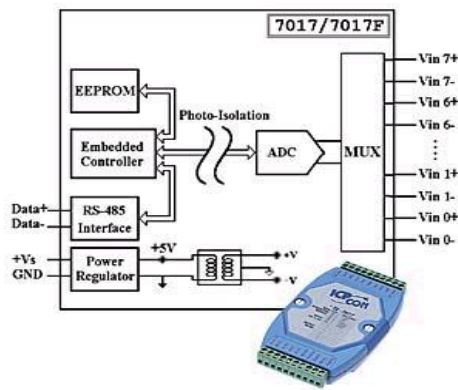


Рисунок 2.8 - I-7017 8-канальний модуль аналогового вводу з ізоляцією

Модуль виконаний у пластиковому корпусі і призначений для монтажу на DIN-рейку. Передача даних здійснюється через послідовний інтерфейс RS-485, що гарантує стійкість до електромагнітних перешкод та дозволяє створювати розгалужені мережі збору даних. Підтримуються швидкості передачі від 1200 до 115200 біт/с, довжина лінії зв'язку до 1200 метрів на сегмент, протокол сумісний із ADAM-4000, а в мережі може працювати до 2048 модулів.

Модуль містить 8 диференціальних каналів, що вимірюють як напругу, так і струм. Діапазони напруги в біполярному режимі складають $\pm 0,15$ В, $\pm 0,5$ В, ± 1 В, ± 5 В і ± 10 В, а діапазон струму - ± 20 мА. Вхідний опір становить 20 МОм для напруги та 125 Ом для струму (зовнішній резистор). Допустиме перевантаження по входу - до 35 В, смуга пропускання - 15,7 Гц. Аналого-цифрове перетворення здійснюється сигма-дельта АЦП з розрядністю 24 біти та частотою вибірки 10 вимірювань на секунду, запуск вимірювань здійснюється вбудованим генератором.

Гальванічна ізоляція каналів досягає 3000 В, основна похибка вимірювань становить $\pm 0,1$ %, коефіцієнт придушення перешкод загального виду (CMRR) - 86 дБ при 50/60 Гц, температурний дрейф нуля - 20 мкВ/°С. Вбудований процесор сумісний з архітектурою 8051 і забезпечує обробку сигналів та обмін даними, додатково модуль оснащений сторожовим таймером для запобігання зависанню системи.

Живлення подається постійною напругою від +10 до +30 В, споживана потужність близько 1,3 Вт. Модуль експлуатується при температурах від -20 до +75 °С і витримує промислові умови та електромагнітні перешкоди. Габаритні розміри складають 122×72×25 мм.

Модуль I-7017 відзначається високою точністю вимірювання, широкими можливостями підключення, гальванічною ізоляцією та сумісністю зі стандартними промисловими системами збору даних. Завдяки цьому він широко застосовується у системах контролю технологічних процесів, автоматизації виробництва, лабораторних і польових вимірюваннях.

I-7024 4-канальний модуль аналогового виводу, 12 біт ЦАП, ізоляція

Модуль I-7024 є 4-канальним пристроєм аналогового виводу з 12-бітними ЦАП та гальванічною ізоляцією (рисунок 2.9), призначеним для промислових систем автоматизації.

Він забезпечує точне формування напруги та струму, сумісний зі стандартними протоколами промислових мереж і дозволяє підключати до 2048 модулів у мережі.

Модуль виконаний у пластиковому корпусі та призначений для монтажу на DIN-рейку. Передача даних здійснюється через послідовний інтерфейс RS-485 зі швидкістю від 1200 до 115200 біт/с, протокол сумісний з ADAM-4000, максимальна довжина сегмента лінії зв'язку - 1200 м. Модуль має 4 канали аналогового виводу з гальванічною ізоляцією 3000 В.

Діапазони вихідного сигналу по напрузі становлять 0...5 В, 0...10 В, -5...5 В, -10...10 В, по струму від 0...20 мА та 4...20 мА. Навантажувальна здатність каналів 5 мА, швидкість наростання сигналу по напрузі 0,0625...512 В/с, по струму 0,125...1024 мА/с.

Похибка вихідного сигналу складає -0,1...+0,1 %, температурний дрейф нуля по напрузі -30...+30 мкВ/°С, по струму -0,2...+0,2 мкА/°С.

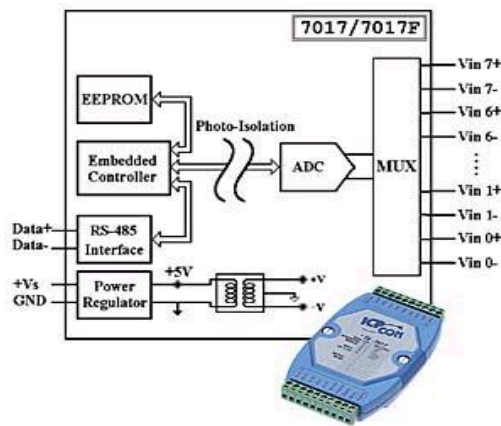


Рисунок 2.9 - I-7024 4-канальний модуль аналогового виводу, 12 біт ЦАП

Вбудований процесор сумісний з архітектурою 8051, модуль оснащений сторожовим таймером для запобігання зависанню системи. Всі підключення виконуються через гвинтові клєми.

Живлення подається постійною напругою +10...+30 В, споживана потужність 2,3 Вт. Робочий температурний діапазон -20...+75 °С. Габаритні розміри модуля складають 122×72×25 мм.

Модуль I-7017 призначений для збору аналогових сигналів у системах промислової автоматизації та диспетчеризації. Пристрій забезпечує прийом, перетворення та передачу аналогових сигналів у цифрову форму з високою точністю та електричною ізоляцією між каналами і шиною зв'язку.

I-7060 Модуль дискретного 4-канального вводу і 4-канального виводу з ізоляцією

Модуль I-7060 виконаний у пластиковому корпусі (рисунок 2.10) та призначений для монтажу на DIN-рейку.

Передача даних здійснюється через послідовний інтерфейс RS-485, що дозволяє підключати модуль у мережі з максимальною довжиною лінії до 1200 м. Підтримуються швидкості передачі від 1200 до 115200 біт/с, протокол сумісний із ADAM-4000, максимальна кількість модулів у мережі до 2048 одиниць.

Модуль оснащений 4 каналами дискретного вводу з гальванічною ізоляцією 3750 В, логічний рівень 0 відповідає 0...+1 В, логічний рівень 1 - +4...+30 В, вхідний опір 3 кОм, 0,5 Вт. Для дискретного виводу передбачено 4 канали: 2 реле з нормально розімкнутими контактами та 2 реле з перекидними контактами, із гальванічною ізоляцією 1500 В.

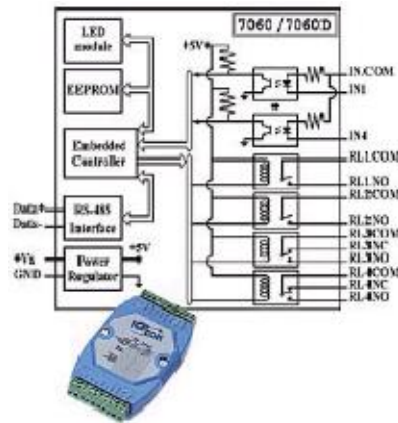


Рисунок 2.10 - I-7060 Модуль дискретного 4-канального вводу і 4-канального виводу

Максимальний комутований струм постійного струму становить 2 А при 30 В та 0,6 А при 110 В, максимальний комутований струм змінного струму - 0,6 А при 125 В та 0,3 А при 250 В, час вмикання 3 мс, час вимикання 1 мс, загальний час перемикання 10 мс, ресурс спрацьовувань до 500 000. Модуль оснащений вбудованим процесором сумісним з архітектурою 8051 та сторожовим таймером (Watchdog Timer).

Живлення здійснюється постійною напругою +10...+30 В, споживана потужність близько 1,3 Вт. Робочий температурний діапазон від -20 до +75 °С. Габаритні розміри модуля 122×72×25 мм. Модуль I-7060 відзначається високою надійністю та довговічністю, здатний працювати в промислових умовах і забезпечує ефективну інтеграцію дискретних сигналів у системи автоматизації та контролю технологічних процесів.

I-7520 Конвертер RS-232 в RS-485 з автоматичним контролем за напрямком передачі даних для RS-485, гальванічна ізоляція 3кв по RS-232

Промисловий контролер Lagoon-3140 (рисунок 2.12) – PC-сумісний пристрій з процесором AMD188ES, який працює на частоті до 40 МГц.

Контролер виконаний у пластиковому корпусі та призначений для монтажу на DIN-рейку або на стіну. Він має 256 кБ оперативної пам'яті SRAM, 2 кБ енергонезалежної пам'яті EEPROM та 512 кБ Flash для зберігання програм. Інтерфейси включають 2 порти RS-232, один RS-485 та один комбінований RS-232/RS-485, які підтримують швидкість передачі даних до 115200 біт/с і підключаються через роз'єми DB9 або гвинтові клеми.



Рисунок 2.12 - Lagoon-3140 PC-сумісний промисловий контролер

Контролер оснащений годинником реального часу (RTC) та сторожовим таймером на 1,6 с, має світлодіодні індикатори для керування та моніторингу стану. Живлення здійснюється постійною напругою +10...+30 В із споживанням 3 Вт. Програмне забезпечення включає DOS, бібліотеку для програмування та систему Trace Mode для інструментальної розробки. Робочий температурний діапазон –20...+75 °С.

Габарити контролера 72×122×25 мм, вага 0,2 кг. Lagoon-3140 підходить для промислових систем автоматизації, сумісний із PC і забезпечує зручне підключення до модулів I/O, таких як I-7017, I-7024, I-7060 та I-7520.

3. РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ

3.1 Розрахунок параметрів САР

Для моделювання та розрахунку САР (системи автоматичного регулювання) було обрано контур регулювання концентрації оксидів азоту на виході з колони (далі – Контур 1).

Одним із способів підвищення якості регулювання є застосування додаткових (внутрішніх) регуляторів, що дозволяє реалізувати каскадну структуру САР [19-21].

Суть каскадного регулювання передбачає, що внутрішній регулятор безпосередньо впливає на виконавчий механізм регулюючого органу та основний (зовнішній) регулятор формує завдання для допоміжного (внутрішнього) регулятора. Цей підхід дозволяє підвищити точність та швидкодію системи, особливо в умовах:

- зовнішніх збурень (наприклад, зміна навантаження);
- високої інерційності об'єкта регулювання.

У випадку, коли збурення використовують на вході об'єкта, внутрішній регулятор реагує на нього ще до того, як відхилення досягне виходу, що значно зменшує час реакції системи. Внаслідок чого, похибка може бути зменшена від 10 до 100 разів у порівнянні з одноконтурною САР.

Застосування каскадних САР широко використовуються у промисловості, зокрема для регулювання температури, підтримання рівня в апаратах, контролю концентрації речовин у хімічних процесах.

У більшості випадків внутрішній контур стабілізує витрату матеріального або енергетичного потоку, що є одним із головних факторів впливу на основний регульований параметр.

Особливості багатоконтурних каскадних САР належать до багатоконтурних систем регулювання. Найчастіше використовуються

двоконтурні або триконтурні каскадні схеми. У такій структурі кожен контур має свій регулятор, датчик та об'єкт впливу, але контури взаємопов'язані і працюють узгоджено [19-21].

Структурна схема двоконтурної каскадної САР зображена на рисунку 3.1.

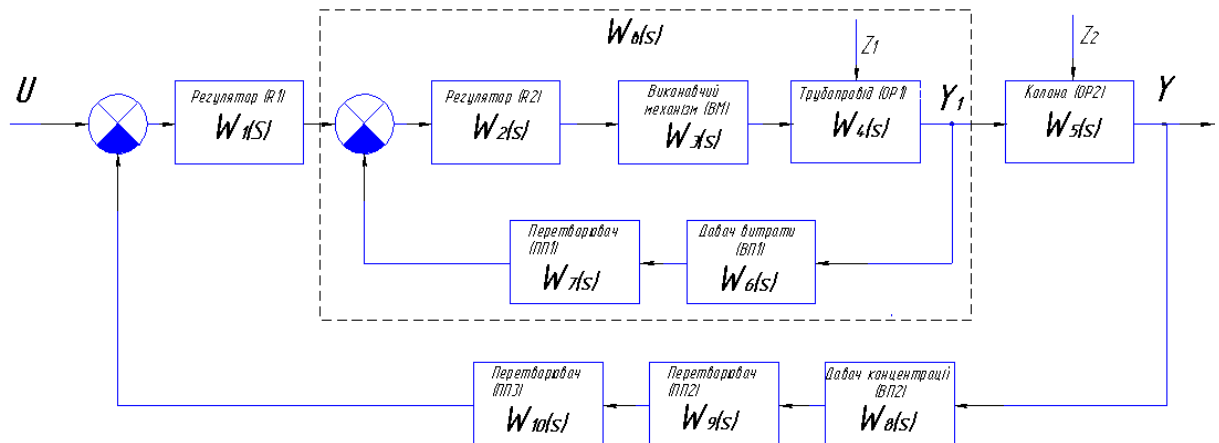


Рисунок 3.1 - Структурна схема каскадної САР

Опис структури внутрішнього контуру каскадної системи автоматичного регулювання та вибір законів регулювання для каскадної САР (рисунку 3.1) складається з таких елементів:

R2 - допоміжний регулятор;

ВМ - виконавчий механізм;

ОР1 - об'єкт регулювання внутрішнього контуру;

ВП1 - вимірювальний перетворювач;

ПП1 - проміжний перетворювач.

Завдання для регулятора R2 формується основним регулятором R1, що входить до зовнішнього (коректуючого) контуру. До складу зовнішнього контуру входять:

R1 - основний регулятор;

ВР2 - вимірювальний перетворювач;

ПП2, ПП3 - проміжні перетворювачі.

Вибір законів регулювання залежить від функціонального призначення основного регулятора: ($R1$). Його основне завдання - забезпечення сталого значення вихідної координати з мінімальною або нульовою статичною похибкою. Для цього доцільно використовувати регулятор з інтегральною складовою - тобто, ПІ або ПІД-регулятор.

Допоміжний регулятор ($R2$), основна вимога якого - висока швидкодія, оскільки саме цей регулятор має оперативно реагувати на збурення у внутрішньому контурі до появи відхилень на виході системи.

У цьому випадку доцільне використання пропорційного (П) регулятора, як найпростішого та найшвидшого за реакцією.

За потреби можна застосовувати також ПІ або ПІД закони, але це залежить від інерційності внутрішнього об'єкта.

Передаточну функцію каскадної системи позначимо $W_B(s)$, тоді вся каскадна система з точки зору основного регулятора формально перетворюється на одноконтурну САР, у якій передаточна функція по каналу регулювання (від виходу регулятора $R1$ до контрольованого параметра) становить:

$$W(s) = W_{\text{зовн}}(s) \cdot W_B(s), \text{ де}$$

- $W_B(s)$ - передаточна функція внутрішнього контуру;

- $W_{\text{зовн}}(s)$ - передаточна функція зовнішнього об'єкта (від виходу $R1$ до входу $R2$).

Це дозволяє застосувати стандартні методи аналізу та синтезу одноконтурних систем, попередньо врахувавши динаміку внутрішнього контуру в моделі. Завдяки каскадному принципу, система забезпечує зменшення впливу збурень на вихідний параметр, підвищує швидкодію та стійкість, а також дозволяє гнучко налаштувати регулятори відповідно до інерційності об'єкта та вимог до точності регулювання:

$$W_{\text{зп}}(s) = \frac{W_1(s)W_B(s)W_5(s)}{1+W_1(s)W_R(s)W_5(s)W_R(s)W_9(s)W_{10}(s)} \quad (3.1)$$

по каналу Z_2 Y :

$$W_{z_2}(s) = \frac{W_{z_2}(s)}{1 + W_1(s)W_5(s)W_6(s)W_8(s)W_9(s)W_{10}(s)}, \quad (3.2)$$

де передаточна функція внутрішнього контуру по каналу регулювання виглядатиме:

$$W_{ep}(s) = \frac{W_2(s)W_3(s)W_4(s)}{1 + W_2(s)W_3(s)W_4(s)W_6(s)W_7(s)}, \quad (3.3)$$

а по каналу Z_1 Y_1

$$W_{z_1}(s) = \frac{W_{z_1}(s)}{1 + W_2(s)W_3(s)W_4(s)W_6(s)W_7(s)}, \quad (3.4)$$

Розрахунок каскадних автоматичних систем регулювання (АСР) передбачає визначення параметрів настроювання як основного, так і допоміжного регуляторів. Це здійснюється з урахуванням динамічних характеристик об'єктів регулювання (*OP1*) та (*OP2*), виконавчого механізму, вимірювальних перетворювачів та інших засобів автоматизації.

Параметри основного і допоміжного регуляторів взаємопов'язані, тому їх розрахунок проводять методом ітерацій за наступною схемою.

1. Визначення параметрів допоміжного регулятора (*R2*). Для цього внутрішній контур розмикають на вході вимірювального перетворювача *ВП2*. Регулятор *R2* налаштовують як для звичайної одноконтурної системи регулювання.

2. Настроювання основного регулятора (*R1*). При визначенні параметрів *R1* внутрішній контур замінюють еквівалентною передаточною функцією $W_E(s)$ (позначено пунктиром на рисунку 3.1). У такому вигляді каскадна АСР розглядається як одноконтурна система, для якої розраховують параметри *R1*.

Ітеративний процес коригування відбувається після первинного визначення параметрів таким чином:

- розрахунок перехідного процесу каскадної АСР та оцінку його якості за обраними критеріями;

- якщо якість перехідного процесу не відповідає вимогам, коригують параметри допоміжного регулятора $R2$ (збільшують або зменшують налаштування);

- повторно розраховують перехідний процес і оцінюють його якість;

- якщо й після цього якість залишається незадовільною, тоді виконують коригування параметрів основного регулятора $R1$.

Цикл повторюється доти, доки параметри каскадної системи регулювання не будуть забезпечувати задані вимоги до якості регулювання.

При розрахунку каскадної АСР слід враховувати, що система в цілому може залишатися стійкою навіть за умови нестійкості внутрішнього контуру. Однак такого стану рекомендується уникати, оскільки зовнішній контур іноді переводять у ручне керування, що може привести до небажаних наслідків.

Для внутрішнього контуру оптимальним вибором є пропорційний (П) регулятор із високим коефіцієнтом підсилення. Невеликі залишкові коливання при зміні навантаження компенсуються зовнішнім регулятором. Інтегральна складова у внутрішньому контурі виправдана лише за умови невеликого коефіцієнта підсилення, що часто зустрічається при регулюванні витрат.

Під час проєктування каскадної системи необхідно уникати нелінійностей, що виникають через великі сигнали у внутрішньому контурі. Надмірно великий коефіцієнт підсилення регулятора $R2$ може призвести до перенасичення допоміжного регулятора. Тобто при зміні збурення або керуючого сигналу з основного регулятора відбувається вихід регулюючого органу в крайні положення. Хоча система при цьому іноді залишається стійкою, якість перехідних процесів значно погіршується в порівнянні з одноконтурними АСР.

Враховуючи викладене, для регулятора $R1$ доцільно застосовувати закон регулювання ПІД, а для регулятора $R2$ — ПІ.

Знайдемо передаточні функції елементів внутрішнього контуру та їх коефіцієнти:

Трубопровід (ОП1).

У стаціонарному потоці швидкість рідини ω у трубопроводі залежить від перепаду тиску ΔP ($\Delta P = P_1 - P_2$)

$$\omega^2 = c^2 2 \frac{\Delta P}{\rho}, \quad (3.5)$$

де ω - швидкість;

c - коефіцієнт витрати;

ρ - питома густина;

ΔP - перепад тиску.

Швидкість прямопропорційна витраті:

$$\omega = \frac{F}{S}, \quad (3.6)$$

де F - витрата;

S - площа перерізу трубопроводу.

Відповідно, перепад тиску при стаціонарному потоці рідини розраховується:

$$\Delta P = \frac{\omega \rho}{2c^2} = \frac{F^2 \rho}{2c^2 S^2}. \quad (3.7)$$

Якщо прикладена сила $S_{\Delta P}$ перевищує гідростатичний опір трубопроводу, то потік починає рухатися з прискоренням.

Таким чином запишемо рівняння нестационарного руху рідини враховуючи, що результуюча сила потоку рівна масі помноженій на прискорення:

$$S_{\Delta P} = \frac{SF^2 \rho}{2S^2 c^2} + M \frac{d\omega}{d\tau}, \quad (3.8)$$

де M - маса;

τ - координата часу.

Маса рідини в трубопроводі $M = LS\rho$, де L - довжина трубопроводу.

Виконавши відповідні перетворення і замінивши M , отримаємо:

$$\frac{F^2 \rho}{2C^2 S} + L\rho \frac{dF}{d\tau} - S\Delta P. \quad (3.9)$$

Щоб визначити сталу часу об'єкту, приведемо це рівняння до нормального вигляду:

$$\frac{2LSC^2}{F} \left(\frac{dF}{d\tau} \right) + F = \frac{2C^2 S^2 \Delta P}{\rho F}. \quad (3.10)$$

Коефіцієнтом при $\left(\frac{dF}{d\tau} \right)$ є стала часу:

$$T = \frac{2LSC^2}{F}. \quad (3.11)$$

Коефіцієнт витрати C^2 можна замінити його значенням з рівняння стаціонарного руху:

$$C^2 = \frac{F^2 \rho}{2S^2 \Delta P}. \quad (3.12)$$

Тоді стала часу буде мати такий вигляд:

$$T = \frac{LF\rho}{S\Delta P}. \quad (3.13)$$

З викладених міркувань, передаточна функція даного об'єкта регулювання представляє собою аперіодичну ланку з ланкою запізнення:

$$W(p) = \frac{e^{-T_1 p}}{T_1 p + 1}, \quad (3.14)$$

де стала часу трубопроводу та запізнення можна знайти за наступними формулами:

$$T = \frac{LF\rho}{S\Delta P}, \quad (3.15)$$

$$\tau = \frac{\rho \cdot V}{F_m} \quad (3.16)$$

де F_m - масова витрата, L - довжина трубопроводу, S - площа поперечного перерізу трубопроводу, F - об'ємна витрата, ρ – густина рідини, ΔP - перепад тиску.

Відповідно технологічного регламенту для трубопроводу подачі знесоленої води маємо:

$$L = 1,5(\text{м}), d = 25\text{мм} = 0,025\text{м}, F = \frac{0,83\text{м}^3}{\text{год}} = 0,00023\text{м}^3,$$

$$S = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 0,025^2}{4} = 0,00049(\text{м}^2), \rho = \frac{1000\text{кг}}{\text{м}^3}, \Delta P = 25000\text{Па}.$$

Тепер зробимо розрахунки параметрів передаточної функції:

$$T = \frac{LF_p}{S\Delta P} = \frac{1,5 \cdot 0,00023 \cdot 1000}{0,00049 \cdot 25000} = 0,028\text{с},$$

$$\tau = \frac{\rho \cdot V}{F_m} = \frac{1000 \cdot 0,000735}{0,00023 \cdot 1000} = 0,028\text{с}.$$

Таким чином, ми отримали наступну передаточну функцію для трубопроводу:

$$W_{TP}(s) = \frac{1}{0,028 \cdot s + 1} \cdot e^{-3,2s} \quad (3.17)$$

Виконавчий механізм ВМ.

На підставі аналізу розрахунку передаточної функції виконавчого механізму, маємо:

$$W(s) = \frac{\Delta\omega(s)}{\Delta\omega_1(s)} = \frac{\frac{K^2 \cdot 1}{R_p \cdot J \cdot p}}{1 + \frac{1 \cdot K^2}{J \cdot p \cdot R_p}} = \frac{1}{T_m \cdot s + 1}, \quad (3.18)$$

де $K = 1$ - електромеханічна стала часу.

Знаходимо сталу часу за формулою:

$$T_m = \frac{J \cdot \omega_1 \cdot s_m}{M_{max}}, \quad (3.19)$$

де J - зведений момент інерції, ω_0 - синхронна кутова швидкість двигуна, s_m - ковзання двигуна, M_{max} - максимальний момент двигуна.

$$\omega_0 = \frac{\omega_1}{1 - s_m}, \quad (3.20)$$

де ω_0 - робоча кутова швидкість двигуна.

$$\omega_0 = \frac{2\pi f}{p} \quad (3.21)$$

де f - частота мережі живлення двигуна, p - пара полюсів двигуна.

Максимальний момент на валу двигуна:

$$M_{max} = \frac{W}{\omega_0} \quad (3.22)$$

де W – потужність двигуна, J – зведений момент інерції.

Для передаточної функції двигуна з заслінкою матимемо:

$$\omega_0 = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 50}{1} = 314(\text{рад/с}).$$

$$\text{Тоді: } \omega_1 = 314 \cdot (1 - 0,11) = 279,46(\text{рад/с}),$$

де $W = 1,1 \text{ кВт}$ – потужність двигуна виконавчого механізму,
 $J = 0,037 \text{ кг} \cdot \text{м}^3$ – зведений момент інерції.

$$E_m = \frac{0,037 \cdot 279,46 \cdot 0,11}{3,503} = 0,32(\text{с}).$$

$$M_{\text{max}} = \frac{1100}{314} = 3,503(\text{Н} \cdot \text{м})$$

Передаточна функція регулюючого клапану буде мати такий вигляд:

$$W_k(s) = k_k, \quad (3.23)$$

де k_k – коефіцієнт перетворення клапана.

В даному випадку приймаємо $k_k = 0,56$.

В результаті матимемо: $W_k(s) = 0,56$.

Отримаємо для передаточної функції виконавчого механізму з регулюючим органом таке рівняння:

$$W_{BM}(s) = \frac{0,56}{0,32 \cdot s + 1}. \quad (3.24)$$

Передаточна функція давача витрати ВП1 має вигляд: $W_0(s) = k_0 = 1$.

Для передаточної функції перетворювача ПП1 (при $k_n = 1$) маємо:

$$W_n(s) = k_n = 1.$$

Для покращення характеристик роботи системи проведемо оптимізацію коефіцієнтів ПІ-регулятора (блок NCD Output).

У середовищі Simulink, що є додатком до Matlab, створюємо математичну модель об'єкта регулювання.

Структурна схема моделі буде мати такий вигляд (рисунок 3.2):

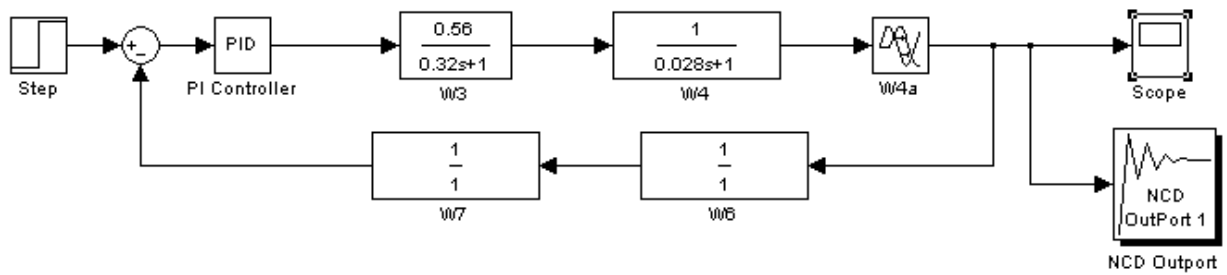


Рисунок 3.2 - Структурна схема математичної моделі внутрішнього контуру САР

Після завершення процесу оптимізації ми отримуємо такі коефіцієнти настройки регулятора:

$$Kp_{\text{опт}} = 0,3544;$$

$$KI_{\text{опт}} = 0,3221;$$

Перехідна характеристика оптимізованої САР внутрішнього контуру з отриманими коефіцієнтами налаштування ПІ-регулятора наведена на рисунку 3.3.

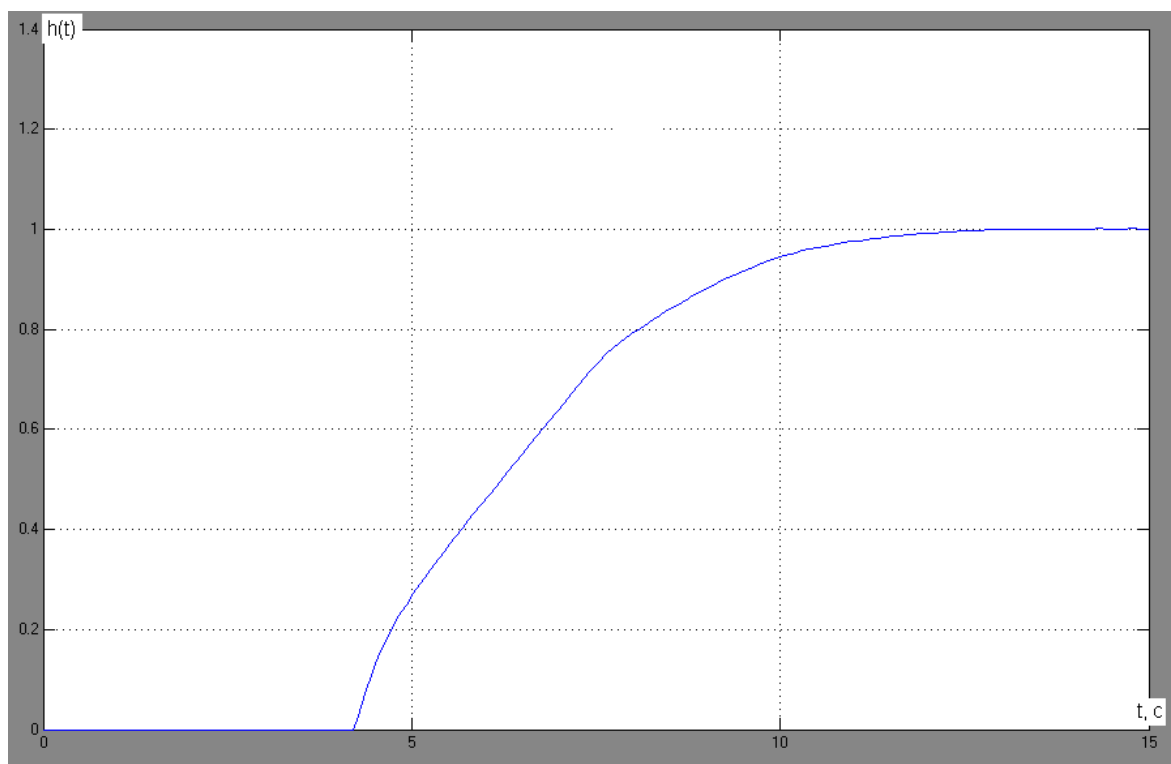


Рисунок 3.3 - Перехідна характеристика оптимізованої САР внутрішнього контуру

Знайдемо передаточні функції елементів зовнішнього контуру та їх коефіцієнти:

Передаточні функції абсорбера (OP2)

Як видно з досліджень, математичною моделлю об'єкта є рівняння динаміки матеріального балансу за цільовим компонентом. На основі цього рівняння побудуємо математичну модель об'єкта регулювання по відповідному каналу $G_a \rightarrow c_{ог}$ у такому вигляді:

$$\rho_{ог} \cdot S_{ан} \cdot (H_{ан} - h_{на}) \cdot \frac{dc_{ог}}{dt} + G_{ог} \cdot c_{ог} = G_z \cdot c_z + G_a \cdot c_a - G_{на} \cdot c_{на} \quad (3.25)$$

На основі цього рівняння об'єкт по каналу $G_a \rightarrow c_{ог}$ описується аперіодичною ланкою першого порядку:

$$W(s) = \frac{K_0}{T_0} \cdot s + 1, \quad (3.26)$$

де:

$$T_0 = \frac{\rho_{ог} \cdot S_{ан} \cdot (H_{ан} - h_{ан})}{G_{ог}}, \quad (3.27)$$

$$K_0 = \frac{G_a}{G_{ог}} \quad (3.28)$$

Об'єкт має транспортне запізнення:

$$t = \frac{\rho_a \cdot V_{труб}}{G_a}, \quad (3.29)$$

де $V_{труб}$ – об'єм трубопроводу від регулюючого органу до входу в апарат;

ρ_a – густина абсорбенту.

Отже, динаміка об'єкта по каналу регулювання в цілому описується аперіодичною ланкою першого порядку з запізненням:

$$W(s) = \frac{k_0}{T_0 \cdot s + 1} \cdot e^{-s\tau}. \quad (3.30)$$

Знаючи геометричні розміри об'єкта, значення основних параметрів, а також матеріальні та енергетичні потоки, розрахуємо ключові параметри математичної моделі об'єкта.

$$T_0 = \frac{\rho_{ог} \cdot S_{ан} (H_{ан} - h_{ан})}{G_{ог}} = \frac{95,4 \cdot 5,51 \cdot (22,46 - 1,3)}{591480} = 0,018 \text{ год} = 64,8 \text{ с} - \text{стала часу}$$

об'єкта;

$$T = \frac{\rho_a \cdot V_{труб}}{G_a} = \frac{1000 \cdot 0,000735}{0,23} = 3,2 \text{ с} - \text{величина чистого запізнення об'єкта};$$

$$k_0 = \frac{C_u}{C_{ог}} = \frac{0,23}{1613} = 0,0014 - \text{коефіцієнт передачі об'єкта.}$$

Таким чином, ми отримали передаточну функцію для абсорбера:

$$W(s) = \frac{0,0014}{64,8 \cdot s + 1} \cdot e^{-3,2s} \quad (3.31)$$

Передаточна функція давача витрати *ВП2* виглядає: $W(s) = k_d = 1$.

Для передаточної функції перетворювачів *ПП2*, *ПП3* (при $k_n = 1$) маємо: $W_n(s) = k_n = 1$.

За допомогою оптимізації в середовищі Matlab знайдемо коефіцієнти основного регулятора *R1*:

Структурна схема моделі представлена на рисунку 3.4.

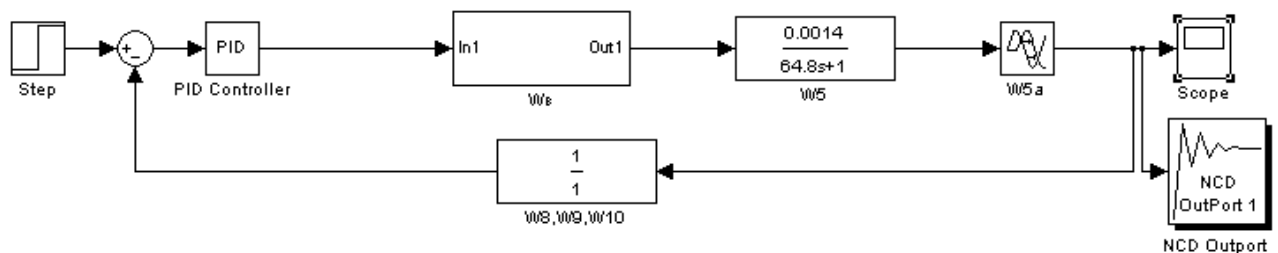


Рисунок 3.4 - Структурна схема математичної моделі каскадної САР

Після завершення процесу оптимізації отримаємо ось такі коефіцієнти налаштування регулятора:

$$K_{p_{опт}} = 6,5074; \quad K_{I_{опт}} = 4,3047;$$

$$K_{D_{опт}} = 0,9999.$$

Перехідна характеристика оптимізованої САР з отриманими коефіцієнтами налаштування ПД-регулятора наведена на рисунку 3.5. Вона характеризується такими показниками якості регулювання:

- час регулювання $T_p = 309$;
- перерегулювання: відсутнє;
- коливальність: відсутня;
- усталена похибка регулювання $\delta_{уст} \approx 0$.

Таким чином, параметри якості перехідного процесу відповідають вимогам системи автоматичного регулювання.

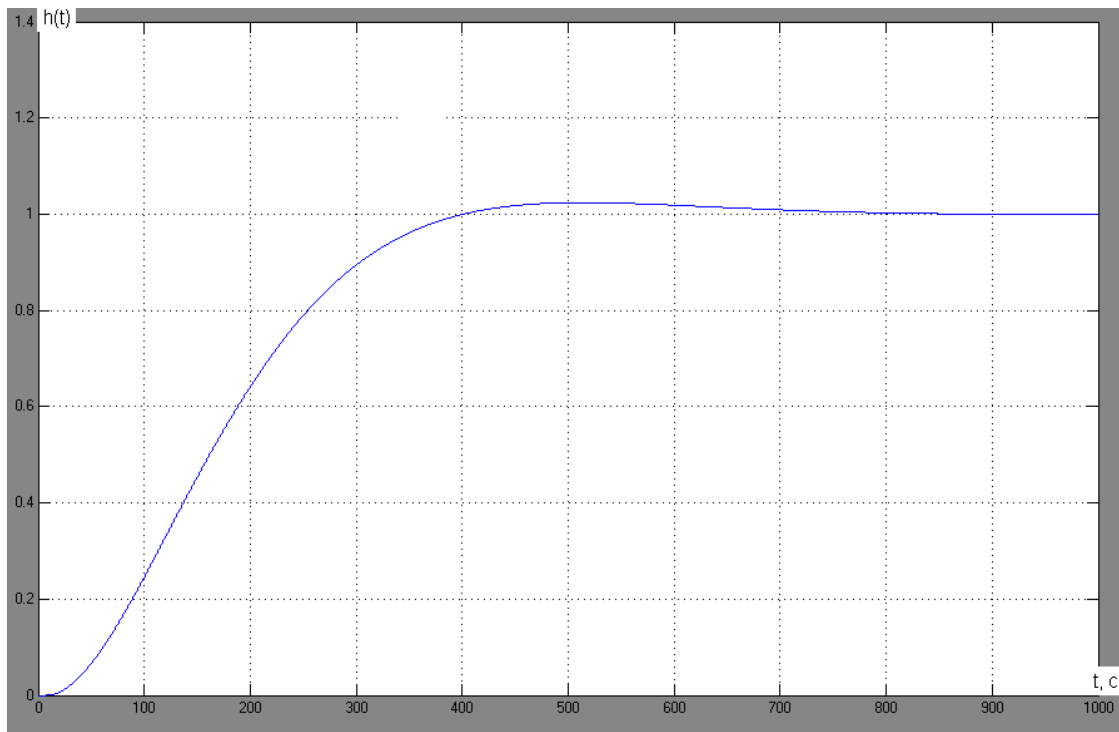


Рисунок 3.5 - Перехідна характеристика оптимізованої САР

3.2 Особливості налаштування та компонування АСУ ТП

Мікроконтролер "Лагуна-7000" виконаний у корпусі з пластмаси, яка не горить. На корпусі розташовані: роз'єм типу DB-9 та клемний з'єднувач з гвинтовою фіксацією для надійного підключення. Контролер може монтуватися як на панель, так і на стандартну DIN-рейку шириною 35 мм.

Схема монтажу МК приведена на рисунку 3.6, а схема підключення – на рисунку 3.7.

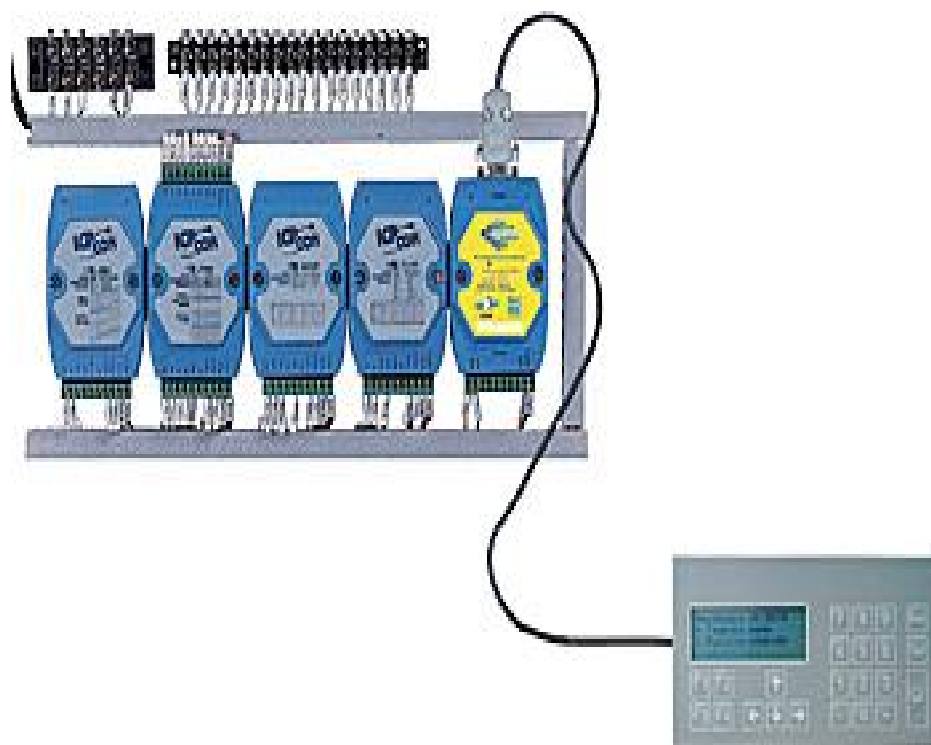


Рисунок 3.6 – Схема монтажу мікроконтролера "Лагуна-7000".

За показниками продуктивності "Лагуна-7000" не поступається комп'ютеру з процесором Intel 80286. Для розширення можливостей вводу-виводу в контролері використовуються модулі серії I-7000, які вже давно застосовуються у різних галузях промисловості. Номенклатура цих модулів налічує понад 60 типів: модулі аналогового та дискретного вводу-виводу, комунікаційні модулі, а також модулі таймерів та лічильників.

Всі модулі серії I-7000 є інтелектуальними перетворювачами, які конвертують аналогові та дискретні сигнали у цифровий код, що можуть бути оброблені комп'ютером або контролером.

Модулі дозволяють безпосередньо підключати первинні датчики, такі як термопари, термометри опору, тензодатчики, а також джерела сигналів, і керувати аналоговими та дискретними навантаженнями. Контролер "Лагуна-7000" практично повністю підтримує всі функції повноцінного МікроМРВ.

З позиції програмного середовища Trace Mode, "Лагуна-7000" виступає як керуючий контролер із 128 точками введення/виведення. До його послідовних портів можуть підключатися модулі серії I-7000 та термінал ДК-8070. Зв'язок із комп'ютером верхнього рівня здійснюється через один із СОМ-портів.

Мінімальний цикл монітора реального часу становить 55 мс. При швидкості послідовного порту 56 кбод контролер може опитувати до 20 модулів вводу-виводу за одну секунду.

"Лагуна-7000" постачається з вбудованим монітором реального часу та базовою версією інструментальної системи Trace Mode 5, яка дозволяє користувачам розробляти графічний інтерфейс для комп'ютера верхнього рівня і тестувати його роботу в режимі реального часу.

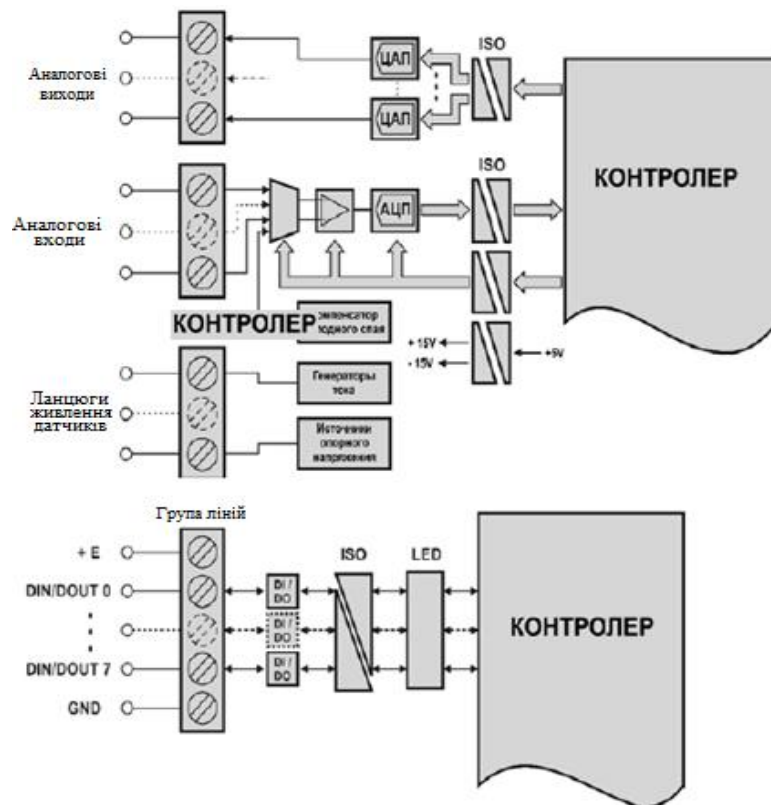


Рисунок 3.7 - Схема підключення мікроконтроллера "Лагуна I-7000"

Контролер сумісний не лише з Trace Mode, а й з будь-якими сучасними SCADA-системами, що підтримують OPC-технологію. Водночас він не призначений для застосування у випадках, коли потрібно контролювати дуже

велику кількість параметрів або використовувати складні алгоритми обробки даних.

Контролер може працювати автономно, без підключення до керуючого комп'ютера, або бути інтегрованим у більшу розподілену систему АСУ ТП. Це дозволяє легко інтегрувати його в існуючі системи автоматизації.

Спектр застосування контролера "Лагуна-7000" досить широкий і різноманітний. Він використовується в системах енергозвіту, охоронній сигналізації, керує котельними та насосними станціями, застосовується у нафтопереробній промисловості, металургії, а також у навчальних процесах.

При виборі технічної структури та засобів АСУ ТП ВАК було враховано такі вимоги: повна реалізація всіх функцій діючої системи з можливістю їх подальшого розширення, забезпечення необхідного рівня надійності, точності та швидкодії, відносно низька вартість, максимальне використання наявних технічних засобів (датчики, перетворювачі, виконавчі механізми, лінії зв'язку), які вже експлуатуються в існуючій системі [22, 23]. Проклад монтажу мікроконтролерних засобів управління приведено на рисунку 3.8.

АСУ ТП складається з кількох автономних систем контролю та керування, які працюють на п'яти стадіях та виконують схожі функції.

На нижньому рівні кожної стадії АСУ ТП організовується автоматизоване робоче місце оператора-технолога, яке оснащено двома робочими станціями. Це дозволяє незалежно контролювати та керувати технологічним процесом відповідної стадії.

Збір інформації з об'єкта та видачу керуючих сигналів здійснюють мікропроцесорні контролери.

Введення аналогової інформації в систему здійснюється від наявних датчиків і пневмоперетворювачів у вигляді струмових сигналів діапазону 0-5 мА та сигналів низького рівня 0-100 мВ.

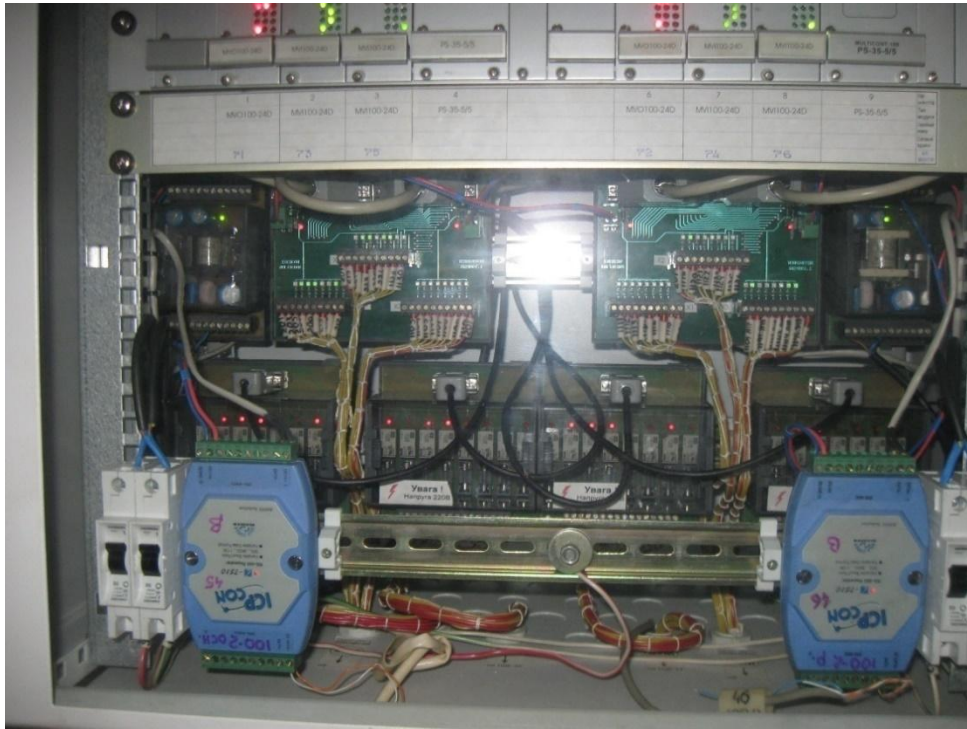


Рисунок 3.8 - Проклад монтажу на щиті мікроконтролерних засобів управління

Вивід керуючих сигналів виконується через існуючі електричні пневмоперетворювачі, підключені до відповідних пристроїв.

У розроблену систему інтегрована вся аналогова інформація, яка раніше подавалась оперативному персоналу в ЦПУ на локальних автоматичних засобах (безперервний контроль за допомогою показуючих і реєструючих приладів або контроль за викликом на ПОУ).

Обсяг дискретної інформації, що вводиться, забезпечує виконання задач контролю стану системи захисту, запірної арматури, роботи насосів і вентиляторів (система захисту зберігає функціональність на локальному рівні).

Дискретні сигнали у вигляді «сухих контактів» надходять від існуючих шаф введення та приєднань, куди вони подаються від наявних електроконтактних пристроїв і реле шаф блокувань. Склад сигналів, що надходять із шаф блокувань, наведений у принципових схемах введення дискретних сигналів.

Введення сигналів низького (НР) та середнього (СР) рівня, як контрольованих, так і регульованих, а також вивід аналогових керуючих сигналів і дискретних сигналів здійснюється за допомогою контролерів.

Підключення сигналів до контролерів виконується через пристрої зв'язку з об'єктом - кросові модулі введення-виведення інформації.

ВИСНОВКИ

У магістерській роботі виконано комплексне дослідження та розробку автоматизованої системи керування процесом утилізації нітрозних газів. Розроблена система спрямована на підвищення ефективності технологічного процесу, забезпечення стабільності параметрів та зменшення негативного впливу виробництва на довкілля.

Одним із головних результатів роботи є створення системи автоматичного регулювання, яка завдяки використанню сучасних засобів вимірювання, контролю та сигналізації забезпечує надійну роботу абсорбційної установки в заданих межах технологічних параметрів. Застосування мікропроцесорних пристроїв дало змогу підвищити точність контролю температури, тиску та концентрації газових компонентів, а також забезпечити своєчасне реагування системи на зміни навантаження або аварійні ситуації.

Завдяки впровадженню автоматизованого керування досягнуто підвищення якості кінцевого продукту, оскільки стабілізація режимних параметрів сприяє зменшенню коливань у складі рідинної фази та забезпечує оптимальні умови протікання хімічних реакцій між нітрозними газами та абсорбентом. Система дозволяє підтримувати сталі технологічні режими, що особливо важливо для отримання продукції високої чистоти та зниження кількості побічних сполук.

Розроблена математична модель процесу абсорбції нітрозних газів дала змогу дослідити вплив основних параметрів на ефективність масообміну та визначити критерії оптимального керування системою. Модель стала основою для розрахунку регуляторів, підбору їхніх налаштувань та побудови структурної схеми автоматичного керування. Виконане моделювання дозволило оцінити динаміку процесу при різних збуреннях і підібрати оптимальні характеристики регуляторів, що забезпечують стійкість і швидкодію системи.

Під час розробки системи були обрані сучасні технічні засоби автоматизації, сумісні з мікропроцесорною технікою, що дозволяє легко масштабувати систему, інтегрувати її в загальну структуру керування підприємством і забезпечити взаємодію з інформаційними мережами. Вибір апаратури здійснювався з урахуванням вимог до точності вимірювань, швидкодії, надійності та стійкості до дії агресивних середовищ.

У результаті проведеної роботи досягнуто таких основних практичних результатів:

- розроблено структуру системи автоматичного регулювання процесу утилізації нітрозних газів;
- створено функціональну схему автоматизації;
- побудовано математичну модель процесу, що відображає основні закономірності масообміну та хімічної взаємодії компонентів;
- розраховано параметри ПД-регуляторів для стабілізації технологічних параметрів.

Отримані результати свідчать про високу ефективність розробленої системи як з точки зору стабільності технологічного процесу, так і з позицій екологічної безпеки. Завдяки зниженню концентрації бідних нітрозних газів у викидах в атмосферу забезпечується зменшення шкідливого впливу на довкілля, що відповідає сучасним вимогам екологічного законодавства та концепції сталого розвитку промисловості.

Таким чином, розроблена автоматизована система регулювання процесу абсорбції нітрозних газів є ефективним технічним рішенням, яке поєднує високу точність керування, надійність, зручність експлуатації та екологічну доцільність. Вона може бути використана як основа для модернізації діючих виробництв, а також для подальших досліджень і впровадження інтелектуальних систем керування технологічними процесами хімічної промисловості.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Беднарська І. С. Аналіз сучасних методів боротьби з оксидами азоту в газових котлах // Технічні журнали (Vernadsky Journals). - 2024. - № 2. - С. 30–40.
2. Примиська С. О., Безносик Ю. О. Очищення «хвостових» газів виробництва нітратної кислоти // Східно-Європейський журнал передових технологій. - 2012. - № 1/6 (55). - С. 56–60.
3. Столяренко Г. С. Технологічні методи вилучення оксидів азоту : монографія. - Черкаси : ЧДТУ, 2021. - 115 с.
4. Joshi J. B., Mahajani V. V., Juvekar V. A. Invited review – absorption of NO_x gases // Chemical Engineering Communications. - 1985. - Vol. 33, No. 1–4. - P. 1–92.
5. Counce R. M. Literature review of nitrogen oxide absorption into water and dilute nitric acid : Technical report ORNL/TM-5921. - Oak Ridge National Laboratory, 1977. - 98 p.
6. Zhu Z., Xu B. Purification technologies for NO_x removal from flue gas: A review // Separations. - 2022. - Vol. 10, No. 307. - P. 1–25.
7. Liu B., Wang X., Tian J., et al. Absorption and oxidation of nitrogen oxide in ionic liquids // Molecules. - 2021. - Vol. 26. - P. 6953-6969.
8. High-efficiency absorption of low NO_x concentration in metallurgical flue gas using a 3D-printed large-flow microstructured reactor // Arabian Journal of Chemistry. - 2022. - Article No. 103711. - 12 p.
9. Zheng C., et al. Nitrogen oxide absorption and nitrite/nitrate formation in limestone slurry for WFGD system // Chemical Engineering Research. - 2014. - P. 1–10.
10. Бойко І. П. Автоматизація технологічних процесів: підручник. Київ: Вища школа, 2018. - 412 с.
11. Гук О.Б., Сінчук О.М. Основи автоматизації виробничих процесів. Львів: Новий Світ–2000, 2017. - 356 с.

12. Дяченко Ф. Д. Технологічні процеси та їх автоматизація в хімічній промисловості. Дніпро: НМетАУ, 2019. - 284 с.
13. Волошин В. І. Засоби автоматизації та контролю: довідник. Київ: Техніка, 2019. - 520 с.
14. Храбатин Р. Й. Промислові датчики та засоби контролю: навчальний посібник. Львів: Видавництво ЛНУ, 2018. - 312 с.
15. Борисенко Л. П., Матвієнко В. І. Промислові контролери: структура, програмування та застосування. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. - 290 с.
16. Носенко Ю. М. Частотні перетворювачі та електропривод змінного струму: навч. посіб. Харків: ХНЕУ, 2017. - 244 с.
17. Кириченко В. В. Програмовані логічні контролери Siemens: принципи роботи та програмування. Київ: КТПУ, 2019. - 260 с.
18. Линник О. В. Програмно-апаратні засоби автоматизації на базі ПЛК. Львів: ЛНТУ, 2021. - 190 с.
19. Мазяк З., Карпінська І., Тазалова Н. Математична модель процесу абсорбції газів краплинами рідини // Вісник Тернопільського державного технічного університету. - 1998. - Т. 3, № 3. - С. 120–125.
20. Біляєва В. Використання математичних моделей для оцінювання рівня теплового та хімічного забруднення робочих зон // Український журнал будівництва та архітектури. - 2023. - № 12. - С. 40–46.
21. Олійник А. П., Мороз А. А. Комплексна математична модель забруднення ґрунтів внаслідок реалізації технологічних процесів у нафтогазовій промисловості // Вісник Вінницького політехнічного інституту. - 2023. - № 4. - С. 51–59.
22. Яковлєв О. І., Гурський, В. С. SCADA-системи в промисловій автоматизації. Дніпро: ПДАБА, 2018. 328 с.
23. Тарасенко С. М. Промислові мережі та протоколи автоматизації: навчальний посібник. Харків: ХПІ, 2020. 215 с.