

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**Сумський державний університет**  
Факультет електроніки та інформаційних технологій  
Кафедра комп'ютеризованих систем управління

«До захисту допущено»  
Завідувач кафедри КСУ  
\_\_\_\_\_ Петро ЛЕОНТЬЄВ  
\_\_\_\_\_ 2024 р.

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**  
на здобуття освітнього ступеня магістр

зі спеціальності  
174 – Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка  
освітньо-професійної програми  
«Комп'ютеризовані системи управління та робототехніка»  
на тему: «Забезпечення енергоефективного управління процесом осушення  
природного газу»

Здобувача групи СУ.м-31

Руденко Денис Ігорович

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Денис РУДЕНКО

Керівник \_\_\_\_\_  
Завідувач кафедри КСУ, Петро ЛЕОНТЬЄВ  
(посада, науковий ступінь, вчене звання, Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Консультант \_\_\_\_\_  
(посада, науковий ступінь, вчене звання, Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

\_\_\_\_\_  
(підпис)

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
Кафедра комп'ютеризованих систем управління

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри КСУ

\_\_\_\_\_ Петро ЛЕОНТЬЄВ  
\_\_\_\_\_ 2024 р.

**ЗАВДАННЯ**

на кваліфікаційну роботу магістра здобувачу вищої освіти

Руденко Денис Ігорович

(Прізвище, ім'я, по-батькові повністю)

1. Тема кваліфікаційної роботи: «Забезпечення енергоефективного управління процесом осушення природного газу»  
затверджена наказом ректора СумДУ № № 1090 - VI від "24" жовтня 2024 р.
2. Термін здачі студентом закінченої роботи: 30 листопада 2024 р.
3. Вихідні дані до кваліфікаційної роботи:  
звіт з переддипломної практики, наукові публікації, технічна документація, перелік літературних джерел.
4. Зміст кваліфікаційної роботи (питання, що підлягають розробленню):  
принцип роботи та протікання технологічного процесу, опис окремі канали та контури керування УОГ, модель системи керування, порівняння регуляторів.
5. Перелік графічних матеріалів:  
30 рисунків, 2 таблиць, 2 схем.

## 6. Календарний план виконання роботи

Номер етапу	Зміст етапу виконання роботи	Термін виконання
1	Аналіз завдання. Огляд літератури.	22.10.2024 – 27.10.2024
2	Описати принцип роботи та протікання технологічного процесу. Привести технологічну схему.	28.10.2024 – 03.11.2024
3	Описати окремі канали та контури керування УОГ. Привести схему автоматизації.	04.11.2024 – 10.11.2024
4	Розробити модель системи керування	11.11.2024 – 17.11.2024
5	Порівняти два види регуляторів	18.11.2024 – 24.11.2024
6	Оформлення дипломного проекту та супровідної документації.	25.11.2024 – 30.11.2024

7. Дата видачі завдання " 22 " жовтня 2024 р.

Керівник проекту:

Завідувач кафедри КСУ  
(науковий ступінь, вчене звання, посада)

\_\_\_\_\_ (підпис)

Петро ЛЕОНТЬЄВ  
(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Здобувач:

студент гр. СУ.м-31  
(шифр групи)

\_\_\_\_\_ (підпис)

Денис РУДЕНКО  
(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

## АНОТАЦІЯ

Руденко Денис Ігорович. Забезпечення енергоефективного управління процесом осушення природного газу. Дипломна робота. Сумський державний університет. Суми, 2024 р.

Робота містить: 64 сторінок, 30 рисунків, 2 таблиці, 2 схеми. При виконанні роботи було використано 16 літературних джерел.

Об'єктом дослідження виступає установка осушення природного газу за допомогою гліколю, предметом дослідження являється – створення системи забезпечення енергоефективного управління процесом осушення природного газу та порівняння регуляторів.

Було розглянуто принцип роботи та протікання технологічного процесу, описані окремі канали та контури керування УОГ, побудована модель системи керування, проведено порівняння регуляторів.

Ключові слова: абсорбція, алгоритм, осушення, природний газ, система керування, регулятор.

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ І УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ .....	2
ВСТУП.....	3
РОЗДІЛ 1 КОНСТРУКТИВНО – ТЕХНОЛОГІЧНИЙ АНАЛІЗ ОБ’ЄКТУ КЕРУВАННЯ .....	5
1.1 Призначення об’єкту керування .....	5
1.2 Опис технологічного процесу.....	7
1.3 Переваги та недоліки технологій осушення газу .....	9
РОЗДІЛ 2 ОПИС КОНТУРІВ КОНТРОЛЮ ТА УПРАВЛІННЯ.....	12
2.1 Завдання та вимоги до системи керування .....	12
2.2 Огляд регуляторів для управління технологічним процесом. ....	14
2.3 Контур керування концентрацією.....	18
2.4 Контур керування витрати газу.....	19
2.5 Контур контролю за технологічним процесом.....	19
РОЗДІЛ 3 МОДЕЛЬ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ .....	21
3.1 Дослідження контуру концентрації.....	21
3.2 Дослідження контуру витрати .....	32
3.3 Налаштування Fuzzy-регулятора .....	41
РОЗДІЛ 4 СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ .....	50
4.1 Алгоритм роботи .....	50
4.2 Scada система.....	53
ВИСНОВКИ.....	55
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ДЖЕРЕЛ .....	56

## ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ І УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ДЕГ – діетиленгліколь;

ПЛК – програмований логічний контролер;

ВП – виконавчий пристрій;

САУіР – автоматизована система управління і регулювання;

УОГ – установка осушення газу.

## ВСТУП

Ефективне та енергоощадне управління процесом осушення природного газу є актуальним у контексті зростаючих вимог до якості енергоресурсів і необхідності раціонального використання природних ресурсів. В умовах сучасної економіки попит на природний газ продовжує зростати, оскільки він є основним енергетичним джерелом для багатьох галузей промисловості, включаючи електроенергетику, хімічну промисловість і транспорт. Разом з тим, у побутовій сфері природний газ забезпечує опалення, гаряче водопостачання і приготування їжі для мільйонів домогосподарств. Сучасні вимоги до якості газу для використання у промислових та побутових системах висувають особливі стандарти до рівня його вологості. Високий вміст вологи може призвести до корозії обладнання, погіршення теплотехнічних характеристик газу та навіть до аварійних ситуацій.

На сьогоднішній день у галузі осушення природного газу існує кілька методів зниження вологи, серед яких найбільш популярним є абсорбційний метод, що застосовує діетиленгліколь як абсорбента [1]. Цей метод дозволяє забезпечити необхідний рівень вологості газу перед його подальшою обробкою або транспортуванням. Однак, впровадження технологій, що здатні забезпечити стабільну роботу абсорбційної колони за умов змінних навантажень і параметрів вхідного потоку, залишається складним завданням.

Проблема полягає у забезпеченні оптимального рівня енергоспоживання при досягненні необхідних параметрів осушення газу, що вимагає енергоефективного підходу до управління процесом. Коливання швидкості потоку природного газу та концентрації вологи на вході зумовлюють необхідність у впровадженні систем автоматичного управління, які здатні вчасно реагувати на зміну умов і забезпечувати стабільність процесу осушення. Окрім цього, важливо мінімізувати енергетичні витрати, пов'язані з роботою системи, задля зниження експлуатаційних витрат.

Метою цієї роботи є розробка енергоефективного управління процесом осушення природного газу з використанням методів автоматизації та контролю.

Такий підхід дозволить зменшити час перехідних процесів, знизити енергоспоживання установки і, відповідно, покращити загальну продуктивність. Впровадження цих рішень не лише сприятиме економічній вигоді від використання ресурсу, але й забезпечить додаткову безпеку та надійність технологічного процесу. Очікуваним результатом є отримання стабільних показників якості газу на виході з установки, що позитивно вплине на економічну ефективність та екологічні аспекти функціонування промислових підприємств.



# РОЗДІЛ 1 КОНСТРУКТИВНО – ТЕХНОЛОГІЧНИЙ АНАЛІЗ ОБ’ЄКТУ КЕРУВАННЯ

## 1.1 Призначення об’єкту керування

Абсорбційна колона, що використовується для осушення природного газу є одним із ключовим об’єктом керування в системі підготовки газу до транспортування та подальшого використання. Її основне призначення полягає у видаленні водяної пари з газу, що є необхідним для запобігання утворенню гідратів, зниження корозійного впливу на трубопроводи та обладнання, а також для підвищення якості природного газу як товарного продукту.

У промисловості, особливо в нафтогазовій, енергетичній та хімічній галузях, природний газ є важливим енергетичним ресурсом. В процесі видобутку і підготовки природний газ часто містить значну кількість водяної пари, яка може призвести до утворення гідратів — кристалічних структур, що утворюються в результаті взаємодії води і газу при низьких температурах і високих тисках. Гідрати можуть блокувати трубопроводи, компресорні станції та інше обладнання, що загрожує безпеці експлуатації та може призвести до значних економічних втрат через вимушені зупинки виробничих процесів і ремонти. Абсорбційна колона є ефективним засобом для усунення цієї проблеми, забезпечуючи осушення газу до рівня при якому утворення гідратів неможливе [2].

Використання абсорбційної колони в процесі осушення газу дозволяє також значно знизити корозійний вплив вологи на металеві елементи трубопроводів та обладнання. Волога в газі, особливо в поєднанні з певними компонентами, такими як сірководень або діоксид вуглецю, може утворювати агресивні середовища, що викликають інтенсивну корозію. Це, в свою чергу, призводить до зменшення терміну служби обладнання, підвищення витрат на його технічне обслуговування та ремонт, а також до підвищеного ризику аварій. Осушення газу в абсорбційній колоні дозволяє уникнути цих негативних наслідків, забезпечуючи стабільну і безпечну експлуатацію всієї системи.

Економічні показники підприємства, що використовує абсорбційну колону для осушення газу, також значно покращуються завдяки зниженню витрат на обслуговування і ремонт обладнання, а також мінімізації простоїв через аварійні ситуації. Осушений природний газ має вищу якість, що дозволяє продавати його за більш вигідними умовами на ринку. Крім того, зниження корозійних процесів у трубопроводах і обладнанні знижує потребу в дорогих антикорозійних заходах, що також позитивно впливає на економічну ефективність підприємства [3].

Сучасні абсорбційні колони оснащені комп'ютеризованими системами управління, що дозволяють автоматизувати процес осушення газу і досягти високого рівня енергоефективності. Завдяки цьому, оператори можуть в режимі реального часу контролювати і регулювати параметри процесу, такі як температура, тиск, концентрація абсорбента та інші, що забезпечує оптимальні умови для максимального видалення вологи з газу при мінімальних витратах енергії та ресурсів. Це дозволяє не тільки знизити операційні витрати, але й підвищити надійність і стабільність роботи установки.

Абсорбційна колона є важливим елементом у забезпеченні екологічної безпеки підприємства. Процес осушення газу, що здійснюється за допомогою ДЕГ не створює шкідливих викидів або відходів, що відповідає сучасним вимогам екологічного законодавства. Крім того, багаторазове використання діетиленгліколю в циклі осушення знижує обсяг відходів і витратних матеріалів, що сприяє зменшенню негативного впливу на навколишнє середовище.

Завдяки широкому застосуванню абсорбційних колон у промисловості підприємства мають можливість підвищити ефективність своїх виробничих процесів, знизити витрати на енергоресурси та забезпечити стабільну роботу обладнання навіть у складних умовах експлуатації. Комп'ютеризовані системи управління, що використовуються для контролю процесу осушення дозволяють не лише оптимізувати параметри роботи колони, але й автоматично адаптуватися до змін параметрів перебігу технологічного процесу. Це забезпечує гнучкість і надійність процесу осушення, що є важливим для підприємств, які працюють в умовах змінних технологічних режимів або потребують високої якості кінцевого продукту.

Таким чином, абсорбційна колона для осушення природного газу є невід'ємною частиною технологічного процесу підготовки газу до транспортування та використання. Її основне призначення полягає у забезпеченні безпеки і надійності роботи трубопровідних систем, зниженні корозійного впливу на обладнання, а також у підвищенні якості природного газу.

## 1.2 Опис технологічного процесу

Абсорбція — це процес поглинання одного або декількох компонентів газової суміші рідиною, що виступає в ролі абсорбенту. У контексті осушення природного газу абсорбція використовується для видалення водяної пари з газової фази шляхом її поглинання рідким абсорбентом — ДЕГ. Процес абсорбції є фізико-хімічним явищем, при якому молекули водяної пари проникають у рідку фазу, взаємодіючи з молекулами ДЕГ [4]. Цей метод є одним із найефективніших і найпоширеніших у промисловості для осушення природного газу, оскільки забезпечує високий рівень видалення вологи та стабільність процесу навіть за умов змінних технологічних параметрів.

В основі процесу абсорбції лежить явище розчинності водяної пари в абсорбенті. Діетиленгліколь має високу гігроскопічність, що дозволяє ефективно поглинати вологу з газової суміші. Під час взаємодії водяної пари з ДЕГ відбувається утворення насиченого розчину, який надалі піддається регенерації для повторного використання. Важливою характеристикою процесу є залежність ефективності абсорбції від таких параметрів, як температура, тиск, концентрація абсорбенту, а також тривалість контакту між газовою та рідкою фазами.

Абсорбційна колона, що використовується при осушенні природного газу, як правило, є вертикальним циліндричним апаратом, що складається з кількох зон або ступенів. У кожній з цих зон відбувається часткове осушення газу, що сприяє досягненню високого рівня видалення вологи на виході з колони. Для підвищення ефективності процесу використовуються різні конструктивні елементи, такі як тарілки або насадки, які забезпечують максимальну поверхню контакту між газовою і рідкою фазами [5].

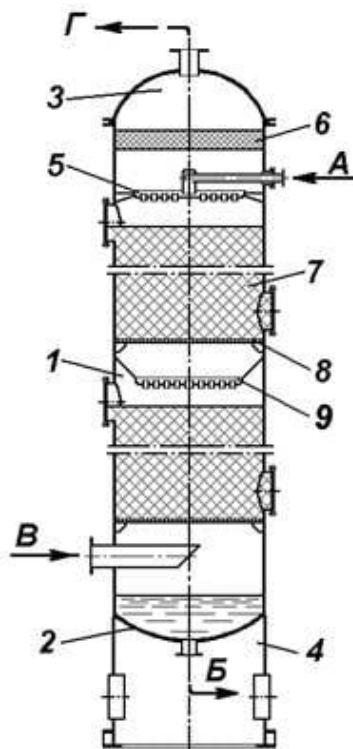


Рисунок 1.1 – Насадковий абсорбер: Потоки: А - введення абсорбенту; Б - відведення абсорбенту; В - введення сирого газу; Г - відведення очищеного (сухого) газу; 1 - корпус; 2 - днище; 3 - кришка; 4 - опора; 5 - тарілка розподільна; 6 - краплеуловлювач; 7 - шар насадки; 8 - ґрати опорні; 9 - тарілка розподільна.

Осушення природного газу в абсорбційній колоні є важливим технологічним процесом, який забезпечує видалення вологи з газу для підвищення його якості та запобігання утворенню гідратів у трубопроводах і обладнанні. Вхідна газова суміш надходить до абсорбційної колони при температурі 5-10°C і витраті 18500 м<sup>3</sup>/год. На вході тиск газу становить 4,5 МПа. Після входу в колону газ піднімається вгору, де відбувається процес абсорбції вологи за допомогою абсорбенту, зокрема діетиленгліколь. Абсорбент подається в колону зверху вниз при температурі 10-15°C і витраті 100 м<sup>3</sup>/год. При проходженні газу через колону відбувається контакт газової фази з рідким абсорбентом, що дозволяє діетиленгліколю поглинати вологу з газу. На виході з колони отриманий насичений абсорбент відводиться для регенерації або заміни. При цьому рівень рідини в колоні підтримується на рівні 1/6 висоти колони, що забезпечує ефективний масообмін.

Після абсорбційної колони осушений газ відводиться з установки при температурі 10-15°C і витраті 18500 м<sup>3</sup>/год. Концентрація залишкової вологи в обробленому газі становить 0,01% Цей показник відповідає вимогам стандартів якості природного газу, що забезпечує безпечне транспортування та використання газу в подальших процесах. Оброблений газ спрямовується до системи відведення або на наступні стадії підготовки, залежно від вимог технологічного процесу.

Схема інформаційно - матеріальних потоків осушення газу в абсорбційній колоні, що показана в додатку А, містить значення основних параметрів, що забезпечують оптимальні умови для ефективного масообміну між газом і абсорбентом. Важливими параметрами є температура, тиск, витрата газу та абсорбенту, а також рівень рідини в колоні. Технологічний процес контролюється за допомогою датчиків і регуляторів, які забезпечують підтримку заданих параметрів і стабільну роботу установки. Контроль за температурою та витратою абсорбенту дозволяє забезпечити максимальну ефективність процесу осушення газу та мінімізувати витрати абсорбенту.

### 1.3 Переваги та недоліки технологій осушення газу

Існує кілька основних методів осушення газу, серед яких найпоширенішими є абсорбція, адсорбція та охолодження газового потоку. Кожен з цих методів має свої переваги та недоліки, які визначають його застосування в різних умовах.

Абсорбція — це процес, у якому газова суміш контактує з рідким абсорбентом, що здатний розчиняти певні компоненти газу, зокрема вологу.

Однією з ключових переваг абсорбції є її висока ефективність при осушенні газу. Цей метод дозволяє досягти дуже низького рівня залишкової вологості, що є важливим для уникнення утворення гідратів у трубопроводах. Абсорбція також є економічно вигідним методом, оскільки абсорбенти, такі як ДЕГ або ТЕГ, можуть бути регенеровані та повторно використані, що зменшує експлуатаційні витрати. Крім того, абсорбційні колони можуть бути адаптовані для роботи з великими обсягами газу, що робить цей метод особливо придатним для великих промислових установок [6].

Недоліком методу абсорбції є необхідність використання великої кількості рідин-абсорбентів та відповідного обладнання для їх регенерації. Процес регенерації вимагає додаткових енергетичних витрат, що може знижувати загальну економічну ефективність у випадку невеликих обсягів газу. Крім того, абсорбенти можуть мати корозійний вплив на обладнання, що потребує спеціальних матеріалів для їх виготовлення .

Адсорбція передбачає осушення газу за допомогою твердих адсорбентів, таких як цеоліти або силікагель. Ці матеріали мають пористу структуру, яка забезпечує велику площу поверхні для поглинання молекул води з газу. Газ пропускається через шар адсорбенту, де волога затримується на поверхні твердого матеріалу, і в результаті на виході отримується осушений газ [7].

Перевагами адсорбційного методу є його висока ефективність у видаленні вологи, що дозволяє досягти дуже низького рівня залишкової вологості. Крім того, адсорбенти можуть працювати при низьких температурах, що робить цей метод придатним для осушення газу в холодних кліматичних умовах. Адсорбція також не потребує значних обсягів рідин, що знижує ризик корозії та спрощує експлуатацію.

Проте, метод адсорбції має і свої недоліки. Основним з них є те, що адсорбенти мають обмежений термін служби і потребують регулярної заміни або регенерації. Процес регенерації адсорбентів зазвичай вимагає значних енергетичних витрат, особливо якщо він виконується шляхом нагрівання. Крім того, ефективність адсорбції може знижуватися при високих температурах або в умовах, де газ містить велику кількість інших домішок, що конкурують за поглинання з водою.

Метод охолодження газового потоку ґрунтується на зниженні температури газу до точки роси, при якій волога конденсується і видаляється з потоку. Охолоджений газ пропускається через теплообмінник, де волога випадає у вигляді конденсату, який потім відокремлюється від газу. Цей метод є відносно простим у реалізації та не потребує використання хімічних речовин [8].

Перевагою методу охолодження є його простота та низька вартість обладнання, що використовується. Він також є ефективним при обробці великих

обсягів газу і може застосовуватися як попередній етап осушення перед використанням більш точних методів, таких як абсорбція або адсорбція.

Однак, охолодження газу має значні обмеження. Цей метод не завжди дозволяє досягти дуже низьких рівнів вологості, необхідних для запобігання утворенню гідратів у трубопроводах. Крім того, охолодження може вимагати значних енергетичних витрат, особливо в теплих кліматичних умовах, де температура навколишнього середовища висока. Також виникають питання, пов'язані з утилізацією конденсату, який може містити домішки і потребує додаткової обробки.

Серед трьох розглянутих методів осушення природного газу, метод абсорбції виділяється своєю високою ефективністю, здатністю працювати з великими обсягами газу та економічною доцільністю при правильній організації процесу регенерації абсорбенту. Він дозволяє досягти необхідних рівнів осушення газу, знижуючи вологість до рівня, що запобігає утворенню гідратів і корозії. У порівнянні з адсорбцією, абсорбція має перевагу в тривалому використанні абсорбенту та меншій залежності від зовнішніх умов, таких як температура газу. У порівнянні з охолодженням, абсорбція є більш універсальним методом, здатним забезпечити стабільно високі показники осушення навіть при високих початкових рівнях вологості газу.

## РОЗДІЛ 2 ОПИС КОНТУРІВ КОНТРОЛЮ ТА УПРАВЛІННЯ

### 2.1 Завдання та вимоги до системи керування

У процесі дослідження осушення природного газу методом абсорбції з'ясовано, що зміни швидкості вхідного потоку газу спричинені коливаннями, які виникають у верхніх рівнях системи, а вміст вологи природно варіюється в залежності від умов у пласті. Для забезпечення енергоефективного управління основними змінними, які слід контролювати, є концентрація і швидкість вхідного газу. Крім того, концентрація вологи у газі на виході з абсорбційної колони залежить від кількості абсорбенту, що подається, який також підлягає контролю за допомогою ПЛК.

Метою стратегії енергоефективного управління в процесі осушення газу є мінімізація небажаних наслідків під час роботи установки та забезпечення стабільної продуктивності. Система автоматичного керування включає ключові елементи контролю, зокрема регулятор потоку осушеного газу на виході з верхньої частини абсорбера та регулятор подачі абсорбенту. Завдання регулятора полягає в обчисленні значень параметрів і передаванні керуючих сигналів до виконавчих механізмів, розташованих на лініях потоку газу і абсорбенту, щоб адаптувати роботу установки до змін у концентрації та швидкості вхідного потоку газу.

Результатом налаштування регуляторів є зменшення тривалості перехідних процесів, що позитивно впливає на енергоефективність використання ресурсів і підвищує продуктивність технологічного процесу.

Технічні та програмні засоби системи забезпечують безперервний режим функціонування САУіР з періодичними оглядами та регламентними роботами в період зупинок, ремонту чи регламентних робіт технологічного обладнання.

Час повного циклу роботи підсистеми логічного управління та захисту – 40мс. Середній час напрацювання комплексу на відмову з різних видів виконуваних функцій становить 8 000 годин. Встановлений ресурс комплексу становить 7 років.



Діапазон робочих температур щитів САУіР та силових від 5 до 35 °С.

Швидкодія комплексу каналами перетворювача наступні:

- вимірювання витрати – не більше 0.2 с.;
- вимірювання тиску (перепад тиску) – не більше 0.2 с.;
- вимірювання концентрації – не більше 0.2 с.;
- час перехідного процесу – не більше 4 с.;

Основні функції системи автоматичного керування осушенням природного газу включають:

1. Моніторинг параметрів: система здійснює постійний моніторинг важливих параметрів, таких як тиск, температура, вологість газу та рівні робочих речовин, для забезпечення стабільності та ефективності процесу осушення.

2. Автоматичне регулювання: на основі отриманих даних система приймає рішення щодо необхідних корекцій параметрів, таких як рівні робочих речовин, температура та тиск, для забезпечення оптимальних умов осушення газу за допомогою ВМ.

3. Забезпечення безпеки: система виконує контроль за рівнями безпеки та запобігає виникненню небезпечних ситуацій шляхом автоматичного вимкнення або регулювання параметрів.

4. Запис та звітність: система забезпечує запис та зберігання даних про процеси осушення для подальшого аналізу та створення звітів про ефективність та якість роботи системи.

Система автоматичного керування повинна відповідати таким вимогам до технологічності: час налаштування не перевищує 2 хвилин, швидкість реакції на зміни параметрів - до 0.5 хвилини, частота аварій - не більше 1 разу на 6 місяць, точність контролю не гірше  $\pm 2\%$ , можливість моніторингу в реальному часі, гнучкість налаштування з кроком не більше 0.1%, та система зберігання та аналізу даних для виявлення тенденцій та попередження проблем.

## 2.2 Огляд регуляторів для управління технологічним процесом.

Регулятори є невід'ємною частиною систем автоматичного керування технологічними процесами, забезпечуючи підтримку необхідних параметрів на заданому рівні. Їх основна функція полягає в автоматичному коригуванні відхилень контрольованих величин від заданих значень. Регулятори отримують сигнал з датчиків, порівнюють із заданою величиною та генерують відповідний керуючий вплив на виконавчі механізми. Це дозволяє зменшити вплив зовнішніх та внутрішніх збурень на процес, забезпечити стабільність його перебігу та покращити показник, такий як енергоефективність. У технологічних процесах, пов'язаних з осушенням або очищенням природного газу, регулятори використовуються для забезпечення заданого значення концентрації, підтримання стабільної витрати. В сучасних системах автоматизації найчастіше застосовуються PID-регулятори та Fuzzy-регулятори, які дозволяють забезпечити оптимальну реакцію на зміну параметрів та мінімізувати вплив збурень.

ПІД-регулятор є одним із найпоширеніших інструментів автоматичного керування в системах управління технологічним процесом. Він використовується для забезпечення точного і стабільного керування різними процесами, де потрібно контролювати температуру, тиск, рівень або витрату. Основою роботи ПІД-регулятора є поєднання трьох складових: пропорційної, яка миттєво реагує на відхилення процесу від заданого значення; інтегральної, яка компенсує накопичені відхилення за тривалий час; та диференційної, яка передбачає зміни, базуючись на швидкості змін сигналу.

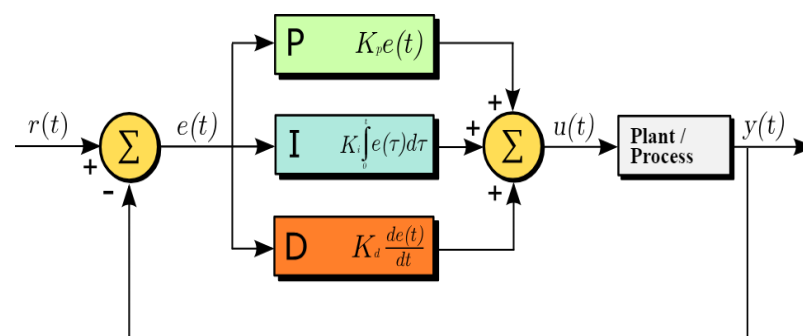


Рисунок 2.1 – Структурна схема з ПІД-регулятором

Основними перевагами ПІД-регулятора є простота конструкції, універсальність і здатність працювати в різних умовах. Важливою перевагою також є можливість забезпечення високої точності керування за мінімального відхилення системи. Однак ПІД-регулятори мають і певні недоліки. Наприклад, для динамічних систем з високою інерційністю налаштування може бути складним і вимагати значного часу. До того ж диференційна складова може підсилювати шум у вимірювальному сигналі, що може негативно впливати на стабільність регулятора.

Особливістю роботи ПІД-регулятора є залежність його ефективності від правильного налаштування трьох параметрів: коефіцієнта пропорційності  $K_p$ , інтегральної складової  $T_i$  та диференційної складової  $T_d$ . Оптимальні параметри залежать від характеристик об'єкта керування і можуть суттєво впливати на стабільність та швидкість реакції системи [9].

Способи налаштування ПІД-регулятора поділяються на емпіричні, аналітичні та автоматичні. Емпіричні методи, як метод Зіглера-Ніколса, базуються на практичному підборі параметрів шляхом тестування системи, який ми будемо використовувати в нашій роботі. Аналітичні методи включають розрахунок параметрів на основі математичних моделей об'єкта керування. Сучасні автоматичні способи налаштування використовують алгоритми оптимізації, що дає змогу забезпечити швидке і точне налаштування навіть для складних систем.

Fuzzy-регулятор є типом регулятора, що базується на методах нечіткої логіки. На відміну від класичних регуляторів, які працюють із точними математичними моделями, Fuzzy-регулятор оперує лінгвістичними змінними, що визначаються правилами типу "якщо-то". Це дозволяє регулятору ефективно керувати системами, для яких складно або неможливо створити точну математичну модель.

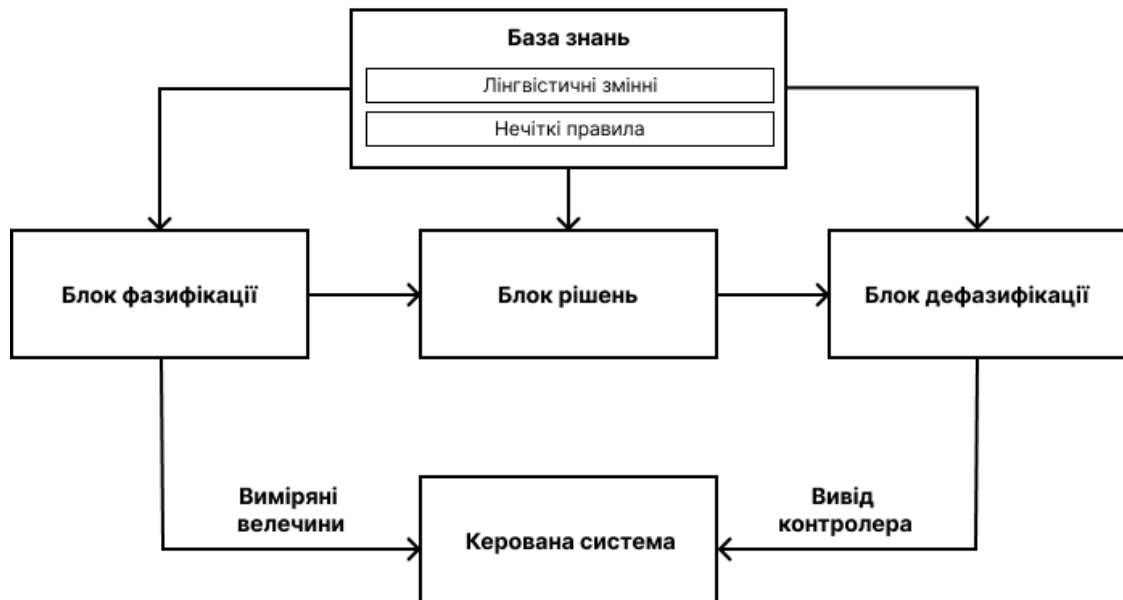


Рисунок 2.2 – Структурна схема Fuzzy-регулятора

Основними перевагами Fuzzy-регулятора є його адаптивність і гнучкість. Він може ефективно керувати складними системами, які важко описати традиційними методами. Крім того, Fuzzy-регулятори часто є більш стійкими до шумів і коливань у системі. Водночас одним із недоліків є складність налаштування правил і функцій належності, особливо для багатовимірних систем. Також точність роботи регулятора залежить від його налаштування та правильного створення самих правил для регулятора, що дасть можливість ефективній роботі.

Особливістю Fuzzy-регулятора є використання бази правил і нечітких множин, що визначають поведінку системи. База правил створюється на основі знань про керований процес, а нечіткі функції належності дозволяють описати зміни системи через лінгвістичні змінні, такі як "низький", "середній" або "високий". Fuzzy-регулятор часто поєднується з класичними підходами для підвищення ефективності керування.

Способи налаштування Fuzzy-регулятора включають емпіричний, експертний і автоматизований підходи. Емпіричний спосіб базується на експериментах із системою для визначення оптимальних правил і функцій належності. Експертний підхід використовує знання у певній галузі для створення бази правил. Автоматизовані методи налаштування, зокрема з використанням

алгоритмів машинного навчання або генетичних алгоритмів, дозволяють оптимізувати параметри регулятора автоматично.

Загалом Fuzzy-регулятори є ефективним інструментом для вирішення завдань керування у складних системах. Їхня здатність адаптуватися до змінних умов і гнучко реагувати на складні ситуації робить їх ефективним вибором для багатьох застосувань.

У технологічних процесах автоматичного керування важливо забезпечити ефективність регулювання, стабільність і точність управління параметрами. Вибір оптимального регулятора залежить від характеристик об'єкта керування, рівня складності системи, наявності збурень та необхідності адаптації до змінних умов. Аналізуючи особливості ПД і Fuzzy-регуляторів, можна припустити, що кожен із них має свої переваги в певних ситуаціях.

ПД-регулятор забезпечує точність і стабільність завдяки простій конструкції та зрозумілому принципу роботи. Завдяки інтегральній та диференційній складовим, ПД-регулятор здатний мінімізувати перехідний процес і забезпечити прийнятну точність. Однак його ефективність значною мірою залежить від правильного налаштування параметрів  $K_p$ ,  $T_i$  і  $T_d$ . У динамічних системах з високою інерційністю або в умовах змінних характеристик процесу налаштування ПД-регулятора може бути складним, що негативно впливає на час перехідного процесу та може призводити до перегулювань та тривалий час перехідного процесу.

Fuzzy-регулятор, на відміну від ПД, має значно більшу адаптивність і гнучкість у налаштуванні. Використання лінгвістичних змінних і нечіткої логіки дозволяє йому ефективно керувати системами. Це особливо важливо в умовах, коли об'єкт піддається постійним змінам. Завдяки здатності до адаптації, Fuzzy-регулятор забезпечує кращий час перехідного процесу та мінімальне перегулювання, навіть за наявності значних збурень чи шумів у системі [10].

Таким чином, можна припустити, що Fuzzy-регулятор матиме кращі показники керування, такі як менший час перехідного процесу та менший рівень перегулювань. Його гнучкі налаштування і можливість адаптуватися до змінних

умов дозволяють ефективно керувати навіть складними системами, де характеристики процесу.

### 2.3 Контур керування концентрацією

У процесі осушення природного газу методом абсорбції за допомогою діетиленгліколю контур керування концентрацією відіграє ключову роль у забезпеченні задачі енергоефективного керування. Також цей контур забезпечує підтримку стабільної концентрації вологості газу на виході з установки. Основна задача цього контуру – підтримувати оптимальний рівень осушення газу, адаптуючись до змін у вхідному потоці, який може мати варіації вологості, зумовлені умовами в пласті за допомогою керування зі зворотнім зв'язком і регулятора.

Контур керування отримує дані від датчика концентрації, що дозволяє оцінювати поточний стан вихідного потоків газу. Виходячи з показників сенсора вологості регулятор концентрації передає сигнал на виконавчий механізм клапана, який регулює потік абсорбенту до абсорбційної колони. Це дозволяє точно контролювати об'єм ДЕГ, необхідний для ефективного видалення вологи з газу. Якщо змінюється швидкість або концентрація вхідного потоку газу, регулятор автоматично коригує подачу абсорбенту, щоб забезпечити належний рівень осушення відповідно до нових умов. Таким чином, контур керування концентрацією забезпечує стабільну роботу абсорбційної колони, зменшуючи тривалість перехідних процесів та коливання параметрів.

Завдяки такому підходу система автоматичного керування мінімізує споживання енергії та витрати абсорбенту, використовуючи оптимальну кількість ресурсу лише тоді, коли це необхідно. Крім того, це дає змогу підвищити кількість газу з необхідним рівнем осушення. Це сприяє енергоефективності, знижує навантаження на обладнання, збільшує продуктивність процесу та продовжує термін експлуатації установки.

## 2.4 Контур керування витрати газу

Контур регулювання витратою газу призначений для підтримки стабільного рівня витрати газу на вході до абсорбційної колони. Це забезпечує необхідну продуктивність установки осушення газу, дозволяючи підтримувати стабільний процес навіть при коливаннях витрати вхідного потоку. Підтримання стабільної витрати важливо для того, щоб забезпечити оптимальні умови для абсорбції вологи за допомогою діетиленгліколю і уникнути перевитрати абсорбенту.

Контур включає сенсор витрати, який вимірює поточну витрату газу, і регулятор витрати, який керує клапаном для дроселювання потоку газу. Коли витрата газу на вході відхиляється від заданого значення, регулятор автоматично коригує положення клапана, змінюючи дроселювання. Це дозволяє підтримувати стабільну витрату газу, що надходить в абсорбер, незалежно від змін у зовнішніх умовах.

Процес дроселювання дозволяє знижувати або збільшувати витрату газу за необхідності, що допомагає досягти необхідної продуктивності процесу осушення і зменшити споживання ДЕГ. Такий підхід забезпечує енергоефективність і дозволяє мінімізувати витрати на абсорбент, водночас гарантуючи стабільну роботу абсорбційної колони.

## 2.5 Контур контролю за технологічним процесом

Контур контролю технологічним процесом відіграє важливу роль у забезпеченні безпеки та стабільності роботи установки осушення природного газу. Основна задача цього контуру полягає в моніторингу параметрів процесу за допомогою сенсорів (давачів), встановлених на різних етапах установки. Ці сенсори включають датчики температури, тиску, рівня та витрати, які постійно передають інформацію про поточний стан технологічного процесу.

Контур контролю технологічним процесом здійснює опитування давачів і порівнює отримані значення з заданими допустимими межами. У разі виявлення відхилень від заданих значень система автоматично подає сигнал тривоги для

попередження оператора. Якщо ж відхилення є критичним, контур контролю може ініціювати автоматичне зупинення процесу, щоб запобігти можливим аварійним ситуаціям. Такий механізм дозволяє швидко реагувати на зміни у технологічному процесі та мінімізує ризики, пов'язані з несправностями обладнання чи відхиленням параметрів від нормативних значень.

Завдяки функції моніторингу та автоматичної реакції контур контролю технологічним процесом забезпечує надійну і безпечну експлуатацію установки, підвищуючи ефективність осушення газу та знижуючи ймовірність аварій.



## РОЗДІЛ 3 МОДЕЛЬ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ

### 3.1 Дослідження контуру концентрації

Математична модель абсорбційної установки складається з наступних основних рівнянь матеріального та енергетичного балансів.

Матеріальний баланс за цільовим компонентом в газовій фазі описується рівнянням динаміки:

$$p_{зг} \cdot S_{ап} \cdot (H_{ап} - h_{на}) \cdot \frac{dC_{зг}}{dt} = G_{г} \cdot C_{г} - G_{зг} \cdot C_{зг} - m_{г}^{на} \quad (1)$$

де  $p_{зг}$  – густина збідненого газу, кг/м<sup>3</sup>;  $S_{ап}$  – площа перерізу апарату, м<sup>2</sup>;  $H_{ап}$  – висота апарату, м;  $h_{на}$  – рівень насиченого абсорбенту, м;  $C_{зг}$  – концентрація цільового компонента в збідненому газі, %;  $G_{г}$  – масова витрата вхідного потоку газу, кг/год;  $C_{г}$  – концентрація цільового компонента в вхідному потоці газу, %;  $G_{зг}$  – масова витрата збідненого газу, кг/год;  $m_{г}^{на}$  – маса цільового компонента, що переходить з газової фази в рідку в одиницю часу (визначається рівнянням масопередачі).

З рівняння статички  $\frac{dC_{зг}}{dt} = 0$ ,

$$G_{г} \cdot C_{г} = G_{зг} \cdot C_{зг} + m_{г}^{на} \quad (2)$$

Тоді, з виразів (1) і (2) виходить, що:

$$C_{зг} = f(G_{зг}, G_{г}, m_{г}^{на}) \quad (3)$$

Матеріальний баланс за цільовим компонентом в насиченому абсорбенті:

$$p_{на} \cdot S_{ап} \cdot h_{на} \cdot \frac{dC_{на}}{dt} = m_{г}^{на} + G_{а} \cdot C_{а} - G_{на} \cdot C_{на} \quad (4)$$

де  $p_{на}$  – густина насиченого абсорбенту, кг/м<sup>3</sup>;  $C_{на}$  – концентрація цільового компонента в насиченому абсорбенті, %;  $G_{а}$  – масова витрата

абсорбенту, кг/год;  $C_A$  – концентрація цільового компонента в абсорбенті, %;  $G_{HA}$  – масова витрата насиченого абсорбенту, кг/год;

$$\begin{aligned} \text{З рівняння статички } \frac{dC_{HA}}{dt} = 0, \\ G_{HA} \cdot C_{HA} = m_{\Gamma}^{HA} + G_A \cdot C_A \end{aligned} \quad (5)$$

Тоді, з виразів (4) і (5) виходить, що:

$$C_{3\Gamma} = f(G_A, G_{HA}, m_{\Gamma}^{HA}) \quad (6)$$

Матеріальний баланс за загальною кількістю цільового компонента в процесі абсорбції.

$$p_{3\Gamma} \cdot S_{АП} \cdot (H_{АП} - h_{HA}) \cdot \frac{dC_{3\Gamma}}{dt} = G_{\Gamma} \cdot C_{\Gamma} - G_{3\Gamma} \cdot C_{3\Gamma} + G_A \cdot C_A - G_{HA} \cdot C_{HA} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \text{З рівняння статички } \frac{dC_{3\Gamma}}{dt} = 0, \\ G_{\Gamma} \cdot C_{\Gamma} + G_A \cdot C_A = G_{3\Gamma} \cdot C_{3\Gamma} + G_{HA} \cdot C_{HA} \end{aligned} \quad (8)$$

Тоді, з виразів (7) і (8) виходить, що:

$$C_{3\Gamma} = f(G_{\Gamma}, G_{3\Gamma}, G_A, G_{HA}) \quad (9)$$

Матеріальний баланс по рідкій фазі.

$$p_{HA} \cdot S_{АП} \cdot \frac{dh_{HA}}{dt} = G_A + m_{\Gamma}^{HA} - G_{HA} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \text{З рівняння статички } \frac{dh_{HA}}{dt} = 0, \\ G_A + m_{\Gamma}^{HA} = G_{HA} \end{aligned} \quad (11)$$

Тоді, з виразів (10) і (11) виходить, що:

$$h_{HA} = f(G_A, G_{HA}) \quad (12)$$

Матеріальний баланс по газовій фазі.

$$\frac{V_{3\Gamma} \cdot M_{3\Gamma}}{R \cdot \theta_{3\Gamma}} \cdot \frac{dP_{3\Gamma}}{dt} = G_{\Gamma} - G_{3\Gamma} - m_{\Gamma}^{\text{HA}} \quad (13)$$

де  $V_{3\Gamma}$  – об'єм газової фази в колоні, м<sup>3</sup>;  $M_{3\Gamma}$  – молярна маса збідненої суміші, кг/моль;  $\theta_{3\Gamma}$  – температура збідненого газу в апараті, К;  $P_{3\Gamma}$  – тиск в колоні, Па;

З рівняння статички  $\frac{dP_{3\Gamma}}{dt} = 0$ ,

$$G_{\Gamma} = G_{3\Gamma} + m_{\Gamma}^{\text{HA}} \quad (14)$$

Тоді, з виразів (13) і (14) виходить, що:

$$P_{3\Gamma} = f(G_{\Gamma}, G_{3\Gamma}). \quad (15)$$

Проаналізувавши рівняння видно, що  $G_{3\Gamma}$  є одним із ключових параметрів, оскільки цей параметр має ключовий вплив на ефективність і стабільність роботи абсорбційної установки. До основних причин можна віднести вплив на концентрацію компонентів у газовій фазі. Масова витрата  $G_{3\Gamma}$  впливає на концентрацію цільового компонента в збідненому газі, що визначається рівнянням динаміки процесу у рівнянні 7. Зміна  $G_{3\Gamma}$  дає можливість регулювати кількість цільового компонента, який залишився в газовій фазі після абсорбції. Це важливо для забезпечення бажаної якості газу на виході. Також взаємозв'язок із масопередачею. Через рівняння статички стає очевидним, що  $G_{3\Gamma}$  впливає на кількість компонента, який переходить з газової фази в рідку. Цей процес масопередачі є основою роботи абсорбційної установки, тому контроль за  $G_{3\Gamma}$  забезпечує ефективність процесу. Вплив на загальний матеріальний баланс системи. У загальному матеріальному балансі  $G_{3\Gamma}$  визначає розподіл цільового компонента між газовою та рідкою фазами. Регулюючи цей параметр, можна впливати на кількість речовини, що поглинається абсорбентом, і тим самим досягати оптимальних умов для процесу.

Отже, вибір контуру керування дії  $G_{3\Gamma}$  є необхідним для забезпечення контролю над ключовими параметрами процесу абсорбції — концентрацією,

масопередачею і загальним матеріальним балансом. Це дозволяє досягти оптимальних умов роботи установки та підвищити її ефективність.

Вхідні параметри технологічного процесу:

Витрата абсорбента = 98 м<sup>3</sup>/г;

Витрата початкової газової суміші = 18500 м<sup>3</sup>/г;

Концентрація H<sub>2</sub>O в початковій газовій суміші = 1,5 %(об'ємних);

Концентрація H<sub>2</sub>O в збідненій газовій суміші = 0,01 %(об'ємних);

Концентрація діетиленгліколю = 98 %(об'ємних);

Тиск у колоні = 4,5 мПа;

Висота абсорбера = 6 м;

Діаметр абсорбера = 1,4 м;

Рівень рідини в абсорбері 0,1 м.

Розрахуємо математичну модель об'єкта керування з каналом регулювання концентрації цільового компонента у збідненому газі. Для знаходження передатної функції об'єкта керування по каналу  $G_A \rightarrow C_{3Г}$  використовуємо рівняння динаміки 7. Тоді:

$$p_{3Г} \cdot S_{АП} \cdot (H_{АП} - h_{НА}) \cdot \frac{dC_{3Г}}{dt} = G_{Г} \cdot C_{Г} - G_{3Г} \cdot C_{3Г} + G_A \cdot C_A - G_{НА} \cdot C_{НА} \quad (7)$$

Зробимо перетворення Лапласа:

$$x(p) - G_A$$

$$y(p) - C_{3Г}$$

Отримаємо:

$$y(p) \cdot (p_{3Г} \cdot S_{АП} \cdot (H_{АП} - h_{НА}) \cdot p + G_{3Г}) = x(p) \cdot C_A \quad (16)$$

$$W(p) = \frac{y(p)}{x(p)} = \frac{C_A}{(p_{3Г} \cdot S_{АП} \cdot (H_{АП} - h_{НА}) \cdot p + G_{3Г})} = \frac{C_A/G_{3Г}}{\frac{p_{3Г} \cdot S_{АП} \cdot (H_{АП} - h_{НА})}{G_{3Г}} \cdot p + 1} \quad (17)$$

Після перетворення Лапласа і знаходження передатної функції об'єкта керування за каналом  $G_A \rightarrow C_{3Г}$ , можна побачити, що властивості описуються аперіодичною ланкою першого порядку:

$$W(p) = \frac{K_{OK}}{T_{OK} \cdot s + 1} \quad (18)$$

Коефіцієнт передача об'єкта керування:

$$K_{OK} = \frac{C_A}{G_{3Г}} \quad (19)$$

Стала часу об'єкта керування:

$$T_{OK} = \frac{p_{3Г} \cdot S_{АП} \cdot (H_{АП} - h_{НА})}{G_{3Г}} \quad (20)$$

Розрахуємо основні параметри об'єкта керування, що необхідні для моделювання. Далі знайдемо отримаємо  $G_{3Г}$ ,  $p_{3Г}$  для знаходження параметрів.

$$p_{3Г} = \frac{M_{3Г}}{V_T} = \frac{M_{3Г}}{22,4} \quad (21)$$

Знайдемо молярну масу збідненого газу, Так як відомий склад газу, то можна знайти:

$$M_{3Г} = M(CH_4) \cdot C(CH_4) + M(C_2H_6) \cdot C(C_2H_6) + M(C_3H_8) \cdot C(C_3H_8) \quad (22)$$

концентрації відповідних компонентів. Інші гази не враховуємо, оскільки їх концентрація у суміші достатньо мала.

$$M_{3Г} = 0,016 \cdot 0,8732 + 0,030 \cdot 0,0912 + 0,044 \cdot 0,011 = 0,0171 \text{ (кг/моль)} \quad (23)$$

$$p_{3Г} = \frac{0,0171 \cdot 1000}{22,4} = 0,76 \text{ (кг/м}^3\text{)} \quad (24)$$

Тоді,  $G_{3Г} = p_{3Г} \cdot F_{3Г}$ , де  $F_{3Г}$  – об'ємна витрата очищених газів, м<sup>3</sup>/год.

$$G_{3Г} = p_{3Г} \cdot F_{3Г} = 0,76 \cdot 18\,500 = 14\,060 \text{ (кг/год)} \quad (25)$$

Об'єкт керування буде мати наступні параметри:

$$K_{OK} = \frac{C_A}{G_{3\Gamma}} = \frac{98}{14\,060} = 0,006 \quad (26)$$

$$T_{OK} = \frac{p_{3\Gamma} \cdot S_{АП} \cdot (H_{АП} - h_{НА})}{G_{3\Gamma}} = \frac{0,76 \cdot 3,1 \cdot (6 - 0,1)}{14\,060} = 0,1 \quad (27)$$

$$S_{АП} = \frac{\pi \cdot D^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 2}{4} = 3,1 \text{ (м}^2\text{)} \quad (28)$$

Отже, передатна функція об'єкту керування за каналом  $G_A \rightarrow C_{3\Gamma}$  має вигляд:

$$W(p) = \frac{K_{OK}}{T_{OK} \cdot s + 1} = \frac{0,006}{0,1 \cdot s + 1} \quad (29)$$

Розрахуємо транспортне запізнення для об'єкту керування. У вашій системі керування абсорбційною колоною транспортне запізнення може виникати так, як після введення редагування витрати осушувача потрібен час, щоб нова концентрація цільового компонента досягла виходу колони. Це пов'язано з фізичним часом, необхідним для проходження газової суміші через колонку.

Формула розрахунку транспортного запізнення:

$$\tau = \frac{L}{v} \quad (30)$$

де  $L$  – довжина ділянки або обладнання, через яку рухається газ, м;  $v$  – швидкість потоку газу, м/с.

Розрахуємо значення транспортного запізнення, підставивши вхідні значення:

$$L = 6 \text{ (м);}$$

$$v = 6 \text{ (м/с).}$$

Тоді

$$\tau = \frac{6}{6} = 1 \text{ (с)} \quad (31)$$

Розрахуємо передатну функцію виконавчого механізму аналітичним методом, у нашому випадку використовується клапан рідини. Передаточна функція виконавчого механізму має вигляд:

$$W(p) = \frac{K_{PK}}{T_{PK} \cdot s + 1} \quad (32)$$

де  $K_{PK}$  – коефіцієнт підсилення регулюючого клапана;

$T_{PK}$  – постійна часу, хв.

Для аналітичного розрахунку коефіцієнт підсилення клапана рідини потрібно визначити зв'язок між витратою і перепадом тиску через клапан. Формула для витрати рідини через клапан, що враховує перепад тиску може бути основана за допомогою рівняння Бернуллі.

Рівняння Бернуллі – у гідродинаміці – співвідношення між тиском, швидкістю та висотою певної точки над площиною відліку в рухомій рідині (або газі) через звужену ділянку, таку як клапан [11].

Запишемо рівняння Бернуллі для двох перерізів течії [12]:

$$\frac{v_1^2}{2} + \frac{P_1}{\rho} + gh_1 = \frac{v_2^2}{2} + \frac{P_2}{\rho} + gh_2 \quad (33)$$

де  $v_1$  і  $v_2$  – швидкість рідини, м/с;

$P_1$  і  $P_2$  – тиск у точках 1 і 2, Па;

$\rho$  – густина рідини, кг/м<sup>3</sup>;

$g$  – прискорення вільного падіння, м/с<sup>2</sup>;

$h_1$  і  $h_2$  – висота над опорною точкою в точках 1 і 2, м.

У нашому випадку ми маємо горизонтальний потік, тоді різниця у висотах  $h_1$  і  $h_2$ . Отже, рівняння набуває вигляду:

$$\frac{v_1^2}{2} + \frac{P_1}{\rho} = \frac{v_2^2}{2} + \frac{P_2}{\rho} \quad (34)$$

Визначимо перепад тиску через клапан як:

$$\Delta P = P_1 - P_2 \quad (35)$$

Тоді рівняння набуває вигляду:

$$\frac{v_1^2}{2} - \frac{v_2^2}{2} = \frac{\Delta P}{\rho} \quad (36)$$

Для випадку клапана швидкість потоку до клапана (на вході) вважається малою в порівнянні зі швидкістю на виході. Отже, можна вважати  $v_1 \approx 0$  [13] і рівняння спрощується до:

$$-\frac{v_2^2}{2} = \frac{\Delta P}{\rho} \quad (37)$$

або

$$v_2^2 = \frac{2\Delta P}{\rho} \quad (38)$$

Тоді, швидкість потоку через клапан на виході визначається як:

$$v_2 = \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \quad (39)$$

Витрата  $F_A$  через клапан пропорційна швидкості потоку  $v_2$  і площі перерізу клапана, що зазвичай виражається через коефіцієнт витрати клапана  $K_u$ :

$$F_A = K_u \cdot v_2 \quad (40)$$

Підставимо вираз для  $v_2$ :

$$F_A = K_u \cdot \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \quad (41)$$

Коефіцієнт підсилення регулюючого клапана  $K_{PK}$  виражає зв'язок між витратою і перепадом тиску через клапан. Тому остаточна формула для коефіцієнта підсилення клапана:

$$K_{PK} = K_u \cdot \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \quad (42)$$

Розрахуємо коефіцієнт підсилення регулюючого клапана. Вхідні значення:



$$K_u = 3,2 \cdot 10^{-4} \left( \frac{\% \cdot c}{\text{М}^2} \right)$$

$$\Delta P = 0,17 \text{ (МПа)}$$

$$p = 0,76 \left( \frac{\text{кг}}{\text{М}^3} \right)$$

Тоді, коефіцієнт підсилення регулюючого клапана дорівнює:

$$K_{PK} = 3,2 \cdot 10^{-4} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 0,17}{0,76}} = 0,0002 \left( \frac{\text{М}^3}{\% \cdot c} \right) \quad (43)$$

Візьмемо час відкриття клапана при вхідному впливі, як постійну часу. Тоді отримаємо:

$$T_{PK} = 5,95 \text{ (с)} \quad (44)$$

Таким чином передатна функція виконавчого механізму, у нашому випадку клапан рідини має вигляд:

$$W(p) = \frac{0,0002}{5,95 \cdot s + 1} \quad (45)$$

Промодельюємо контур об'єкта керування з каналом регулювання концентрації цільового компоненту у збідненому газі використавши отриманні передатні функції елементів моделі цього даного контуру в Matlab/Simulink.

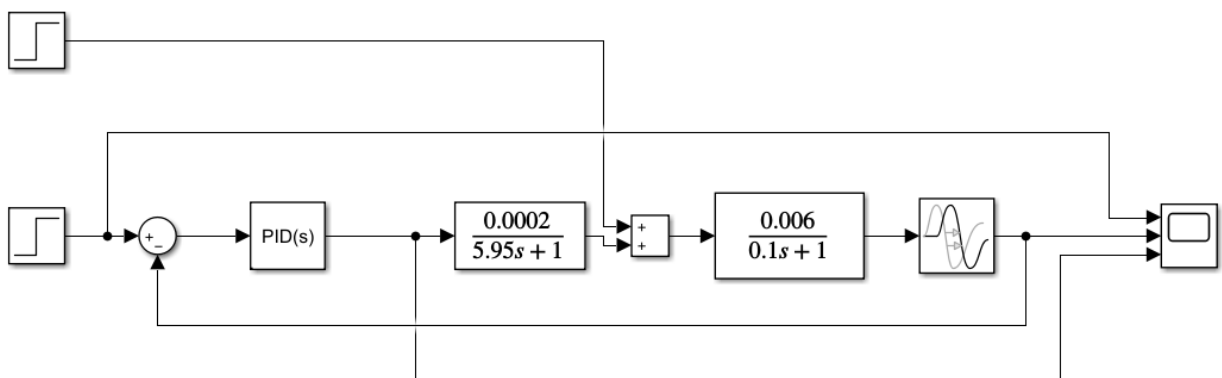


Рисунок 3.1 – Схема контуру регулювання концентрації

Промодельюємо перехідний процес.

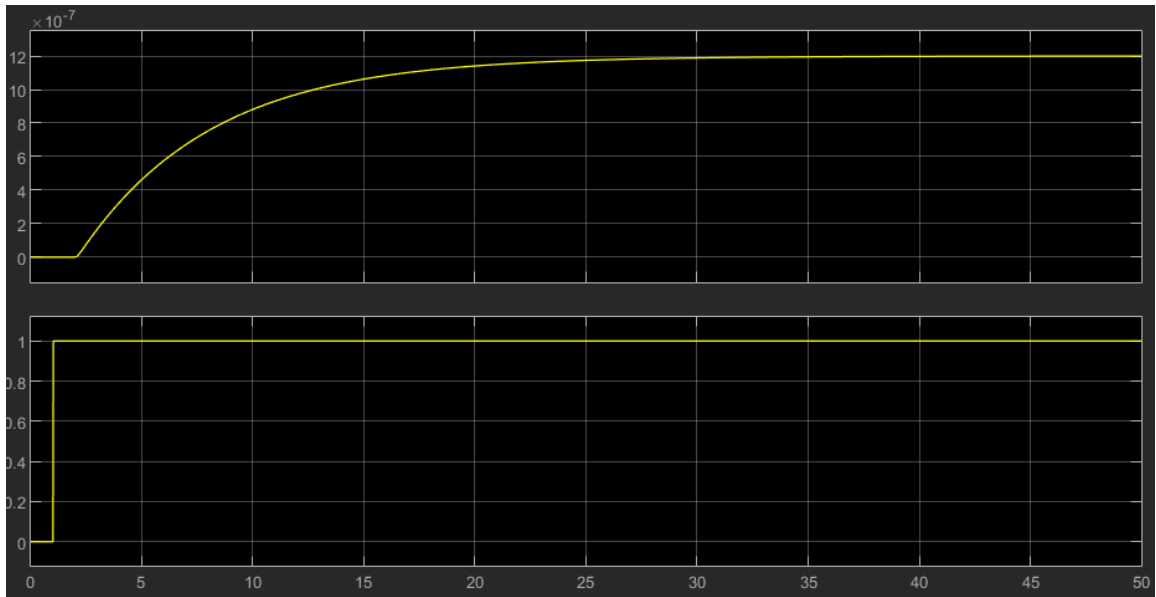


Рисунок 3.2 – Перехідна характеристика контуру концентрації

На представленій перехідній характеристиці зображено динаміку системи контролю концентрації на виході абсорбера, який використовується для осушення газу гліколем. Графік демонструє монотонне зростання вихідної концентрації до стаціонарного значення, що є типовим для системи першого порядку. Час перехідного процесу становить 30 с. Відсутність коливань свідчить про стійкість системи, проте перехідний процес є повільним, що вказує на значну інерційність. Без регулятора система демонструє досить тривалий час виходу на стаціонарний режим та недосягнення заданого рівня, що може бути недостатньо ефективним у реальних умовах експлуатації. Для покращення роботи системи доцільно впровадити ПД-регулятор, який може скоротити час перехідного процесу, підвищити точність контролю та зменшити вплив інерційності на динаміку системи.

Налаштуємо ПД – регулятор. Для цього використаємо метод Зіглера-Нікольса. Підхід до налаштування параметрів ПД-регулятора, який базується на характеристиках відкритої системи. Основна ідея методу полягає в тому, щоб визначити критичні параметри системи — коефіцієнт підсилення і період коливань — за умови, що система працює на межі стійкості.

Тоді перехідна характеристика з ПД регулятором має наступний вигляд.

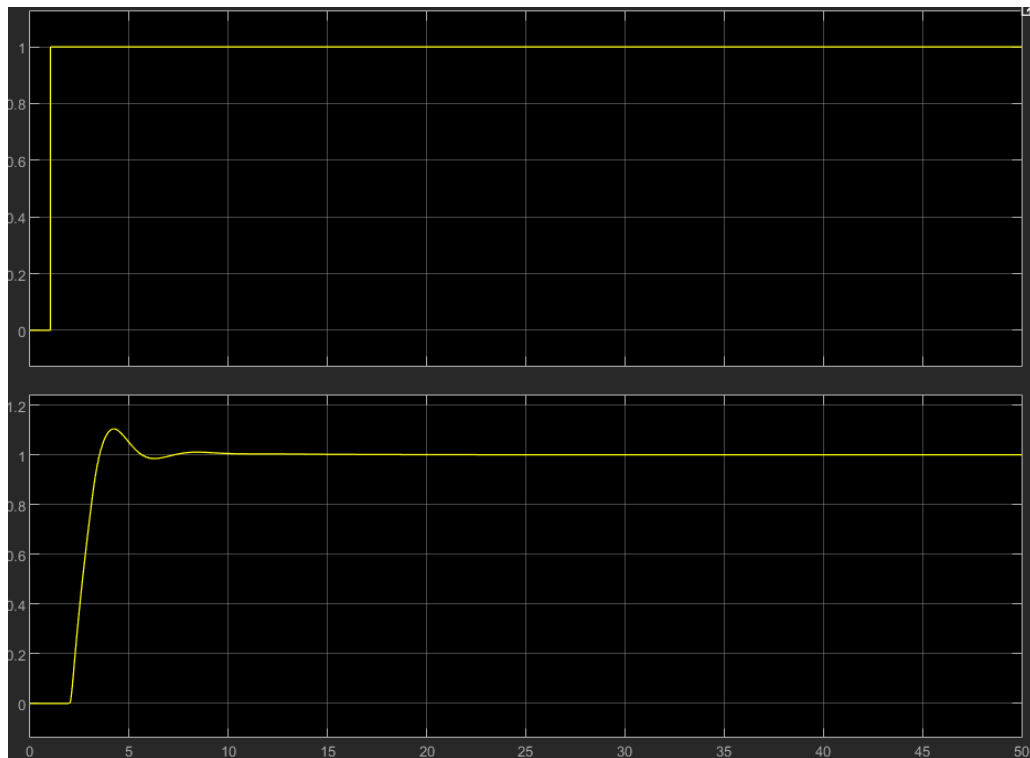


Рисунок 3.3 – Перехідна характеристика контуру концентрації

На представленому графіку показано перехідну характеристику системи з налаштованим ПД-регулятором. Верхній графік відображає вхідний сигнал, який є одиничним стрибком, тоді як нижній графік ілюструє вихідний сигнал системи. У порівнянні з попередньою характеристикою без регулятора, система демонструє швидше досягнення стаціонарного режиму та більш точне відтворення заданого значення.

Вихідний сигнал має такі особливості: спочатку спостерігається швидке зростання до значення, близького до цільового, після чого з'являється невелике перерегулювання, яке не перевищує 10% від стаціонарного значення. Після цього система стабілізується, досягаючи цільового значення через приблизно 4 с. Перерегулювання є типовим для ПД-регулятора, проте амплітуда коливань добре пригнічена, що свідчить про якісно налаштовані параметри регулятора. Налаштований ПД-регулятор забезпечує швидку реакцію на зміну вхідного сигналу та ефективне досягнення стаціонарного режиму без значних коливань.

Промодельюємо контур подавши на нього збурення.

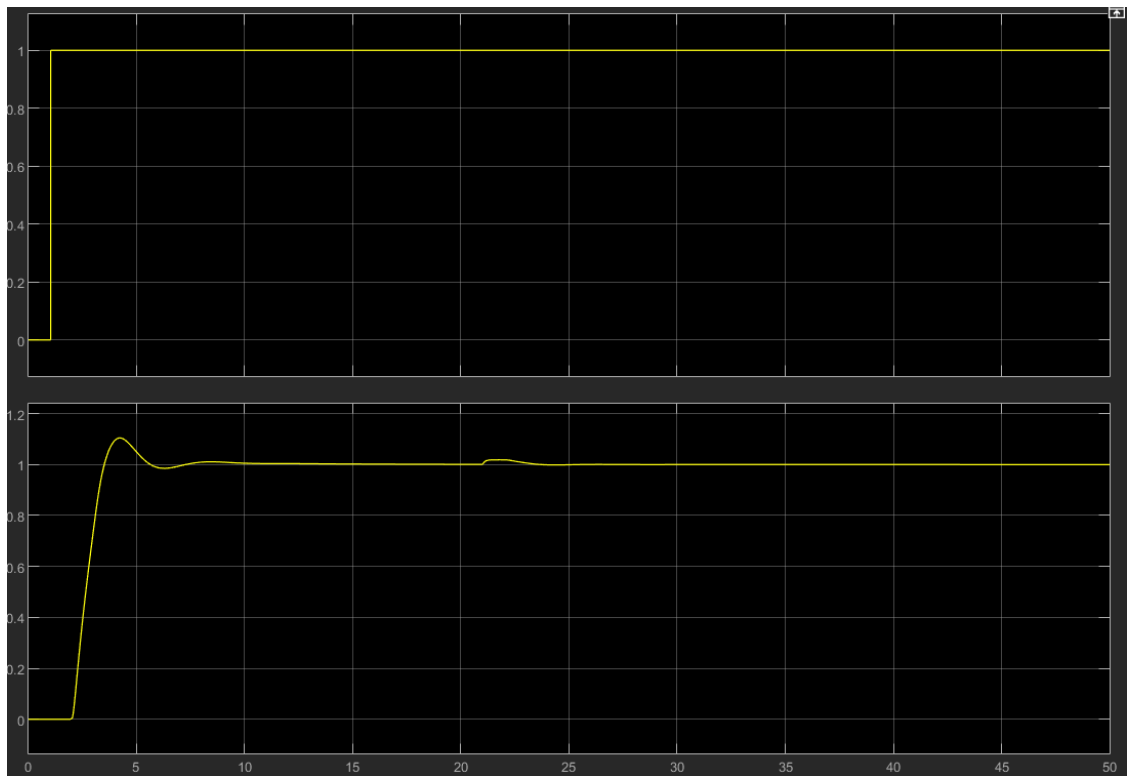


Рисунок 3.4 – Перехідна характеристика контуру концентрації із збуренням

На представленій перехідній характеристиці спостерігається реакція системи на збурення. До моменту збурення система демонструє стабільну роботу, вихідний сигнал досягає заданого рівня та залишається поблизу нього з незначними відхиленнями через перерегулювання. Однак після подачі збурення на 22-й секунді вихідний сигнал миттєво змінюється, що свідчить про вплив збурення на динаміку системи. Після цього система намагається компенсувати зміни та повернутися до стаціонарного значення. Відновлення відбувається із певними коливаннями, але система демонструє стійкість, оскільки коливання поступово згасають, і сигнал повертається до заданого рівня через кілька секунд після дії збурення.

### 3.2 Дослідження контуру витрати

Для моделювання руху газу через трубопровід можемо скористатися рівнянням другого закону Ньютона, що описує зміну кількості газу [14]:

$$m \frac{dV}{dt} = \Delta P - F_{\text{опір}} \quad (1)$$

де  $m$  – маса газу в трубопроводі, кг;  $\frac{dV}{dt}$  – прискорення потоку, м/с  $\Delta P$  – перепад тиску в трубопроводі, Па;  $F_{\text{опір}}$  – сила опору трубопроводу, Н.

Швидкість потоку  $V$  пов'язана з витратою  $Q$  як:

$$Q = A \cdot V \quad (2)$$

де  $A$  – площа поперечного перерізу трубопроводу, м<sup>2</sup>.

Площу поперечного перерізу трубопроводу можна розрахувати за формулою

$$A = \frac{\pi D^2}{4} \quad (3)$$

Силу опору можна отримати з рівняння, що враховує чинники які впливають на опір в трубопроводі:

$$F_{\text{опір}} = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{\rho \cdot \left(\frac{Q}{A}\right)^2}{2} \quad (4)$$

де  $f$  – коефіцієнт тертя в трубі (залежить від числа Рейнольдса та шорсткості труби);  $L$  – довжина трубопроводу, м;  $D$  – діаметр трубопроводу, м;  $\rho$  – густина газу кг/м<sup>3</sup>;

Після підстановки отримаємо:

$$F_{\text{опір}} = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{8 \cdot \rho \cdot Q^2}{\pi^2 \cdot D^4} \quad (5)$$

Після спрощення отримаємо:

$$F_{\text{опір}} = K \cdot Q^2 \quad (6)$$

$$\text{де } K = f \cdot \frac{8 \cdot L \cdot p}{\pi^2 \cdot D^5}$$

Тоді рівняння набуває вигляду:

$$m \frac{dQ}{dt} = A(\Delta P - KQ^2) \quad (7)$$

Отримане рівняння є нелінійним. Для моделювання моделі потрібно лінеаризувати це рівняння. Припустимо, що система працює в деякій робочій точці, де витрата і перепад тиску мають номінальні значення [15]:

$Q_0$  – витрата в робочій точці;

$\Delta P_0$  – перепад тиску в робочій точці.

Тепер розглянемо збурення навколо цих робочих значень:

$\Delta Q(t) = Q(t) - Q_0$  – відхилення витрати від номінальної;

$\Delta P(t) = P(t) - P_0$  – відхилення перепаду тиску від номінального.

Для лінеаризації навколо робочої точки скористаємося методом розкладу функції у ряд Тейлора.

Розкладемо функцію  $f(Q) = KQ^2$  навколо точки  $Q_0$ :

$$f(Q) \approx f(Q_0) + \left. \frac{df}{dQ} \right|_{Q=Q_0} (Q - Q_0) \quad (8)$$

де  $f(Q_0) = KQ_0^2$ , а похідна функції  $f(Q) = KQ^2$  по  $Q$  дорівнює:

$$\frac{df}{dQ} = 2KQ \quad (9)$$

Тому, для  $Q$  близько до  $Q_0$  маємо:

$$f(Q) \approx KQ_0^2 + 2KQ_0(Q - Q_0) \quad (10)$$

Вважаємо, що  $Q$  змінюється відносно  $Q_0$ , тобто  $Q - Q_0 = \Delta Q$ . Тоді рівняння запишемо у вигляді:

$$f(Q) \approx KQ_0^2 + 2KQ_0\Delta Q \quad (11)$$

де  $2KQ_0$  є коефіцієнтом лінеаризації.

Тепер отриманий вираз у початкове рівняння:

$$m \frac{d\Delta Q}{dt} = A(\Delta P - 2KQ_0\Delta Q) \quad (12)$$

Наступним кроком є застосування перетворення Лапласа.

Перетворення Лапласа для похідної  $\frac{d\Delta Q}{dt}$ :

$$\mathcal{L}\left\{\frac{d\Delta Q}{dt}\right\} = s\Delta Q(s) \quad (13)$$

Тут ми вважаємо, що початкові умови дорівнюють нулю, тобто  $Q(0) = 0$ .

Перетворення Лапласа для правої частини рівняння:

$$\mathcal{L}\{A(\Delta P - 2KQ_0\Delta Q)\} = A(\Delta P(s) - 2KQ_0\Delta Q(s)) \quad (14)$$

Отримуємо рівняння:

$$ms\Delta Q(s) = A(\Delta P(s) - 2KQ_0\Delta Q(s)) \quad (15)$$

Далі розв'яжемо рівняння відносно витрати:

$$msQ(s) + A2KQ_0\Delta Q(s) = A\Delta P(s) \quad (16)$$

Винесемо  $\Delta Q(s)$  за дужки:

$$\Delta Q(s)(ms + A2KQ_0) = A\Delta P(s) \quad (17)$$

Після перетворення отримаємо:

$$\Delta Q(s) = \frac{A\Delta P(s)}{ms + A2KQ_0} \quad (18)$$

Тоді передатна функція  $W(s)$  набуває вигляду відношення вихідного сигналу до вхідного. У нашому випадку вихідний сигнал це витрата, а вхідний сигнал це перепад тиску. Отже, передатна функція:

$$W(s) = \frac{A}{ms + A2K_{\text{оп}}Q_0} \quad (19)$$

Тобто:

$$W(s) = \frac{K}{Ts+1} \quad (20)$$

де

$$K = \frac{1}{2K_{\text{оп}}Q_0}$$
$$T = \frac{m}{A2K_{\text{оп}}Q_0}$$

Розрахуємо передатну функцію відповідно до вхідних значень.

Вхідні данні:

Довжина трубопроводу  $L = 20$  м;

Діаметр трубопроводу  $D = 0.2$  м;

Густина газу  $\rho = 0.77$  кг/м<sup>3</sup>;

Коефіцієнт тертя  $f = 0.02$  (може бути взято з таблиць для різних матеріалів);

Розрахуємо площу поперечного перерізу трубопроводу:

$$A = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi \cdot (0.2)^2}{4} = 0.03 \text{ (м}^2\text{)} \quad (21)$$

Розрахуємо коефіцієнта опору:

$$K_{\text{оп}} = f \cdot \frac{8 \cdot L \cdot \rho}{\pi^2 \cdot D^5} = 0.02 \cdot \frac{8 \cdot 20 \cdot 0.77}{\pi^2 \cdot (0.2)^5} = 780,1 \quad (22)$$

Розрахуємо коефіцієнт підсилення за формулою:

$$K = \frac{1}{2K_{\text{оп}}Q_0} = 0.0006 \quad (23)$$

Розрахуємо сталу часу за формулою:

$$T = \frac{m}{A2K_{\text{оп}}Q_0} = 0.01 \text{ с} \quad (24)$$

Передатна функція набуває вигляду:



$$W(s) = \frac{K}{Ts+1} = \frac{0.0006}{0.01s+1} \quad (25)$$

Отримаємо передатну функцію виконавчого механізму. Виконавчий механізм можна описати з урахуванням затримки в реакції на вхідний сигнал і підсилення, що визначає величину перепаду тиску.

Припустимо, що перепад тиску  $\Delta P$  змінюється пропорційно вхідному сигналу  $u(t)$ , але з інерційною затримкою. Тоді лінійне рівняння для виконавчого механізму можна записати як:

$$\tau \frac{d(\Delta P)}{dt} + \Delta P = Ku(t) \quad (26)$$

де  $\tau$  – стала часу виконавчого механізму, що визначає швидкість реакції на вхідний сигнал;  $K$  – коефіцієнт підсилення, що показує, на скільки зміна вхідного сигналу впливає на перепад тиску.

Застосуємо перетворення Лапласа:

$$\tau s \Delta P(s) + \Delta P(s) = KU(s) \quad (27)$$

Виразимо передатну функцію:

$$W(s) = \frac{\Delta P(s)}{U(s)} = \frac{K}{\tau s + 1} \quad (28)$$

Коефіцієнт підсилення  $K$  можна розрахувати відповідно до фізичних характеристик системи, а саме:

$$K = \frac{A}{V} \quad (29)$$

де:  $A$  – площа поперечного перерізу виконавчого механізму;  $V$  – об'єм, у якому створюється перепад тиску.

Стала часу  $\tau$  відображає інерційність виконавчого механізму і залежить від фізичних характеристик, таких як об'єм і коефіцієнт потоку через систему. Вона визначається як:

$$\tau = \frac{V}{Q_{max}} \quad (30)$$

$Q_{max}$  – максимальна швидкість зміни об'єму газу, що циркулює в механізмі

Розрахуємо передатну функцію відповідно до вхідних значень:

Площа перерізу  $A = 0.007 \text{ м}^2$ ;

Об'єм  $V = 0.8 \text{ м}^3$ ;

Максимальна швидкість потоку  $Q_{max} = 0.07 \frac{\text{м}^3}{\text{с}}$ .

Розрахунок коефіцієнту перетворення:

$$K = \frac{A}{V} = \frac{0.007}{0.8} = 0.008 \quad (31)$$

Розрахунок сталої часу:

$$\tau = \frac{V}{Q_{max}} = \frac{0.8}{0.07} = 1.1 \text{ (с)} \quad (32)$$

Тоді передатна функція набуває вигляду:

$$W(s) = \frac{0.008}{1.1s+1} \quad (33)$$

Промодельємо контур об'єкта керування з каналом регулювання концентрації витрати відного потоку газу використавши отриманні передатні функції елементів моделі цього даного контуру в Matlab/Simulink.

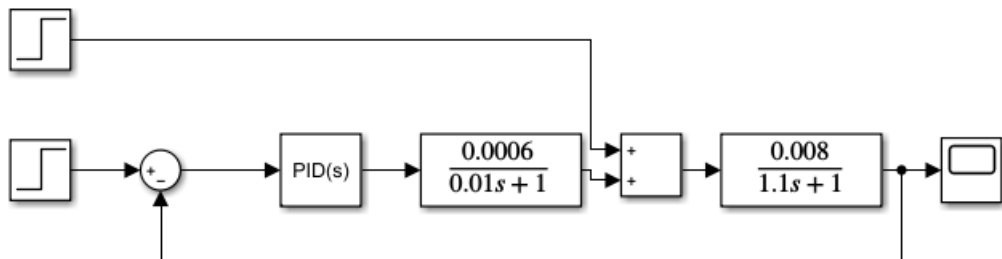


Рисунок 3.5 – Схема контуру регулювання концентрації

Промодельємо перехідний процес.

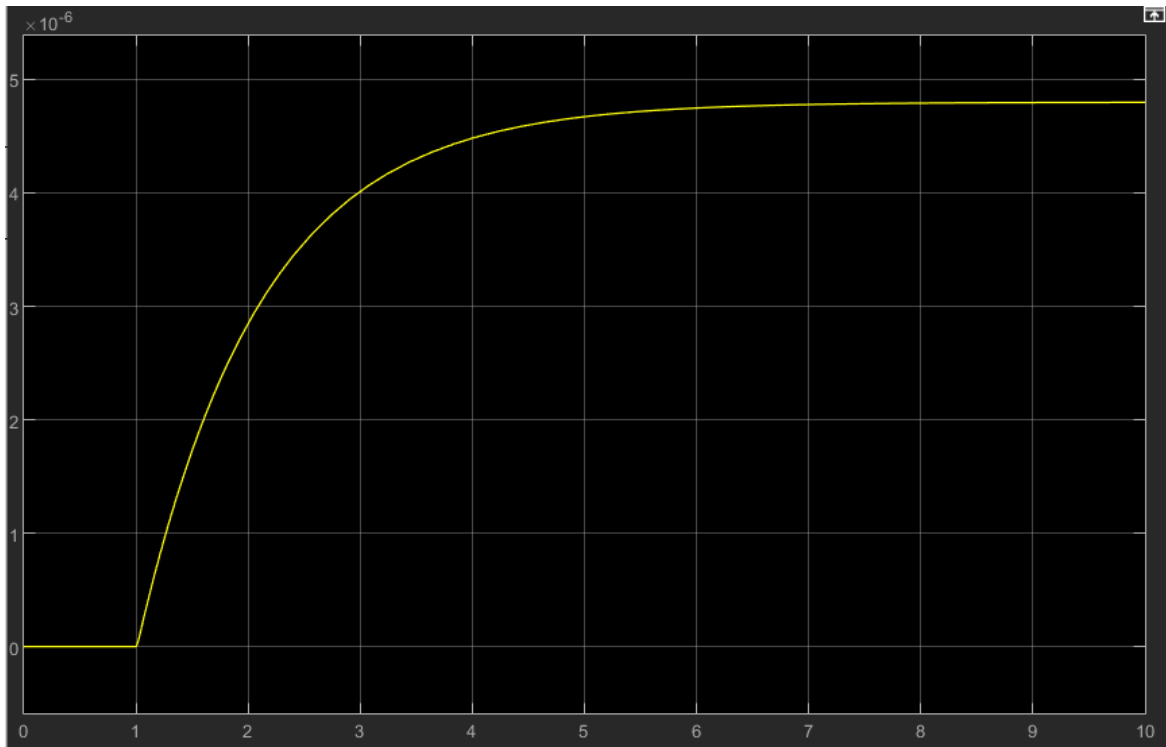


Рисунок 3.6 – Перехідна характеристика контуру концентрації

На представленій перехідній характеристиці зображено динаміку системи контролю витрати газу на вході до абсорбера. Графік демонструє монотонне зростання витрати до сталого значення, що є типовим для системи першого порядку. Час перехідного процесу становить 7 секунд. Відсутність коливань свідчить про стійкість системи, проте процес є повільним, що вказує на значну інерційність. Без регулятора система демонструє досить тривалий час виходу на стаціонарний режим, що може бути недостатньо ефективним. Для покращення роботи системи доцільно впровадити ПД-регулятор, який може скоротити час перехідного процесу, підвищити точність контролю та зменшити вплив інерційності на динаміку системи.

Налаштуємо ПД – регулятор. Для цього використаємо метод Зіглера-Нікольса

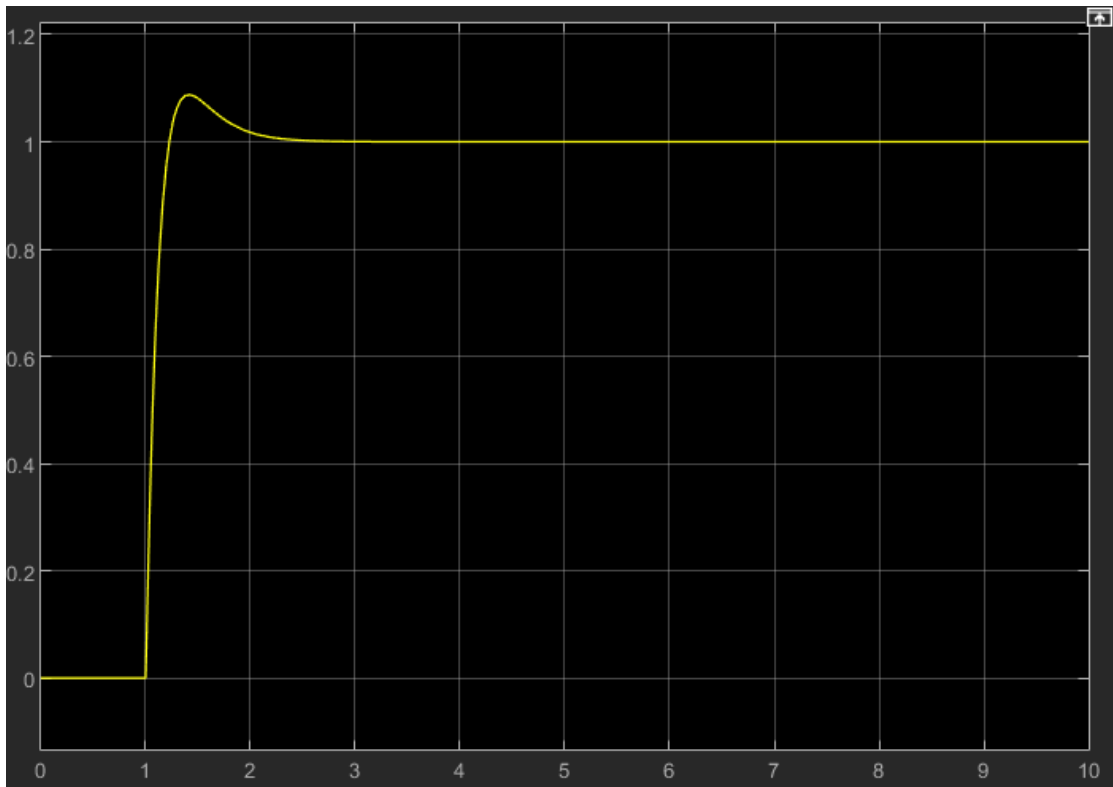


Рисунок 3.7 – Перехідна характеристика контуру концентрації

На представленій перехідній характеристиці зображено динаміку системи контролю витрати газу на вході до абсорбера з налаштованим ПД - регулятором. Графік демонструє значне покращення: перехідний процес триває приблизно 2 секунди, що значно швидше у порівнянні з попередньою характеристикою. Невелике перерегулювання на початку свідчить про високу чутливість регулятора, але після цього система швидко досягає сталого значення, без тривалих коливань. Використання регулятора дозволило скоротити час перехідного процесу, підвищити точність контролю та зменшити вплив інерційності, що значно підвищує ефективність системи в умовах реальної експлуатації.

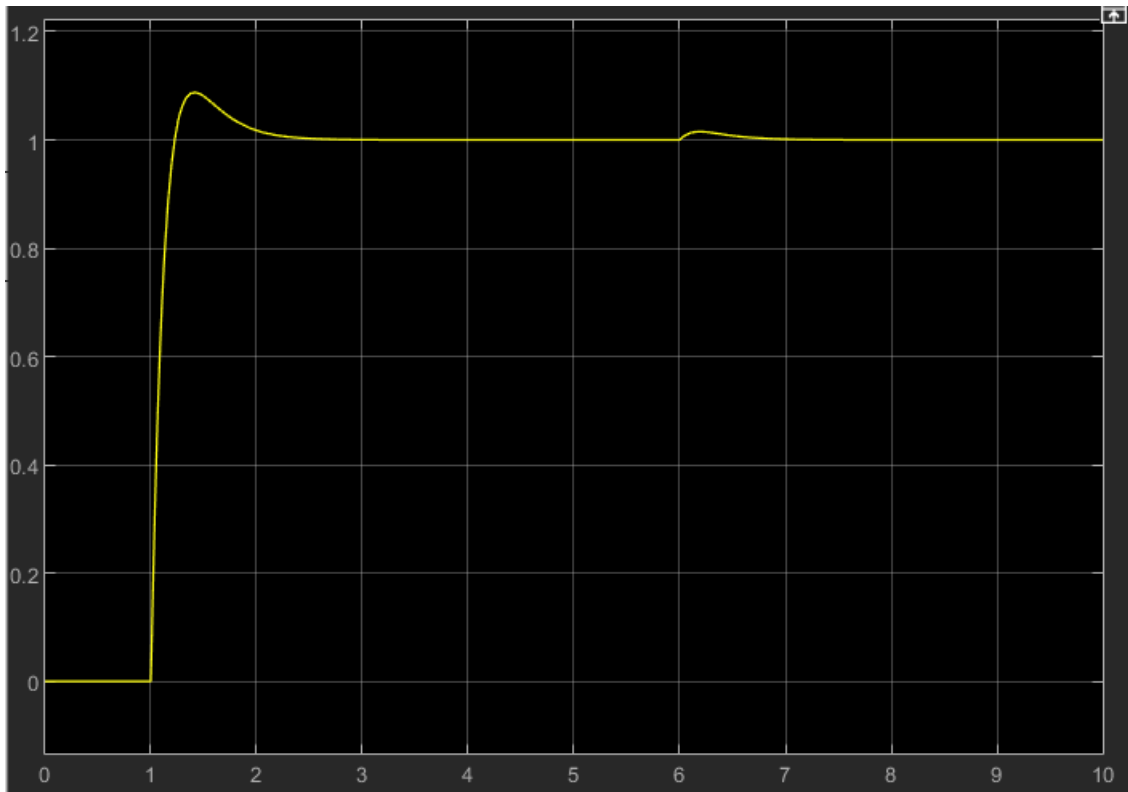


Рисунок 3.8 – Перехідна характеристика контуру концентрації із збурення

На представленій перехідній характеристиці зображено динаміку системи контролю витрати газу на вході до абсорбера зі збуренням, яке було внесене на 6-й секунді. Графік показує, що після початкового перехідного процесу, який триває близько 2 секунд, система стабілізується на сталому значенні, рівному 1. На 6-й секунді помітне короткочасне відхилення, спричинене збуренням, але система швидко повертається до сталого режиму завдяки роботі регулятора. Це свідчить про добру стійкість системи та її здатність ефективно компенсувати вплив зовнішніх збурень.

У підсумку, впровадження регулятора значно покращує динаміку системи, зменшує час перехідного процесу та забезпечує її стійкість при збуреннях. Це дозволяє підвищити точність і надійність роботи установки осушення газу.

### 3.3 Налаштування Fuzzy-регулятора

Для налаштування і моделювання Fuzzy-регулятора зберемо схему в Matlab/Simulink для першого контуру – підтримання концентрації цільового компоненту у збідненому газі, використавши отриманні передатні функції

елементів моделі цього даного контуру з ПІД і Fuzzy-регуляторами. Використання такої схеми дасть змогу порівняти якість керування для двох регуляторів.

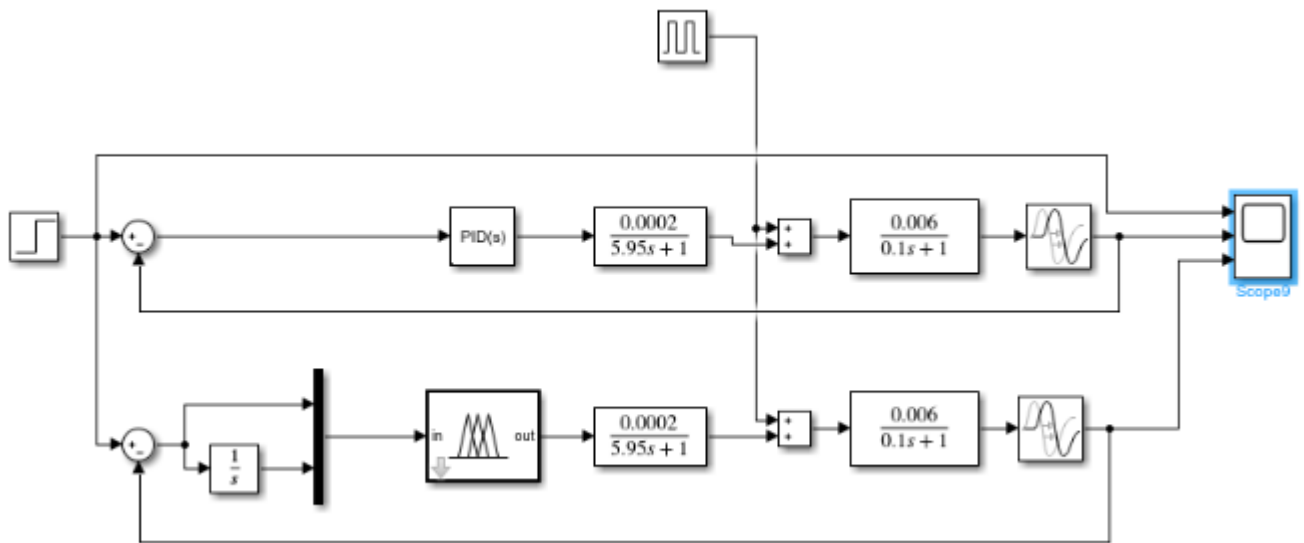


Рисунок 3.9 – Схема контуру регулювання концентрації

Для налаштування Fuzzy-регулятора в MATLAB необхідно виконати кілька етапів. Спочатку потрібно визначити кількість входів і виходів регулятора. Ми на входи подаємо похибку  $e$  та зміну похибки  $\Delta e$ , а вихід використовується для формування керуючого сигналу  $u$ . У MATLAB відкривають інструмент Fuzzy Logic Designer за допомогою команди `fuzzy`, після чого створюють нову нечітку систему FIS, вибираючи метод логічного виведення Mamdani або Sugeno залежно від типу задачі [16].

Далі створюємо функції приналежності для кожного входу і виходу. Наприклад, для похибки можна створити множини Negative, Zero, Positive, використовуючи трикутні чи гаусівські функції. Після цього переходять до формування бази правил, що описують роботу регулятора. Наприклад, кожне правило має вигляд: "Якщо похибка = Positive і зміна похибки = Negative, то керуючий сигнал = High". Правила задають через інтерфейс Rule Editor або програмно в MATLAB.

Створимо базу правил та функції приналежності для вхідних і вихідних змінних для першого контуру.

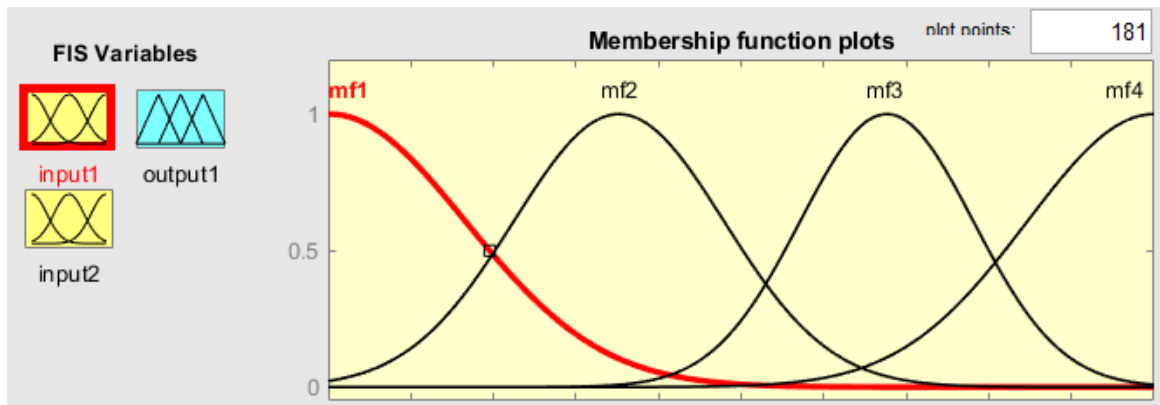


Рисунок 3.10 – Функції приналежності для входу №1

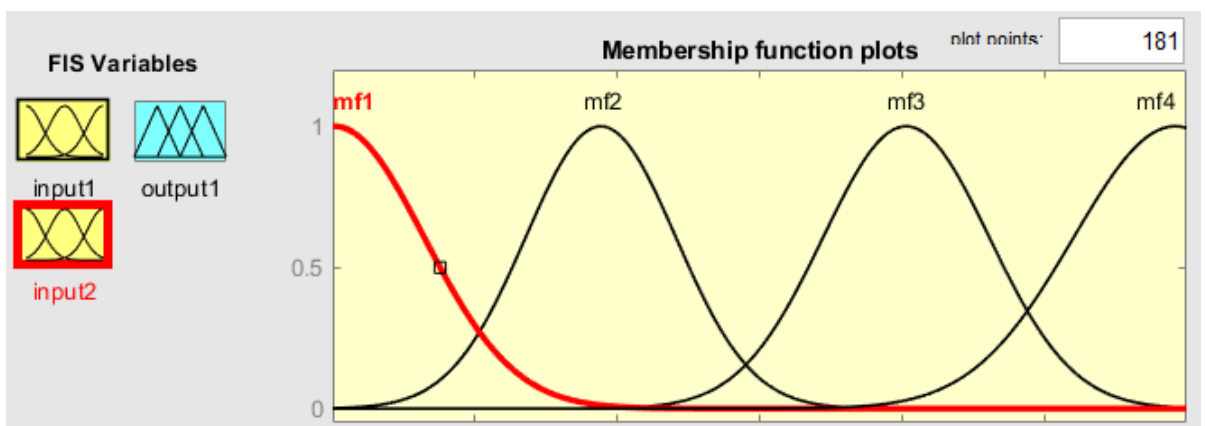


Рисунок 3.11 – Функції приналежності для входу №2

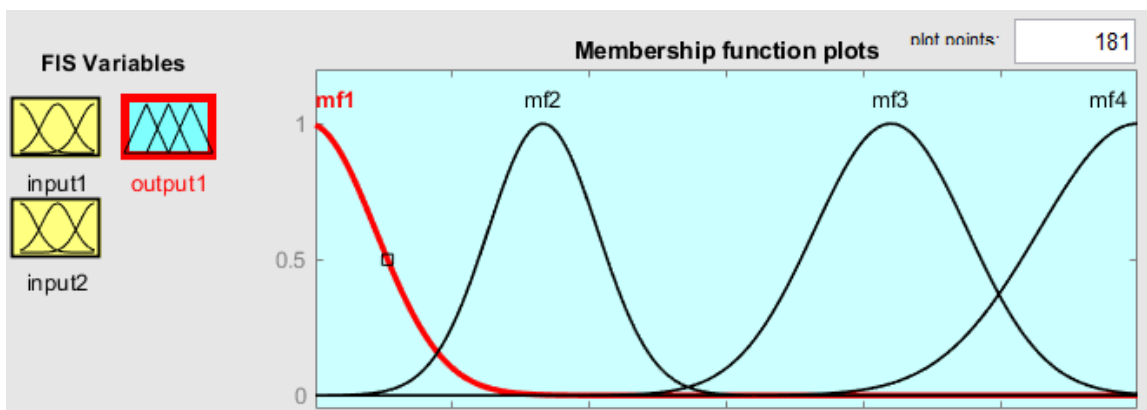


Рисунок 3.12 – Функції приналежності для виходу

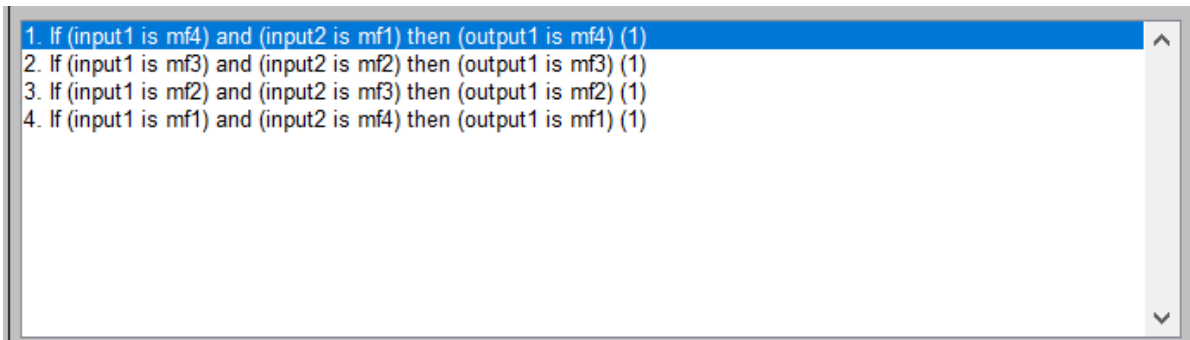


Рисунок 3.13 – База правил для Fuzzy-регулятора

На зображеннях налаштування показано налаштування Fuzzy-регулятора з функціями приналежності для двох вхідних змінних (input1 і input2) та однієї вихідної змінної (output1). Для кожної змінної використано по чотири функції приналежності (mf1, mf2, mf3, mf4), які забезпечують плавний перехід між рівнями завдяки оптимальному перекриттю. Вхідні змінні охоплюють весь діапазон значень, що допомагає отримати стабільність та точність регулятора. Вихідна змінна налаштована, щоб забезпечити чітке керування відповідно до заданих умов.

Промодельюємо контур об'єкта керування з каналом регулювання концентрації, порівнюючи якість регулювання для двох регуляторів.

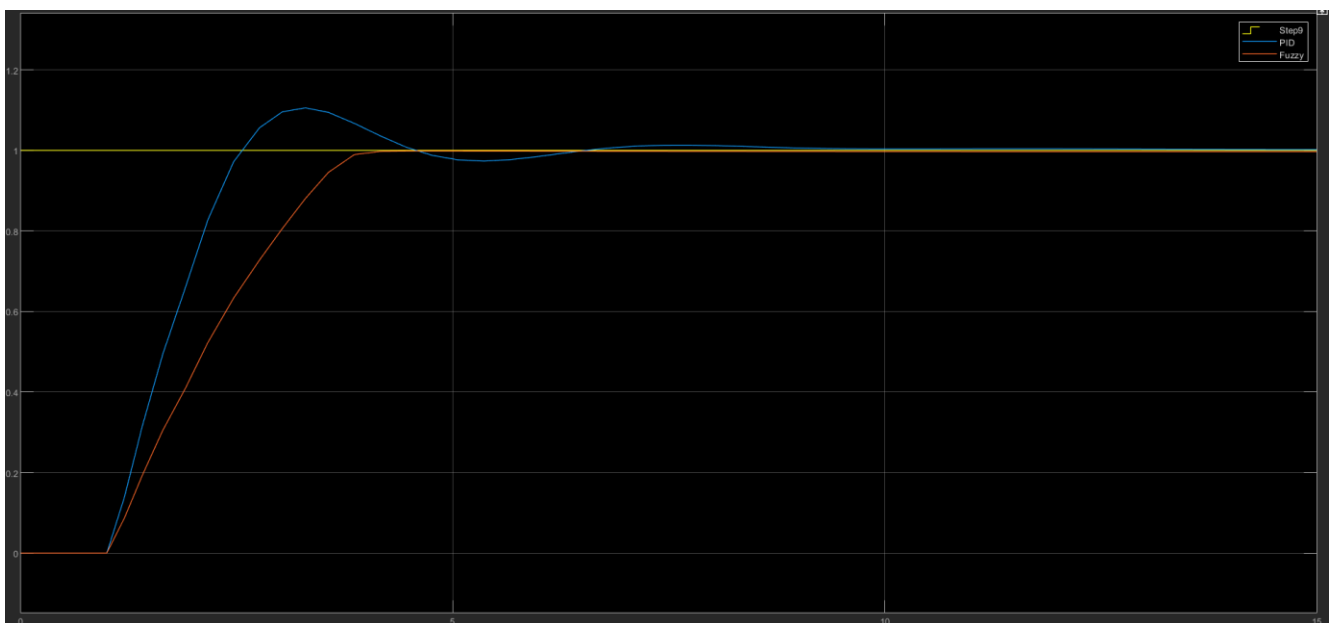


Рисунок 3.14 – Перехідна характеристика контуру концентрації

Промодельюємо контур при дії збурень



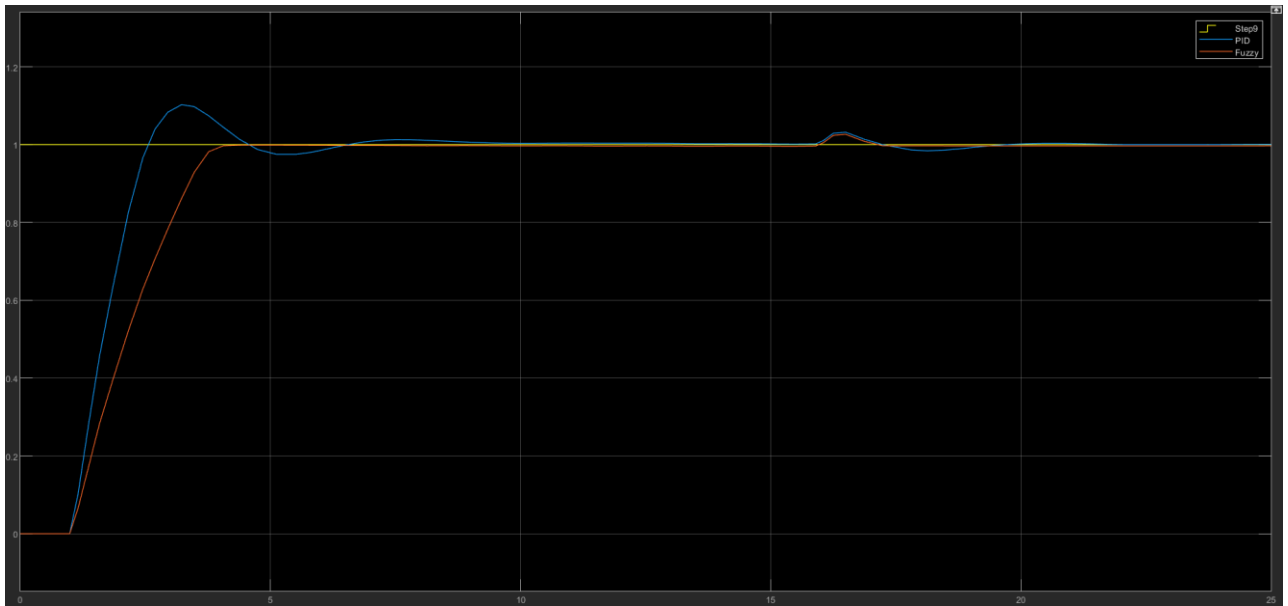


Рисунок 3.15 – Перехідна характеристика контуру концентрації

Таблиця 1 – Показники якості регулювання

	ПІД-регулятор	Fuzzy-регулятор
Перерегулювання	10%	0%
Час перехідного процесу	6,1 с	3,9 с

Проаналізувавши отримані результати можна сказати, що Fuzzy-регулятор показує кращі результати. У системи повністю відсутнє перерегулювання, що означає плавне досягнення встановленого значення без перевищення. Час перехідного процесу становить 3,9 с, що значно швидше порівняно з ПІД-регулятором. Це вказує на те, що система з нечітким регулятором досягає стабільного стану за менший час, забезпечуючи високу якість управління.

Зберемо схему в Matlab/Simulink для другого контуру – підтримання витрати на вході до абсорбера використавши отриманні передатні функції елементів моделі цього даного контуру з ПІД і Fuzzy-регуляторами.

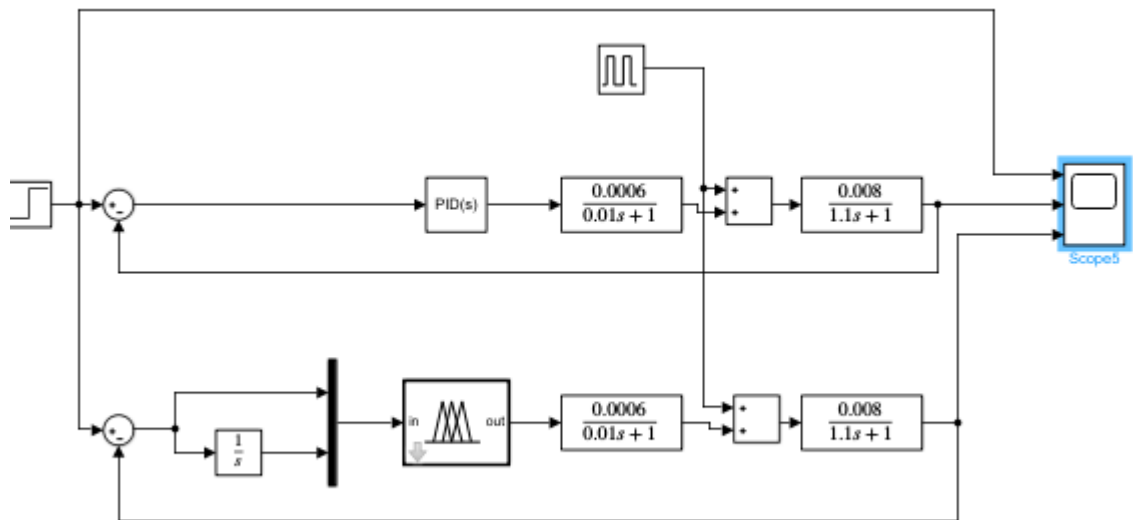


Рисунок 3.16 – Схема контуру регулювання витрати

Створимо базу правил та функції приналежності для вхідних і вихідних змінних для другого контуру.

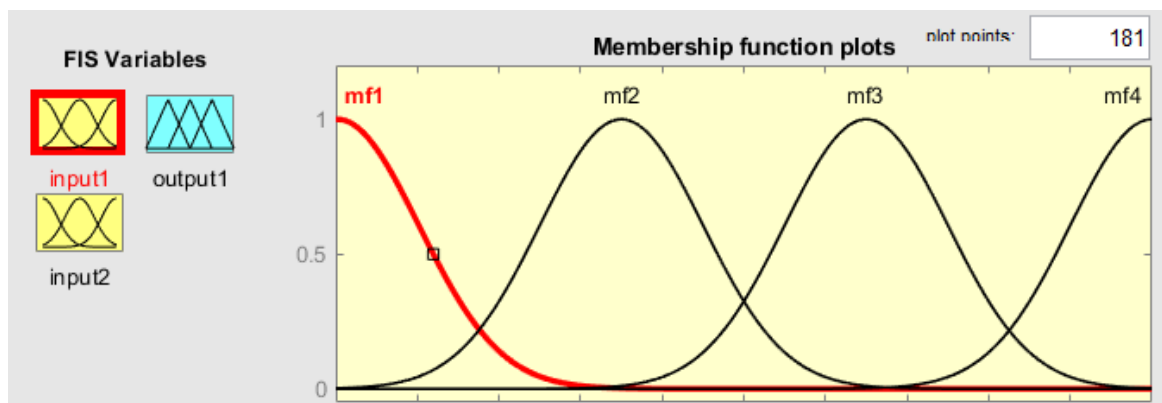


Рисунок 3.17 – Функції приналежності для входу №1

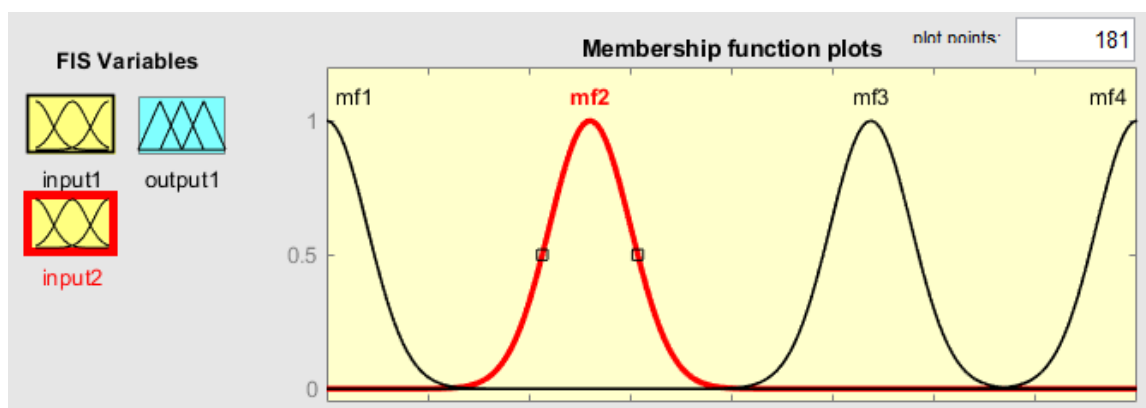


Рисунок 3.18 – Функції приналежності для входу №2

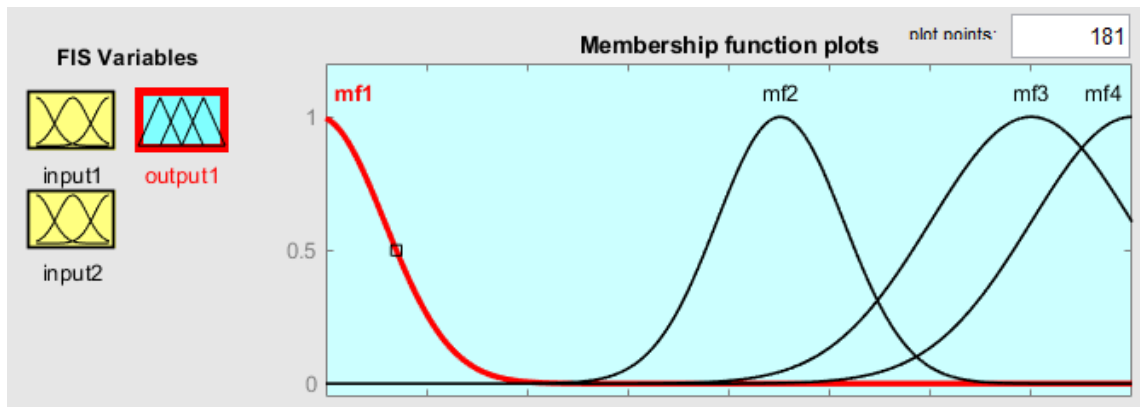


Рисунок 3.19 – Функції приналежності для виходу

```

1. If (input1 is mf4) and (input2 is mf1) then (output1 is mf4) (1)
2. If (input1 is mf3) and (input2 is mf2) then (output1 is mf3) (1)
3. If (input1 is mf2) and (input2 is mf3) then (output1 is mf2) (1)
4. If (input1 is mf1) and (input2 is mf4) then (output1 is mf1) (1)

```

Рисунок 3.20 – База правил для Fuzzy-регулятора

На зображеннях представлено налаштування нечіткого регулятора із функціями належності для двох вхідних змінних і однієї вихідної змінної. Для кожної змінної використано по чотири функції належності, які забезпечують плавний перехід між рівнями завдяки оптимальному перекриттю. Вхідні змінні охоплюють увесь робочий діапазон, щоб надати стабільну роботу та високу точність регулятора. Вихідна змінна налаштована так, щоб забезпечувати ефективне керування відповідно до заданих вимог.

Промодельюємо контур об'єкта керування з каналом регулювання витрати, порівнюючи якість регулювання для двох регуляторів.

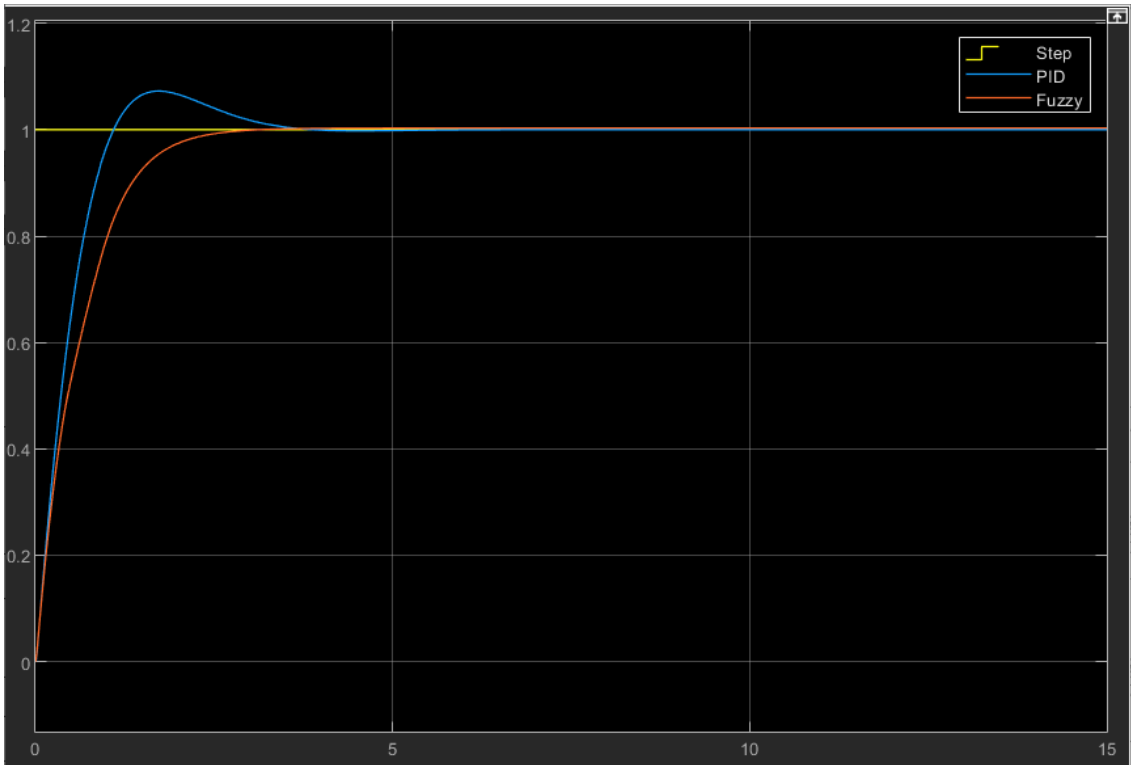


Рисунок 3.21 – Перехідна характеристика контуру витрати

Промодельюємо контур при дії збурень.

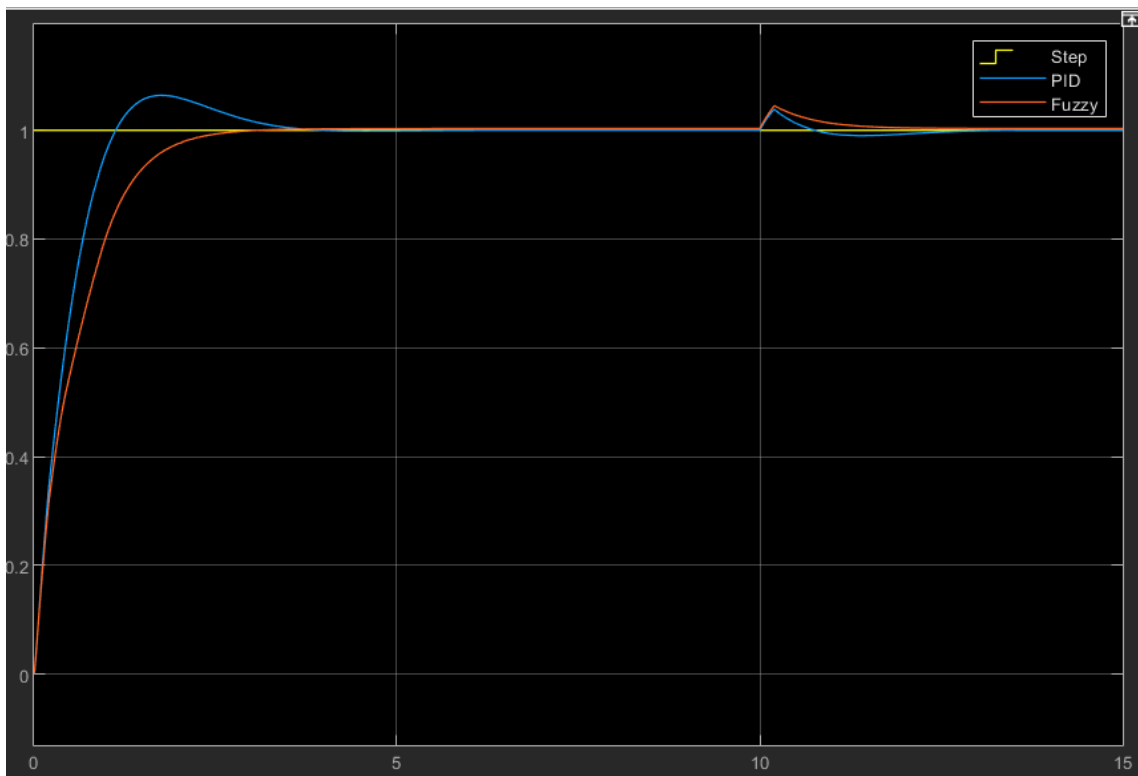


Рисунок 3.22 – Перехідна характеристика контуру витрати

Таблиця 2 – Показники якості регулювання

	ПІД-регулятор	Fuzzy-регулятор
Перерегулювання	9%	0%
Час перехідного процесу	3,2 с	2,5 с

Результати моделювання для двох контурів керування – підтримання концентрації та витрати – показують, що Fuzzy-регулятор демонструє кращі показники якості регулювання порівняно з ПІД-регулятором. Як видно з таблиць, перерегулювання при використанні Fuzzy-регулятора в обох випадках відсутнє, тоді як для ПІД-регулятора цей показник становить 10% та 9% відповідно. Це свідчить про перевагу Fuzzy-регулятора у забезпеченні стабільності перехідного процесу та мінімізації небажаних коливань.

Час перехідного процесу також є меншим для Fuzzy-регулятора. У першому контурі цей показник становить 3,9 с, що на 2,2 с менше, ніж у ПІД-регулятора, де час перехідного процесу становить 6,1 с. У другому контурі різниця також є: Fuzzy-регулятор забезпечує час 2,5 с порівняно з 3,2 с у ПІД-регулятора. Це вказує на здатність Fuzzy-регулятора швидше досягати заданого стану, що є важливим для динамічних систем.

Таким чином, отримані дані підтверджують переваги Fuzzy-регулятора, які раніше було припущено на основі його теоретичних особливостей, таких як адаптивність, гнучкість у налаштуванні та. У порівнянні з ПІД-регулятором, Fuzzy-регулятор забезпечує кращу якість регулювання завдяки відсутності перерегулювання та скороченню часу перехідного процесу. Завдяки меншому часу перехідного процесу та відсутності перерегулювань, Fuzzy-регулятор забезпечує стабільність системи, що є важливим для енергоефективного управління технологічним процесом. Як наслідок, така стратегія керування сприяє досягненню стабільної продуктивності, зменшенню енерговитрат і підвищенню ефективності роботи установки.

## РОЗДІЛ 4 СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ

### 4.1 Алгоритм роботи

Алгоритм управління установкою осушення природного газу, що представлений на рисунку 4.1, починається з ініціалізації системи управління, під час якої перевіряється працездатність системи та виконується підготовка до роботи. Після цього здійснюється перевірка відповідності початкових параметрів заданим. Якщо параметри не відповідають завданням, система надсилає повідомлення оператору, і процес повертається до етапу перевірки. Якщо параметри відповідають, виконується пуск установки, після чого запускаються підпрограми для управління технологічними параметрами.

Першою підпрограмою є контур концентрації, у якому виконується опитування датчика концентрації для визначення рівня вологості газу. На основі отриманих даних нечіткий регулятор розраховує оптимальні дії, після чого керуючий вплив передається на клапан для регулювання параметрів. Аналогічно працює контур витрати, в якому здійснюється опитування датчика витрати газу, обробка даних за допомогою Fuzzy-регулятора та регулювання потоку через керуючий вплив на клапан.

Після виконання підпрограм система переходить до моніторингу критичних показників, таких як тиск, температура, концентрація осушувального агента та витрата газу. Якщо виявлено відхилення критичних параметрів від норми, система активує сигналізацію на моніторі оператора. У разі повернення параметрів у межі норми процес продовжується, а якщо відхилення залишаються, здійснюється аварійна зупинка установки. Окрім цього, аварійна зупинка може бути ініційована вручну у випадку переривання роботи оператором. Алгоритм забезпечує стабільну та ефективну роботу установки осушення природного газу, використовуючи нечітку логіку для точного управління та зменшення ризиків аварійних ситуацій.

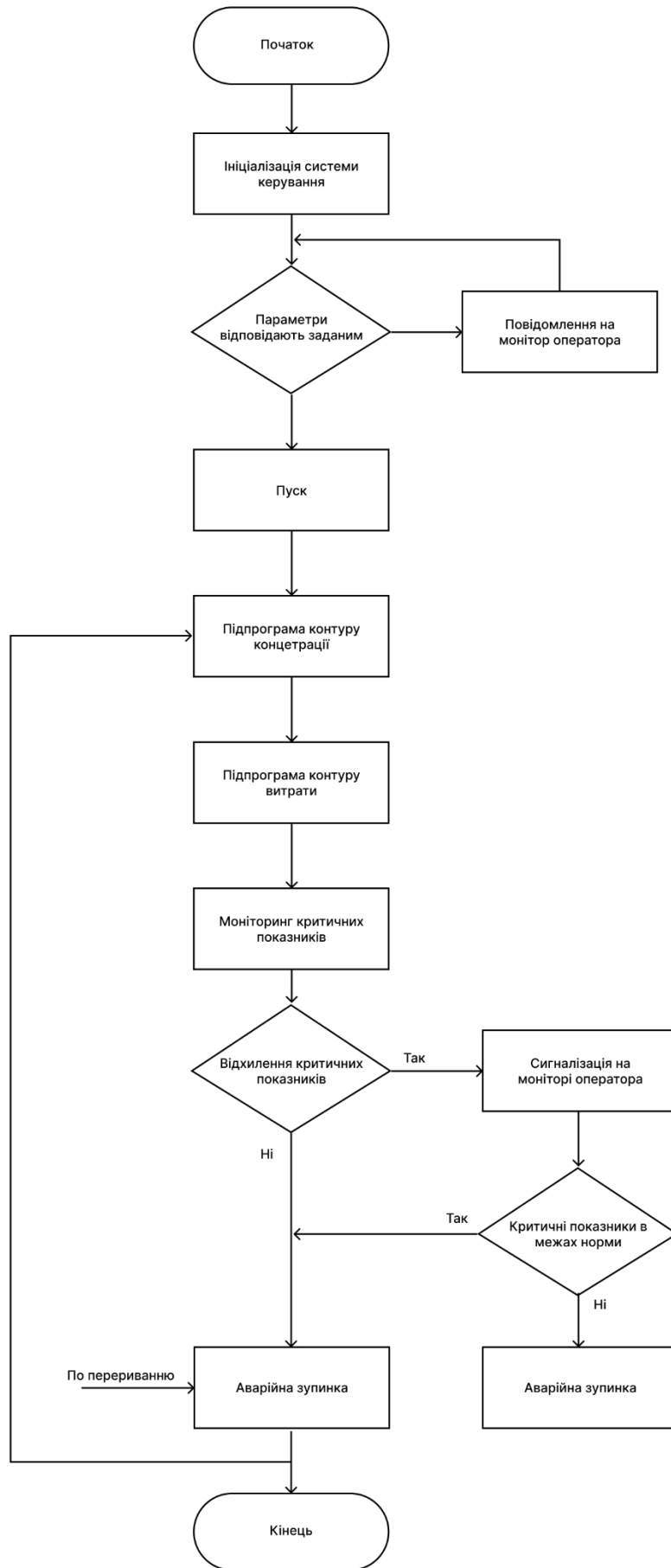


Рисунок 4.1 – Алгоритм роботи основної програми

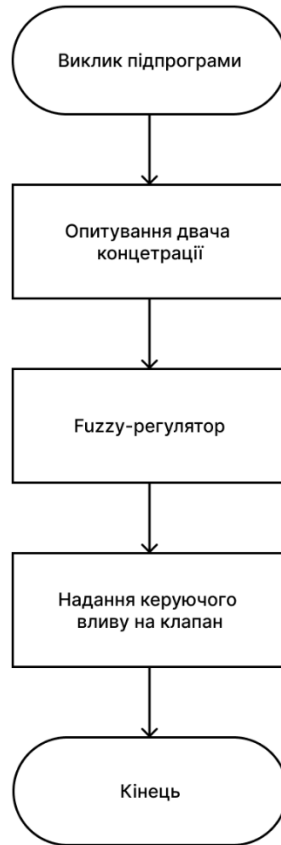


Рисунок 4.2 – Алгоритм підпрограми керування концентрацією

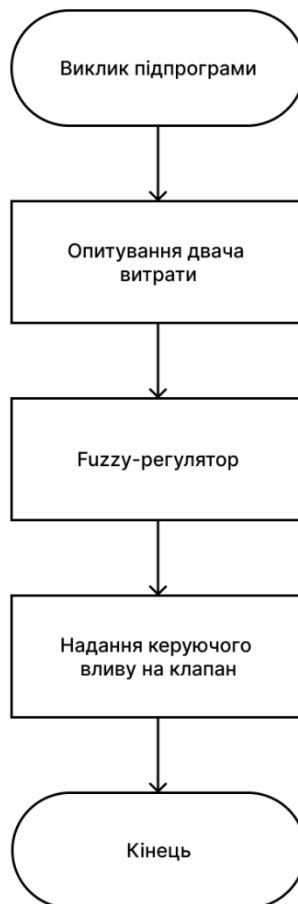


Рисунок 4.3 – Алгоритм підпрограми керування витратою



## 4.2 Scada система

SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) — це система, призначена для збору, обробки, відображення та управління даними технологічних процесів у реальному часі. Основним призначенням SCADA є забезпечення централізованого контролю та моніторингу виробничих процесів на об'єктах різних галузей, таких як енергетика, нафтогазова промисловість, водопостачання, хімічне виробництво та інші.

Основні функції SCADA-системи включають:

1. Моніторинг технологічних процесів. Система дозволяє візуалізувати процеси у вигляді графіків, схем, таблиць і отримувати оперативну інформацію про стан обладнання, значення датчиків і зміну параметрів у реальному часі.
2. Управління процесами. SCADA забезпечує можливість дистанційного управління обладнанням, такими як насоси, клапани, двигуни, та інші виконавчі механізми через інтерфейс системи.
3. Збір та обробка даних. Система накопичує інформацію, отриману від датчиків та інших пристроїв, проводить її обробку, аналіз і формування звітів для подальшого використання.

Створимо інтерфейс для Scada системи. Панель керування установкою осушення газу, створена у SCADA-системі, забезпечує зручне управління процесом і моніторинг його параметрів у реальному часі. Центральним елементом є абсорбційна колона, навколо якої розташовані елементи для відображення параметрів потоків, таких як тиск, температура, витрата та вологість. У системі є три клапани: перший регулює подачу газу у верхню частину системи, другий відповідає за потік у середній частині, а третій контролює вихідний потік. Клапани оснащені слайдерами для регулювання положення, а також кнопками для відкриття або закриття. На панелі також передбачені кнопки запуску, зупинки та

активації ручного режиму. Інтерфейс розроблений інтуїтивно, що дозволяє оператору легко контролювати всі основні аспекти роботи установки.

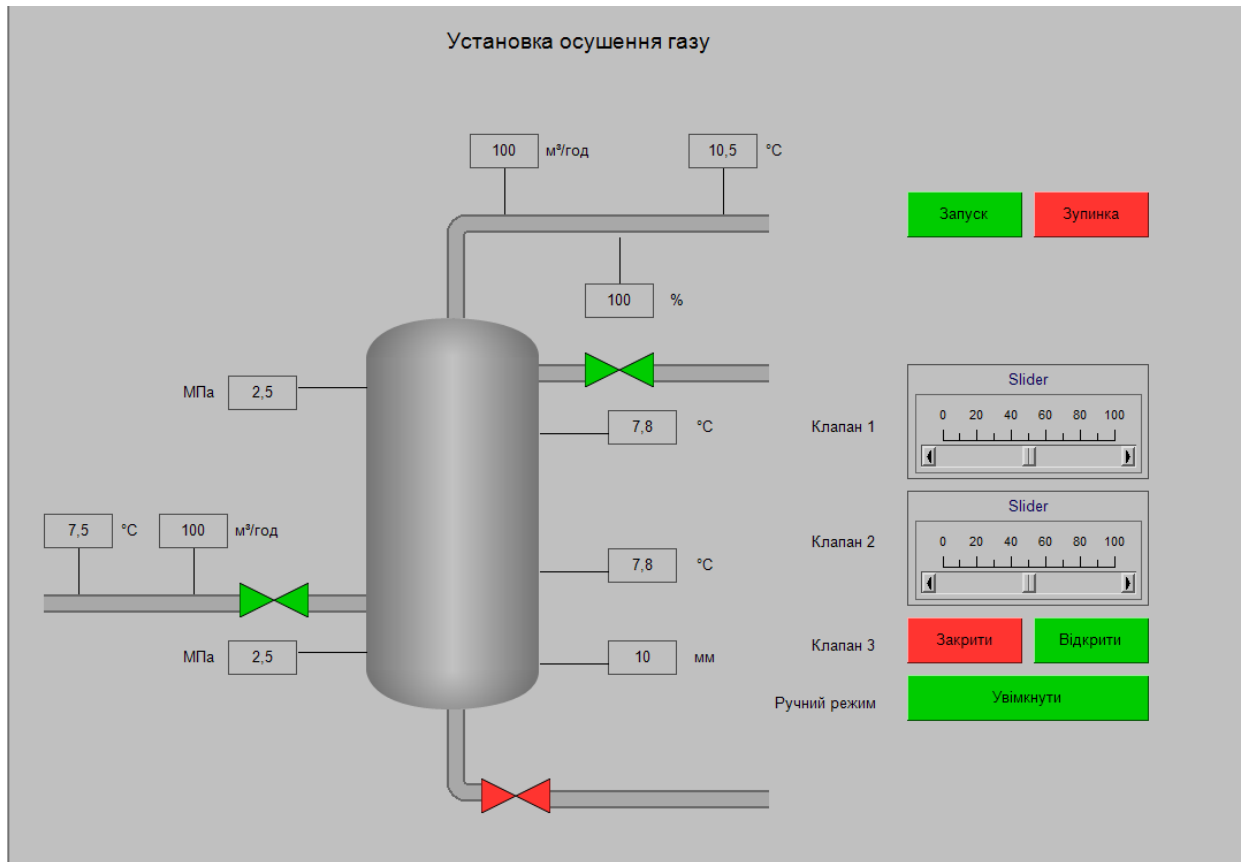


Рисунок 4.4 – Зображення панелі

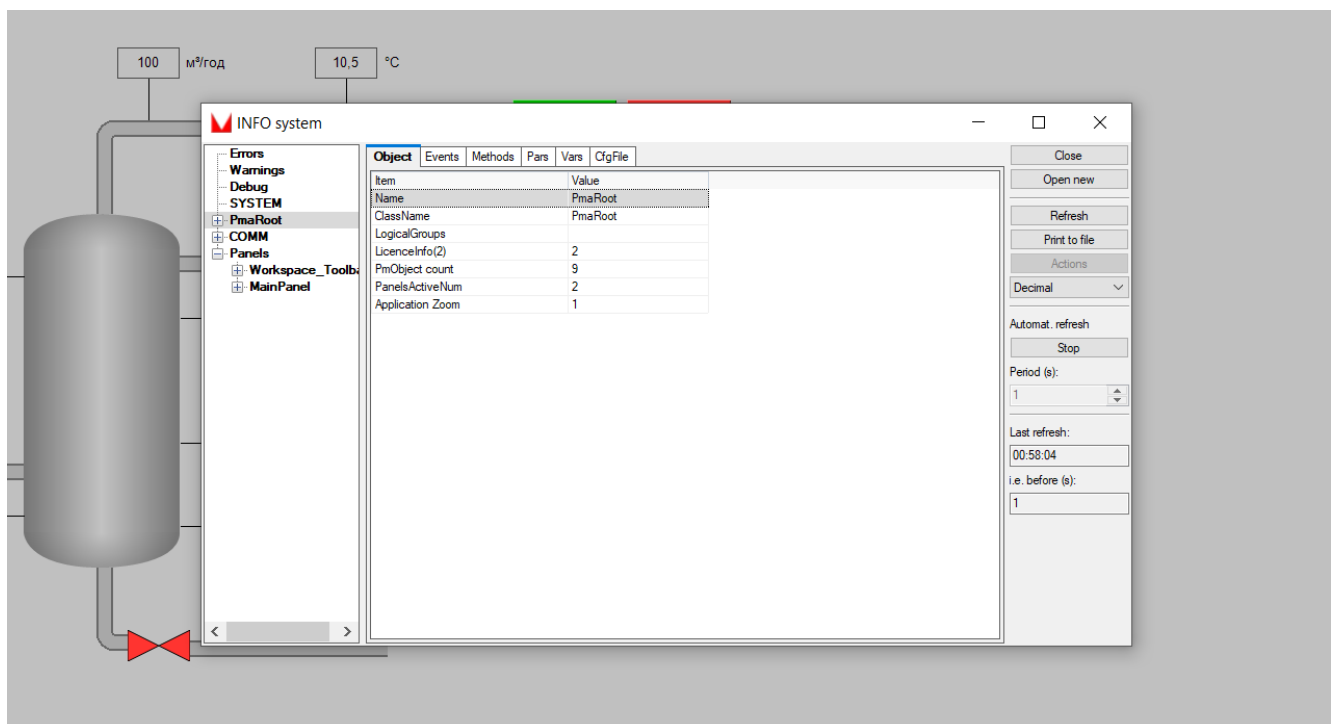


Рисунок 4.5 – Режим симуляції

## ВИСНОВКИ

У ході дослідження було ретельно проаналізовано процес осушення природного газу в абсорбційній колоні, з метою забезпечення енергоефективного керування системою. Було описано принципи функціонування установки та виявлено ключові фактори, які впливають на стабільність та енерговитрати процесу. Серед основних завдань дослідження — розробка і налаштування контурів керування, які регулюють процес осушення з мінімізацією витрат ресурсів.

Зокрема, описано принцип роботи контурів керування концентрацією та витратою газу, які забезпечують контроль над критичними параметрами процесу. Контур керування концентрацією дозволяє підтримувати стабільний рівень вологості газу на виході з колони, регулюючи подачу абсорбенту залежно від коливань концентрації вхідного потоку газу. Це, в свою чергу, сприяє підвищенню енергоефективності і забезпеченню надійності роботи системи. Контур керування витратою газу підтримує стабільність об'ємного потоку на вході в абсорбер, що дає можливість уникнути перевитрати абсорбенту та забезпечити оптимальні умови осушення.

Було сформовано математичну модель абсорбційного процесу осушення природного газу. Ця модель дозволяє описати динаміку взаємодії газу та абсорбенту в колоні, що допомагає краще зрозуміти процеси масообміну і вплив ключових параметрів на якість осушення. Модель включає рівняння матеріального та енергетичного балансу, які описують поведінку концентрації вологи. Також було порівняння двох регуляторів, Fuzzy та ПД, показало значні переваги Fuzzy-регулятора завдяки його адаптивності, гнучкості та здатності забезпечувати стабільність системи. Fuzzy-регулятор демонструє відсутність перегулювання та зменшення часу перехідного процесу в обох контурах керування, що підтверджує його ефективність у динамічних системах. Завдяки кращим показникам якості регулювання, використання Fuzzy-регулятора сприяє підвищенню енергоефективності управління технологічними процесами.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ДЖЕРЕЛ

1. Generowicz N. Overview of selected natural gas drying methods. *Architecture, civil engineering, environment*. 2020. Vol. 13, no. 3. P. 73–83. URL: <https://doi.org/10.21307/acee-2020-025> (date of access: 13.11.2024).
2. Importance of natural gas: fueling progress. *MET Group*. URL: <https://group.met.com/en/media/energy-insight/importance-of-natural-gas> (date of access: 13.11.2024).
3. Impact of absorbents and changes of parameters of absorber operation on the level of absorption drying of natural gas / K. Jumaev et al. *IOP conference series: earth and environmental science*. 2022. Vol. 1112, no. 1. P. 012006. URL: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1112/1/012006> (date of access: 13.11.2024).
4. С. О. Алфьоров С. В. П. КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ з дисципліни «ЗБІР І ПІДГОТОВКА ПРИРОДНИХ ГАЗІВ» ЧАСТИНА І. Харків, 2022.
5. Буденко С.Ф Б. В., Ялпачик Ф.ю. Конструкції і розрахунки параметрів абсорберів. Мелітополь : ТАВР. ДЕРЖ. АГРОТЕХНОЛ. УН-Т Ф-Т ІНЖЕНЕРІЇ ТА КОМП'ЮТЕР. ТЕХНОЛОГІЙ, 2016. 29 с.
6. Процеси та обладнання газороздільних установок. *Elearning SumDU*. URL: [https://elearning.sumdu.edu.ua/free\\_content/lectured:a431440315da9066760766d0c931a08acfc9ca64/latest/5762/index.html](https://elearning.sumdu.edu.ua/free_content/lectured:a431440315da9066760766d0c931a08acfc9ca64/latest/5762/index.html) (дата звернення: 13.11.2024).
7. Лекція №9 основні напрямки та методи зниження екологічного ризику забруднення оточуючого середовища. *Кафедра хімії середовища та хімічної освіти – Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника*. URL: <https://chemeducation.pnu.edu.ua/wp-content/uploads/sites/14/2020/03/Лекція-№9.pdf> (дата звернення: 13.11.2024).
8. Т.Ю. Гіріч Т. Є., П.в Рябік. Конспект лекцій з курсу “основні процеси та апарати хімічної технології” розділ “глибоке охолодження”. Дніпропетровськ : Конспект лекцій з курсу "Основні процеси та апарати хім. технології". Розд. “Глибоке охолодження” для студентів усіх спец., 2010. 31 с.

9. Петросян А.Р, Петросян Р.В, Підтиченко О.В. Оптимізація моделі підрегулятора на базі цифрового фільтру. Т. 32 (71) № 4 2021.
10. D. S. Hooda, Vivek Raich. Fuzzy Logic Models and Fuzzy Control. Alpha Science International Ltd., 2016. 408 p.
11. Тищенко А. Бернуллі рівняння. ВУЕ. URL: <https://vue.gov.ua/Б%?%> (дата звернення: 13.11.2024).
12. Учасники проектів Вікімедіа. Закон Бернуллі – Вікіпедія. *Вікіпедія*. URL: [https://uk.wikipedia.org/wiki/Закон\\_Бернуллі](https://uk.wikipedia.org/wiki/Закон_Бернуллі) (дата звернення: 13.11.2024).
13. ЛЕКЦІЯ № 3 Характеристика руху рідин Змістовий модуль 1 “Основи гідравліки”.
14. В.М. Гудь Б. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з навчальної дисципліни "Моделювання систем автоматизації". Рівне : МОН України Нац. ун-т вод. госп-ва та природокористування, 2013. 50 с.
15. Лазарєв Ю. Ф. Лекції з навчальної дисципліни "Основи теорії чутливих елементів систем орієнтації – 3". Київ : НТУУ "Київ. політехн. ін-т" Каф. приладів і систем орієнтації і навігації, 2015. 50 с.
16. Сучасна теорія управління / Ю. М. Ковриго та ін. 2-ге вид. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. 155 с.