

**БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА**

БР.АКП-10.00.00.000 ПЗ

Група АКП-21-1

**Кучма В'ячеслав**

**2025**

Міністерство освіти і науки України  
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу  
Факультет автоматизації та енергетики  
Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій

Кучма В'ячеслав Євгенійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 66.02:669.295.5

(індекс)

## БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

«Автоматизація процесу відновлення чотирихлористого титану»

(назва роботи)

Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

(назва освітньої програми)

151 - «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

(шифр і назва спеціальності)

Робота містить результати власних досліджень, використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

### Нормоконтроль

доцент

(посада)

(підпис)

О. В. Кучмистенко

(дата)

(ініціали та прізвище)

### Рецензент

доцент

(посада)

(підпис)

(дата)

І. І. Чигур

(ініціали та прізвище)

### Здобувач освітнього ступеня

АКП-21-1

(шифр групи)

(підпис)

(дата)

В. Є. Кучма

(ініціали та прізвище)

### Науковий керівник

доцент

(посада)

(підпис)

(дата)

Л.Я. Чигур

(ініціали та прізвище)

### Допущено до захисту

### Завідувач кафедри

доцент

(посада)

(підпис)

(дата)

А.І. Лагойда

(ініціали та прізвище)

**Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу**

(повне найменування закладу вищої освіти)

Факультет автоматизації та енергетики

Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій

Освітній рівень перший (бакалаврський)

Спеціальність 151 - «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

(шифр і назва)

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

**Завідувач кафедри АКІТ**

доцент А. І. Лагойда

«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2025 року

**З А В Д А Н Н Я  
НА БАКАЛАВРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ**

Кучмі В'ячеславу Євгенійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Автоматизація процесу відновлення чотирьохлористого титану»

керівник роботи Чигур Людмила Ярославівна, к.т.н., доцент

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затвердені наказом закладу вищої освіти від « 07 » 05 20 25 року № 52/8

2. Строк подання студентом роботи 13.06.2025

3. Вихідні дані до роботи Технологічна схема об'єкту, параметри проходження процесу, стандарти, каталоги, методичні вказівки

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Вступ. 1. Опис та аналіз технологічного процесу як об'єкта управління. 2. Порівняльний аналіз запропонованих варіантів рішень. 3. Дослідження системи автоматичного керування процесом відновлення тетрахлориду титану. 4. Розробка технічної документації та вибір технічних засобів автоматизації.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

Лист 1 - Структурна схема РСАР в MATLAB - БР.АКП-10.00.00.000 01

Лист 2 - Структурна схема ЗСАР в MATLAB - БР.АКП-10.00.00.000 02

Лист 3 - ЗСАР з усіма типовими регуляторами - БР.АКП-10.00.00.000 03

Лист 4 - Перехідні процеси з усіма регуляторами - БР.АКП-10.00.00.000 04

Лист 5 - Функціональна схема САК - БР.АКП-10.00.00.000 05

Лист 6 - Загальний вигляд щита для процесу обробки тетрахлориду титану - БР.АКП-10.00.00.000 06

## 6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання 06.11.20214

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів бакалаврської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Опис та аналіз технологічного процесу як об'єкта управління	10.05.25-15.05.25	
2	Порівняльний аналіз запропонованих варіантів рішень	16.05.25-21.05.25	
3	Дослідження системи автоматичного керування процесом відновлення тетраклориду титану	22.05.25-30.05.25	
4	Розробка технічної документації та вибір технічних засобів автоматизації	31.05.25-10.06.25	

Студент \_\_\_\_\_  
(підпис)

В. Є. Кучма \_\_\_\_\_  
(ініціали та прізвище)

Керівник роботи \_\_\_\_\_  
(підпис)

Л.Я. Чигур \_\_\_\_\_  
(ініціали та прізвище)

## АНОТАЦІЯ

Бакалаврська робота містить: 70 сторінок друкованого тексту, 37 рисунків, 7 таблиць, 20 переліків посилань на джерела.

Тема: «Автоматизація процесу відновлення чотирихлористого титану».

Об'єкт дослідження: технологічний процес у хімічному реакторі (реторті) для відновлення тетрахлориду титану ( $TiCl_4$ ) магнієтермічним методом.

Мета бакалаврської роботи є розробка сучасної системи автоматизованого управління (САУ) процесом відновлення  $TiCl_4$  у реторті. Для досягнення цієї мети передбачається використання сучасних засобів автоматизації, включаючи програмовані логічні контролери (ПЛК), PID-регулятори та SCADA-системи, які дозволять забезпечити точне регулювання основних технологічних параметрів.

Методи дослідження: методи оптимізації, теоретичні методи, системний підхід, експериментальні методи, математичне моделювання, порівняльний аналіз, методи теорії автоматичного керування.

Результати бакалаврської роботи: проведений детальний аналіз технологічного процесу відновлення  $TiCl_4$  як об'єкта управління. Розроблена математична модель системи регулювання тиску та температури в реторті. За допомогою програмного середовища MATLAB/Simulink проведено моделювання динаміки системи з оцінкою її стійкості та якості регулювання. Здійснено синтез ПД-регулятора, який забезпечив стабілізацію основних параметрів процесу. Здійснено вибір технічних засобів автоматизації, включаючи датчики температури і тиску, виконавчі механізми та контролери, які повинні відповідати вимогам промислового виробництва. Завершальним етапом є розробка функціональної схеми автоматизації та проектування щита управління, який інтегрує всі елементи системи.

Ключові слова: автоматизація технологічних процесів, тетрахлорид титану ( $TiCl_4$ ), магнієтермічне відновлення, система автоматичного регулювання, ПД-регулятор, математичне моделювання, стійкість системи, перехідні характеристики.

## ABSTRACT

Bachelor's thesis contains: 70 pages of printed text, 37 figures, 7 tables, 20 lists of references to sources.

Topic: "Automation of the process of titanium tetrachloride reduction".

Object of research: technological process in a chemical reactor (retort) for the reduction of titanium tetrachloride ( $\text{TiCl}_4$ ) by the magnetothermal method.

The purpose of the bachelor's thesis is to develop a modern automated control system (ACS) for the  $\text{TiCl}_4$  reduction process in a retort. To achieve this goal, it is planned to use modern automation tools, including programmable logic controllers (PLC), PID controllers and SCADA systems, which will allow for precise regulation of the main technological parameters.

Research methods: optimization methods, theoretical methods, system approach, experimental methods, mathematical modeling, comparative analysis, methods of automatic control theory.

Results of the bachelor's thesis: a detailed analysis of the technological process of  $\text{TiCl}_4$  reduction as a control object was carried out. A mathematical model of the pressure and temperature control system in the retort has been developed. Using the MATLAB/Simulink software environment, the dynamics of the system have been simulated with an assessment of its stability and quality of control. A PID controller has been synthesized, which has ensured the stabilization of the main process parameters. A selection of technical means of automation has been made, including temperature and pressure sensors, actuators and controllers, which must meet the requirements of industrial production. The final stage is the development of a functional automation scheme and the design of a control panel that integrates all elements of the system.

Keywords: automation of technological processes, titanium tetrachloride ( $\text{TiCl}_4$ ), magnetothermal recovery, automatic control system, PID controller, mathematical modeling, system stability, transient characteristics.





## ПЕРЕЛІК ОСНОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ

АТПП – Автоматизація технологічних процесів виробництва

TiCl<sub>4</sub> – Тетрахлорид титану

САР – Система автоматичного регулювання

САУ – Система автоматичного управління

РСАР – Розімкнута система автоматичного регулювання

ЗСАР – Замкнута система автоматичного регулювання

ПЛК – Програмований логічний контролер

DCS – Distributed Control System (Розподілена система керування)

SCADA – Supervisory Control and Data Acquisition (Система диспетчерського управління)

ПІД-регулятор – Пропорційно-інтегрально-диференційний регулятор

АСУТП – Автоматизована система управління технологічними процесами ТЕ –

Термоелектричний датчик (термопара)

РТ – Датчик тиску

FT – Датчик витрати

LT – Датчик рівня

НСА – Ручний перемикач аварійного зупину

IEC – International Electrotechnical Commission (Міжнародна електротехнічна комісія)

IP – Ingress Protection (Ступінь захисту оболонки)

PID – Proportional-Integral-Derivative (ПІД-регулятор)

					БР.АКП-10.00.00.000 ПЗ	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## ВСТУП

Сучасні технології виробництва титану відіграють вирішальну роль у багатьох стратегічно важливих галузях промисловості, зокрема в авіабудуванні, космічній техніці, хімічній промисловості та медицині. Одним із найважливіших етапів отримання чистого титану є процес відновлення чотирихлористого титану ( $TiCl_4$ ), який проводиться за допомогою магнію (Mg) або натрію (Na) у спеціальних реакторах - ретортах. Цей процес є складним і багатоетапним, що вимагає ретельного контролю основних технологічних параметрів, таких як температура, тиск і витрата реагентів.

Актуальність даного дослідження обумовлена необхідністю підвищення ефективності, безпеки та точності управління технологічним процесом відновлення  $TiCl_4$ . Традиційні методи керування, що ґрунтуються на ручному регулюванні, не забезпечують достатньої стабільності та контролю критичних параметрів, що може призводити до зниження якості кінцевого продукту, збільшення витрат сировини та енергії, а також створює потенційні ризики для безпеки виробничого процесу.

Очікуваним результатом проекту є створення автоматизованої системи, здатної забезпечити точне регулювання тиску та температури у реакторі, мінімізацію витрат реагентів, підвищення безпеки процесу шляхом запобігання аварійним ситуаціям, а також зниження впливу людського фактора на якість кінцевого продукту.

Практичне значення даної роботи полягає в тому, що запропоновані рішення можуть бути впроваджені на підприємствах, що займаються виробництвом титану, дозволяючи оптимізувати технологічний процес, знизити енерговитрати та підвищити ефективність виробництва. Крім того, розроблена система автоматизації може стати основою для подальшого вдосконалення технологій виробництва титану та його сполук.

					БР.АКП-10.00.00.000 ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

# 1 ОПИС ТА АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ЯК ОБ'ЄКТА УПРАВЛІННЯ

## 1.1 Хімізм технологічного процесу отримання чотирхлористого титану

Титан є одним із найміцніших металів на планеті, але у свою чергу процес отримання в чистому вигляді процес дуже складний. Вчені витратили близько ста років на відокремлення його від навіть невеликої кількості домішок, адже саме окремий вміст чистого титану дає йому властивість міцності та довговічності. У природі він зустрічається лише у різних сполуках. Найбільш поширеною є ільменітова сполука  $\text{FeTiO}_3$  (діоксид титану), її вміст близько 50%, решта — це оксиди заліза. Його видобуток здійснюється на гірничодобувних рудних родовищах, переважно зосереджених на території України [4].

Насамперед із руди видаляють оксиди заліза, її відправляють у величезні плавильні печі. Протягом 6 годин руда поділяється на чавун та діоксид титану. Розплавлену суміш відливають у спеціальні ємності, де утворюються два шари, чавун розташований у нижньому шарі, так як вона важча за титан, вона відливається в окрему ємність. Шлак це вже є сировина, в якій міститься близько 80% діоксиду титану. Для того щоб відправити її на наступний етап, розплавленої суміші титану дають охолонути (температура шлаку в цей момент більша за  $600^\circ\text{C}$ ).

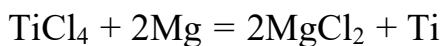
Після повного остигання завдання полягає у відділенні діоксиду титану від кисню. Цей зв'язок є дуже міцним, але вченим вдалося 1940 відокремити кисень від титану. Було підтверджено в ході експерименту, що хлор може витіснити кисень від діоксиду титану. Застигла маса попередньо подрібнюється і вирушає до цеху для хлорування [3].



Це закритий процес, що проходить при високій температурі, в результаті відбувається нова речовина тетрахлорид титану  $\text{TiCl}_4$ . Ця суміш втратила свою колишню міцність і з неї легко отримати чистий титан.

					БР.АКП-10.00.00.000 ПЗ	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Далі звільнення титану від хлору відбувається рахунок магнію.



Пари  $\text{TiCl}_4$ , що утворюються, при  $850^\circ\text{C}$  відновлюють магнієм. В результаті виходить нова речовина магнію дихлорид, а титан залишиться в чистому вигляді. Магній отримують на цьому ж підприємстві, його виробництво - закільцьований безперервний процес. Відправною точкою є цех, у якому знаходяться електролізери, в них заливають розплав магнію дихлориду. Під впливом постійного струму магній спливає поверхню. Хлор, що відокремився під час процесу, знову подається на цех для відокремлення від кисню діоксиду титану. Тобто хлор знаходиться в замкнутому циклі, що не залишає межі цехів, не завдаючи загрози для навколишнього середовища [8].

Рідкий магній перед відправкою для виробництва титану проходить відділення від домішок, його називають рафінуванням (додають безпосередньо флюс, щоб уникнути окислення). Флюс тягнеться на одне, захоплюючи з собою непотрібні домішки. Таким чином відбувається очищення магнію [7].

У цеху розташовані спеціальні обробні пристрої як коконів, звані ретортами. У реторту подається магній та тетрахлорид титану. Температура піднімається до  $820^\circ\text{C}$ , адже саме за цих умов хлор відокремлюється від титану та приєднується до магнію. Нова речовина магнію хлорид осідає на дні реторти, а легкий титан нашаровується на її верхній частині. Після вакуумної сепарації в реторті залишається блок титану. Перед тим, як відкрити реторту її попередньо охолоджують, у результаті утворюється пориста речовина – титанова губка. В результаті тривалого процесу виходить високоякісна сировина без домішок [7].

## 1.2 Опис процесу відновлення за допомогою реторти

Реторта – спеціальна хімічна посудина, що застосовується у практичних лабораторних та цехових роботах. Даний винахід є основним на сьогоднішній день способом виробництва титану в чистому вигляді за допомогою магній термічного процесу. Цей спосіб є свого образу витісненням хімічно активних

					БР.АКП-10.00.00.000 ПЗ	Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

металів із різних сполук. У ході цього процесу важливу роль відіграють такі властивості:

- 1) хімічна активність активних металів;
- 2) низька вартість процесу відновлення;
- 3) відновлення металів має відбуватися виключно за допомогою окремих активних металів (без домішок та сполук);
- 4) висока здатність відокремлення металу від утвореного шлаку.

Процес відновлення титану всередині реторти відбувається за температури 800 – 900°C. Середня висота реторти має становити від 2 до 3.5 метри. При цьому кількість магнію для відновлення 120-140% більше обсягом необхідного в ході реакції. Процес подачі тетрахлориду титану здійснюється за допомогою автоматичного регулювання [5].

У ході процесу титан збирається на дні відновлювального апарату у вигляді губчастої маси, який містить магній і хлорид магнію, що час від часу виводиться з реторти через спеціальний зливний пристрій, що відводить. Тривалість такого процесу відновлення у реторті становить близько 30-60 годин. Отриманий обсяг титану в першу чергу залежить від обсягу реторти, в середньому він становить від 1 до 5 тон титану. Після закінчення процесу обсяг титану становитиме 50% від загального обсягу реторти, решта його — надлишковий хлорид і магній. Процес витіснення даних домішок від титану називається вакуумною відгоном, тобто створення високої різниці тиску пароутворюючих компонентів маси реакції за високотемпературної умови. Для відновлення цього процесу реторту потрібно нагріти до 1000°C. Такий процес утворення вакууму через конденсуючий апарат дає залишковий тиск після відгону від 1 до 7 Па в системі. Час процесу, що протікає, становить від 25 до 55 годин, при цьому витрата електроенергії становить від 6 до 9 кВт \* год / кг [6].

Після всієї реакції обробки та відновлення титану, титанова губка буде містити:

- 1) Біля 0.05% Cl; 2) 0.09% Fe;
- 3) 0.049% C2;

					БР.АКП-10.00.00.000 ПЗ	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- 4) 0.049% Ni;
- 5) 0.0185% C;
- 6) 0.0185% N;
- 7) 0.475% Si.

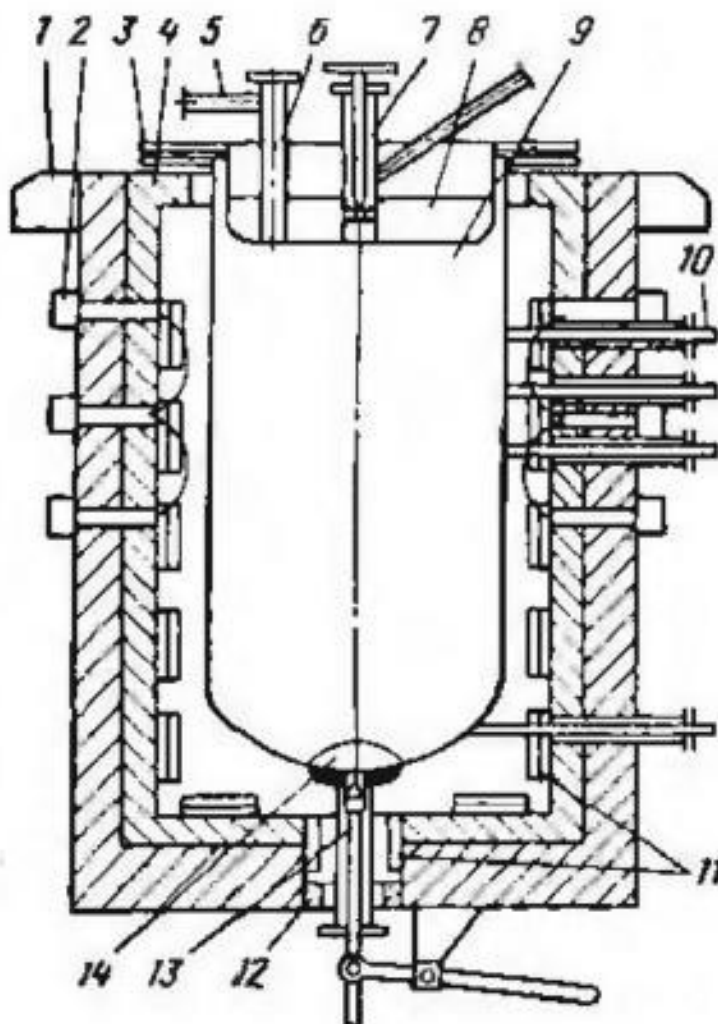


Рисунок 1.1 – Схема реторти відновлення тетрахлориду титану

На рисунку 1.1 прийняті такі позначення: 1 - опора печі, 2 - колектори подачі та відведення повітря; 3 - водоохолоджуване фланцеве з'єднання; 4 - футерування печі; 5 - штуцер вакуумування та подачі аргону; 6 - вузол заливання магнію; 7 - вузол подачі  $TiCl_4$ ; 8 - кришка реактора; 9 – реторту; 10 - контактні термометри (термощупи); 11 - нагрівачі; 12 - пісочний затвор; 13 - багнет зливного пристосування; 14 - хибне днище.

Загальний обсяг губчастого титану, що відокремився, зі шлаку становитиме

										Арк.
										13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	БР.АКП-10.00.00.000 ПЗ					

70-80%. Для більшості сучасних компаній споживачів технічно чистий титан використовують у губчастому вигляді, але якщо є необхідність застосування більш спеціалізованих областей, то її піддають додатковому очищенню за допомогою рафінування [7].

Найчистіший титан одержують у процесі електронної безтигельної плавки йодидного металу.

### **1.3 Аналіз технологічного процесу відновлення чотирьохлористого титану з точки зору автоматизації**

Аналіз технологічного процесу як об'єкта управління виконується за допомогою введених параметрів технологічного режиму.

Після виконання аналізу процесу необхідно позначити параметри технологічного процесу, допустимі відносини і значення, що задаються, і те, як вони пов'язані між собою [6].

Далі будується технічна специфікація приладів та датчиків для вимірювання та керування параметрами під час технологічного процесу.

Складання системи автоматичного управління та регулювання для всього циклу процесу є складним процесом, тому що на це часто впливають різні фактори. Щоб розв'язати завдання та складності в ході виконання роботи, їх поділяють на підзавдання та намагаються оптимізувати параметри, що видаються в ході технологічного процесу. Але не слід забувати факт присутності технічних обмежень, що дозволяють контролювати регламент відтворення процесів [7].

При створенні проекту автоматизації об'єкта управління стикаються з параметрами, які мають прямий вплив на об'єкт, мета якого є регулювання технологічного процесу в режимі, що задається.

Є кілька основних типів впливів збурення.

Збурення, що призводять до стабілізації за допомогою САР. Наприклад, обсяг сировини, що подається на об'єкт управління, або регулювання тиску або температури як в даному об'єкті управління.

					БР.АКП-10.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

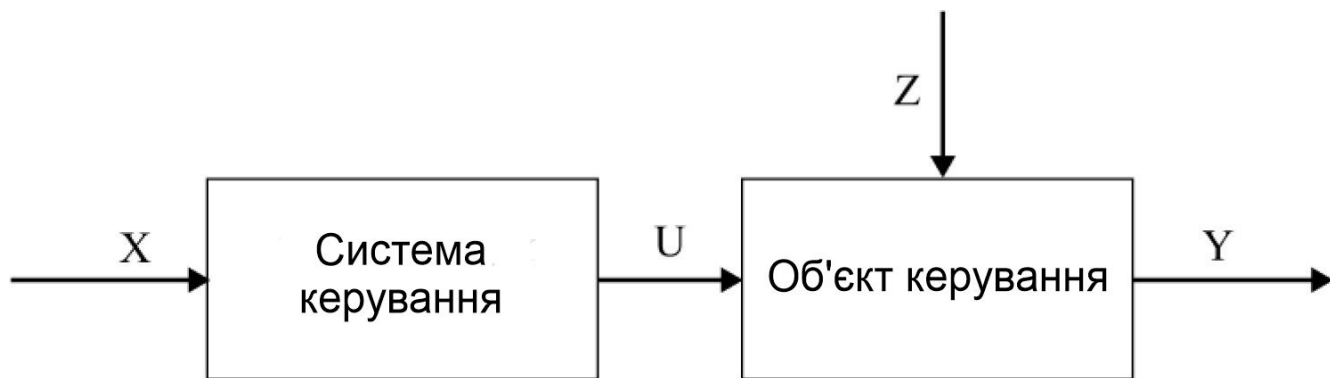


Рисунок 1.2 – Структурна схема управління прямого зв'язку

Збурення, що піддаються контролю. Це змінні, але не піддаються стабілізації. Найпростішим прикладом є зовнішня температура повітря.

Збурення, які не піддаються контролю, тобто змінні, які не доцільно контролювати або вимірювати, а іноді це зовсім неможливо.

Параметри на виході із системи. В основному вибирають параметри, що піддаються регулюванню. Як об'єкт управління в процесі обробки та утворення титану було взято реактор відновлення (реторту).

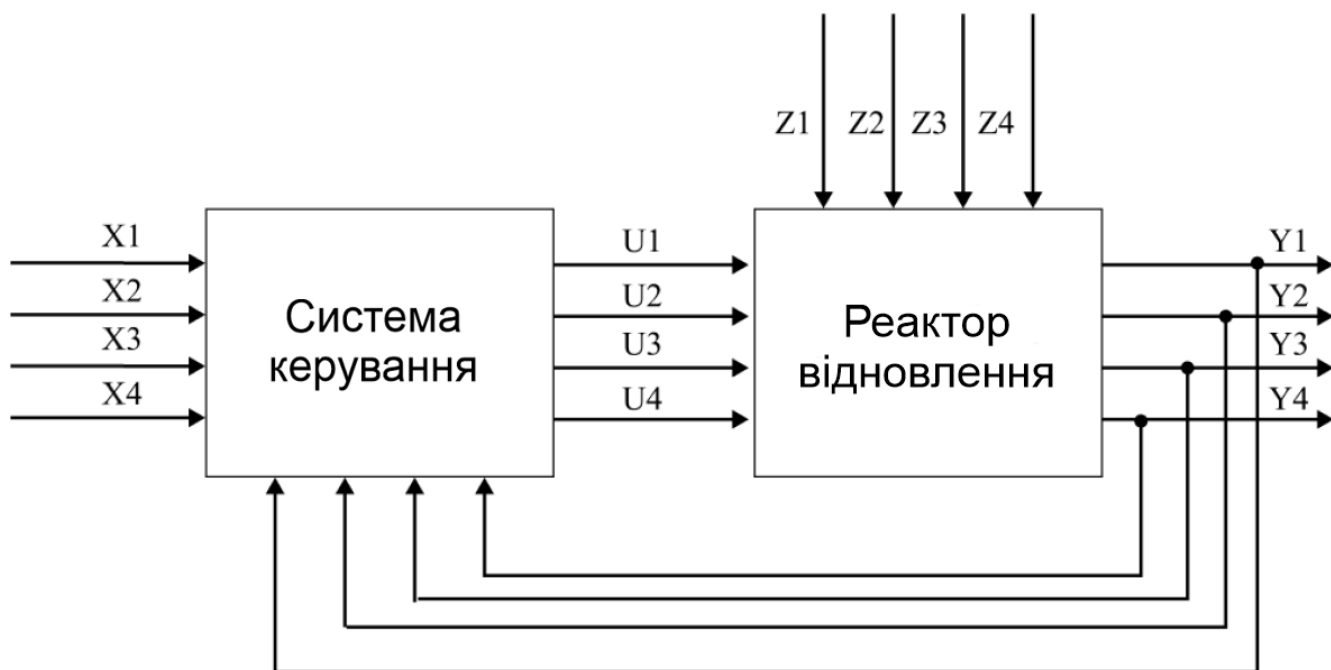


Рисунок 1.3 – Структурна схема автоматичного керування процесу відновлення тетрахлориду титану

В даному випадку задачій вплив: X1 - вміст  $TiCl_4$ ; X2 - вміст Mg; X3 - властивість Mg; X4 – властивість Ar.

Регулююча дія: U1 - швидкість подається  $TiCl_4$ ; U2 – значення температурного середовища у процесі відновлення; U3 – режим переливання суміші; U4 – допустимий тиск у реторті.

Збурючий вплив: Z1 – вміст зайвих домішок у складі  $TiCl_4$ , Mg, Ar; Z2 - стійкість апаратури та обладнання; Z3 – впливом геть процес не контрольованих координат процесу; Z4 – здатність зміни довкілля.

Вихідні змінні: Y1 – результативність; Y2 – склад Cl.

#### 1.4 Основні завдання для управління процесом відновлення $TiCl_4$

Основне завдання, поставлене регулювання технологічного процесу відновлення титану за допомогою попередньо обробленого магнію – розробка проекту з процесу відновлення титану в реторті, при цьому забезпечити максимальну продуктивність і працездатність апарату відновлення для отримання максимально заданого рівня якості продукту, що паралельно відповідає всім технічним обмеженням.

Параметри для технологічного режиму відновлення чистого титану:

- 1) регулювання титану  $TiCl_4$ , що подається;
- 2) регулювання значення температурного середовища у процесі відновлення;
- 3) регулювання допустимого тиску у реторті;
- 4) управління режимом переливання суміші.

Складнощі при проектуванні системи автоматизації процесом можуть бути викликані регулярністю відновлювального процесу, малий рівень точності регулювання та контролю матеріальних потоків, труднощі у налагодженні обміну даними між параметрами.

					БР.АКП-10.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

## Висновки до розділу

У першому розділі роботи було проведено комплексне дослідження технологічного процесу відновлення чотирихлористого титану ( $TiCl_4$ ) як об'єкта автоматизації. Основна увага була зосереджена на детальному аналізі хімічних перетворень, конструктивних особливостей реторти та визначенні ключових параметрів, що впливають на якість кінцевого продукту.

Процес виробництва титану методом магнієтермічного відновлення показав себе як складний багатостадійний цикл, що включає кілька критично важливих етапів. Особливу увагу було приділено хімічній стороні процесу, де діоксид титану спочатку перетворюється на тетрахлорид, який потім відновлюється магнієм до чистого металу. Ці реакції відбуваються за високих температур (800-900°C) і потребують ретельного контролю.

Конструктивний аналіз реторти як основного технологічного апарату виявив її складну будову, що включає системи подачі реагентів, теплообміну та видалення продуктів реакції. Було встановлено, що процес характеризується значною інерційністю (тривалість циклу 30-60 годин) і чутливістю до змін основних параметрів. Системний підхід до аналізу дозволив чітко визначити основні керуючі впливи; головні збурюючі фактори; критичні вихідні параметри. Важливим результатом розділу стало побудовання структурної схеми управління процесом, яка наочно демонструє взаємозв'язок між окремими параметрами та вплив зовнішніх факторів. Було виявлено, що система має виражену нелінійність і сильну взаємозалежність між окремими контурами регулювання.

Отримані результати створюють міцну теоретичну базу для подальшого проектування системи автоматизованого управління, дозволяючи обґрунтовано підійти до вибору технічних засобів автоматизації та розробки алгоритмів керування.

					БР.АКП-10.00.00.000 ПЗ	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## 2 ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ЗАПРОПОНОВАНИХ ВАРІАНТІВ РІШЕНЬ

### 2.1 Порівняльний аналіз варіантів автоматизації технологічних процесів

Оскільки основними промисловими методами є процес Кролла (магнієтермічне відновлення) та процес Хантера (натрійтермічне відновлення), розглянемо та порівняємо варіанти автоматизації для кожного з них, а також загальні підходи та технології.

Процес Кролла є періодичним і включає кілька етапів, кожен з яких може бути автоматизований.

Підготовка реакційної посудини (реторти). Ручний варіант: очищення, завантаження магнію, герметизація здійснюються вручну. Варіанти автоматизації: автоматизовані системи очищення - механізовані щітки, вакуумні системи для видалення залишків; роботизовані комплекси завантаження магнію - точне дозування та завантаження магнієвих злитків або гранул; автоматизовані системи герметизації - контроль герметичності з використанням датчиків тиску та автоматичних затискних механізмів.

Подача тетрахлористого титану ( $TiCl_4$ ). Ручний варіант: контроль подачі здійснюється оператором за допомогою вентилів та витратомірів. Варіанти автоматизації: автоматичні регулюючі клапани - керовані за сигналами від датчиків тиску та витрати для точного дозування  $TiCl_4$ ; системи контролю фазового стану  $TiCl_4$  - моніторинг температури та тиску для забезпечення подачі  $TiCl_4$  у газовій фазі; системи запобігання гідролізу - контроль вологості в трубопроводах та обладнанні.

Проведення реакції відновлення. Ручний варіант: контроль температури печі здійснюється оператором за показаннями термопар. Варіанти автоматизації: автоматичні системи керування температурним режимом печі - ПІД-регулятори для точного підтримання заданої температури за зонами печі; системи контролю тиску в реторті - моніторинг тиску для запобігання витокам та аварійним ситуаціям; системи контролю атмосфери в реторті - підтримання інертної

					БР.АКП-10.00.00.000 ПЗ	Арк.
						18
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

атмосфери (аргону) з контролем чистоти газу; моделювання та оптимізація процесу - використання математичних моделей для прогнозування ходу реакції та оптимізації температурних профілів.

Вивантаження титанової губки та хлориду магнію ( $MgCl_2$ ). Ручний варіант: охолодження реторти, розгерметизація та вивантаження здійснюються вручну. Варіанти автоматизації: автоматизовані системи охолодження - контрольоване охолодження реторти для оптимізації часу циклу; роботизовані комплекси вивантаження: - маніпулятори для безпечного та ефективного вилучення титанової губки та  $MgCl_2$ ; системи розділення продуктів - механізовані системи для первинного відділення титанової губки від хлориду магнію.

Подальша обробка титанової губки. Вакуумна дистиляція/вилуговування: автоматизовані системи контролю температури та вакууму для видалення  $MgCl_2$  та непрореагованого магнію; автоматизовані системи контролю концентрації розчинів для вилуговування.

Автоматизація натрійтермічного процесу (процесу Хантера). Процес Хантера також є періодичним, але має свої специфічні етапи.

Підготовка сталеві бомби. Аналогічно процесу Кролла, потрібна автоматизація очищення, завантаження натрію та герметизації. Особлива увага приділяється безпеці через високу реакційну здатність натрію. Варіанти автоматизації: герметичні роботизовані системи завантаження натрію в інертній атмосфері.

Подача тетрахлористого титану ( $TiCl_4$ ). Аналогічно процесу Кролла, потрібні автоматичні регулюючі клапани та системи контролю фазового стану.

Проведення реакції відновлення: автоматичні системи керування температурним режимом печі та контролю тиску в бомбі; моніторинг та контроль можливих викидів натрію.

Вивантаження титанового порошку та хлориду натрію ( $NaCl$ ). Автоматизовані системи охолодження бомби - роботизовані комплекси вивантаження в захищеному середовищі.

					БР.АКП-10.00.00.000 ПЗ	Арк.
						19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Автоматизовані системи розділення продуктів. Складніші системи для відділення дрібнодисперсного титанового порошку від NaCl, що може включати промивання, фільтрацію та сушку з автоматичним контролем параметрів.

Незалежно від конкретного методу відновлення, існують загальні технології та підходи, які можуть бути застосовані для автоматизації.

Системи керування технологічними процесами (АСУТП / DCS) - централізовані системи для моніторингу та керування всіма етапами процесу. Забезпечують збір даних, візуалізацію, управління виконавчими механізмами та формування звітів.

Програмовані логічні контролери (ПЛК / PLC) - використовуються для автоматизації дискретних та безперервних процесів на рівні окремих машин та агрегатів.

Системи збору та обробки даних (SCADA) - для моніторингу та контролю розподілених систем, збору великих обсягів даних та їх аналізу.

Датчики та вимірювальні прилади - широкий спектр датчиків для вимірювання температури, тиску, витрати, рівня, хімічного складу та інших технологічних параметрів.

Виконавчі механізми - автоматичні клапани, насоси, приводи, роботи-маніпулятори.

Робототехніка - застосування промислових роботів для виконання монотонних, небезпечних або точних операцій (завантаження, вивантаження, зварювання, контроль якості).

Системи машинного зору - для контролю якості продукції, розпізнавання об'єктів та навігації роботів.

Системи штучного інтелекту та машинного навчання - для оптимізації технологічних процесів, прогнозування відмов обладнання та підтримки прийняття рішень оператором.

Цифрові двійники (Digital Twins) - віртуальні моделі фізичних процесів та обладнання для моделювання, оптимізації та навчання персоналу.

					БР.АКП-10.00.00.000 ПЗ	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 2.1 - Порівняльний аналіз варіантів автоматизації.

Критерій Автоматизації	Процес Кролла	Процес Хантера
<b>Складність автоматизації</b>	<p>Висока, зумовлена високими температурами, корозійним середовищем (<math>MgCl_2</math>), необхідністю контролю герметичності реакторів великого об'єму та складним періодичним циклом.</p> <p>Автоматизація вимагає надійного обладнання, здатного працювати в екстремальних умовах.</p>	<p>Дуже висока, додатково ускладнюється високою реакційною здатністю натрію, що вимагає спеціальних заходів безпеки та герметичних систем.</p> <p>Автоматизація етапів розділення дрібнодисперсного порошку титану від <math>NaCl</math> також є складною задачею.</p>
<b>Вартість автоматизації</b>	<p>Значні інвестиції в спеціалізоване обладнання для високих температур, корозійностійкі матеріали, роботизовані комплекси та системи керування.</p>	<p>Ще вища, через додаткові вимоги до безпеки при роботі з натрієм, складніші системи розділення продуктів та необхідність використання інертного середовища на багатьох етапах.</p>
<b>Підвищення безпеки</b>	<p>Значне зниження ризику для персоналу при завантаженні/вивантаженні гарячих реакторів, контакті з <math>TiCl_4</math> та контролі технологічних параметрів. Автоматичні системи контролю тиску та температури запобігають</p>	<p>Критично важливе значення для мінімізації ризиків, пов'язаних з роботою з розплавленим натрієм. Автоматизовані системи завантаження/вивантаження та контролю протікання реакції значно підвищують безпеку.</p>



Автоматизація процесу відновлення чотирихлористого титану є стратегічно важливим напрямком для підвищення конкурентоздатності виробництва титану. Хоча вартість впровадження автоматизованих систем є значною, довгострокові переваги у вигляді підвищення безпеки, продуктивності, якості продукції та зниження витрат є безперечними.

Для процесу Кролла акцент в автоматизації робиться на точному контролі температурних режимів, дозуванні  $TiCl_4$  та магнію, автоматизації завантаження/вивантаження реакторів та подальшої обробки губки.

Для процесу Хантера ключовими аспектами автоматизації є забезпечення безпеки при роботі з високореакційним натрієм, автоматизація процесів розділення дрібнодисперсного титанового порошку від хлориду натрію та контроль атмосфери на всіх етапах.

В обох випадках впровадження сучасних АСУТП, ПЛК, робототехнічних комплексів та систем машинного зору відіграє вирішальну роль у створенні ефективного та безпечного автоматизованого виробництва титану. Подальший розвиток технологій штучного інтелекту та цифрових двійників відкриває нові можливості для оптимізації та інтелектуалізації процесів відновлення чотирихлористого титану.

## 2.2 Постановка завдання для наукових досліджень

Отже, основними завданнями в бакалаврській роботі є наступні. На основі отриманих передавальних функцій елементів системи (електронного підсилювача, електродвигуна постійного струму, редуктора, електромагнітного клапана, хімічного реактора) розробити загальну математичну модель контуру керування тиском у реакторі.

Створити структурну схему контуру керування тиском, використовуючи бібліотеку Simulink. Елементи схеми повинні включати моделі реактора, виконавчого механізму (електромагнітного клапана), датчика тиску, ПІД-контролера, блок задання тиску та блоки для формування сигналу помилки.

					БР.АКП-10.00.00.000 ПЗ	Арк.
						23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Підібрати оптимальні значення коефіцієнтів пропорційної ( $K_p$ ), інтегральної ( $K_i$ ) та диференціальної ( $K_d$ ) складових ПІД-контролера з використанням різних методів. Провести серію симуляцій створеної структурної схеми в Simulink для аналізу динамічної поведінки системи при різних сценаріях (зміна заданого значення, вплив збурень). Оцінити якість розробленої САК за такими показниками, як стійкість, швидкість виходу на заданий режим (час наростання, час встановлення), перерегулювання, статична похибка та реакція на збурення.

Дослідити стійкість розімкнутої та замкнутої систем керування з використанням першого методу Ляпунова та критерію Найквіста в командному рядку MATLAB. Провести порівняльний аналіз впливу P-, PI- та PID-регуляторів на якість керування тиском у реакторі шляхом моделювання та оцінки прямих показників якості перехідних процесів. Якщо досягнуті показники якості регулювання не відповідають заданим вимогам, провести ітераційну оптимізацію параметрів ПІД-контролера з використанням інструментів MATLAB.

Замість загального аналізу автоматизації всього процесу відновлення, дане завдання фокусується на критично важливому параметрі – тиску в реакторі. Це дозволяє глибше дослідити специфіку керування саме цим параметром.

Завдання передбачає практичну реалізацію системи керування у вигляді математичної моделі та її симуляцію в потужному інструменті MATLAB Simulink. Це дає можливість отримати кількісні оцінки якості регулювання та візуалізувати динамічні процеси. На відміну від загального обговорення переваг автоматизації, це завдання включає конкретні методи аналізу стійкості системи (метод Ляпунова та критерій Найквіста), що є фундаментальним аспектом проектування систем керування. Налаштування та оптимізація параметрів ПІД-контролера для досягнення бажаних характеристик системи керування, що є практично важливим кроком при впровадженні САК.

Таким чином, наведене завдання є більш конкретним, орієнтованим на практичну реалізацію та глибокий аналіз контуру керування тиском у реакторі відновлення керування тетраклориду титану з використанням сучасних інструментів моделювання та аналізу систем.

					БР.АКП-10.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

### 3 ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ВІДНОВЛЕННЯ ТЕТРАХЛОРИДУ ТИТАНУ

#### 3.1 Реалізація контуру керування тиском у хімічному реакторі відновлення тетрахлориду титану

У ході реалізації передавальних функцій систем тиску в реторті було використано такі рівняння:

Передатна функція електронного підсилювача:

$$G_{en}(s) = T_{en} \frac{dU_{вих}}{dt} + U_{вих} = 90 \quad (3.1)$$

де  $T_{en}$  - постійна за часом електронного підсилювача, с;  $U_{вих}$  - напруга на виході, В;  $U_{вх}$  - напруга на вході, В.

Передавальна функція електричного двигуна постійного струму:

$$T_{я}T_{м} \frac{d^2w}{dt^2} + T_{м} \frac{dw}{dt} + w = K_{\delta}U_{\delta} = \frac{0,0002}{0,02s^2 + 1,6s + 1} \quad (3.2)$$

де  $T_{я}$  - електромагнітна постійна за часом якоря, с;  $T_{м}$  - електромеханічна постійна двигуна, с;  $w$  - кутова швидкість, с<sup>-1</sup>;  $K_{\delta}$  - коефіцієнт передачі електродвигуна, 1/сВ;  $U_{\delta}$  - напруга на якорі, В.

Передатна функція редуктора:

$$W_{вих} = K_p W_{вх} = 0,8 \quad (2.3)$$

де  $W_{вих}$  - кутова швидкість ланки редуктора на виході;  $W_{вх}$  - кутова швидкість ланки редуктора на вході;  $K_p$  - коефіцієнт передачі.

Передатна функція електромагнітного клапана:

$$T_{кл} \frac{dp}{dt} + P = K_{кл} Q = \frac{12}{0,8s + 1} \quad (3.4)$$

де  $T_{кл}$  - постійна за часом;  $K_{кл}$  - коефіцієнт передачі.

Передатна функція хімічного реактора:

$$T_0 \frac{dF_{вих}}{dt} + F_{вих} = kF_{вх}$$

					БР.АКП-10.00.00.000 ПЗ	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

де  $F_{вих}$  – вихідна концентрація речовини;  $F_{вх}$  – вхідна концентрація речовини;  $T_0$  - постійна об'єкта за часом.

### 3.2 Побудова САУ у програмному забезпеченні MATLAB

Використовуючи бібліотеку Simulink, необхідно створити структурну схему контуру керування тиском. Елементи структурної схеми включатимуть блоки, що представляють: модель хімічного реактора (створена на основі математичної моделі); модель виконавчого механізму; модель датчика тиску; ПД-контролер; задаюче значення тиску; блоки для підсумовування сигналів та формування сигналу помилки; блоки для візуалізації сигналів.

На основі фізичних характеристик реактора, виконавчого механізму та датчика тиску необхідно задати відповідні параметри в блоках Simulink.

Для ПД-контролера необхідно підібрати коефіцієнти пропорційної, інтегральної та диференційної складових. Налаштування параметрів контролера може здійснюватися за допомогою різних методів, таких як метод Циглера-Ніколса, метод Коена-Куна або шляхом оптимізації критеріїв якості перехідного процесу (наприклад, мінімізація часу перегулювання, часу встановлення, статичної помилки).

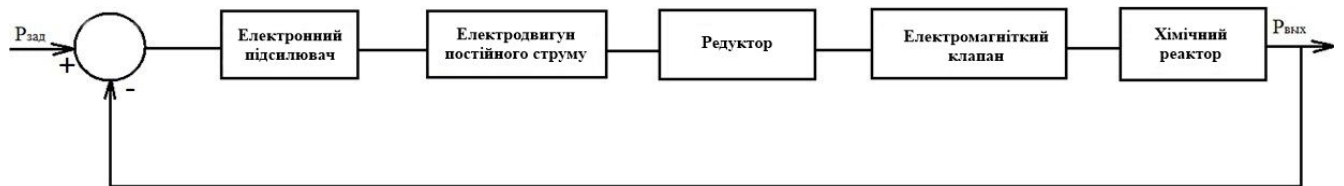


Рисунок 3.1 – Функціональна схема САУ тиску в реторті відновлення

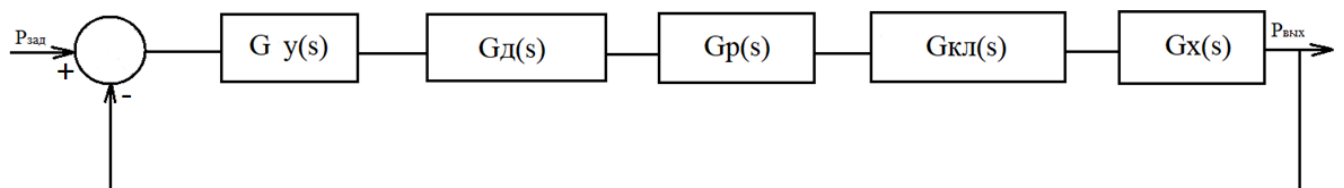


Рисунок 3.2 – САУ структурної схеми тиску в реторті відновлення

					БР.АКП-10.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

Необхідно запуснути симуляцію створеної структурної схеми в Simulink. Проаналізувати отримані графіки зміни тиску в часі, керуючого сигналу та сигналу помилки. Оцінити якість регулювання тиску за такими показниками, як: стійкість системи; швидкість виходу на заданий режим; перегулювання; статична похибка; реакція на збурення (наприклад, зміна вхідних потоків).

Оптимізація параметрів контролера (за необхідності): якщо результати симуляції не відповідають вимогам до якості регулювання, необхідно скоригувати параметри ПІД-контролера та повторити симуляцію. Процес оптимізації може бути ітераційним і включати аналіз впливу кожного коефіцієнта контролера на динаміку системи. Можна використовувати інструменти оптимізації, доступні в MATLAB, для автоматичного підбору параметрів контролера.

Control System Toolbox містить готові блоки для моделювання лінійних систем, проектування контролерів та аналізу стійкості.

Simulink Control Design дозволяє лінеаризувати нелінійні моделі реакторів для спрощення проектування лінійних контролерів.

Optimization Toolbox надає інструменти для оптимізації параметрів контролера з метою досягнення бажаних характеристик системи.

Simscape може бути використаний для більш детального моделювання фізичних процесів у реакторі та виконавчому механізмі.

Отримання та розробка передавальної РСАР без зворотного зв'язку реактора відновлення:

$$G(s) = G_{en}(s) \cdot G_d(s) \cdot G_p(s) \cdot G_{кл}(s) \cdot G_x(s) \quad (3.6)$$

$$G(s) = \frac{0.1121}{0.00848s^4 + 0.705s^3 + 2.572s^2 + 2.93s + 1} \quad (3.7)$$

Отримання та розробка передавальної ЗСАР із зворотним зв'язком реактора відновлення:

$$T(s) = \frac{G(s)}{G(s) + 1} \quad (3.8)$$

$$G(s) = \frac{0.1121}{0.00848s^4 + 0.705s^3 + 2.572s^2 + 2.93s + 1.1121} \quad (3.9)$$

					БР.АКП-10.00.00.000 ПЗ	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

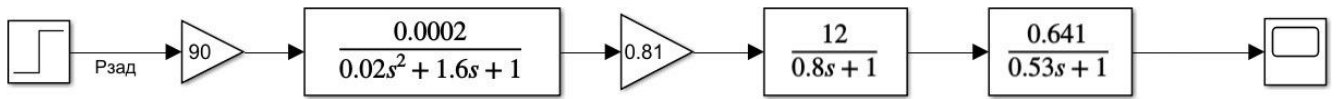


Рисунок 3.3 – Структурна схема моделювання РСАР в Simulink MATLAB

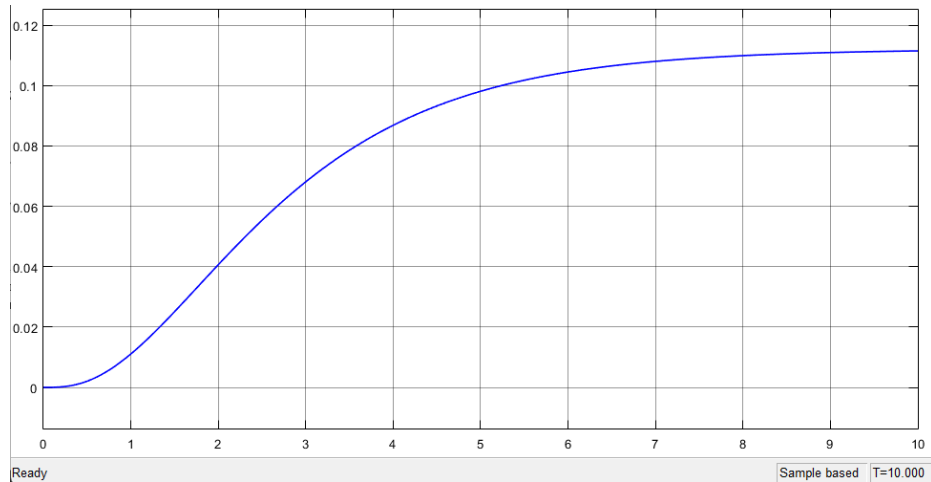


Рисунок 3.4 – Результат моделювання РСАР

На малюнку 3.5 та 3.6 наведено результати моделювання ЗСАР тиску в хімічному реакторі відновлення. Відповідно до вихідних графіків ЗСАР, перехідні процеси вихідної та еквівалентної систем ідентичні.

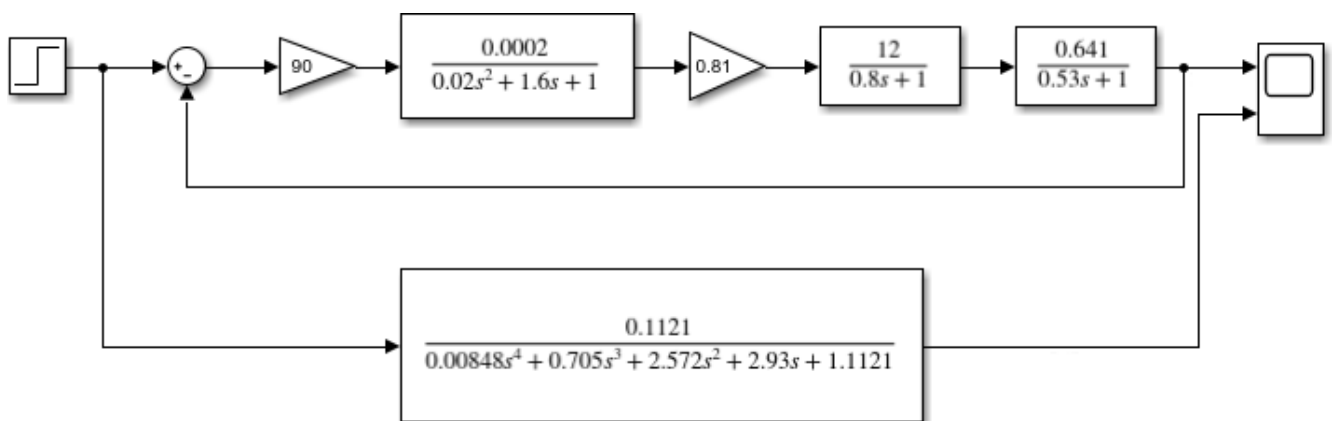


Рисунок 3.5 – Структурна схема моделювання ЗСАР в Simulink MATLAB

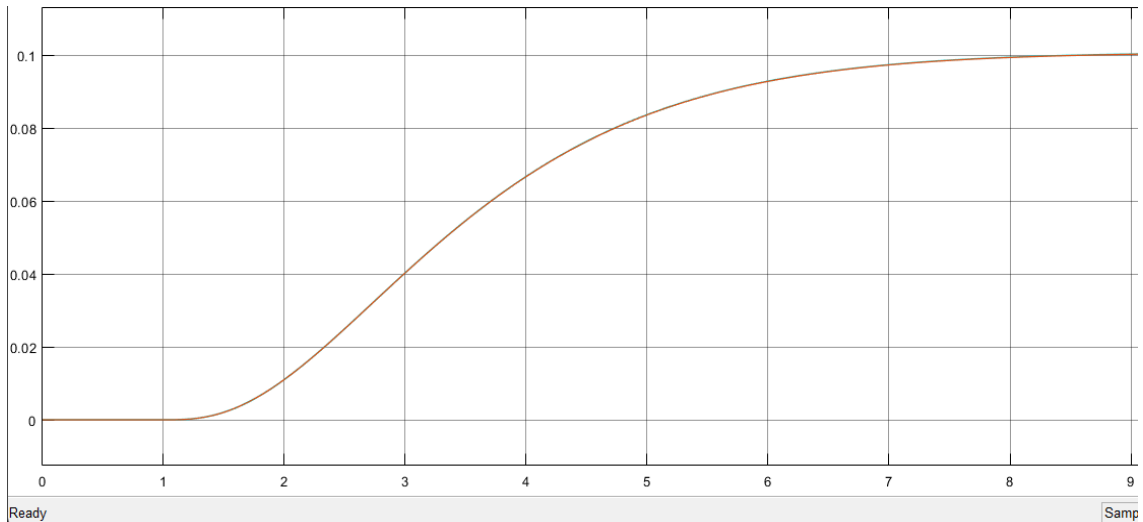


Рисунок 3.6 – Перехідні процеси вихідної та еквівалентної схем ЗСАР

Реалізація контуру керування тиском у хімічному реакторі відновлення тетрахлориду титану в MATLAB є важливим етапом для забезпечення безпечної та ефективної роботи технологічного процесу. Побудова адекватної математичної моделі реактора та правильне налаштування контролера дозволяють підтримувати тиск на заданому рівні, мінімізувати вплив збурень та підвищити якість продукції.

### 3.3 Аналіз РСАР та ЗСАР у програмному середовищі MATLAB

Для визначення стійкості системи використали перший метод Ляпунова.

Перший метод Ляпунова, також відомий як метод лінеаризації або метод дослідження стійкості за першим наближенням, є потужним інструментом для визначення локальної стійкості нелінійних систем. Основна ідея першого методу Ляпунова полягає в наступному.

Крок 1. Визначення точки рівноваги. Спочатку знаходять стаціонарний стан або точку рівноваги системи, де всі похідні змінних стану дорівнюють нулю.

Крок 2. Лінеаризація системи. Нелінійні рівняння системи лінеаризуються в околі цієї точки рівноваги шляхом розкладання функцій у ряд Тейлора і відкидання членів вищого порядку. Отримується лінійна система вигляду  $\dot{x}^* = Ax$ , де  $x$  - вектор відхилень змінних стану від точки рівноваги, а  $A$  - матриця Якобі,

елементи якої є частинними похідними правих частин нелінійних рівнянь, обчисленими в точці рівноваги.

Крок 3. Аналіз власних значень матриці лінеаризованої системи. Стійкість вихідної нелінійної системи в околі точки рівноваги визначається знаками дійсних частин власних значень матриці  $A$ : якщо всі дійсні частини власних значень від'ємні, то точка рівноваги асимптотично стійка. Якщо хоча б одна дійсна частина власного значення додатна, то точка рівноваги нестійка. Якщо деякі власні значення мають нульову дійсну частину, а інші - від'ємну, то висновки про стійкість нелінійної системи зробити неможливо і потрібні додаткові дослідження (наприклад, з використанням другого методу Ляпунова).

У контексті задачі керування тиском визначили бажаний робочий тиск як точку рівноваги для ношої системи. Потім лінеаризували модель реактора, датчика, клапана та, ПД-регулятора навколо цієї робочої точки, щоб отримати лінійну систему рівнянь, що описує динаміку відхилень тиску та керуючого сигналу від їхніх рівноважних значень.

Далі склали матрицю  $A$  цієї лінеаризованої системи та обчислили її власні значення. Аналізуючи знаки дійсних частин цих власних значень, можна зробити висновок про локальну стійкість системи керування тиском в околі заданого робочого тиску. Дослідження РСАР та ЗСАР за допомогою знаходження полюсів систем у командному рядку MATLAB.

Полюси передавальної функції  $G_1$ :

-79.4;

-1.88;

-1.25;

-0.63.

Полюси передавальної функції  $G$ :

-79.4;

-2;

-1.2;

-0.65.

					БР.АКП-10.00.00.000 ПЗ	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

```

Command Window
New to MATLAB? See resources for Getting Started.
>> A=tf([90],[0 1]);
>> B=tf([0.0002],[0.02 1.6 1]);
>> C=tf([0.81],[0 1]);
>> D=tf([12],[0.8 1]);
>> E=tf([0.641],[0.53 1]);
>> G=A*B*C*D*E

G =

          0.1121
-----
0.00848 s^4 + 0.705 s^3 + 2.572 s^2 + 2.93 s + 1

Continuous-time transfer function.

>> pole(G)

ans =

-79.3700
-1.8868
-1.2500
-0.6300

```

Рисунок 3.7 – Результат моделювання визначення стійкості розімкнутої системи регулювання за першим методом Ляпунова

```

>> G1=tf([0.1121],[0.00848 0.705 2.572 2.93 1.1121])

G1 =

          0.1121
-----
0.00848 s^4 + 0.705 s^3 + 2.572 s^2 + 2.93 s + 1.112

Continuous-time transfer function.
>> pole(G1)

ans =

-79.3700
-1.9071
-1.2069
-0.6527

fx >>

```

Рисунок 3.8 – Результат моделювання визначення стійкості замкнутої системи регулювання за першим методом Ляпунова

Полюси як у РСАРУ, так і ЗСАР мають негативні полюси, отже, системи стійкі.

Наступним етапом буде визначення запасів стійкості системи по фазі та

амплітуді. Дослідження стійкості ЗСАР з АФЧХ РСАР визначалося за критерієм Найквіста.

$$G(s) = \frac{0.1121}{0.00848s^4 + 0.705s^3 + 2.572s^2 + 2.93s + 1} \quad (3.9)$$

Критерій Найквіста призначений для визначення стійкості системи зворотного зв'язку. Цей критерій виводиться за допомогою амплітудно-частотної характеристики розімкнутої системи управління. ЗСАР стійка лише тому випадку, якщо АФЧХ РСАР не проходила через точку  $(-1; j0)$ .

Критична точка  $(-1; j0)$  є ключовою, оскільки вона пов'язана з характеристичним рівнянням замкнутої системи  $1+W(j\omega)=0$ , де  $W(j\omega)$  - комплексна передавальна функція розімкнутої системи. Коли  $W(j\omega)=-1+j0$ , характеристичне рівняння стає нулем, що вказує на наявність полюсів у правій півплощині комплексної площини  $s$ , а отже, на нестійкість замкнутої системи.

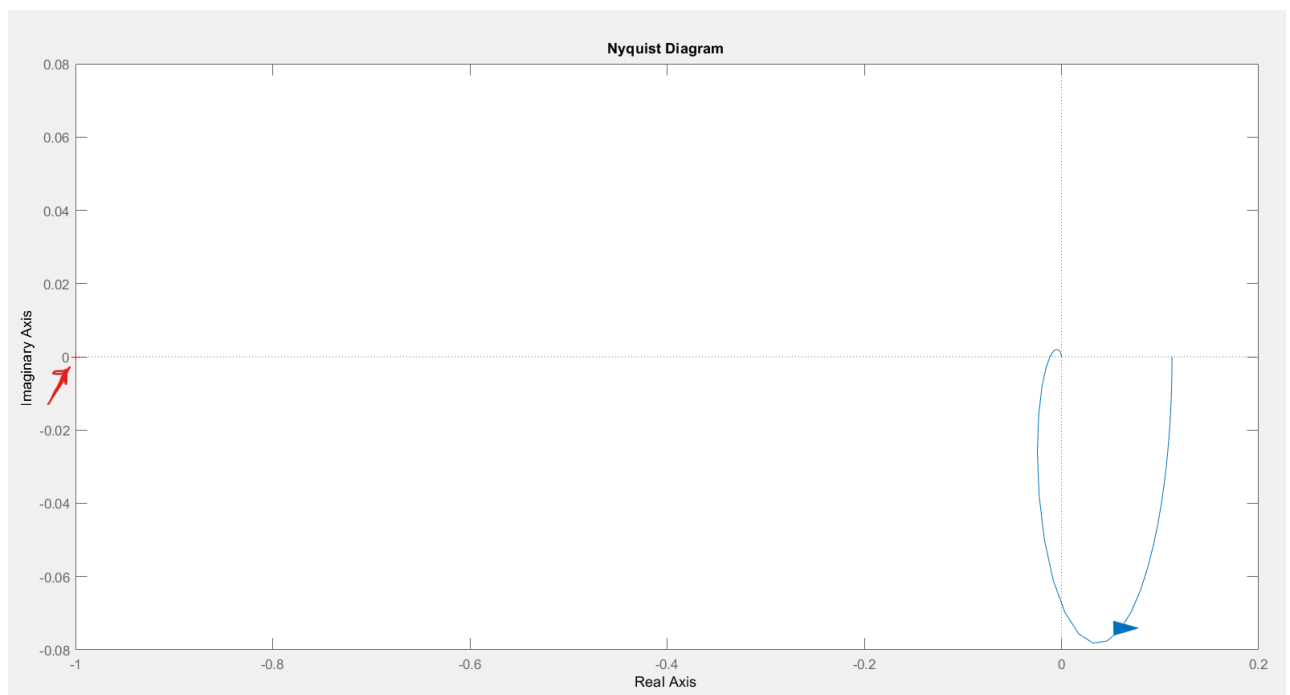


Рисунок 3.9 – АФЧХ розімкнутої системи

Більш загальна формулювання критерію Найквіста враховує кількість охоплень критичної точки контуром Найквіста (відображенням уявної осі  $s$ -площини на площину  $W(s)$ ). Стійкість замкнутої системи визначається

					БР.АКП-10.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

співвідношенням між кількістю полюсів розімкнутої системи в правій півплощині та кількістю охоплень критичної точки контуром Найквіста. Зокрема, для стійкої розімкнутої системи (без полюсів у правій півплощині), замкнута система буде стійкою, якщо контур Найквіста не охоплює критичну точку.

АФЧХ стійкої РСАР не охоплює точку  $(-1; j0)$ , отже ЗСАР стійка.

Критерій Найквіста дозволяє оцінити стійкість замкнутої системи без знаходження коренів характеристичного рівняння, що особливо корисно для систем високого порядку. Також критерій Найквіста надає інформацію про запаси стійкості (за амплітудою та фазою), які є важливими показниками якості системи керування.

Використання критерію Найквіста є потужним методом для аналізу стійкості, особливо на етапах проектування та налагодження систем керування.

### **3.4 Дослідження впливу типових регуляторів на об'єкт управління**

Об'єкти управління бувають різних типів та властивостей, отже їх регулювання також вибирається від лінійних налаштувань та функцій. В основному лінійні регулятори використовують у промисловості.

Так регулятори типу Р використовуються при довільному значенні часу запізнення та інерції. Даний регулятор включає статичний і астатичний регулюючий орган.

У свою чергу І регулятор має лише статичний орган регулювання, за умови, що буде малий час запізнення та зміни обурень протікатиме повільно.

Коли РІ регулятор працює при будь-якому значенні часу запізнення та інерції.

Ще один тип регулятора – це PID. Він працює за будь-якого значення часу запізнення, але за малих коливальних умов початкових процесів.

Дослідження прямих оцінок якостей ЗСАР хімічного апарату відновлення без регулятора.

					БР.АКП-10.00.00.000 ПЗ	Арк.
						33
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

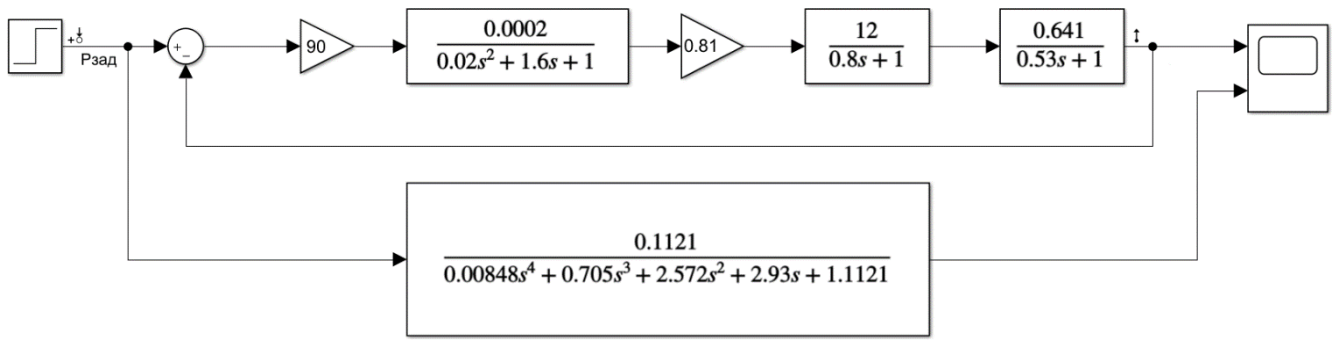


Рисунок 3.10 – Побудова ЗСАР з вхідним і вихідним сигналом, що задається без регулятора

Параметрами процесу називають процеси, що характеризуються множиною величин виробничого процесу, тиском, вологою температурою, витратою і т.д.

Пристрій управління система автоматичного регулювання називається автоматичним регулятором або просто регулятором.

У ході технологічного процесу об'єкт управління піддається все різним впливу та збуренням, в результаті якого величина управління відхиляється від заданого значення.

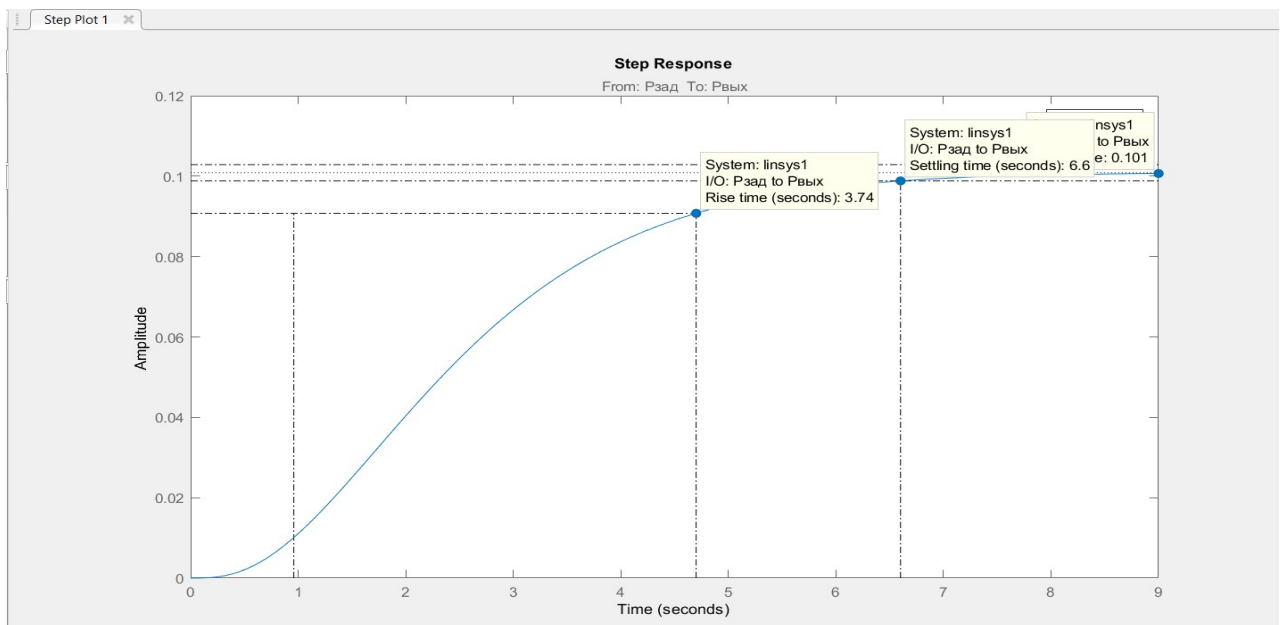


Рисунок 3.11 – Графік ЗСАР без регулятора з прямими оцінками якості

Час наростання – це час, за який вихідний сигнал вперше досягає певного відсотка від свого кінцевого значення (зазвичай 10-90% або 0-100%). На графіку це буде інтервал часу від моменту подачі ступінчастого сигналу до моменту, коли крива досягне цього діапазону.

Час встановлення - це час, необхідний для того, щоб вихідний сигнал увійшов і залишався в межах заданого відхилення (зазвичай  $\pm 2\%$  або  $\pm 5\%$ ) від свого кінцевого значення. На графіку це буде час, після якого крива стає близькою до усталеного значення і більше не виходить за межі заданої смуги.

Перерегулювання - це максимальне відхилення вихідного сигналу від свого кінцевого значення, виражене у відсотках. На графіку це буде максимальний пік кривої, що перевищує усталене значення.

Статична похибка - це різниця між заданим значенням і фактичним усталеним значенням вихідного сигналу. На графіку це буде різниця по вертикалі між горизонтальною лінією, що відповідає заданому значенню, і горизонтальною асимптотою, до якої наближається крива вихідного сигналу.

Таблиця 3.1 - Характеристики прямих оцінок якостей ЗСАР без регулятора

Основні	1	Час регулювання (setting time)	6.6
	2	Час наростання (risetime)	3.74
	3	Усталене значення (final value)	0.101

Дослідження моделювання прямих оцінок якостей ЗСАР з Р-регулятором.

Побудова ЗСАР з вхідним і вихідним задаючим сигналом з Р-регулятором передбачає наявність двох незалежних задаючих впливів на систему: один на вході контуру керування (як звичайне завдання бажаного значення), а інший - на виході (який може розглядатися як збурення або додаткова цільова функція).

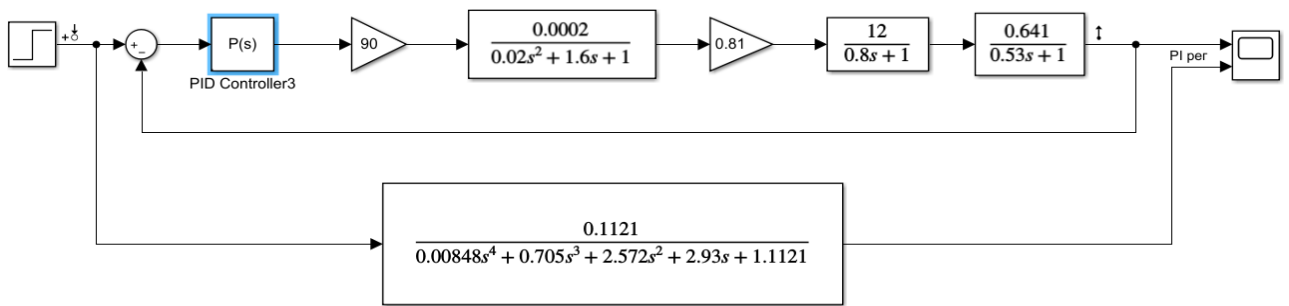


Рисунок 3.12 – Побудова ЗСАР з вхідним і вихідним задаючим сигналом з P-регулятором

Однак, стандартна структура ЗСАР з одним контуром зворотного зв'язку передбачає порівняння вимірюваного вихідного сигналу лише з одним заданим значенням для формування похибки керування.

Одноконтурна ЗСАР з P-регулятором і одним задаючим сигналом на вході, в Simulink буде будуватися наступним чином. Блок "Задане значення" (Step Input або інший генератор сигналу) генерує бажане значення тиску  $r(t)$ . Блок "Суматор" (Sum) обчислює похибку  $e(t) = r(t) - y(t)$ , де  $y(t)$  - вимірюваний тиск на виході реактора. Блок "P-регулятор" (Gain) формує керуючий сигнал  $u(t) = K_p \cdot e(t)$ . Блок "Модель реактора" (Transfer Function або State-Space) представляє динамічну модель вашого хімічного реактора, на вхід якого подається керуючий сигнал  $u(t)$ , а на виході отримується фактичний тиск  $y(t)$ .

Блок "Датчик тиску" (Gain або Transfer Function - якщо є динаміка датчика) моделює процес вимірювання тиску. У найпростішому випадку це може бути просто коефіцієнт підсилення, рівний одиниці. Лінія зворотного зв'язку з'єднує вихід датчика тиску з від'ємним входом суматора, утворюючи замкнутий контур. Блок "Score" для візуалізації заданого значення, вихідного сигналу та керуючого сигналу.

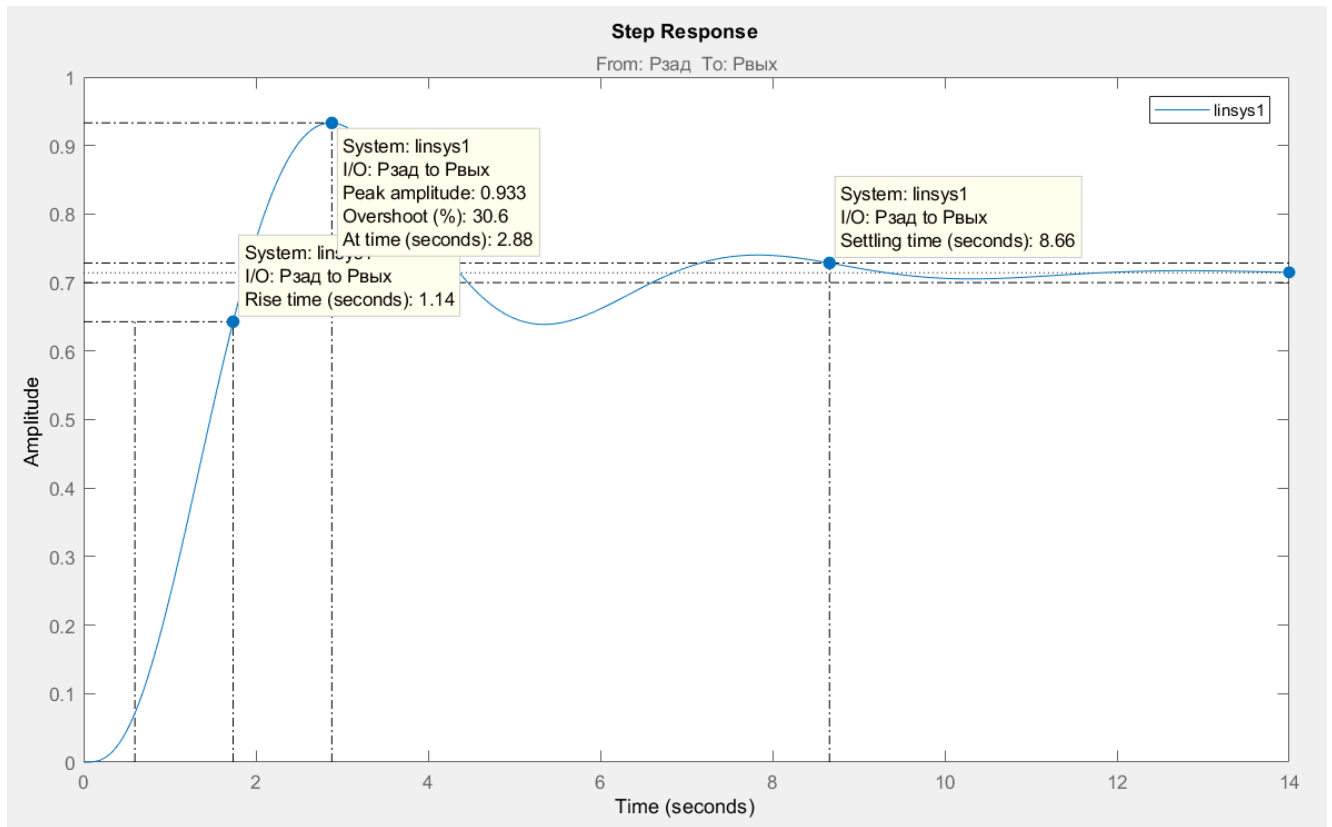


Рисунок 3.13 – Графік ЗСАР із Р-регулятором прямими оцінками якості

Для системи першого порядку, яку ми розглядаємо, перерегулювання завжди буде відсутнє, незалежно від значення  $K_p$ . Однак для систем вищого порядку Р-регулятор може призводити до перерегулювання, яке зростає зі збільшенням  $K_p$ .

Розглядаючи отримані графіки та числові значення показників якості для різних  $K_p$ , можна наочно побачити вплив пропорційного коефіцієнта на динамічні та статичні характеристики вашої системи керування тиском.

Це допоможе зрозуміти обмеження використання лише Р-регулятора та необхідність впровадження інтегральної та/або диференціальної складових для досягнення бажаних показників якості.

Перехід до дослідження моделювання прямих оцінок якостей ЗСАР з пропорційно-інтегральним (PI) регулятором є важливим кроком для покращення характеристик системи керування, особливо щодо усунення статичної похибки.

Таблиця 3.2 - Характеристики прямих оцінок якостей ЗСАР з Р-регулятором

Основні	1	Час регулювання (setting time)	8.66
	2	Перерегулювання (overshoot) %	30.6
	3	Час досягнення першого максимуму (peaktime)	0.933
	4	Час наростання (risetime)	1.14
	5	Усталене значення (final value)	0.714

PI-регулятор формує керуючий вплив  $u(t)$ , який складається з двох компонентів: пропорційної, що залежить від поточної похибки  $e(t)$ , та інтегральної, що залежить від інтеграла похибки за минулий час.

Збільшення  $K_p$  Зазвичай призводить до збільшення перерегулювання та може погіршити стійкість системи, викликаючи осциляції. Інтегральна складова продовжує збільшувати керуючий сигнал навіть після того, як вихід наблизився до заданого значення, що може призвести до перескакування. Вплив  $K_p$  на час встановлення залежить від системи, але зазвичай помірне збільшення може його зменшити. Правильно налаштований  $K_i$  може сприяти швидшому затуханню коливань і зменшенню часу встановлення за рахунок усунення статичної похибки. Однак занадто великий  $K_i$  може погіршити перехідний процес і збільшити час встановлення через зростаючі коливання. Р-складова сама по собі не усуває статичну похибку повністю. Інтегральна складова є ключовою для усунення статичної похибки при ступінчастих збуреннях або задаючих впливах для систем сталого типу (тип 0 або вище). Навіть невелика ненульова похибка з часом

приведе до зростання інтегрального члена, доки похибка не стане нульовою.

Для дослідження впливу  $K_p$  та  $K_i$  можна модифікувати попередню модель Simulink, замінивши блок "Gain" (P-регулятор) на блок "PI Controller" (бібліотека Control System Toolbox). Дослідження моделювання прямих оцінок якостей ЗСАР з PI-регулятором.

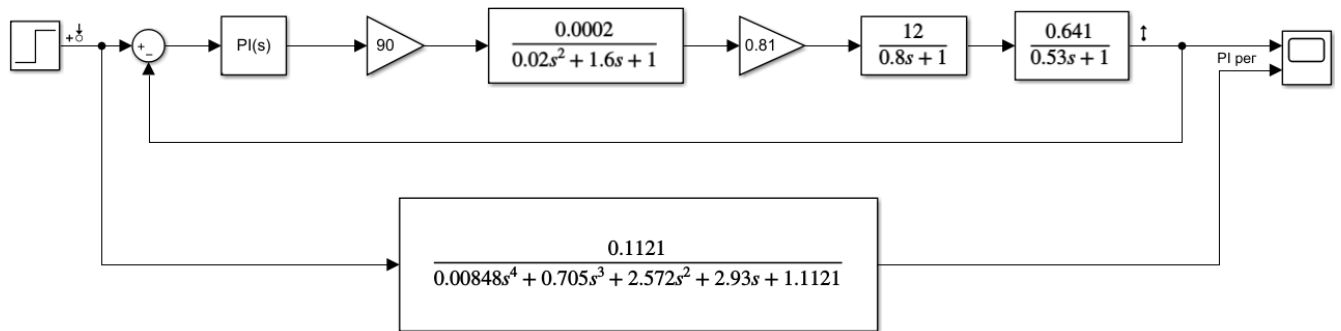


Рисунок 3.14 – Побудова ЗСАР з вхідним і вихідним задаючим сигналом з PI-регулятором

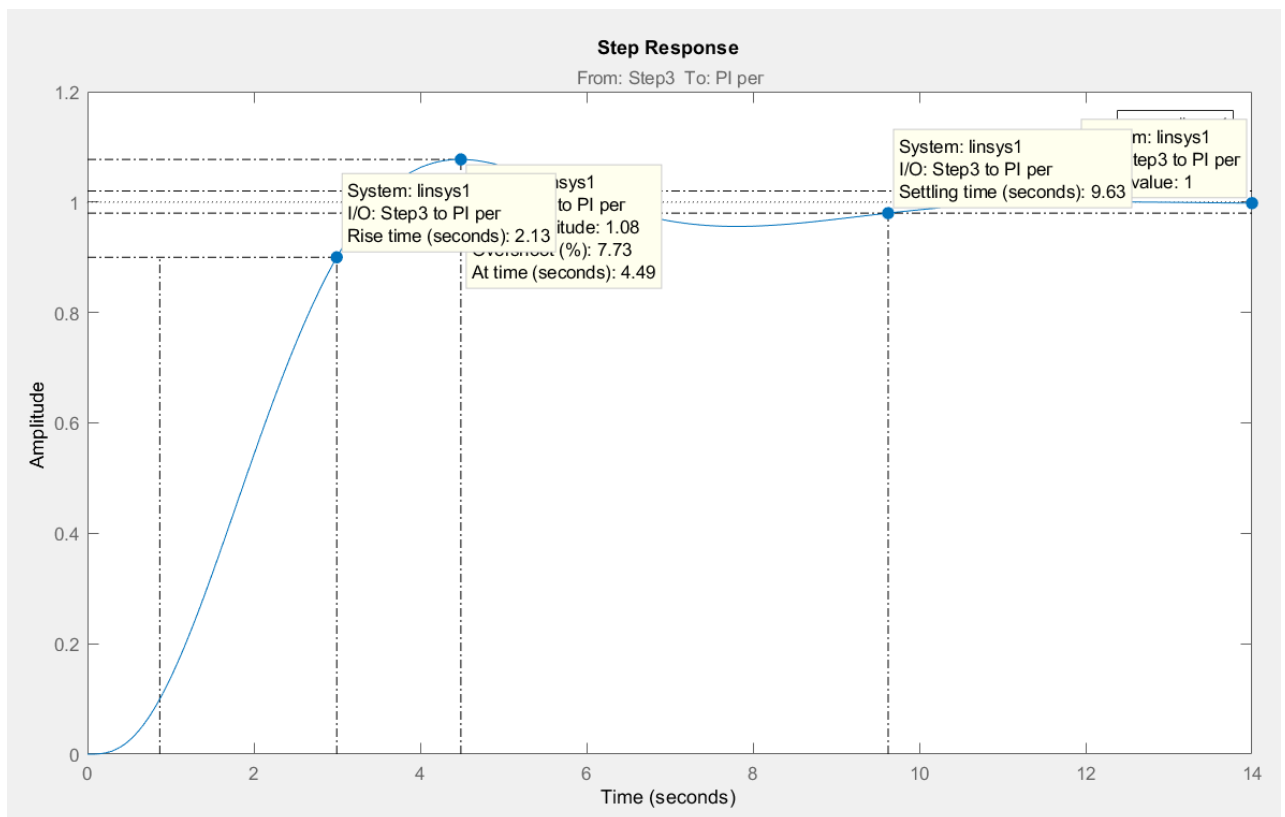


Рисунок 3.15 – Графік ЗСАР із PI-регулятором прямими показниками якості перехідних процесів

Таблиця 3.3 – Характеристики прямих оцінок якостей ЗСАР із ПІ-регулятором

Основні	1	Час регулювання (setting time)	9.63
	2	Перерегулювання (overshoot) %	7.73
	3	Час досягнення першого максимуму (peaktime)	1.08
	4	Час наростання (rise time)	2.13
	5	Усталене значення (final value)	1

Дослідження моделювання прямих оцінок якостей ЗСАР з пропорційно-інтегрально-диференціальним (PID) регулятором є завершальним і найбільш потужним етапом у налаштуванні класичних контурів керування. PID-регулятор об'єднує переваги трьох складових для досягнення оптимальної якості керування.

PID-регулятор формує керуючий вплив  $u(t)$  як суму трьох компонентів: пропорційної, інтегральної та диференціальної:

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt}$$

де:  $K_p$  - коефіцієнт пропорційного підсилення,  $K_i$  - коефіцієнт інтегрального підсилення,  $K_d$  - коефіцієнт диференціального підсилення.

Вплив  $K_p$ ,  $K_i$  та  $K_d$  на показники якості:

1. Час наростання ( $t_r$ ):  $K_p$  збільшує швидкість реакції, зменшує час наростання;  $K_i$  може незначно зменшити час наростання, але основна його функція - усунення статичної похибки;  $K_d$  має невеликий вплив на час наростання.
2. Перерегулювання ( $\sigma$ ): збільшення  $K_p$  може призвести до більшого перерегулювання; збільшення  $K_i$  зазвичай збільшує перерегулювання та може погіршити стійкість; диференціальна складова  $K_d$  має тенденцію зменшувати перерегулювання за рахунок прогнозування майбутньої похибки та протидії швидким змінам вихідного сигналу.
3. Час встановлення ( $t_s$ ): вплив  $K_p$  залежить від системи;  $K_i$  допомагає швидше досягти усталеного стану за рахунок усунення статичної похибки;  $K_d$  може значно зменшити час встановлення за рахунок демпфування коливань.

4. Статична похибка (ess):  $K_p$  зменшує, але не усуває повністю;  $K_i$  усуває статичну похибку для систем сталого типу;  $K_d$  не впливає на статичну похибку в усталеному стані (оскільки похідна сталої похибки дорівнює нулю).

Для дослідження впливу параметрів PID-регулятора використовуємо блок "PID Controller" (з Control System Toolbox) у вашій моделі Simulink. Для цього виконуємо наступні кроки.

1. Відкриваємо нашу модель ЗСАР з реактором та зворотним зв'язком.
2. Замінюємо (якщо ще не замінено) блоки регулятора на блок "PID Controller".
3. Двічі клацаємо на блоці "PID Controller" для налаштування параметрів Proportional (P), Integral (I) та Derivative (D) (відповідно  $K_p$ ,  $K_i$  та  $K_d$ ).
4. Проводимо серію симуляцій, змінюючи значення  $K_p$ ,  $K_i$  та  $K_d$  по черзі та комбінуючи їх.
5. Для кожної комбінації параметрів спостерігаємо за графіком перехідного процесу на блоці "Scope" та оцінюйте показники якості.

Використовуємо наступні стратегії дослідження.

Налаштування по черзі. Починаємо з  $K_i = 0$  і  $K_d = 0$  (P-регулятор) та налаштуйте  $K_p$  для отримання прийняттого часу наростання та перерегулювання. Потім збільшуємо  $K_i$ , спостерігаючи за впливом на статичну похибку та перехідний процес. Обережно збільшуємо  $K_i$  і, оскільки занадто велике значення може погіршити стійкість. Додаємо  $K_d$  і налаштовуємо його для зменшення перерегулювання та часу встановлення.  $K_d$  діє на швидкість зміни похибки, тому може допомогти стабілізувати систему.

А також використовуємо методи налаштування PID-регуляторів. Існують різні аналітичні методи налаштування PID-регуляторів, такі як методи Зіглера-Ніколса (Ziegler-Nichols), які можуть дати початкові значення для  $K_p$ ,  $K_i$  та  $K_d$ . Можемо використовувати ці значення як відправну точку для подальшого експериментального налаштування в Simulink.

					БР.АКП-10.00.00.000 ПЗ	Арк.
						41
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

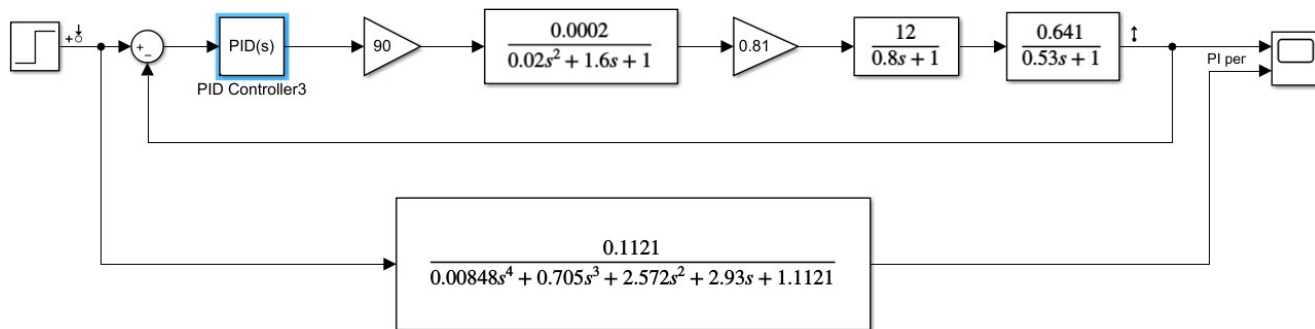


Рисунок 3.16 – Побудова ЗСАР з вхідним і вихідним задаючим сигналом з PID-регулятором

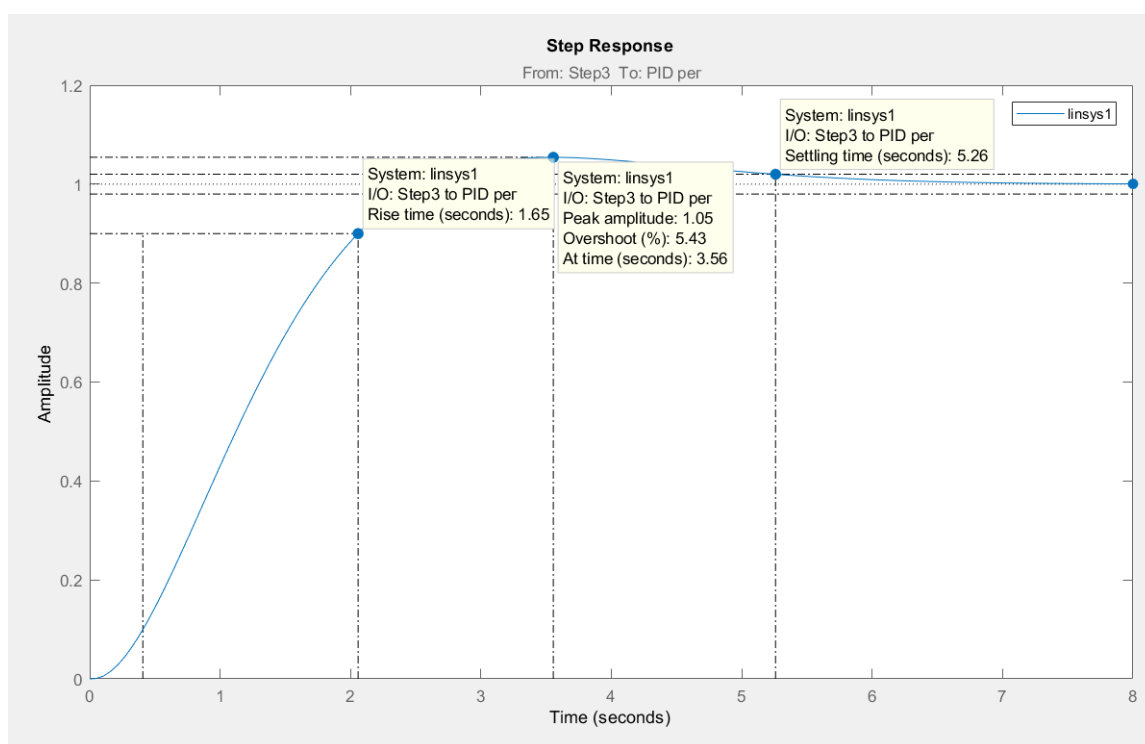


Рисунок 3.17 – Графік ЗСАР із PID-регулятором прямими показниками якості перехідних процесів

Під час дослідження необхідно звернути увагу на наступні аспекти.

Вплив кожної складової окремо та в комбінації на всі показники якості.

Компроміси між різними показниками якості. Наприклад, зменшення часу наростання може призвести до збільшення перерегулювання.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Пошук оптимального набору параметрів  $K_p$ ,  $K_i$  та  $K_d$ , який забезпечує найкращий компроміс для вашої конкретної системи керування тиском. Критерії оптимальності можуть включати мінімальний час встановлення, прийнятне перерегулювання та нульову статичну похибку.

Спостереження за стійкістю системи при різних значеннях параметрів. Неправильно налаштований PID-регулятор може призвести до осциляцій або нестабільності.

Таблиця 3.4 - Характеристики прямих оцінок якостей ЗСАР з PID-регулятором

Основні	1	Час регулювання (setting time)	5.26
	2	Перерегулювання (overshoot) %	5.43
	3	Час досягнення першого максимуму (peaktime)	1.05
	4	Час наростання (rise time)	1.65
	5	Усталене значення (final value)	1

Здійснимо дослідження ЗСАР із P-регулятором, PI-регулятором, PID-регулятором та порівняємо результати.

Таким чином, дослідження в MATLAB Simulink є важливим етапом для проектування та налаштування ефективної системи керування тиском у хімічному реакторі.

Вибір типу регулятора та його параметрів залежить від конкретних вимог до якості перехідного процесу та стійкості системи.



Дослідження ЗСАР з PID-регулятором у Simulink дозволяє нам отримати глибоке розуміння його можливостей та навчитися ефективно налаштовувати його параметри для досягнення високої якості керування тиском у вашому хімічному реакторі відновлення тетраклориду титану. Виходячи з дослідження прямих оцінок якостей ЗСАР хімічного апарату відновлення без регулятора та з різними типами регуляторів найбільш доцільним буде вибір PID регулятора. У даного типу регулятора, час регулювання 5.26, перерегулювання досягає найменшого значення рівним 5.26, час досягнення першого максимуму 1.05, а також найшвидше досягає наростання, воно приймає значення 1, порівняно з іншими регуляторами.

### Висновки до розділу

У цьому розділі було проведено комплексне дослідження системи автоматичного керування процесом відновлення тетраклориду титану, що включало моделювання, аналіз стійкості та оптимізацію роботи регуляторів. На основі розроблених передавальних функцій окремих елементів системи було створено структурну схему контуру керування тиском у середовищі MATLAB Simulink. Особливу увагу приділено аналізу стійкості системи, де застосовано метод Ляпунова та критерій Найквіста, що підтвердили надійність запропонованого рішення. Проведене дослідження різних типів регуляторів (P, PI та PID) дозволило виявити їх вплив на динамічні характеристики системи. Експериментально встановлено, що PID-регулятор демонструє найкращі результати. Ці показники значно перевершують характеристики систем з простими P- та PI-регуляторами. Важливим результатом стало визначення оптимальних параметрів регулятора шляхом ітераційної оптимізації, що дозволило досягти стабільної роботи системи в широкому діапазоні змінних умов. Розроблена модель продемонструвала здатність ефективно придушувати збурення та підтримувати задані параметри процесу без статичної похибки.

					БР.АКП-10.00.00.000 ПЗ	Арк.
						45
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## 4 РОЗРОБКА ТЕХНІЧНОЇ ДОКУМЕНТАЦІЇ ТА ВИБІР ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ АВТОМАТИЗАЦІЇ

### 4.1 Функціональна схема відновлення тетрахлориду титану в реторті

ФСА є ключовим документом при розробці систем автоматичного керування технологічними процесами, оскільки вона графічно відображає структуру системи управління, забезпечує наочне розуміння того, як різні елементи системи взаємодіють між собою.

Відображає взаємозв'язок між технологічним обладнанням, показує, які машини, апарати та трубопроводи є частиною технологічного процесу; а також - взаємозв'язок із засобами контролю, вказує, які датчики, вимірювальні прилади використовуються для отримання інформації про стан технологічного процесу; і в тому числі - взаємозв'язок із засобами регулювання, показує, які регулюючі клапани, приводи, насоси та інші виконавчі механізми використовуються для впливу на технологічний процес.

Демонструє, які контролери (ПЛК, DCS), комп'ютери та інше обладнання використовуються для обробки інформації та формування керуючих сигналів.

ФСА є важливим інструментом на всіх етапах життєвого циклу системи автоматизації. Проектування слугує основою для розробки детальної технічної документації, вибору обладнання та програмного забезпечення.

Розробка використовується інженерами-автоматчиками для створення алгоритмів керування та конфігурації контролерів.

Монтаж та налагодження допомагає при встановленні обладнання та перевірці правильності з'єднань.

Експлуатація та обслуговування полегшує розуміння роботи системи, пошук несправностей та внесення змін.

Таким чином, ФСА є кресленням автоматизованої системи керування, що забезпечує чітке розуміння її структури та функціонування для всіх учасників процесу – від проектувальників до операторів.

					БР.АКП-10.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

Маючи на увазі процес відновлення тетрахлориду титану в реторті, ФСА повинна відображати всі ключові елементи контуру керування тиском, які ми обговорювали раніше: датчик тиску, регулятор (наприклад, ПІД-контролер), виконавчий механізм (регулюючий клапан на виході газів), а також сам реактор (реторту) як об'єкт керування (рис.4.1).

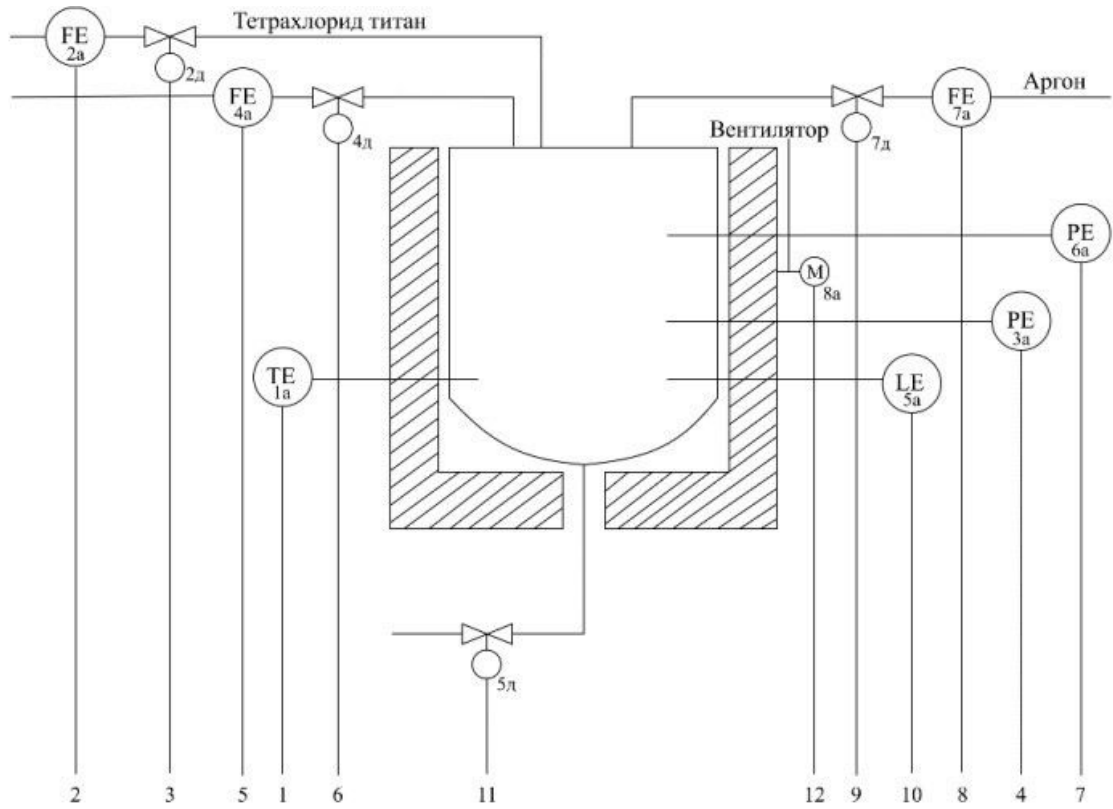
У ході розробки системи автоматичного управління здійснюється вибір того чи іншого технологічного забезпечення, тобто закупівля засобів контролю та автоматизації з урахуванням специфікації технологічного процесу, а також рівень запитуваної безпеки та стабільної роботи системи [10]. Для хіміко-технологічних процесів регулювання, як і промислових процесів часто використовуються подібні вимірювальні прилади і устаткування. Також активно беруть у використання такий тип управління та регулювання процесом як виконавчий пристрій, який отримує інформацію з різних команд [9].

Система відновлення тетрахлориду титану в реторті функціонує за наступним принципом.

1. Початок циклу: ПЛК перевіряє готовність системи (наявність реагентів, герметичність).
2. Завантаження реагентів: клапани відкриваються для подачі  $TiCl_4$  та  $Mg$  у реторту.
3. Нагрівання: включається нагрівач, температура контролюється за замкнутим контуром (ПІД-регулятор).
4. Контроль тиску: датчики фіксують зміни, при критичних значеннях спрацьовує аварійний скид тиску.
5. Видалення  $MgCl_2$ : насоси відкачують побічний продукт у конденсатор.
6. Завершення процесу: після досягнення необхідного ступеня відновлення система переходить у режим охолодження.

Згідно наведеною функціональною схемою автоматизації процесу відновлення тетрахлориду титану в реторті, можна виділити наступні основні елементи та контури керування (рисунок 4.1).

					БР.АКП-10.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		47



	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Прилади по місцю	TT 1б	FT 2б		PT 3б	FT 4б		PT 6б	ET 7б		LT 5б		HSA 8б
Прилади на щиті	TRK 1в, TC 1г	FRK 2в, FC 2г		PIK 3в, PC 3г	FRK 4в, FC 4г		PIK 6в, PC 6г	FRK 7в, FC 7г		LRK 5в, LC 5г		H 8в

Рисунок 4.1 - Функціональна схема відновлення тетрахлориду титану в реторті представлена

1. Технологічне обладнання. Реторта (вертикальний циліндричний апарат): Основний технологічний апарат, де відбувається процес відновлення тетрахлориду титану магнієм. Вентилятор (М) призначений для циркуляції або видалення газової фази з реторти. Трубопроводи з запірною арматурою (клапани 2а, 4а, 7а, 3а) для подачі реагентів (тетрахлориду титану, магнію, аргону) та відведення продуктів/відпрацьованих газів.

2. Засоби контролю та вимірювання (прилади по місцю) ТЕ 1а (Термоелемент - термопара) вимірює температуру всередині реторти (позиція 5). FE 2а (витратомір) вимірює витрату тетраклориду титану на вході (позиція 2). FT 2б (перетворювач витрати) перетворює сигнал з витратоміра 2а в уніфікований сигнал. РТ 3а (манометр) візуально показує тиск в нижній частині реторти (позиція 11). РТ 3б (Перетворювач тиску) перетворює тиск в реторті в уніфікований сигнал (позиція 11). FE 4а (витратомір) вимірює витрату магнію на вході (позиція 6). FT 4б (перетворювач витрати) перетворює сигнал з витратоміра 4а в уніфікований сигнал. LE 5а (рівнемір поплавковий) вимірює рівень речовини в нижній частині реторти (позиція 10). LT 5б (перетворювач рівня) перетворює сигнал з рівнеміра 5а в уніфікований сигнал. FE 7а (витратомір) вимірює витрату аргону на вході (позиція 7). FT 7б (перетворювач витрати) перетворює сигнал з витратоміра 7а в уніфікований сигнал. ET 8а (вимірювач розрідження/тиску): вимірює тиск/розрідження, пов'язане з вентилятором (позиція 9). РТ 8а (манометр) візуально показує тиск у верхній частині реторти (позиція 8). HSA 9а (ручний перемикач) ручний перемикач для керування чимось (можливо, вентилятором або іншим виконавчим механізмом) (позиція 12).

3. Засоби керування та регулювання (прилади на щиті). На щиті розташовані вторинні прилади та регулятори, які отримують сигнали від первинних перетворювачів та формують керуючі впливи. TRK 1в (реєструючий прилад температури) реєструє значення температури в реторті, отримане від термопари 1а через перетворювач 1б. ТС 1г (регулятор температури автоматичний) отримує сигнал про температуру та формує керуючий сигнал для виконавчого механізму (на схемі не показаний, але передбачається для регулювання температури). FRK 2в (реєструючий прилад витрати тетраклориду титану) реєструє витрату тетраклориду титану, отриману від перетворювача витрати 2б. FC 2г (регулятор витрати тетраклориду титану автоматичний): Отримує сигнал про витрату тетраклориду титану та формує керуючий сигнал для виконавчого механізму (2д - клапан на лінії подачі тетраклориду титану). РІК 3в (показуючий прилад тиску) відображає значення тиску в реторті, отримане від

					БР.АКП-10.00.00.000 ПЗ	Арк.
						49
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

перетворювача тиску 3б. РС 3г (регулятор тиску автоматичний) отримує сигнал про тиск та формує керуючий сигнал для виконавчого механізму (3д - клапан на вихідній лінії газів з реторти). Це є ключовим елементом контуру керування тиском. FRK 4в (реєструючий прилад витрати магнію) реєструє витрату магнію, отриману від перетворювача витрати 4б. FC 4г (регулятор витрати магнію автоматичний) отримує сигнал про витрату магнію та формує керуючий сигнал для виконавчого механізму (4д - пристрій дозування магнію). LRK 5в (реєструючий прилад рівня) реєструє рівень речовини в нижній частині реторти, отриманий від перетворювача рівня 5б. LC 5г (регулятор рівня автоматичний) отримує сигнал про рівень та формує керуючий сигнал для виконавчого механізму (на схемі не показаний, але передбачається для регулювання рівня). FRK 7в (реєструючий прилад витрати аргону) реєструє витрату аргону, отриману від перетворювача витрати 7б. FC 7г (регулятор витрати аргону автоматичний) отримує сигнал про витрату аргону та формує керуючий сигнал для виконавчого механізму (7д - клапан на лінії подачі аргону). ET 8г (реєструючий прилад розрідження/тиску) реєструє значення розрідження/тиску, пов'язане з вентилятором. Н (індикатор положення) положення ручного перемикача HSA 9а. LC (кінцевий вимикач) сигналізує про досягнення певного положення (можливо, пов'язаного з рівнем або іншим параметром). HSA (ручна станція керування) дозволяє оператору вручну керувати виконавчим механізмом (можливо, вентилятором).

Основні контури керування.

Керування температурою в реторті: датчик TE 1а → перетворювач 1б → реєстратор 1в → регулятор температури 1г → виконавчий механізм.

Керування витратою тетраклориду титану: витратомір FE 2а → перетворювач 2б → реєстратор 2в → регулятор витрати 2г → виконавчий механізм 2д (клапан).

Керування тиском в реторті: перетворювач тиску PT 3б → показуючий прилад 3в → регулятор тиску 3г → виконавчий механізм 3д (клапан на вихідній лінії газів). Це є контур керування тиском, який ми досліджуємо в роботі.

					БР.АКП-10.00.00.000 ПЗ	Арк.
						50
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Керування витратою магнію: витратомір FE 4а → перетворювач 4б → реєстратор 4в → регулятор витрати 4г → виконавчий механізм 4д (дозатор).

Керування рівнем в нижній частині реторти: рівнемір LE 5а → перетворювач рівня 5б → реєстратор 5в → регулятор рівня 5г → виконавчий механізм.

Керування витратою аргону: витратомір FE 7а → перетворювач 7б → реєстратор 7в → регулятор витрати 7г → виконавчий механізм 7д (клапан).

Представлена функціональна схема автоматизації відображає комплексну систему керування процесом відновлення тетраклориду титану. Вона включає вимірювання основних технологічних параметрів (температури, тиску, витрат реагентів, рівня), їх реєстрацію та автоматичне регулювання за допомогою відповідних контролерів та виконавчих механізмів. Ключовим для нашого попереднього дослідження є контур керування тиском, що складається з датчика тиску (РТ 3б), регулятора тиску (РС 3г) та виконавчого механізму (3д). Інші контури керування забезпечують оптимальні умови для протікання реакції та безпечну експлуатацію установки.

Таблиця 4.1 – Специфікація приладів регулювання та управління процесом відновлення тетраклориду титану

№п/п	№ позиції	Найменуванняприладів	Тип приладу	Кількість
1	1а	Термопара	Термоелектричний хромелькопелевий перетворювач	1
2	1б	Потенціометрелектричний	Термоелектричний перетворювач з уніфікованим струмовим вихідним сигналом	1

3	1в	Міст	КСМ – однокочковий паперовий реєстратор	1
4	1г	Автоматичний регулятор		1
5	2а	Витратомір	Витратомір перепаду тиску	1
6	2б	Перетворювач перепаду тиску		1
7	2в	Вторинний прилад	Витратомір	1
8	2г	Регулятор автоматичний		1
9	2д	Виконавчий механізм		1
10	3а	Манометр		1
11	3б	Перетворювач тиску		1
12	3в	Вторинний пристрій		1
13	3г	Регулятор автоматичний		1
14	4а	Витратомір	Витратомір перепаду тиску	1
15	4б	Перетворювач перепаду тиску		1
16	4в	Вторинний пристрій	Витратомір	1
17	4г	Регулятор автоматичний		1
18	4д	Виконавчий механізм		1
19	5а	Рівнемір поплавковий		1

20	5б	Рівнемір вторинний пристрій		1
21	5в	Вторинний пристрій, реєструючий		1
22	5г	Автоматичний регулятор		1
23	7а	Витратомір	Витратомір перепаду тиску	1
24	7б	Перетворювач перепаду тиску		1
25	7в	Вторинний пристрій		1
26	7г	Регулятор автоматичний		1
27	7д	Виконавчий механізм		1

Управління технологічним процесом відновлення здійснюється за допомогою контролера S7-1200 та модулі живлення введення-виведення від компанії "Siemens".

#### 4.2 Вибір технічних засобів автоматизації

Ефективна автоматизація технологічного процесу відновлення тетрахлориду титану в реторті є запорукою безпечної, стабільної та економічно вигідної експлуатації установки. Ключовим етапом у створенні автоматизованої системи керування (АСК) є вибір технічних засобів автоматизації (ТЗА), що включає широкий спектр вимірювальних приладів, виконавчих механізмів та керуючого обладнання. Цей розділ присвячено обґрунтованому вибору конкретних моделей ТЗА для реалізації контурів керування, представлених на

					БР.АКП-10.00.00.000 ПЗ	Арк.
						53
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

функціональній схемі автоматизації, з урахуванням специфіки технологічного процесу та сучасних вимог до промислової автоматизації.

Термоелемент. Зазвичай виглядає як металева трубка (захисна гільза) різної довжини з двома електричними проводами, що виходять з одного кінця.



Рисунок 4.2 - Термоелемент K Type Stainless Steel Probe Thermocouple Temperature Sensor 0-1300°C BUF(300mm)

Перетворювач температури. Компактний електронний пристрій у пластиковому або металевому корпусі з клемними колодками для підключення термопари та вихідних сигнальних проводів. Може мати індикацію.



Рисунок 4.3 - Перетворювач температури іTEMP TMT142B

					БР.АКП-10.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		54

Реєстратор температури. Електронний прилад з кольоровим сенсорним дисплеєм для відображення та запису графіків і числових значень температури (та інших параметрів). Має роз'єми для підключення датчиків та інтерфейси зв'язку.



Рисунок 4.4 - Реєстратор температури Yokogawa SMARTDAC

Автоматичний регулятор температури. Програмований логічний контролер (ПЛК) у вигляді компактного блоку з процесором, входами/виходами та комунікаційними портами. Модуль PID-регулювання може бути окремою платою або програмною функцією.



Рисунок 4.5 - Автоматичний регулятор температури Siemens SIMATIC S7-1200 з модулем PID-регулювання

Витратомір перепаду тиску. Складається з первинного елемента (наприклад, діафрагми, сопла Вентурі), встановленого в трубопроводі, та інтегрованого

					БР.АКП-10.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		55

диференціального перетворювача тиску. Виглядає як металевий блок з фланцями для приєднання до труби та електричними роз'ємами.



Рисунок 4.6 - Витратомір перепаду тиску Rosemount 3051SFC Compact Flow Meter

Перетворювач перепаду тиску. Електронний прилад у металевому корпусі з двома штуцерами для підключення імпульсних ліній від первинного елемента витратоміра або іншої точки вимірювання перепаду тиску. Має електричні роз'єми та може мати локальний дисплей.



Рисунок 4.7 - Перетворювач перепаду тиску Honeywell STD800 Differential Pressure Transmitter

Вторинний прилад, електромагнітний витратомір, що встановлюється в розріз трубопроводу. Виглядає як металева труба з фланцями та електронним блоком зверху або поруч.

					БР.АКП-10.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		56



Рисунок 4.8 - Електромагнітний витратомір Siemens SITRANS FM MAG 1100

Автоматичний регулятор витрати. Частина розподіленої системи керування (РСК). Контролер є обчислювальним блоком, що встановлюється в шафі керування. Візуалізація та налаштування здійснюються через операторську станцію з монітором.



Рисунок 4.9 - Автоматичний регулятор витрати ABB Ability System 800xA з контролером витрати

Виконавчий механізм з відповідним корпусом клапана. Електричний привід, встановлений на промисловому регулюючому клапані (наприклад, кульовому,

					БР.АКП-10.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		57

поворотном, глобусному). Привід має електродвигун, редуктор та шток для переміщення регулюючого елемента клапана.



Рисунок 4.10 - Виконавчий механізм Velimo EV015S-F15S2 з відповідним корпусом клапана

Манометр механічний показуючий прилад з круглою шкалою та стрілкою, що відображає значення тиску. Має різьбове з'єднання для підключення до процесу.



Рисунок 4.11 - Манометр WIKAI 213.53 Pressure Gauge

Перетворювач тиску. Аналогічний перетворювачу диференційного тиску, але має одну штуцер для підключення до точки вимірювання абсолютного тиску.

					БР.АКП-10.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		58



Рисунок 4.12 - Перетворювач тиску Rosemount 3051S Absolute Pressure Transmitter

Вторинний прилад. Компактний електронний показчик з цифровим дисплеєм для відображення значення тиску, отриманого від перетворювача.



Рисунок 4.13 - Вторинний прилад Siemens SITRANS P DS III PA

Автоматичний регулятор тиску з модулем керування тиском. Аналогічно п. 8, частина розподіленої системи керування. Контролер є обчислювальним блоком, а керування здійснюється через операторський інтерфейс.

					БР.АКП-10.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		59



Рисунок 4.14 - Автоматичний регулятор тиску Emerson DeltaV PK Controller з модулем керування тиском

Витратомір перепаду тиску (Endress+Hauser Deltabar S PMD75). Схожий на Rosemount 3051SFC, інтегрований перетворювач диференційного тиску з первинним елементом.

Перетворювач перепаду тиску (Yokogawa EJA110E Differential Pressure Transmitter). Аналогічний Honeywell STD800, електронний прилад для вимірювання різниці тисків.

Вторинний прилад (ABB Flow Computer AFC600). Спеціалізований електронний обчислювальний пристрій для обробки сигналів від витратомірів, розрахунку об'ємної та масової витрати, а також передачі даних. Має дисплей та інтерфейси зв'язку.

Автоматичний регулятор витрати (Honeywell UDC3200 Universal Digital Controller). Одноканальний цифровий ПІД-регулятор з дисплеєм для відображення та налаштування параметрів.

Виконавчий механізм (Emerson Fisher GX Control Valve). Промисловий регулюючий клапан (наприклад, глобусний) з пневматичним або електричним приводом. Має корпус, регулюючий елемент та привід для його переміщення.

Рівнемір поплавковий (Magnetrol Orion Atlas Magnetostrictive Level Transmitter). Вертикальна металева трубка (вимірювальна камера), встановлена на резервуарі, з поплавком всередині та електронним блоком зверху для перетворення положення поплавка в електричний сигнал.

					БР.АКП-10.00.00.000 ПЗ	Арк.
						60
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Вторинний прилад (VEGA VEGAMET 862 Controller). Електронний пристрій для відображення та обробки сигналу від рівнеміра. Може мати дисплей, релейні виходи та інтерфейси зв'язку.

Вторинний прилад (ABB R600 Paperless Recorder). Електронний реєстратор з дисплеєм для відображення та запису графіків і числових значень рівня (та інших параметрів).

Автоматичний регулятор рівня (Schneider Electric Modicon M221 з модулем PID-регулювання). Компактний ПЛК, аналогічний Siemens S7-1200, з модулем або програмною функцією для керування рівнем.

Витратомір (Krohne OPTIFLUX 2300 Electromagnetic Flowmeter). Електромагнітний витратомір, схожий на Siemens SITRANS FM MAG 1100, для вимірювання витрати провідних рідин або газів (за певних умов).

Перетворювач тиску (Siemens SITRANS P200 Pressure Transmitter). Компактний електронний перетворювач тиску в металевому корпусі.

Вторинний прилад (Phoenix Contact Axioline F AXE FC PSI). Функціональний модуль для системи розподіленого вводу/виводу Axioline F, який може обробляти сигнали від датчиків витрати.

Автоматичний регулятор витрати (Eurotherm EPC3000 Programmable Controller). Програмований контролер з дисплеєм, що може використовуватися для керування витратою.

Виконавчий механізм (ASCO Series 290 Solenoid Valve). Електромагнітний клапан, який використовується для оперативного відкриття/закриття потоку газу (аргону).

#### **4.3 Розробка проекту щита розподілу та автоматики для апарату відновлення тетрахлориду титану**

Розподільні щити, як і щити ВРУ, відносяться до слаботочної системи. Спочатку від трансформаторної будки, що знаходиться неподалік від об'єкта або будівлі, потрапляє на головний розподільчий щит струму, який називається

					БР.АКП-10.00.00.000 ПЗ	Арк.
						61
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

щитом ВРУ. Від нього з окремих автоматів харчування подається на групові щити [5].

Концепція та розмір щитів за своїм призначенням та кількістю автоматів усередині різняться. Насамперед потрібно враховувати кількість компонентів, які встановлюватимуться всередину щита. Потім ступінь захисту корпусу, так для внутрішнього застосування безпосередньо в будівлі використовуються щити зі ступенем захисту (IP 41), а для зовнішнього (наприклад, на вулиці або підвальних приміщеннях відмінно підійдуть щити з IP55 і вище) [4].

Розробка однолінійної електричної схеми проводиться з підрахунком електроенергії, що витрачається. Це легко прорахувати знаючи до яких обладнання та елементів, що харчуються, підводити електроживлення.

Також важливим є тип установки щитів розподілу, це настінні та підлогові. Настінні бувають різних розмірів та варіацій, коли як підлогові відрізняються своїм обсягом та габаритами [1].

Щити автоматики. Щити автоматики використовують у регулюванні автоматизації процесів виробництва, де вручну перемикання чи відключення режимів роботи є недоцільним чи неможливим. Структура внутрішнього оснащення щита є однією з найскладніших, оскільки має безліч компонентів управління, що піддаються програмуванню або внесенню логіки до системи. До групи щитів автоматики можна віднести і щити управління (ЩУ), найчастіше застосовують щити з маркуванням ЩАУ [5].

При складанні та розробці даного проекту електропостачання було використано модульний щит класу ЩУА для виробничого процесу обробки тетрахлориду титану.

Автоматичні вимикачі були обрані за типом захисту обладнання, що знаходяться безпосередньо на виробничій частині. В основному були використані АВ 2, 3 та 4-х полюсні, також ПЗВ від захисту заземлення, реле перенапруги, контактори для насосного обладнання та силової автоматики та були включені запобіжники струмів для різних додаткових ланцюгів живлення. Що стосується третього щита управління, то на нього подається постійна напруга до 24В. Модулі

					БР.АКП-10.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		62

контролера приймають живлення від вихідного щита та подають постійну напругу на сам контролер. Сигнал на дисплеї йде безпосередньо від датчиків, розташованих за місцем оснащення.

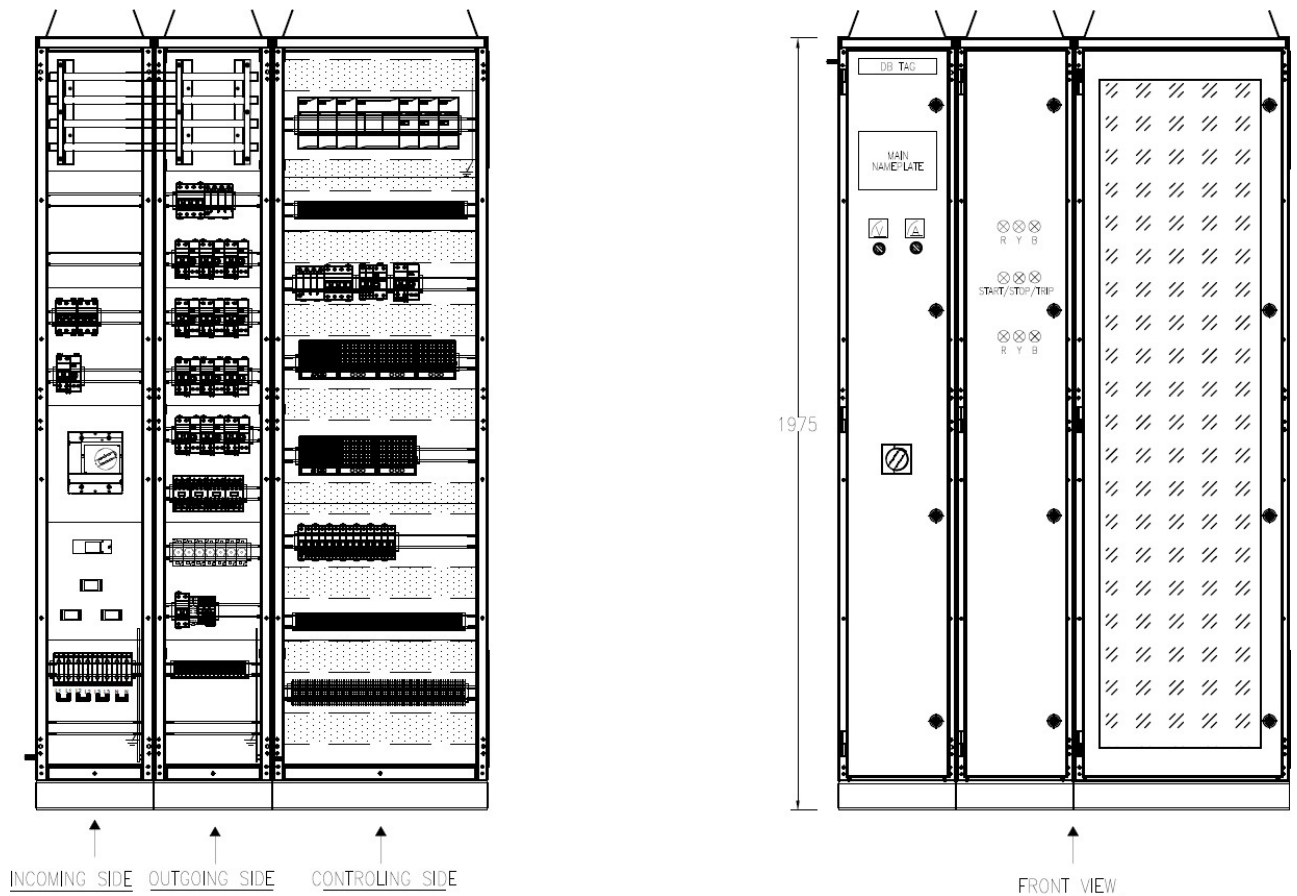


Рисунок 4.15 – Проектна частина ЩУА хімічного процесу

Таблиця 4.2 – Специфікація матеріалів електрощита ЩУА

Вхідна група			
№	Найменування	Характеристика	Кількість
1	МССВ (автоматичний вимикач в литому корпусі)	5 poles, 4A, 100A, 6 400V, 50Hz, 25kA	1
2	МСВ (автоматичний вимикач)	3 poles,	2
3	МСВ + RCD	МСВ: 2 poles, 16A, 230Vac, 10kA, 50Hz, C-curve RCD: ADD-ON, 2 poles, 25A, 30mA, 230Vac, 50Hz	1
4	Current transformer	50Hz, Class: 1, 3VA	3
5	Core balance transformer	160A	1
6	Terminal block (Клеммы)	For 2x0.75...35mm <sup>2</sup> cable	8
7	End stop	for din 32/35 rail	6

<b>Вихідна група</b>			
№	Найменування	Характеристика	Кількість
1	MCB	4pole, 4A, 400Vac, 50Hz,10kA, C-curve	1
2	Модульний обмежувач перенапруги (SPD PRD40r)	4pole + N, 230/400 V AC (+/- 10 %) at 50/60 Hz	1
3	MCB + RCD	MCB: 2pole, 16A, 230Vac, 50Hz, 10kA, C-curve RCD: Add-on, 2pole, 25A, 100mA, 230Vac, 50Hz	12
4	Contactora	3pole, 25A, 230Vac,50Hz с норм. відкр. контактом і норм. закр.контактом	4
5	Запобіжник на дин-рейку	63A fuse holder	7
6	MCB	MCB: 2pole, 20A, 230Vac, 50Hz, 10kA, C- curve	1
7	Реле захисту двигуна	6A, 50Hz, 250Vac	1
8	LC1-D12-10 DIN Rail MountingContactora	4P, 25A, НО+НЗ,220В,50/60Гц	1
9	Terminal block (Клеммы)	For 3x2.5...35mm <sup>2</sup> cable	18
10	End stop	for din 32/35 rail	18
<b>Панель автоматичного контролю</b>			
1	Terminal block	for 2x0.2...6mm <sup>2</sup> cable	144
2	Knife terminal block	UT2.5MT (P. CONTACT) (0.14-2.5)FERRULE	73
3	SIMATIC S7-1200 Базовий контролер	CPU 1211C: CM/CP CPU 1 плата CPU 1212C: CM/CP CPU 1 платаSM	3 1 1 1 3 1 1

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

## Продовження таблиці 4.2

4	MCB	4pole, 4A, 400Vac, 50Hz, 10kA, C-curve	1
5	Модульний обмежувач перенапруги (SPD PRD40r)	4pole + N, 230/400 V AC (+/- 10 %) at 50/60 Hz	1
6	MCB + RCD	MCB: 2pole, 16A, 230Vac, 50Hz, 10kA, C- curve RCD: Add-on, 2pole, 25A, 100mA, 230Vac, 50Hz	1
7	MCB + УЗО	MCB: 2pole, 16A, 230Vac, 50Hz, 10kA, C- curve 40A, 30mA	1
8	Display	DPM METSEPM2120	7
9	MCB	MCB: 2pole, 16A, 230Vac, 50Hz, 10kA, C- curve 40A, 30mA	7
10	End stop	for din 32/35 rail	16

Щит для процесу обробки тетраклориду титану був розроблений відповідно до міжнародного стандарту електричного обладнання (IEC-61439). Щит поділяється на три панелі (1 – панель вхідної групи, 2 – панель вихідної групи та 3 – панель автоматизації). У першій панелі подається живлення на трифазну шину (3L+N), від цієї шини напруга переходить на вихідну панель, де розподіляється автоматичними вимикачами для кожного ланцюга регулювання (насосні станції, відгін парів і газів, теплопостачання, печі і т.д.). Устаткування підключаються у нижній частині через клеми живлення. Від деяких клем живлення подається через кабель напруги на третю панель (панель автоматичного регулювання). У ній знаходяться реле регулювання напруги, головний мозок системи - це контролер Simatic-1200, дисплеї для відстеження стану датчиків та їх параметрів, а також кілька автоматів для запобігання короткому замиканню. У середині панелей також передбачено тепловий кабель для захисту від конденсації, автомат до нього підведений у третій панелі [10].

					БР.АКП-10.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		65

Дві панелі змінної напруги виконані у вигляді закритого щита, а в третій панелі двері по центру вирізані та прироблено броньоване скло завтовшки 2.5 мм. Це зроблено насамперед для зручності спостереження за системою та відстеження будь-яких змін.

Також важливим є захист від стороннього проникнення, тобто першу панель, куди подається напруга, неможливо відкрити, попередньо не відключивши всю систему подачі напруги. Насамперед це зроблено для підвищення безпеки та запобігання нещасним випадкам.

### **Висновки до розділу**

У розділі розглянуто розробку технічної документації та підбір технічних засобів для автоматизації процесу відновлення тетраклориду титану. Ключовим елементом стала функціональна схема автоматизації, яка детально відображає структуру системи управління, включаючи технологічне обладнання, засоби контролю та регулюючі пристрої.

Особливу увагу приділено контуру керування тиском, що забезпечує стабільність технологічного процесу.

Вибір технічних засобів здійснено з увагою до надійності, точності вимірювань та безпеки експлуатації. Система управління побудована на базі програмованого логічного контролера, який автоматизує всі етапи технологічного циклу - від завантаження реагентів до контролю основних параметрів процесу.

Окремо розроблено проект розподільного щита управління, що відповідає сучасним стандартам промислової автоматизації. Щит включає модулі живлення, захисту та керування, що забезпечують надійну та безпечну роботу всієї системи автоматизації. Запропоновані технічні рішення дозволяють ефективно керувати процесом відновлення, підвищуючи його продуктивність та стабільність.

					БР.АКП-10.00.00.000 ПЗ	Арк.
						66
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У даному проекті була розроблена комплексна система автоматизованого управління технологічним процесом відновлення тетрахлориду титану ( $TiCl_4$ ), що включала кілька ключових етапів проектування та впровадження. Спочатку проводився детальний аналіз технологічної схеми виробництва, який дозволив вивчити особливості процесу відновлення у реторті та чітко визначити його як об'єкт автоматизації. На основі отриманих даних була розроблена структурна схема системи управління, де були встановлені взаємозв'язки між керуючою системою та технологічним обладнанням, визначені вхідні та вихідні сигнали, а також намічені контрольні точки для регулювання основних параметрів процесу.

Важливим етапом проекту став теоретичний аналіз системи автоматичного регулювання, який включав розрахунок динамічних характеристик системи контролю тиску, побудову математичної моделі в середовищі MATLAB, а також дослідження стабільності розімкнутої та замкнутої систем. Отримані результати дозволили визначити запаси стійкості за амплітудою та фазою, що є критично важливим для забезпечення надійної роботи системи. Особливу увагу було приділено порівняльному аналізу різних типів регуляторів, включаючи P, PI та PID регулятори, що дало змогу вибрати оптимальний варіант керування процесом з урахуванням його динамічних характеристик та вимог до якості регулювання.

Завершальним етапом роботи стала розробка конструкторської документації для щитів управління та автоматизації, яка враховувала всі вимоги промислової безпеки та специфіку технологічного процесу. Створена система автоматизації забезпечує ефективне керування всіма етапами виробничого циклу відновлення тетрахлориду титану, починаючи від завантаження вихідних реагентів і закінчуючи контролем ключових параметрів процесу. Впровадження даної системи дозволить підвищити ефективність виробництва, забезпечити стабільність технологічного процесу та зменшити ймовірність аварійних ситуацій, що є особливо важливим для хімічних виробництв з підвищеними вимогами до безпеки.

					БР.АКП-10.00.00.000 ПЗ	Арк.
						67
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ НА ДЖЕРЕЛА

1. Бойко В. І. Автоматизація хімічних виробництв / В. І. Бойко, В. М. Коваленко. – 2-ге вид. – Київ: НТУУ "КПІ", 2018. – 320 с.
2. Гнатюк, О. П. Сучасні системи автоматизації промислових процесів / О. П. Гнатюк, І. В. Шевченко. – Львів: Вид-во Львів. політехніки, 2020. – 278 с.
3. Соколов М. Д. Технологія титану та його сполук / М. Д. Соколов, В. О. Рижков. – Дніпро: НГУ, 2019. – 215 с.
4. Петренко, Ю. В. Порівняльний аналіз методів відновлення  $TiCl_4$ : магнієтермічний та натрійтермічний процеси / Ю. В. Петренко // Вісник НТУ "ХПІ". – 2021. – № 12. – С. 45–52.
5. Лисенко В. С. Апаратура для виробництва титанової губки / В. С. Лисенко, О. І. Марченко // Хімічна промисловість України. – 2020. – № 4. – С. 18–25.
6. Мельник І. П. Проектування реакторів для відновлення тетрахлориду титану / І. П. Мельник. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2017. – 134 с.
7. Кривошеєв В. Г. Автоматичне регулювання технологічних процесів / В. Г. Кривошеєв, Л. М. Гончаренко. – Харків: НТУ "ХПІ", 2019. – 412 с.
8. Павленко С. О. Сучасні системи керування тиском у хімічних реакторах / С. О. Павленко // Автоматизація виробничих процесів. – 2022. – № 3. – С. 30–38.
9. Ткаченко О. В. Моделювання динаміки хіміко-технологічних систем / О. В. Ткаченко. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 256 с.
10. Зінченко М. І. Аналіз стійкості систем автоматичного регулювання / М. І. Зінченко // Вісник Нац. ун-ту "Львів. політехніка". – 2020. – № 5. – С. 67–74.
11. Ковальчук В. П. Моделювання систем автоматичного керування в MATLAB Simulink [Електронний ресурс] / В. П. Ковальчук. – Режим доступу: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/45678>

					БР.АКП-10.00.00.000 ПЗ	Арк.
						68
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

12. Білик І. О. Імітаційне моделювання технологічних процесів / І. О. Білик. – Київ: КНЕУ, 2018. – 180 с.
13. Шевчук Д. В. Методи налаштування ПІД-регуляторів / Д. В. Шевчук // Автоматика та комп'ютерні системи. – 2021. – № 2. – С. 22–29.
14. Сидоренко О. М. Практичне застосування РІД-регуляторів у промисловості / О. М. Сидоренко. – Одеса: ОНПУ, 2020. – 198 с.
15. Гриценко В. І. Датчики та виконавчі механізми в промисловій автоматизації / В. І. Гриценко. – Харків: ХНУРЕ, 2019. – 312 с.
16. Лисенко Ю. А. Програмовані логічні контролери Siemens S7-1200 / Ю. А. Лисенко. – Київ: КПІ, 2021. – 245 с.
17. Мороз П. Р. Проектування систем автоматизації: функціональні схеми / П. Р. Мороз. – Дніпро: НГУ, 2020. – 176 с.
18. Коваль С. В. Стандарти позначень у технічній документації / С. В. Коваль // Електротехніка та автоматика. – 2022. – № 1. – С. 12–18.
19. Бондаренко І. О. Електричні щити управління: проектування та монтаж / І. О. Бондаренко. – Київ: КНУБА, 2021. – 210 с.
20. Ткачук В. М. Вимоги безпеки до промислових щитів автоматизації / В. М. Ткачук // Енергетика та автоматика. – 2020. – № 4. – С. 40–47.

					БР.АКП-10.00.00.000 ПЗ	Арк.
						69
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		