

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»  
(повне найменування вищого навчального закладу)

Навчально-науковий інститут інформаційних технологій та робототехніки  
(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))

Кафедра автоматики, електроніки та телекомунікацій  
(повна назва кафедри (предметної, циклової комісії))

## Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи

бакалавр

(освітньо-кваліфікаційний рівень)

на тему **Автоматизація процесу метанування вуглецю**

Виконав: студент 4 курсу, групи 401МЕ  
спеціальності 141 «Електроенергетика,  
електротехніка та електромеханіка»  
(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

Погрібний О.Ю.

(прізвище та ініціали)

Керівник Шефер О.В.

(прізвище та ініціали)

Рецензент Єрмілова Н.В.

(прізвище та ініціали)

# РЕФЕРАТ

кваліфікаційної роботи

«Автоматизація процесу метанування вуглецю»

Робота містить 51 сторінку, 30 ілюстрацій, 7 таблиць, 15 використаних джерел.

**Ключові слова:** адаптація, запірна арматура, корекція інтегрального насичення, контролер, нелінійність.

**Метою кваліфікаційної роботи бакалавра** є розроблення автоматизованої системи керування технологічним процесом метанування оксидів вуглецю з використанням сучасної елементної бази.

В якості ідеї розроблена функціональна схема з 15 контурами контролю та 3 контурами регулювання. Були визначені параметри, що підлягають контролю та регулюванню, для яких було підібрано відповідне обладнання. Для визначення фізичних параметрів (витрата, тиск, температура, концентрація) використовували датчики з уніфікованим вихідним сигналом.

Для електропривода запірної арматури була підібрана оптимальна система керування, проведено математичне та імітаційне моделювання. Результати динамічних досліджень довели, що криві швидкості та моменту дозволяють уникнути таких явищ як гідродинамічний удар у процесі відкриття/закриття арматури, знижують коливання моменту електроприводу при гальмуванні більш ніж в 2 рази, дають можливість запобігти пошкодженню конструкції запірної арматури при різкому зриві після тривалих простоювань.

## ABSTRACT

### of the qualification work «Automation of the process of carbon methanation»

The work contains 51 pages, 30 illustrations, 7 tables, and 15 sources used.

Keywords: adaptation, shut-off valves, correction of integral saturation, controller, nonlinearity.

The purpose of the bachelor's qualification work is to develop an automated control system for the technological process of carbon oxide methanation using a modern element base.

As an idea, a functional diagram with 15 control loops and 3 control loops was developed. The parameters subject to control and regulation were determined, for which the appropriate equipment was selected. To determine the physical parameters (flow, pressure, temperature, concentration), sensors with a unified output signal were used.

An optimal control system was selected for the electric drive of the shut-off valves, mathematical and simulation modeling was carried out. The results of dynamic studies have proven that the speed and torque curves allow to avoid such phenomena as hydrodynamic shock during the opening/closing of the valve, reduce the torque fluctuations of the electric drive during braking by more than 2 times, and make it possible to prevent damage to the design of the shut-off valve in the event of a sudden failure after long downtimes.

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»  
Інститут Навчально-науковий інститут інформаційних технологій та  
робототехніки  
Кафедра Автоматики, електроніки та телекомунікацій  
Ступінь вищої освіти Бакалавр  
Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри автоматичної,  
електроніки та телекомунікацій

О.В. Шефер

«01» квітня 2025 р.

**ЗАВДАННЯ  
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ БАКАЛАВРА**

*Погрібному Олексію Юрійовичу*

1. Тема проекту (роботи) **«Автоматизація процесу метанування вуглецю»**.  
**Керівник проекту Шефер Олександр Віталійович, д.т.н., професор,**  
затверджена наказом вищого навчального закладу №306/1 ф.а від 03.03.2025 року.
2. Строк подання студентом проекту (роботи) 10.06.2025р.
3. Вихідні дані до проекту (роботи) тиск у трубопроводі для азоту - 3,65 МПа; температура газу – 60 °С; тиск у трубопроводі водню - 1,4-1,6 МПа; витрата азоту 5000 м<sup>3</sup>/год; температура неочищеного газу – 300 °С; тиск конвертованого газу – 1,6 МПа; тиск після теплообмінника – 1,6 МПа; концентрація газу - 10 Моль/моль.
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Каталітичне очищення конвертованого газу.осушка водню. Пуск установки каталітичного очищення газу від монооксиду та діоксиду вуглецю метануванням. Зупинка установки каталітичного очищення конвертованого газу від монооксиду та діоксиду вуглецю метануванням. Вибір параметрів контролю та регулювання технологічного процесу метанування оксидів вуглецю. Формування вимог та вибір електропривода запірної арматури. Структурна схема електропривода запірної арматури. Дослідження перехідних процесів у лінеаризованій системі. Розробка нелінійної системи асинхронного електроприводу з векторним керуванням. Розробка функціональної схеми автоматизації. Позначення приладів та опис контурів керування. Розрахунок та вибір технічних пристроїв автоматизації.
5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових плакатів):
  1. Актуальність, мета та задачі розроблення системи автоматизації технологічного процесу метанування оксидів вуглецю.
  2. Структурна схема електропривода запірної арматури.

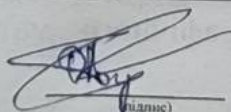
3. Синтез системи керування електроприводом запірної арматури.
4. Розроблення нелінійної системи асинхронного електроприводом з векторним керуванням.
5. Дослідження динамічних режимів роботи електропривода запірної арматури.
6. Функціональна схенма автоматизації метанування вуглецю.
7. Схема електрична принципова автоматизованої системи метанування вуглецю.
8. Висновки.

6. Дата видачі завдання 01.04.2025р.

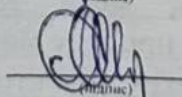
### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Пор. №	Назва етапів магістерської роботи	Термін виконання етапів роботи			Примітка (плакати)
1	Каталітичне очищення конвертованого газу. Сушка водню. Пуск установки каталітичного очищення газу від монооксиду та діоксиду вуглецю метануванням	13.04.25		10%	Пл. 1
2	Зупинка установки каталітичного очищення конвертованого газу від монооксиду та діоксиду вуглецю метануванням. Вибір параметрів контролю та регулювання технологічного процесу метанування оксидів вуглецю	22.04.25	I	20%	Пл. 2
3	Формування вимог та вибір електропривода запірної арматури. Структурна схема електропривода запірної арматури. Дослідження перехідних процесів у лінеаризованій системі	09.05.25		50%	Пл. 3,4
4	Розробка нелінійної системи асинхронного електроприводу з векторним керуванням. Розробка функціональної схеми автоматизації	22.05.25	II	60%	Пл. 5,6
5	Позначення приладів та опис контурів керування. Розрахунок та вибір технічних пристроїв автоматизації	29.05.25		70%	Пл. 7, 8
6	Оформлення кваліфікаційної роботи	10.06.25	III	100%	

Студент



Керівник роботи



Погрібний О.Ю.  
(прізвище та ініціали)

Шефер О.В.  
(прізвище та ініціали)

## ЗМІСТ

	стор.
ВСТУП	7
1. АНАЛІЗ ПРОЦЕСУ МЕТАНУВАННЯ ВУГЛЕЦЮ ТА ОБГРУНТУВАННЯ НАПРЯМКІВ МОДЕРНІЗАЦІЇ	
1.1 Каталітичне очищення конвертованого газу	9
1.2 Пуск установки каталітичного очищення газу від монооксиду та діоксиду вуглецю метануванням	11
1.3 Зупинка установки каталітичного очищення конвертованого газу від монооксиду та діоксиду вуглецю метануванням	13
1.4 Вибір параметрів контролю та регулювання технологічного процесу метанування оксидів вуглецю	15
2. МОДЕРНІЗАЦІЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДА ЗАПІРНОЇ АРМАТУРИ	
2.1 Формування вимог та вибір електропривода запірної арматури	17
2.2 Структурна схема електропривода запірної арматури	20
2.3 Дослідження перехідних процесів у лінеаризованій системі	21
2.4 Розробка нелінійної системи асинхронного електроприводу з векторним керуванням	23
2.5 Дослідження динамічних режимів роботи електропривода запірної арматури	28
3. РОЗРОБЛЕННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ ПРОЦЕСУ МЕТАНУВАННЯ ВУГЛЕЦЮ	
3.1 Розробка функціональної схеми автоматизації	31
3.2 Розроблення контурів керування	33
3.3 Розрахунок та вибір технічних пристроїв автоматизації	37
ВИСНОВКИ	49
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	50
ДОДАТОК А	53
ДОДАТОК Б	61

## ВСТУП

Оксид вуглецю (карбондioxid) є високотоксичним газом. Встановлено жорсткі гранично допустимі його концентрації: у робочій зоні – 20 мг/м<sup>3</sup>, в атмосфері (максимально-разова) – 5 мг/м<sup>3</sup>, середньодобова – 3 мг/м<sup>3</sup>. Оксид вуглецю CO утворюється в результаті неповного згоряння рідкого, твердого та газоподібного палива. Він входить до складу газів, що виділяються в процесах виплавки та переробки чорних та кольорових металів, вихлопних газів двигунів внутрішнього згоряння, газів, що утворюються під час вибухових робіт. Методи санітарного очищення викидів від оксиду вуглецю дорогі та недосконалі. Це не дозволяє піддавати санітарному очищенню значні обсяги викидів, що містять CO. Найчастіше виконують очищення газів від CO в технологічних цілях: наприклад, гази, що подаються на синтез аміаку, повинні містити не більше 5-10 промілей CO, який є каталітичною отрутою. Каталітичне окислення є найбільш раціональним методом знешкодження газів, що відходять промисловості від оксиду вуглецю. Однак поряд з оксидом вуглецю в залежності від умов конкретного виробництва в газах можуть містити інші токсичні компоненти: діоксид сірки, оксиди азоту, пари різних вуглеводнів. Крім того, в них зазвичай є діоксид вуглецю, кисень, азот, пари води і часто механічні домішки у вигляді різного пилу. Деякі з цих домішок можуть бути отрутою для каталізаторів. Актуальність роботи полягає в розробці сучасної надійної автоматизованої системи очистки оксидів вуглецю.

Тому **метою кваліфікаційної роботи бакалавра** є розроблення автоматизованої системи керування технологічним процесом метанування оксидів вуглецю з використанням сучасної елементної бази.

**Об'єктом кваліфікаційної роботи бакалавра** є установка для метанування оксидів вуглецю.

**Предметом кваліфікаційної роботи бакалавра** є дослідження можливості розробки автоматизованої системи метанування оксидів вуглецю.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати наступні **завдання:**

- проаналізувати технологічний процес каталітичного очищення конвертованого газу;
- проаналізувати пуск та зупинку установки каталітичного очищення конвертованого газу;
- обґрунтувати параметри контролю та регулювання, що підлягають автоматизації;
- виділити основні вимоги до електроприводу запірної арматури;
- розробити структурну схему електропривода;
- виконати дослідження перехідних процесів у лінеаризованій системі;
- розробити нелінійної системи асинхронного електроприводу з векторним керуванням;
- розробити функціональну схему автоматизації технологічного процесу метанування оксидів вуглецю;
- виконати позначення приладів та опис контурів керування;
- здійснити розрахунок та вибір технічних пристроїв автоматизації;
- розробити схему електричну принципову.

Для вирішення поставлених завдань в роботі використана методика, що включає в себе методи теорії автоматичного керування та методи математичного моделювання на ПК.

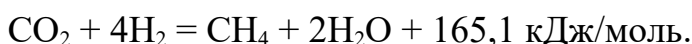
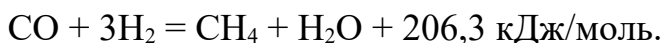
# 1. АНАЛІЗ ПРОЦЕСУ МЕТАНУВАННЯ ВУГЛЕЦЮ ТА ОБГРУНТУВАННЯ НАПРЯМКІВ МОДЕРНІЗАЦІЇ

## 1.1 Каталітичне очищення конвертованого газу

У процесі каталітичного очищення конвертований газ, що має витрату не більше 30 000 м<sup>3</sup>/год, надходить з відділення очищення газу від діоксиду вуглецю за допомогою розчину МЕА. Тиск газу не перевищує 1,6 МПа, а температура – 60 °С. Газ проходить через діафрагму (позначення FR 2п110-1) та подається в між-трубний простір теплообмінника (позначення 301). У теплообміннику (позначення 301) неочищений газ нагрівається до 300 °С (згідно з показаннями приладу позначення TR 334) за рахунок водню, що виходить з реактора метанування (позначення 302) [1].

У випадку неефективної роботи теплообмінника або часткової дезактивації каталізатора, а також під час пускового періоду для підігріву газу на вході в реактор метанування (позначення 302) активують вбудований електропідігрівач потужністю 400 кВт.

У реакторі метанування (позначення 302) завантажено 10 м<sup>3</sup> каталізатора. Процес каталітичного очищення газу від монооксиду та діоксиду вуглецю здійснюється через екзотермічні реакції гідрування:



Безпосередньо процес гідрування відбувається з високим ступенем перетворень та супроводжується значним виділенням тепла. Адіабатичне підвищення температури складає 74 °С для кожного відсотка прореагованого монооксиду та 60 °С для діоксиду вуглецю [2].

Відзначимо, що максимальна температура в реакторі метанування (позначення 302), зумовлена механічними властивостями матеріалу апарату, не повинна перевищувати 350 °С (за даними приладу позначення TR 2п338) при тиску не більше 16 МПа. У разі перевищення рівня оксидів вуглецю в реакторі метанування (позначення 302) та досягнення температури на вході полиці метанатора понад 300 °С (за даними приладу позначення TRC 2п337), автоматично подається байпасний газ у верхню зону реактора, обминаючи теплообмінник (позначення 301), через клапан (позначення TCV 2п337А, Б). Коли температура нижнього шару каталізатора досягає 350 °С (за даними приладу позначення TR 2п338), закривається електрозасувка (позначення 2п915), а конвертований газ, що подається на метанування, скидається на свічку через електрозасувку (позначення 2п911) та клапан (позначення PCV 2п20) [3].

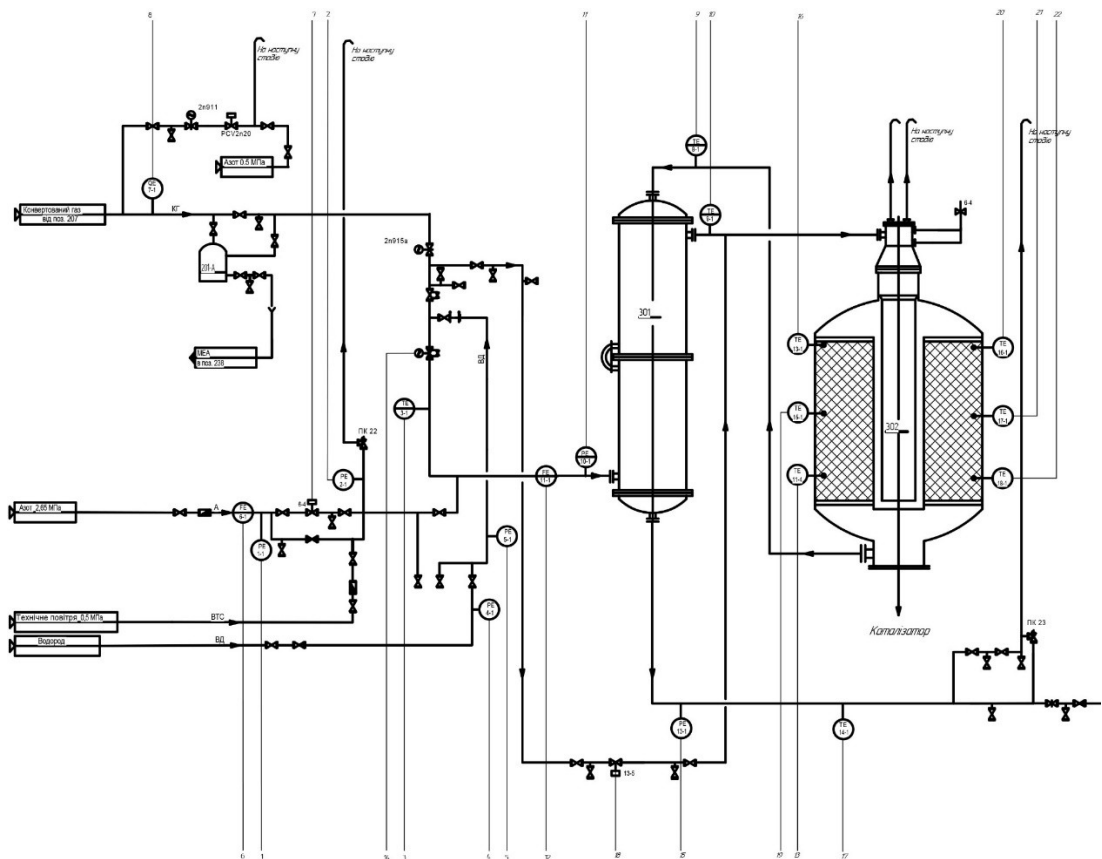


Рисунок 1.1 – Технологічний процес метанування вуглецю

У подальшому, після тонкої очистки конвертованого газу від оксидів вуглецю в реакторі метанування (позначення 302), очищений водень потрапляє в трубний простір теплообмінника (позначення 301). Тут він охолоджується до температури не вище 70 °С, одночасно нагріваючи газ, що проходить через між-трубний простір для подальшого доочищення в метанаторі. Надалі після теплообмінника водень проходить через скруббер (позначення 216), де частково охолоджується втрачаючи частину вологи. Через електрозасувку (позначення 2п918) водень подається в установку для осушення. Тиск у системі регулюється спеціальним клапаном (позначення PCV 2п226), який скидає водень на свічку [4].

## **1.2 Пуск установки каталітичного очищення газу від монооксиду та діоксиду вуглецю метануванням**

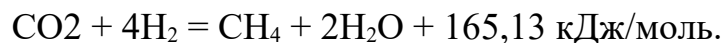
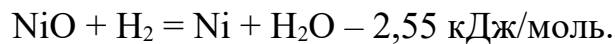
Перш ніж розпочинати запуск установки метанування, проводиться відновлення та розігрів відповідного каталізатора. Для цього розробляється схема розігріву та відновлення, встановлюються знімні ділянки на лініях азоту та водню, а також закривши наявну арматуру. Потім азот проганяють через усю систему, щоб об'ємна частка кисню на виході з установки була трохи більше 0,4 %. Наступним кроком буде подача розігрітого азоту до метанатора з витратою не менше 5 000 м<sup>3</sup>/год через електропідігрівач IP-10. При цьому, дуже важливим є підтримка тиску в установці в межах від 0,35 до 0,40 МПа за допомогою регулятора (позначення PRC 2п226). Надлишки азоту, в свою чергу, скидаються на свічку через електрозасувку (позначення 2п919).

Вищезазначений тиск зазвичай спостерігається під час розігріву, оскільки при атмосферному тиску та температурах нижче 180 °С створюються оптимальні умови для утворення карбонілу нікелю Ni(CO)<sub>4</sub> з нікелю та монооксиду вуглецю. Це призводить відповідно до втрати нікелю,

який є активним компонентом каталізатора. Отже газ, що виконує функцію відновлення, повинен містити якомога менше нікелю [1].

Відзначимо, що швидкість підвищення температури під час розігріву каталізатора становить трохи більше 30 °С на годину. Коли температура в шарі каталізатора досягне 200 °С, а на виході з метанатора буде не менше 150 °С, можна розпочати процес відновлення каталізатора. Для цього необхідно подати водень у лінію конвертованого газу через теплообмінник (позначення 301) за допомогою відкритої арматури на відповідній ділянці.

У процесі відновлення каталізатора відбувається підвищення температури, через наявність реакції відновлення оксиду нікелю до металу, а також паралельними реакціями метанування [2]:



Технічно температуру в реакторі підвищують зі швидкістю від 15 °С/год до 20 °С/год, до відповідних значень від 350 °С до 400 °С. У процесі відновлюючий газ, що виходить з метанатора, проходить шлях через трубний простір теплообмінника (позначення 301) та відповідно нагріває відновлюючий газ, який рухається по міжтрубному простору теплообмінника до метанатора. При такому режимі розігріву та навантаженні відновлювального газу в межах від 5 000 до 10 000 м<sup>3</sup>/год, час розігріву каталізатора до 400 °С становить від 10 до 12 годин. Доведено, що повне відновлення каталізатора при 400 °С відбувається за 20-24 години. Завдяки екзотермічному ефекту реакцій метанування та періодичному включенню і відключенню електропідігрівача, температура постійно підтримується на належному рівні.

Після добового відновлення, температуру в каталізаторному шарі знижують до робочого діапазону (від 270 °С до 290 °С) та визначають об'ємну частку монооксиду та діоксиду вуглецю у водневій суміші після

метанатору (монооксид вуглецю – 20 ppm, діоксид вуглецю – 30 ppm). У подальшому потрібно перекрити водневмісний газ та демонтувати знімні ділянки. Для безпечної роботи у подальшому встановлюють спеціальні заглушки [3].

Розглянемо операції, які необхідно здійснити для пуску метанатора. В першу чергу перевіряємо положення арматури на установці: ручна засувка та електрозасувка (позначення 2п915) на лінії подачі конгазу в теплообмінник (позначення 301) повинні бути закриті, а засувка на вході конгазу в скруббер (позначення 216) після метанатора відповідно – відкрита. Потім продуваємо апарати (позначення 301 та 302) азотом до повного видалення залишків горючих речовин. Набираємо тиск в апаратах азотом до 1,45 МПа.

Паралельно з відкриттям ручної засувки та електрозасувки (позначення 2п915), подаємо конвертований газ з метанатора зі скиданням на свічку (позначення 2п919) через клапан (позначення PCV 2п226). В свою чергу слідкуємо за тим, щоб температура в зоні реакції в каталізаторі метанатора була не вище 330 °С, подаючи холодний байпас через клапан (позначення TCV 2п337А (Б)) у верхню частину метанатора [4].

Переводимо очищений водень на осушування, після отримання об'ємної частки монооксиду вуглецю не більше 10 ppm та діоксиду вуглецю не більше 30 ppm в очищеному конвертованому газі з метанатора. Для цього поступово відкривають електрозасувку (позначення 2п918-1) та, разом з тим, закривають клапан (позначення PCV 2п226) та електрозасувку (позначення 2п919).

### **1.3 Зупинка установки каталітичного очищення конвертованого газу від монооксиду та діоксиду вуглецю метануванням**

Деталізуємо послідовність дій при зупинці установки метанування. Спочатку закриваємо електрозасувку (позначення 2п918-1) на лінії видачі очищеного водню в БО N1, одночасно відкриваючи свічку (позначення

2п919) та клапан (позначення PCV 2п226) для підтримки тиску в системі. Наступним кроком буде розвантаження конверсії природного газу до навантаження від 6000 до 7000 м<sup>3</sup>/год. Необхідно контролювати, щоб основні параметри не досягали блокувальних значень, а також стабілізувати технологічний режим. У подальшому потрібно зупинити подачу конвертованого газу в установку метанування, закривши електрозасувку (позначення 2п915) на лінії входу конгазу в теплообмінник (позначення 301) та перемістивши конгаз на свічку (позначення 2п911). При цьому уважно слідкуємо за балансом тиску у системі в межах від 1,5 до 1,6 МПа за допомогою клапана (позначення PCV 2п20).

Наступним кроком буде розвантаження та вимикання електропідігрівача (позначення IP-10). Потім поступово знижуємо тиск в агрегаті до 0,1 МПа та продуваємо апарати (позначення 301, 302) азотом до повного видалення горючого газу [2].

Останнім кроком буде закриття ручних засувок на лінії входу конгазу в теплообмінник (позначення 301) та на виході зі скрубера (позначення 216). Після продування азотом тиск знижуємо до атмосферного рівня та встановлюємо заглушки відповідно до схеми їх установки.

У випадку, якщо зупинка не викликана перевантаженням каталізатора, його пасивують та залишають під надлишковим тиском азоту в межах від 0,2 до 0,3 МПа. У випадку, коли зупинка все ж таки пов'язана з перевантаженням каталізатора метанування, перед вивантаженням його потрібно запасивувати та окислити.

Пасивація каталізатора полягає у поступовому зниженні його температури в потоці конвертованого газу до 280 °С зі швидкістю 50 °С на годину. Після цього подачу газу призупиняють та поступово знижують тиск у системі до 0,1-0,2 МПа, після чого в реактор подається продувний азот. Наступним етапом є продування системи азотом до повного видалення залишків горючих компонентів, а каталізатор, в свою чергу, охолоджується до температури від 40 °С до 60 °С. Коли каталізатор охолоджений, то йому

починають додавати повітря, поступово збільшуючи його кількість, поки об'ємна частка кисню не досягне 0,2-0,3 %. Знову ж таки важливо контролювати температуру в шарі каталізатора, яка повинна залишатися в межах 60-80 °С. Якщо відбудеться зниження температури каталізатора до температури навколишнього середовища, а об'ємна частка кисню в азоті досягне 1-2 %, подачу азоту терміново зупиняють. Якщо зупинка виявиться довготривалою, то каталізатор залишається під азотом [4].

Окислення каталізатора роблять перед його розвантаженням. При окисненні метанатор продувають повітрям протягом певного періоду часу, поки об'ємна частка кисню не досягне щонайменше 16 %. Вивантаження каталізатора відбувається безпосередньо через нижній люк реактора (позначення 302) шляхом зняття верхнього блоку разом з електропідігрівачем.

#### **1.4 Вибір параметрів, що належать контролю та регулюванню технологічного процесу метанування оксидів вуглецю**

Важливим фактором при проектуванні систем автоматизації виробничих процесів є параметри, які потрібно безперервно контролювати та регулювати. Також встановлюються точки введення керуючих впливів і канали їхнього проходження через об'єкт. Для цього розробляється схема взаємодії параметрів об'єкта, виділяються основні та додаткові канали передачі сигналів, а потім формуються окремі регульовальні контури, які компенсують вплив дій. За потреби основні регульовальні контури з'єднуються між собою, а параметри, що підлягають контролю, обираються так, щоб їхня кількість була мінімальною, але достатньою для повного відображення технологічного процесу. Зазвичай параметри процесу отримання пари розрізняють як вхідні та вихідні. Вхідні параметри це:  $G_0$  – витрата рідини;  $b_0$  – концентрація;  $P_{гр}$  – тиск гріючої пари;  $t_{к.р.}$  – температура

кипіння рідини (контрольовані параметри);  $h_p$  – рівень рідини (регульований параметр). Відповідно вихідні параметри –  $P_{т.п.}$  – тиск перегрітої пари.

Особливої уваги потребує контроль витрати та концентрації вихідної рідини при управлінні процесом отримання пари. Тиск гріючої та вторинної пари, а також температура кипіння рідини є не менш важливими індикаторами керування процесом отримання пари. Крім того, належного регулювання потребують тиск пари, рівень рідини в барабані та температура перегрітої пари.

Після детального аналізу параметрів технологічного процесу, що підлягають контролю та регулюванню, згрупуємо їх до таблиці 1.1:

Таблиця 1.1 – Параметри, що підлягають контролю та регулюванню технологічного процесу метанування оксидів вуглецю

Найменування параметра	Одиниці виміру	Межа зміни	Контроль	Регулювання
Тиск у трубопроводі для азоту	МПа	3,65	Так	--
Тиск у трубопроводі для азоту	МПа	--	Так	--
Температура газу	°С	60	Так	--
Тиск у трубопроводі водню	МПа	1,4-1,6	Так	--
Тиск у трубопроводі водню	МПа	1,4-1,6	Так	--
Витрата азоту	м <sup>3</sup> /год.	5000	Так	Так
Температура неочищеного газу	°С	300	Так	--
Тиск конвертованого газу	МПа	1,6	Так	--
Витрата конверт. газу	м <sup>3</sup> /год.	30000	Так	Так
Тиск після теплообмінника	МПа	1,6	Так	--
Температура неочищеного газу	°С	300	Так	Так
Температура у верхній частині реактора метанування	°С	300	Так	--
Температура у середній частині реактора метанування	°С	325	Так	--
Температура у нижній частині реактора метанування	°С	350	Так	--
Температура у верхній частині реактора метанування	°С	300	Так	--
Температура у середній частині	°С	325	Так	--

реактора метанування				
Концентрація газу	Моль/ моль МЕА	10	Так	--

### **Висновки за розділом**

Виконали аналіз процесу метанування оксидів вуглецю. Виявили сильні та слабкі сторони технологічного процесу. Окреслили параметри, що підлягають контролю та регулюванню.

## **2. МОДЕРНІЗАЦІЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДА ЗАПІРНОЇ АРМАТУРИ**

### **2.1 Формування вимог та вибір електропривода запірної арматури**

Не меш вагомим фактором ефективного функціонування електроприводу є відповідність встановленим критеріям та нормативним показникам якості. Коли проводиться технічний аналіз роботи запірної арматури та процесів, що відбуваються в динаміці (наприклад, пуск, реверс, навантаження, гальмування тощо), виникає необхідність в управлінні вихідними координатами. До вихідних координат відповідно швидкість та момент, що розвивається приводом. Отже, вибір правильної структури системи керування буде напрямком на подальше успішне функціонування системи в цілому.

Розглянемо одну з найцікавіших структур системи керування. Наприклад, систему підпорядкованого регулювання параметрів електроприводу або, так зване, векторне керування, яке орієнтується на вектор потокозчеплення ротора. Оскільки до основних властивостей трубопроводів відносять транспортування різноманітних рідин, навіть вибухонебезпечних, то важливо, щоб електропривод був виконаний з вибухобезпечних матеріалів. Спираючись на аналіз ринку запірної арматури, обираємо оптимальний варіант – це електроприводи компанії Auma.

Коли потрібно автоматизувати роботу трубопровідних клапанів, використовується багатооборотний привід Auma SA. Завдяки двосторонній муфті для обмеження крутного моменту, багатооборотний електричний привід призначений для загальнопромислового використання та вибухобезпечного середовища. Його основне призначення — регулювати промислові трубопровідні клапани, які закриваються в приміщенні, на вулиці або під навісом. Розглянемо основні технічні характеристики багатообертового приводу Auma SA:

1. Стандартна конфігурація – 400 Гц, 50 Гц.
2. Треступеневий.
3. Цей кінцевий вимикач легко регулюється.
4. Перемикач з двома обертами.
5. Вихід сигналу на панель керування.
6. Термічний вимикач та комутаційний пристрій підігріваються.
7. Керування в аварійній ситуації за допомогою маховика.
8. Тип підключення – EN ISO 5210 F10/F14.
9. Тип: привод EN ISO 5210 B3.
10. Клас захисту – IP68.
11. Крутний момент від 10 до 32 000 Нм.
12. Вихідна швидкість – від 4 до 180 об/хв.
13. Діапазон робочих температур – від -60 до +80 градусів.
14. Ду/відріз клапана – 500–600 мм.



Рисунок 2.1 – Загальний вигляд електропривода AUMA [8]

У сучасному світі електропривод з електронною системою керування призначений для багатофункціонального керування трубопровідною арматурою. Він успішно використовується у різних галузях вітчизняної промисловості, зокрема в нафтовій, газовій, нафтохімічній тощо. В електронному блоці керування електроприводу також реалізована система векторного керування, що неодноразово довела свою ефективність.

На рисунку 2.2 зображено блок керування електроприводом.



Рисунок 2.2 - Блок керування електроприводом АУМА

Електронний силовий модуль системи керування електроприводом ESD-VCX, що використовує перетворювач на основі IGBT та оснащений інтелектуальними функціями, може бути успішно інтегрований в автоматизовану систему керування технологічними процесами (АСК ТП) або в єдину систему телемеханіки підприємства.

Система керування електроприводом виконує такі функції:

- відкриття, закриття та регулювання прохідного перерізу трубопровідної арматури з можливістю точної зупинки в будь-якому положенні на всій довжині ходу завдяки динамічному гальмуванню електродвигуна;
- забезпечення будь-якого закону руху на всій довжині ходу окремо для відкриття та закриття арматури;
- автоматичне відключення електродвигуна при перевищенні встановлених зусиль;

- функціонування в аварійних ситуаціях: обрив однієї з фаз, випадкове чергування фаз, перевищення стандартних допусків напруги ( $\pm 30\%$  від номінального значення);
- забезпечення захисту протягом 50 секунд при перевищенні напруги на 50% та захист від мікросекундних імпульсів перенапруги до 2000 В;
- постійний контроль опору ізоляції між фазами та корпусом електродвигуна;
- всебічний захист обмоток електродвигуна від перегріву;
- безперервний захист від несанкціонованих або помилкових дій оператора;
- спрацювання сигналізації про відсутність електродвигуна в приводі;
- наявність цифрової та світлової індикації параметрів та режимів роботи.

Далі представлено поетапний синтез системи керування асинхронним електроприводом [11].

## **2.2 Структурна схема електропривода запірної арматури**

На рисунку 2.3 зображена структурна схема електроприводу АУМА, на якій візуалізовані його складові елементи [8].

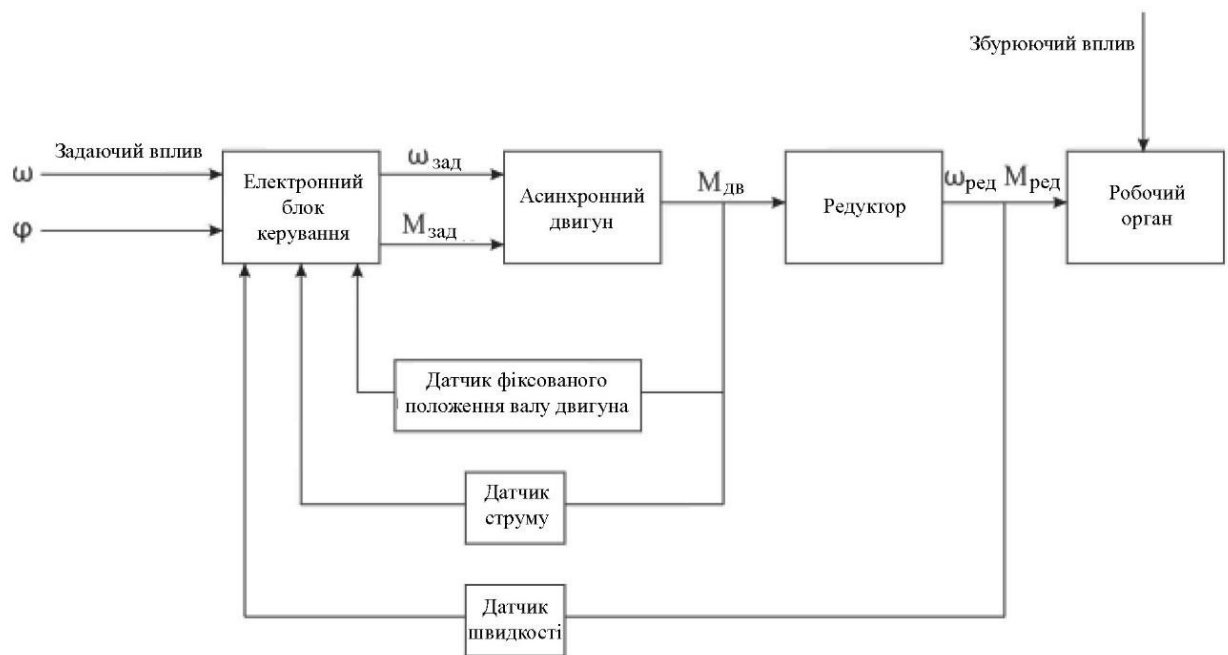


Рисунок 2.3 – Структурна схема електроприводу

Спочатку на вхід електронного блоку керування системи надходить керуючий сигнал із завданням на швидкість (тобто, крива розгону) та завдання на кут повороту, яке визначається в кожному конкретному випадку під час налаштування електроприводу.

Враховуючи вище досліджене, маємо, що у технічному вивченні електроприводів запірної арматури, спрямованому на підвищення їх надійності та стійкості до певних відмов у системі, динамічні режими мають ключове значення. До динамічних належать режим пуску, реверсу, навантаження та гальмування. Саме на цих етапах можуть виникати пошкодження або руйнування елементів електроприводу та запірної арматури.

Отже, щоб покращити динамічні характеристики електроприводу, потрібно проаналізувати його складові частини у розрізі деталей – окремо електродвигун, окремо редуктор та окремо систему керування електроприводом.

### 2.3 Дослідження перехідних процесів у лінеаризованій системі

На рисунках 2.4 та 2.5 візуалізовані імітаційні моделі двигуна в обертовій та нерухомій системах координат [5]. Рисунки 2.6 та 2.7 наглядно демонструють графіки перехідних процесів цих систем. У момент часу 0,3 с було застосовано навантаження, в 0,5 с – його скидання, а в 0,7 с – реверс.

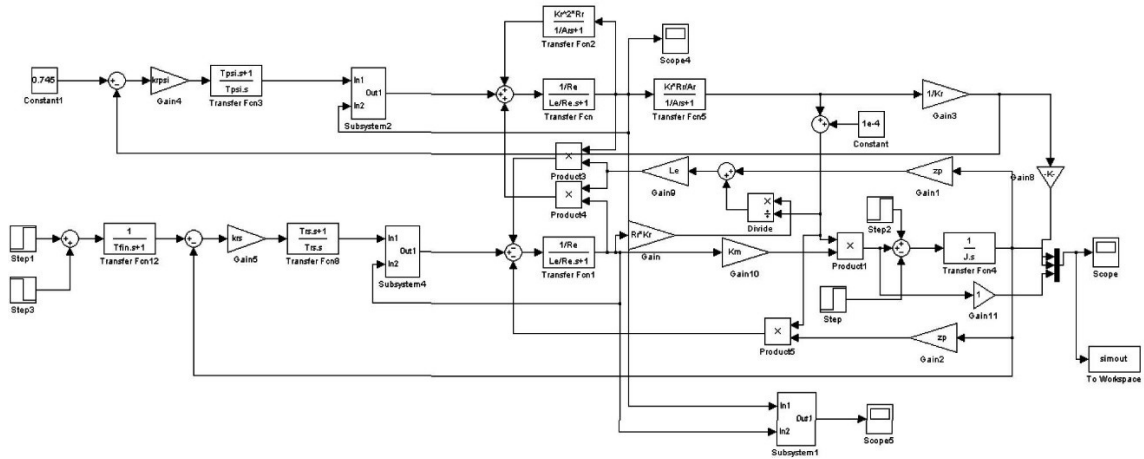


Рисунок 2.4 – Імітаційна модель двигуна в обертаючій системі координат

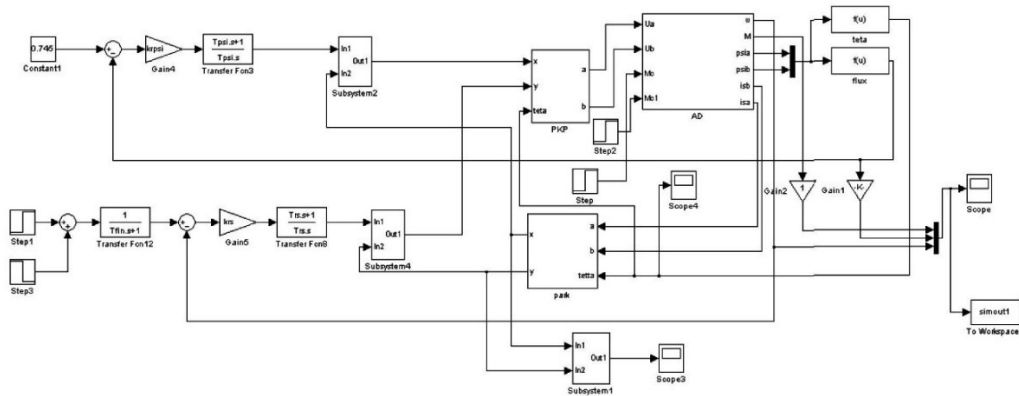


Рисунок 2.5 – Імітаційна модель двигуна у нерухомій системі координат

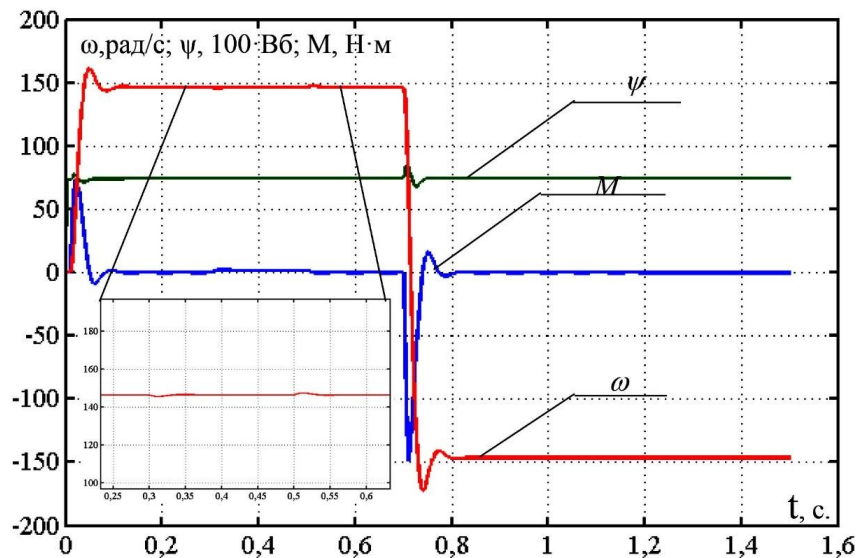


Рисунок 2.6 – Перехідні процеси в обертаючій системі координат

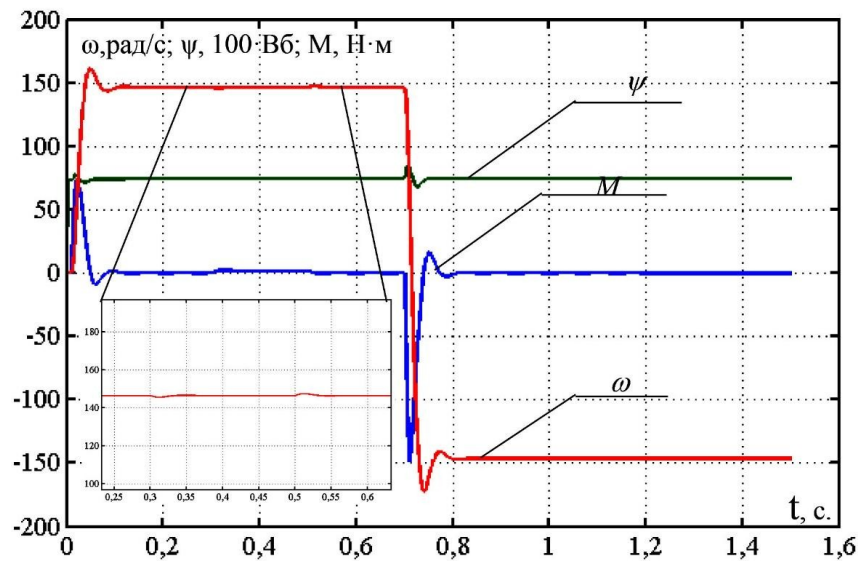


Рисунок 2.7 – Перехідні процеси в нерухомій системі координат

Отже, ідентичність графіків перехідних процесів дає змогу оцінити подібність моделей асинхронного двигуна в нерухомих та обертових системах координат.

## 2.4 Розробка нелінійної системи асинхронного електроприводу з векторним керуванням

При розробці нелінійної системи виникає необхідність розглянути обмеження в асинхронному електроприводі з векторним керуванням.

Встановлення обмежень на виході регуляторів в асинхронному електроприводі з векторним керуванням є необхідним з кількох причин, а саме:

- обмеження максимальної амплітуди напруги, що подається на обмотки асинхронного двигуна (АД), не повинна перевищувати 311 В;
- обмеження струмів, які протікають через обмотки статора АД;
- обмеження моменту, що розвивається на валу АД.

Отже, є сенс використовувати рекомендації щодо визначення рівня обмежень на виході регуляторів струму [5].

$$U_X \approx 0,312 \cdot U_{MAX}$$

$$U_Y \approx 0,95 \cdot U_{MAX}$$

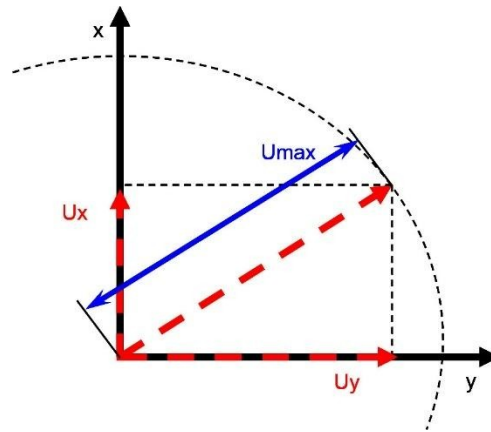


Рисунок 2.8 – Обмеження на виході регуляторів струму

$U_X$  – формування магнітного потоку в АД,

$U_Y$  – формування моменту на валу АД.

Значення  $U_X$  та  $U_Y$  можна змінювати без порушення умови:

$$\sqrt{U_X^2 + U_Y^2} \leq U_{MAX}$$

Приймаємо наступні значення:

$$U_X \approx 0,312 \cdot U_{MAX}$$

$$U_Y \approx 0,98 \cdot U_{MAX}$$

Деталізуємо рекомендації щодо встановлення обмежень на вихід регуляторів швидкості та потокозчеплення [6].

$$\sqrt{U_X^2 + U_Y^2} \leq U_{MAX}$$

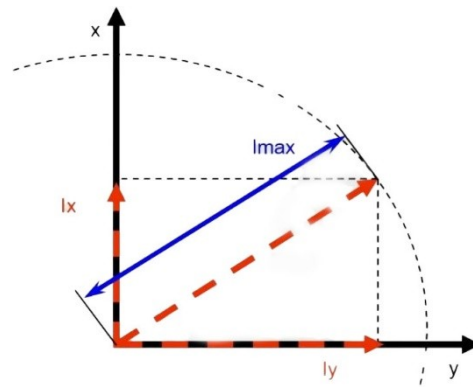


Рисунок 2.9 – Обмеження на виході регуляторів швидкості та потокозчеплення

$I_x$  – намагнічуюча частина складової струму статора АД.

$I_y$  – це складова пропорційна моментному зусиллю, що розвивається на валу АД.

$I_{MAX}$  – максимальний струм статора АД, короткочасно допускаємо навантаження від  $2..3 \cdot I_{НОМ}$ .

$I_{X MAX}$  – обмеження складової струму статора, що намагнічує. АД,  $1,5..2 \cdot I_{НОМ}$ .

$I_{Y MAX}$  – визначає максимальний момент, що розвивається на валу АД,  $2 \dots 3 \cdot I_{НОМ}$ .

У цьому випадку було прийнято такі значення:

$$I_{X MAX} = 2 \cdot I_{НОМ}$$

$$I_{Y MAX} = 3 \cdot I_{НОМ}$$

### **Адаптація системи керування до нелінійності.**

Природньо, що введення будь-яких обмежень з боку регуляторів, змінює характер перехідних процесів, які виникають під час оптимізації. Щоб покращити вигляд перехідних процесів, необхідні додаткові зміни до структурної схеми системи керування. Для цього реалізують такі заходи:

– використання ПІ-регуляторів з можливістю корекції інтегрального насичення;

– встановлення задатчиків інтенсивності у вхідних керуючих каналах для забезпечення плавної зміни завдань за швидкістю та потоком зчеплення.

### Корекція інтегрального насичення.

Визначено, що інтегральне насичення виникає, коли ПІ- або ПІД-регулятор протягом тривалого часу змушений компенсувати помилку, що перевищує межі діапазону керованої змінної. Оскільки вихід регулятора має обмеження, звести помилку до нуля стає відчутно складно, що може призвести до перерегулювання, коливань та затримок у процесі регулювання. Обмеження регуляторів досягаються за допомогою ланки насичення та зворотного зв'язку, який коректує інтегруючу складову, коли регулятор переходить у режим насичення [6].

Структурна схема ПІ-регулятора з обмеженням вихідного значення зображена на рисунку 2.10.

Розглянемо покроково як функціонує вищенаведена схема. На вхід регулятора подається сигнал  $e(t)$ , що представляє собою помилку регульованої величини. Цей сигнал  $e(t)$  пропорційно збільшується на коефіцієнт  $K_p$  і надходить до суматора. Одночасно  $e(t)$  потрапляє в інтегруючу частину, де підсумовується із сигналом зворотного зв'язку корекції інтегральної складової, який до моменту насичення дорівнює нулю.

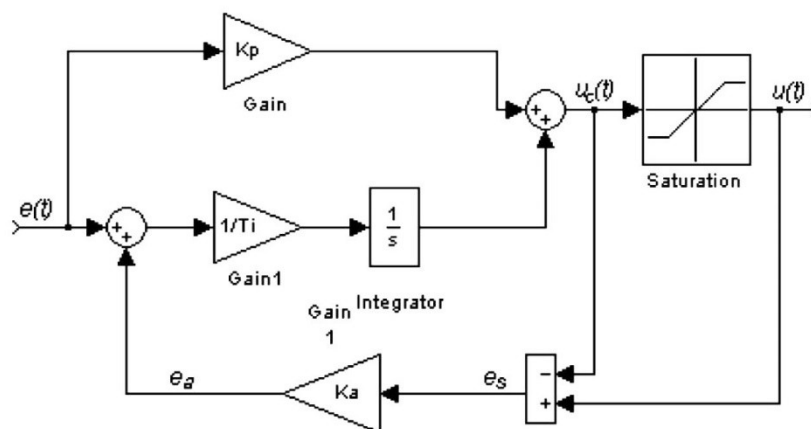


Рисунок 2.10 – Структурна схема ПІ-регулятора з обмеженням вихідного значення

Після цього коригований сигнал з інтегрування  $e(t) + e_a$  множить на  $1/T_i$ , інтегрується та підсумовується з пропорційною складовою. Далі необмежений сигнал ПІ-регулятора надходить на блок обмеження та у зворотний зв'язок для корекції інтегрального насичення [5]. У момент, коли регулятор ще не досяг насичення ( $e_a = 0$ ), як тільки він переходить у режим насичення, значення  $e_a$  стає негативним. Це призводить до того, що результуючий сигнал  $e(t) + e_a$  залишається на нулі. Зауважимо, що для отримання коректного сигналу корекції важливо правильно розрахувати коефіцієнт  $K_a$ .

### Дослідження перехідних процесів у системі електроприводу з обмеженнями.

Схематично модель асинхронного двигуна в стаціонарній системі координат, з урахуванням обмежень регуляторів та заданих інтенсивностей, представлена на рисунку 2.11.

Графіки перехідних процесів швидкості, моменту та потокозчеплення в динамічних режимах роботи наведені на рисунку 2.12. На момент 0,8 с. було зафіксовано початок навантаження, а на 1,2 с. – скидання навантаження. Реверсування двигуна відбулося на 1,5 с., а зупинка – на 3 с.

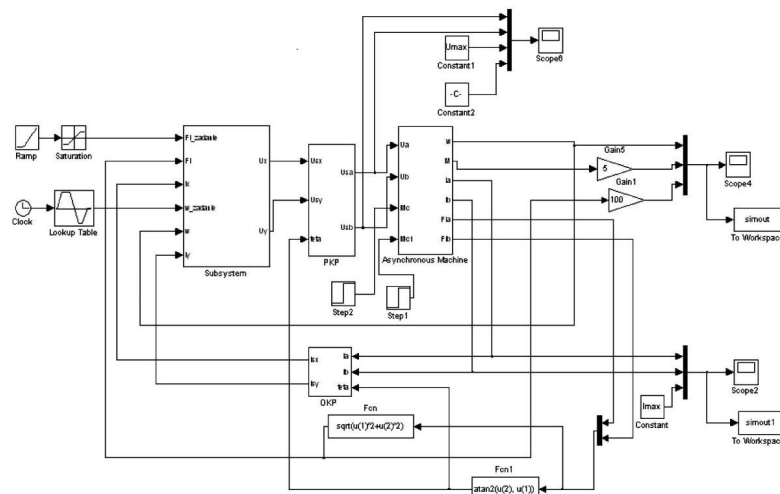


Рисунок 2.11 – Модель двигуна з обмеженнями регуляторів та задатчиками інтенсивності

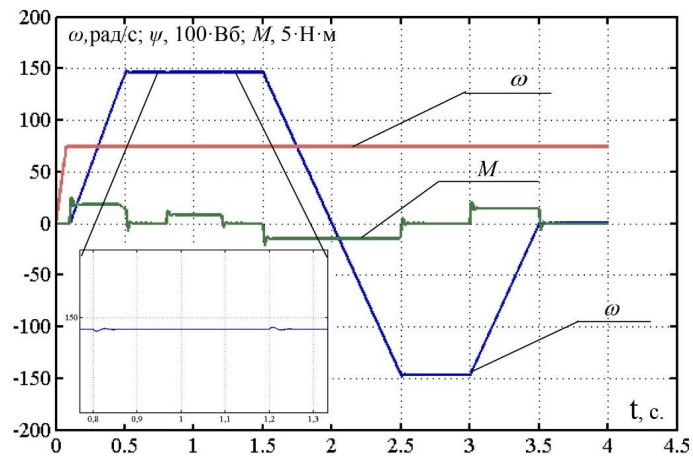


Рисунок 2.12 – Перехідні процеси швидкості, моменту та потокозчеплення у динамічних режимах роботи

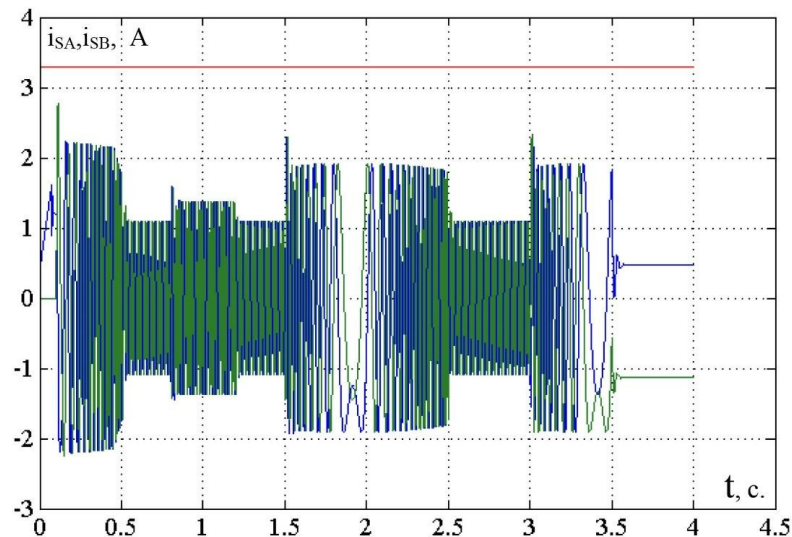


Рисунок 2.13 – Перехідні процеси струмів статора  $i_{SA}$ ,  $i_{SB}$  у динамічних режимах роботи

Рисунок 2.13 демонструє, що фазні струми залишаються в межах допустимих значень, що свідчить про правильний вибір параметрів обмеження.

Під час синтезу системи векторного керування були отримані передавальні функції для контурів регулювання струму, потокозчеплення та швидкості. Різниця між очікуваними та фактичними показниками якості не перевищує 10 відсотків, що свідчить про коректність налаштування регуляторних контурів. Контур швидкості був визначений з допустимою похибкою, так як взято більше значення малої постійної часу контуру

швидкості ( $T_{\mu c} = 32 \cdot T_{\mu p}$ ), щоб нівелювати взаємний вплив контурів швидкості та потокозчеплення. Адаптація системи керування до нелінійностей здійснена за допомогою ПІ-регуляторів, які мають можливість корекції інтегрального насичення. В свою чергу, зможемо зменшити коливання та скоротити час перехідного процесу. Вказані характеристики системи матимуть позитивний вплив на електропривод у динамічних режимах.

## 2.5 Дослідження динамічних режимів роботи електропривода запірної арматури

Застосування задатчиків інтенсивності та їх вплив на перехідні процеси. Для вивчення динамічних режимів роботи асинхронного електроприводу, таких як пуск, навантаження та гальмування, були використані задатчики інтенсивності, зокрема задані криві швидкості та моменту електроприводу. За допомогою програмного середовища Advanced Grapher було графічно побудовано криву завдання моменту електроприводу та ділянку гальмування кривої швидкості, які візуалізовані на рисунках 2.14 та 2.15 відповідно [7].

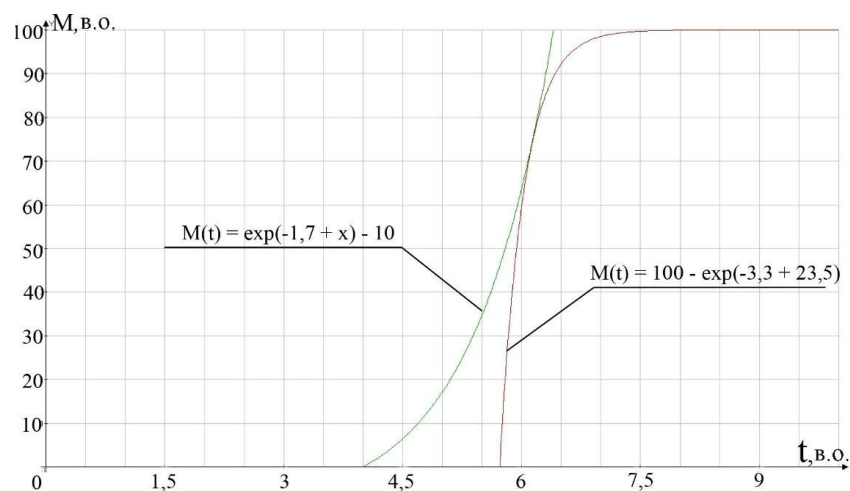


Рисунок 2.14 – Графік кривої завдання моменту електроприводу

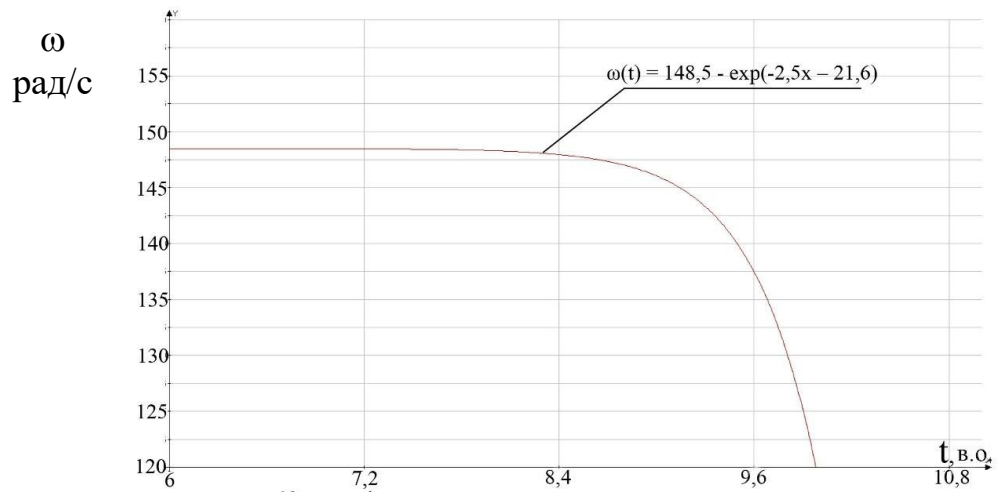


Рисунок 2.15 – Графік ділянки початку гальмування кривої завдання швидкості електроприводу

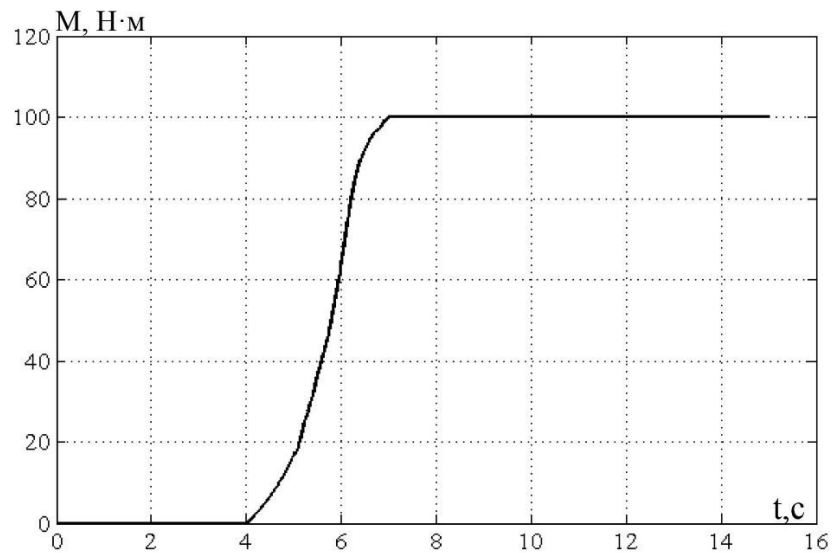


Рисунок 2.16 – Крива завдання моменту, реалізована у середовищі Matlab

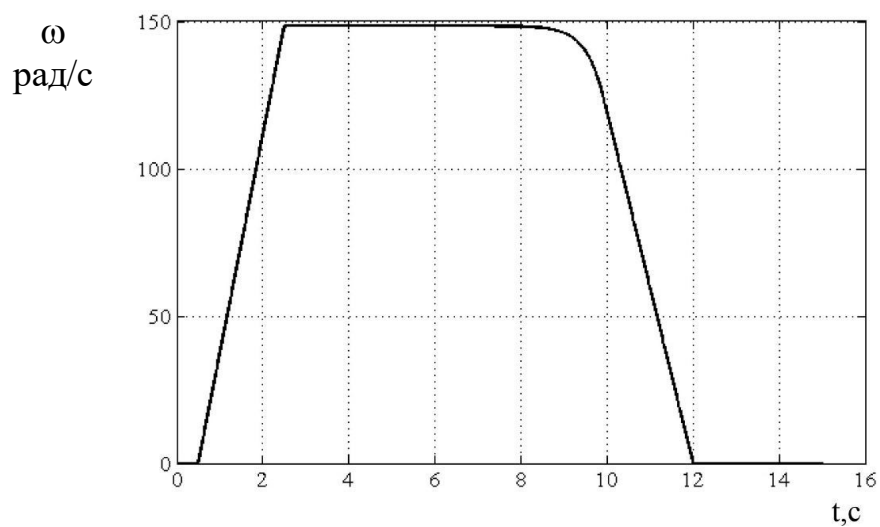


Рисунок 2.17 – Крива завдання швидкості, реалізована у середовищі Matlab

Отже, крива, яку потрібно було знайти, отримана шляхом апроксимації двох експоненційних залежностей в єдину.

Наступним кроком, за допомогою трасування, дані залежностей були реалізовані в середовищі Matlab Simulink [5].

Наші дослідження доводять, що використання задатчиків інтенсивності у вхідних каналах керування зменшують вплив нелінійностей, які існують в системі. Окрім інтенсивності зміни сигналу, затримка у формуванні завдання в каналі швидкості сприяє більш ефективному використанню ресурсів джерела.

#### Висновок за розділом

Розроблена структурна схема електропривода запірної арматури. Проведено математичне та імітаційне моделювання асинхронного двигуна запірної арматури. Ідентичність графіків перехідних процесів дозволяє зробити висновок про ідентичність моделей асинхронного двигуна в нерухомій та нерухомій системах координат. Введено обмеження на виході регуляторів в асинхронному електроприводі з векторним керуванням та виконано його дослідження. Застосовано задатчик інтенсивності та його вплив на перехідні процеси.

### **3. РОЗРОБЛЕННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ ПРОЦЕСУ МЕТАНУВАННЯ ВУГЛЕЦЮ**

#### **3.1 Розробка функціональної схеми автоматизації**

Серед основних технічних документів функціональні схеми є ключовими, адже визначають функціонально-блочну структуру окремих вузлів автоматичного контролю, керування та регулювання технологічного процесу. Вони також описують оснащення об'єкта керування приладами та засобами автоматизації, включаючи телемеханіку та обчислювальну техніку.

Об'єктом керування в системах автоматизації технологічних процесів є комплекс основного та допоміжного обладнання, що включає в себе вбудовані запірні та регулюючі органи, а також енергію, сировину та інші матеріали, які залежать від специфіки використовуваної технології. Доведено, що найефективніше завдання автоматизації вирішуються під час розробки технологічного процесу.

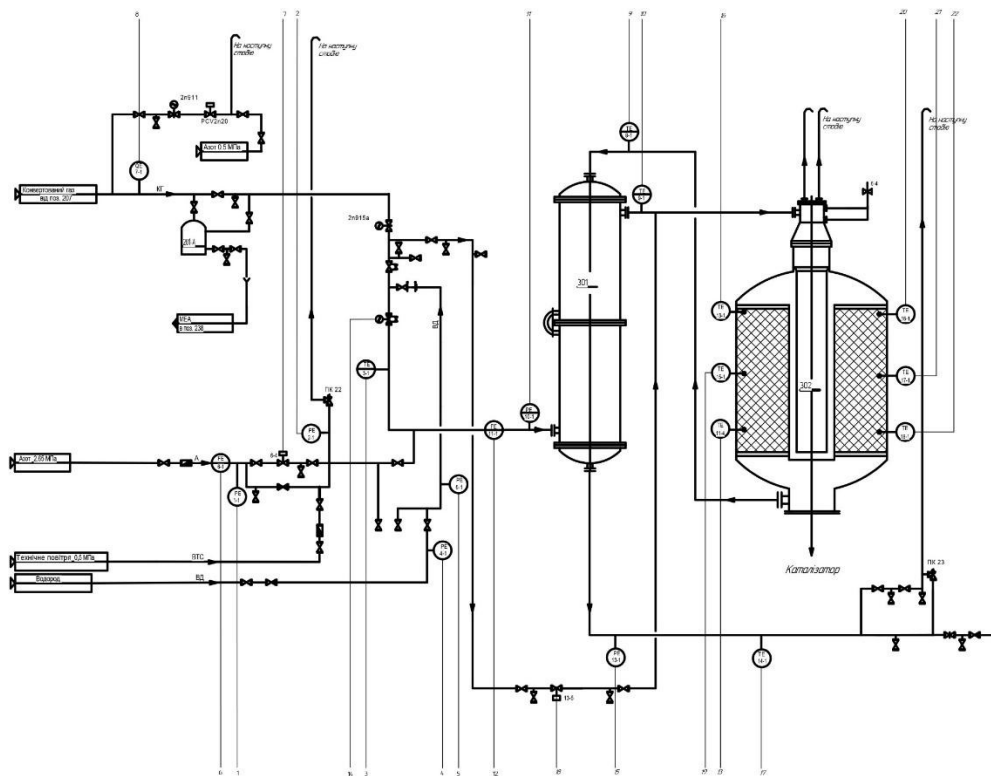


Рисунок 3.1 - Функціональна схема автоматизації технологічного процесу метанування оксидів вуглецю

У верхній частині кола або овалу (залежить від позначення приладу) на першому місці вказується вимірюваний параметр. Далі розміщуються функції приладу, що відображають цей параметр, а також функції, що формують вихідний сигнал. У нижній частині зазначається позиційне позначення приладу на схемі. Воно може бути літерне або цифрове.

Для позначення фізичних параметрів затверджені такі літерні позначення: D—щільність; E—будь-яка енергетична величина (конкретна величина вказується у верху з правого боку гуртка); F—витрата; G—розмір переміщення положення; H—ручне керування; K—тимчасова діаграма; L—рівень; M—вологість; P—тиск; Q—концентрація, склад, якість (праворуч від

кола у верху треба дати назву вимірюваного параметра); R–радіоактивність; S–швидкість, частота обертання; T–температура; U–кілька різнорідних величин; V–в'язкість; W–вага, маса.

Бувають ситуації, коли виникає потреба в уточнюючих позначеннях: D, d–перепад, різницю; F, f–частка, дріб, співвідношення; J, j–відгинання, автоматичне перемикавання.

1) PE – первинний вимірювальний перетворювач для вимірювання тиску. PT – вторинний перетворювач (пристрій з дистанційною передачею інформації). PIR – прилад індикації та реєстрації. PIC – прилад індикації та безперервного регулювання. NS – пускач.

2) TI – первинний вимірювальний перетворювач для вимірювання температури. TI – вторинний перетворювач (пристрій з дистанційною передачею інформації). TIR – прилад індикації та реєстрації.

3) PE – первинний вимірювальний перетворювач для вимірювання тиску. PT – вторинний перетворювач (пристрій із дистанційною передачею інформації). PIR – прилад індикації та реєстрації. PIC – прилад індикації та безперервного регулювання. NS – пускач.

4) FE – первинний вимірювальний перетворювач для виміру витрати. FT – вторинний перетворювач (пристрій із дистанційною передачею інформації). FIR – прилад індикації та реєстрації.

5) TE – первинний вимірювальний перетворювач для вимірювання температури. TI – вторинний перетворювач (пристрій із дистанційною передачею інформації). TIR – прилад індикації та реєстрації.

6) FE – первинний вимірювальний перетворювач для виміру витрати. FT – вторинний перетворювач (пристрій із дистанційною передачею інформації). FIR – прилад індикації та реєстрації. FIC – прилад індикації та безперервного регулювання. NS – пускач.

7) FE – первинний вимірювальний перетворювач для виміру витрати. FT – вторинний перетворювач (пристрій з дистанційною передачею

інформації). FIR – прилад індикації та реєстрації. FIC – прилад індикації та безперервного регулювання. NS – пускач.

8) TI – первинний вимірювальний перетворювач для вимірювання температури TT – вторинний перетворювач (пристрій з дистанційною передачею інформації). TIR – прилад індикації та реєстрації.

9) FE – первинний вимірювальний перетворювач для вимірювання витрати. FT – вторинний перетворювач (пристрій з дистанційною передачею інформації). FIR – прилад індикації та реєстрації. FIC – прилад індикації та безперервного регулювання.

10) TI – первинний вимірювальний перетворювач для вимірювання температури. TT – вторинний перетворювач (пристрій із дистанційною передачею інформації). TIR – прилад індикації та реєстрації.

## **3.2 Розроблення контурів керування**

### **Контур контролю тиску в трубопроводі для азоту (1)**

Як і будь-який технологічний процес, коректний хід потребує постійного контролю. Як датчик тиску використаний APC-2000AL (1-1). Далі сигнал надходить на вхід пристрою передачі на відстань сигналу УДКС 4604 (1-2).

Далі, струменевий сигнал подається на вхід реєстратора з цифровою індикацією моделі Метран-910 (1-3).

### **Контур контролю тиску в трубопроводі для азоту (2)**

Відзначимо, що потрібен контроль для коректного ходу технологічного процесу. Як датчик тиску використаний APC-2000AL (2-1). Далі сигнал надходить на вхід пристрою передачі на відстань сигналу УДКС 4604 (2-2).

Струменевий сигнал подається на вхід реєстратора з цифровою індикацією моделі Метран-910 (2-3).

### **Контур контролю температури газу (3)**

Як датчик температури застосований ТСМУ Метран-276 (3-1). Далі струмовий сигнал подається на вхід реєстратора із цифровою індикацією моделі Метран-910 (3-2).

#### **Контур контролю тиску у трубопроводі водню (4)**

Відзначимо, що потрібен контроль коректного ходу технологічного процесу. Як датчик тиску використаний APC-2000AL (4-1). Далі сигнал надходить на вхід пристрою передачі на відстань сигналу УДКС 4604 (4-2).

Струменевий сигнал подається на вхід реєстратора з цифровою індикацією моделі Метран-910 (4-3).

#### **Контур контролю тиску у трубопроводі водню (5)**

Маємо потребу у контролі коректного ходу технологічного процесу. Як датчик тиску використаний APC-2000AL (5-1). Далі сигнал надходить на вхід пристрою передачі на відстань сигналу УДКС 4604 (5-2).

Струмовий сигнал подається на вхід реєстратора з цифровою індикацією моделі Метран-910 (5-3).

#### **Контур контролю та регулювання витрати азоту (6)**

Потребуємо постійного контролю коректного ходу технологічного процесу. Як датчик витрати використаний турбінний витратомір TUV (6-1). Далі сигнал надходить на вхід пристрою передачі на відстань сигналу УДКС 4604 (6-2). Сигнал з перетворювача, що виконує функцію нормалізації, прямує на вхід регулятора Сосна 002 (6-3). Далі сигнал подається на БУЕП, який здійснює керування ІМ. В якості виконавчого механізму застосовуємо ГЗ-А.70, який призначений для монтажу на трубопроводах з метою безперервного регулювання витрати робочого середовища.

#### **Контур контролю концентрації газу (7)**

Як датчик концентрації приймемо ПКГ100-CO2 (7-1). Далі струмовий сигнал прямує на вхід реєстратора із цифровою індикацією моделі Метран-910 (7-2).

#### **Контур контролю температури неочищеного газу (8)**

Як датчик температури застосований ТСМУ Метран-276 (8-1). Наступним кроком буде подача струмового сигналу на вхід реєстратора із цифровою індикацією моделі Метран-910 (8-2).

#### **Контур контролю температури неочищеного газу (9)**

Як датчик температури застосований ТСМУ Метран-276 (9-1). Наступним кроком буде подача струмового сигналу на вхід реєстратора із цифровою індикацією моделі Метран-910 (9-2).

#### **Контур контролю тиску конвертованого газу (10)**

Маємо потребу у постійному контролі коректного ходу технологічного процесу. Як датчик тиску використаний APC-2000AL (10-1). Потім сигнал прямує на вхід пристрою передачі на відстань сигналу УДКС 4604 (10-2).

Струменевий сигнал направляється на вхід реєстратора з цифровою індикацією моделі Метран-910 (10-3).

#### **Контур контролю та регулювання витрати газу (11)**

Потребуємо постійного контролю коректного ходу технологічного процесу. В якості датчика витрати використовується Turbo Flow UFG-F (11-1). Потім сигнал передається на вхід пристрою для дистанційної передачі сигналу УДКС 4604 (11-2). Далі сигнал надходить на вхід регулятора Сосна 002 (11-3).

Для контролю температури застосовано датчик ТСМУ Метран-276 (11-4). Наступний кроком буде подача струмового сигналу на вхід реєстратора із цифровою індикацією моделі Метран-910 (11-5).

У подальшому сигнал спрямовується на вхід регулятора Сосна 002 (11-3). Потім він передається на БУЕП, який відповідає за керування ІМ. Виконавчим механізмом у даній системі є ГЗ-А.70, призначений для встановлення на трубопроводах з метою безперервного регулювання витрати робочого середовища.

#### **Контур контролю тиску після теплообмінника (12)**

Маємо потребу у постійному контролі коректного ходу технологічного процесу. Як датчик тиску використаний APC-2000AL (12-1). У подальшому

логічною буде подача сигналу на вхід пристрою передачі сигналу на відстань УДКС 4604 (12-2).

На вхід реєстратора з цифровою індикацією моделі Метран-910 (12-3) подається струменевий сигнал.

### **Контур контролю температури неочищеного газу (13)**

У якості датчика температури обираємо ТСМУ Метран-276 (13-1). Потім струмовий сигнал надходить на вхід реєстратора з цифровою індикацією моделі Метран-910 (13-2).

### **Контур контролю та регулювання температури в метанаторі (14)**

Маємо потребу у безперервному контролі коректного ходу технологічного процесу. Як датчик температури обираємо ТСМУ Метран-276 (14-1). Потім струмовий сигнал передається на вхід реєстратора з цифровою індикацією моделі Метран-910 (14-2). Цей сигнал надходить на вхід регулятора Сосна 002 (14-3).

### **Контур контролю температури в середній частині метанатору (15)**

У якості датчика температури прийнятий ТСМУ Метран-276 (15-1). Після цього струмовий сигнал спрямовується на вхід реєстратора з цифровою індикацією моделі Метран-910 (15-2).

### **Контур контролю температури неочищеного газу (16)**

Як датчик температури приймаємо ТСМУ Метран-276 (16-1). Потім струмовий сигнал надходить на вхід реєстратора з цифровою індикацією моделі Метран-910 (16-2).

### **Контур контролю температури неочищеного газу (17)**

Як датчик температури застосований ТСМУ Метран-276 (17-1). Далі струмовий сигнал подається на вхід реєстратора із цифровою індикацією моделі Метран-910 (17-2).

### **Контур контролю температури неочищеного газу (18)**

У якості датчику температури приймемо ТСМУ Метран-276 (18-1). Наступним кроком буде подача струмового сигналу на вхід реєстратора із цифровою індикацією моделі Метран-910 (18-2).

### 3.3 Розрахунок та вибір технічних пристроїв автоматизації

Відзначимо, що контроль технологічних процесів можливий за допомогою вимірювальних приладів, які генерують сигнали про параметри процесу в формі, зрозумілій для сприйняття людиною. У випадку централізованого контролю кожен окремий вимірювальний прилад складається з трьох компонентів: первинного вимірювального перетворювача, каналу зв'язку та вторинного приладу.

Таблиця 3.1 – Датчики автоматизованої системи

№	Параметр	Призначення приладу	Найменування та тип приладу	Технологічна характеристика
1	2	3	4	5
11-1	F	Вимірювання витрати	Turbo Flow UFG-F	Діапазон вимірювань витрати газу, м <sup>3</sup> /год від 1,5 до 32000
6-1	F	Вимірювання витрати	Турбінний витратомір TUV	Діапазон від 0.3-1.5 до 35-400 л/хв.
3-1, 8-1, 9-1, 11-4, 13-1, 14-1, 15-1, 16-1, 17-1, 18-1,	T	Вимірювання температури	Метран-276	Вихідний сигнал: 4-20 мА
1	2	3	4	5
1-1, 2-1, 4-1, 5-1, 10-1, 13-1	P	Вимірювання тиску	APC-2000AL	Вихідний сигнал: 4-20 мА
7-1	Q	Вимірювання концентрації	ПКГ100-CO2	Діапазон вимірювання 0...10 000 ппм;

Первинний вимірювальний перетворювач, розташований на об'єкті, перетворює вимірювану величину на вихідний сигнал, який зручно передавати через канал зв'язку. Цей канал забезпечує передачу сигналу від

первинного перетворювача до вторинного пристрою. По факту, вторинний прилад – це пристрій, який приймає сигнал від перетворювача та візуалізує його у комфортному для сприйняття вигляді.

Лічильник газу ультразвуковий Turbo Flow UFG. Витратомір – ультразвуковий лічильник газу моделі Turbo Flow UFG – F, призначений для вимірювання об'ємної витрати та обсягу газу в робочих умовах. Він також здійснює обчислення об'ємної витрати та обсягу газу, приведених до стандартних умов, а також масової витрати та маси газу, включаючи природний газ та вільну нафту [9].



Рисунок 3.2 – Лічильник газу ультразвуковий Turbo Flow UFG

Вищерозглянутий витратомір оснащений функцією заміни електроакустичних перетворювачів під тиском, що дозволяє виконувати цю процедуру в робочому режимі без виведення пристрою з експлуатації. Він також має автоматичну самодіагностику та перевірку нульових та контрольних значень вимірюваних параметрів, а також можливість вимірювання витрати газу в прямому та зворотному напрямках. Така можливість має назву реверсивний режим.

Таблиця 3.2 – Основні технічні характеристики

Діапазон вимірювань витрати газу (залежно від виконання), м <sup>3</sup> /год	от 1,5 до 32000
Динамічний діапазон, Q <sub>min</sub> / Q <sub>max</sub>	1:200
Діаметр умовний, мм	от 50 до 500

Діапазон надлишкового тиску газу, Мпа	от 0 до 25
Межі допустимої відносної похибки витратоміра при вимірюванні тиску, %	$\pm 0,25$
Верхні межі вимірювань надлишкового тиску (ВНТ), МПа	0,0025; 0,004; 0,0063; 0,01; 0,016; 0,025; 0,04; 0,063; 0,1; 0,160; 0,25; 0,4;

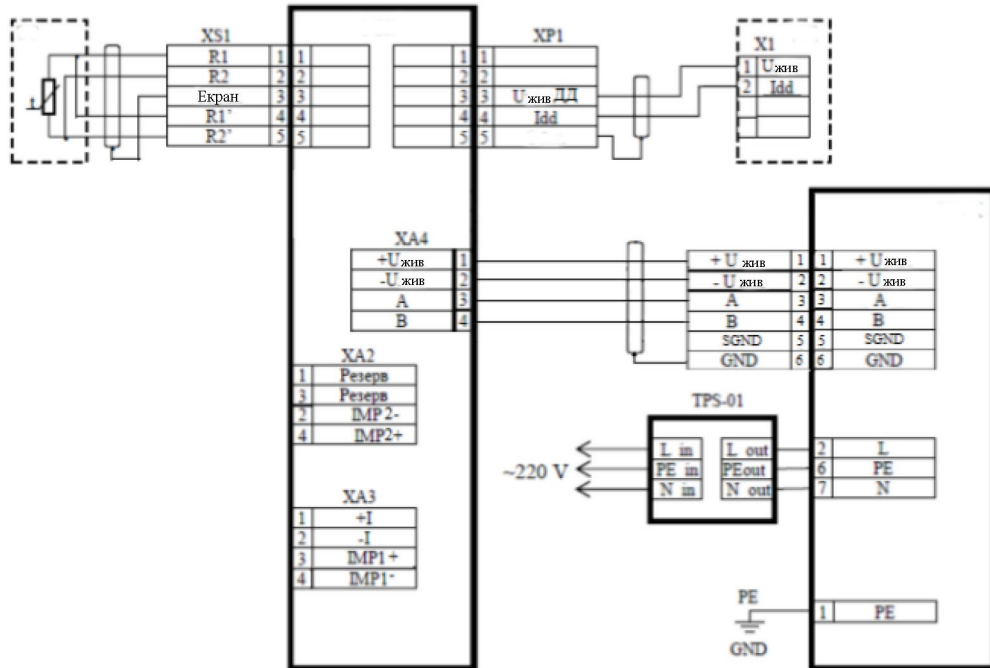


Рисунок 3.3 – Схема підключення витратоміра Turbo Flow UFG

Таблиця 3.3 - Вид на плату зовнішніх підключень витратоміра Turbo Flow UFG

№ контакту	Позначення	Призначення
XA2-1	Резерв	Резерв
XA2-2		
XA2-3	+IMP2	Частотно-імпульсний вихід 2
XA2-4	-IMP2	
XA3-1	+I	Вихід 4-20 мА (пасивний)
XA3-2	-I	
XA3-3	+IMP1	Частотно-імпульсний вихід 1
XA3-4	-IMP1	
XA4-1	+U	Живлення приладу
XA4-2	-U	

XA4-3	A	Інтерфлейс RS-485
XA4-4	B	

Турбінний витратомір для рідин TUV-R. Турбінки моделі TUV-R засновані на принципі влаштування турбінного лічильника Вольтмана. Ротор турбінки незначної маси концентрично встановлений у трубі та закріплений підшипниками. Потік рідини проходить через ротор турбінки у вісьовому напрямку. Потік середовища вирівнюється випрямлячем потоку, і досягає ротора у вигляді квазіламінарної течії. Швидкість обертання ротора пропорційна середній швидкості потоку, що проходить через поперечний переріз труби. Частота обертання, таким чином, пропорційна об'ємним витратам у широкому діапазоні вимірювань [9].

Індуктивний перетворювач, закріплений на корпусі турбінки, вловлює швидкість ротора безконтактним способом. Сигнал датчика проходить через підсилювач і перетворюється на імпульсний сигнал. Кількість імпульсів за одиницю часу пропорційно швидкості даного потоку. Всі турбінки калібруються і поставляються замовнику зі своїми схемами калібрування.

Вимірювальні турбінні перетворювачі витрати застосовуються для точного вимірювання поточних витрат рідин і вимірювання витрати рідин з низькою в'язкістю.



Рисунок 3.4 – Турбінний витратомір для рідин TUV-R

Таблиця 3.4 – Основні технічні характеристики

Максимальна температура	від - 20 до + 120 ° C (стандартн.) Опція: - 220 ° C та + 350 ° C
-------------------------	---

Діапазон в'язкості	1 -30 мм <sup>2</sup> /с (калібрування у відп. з в'язкістю)
Лінійність	± 1 %
Стабільність результату	прибл. 0.05 % - 0.1 %
Час спрацьовування	від 5 до 50 мс
Рекомендований фільтр	100 мкм (на вході TUV-1205), 300 мкм (на виході TUV-1206)

Інтелектуальний вимірювальний перетворювач APC-200AL фактично призначений для вимірювання надлишку, вакууму, абсолютного тиску газу, пропарювання та абсолютного тиску рідин. У «фундаменті» приладу лежить п'єзостійка монолітна кремнієва структура, яка у подальшому інтегрується в приймачі тиску. Цей реципієнт відокремлюється від вимірювального середовища за допомогою мембрани поділу та заповнюється спеціальним вимірювальним рішенням, яке видає вищерозглянутий перетворювач [10].



Рисунок 3.5 – Перетворювач тиску APC-2000AL

Таблиця 3.5 – Основні технічні характеристики

Метрологічні параметри	Межа допустимої наведеної похибки: -±0,075% для основного діапазону -спец. виконання $\pm 0,05\%$ для основного діапазону -для діапазону № 16 $\pm 0,1\%$
Стабільність метрологічних характеристик	не гірше ніж: -основна похибка/3 роки < $\pm 0,05\%$ (засн. діап.) / 10°C
Діапазон термокомпенсації	-25...80°C -40...80°C спеціальне вик.
Термін фіксації вихідного сигналу	0,5 с. -спец. виконання 50 мс. -додаткове електронне демпфування 0 ... 60 с.

Час спрацьовування	от 5 до 50 мс
Умови роботи:	Діапазон температур довкілля -45...85°C виконання Ex -45...80°C Діапазон температур середовища виміру - 60...120°C понад 120°C – вимірювання з використанням мембранних розділювачів або імпульсної трубки

Аналоговий перетворювач температури з уніфікованим вихідним сигналом ТСПУ Метран-276. Призначені для вимірювання температури нейтральних та агресивних середовищ, стосовно яких матеріал захисної арматури є корозійностійким.

Чутливий елемент первинного перетворювача і вбудований в головку датчика вимірювальний перетворювач перетворюють вимірювану температуру в уніфікований вихідний сигнал постійного струму, що дає можливість побудови АСУТП без застосування додаткових перетворювачів, що нормують.

Первинні перетворювачі:

- 100М, 50М із можливістю вимірювання температури до 180°C;
- Pt100 з можливістю вимірювання температури до 500°C;
- ТХА(к) з можливістю вимірювання температури до 1000°C;
- жароміцні та корозійностійкі захисні арматури.
- вибухозахисні виконання Exd або Exi.



Рисунок 3.6 – ТСПУ Метран-276

Основні особливості: вихідний сигнал 4-20ма.

Таблиця 3.6 – Основні характеристики ТСПУ Метран-276

Тип та виконання термоперетворювача	НСХ	Вихідний сигнал	Діапазон перетворених температур °С	Межа основної провідної похибки	Залежність вихідного сигналу від температури
ТСПУ Метран-276	Pt100	0-5,4-20	-50...100,-50...150,	0,25	лінійна
ТСПУ Метран-276-Хіа		4-20	0...150, 0...50,-50...50, 0...100, 0...200,	0,5	
ТСПУ Метран-276-Ехд					

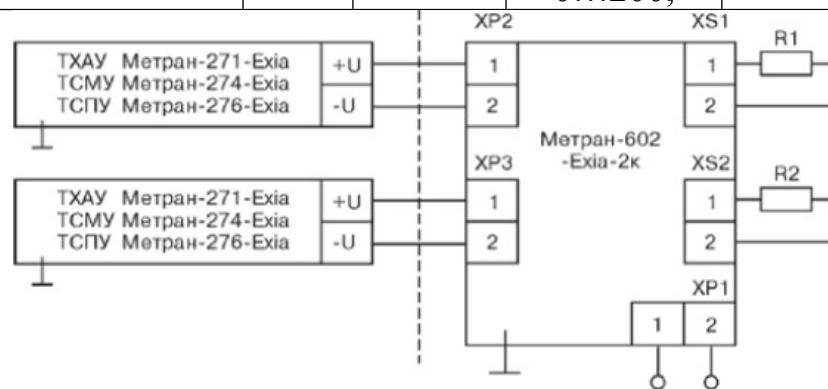


Рисунок 3.7 – Схема зовнішніх підключень ТСПУ Метран-276

Зауважимо, що ПКГ100-СО2 є промисловим датчиком для вимірювання концентрацій вуглекислого газу та забезпечує безперервне перетворення даних на два стандартних вихідних сигналів: 4 ... 20 мА та передача вимірювань через RS-485 (Modbus RTU). Такі перетворювачі активно використовуються в бізнесу, що полягає у розведенні великої рогатої худоби, птахівницьких фермах, теплицях для вирощування рослин та грибів тощо. Цікавим є те, що датчики можуть бути також інтегровані в вентиляційну систему для адаптації мікроклімату різних типів приміщень.

Функціональні особливості:

1. Вимірювана концентрація: від 400 до 5000 ppm.
2. Основна зведена похибка – не більше 15 %.

3. Комбінований вихідний сигнал: два канали 4...20 мА + RS-485 (Modbus RTU).
4. Ергономічний корпус, ступінь захисту IP65.
5. Можливість заміни зонда з сенсором.

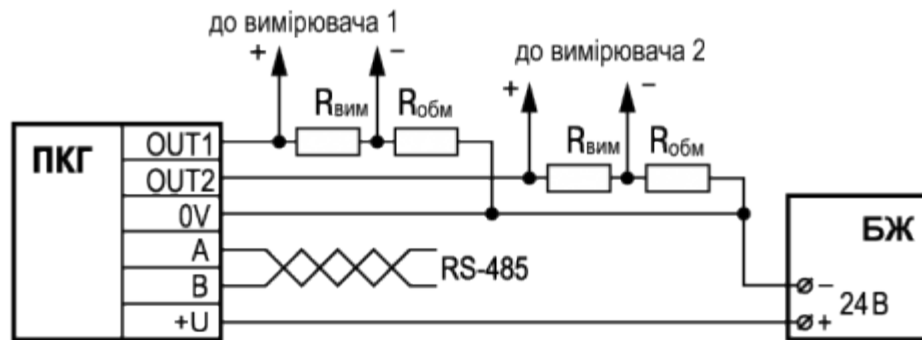


Рисунок 3.8 – Схема підключення газоаналізатора ПКГ100-CO2

Прилад індикації та реєстрації Метран – 910. Відеографічний безпаперовий багатоканальний реєстратор Метран-910 призначений для збирання, візуалізації, реєстрації та регулювання різних параметрів технологічних процесів [13].

Просто інтегрується в системи АСК ТП.



Рисунок 3.9 – Прилад індикації та реєстрації Метран – 910

Основні переваги:

- контрастний кольоровий екран на TFT-матриці (5,6" або 10,4") з широким кутом огляду;
- вільна програмованість аналогових каналів під різні типи вхідних сигналів та між-канальна гальванічна ізоляція;
- висока швидкодія;
- математична обробка по кожному каналу;
- відповідність вимогам ЕМС;
- до 20 універсальних аналогових входів;
- міжканальна гальванічна ізоляція;
- повний цикл опитування всіх каналів 0,1 с;
- дискретні входи та виходи;
- математична обробка даних;
- обчислення витрати середовищ;
- суматори, лічильники, таймери, робота з розкладу;
- перенесення архіву на USB-Flash карту або SD/MMC картку;
- подання даних на екрані: тренди, шкали (bargraph), комбінація з трендів та шкал, числові значення;
- вбудовані інтерфейси RS485 (Modbus RTU + OPC Server), Ethernet (Modbus TCP/IP), USB Host, CAN 2.0;
- можливість збирання та реєстрації даних від зовнішніх пристроїв за інтерфейсом RS485 (Modbus).

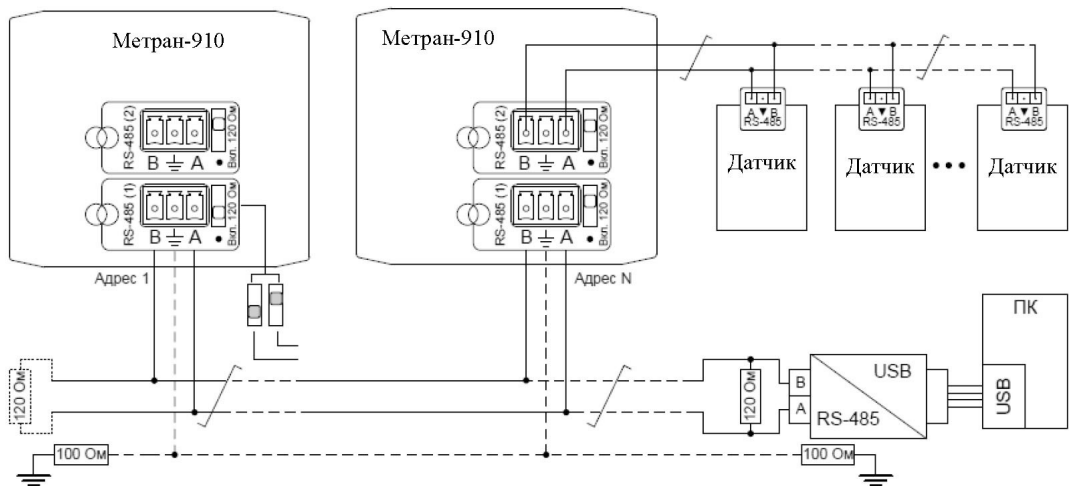


Рисунок 3.10 – Схема підключення реєстратора під час вимірювання уніфікованого струмового сигналу датчика

Прилад для передачі сигналу на відстань УДКС-4604. Пристрій призначений для дистанційного контролю устаткування, що не обслуговується шляхом передачі сигналу оператору по двопровідній лінії зв'язку.

Забезпечує прийом дискретних вхідних сигналів, формування сигналу «Аварія» при виході параметрів контрольованого об'єкта з норми та передачі інформації на віддалений пункт (пункти) розташування операторів.



Рисунок 3.11 – Прилад для передачі сигналу на відстань УДКС-4604

Основні характеристики [14]:

- 11 каналів типу «сухий контакт» (можливе використання сигналів напруги постійного струму) ;
- передача сигналу по двопровідній лінії зв'язку від 10 км.;

- світлова та звукова сигналізація аварії, можливість підключення зовнішніх пристроїв сигналізації;
- можливість багато-постової роботи (кілька операторів) ;
- постійний контроль справності пристрою та лінії зв'язку;
- резервоване живлення до 24 год. ;
- діапазон робочих температур  $-30^{\circ}\text{C}$   $+50^{\circ}\text{C}$ ;
- розміри кожного блоку –  $186\times 240\times 66$  мм ;
- вага 1,2 кг.

Восьмиканальний вимірювач-регулятор ОВЕН ТРМ138-Р. Щитовий прилад із числом незалежних каналів вимірювання та регулювання від 1 до 6.



Рисунок 3.12 – Прилад для передачі сигналу на відстань ОВЕН ТРМ138-Р

Вимірювач-регулятор ОВЕН ТРМ 138 призначений для вимірювання, реєстрації та регулювання температури, тиску або іншого фізичного параметра, одночасного керування кількома (до 8-ми) виконавчими механізмами, а також для реєстрації вимірюваних параметрів на ЕОМ.

Вісім універсальних входів дозволяють підключати від 1 до 8 датчиків різного типу в будь-яких комбінаціях, що дозволяє одночасно вимірювати і контролювати кілька різних параметрів (температуру, вологість, тиск та ін.) Гнучка змінна структура приладу дозволяє задавати необхідну кількість входів і виходів і, таким чином, швидко конфігурувати прилад. RS-485 (протоколи ОВЕН і Modbus) дозволяє легко інтегрувати прилад у різні системи керування.

#### Висновки за розділом

Була складена функціональна схема автоматизації з 15 контурами контролю та 3 контурами регулювання, принципова електрична схема. Для визначення фізичних параметрів (витрата, тиск, температура, концентрація) обрали датчики з уніфікованим вихідним сигналом. Для вимірювання температури були обрані датчики Метран-276, для вимірювання витрати - витратомір турбінний витратомір TUV, Turbo Flow UFG-F, для вимірювання тиску - датчик тиску Метран - APC-2000AL, як регулятор був обраний ОВЕН ТРМ138-Р.

## ВИСНОВКИ

Мета кваліфікаційної робота бакалавра досягнута, а саме розроблено автоматизовану систему керування технологічним процесом метанування оксидів вуглецю з використанням сучасної елементної бази.

У першому розділі виконали аналіз процесу метанування оксидів вуглецю. Виявили сильні та слабкі сторони технологічного процесу. Окреслили параметри, що підлягають контролю та регулюванню.

У другому розділі розроблена структурна схема електропривода запірної арматури. Проведено математичне та імітаційне моделювання асинхронного двигуна запірної арматури. Ідентичність графіків перехідних процесів дозволяє зробити висновок про ідентичність моделей асинхронного двигуна в нерухомій та нерухомій системах координат. Введено обмеження на виході регуляторів в асинхронному електроприводі з векторним керуванням та виконано його дослідження. Застосовано задатчик інтенсивності та його вплив на перехідні процеси.

У третьому розділі на основі вивченого обладнання була складена функціональна схема автоматизації з 15 контурами контролю та 3 контурами регулювання, принципова електрична схема. Для визначення фізичних параметрів (витрата, тиск, температура, концентрація) обрали датчики з уніфікованим вихідним сигналом. Для вимірювання температури були обрані датчики Метран-276, для вимірювання витрати - витратомір турбінний витратомір TUV, Turbo Flow UFG-F, для вимірювання тиску - датчик тиску Метран - APC-2000AL, як регулятор був обраний ОВЕН ТРМ138-Р.

Розроблена схема автоматизації може бути застосована для регулювання технологічних процесів, де параметрами регулювання є тиск, температура, витрата.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Невлюдов І. Ш. Автоматичне управління технологічними об'єктами [Електронний ресурс]: Підручник / І. Ш. Невлюдов, О. В. Токарева; М-во освіти і науки України, ХНУРЕ. – Харків: ХНУРЕ, 2018. – 190 с.
2. Онищук О.О., Кормош Ж.О. Процеси і апарати хімічних виробництв: Курс лекцій. – Луцьк: Волинський національний університет імені Лесі Українки», 2020. – 155 с.
3. Процеси та обладнання хімічних технологій. Частина 2. Практикум [Електронний ресурс] : навч. посіб. для ступеня бакалавра за освіт. програмою «Комп'ютерно-інтегровані технології проектування обладнання хімічної інженерії» спец. 133 Галузеве машинобудування / Корнієнко Я. М., Степанюк А. Р., Гулієнко С. В., Гайдай С. С., Семінський О. О. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2025. – 520 с.
4. Товажнянський Л. Л., Готлинська Г. П., Лещенко В. А., Нечипоренко І. О., Чернишев І. С. Процеси та апарати хімічної технології. : Підручник. / Під заг. Ред. Л.Л. Товажнянського. – Харків: НТУ «ХП», 2024. – 1016 с.
5. Моделювання систем автоматичного керування [Електронний ресурс]: підручник для студентів, які навчаються за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» за освітньою програмою «Електромеханічні системи автоматизації, електропривод та електромобільність» / О. І. Толочко ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 7,93 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. – 328 с.
6. Моделювання систем автоматичного керування. Лабораторний практикум [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студентів спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» з дисципліни «Моделювання систем автоматичного керування» / КПІ ім. Ігоря

Сікорського; уклад.: О. І. Толочко. – Електронні текстові дані (1 файл: 6.56 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. – 250 с.

7. Теорія автоматичного керування. Частина 1: комп'ютерний практикум [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», освітньої програми «Керування, захист та автоматизація енергосистем» / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: А.А. Марченко, В.С. Гулий. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 54 с.

8. Каталог двигунів. – Режим доступу: <https://profimann.com.ua/zaporno-reguliruyuschaya-armatura/elektroprivody/elektroprivod-auma-sa-10.2-16/>

9. Каталог витратомірів. – Режим доступу: <https://flagma.ua/ua/raskhodomer-turbo-flow-ufg-80-o1816686.html>

10. Каталог ультразвукових витратомірів. – Режим доступу: <https://www.jumo.ua/web/products/flow>

11. Каталог перетворювачів тиску. – Режим доступу: <https://aplisens.com.ua/product/apc-2000al/>

12. Каталог термоперетворювачів. – Режим доступу: <https://standart-pribor.com.ua/product/termopreobrazovateli-s-unifitsirovannym-vykhodnym-signalom-metran-276/>

13. Каталог реєстраторів. – Режим доступу: <https://kharkov.ukrboard.com.ua/board/m-2252762/realizuem-registrator-metran-910/>

14. Каталог вимірювачів-регуляторів. – Режим доступу: <https://ukrspecavtomat.com.ua/products/izmeriteli-regulyatory-vosmikanalnye-oven-trm138/>

15. Методичні рекомендації до виконання кваліфікаційної роботи бакалавра для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» – Полтава: Національний університет імені Юрія Кондратюка, 2025. – 18 с.

# ДОДАТКИ

## ДОДАТОК А

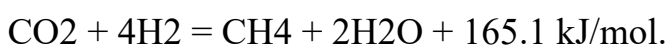
### CHAPTER 1

#### ANALYSIS OF THE COAL METHANATION PROCESS AND JUSTIFICATION OF MODERNIZATION DIRECTIONS

##### 1.1 Catalytic purification of converted gas

In the catalytic purification process, the converted gas, with a flow rate of no more than 30,000 m<sup>3</sup>/h, comes from the gas purification section from carbon dioxide using an MEA solution. The gas pressure does not exceed 1.6 MPa, and the temperature is 60 °C. The gas passes through a diaphragm (designation FR 2p110-1) and is fed into the inter-tube space of the heat exchanger (designation 301). In the heat exchanger (designation 301), the untreated gas is heated to 300 °C (according to the readings of the device designation TR 334) due to the hydrogen coming out of the methanation reactor (designation 302). In the case of inefficient operation of the heat exchanger or partial deactivation of the catalyst, as well as during the start-up period, a built-in electric heater with a capacity of 400 kW is activated to heat the gas at the inlet to the methanation reactor (designation 302).

The methanation reactor (designation 302) is loaded with 10 m<sup>3</sup> of catalyst. The process of catalytic gas purification from carbon monoxide and dioxide is carried out through exothermic hydrogenation reactions:



The hydrogenation process itself occurs with a high degree of conversion and is accompanied by significant heat release. The adiabatic temperature increase is 74 °C for each percent of reacted monoxide and 60 °C for carbon dioxide.

It should be noted that the maximum temperature in the methanation reactor (designation 302), due to the mechanical properties of the material of the apparatus, should not exceed 350 °C (according to the device designation TR 2p338) at a pressure of no more than 16 MPa. In the event of an excess of the level

of carbon oxides in the methanation reactor (designation 302) and the temperature at the inlet of the methanator shelf reaching more than 300 °C (according to the device designation TRC 2p337), bypass gas is automatically supplied to the upper zone of the reactor, bypassing the heat exchanger (designation 301), through the valve (designation TCV 2p337A, B). When the temperature of the lower catalyst layer reaches 350 °C (according to the device designation TR 2p338), the solenoid valve (designation 2p915) closes, and the converted gas supplied for methanation is discharged to the spark plug through the solenoid valve (designation 2p911) and the valve (designation PCV 2p20).

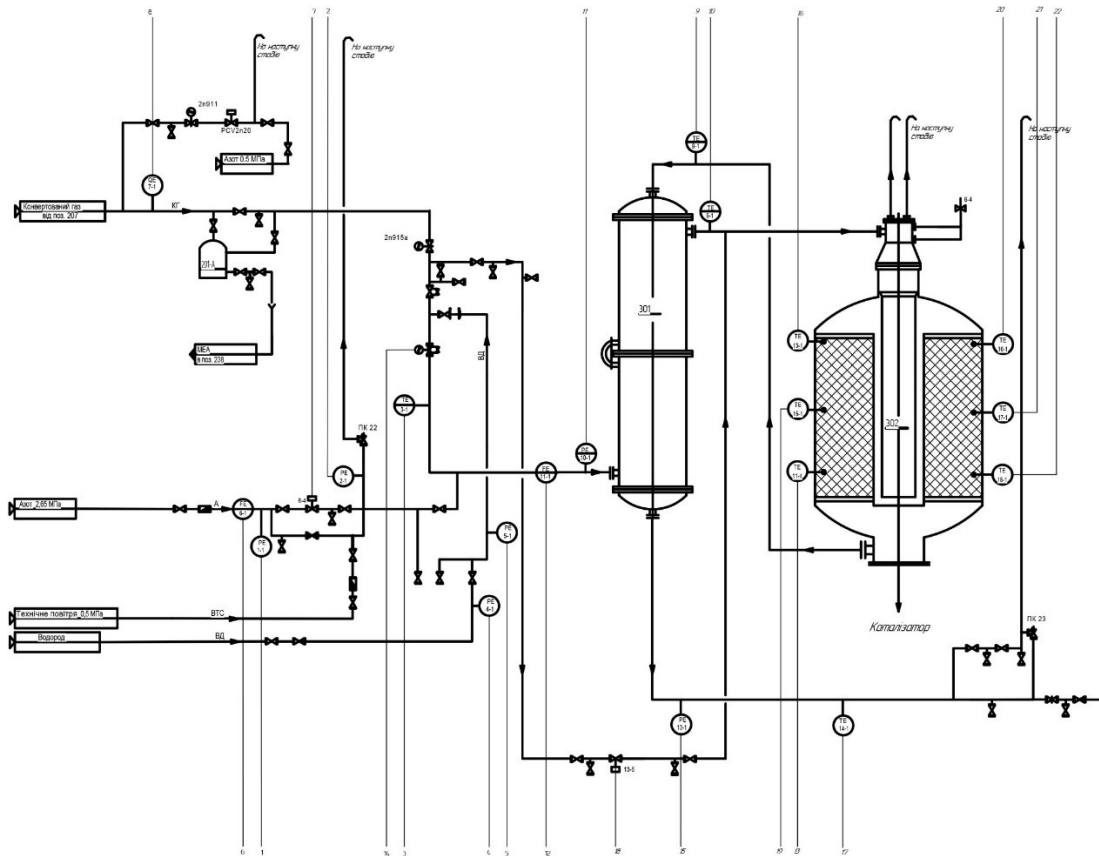


Figure 1.1 – Technological process of carbon methanation

Furthermore, after fine purification of the converted gas from carbon oxides in the methanation reactor (designation 302), the purified hydrogen enters the tube space of the heat exchanger (designation 301). Here it is cooled to a temperature not higher than 70 °C, simultaneously heating the gas passing through the inter-

tube space for further purification in the methanator. Further, after the heat exchanger, the hydrogen passes through the scrubber (designation 216), where it is partially cooled, losing some of the moisture. Through the electric valve (designation 2p918), the hydrogen is fed to the drying unit. The pressure in the system is regulated by a special valve (designation PCV 2p226), which discharges hydrogen onto the spark plug.

## 1.2 Start-up of the catalytic gas purification unit from carbon monoxide and dioxide by methanation

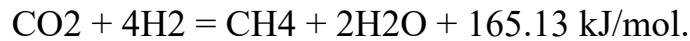
Before starting the start-up of the methanation unit, the corresponding catalyst is regenerated and heated. For this purpose, a heating and regeneration scheme is developed, removable sections are installed on the nitrogen and hydrogen lines, and the existing fittings are closed. Then nitrogen is driven through the entire system so that the volume fraction of oxygen at the outlet of the unit is slightly more than 0.4%. The next step will be to supply the heated nitrogen to the methanator with a flow rate of at least 5,000 m<sup>3</sup>/h through the IR-10 electric heater. In this case, it is very important to maintain the pressure in the unit within 0.35 to 0.40 MPa using a regulator (designation PRC 2p226). Excess nitrogen, in turn, is discharged to the candle through an electric valve (designation 2p919).

The above pressure is usually observed during heating, since at atmospheric pressure and temperatures below 180 °C, optimal conditions are created for the formation of nickel carbonyl Ni(CO)<sub>4</sub> from nickel and carbon monoxide. This leads to a corresponding loss of nickel, which is an active component of the catalyst. Therefore, the gas performing the reduction function should contain as little nickel as possible.

It should be noted that the rate of temperature increase during catalyst heating is slightly more than 30 °C per hour. When the temperature in the catalyst bed reaches 200 °C, and at the outlet of the methanator is at least 150 °C, the catalyst reduction process can be started. To do this, hydrogen must be supplied to

the converted gas line through the heat exchanger (designation 301) using an open valve in the corresponding section.

During the catalyst reduction process, the temperature increases due to the presence of the reduction reaction of nickel oxide to metal, as well as parallel methanation reactions:



Technically, the temperature in the reactor is increased at a rate of 15 °C/h to 20 °C/h, to the corresponding values of 350 °C to 400 °C. In the process, the reducing gas leaving the methanator passes through the tube space of the heat exchanger (designation 301) and accordingly heats the reducing gas, which moves through the intertube space of the heat exchanger to the methanator. With this heating mode and reducing gas loading in the range from 5,000 to 10,000 m<sup>3</sup>/h, the catalyst heating time to 400 °C is from 10 to 12 hours. It has been proven that complete catalyst reduction at 400 °C occurs in 20-24 hours. Due to the exothermic effect of the methanation reactions and periodic switching on and off of the electric heater, the temperature is constantly maintained at the proper level.

After daily recovery, the temperature in the catalyst bed is reduced to the operating range (from 270 °C to 290 °C) and the volume fraction of carbon monoxide and carbon dioxide in the hydrogen mixture after the methanator is determined (carbon monoxide - 20 ppm, carbon dioxide - 30 ppm). In the future, it is necessary to block the hydrogen-containing gas and dismantle the removable sections. For safe operation, special plugs are installed in the future.

Let's consider the operations that must be performed to start the methanator. First of all, we check the position of the valves on the installation: the manual valve and the electric valve (designation 2p915) on the congas supply line to the heat exchanger (designation 301) must be closed, and the valve at the congas inlet to the scrubber (designation 216) after the methanator, respectively, is open. Then

we purge the devices (designations 301 and 302) with nitrogen until all combustible residues are completely removed. We build up the pressure in the devices with nitrogen to 1.45 MPa.

In parallel with the opening of the manual valve and the electric valve (designation 2p915), we supply converted gas from the methanator with discharge to the candle (designation 2p919) through the valve (designation PCV 2p226). In turn, we ensure that the temperature in the reaction zone in the methanator catalyst is not higher than 330 °C, supplying a cold bypass through the valve (designation TCV 2p337A (B)) to the upper part of the methanator.

We transfer the purified hydrogen to drying, after obtaining a volume fraction of carbon monoxide of not more than 10 ppm and carbon dioxide of not more than 30 ppm in the purified converted gas from the methanator. To do this, gradually open the electric valve (designation 2p918-1) and, at the same time, close the valve (designation PCV 2p226) and the electric valve (designation 2p919).

### 1.3 Stopping the catalytic purification unit for converted gas from carbon monoxide and dioxide by methanation

Let us detail the sequence of actions when stopping the methanation unit. First, we close the solenoid valve (designation 2p918-1) on the purified hydrogen delivery line in BO N1, simultaneously opening the spark plug (designation 2p919) and the valve (designation PCV 2p226) to maintain pressure in the system. The next step will be to unload the natural gas conversion to a load of 6000 to 7000 m<sup>3</sup>/h. It is necessary to monitor that the main parameters do not reach blocking values, as well as stabilize the technological mode. In the future, it is necessary to stop the supply of converted gas to the methanation unit by closing the solenoid valve (designation 2p915) on the congas inlet line to the heat exchanger (designation 301) and moving the congas to the spark plug (designation 2p911). At

the same time, we carefully monitor the pressure balance in the system within 1.5 to 1.6 MPa using a valve (designation PCV 2p20).

The next step will be to unload and turn off the electric heater (designation IP-10). Then we gradually reduce the pressure in the unit to 0.1 MPa and purge the devices (designation 301, 302) with nitrogen until the combustible gas is completely removed.

The last step will be to close the manual valves on the line of the congas inlet to the heat exchanger (designation 301) and at the outlet from the scrubber (designation 216). After purging with nitrogen, we reduce the pressure to atmospheric level and install the plugs according to the installation diagram.

If the stop is not caused by catalyst overload, it is passivated and left under excess nitrogen pressure in the range from 0.2 to 0.3 MPa. In the event that the stoppage is still associated with overloading the methanation catalyst, it must be stored and oxidized before unloading.

Catalyst passivation consists in gradually lowering its temperature in the converted gas stream to 280 °C at a rate of 50 °C per hour. After that, the gas supply is stopped and the pressure in the system is gradually reduced to 0.1-0.2 MPa, after which purge nitrogen is supplied to the reactor. The next stage is to purge the system with nitrogen until the remaining combustible components are completely removed, and the catalyst, in turn, is cooled to a temperature of 40 °C to 60 °C. When the catalyst has cooled, air is added to it, gradually increasing its amount until the volume fraction of oxygen reaches 0.2-0.3%. Again, it is important to control the temperature in the catalyst bed, which should remain within 60-80 °C. If the catalyst temperature drops to ambient temperature and the volume fraction of oxygen in nitrogen reaches 1-2%, the nitrogen supply is stopped immediately. If the stop is prolonged, the catalyst remains under nitrogen.

The catalyst is oxidized before unloading. During oxidation, the methanator is purged with air for a certain period of time until the volume fraction of oxygen reaches at least 16%. The catalyst is unloaded directly through the lower hatch of

the reactor (designation 302) by removing the upper block together with the electric heater.

#### 1.4 Selection of parameters related to control and regulation of the technological process of methanation of carbon oxides

An important factor in the design of automation systems for production processes are the parameters that need to be continuously controlled and regulated. The entry points of control influences and the channels of their passage through the object are also established. For this purpose, a scheme of interaction of the parameters of the object is developed, the main and additional signal transmission channels are allocated, and then separate control loops are formed that compensate for the influence of actions. If necessary, the main control loops are interconnected, and the parameters to be controlled are selected so that their number is minimal, but sufficient to fully reflect the technological process. Usually, the parameters of the steam generation process are distinguished as input and output. The input parameters are:  $G_0$  - liquid flow rate;  $b_0$  - concentration;  $P_{gr}$  - heating steam pressure;  $t_{k.r.}$  - boiling point of the liquid (controlled parameters);  $h_p$  - liquid level (regulated parameter). Accordingly, the output parameters are  $P_{t.p.}$  - superheated steam pressure.

Special attention is required to control the flow rate and concentration of the starting liquid when controlling the steam generation process. The pressure of the heating and secondary steam, as well as the boiling point of the liquid, are no less important indicators for controlling the steam generation process. In addition, the steam pressure, the liquid level in the drum and the temperature of the superheated steam require proper regulation.

After a detailed analysis of the process parameters that are subject to control and regulation, we will group them into Table 1.1:

Table 1.1 – Parameters subject to control and regulation of the process of methanation of carbon oxides

Parameter name	Units of measurement	Change limit	CONTROL	Regulation
Pipeline pressure for nitrogen	MPa	3,65	Yes	--
Pipeline pressure for nitrogen	MPa	--	Yes	--
Gas temperature	°C	60	Yes	--
Hydrogen pipeline pressure	MPa	1,4-1,6	Yes	--
Hydrogen pipeline pressure	MPa	1,4-1,6	Yes	--
Nitrogen consumption	m <sup>3</sup> /h	5000	Yes	Yes
Raw gas temperature	°C	300	Yes	--
Raw gas temperature	°C	300	Yes	--
Converted gas pressure	MPa	1,6	Yes	--
Gas consumption converter	m <sup>3</sup> /h	30000	Yes	Yes
Pressure after heat exchanger	MPa	1,6	Yes	--
Raw gas temperature	°C	300	Yes	Yes
Temperature at the top of the methanation reactor	°C	300	Yes	--
Temperature in the middle part of the methanation reactor	°C	325	Yes	--
Temperature in the bottom of the methanation reactor	°C	350	Yes	--
Temperature at the top of the methanation reactor	°C	300	Yes	--
Temperature in the middle part of the methanation reactor	°C	325	Yes	--
Gas concentration	Mole/mol IEA	10	Yes	--

Міністерство освіти та науки України  
Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»  
Кафедра автоматики, електроніки та телекомунікацій

## **Автоматизація процесу метанування вуглецю**

ДОДАТОК Б

### **Кваліфікаційна робота бакалавра**

Виконав:

студент 401МЕ групи

Керівник:

д.т.н, професор

Погрібний О.Ю.

Шефер О.В.

Полтава 2025

**Метою кваліфікаційної роботи бакалавра** є розроблення автоматизованої системи керування технологічним процесом метанування оксидів вуглецю з використанням сучасної елементної бази.

**Об'єктом кваліфікаційної роботи бакалавра** є установка для метанування оксидів вуглецю.

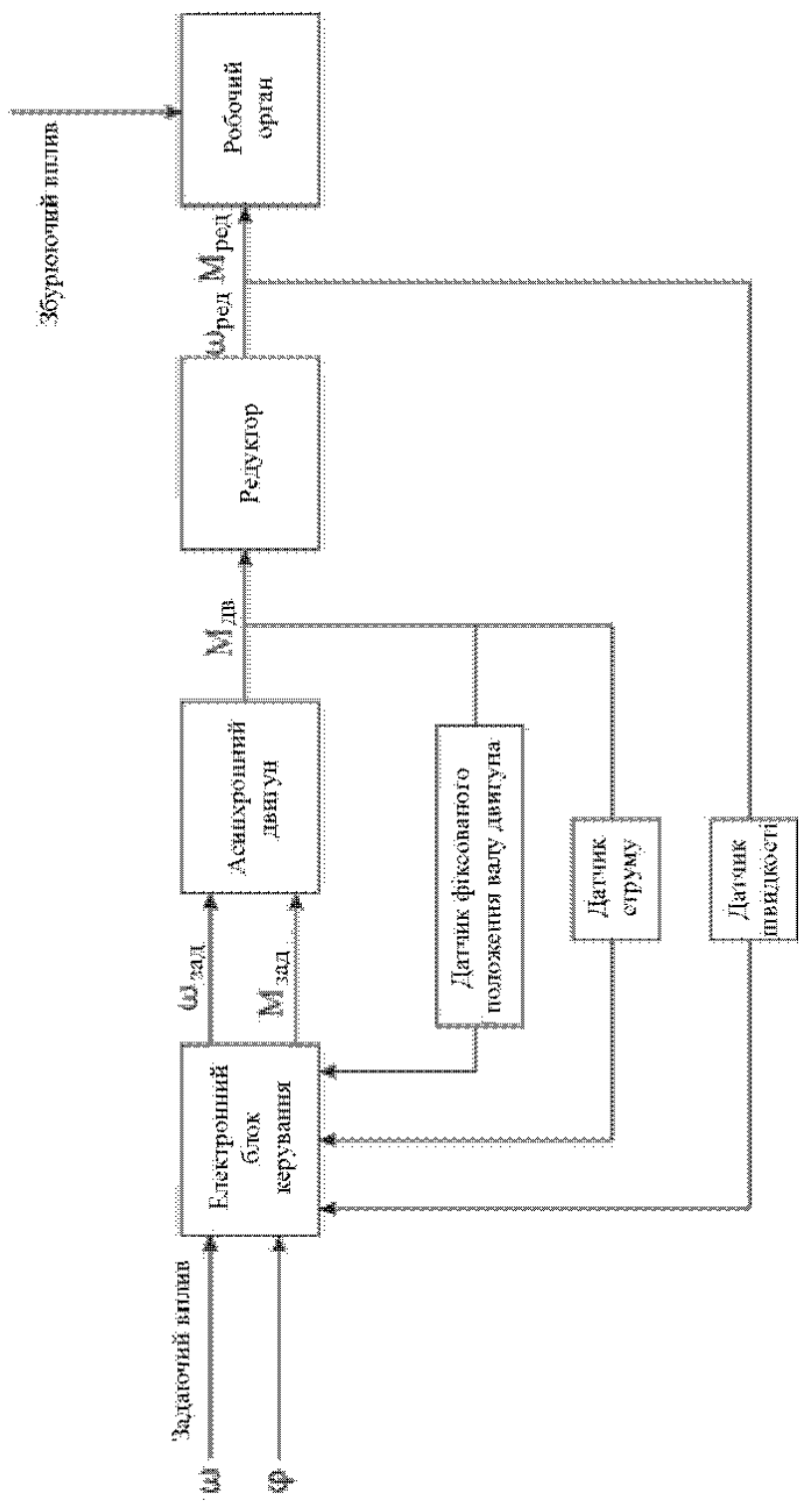
**Предметом кваліфікаційної роботи бакалавра** є дослідження можливості розробки автоматизованої системи метанування оксидів вуглецю.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати наступні **завдання**:

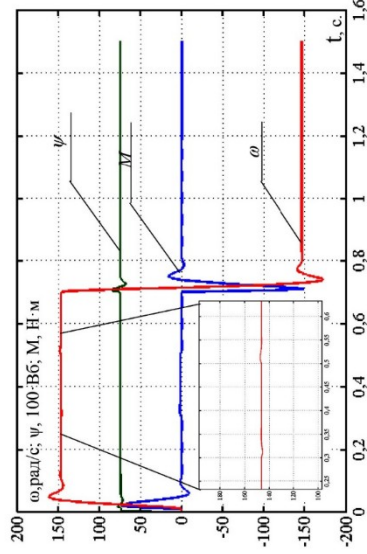
- проаналізувати технологічний процес каталітичного очищення конвертованого газу;
- проаналізувати пуск та зупинку установки каталітичного очищення конвертованого газу;
- обґрунтувати параметри контролю та регулювання, що підлягають автоматизації;
- виділити основні вимоги до електроприводу запірної арматури;
- розробити структурну схему електропривода;
- виконати дослідження перехідних процесів у лінеаризованій системі;
- розробити нелінійної системи асинхронного електроприводу з векторним керуванням;
- розробити функціональну схему автоматизації технологічного процесу метанування оксидів вуглецю;
- виконати позначення приладів та опис контурів керування;
- здійснити розрахунок та вибір технічних пристроїв автоматизації;
- розробити схему електричну принципову.

Для вирішення поставлених завдань в роботі використана методика, що включає в себе методи теорії автоматичного керування та методи математичного моделювання на ПК.

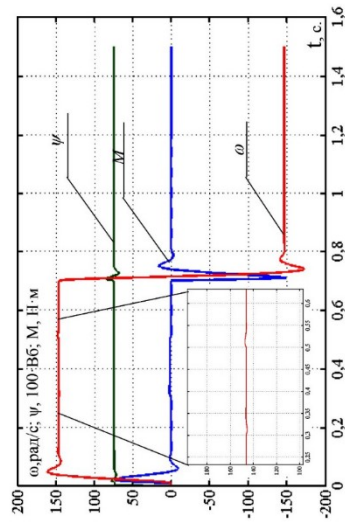
**Структурна схема електропривода запірної арматури**



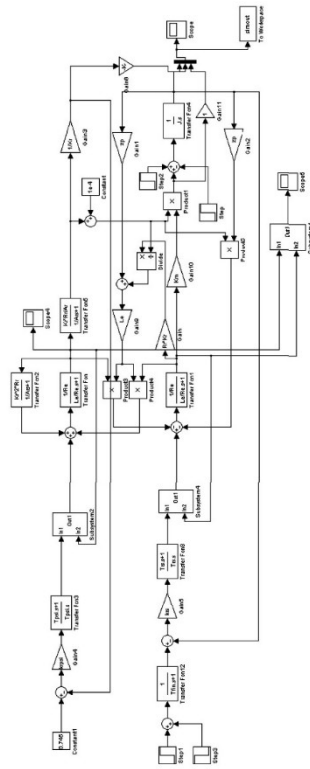
### Синтез системи керування електроприводом заірної арматури



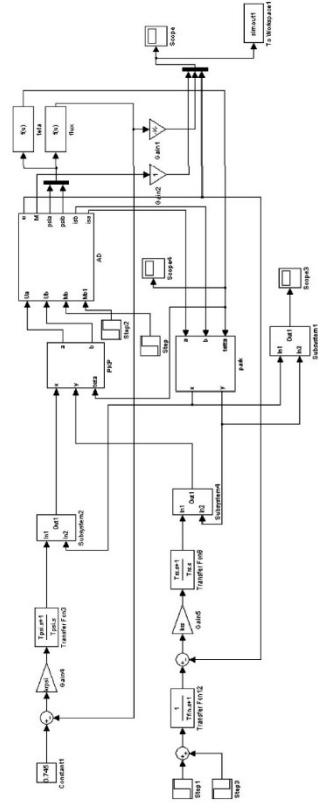
Перехідні процеси в обертаючій системі координат



Перехідні процеси в нерухомій системі координат

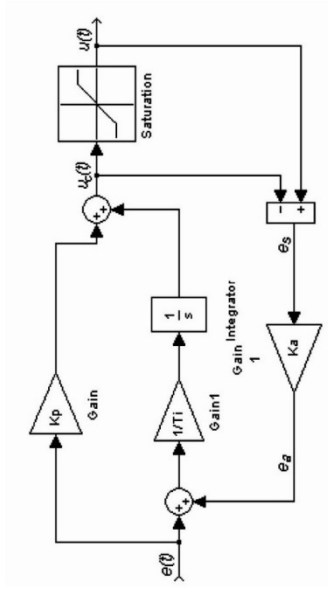


Імітаційна модель двигуна в обертаючій системі координат

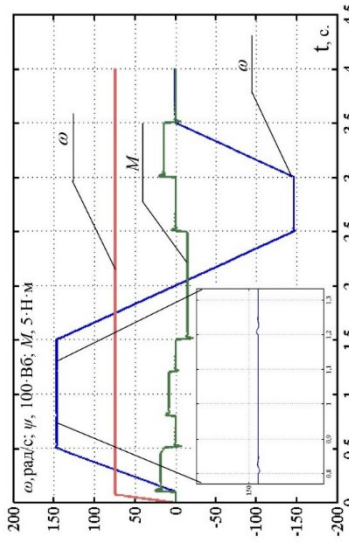


Імітаційна модель двигуна у нерухомій системі координат

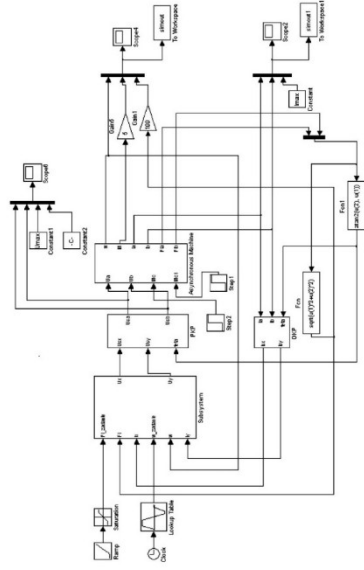
## Розроблення нелінійної системи асинхронного електроприводу з векторним керуванням



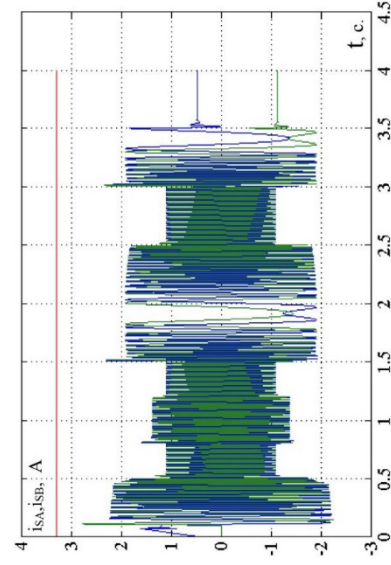
Перехідні процеси в нерухомій системі координат



Перехідні процеси в нерухомій системі координат

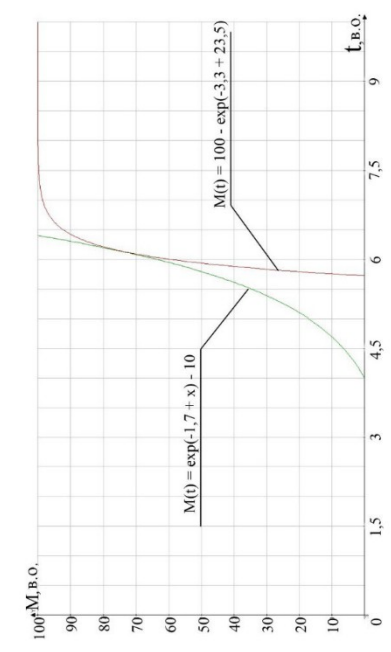


Перехідні процеси в нерухомій системі координат

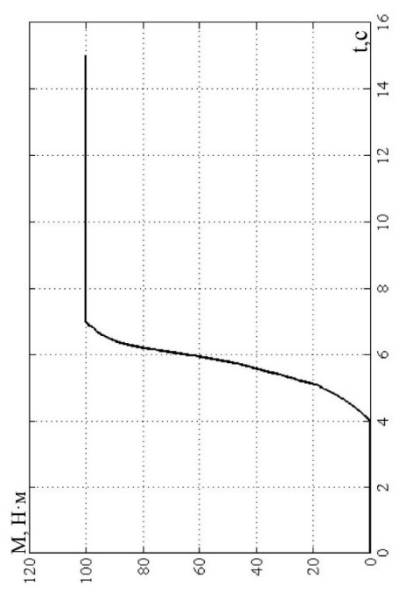


Перехідні процеси в нерухомій системі координат

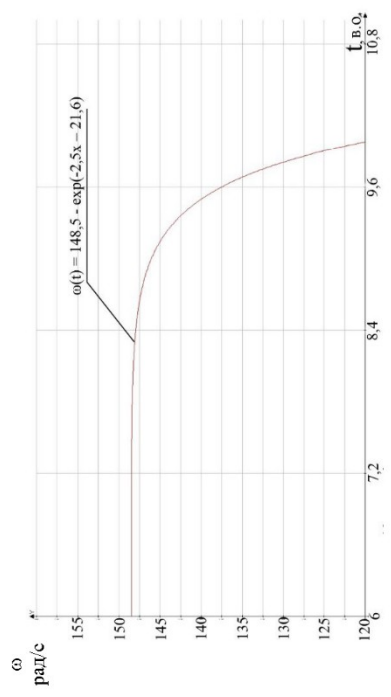
**Дослідження динамічних режимів роботи електропривода запірної арматури**



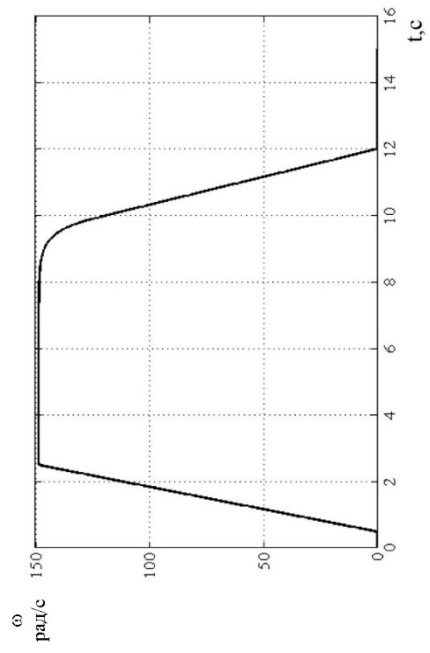
Графік кривої завдання моменту електроприводу



Крива завдання моменту, реалізована у середовищі Matlab

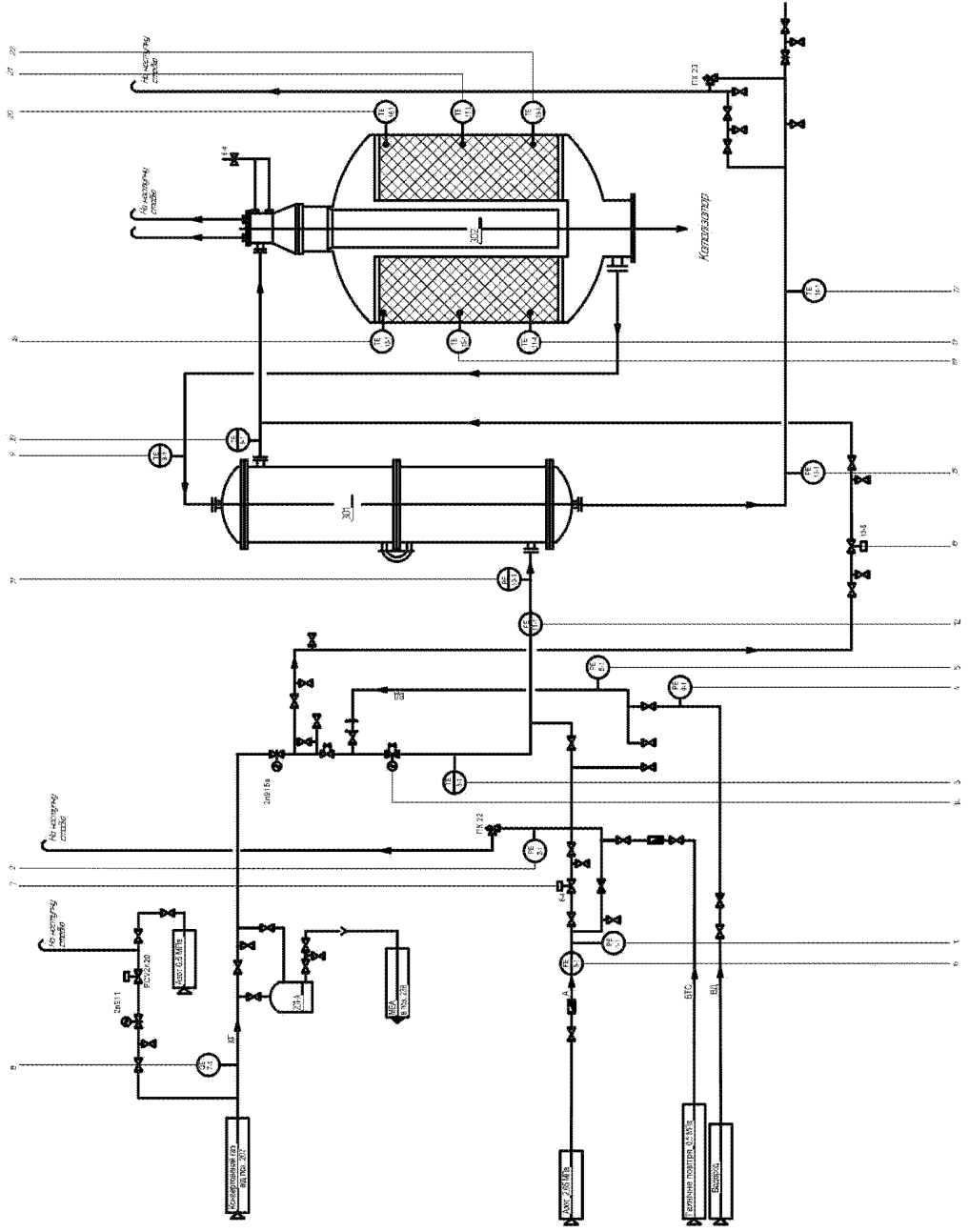


Графік ділянки початку гальмування кривої завдання швидкості електроприводу

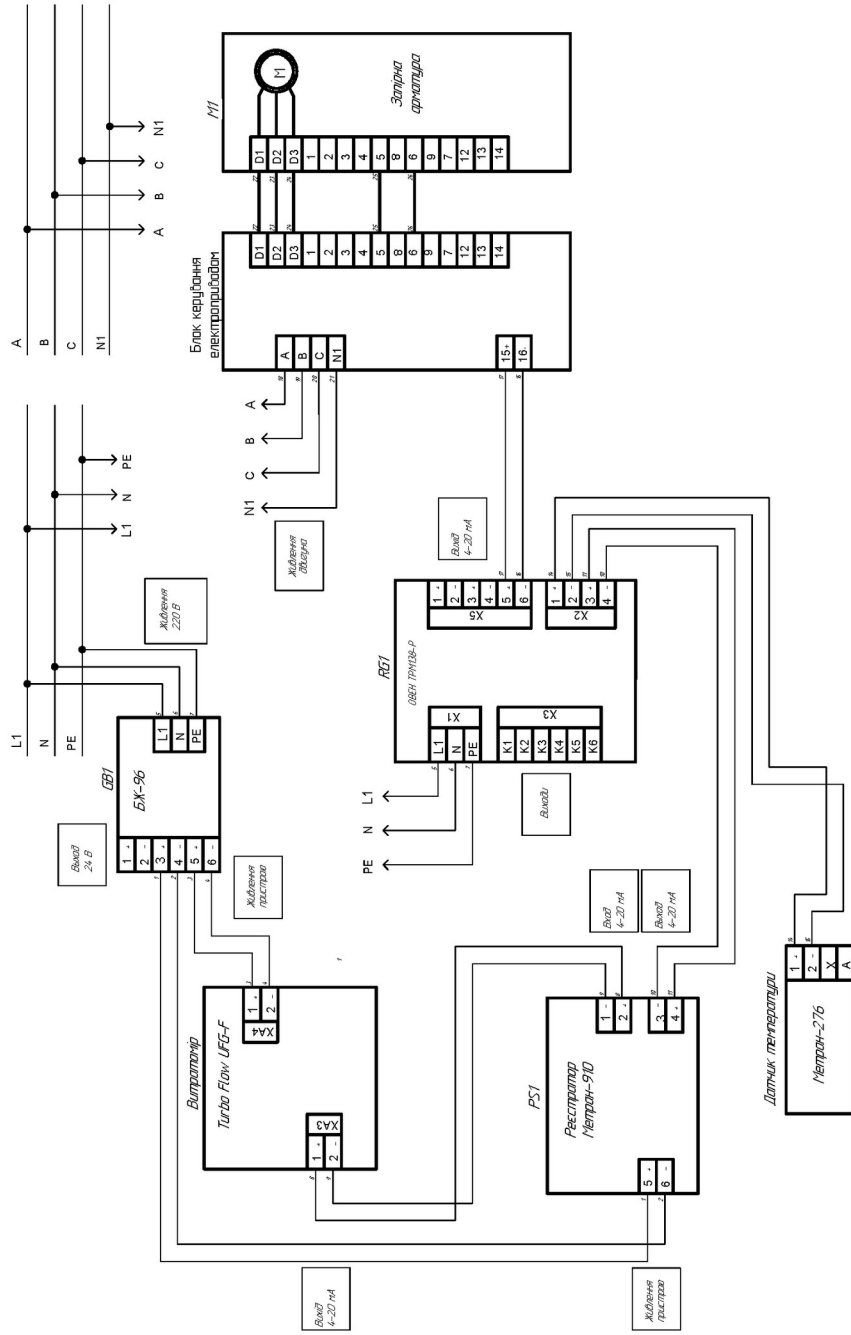


Крива завдання швидкості, реалізована у середовищі Matlab

**Функциональная схема автоматизации метанувания угля**



# Схема електрична принципова системи метанування вугілля



## Висновки

Мета кваліфікаційної робота бакалавра досягнута, а саме розроблено автоматизовану систему керування технологічним процесом метанування оксидів вуглецю з використанням сучасної елементної бази.

У першому розділі виконали аналіз процесу метанування оксидів вуглецю. Виявили сильні та слабкі сторони технологічного процесу. Окреслили параметри, що підлягають контролю та регулюванню.

У другому розділі розроблена структурна схема електропривода запірної арматури. Проведено математичне та імітаційне моделювання асинхронного двигуна запірної арматури. Ідентичність графіків перехідних процесів дозволяє зробити висновок про ідентичність моделей асинхронного двигуна в нерухомій та нерухомій системах координат. Введено обмеження на виході регуляторів в асинхронному електроприводі з векторним керуванням та виконано його дослідження. Застосовано задачник інтенсивності та його вплив на перехідні процеси.

У третьому розділі на основі вивченого обладнання була складена функціональна схема автоматизації з 15 контурами контролю та 3 контурами регулювання, принципова електрична схема. Для визначення фізичних параметрів (витрата, тиск, температура, концентрація) обрали датчики з уніфікованим вихідним сигналом. Для вимірювання температури були обрані датчики Метран-276, для вимірювання витрати - витратомір турбінний витратомір TUV, Turbo Flow UFG-F, для вимірювання тиску - датчик тиску Метран - APC-2000AL, як регулятор був обраний ОВЕН ТРМ138-Р.

Розроблена схема автоматизації може бути застосована для регулювання технологічних процесів, де параметрами регулювання є тиск, температура, витрата.

Дякую за увагу!