

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**Сумський державний університет**  
**Шосткинський інститут**

(повна назва інституту/факультету)

**Кафедра системотехніки та інформаційних технологій**  
(повна назва кафедри)

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Георгій Худолей  
(підпис) (Ім'я та ПРІЗВИЩЕ)

\_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**  
**на здобуття освітнього ступеня бакалавр**  
(бакалавр / магістр)

зі спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»,  
(код та назва)

освітньо-професійної програми «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології  
освітньо-професійної / освітньо-наукової) ( (назва програми)  
та робототехніка»

на тему: Система управління установки розділення повітря з дроселюванням  
і попереднім охолодженням

Здобувача (ки) групи СУ-01Ш Яценко Ігор Миколайович  
(шифр групи) (прізвище, ім'я, по батькові)

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

\_\_\_\_\_ Ігор ЯЦЕНКО  
(підпис) (Ім'я та ПРІЗВИЩЕ здобувача)

Керівник \_\_\_\_\_ викладач, к.т.н. \_\_\_\_\_ Андрусенко О.О. \_\_\_\_\_  
(посада, науковий ступінь, вчене звання, ім'я та ПРІЗВИЩЕ) (підпис)

**Шостка – 2024**

## РЕФЕРАТ

Ященко Ігор Миколайович. Система управління установки розділення повітря з дроселюванням

і попереднім охолодженням. Бакалаврська робота. Шосткинський інститут Сумського державного університету. Шостка, 2024 рік.

Бакалаврська робота містить 52 аркуші пояснювальної записки, з урахуванням 26 рисунків, 5 таблиць; 1 креслення; презентація.

Робота присвячена розробці системи управління установки розділення повітря з дроселюванням і попереднім охолодженням у. Автоматизація дозволяє зменшити потреби в кількості людських втручань в технологічний процес і зробити процес більш адаптивним до збурюючих дій, які можуть виникнути в процесі роботи обладнання. Розробка системи управління даного технологічного процесу забезпечує управління великими потужними агрегатами в якому людські зусилля зводяться до налаштування та налагодження автоматичних пристроїв управління і регулювання.

Ключові слова: технологічний процес, система управління, регулюючий мікропроцесорний контролер, алгоритм управління, регульований параметр.

## SUMMARY

Yashchenko Ihor Mykolayovych. Control system of the air separation unit with throttling and preliminary cooling. Bachelor's thesis. Shostka Institute of Sumy State University. Shostka, 2024.

The bachelor's thesis contains 52 sheets of explanatory note, including 26 figures, 5 tables; 1 drawing; presentation.

The work is devoted to the development of a control system for an air separation unit with throttling and pre-cooling of the air. Automation reduces the need for human intervention in the technological process and makes the process more adaptive to disturbances that may occur during the operation of the equipment. The development of a control system for this technological process ensures the control of large powerful units in which human efforts are reduced to setting up and adjusting automatic control and regulation devices.

Keywords: technological process, control system, regulating microprocessor controller, control algorithm, adjustable parameter.

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ШОСТКИНСЬКИЙ ІНСТИТУТ СУМСЬКОГО ДЕРЖАВНОГО УНІВЕРСИТЕТУ  
КАФЕДРА СИСТЕМОТЕХНІКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ  
Спеціальність 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Зав. кафедри системотехніки та інформаційних технологій

Г. М. Худолей

« 16 » квітня 2024 р.

## ЗАВДАННЯ

### на бакалаврську роботу

студент Ященко Ігор Миколайович

1. Тема проекту Система управління установки розділення повітря з дроселюванням і попереднім охолодженням

Затверджено наказом директора інституту  
№ 22-ОД від « 15 » квітня 2024 р.

2. Строк здачі студентом закінченої роботи «01» червня 2024 р.

3. Вихідні дані до виконання роботи:

\_ - завдання кафедри \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

4. Зміст пояснювальної записки:

4.1 Конструктивно-технологічний аналіз об'єкта управління.

4.2 Вибір параметрів технологічного процесу

4.3 Вибір каналів контролю та управління

4.4 Вибір сучасних засобів автоматизації

4.5 Розрахункова частина.

\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

4.6 Алгоритм роботи системи керування

5. Перелік графічних матеріалів:

5.1. Функціональна схема автоматизації.

\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

7. Календарний план:

№ етапу	Зміст етапу роботи	Строк виконання (початок-кінець)
1	Аналіз завдання кафедри. Підбір та аналіз джерел інформації. Відбір аналогів та прототипів Конструктивно-технологічний аналіз об'єкта керування.	06.05.2024 - 10.05.2024
2	Вибір каналів управління, сигналізації та блокування. Вибір сучасних засобів автоматизації, розробка системи сигналізації та захисту, вибір алгоритмів управління. Схема автоматизації функціональна. Схеми електричні сигналізації.	11.05.2024 - 18.05.2024
3	Виконання розрахункової частини.	19.05.2024- 26.05.2024
4	Технічне оформлення роботи. Здача роботи керівнику.	27.05.2024 - 02.06.2024

8. Дата видачі завдання 17 квітня 2024 року.

Керівник роботи \_\_\_\_\_ викладач, к.т.н. \_\_\_\_\_ Андрусенко О.О.  
вчені ступень та звання, посада Підпис Прізвище І.П.

Завдання до виконання прийняв:

Студент групи СУ - 01ш \_\_\_\_\_ Яценко І.М.  
Підпис Прізвище І.П.

## ЗМІСТ

Список скорочень та умовних позначень

Вступ

1 Конструктивно-технологічний аналіз об'єкта автоматизації

2 Вибір параметрів технологічного процесу

3 Вибір каналів контролю та управління

4 Вибір засобів автоматизації

5 Розрахункова частина

6 Алгоритм роботи системи керування

Висновок

Список використаних джерел

## СПИСОК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

- САК – Система автоматичного керування;
- ВМ – виконавчий механізм;
- ПЛК – програмований логічний контролер;
- ТЗА – технічні засоби автоматизації;
- ЩК – щит керування;
- НМІ – human machine interface;
- ФСА – функціональна схема автоматизації;
- САПР – система автоматизованого проектування;
- AI – Analog input;
- DI – digital input;
- DO – digital output;
- САПР – система автоматизованого проектування;

## **ВСТУП**

В сучасному світі потреба у високоякісному кисні, азоті та інертних газах зростає з кожним роком. Ці гази широко використовуються в різних галузях промисловості, таких як металургія, хімічна промисловість, медицина та харчова промисловість. Для забезпечення їх виробництва використовуються установки розділення повітря.

Установка розділення повітря – це складна технічна система, яка здійснює процес поділу повітря на його компоненти за допомогою різних методів, таких як дроселювання і попереднє охолодження. Ефективність роботи цих установок значною мірою залежить від системи управління, яка забезпечує оптимальне функціонування всіх технологічних процесів.

Метою даної кваліфікаційної роботи є розробка та вдосконалення системи управління установки розділення повітря з дроселюванням і попереднім охолодженням. Завданням роботи є аналіз конструктивно-технологічних особливостей об'єкта автоматизації, вибір оптимальних параметрів технологічного процесу, розробка каналів контролю та управління, вибір засобів автоматизації та розробка алгоритму роботи системи керування.

Актуальність теми обумовлена необхідністю підвищення ефективності та надійності роботи установок розділення повітря, що дозволить знизити енергоспоживання та підвищити якість одержуваних газів.

## 1 КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГІЧНИЙ АНАЛІЗ ОБ'ЄКТА АВТОМАТИЗАЦІЇ

Для добування  $N_2$  і  $O_2$  розділенням повітря в промисловості застосовують переважно установки з дроселюванням стисненого повітря (за один або два цикли) і з попереднім аміачним охолодженням. Застосовуються також установки високого і низького тиску з регенераторами і турбодетандерами [1].

Для виробництва  $N_2$  і  $O_2$  використовується сухе повітря такого складу (об.%):  $N_2$ — 78,03;  $O_2$  — 20,99; Ar — 0,933;  $CO_2$  — 0,03;  $H_2$ —0,01; водяної пари 0,02—2; пилу кілька міліграмів на  $1\text{ м}^3$ , Ne -  $1,06 \cdot 10^{-3}$ , He -  $4,6 \cdot 10^{-4}$ , Kr -  $1,1 \cdot 10^{-4}$ , Xe -  $8 \cdot 10^{-6}$  і Rn  $6 \cdot 10^{-18}$ . Хоча повітря беруть за кілометр від місця його переробки і по можливості в лісових місцевостях, його треба добре очищати від пилу і  $CO_2$  і висушувати.

Схему установки для розділення повітря на  $N_2$  і  $O_2$  з дроселюванням і попереднім аміачним охолодженням подано на рисунку 1. Повітря, очищене від пилу в фільтрі 7, надходить у повітряний чотириступеневий компресор 2, у перших двох ступенях якого стискується приблизно до  $(8—10) \cdot 10^5$  Па і направляється для видалення  $CO_2$  в апарат 3, який зрошується 10%-ним розчином NaOH. Після цього повітря знову повертається в компресор, де стискується в третьому і четвертому ступенях до робочого тиску  $(35—60) \cdot 10^5$  Па.

Вологу видаляють за допомогою NaOH (твердого), силікагелю або алюмогелю, а на великих установках найчастіше вологу видаляють виморожуванням в аміачних холодильниках.

Стиснене повітря спочатку проходить через теплообмінники-регенератори 4, де охолоджується холодним  $N_2$ , що надходить у теплообмінники з колони 7. Після цього повітря проходить через аміачний холодильник 5, де з нього виморожується волога.

В аміачному холодильнику 5, який складається з трьох секцій, повітря охолоджується до  $-25...-40^\circ\text{C}$ ; водяна пара перетворюється в лід, який поступово забиває проходи для повітря. Щоб процес був безперервним, заморожену секцію розігрівають, а на цей час в роботу включається друга секція. Для розмороження використовується газоподібний  $NH_3$  під тиском до  $12 \cdot 10^5$  Па і температурою до  $50...80^\circ\text{C}$ .

Очищене від водяної пари стиснене повітря надходить у протитечійний теплообмінник 6, змонтований навколо ректифікаційної колони 7, де охолоджується  $N_2$  і  $O_2$ , що виходять з колони.

З теплообмінника 6 повітря надходить у випарник 8 всередині колони, де додатково охолоджується рідким повітрям, збагаченим  $O_2$ , і проходить через дросельний



вентиль приблизно в середню частину нижньої колони. Тиск повітря при цьому знижується до  $6 \cdot 10^5$  Па.

Далі рідке повітря ректифікують за методом, описаним вище.

Азот з верхньої частини колони через теплообмінник 4, а  $O_2$  з конденсатора прямують у відповідні газгольдери. При нормальній роботі ректифікаційної колони, залежно від умов, виробляють 99,95...99,97%-ний  $N_2$  і 90...92%-ний  $O_2$  або чистий 99,5...99,7%-ний  $O_2$  і  $N_2$  з підвищеним вмістом  $O_2$ .

Для того щоб одночасно добувати чисті  $N_2$  і  $O_2$ , треба з нижньої частини верхньої колони виводити частину  $O_2$ , збагаченого  $Ar$ . Такий газ («сирий кисень») використовується для добування  $Ar$ .

Зберігання і перевезення  $O_2$ . Газоподібний  $O_2$  зберігають і перевозять під тиском  $150 \cdot 10^5$  або  $(200 \pm 5) 10^5$  Па при  $20^\circ C$  в сталевих безшовних балонах (з товщиною стінки 8 мм). Маса балона в 8,5—9 разів перевищує масу  $O_2$  (1,36 кг), тому вартість перевезення  $O_2$  в балонах досить висока. Балони з  $O_2$  пофарбовані в блакитний колір, а з  $N_2$  — в чорний з коричневою смугою вгорі балонах.

Значно дешевше зберігати і перевозити  $O_2$  у рідкому стані, але при наповненні тари, зберіганні і переливанні рідкого  $O_2$  втрати його становлять 30—40%. Тому для використання в невеликих кількостях  $O_2$  доцільніше видобувати з кисневих установок у газоподібному стані.

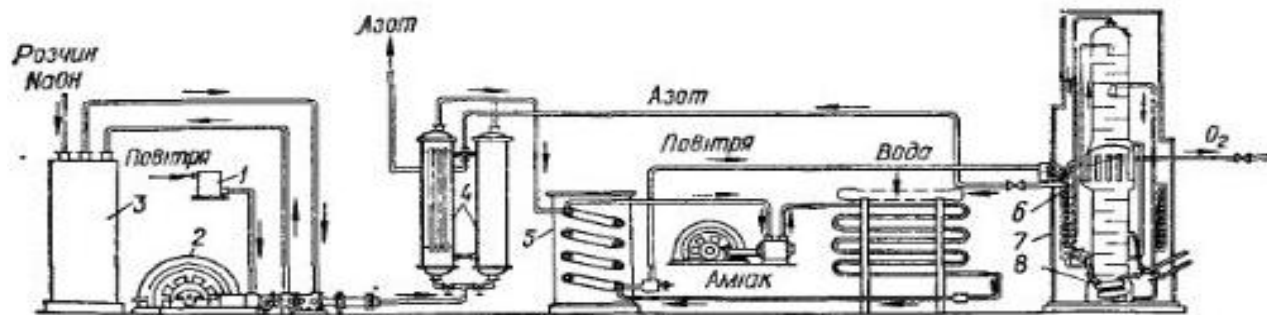


Рисунок 1.1 - Контактний апарат для окислення оксида сірки(IV)

## 2 ВИБІР ПАРАМЕТРІВ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ

Процес розділення повітря складний і дуже важливий, оскільки від якості протікання реакцій залежить чистота отриманої продукції.

В процесі отримання азоту та кисню приймає участь багато апаратів [2]., тому при виборі величин, що регулюються слід в першу чергу обирати ті параметри, що є показниками якості процесу, ті вхідні і вихідні величини через які на об'єкт діють збурюючі чинники, а також регулюванню підлягають режимні параметри об'єктів.

Розглянемо апарат та визначимо параметри, що необхідно регулювати та за якими каналами можуть прийти збурюючі чинники, для того щоб визначити де саме необхідно вносити регулюючі впливи.

У апараті відбувається поглинання вуглекислого газу.

Показником ефективності процесу є рівень NaOH у апараті.

Ціллю управління є підтримання заданого значення рівня.

Каналом внесення регулюючої дії є зміна витрат відпрацьованих продуктів, що поступають з апарата.

Розглянемо теплообмінник та визначимо параметри, що необхідно регулювати та за якими каналами можуть прийти збурюючі чинники, для того щоб визначити де саме необхідно вносити регулюючі впливи.

У теплообміннику відбувається охолодження повітря до температури 10° С.

Показником ефективності процесу є температура у теплообміннику.

Ціллю управління є підтримання заданого значення температури.

Каналом внесення регулюючої дії є зміна витрат азоту, що поступає в теплообмінник.

Розглянемо холодильник та визначимо параметри, що необхідно регулювати та за якими каналами можуть прийти збурюючі чинники, для того щоб визначити де саме необхідно вносити регулюючі впливи.

У холодильнику відбувається охолодження повітря до температури мінус 30° С.

Показником ефективності процесу є температура у холодильнику.

Ціллю управління є підтримання заданого значення температури.

Каналом внесення регулюючої дії є зміна витрат аміаку, що поступає в холодильник.

Розглянемо охолоджувач та визначимо параметри, що необхідно регулювати та за якими каналами можуть прийти збурюючі чинники, для того щоб визначити де саме необхідно вносити регулюючі впливи.

У охолоджувачі відбувається охолодження аміаку до температури 40°C.

Показником ефективності процесу є температура у охолоджувачі.

Ціллю управління є підтримання заданого значення температури.

Каналом внесення регулюючої дії є зміна витрат води, що поступає в охолоджувач.

Також є необхідним контролювати тиск азоту та кислороду на виході технологічного процесу.

Для зручності представлення інформація систематизована у вигляді таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 - Перелік параметрів установки розділення повітря з дроселюванням і попереднім охолодженням

Параметр	Позиція технологічної схеми	Функція	Відхилення	Значення	Min	Max
Рівень NaOH	Апарат	Регулювання	5%	30 г	25 г	35 г
Температура повітря	Теплообмінник-регенератор	Регулювання	5%	10°C	8°C	12°C
Температура повітря	Холодильник	Регулювання	5%	-30°C	-32°C	-28°C
Температура аміаку	Охолоджувач	Регулювання	5%	40°C	38°C	42°C
Тиск кислороду	Теплообмінник-регенератор	Контроль	5%	6 кгс/см <sup>2</sup>	5,9 кгс/см <sup>2</sup>	6,1 кгс/см <sup>2</sup>
Тиск азоту	Ректифікаційна колона	Контроль	5%	6 кгс/см <sup>2</sup>	5,9 кгс/см <sup>2</sup>	6,1 кгс/см <sup>2</sup>

На основі інформації з Таблиці 2.1 та розділу 1, необхідно визначити та використовувати відповідні канали регулювання, адміністрування та управління.

## **3 ВИБІР КАНАЛІВ КОНТРОЛЮ ТА УПРАВЛІННЯ**

### **3.1 Вибір величин, які контролюються**

Варто пам'ятати, що при виборі контрольованих величин слід керуватися такими загальними правилами. Параметри, які контролюються, повинні найбільш повно описувати хід технологічного процесу, тобто такі параметри, знання яких дозволяє оператору полегшити пуск, налаштування і ведення технологічного процесу. Також у будь-якому процесі необхідно здійснювати контроль найбільш важливих вихідних параметрів для оперативного управління. Проаналізувавши хід технологічного процесу та параметри установки розділення повітря з дроселюванням і попереднім охолодженням контролюються такі величини:

3.1.1 Тиск азоту.

3.1.2 Тиск кисню.

### **3.2 Вибір величин, які сигналізуються**

Сигналізація розділяється на технологічну сигналізацію і сигналізацію стану. Для технологічної сигналізації використовується схема технологічної сигналізації. Сигналізуються такі параметри:

1. Перевищення рівня в апараті.
2. Перевищення температури в теплообміннику.
3. Перевищення температури в холодильнику.
4. Перевищення температури в охолоджувачі.
5. Перевищення тиску азоту.
6. Перевищення тиску кисня.

Сигналізація стану оповіщає про роботу двигунів насоса та компресора.

Засоби автоматизації, які будуть використовуватися для керування процесом, мають бути обрані технічно правильно та економічно доцільно. Конкретні типи автоматичних пристроїв обираються з урахуванням можливостей об'єктів управління. В першу чергу, враховуються такі фактори, як пожежо- та вибухонебезпечність, агресивність і токсичність середовища, кількість параметрів, що беруть участь в управлінні, їх фізико-хімічні властивості, а також вимоги до якості контролю і регулювання.

Оскільки дане виробництво не є пожежо- та вибухонебезпечним, автоматизацію можна здійснювати на основі сучасних датчиків без іскрозахисту та вибухозахисту. Для з'єднувальних ліній використовуються звичайні кабелі. Прилади на щиті

застосовуються стандартні, оскільки щитова розташована окремо від технологічного обладнання і знаходиться у приміщенні, де немає доступу небезпечним речовинам.

Електричні засоби характеризуються меншою затримкою і перевершують пневматичні за точністю вимірювання. Крім того, використання електричних засобів спрощує впровадження мікропроцесорної техніки.

### 3.3 Контур регулювання рівня

На рисунку 3.1 зображений контур регулювання рівня води в котлі. Даний контур складається з рівнеміра, регулятора та клапана. Датчик вимірює рівень води в котлі установці та передає сигнал 4-20мА на регулятор який порівнює його з заданим значенням рівня та передає сигнал на виконуючий механізм.

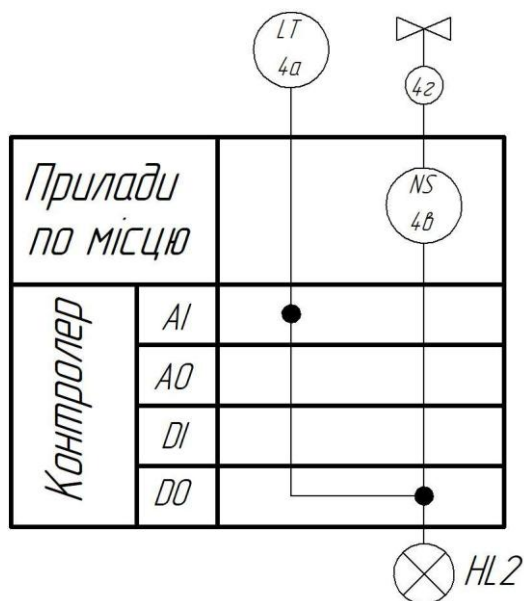


Рисунок 3.1 - Контур регулювання рівня в котлі.

### 3.4 Контур регулювання температури

На рисунку 3.2 зображено контур регулювання температури. Датчик температури перетворює температуру в сигнал та передає його регулятору, який порівнює його з заданим значенням температури та формує сигнал на виконуючий механізм.

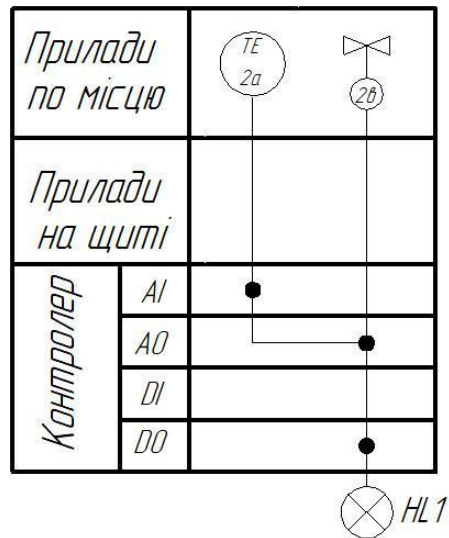


Рисунок 3.2 - Контур регулювання температури.

### 3.5 Контур контролю тиску.

На рисунку 3.3 зображено контур контролю тиску. Датчик тиску перетворює сигнал тиску в електричний уніфікований сигнал, який сприймається контролером та обробляється, в залежності від меж – максимальної та мінімальної видається дискретний сигнал сигналізації.

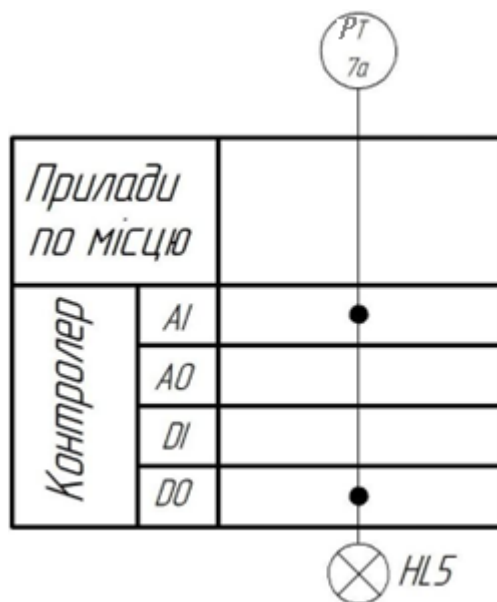


Рисунок 3.3 - Контур контролю тиску

### 3.5 Опис схеми технологічної сигналізації

Схема технологічної сигналізації.

Для випробування схеми сигналізації необхідно натиснути кнопку випробування. При відхиленні параметру відкривається відповідний транзистор

регулятора, на вхід блоку сигналізації поступає -сигнал, блок сигналізації в свою чергу вмикає дзвінок та подає напругу на відповідну сигнальну арматуру. Звукову сигналізацію необхідно зняти натисканням кнопки. Лампи згаснуть у тому випадку коли параметр повернеться до заданого значення.

### 3.6 Схема керування електроприводами насосів

Розглянемо схему керування двигуном М2 насоса [5].. Схемою передбачено керування двигуном безпосередньо з місця установки та дистанційне - кнопковим постом, який розташований на щиту оператора (рис. 3.4).

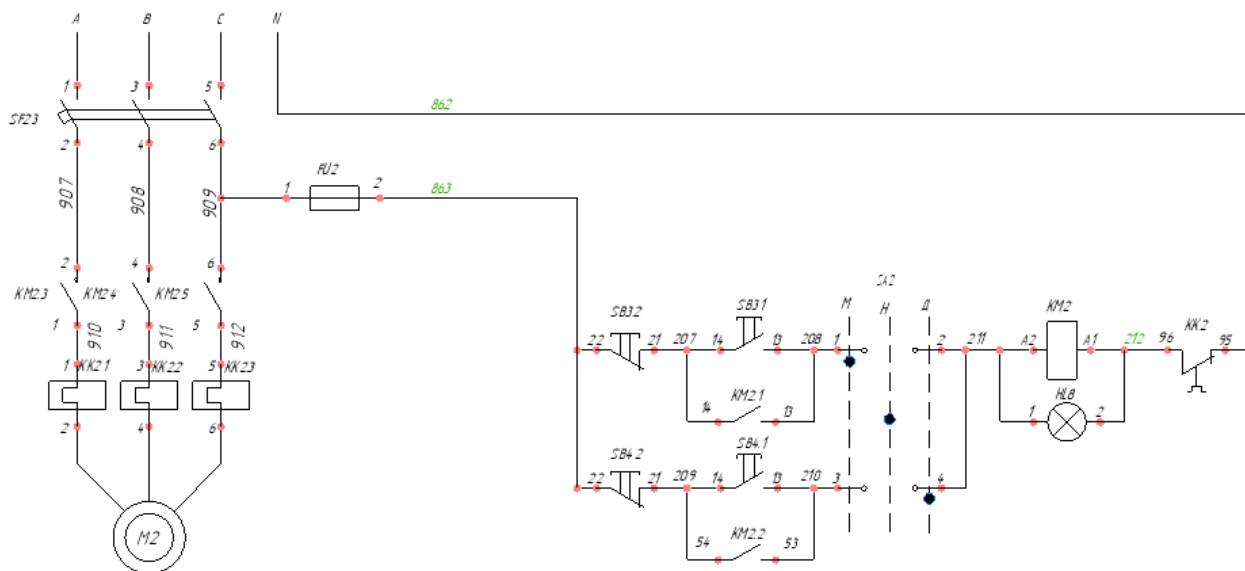


Рисунок 3.4 – Схема керування електроприводами насосів.

Для керуванням двигуном по місцю необхідно перевести ключ керування SA2 у положення “По місцю”. У цьому випадку для запуску двигуна необхідно натиснути кнопку SB3.1 – напруга живлення через замкнуті контакти перемикача SA2 живить котушку пускача KM2. Він спрацьовує і замикає контакт KM2.1, ставиться на самоблокування, замикаючи силові контакти KM2.3 – KM2.5 вмикає двигун насоса.

Для відключення двигуна необхідно натиснути кнопку SB3.2, ланцюг роз'єднається, подача живлення на пускач KM2 припиняється, роз'єднуються його силові контакти KM2.3 – KM2.5 і двигун зупиниться.

Для дистанційного керування двигуном необхідно перевести ключ керування у положення “Дист.”. У цьому випадку для пуску двигуна, необхідно натиснути кнопку SB3.1 – напруга живлення через замкнуті контакти перемикачам SA2 живить котушку

пускатча КМ2. Він спрацьовує та замкнувши контакт КМ2.2, ставиться на самоблокування, замикає силові контакти КМ2.3 –КМ2.5 та вмикає двигун насоса.

Для відключення двигуна необхідно натиснути кнопку SB2.2 ланцюг роз'єднається, подача живлення на пускач КМ2 припиняється, роз'єднуються його силові контакти КМ2.3 –КМ2.5 і двигун зупиниться.

Схемою керування передбачено відключення двигуна при спрацьовуванні теплового захисту - при перенавантаженні двигуна спрацьовує теплове реле КК2 роз'єднуючи ланцюг живлення вмикача КМ2, у подальшому роз'єднуються силові контакти і двигун зупиниться.

Управління компресором здійснюється аналогічно.



## 4 ВИБІР ЗАСОБІВ АВТОМАТИЗАЦІЇ

Для автоматизації процесу будемо використовувати централізовану систему управління. Всі прилади для отримання, фіксації, реєстрації інформації, технічні засоби автоматизації, прилади управління, сигналізації, захисту та блокування обиратимемо, виходячи з вимог централізованої системи управління.

Оскільки процес належить до хімічної промисловості, основними критеріями відбору є точність, швидкодія, надійність, стійкість до агресивних середовищ та уніфікованість. Додатково врахуємо вимоги щодо мінімізації: мінімальна кількість технічних засобів автоматизації повинна забезпечувати номінальний безаварійний режим роботи всього обладнання.

Також слід звернути увагу на можливість модернізації та масштабованості системи, що дозволить легко впроваджувати нові технології та пристрої в майбутньому, не порушуючи цілісності існуючої системи. Це забезпечить гнучкість та адаптивність виробництва до змінних умов і нових вимог ринку.

### 4.1 Вибір датчиків

З визначених основних параметрів технологічного процесу та побудованих контурів регулювання, констатуємо факт, що нам знадобляться датчики тиску, температури та рівня.

#### 4.1.1 Вибір датчиків тиску

Для регулювання розрідження та перепаду тиску необхідні датчики тиску.

Для вимірювання розрідження камера + датчика різниці тиску залишається відкритою (подається атмосферний тиск)

ПД310. Інтелектуальні перетворювачі тиску [6]



Рисунок 4.1 – Зовнішній вигляд датчика тиску ПД310.

Перетворювач тиску ПД310

ПД310 - це багатофункціональний високоточний перетворювач для вимірювання надлишкового, надлишково-вакуумметричного та диференційного (перепад) тиску в загальнопромисловому виконанні. Він оснащений вимірною мембраною із нержавіючої сталі AISI316L.

#### Основні характеристики

- Перетворення тиску: Перетворює тиск різних рідин, газів, повітря та пару в уніфікований вихідний сигнал 4-20 мА та цифровий сигнал протоколу HART.
- Міцний корпус: Польовий корпус відповідає суворим вимогам сучасної промисловості.
- Стійкість до статичного тиску та перевантаження: Має високу стійкість до статичного тиску та перевантаження.
- Висока точність: Точність вимірювання становить 0,075%.
- Налаштування та функціонал: Зручне налаштування під час експлуатації, можливість переналаштування діапазонів вимірювання (100:1) та інших параметрів з лицьової панелі.
- HART інтерфейс: Дає змогу віддалено налаштовувати параметри та передавати інформацію про стан приладу.
- Захист IP: Надійний захист з високим статичним тиском і високим тиском перевантаження сенсора.
- Універсальний сенсор: Можливість вимірювати як надлишковий тиск, так і розрідження. Є функція вилучення квадратного кореня.

#### Основні сфери застосування

- Енергетика
- Котельні установки ("барабани" котлів)
- Парогенеруючі об'єкти (теплова енергетика)
- Вентиляційні системи
- Газорозподільні системи
- Металургія
- Харчова промисловість
- Машинобудування

#### Умови експлуатації

Перетворювач тиску ПД310 може працювати на відкритому повітрі або в приміщеннях без агресивних парів та газів при таких умовах:

- Атмосферний тиск: Від 84 до 106,7 кПа
- Температура навколишнього повітря: Від -40 до +70 °С
- Відносна вологість: Не більше 80% без конденсації вологи при 35 °С, допускається конденсація вологи при низьких температурах

Перетворювач тиску ПД310 є високоякісним і надійним рішенням для вимірювання тиску в різних промислових умовах. Його широкі функціональні можливості та висока точність роблять його ідеальним вибором для застосування в енергетиці, вентиляційних системах, металургії, харчовій промисловості та машинобудуванні.

Таблиця 4.1 - Технічні характеристики датчика тиску ПД310.

Назва	Значення	
	ПД310-Д	ПД310-Н
Вихідний сигнал	4...20 мА + HART	
Межі основної похибки вимірювання	±0,075 %	±0,1 %
Напруга живлення	16,5...55 В (номінальна напруга =24В)	
Опір навантаження	Не менше 250 Ом	
Перенапругування діапазонів вимірювання	100:1	
Штуцер для підмикання тиску	Фланець, міжосьова відстань - 54 мм	M20×1,5
Ступінь захисту корпусу	IP65	
Середній час наробітку, не менше	50 000 год	
Середній термін служби, не менше	5 років	
Вага без упаковки / в упаковці	3,5 кг / 4,5 кг	1,5 кг / 2,5 кг
Діапазон робочих температур навколишнього повітря	-20 (-40°)...70 (80°) °С	
Діапазон температур вимірювального середовища	-40...120 °С	

#### ПД200-ДД. Високоточний датчик тиску з індикацією [7]

Перетворювачі диференційного тиску загальнопромислового виконання ПД200 моделі 155 є пристроями для вимірювання перепаду тиску, виготовленими в польовому корпусі з вимірювальною мембраною із нержавіючої сталі та металевим кабельним вводом.

#### Призначення

Ці перетворювачі призначені для вимірювання перепаду тиску або рівня рідини у посудинах під тиском, а також для вимірювання витрати середовища на звужуючих

пристроях. Вони застосовуються в системах автоматичного регулювання та керування на основних та вторинних виробництвах у промисловості та ЖКГ, зокрема:

- Газорозподільні системи
- Вузли обліку газу
- Об'єкти енергетики
- "Барабани" котлів у котельних
- Парогенеруючі об'єкти
- Вентиляційні системи

Основні характеристики

- Вимірювання різниці тиску: Підходять для нейтральних до нержавіючої сталі середовищ (повітря, пара, різні рідини).
- Перетворення перепаду тиску: В уніфікований сигнал постійного струму 4-20 мА та HART-протокол.
- Верхня межа перепаду тиску: Від  $\pm 60,0$  Па до  $\pm 2,0$  МПа.
- Максимальний статичний тиск: До 13 МПа.
- Клас точності: 0,1.
- Ступінь захисту корпусу: IP65.

Перетворювачі диференційного тиску ПД200 моделі 155 є надійним і точним рішенням для вимірювання перепаду тиску в різних промислових умовах. Вони забезпечують високий рівень точності та мають широкий діапазон вимірюваних значень, що робить їх ідеальними для застосування в енергетиці, газорозподільних системах, вентиляційних системах та інших промислових і комунальних об'єктах.

Таблиця 3.2 - Технічні характеристики датчика тиску ПД200-ДД.

Назва	Значення
Вихідний сигнал постійного струму	4...20 мА
Межі основної похибки вимірювання	±0,1 % ДИ
Напруга живлення	18...42 В
Опір навантаження	Не менше 250 Ом
Ступінь захисту корпусу	IP65
Середній час наробітку	500 000 год
Середній термін служби	12 років
Міжповірочний інтервал	2 роки
Вага без упаковки/в упаковці	3,5 кг / 5,0 кг
Діапазон робочих температур навколишнього повітря	-20 (-40*)...70 °С
Діапазон температур вимірювального середовища	-40...100 °С
Перевантажувальна здатність	13 МПа
Граничний тиск перевантаження	13 МПа



Рисунок 4.2 – Зовнішній вигляд датчика тиску ПД310.

#### **4.1.2 Вибір температурних сенсорів**

Сьогодні існує широкий асортимент датчиків температури, серед яких в промисловості широко використовуються термоперетворювачі та пірометричні термометри. Враховуючи специфіку процесів, що відбуваються в установці, вибір буде зроблений на користь термоперетворювачів, які мають захисні характеристики, що відповідають умовам технологічного процесу.

##### **Термоперетворювач ТХК-2788**

Цей датчик температури [8] призначений для вимірювання температури твердих тіл, рідких та газоподібних середовищ. Він відповідає всім необхідним вимогам для застосування у хімічній промисловості, забезпечуючи надійність та точність вимірювань в агресивних середовищах.

##### **Технічні характеристики ТХК-2788:**

- **Матеріали:** хромель-капель
- **Діапазон вимірювання температури:**  $-40 \div +200$  °С
- **Показник теплової інерції:** не більше 8 с
- **Тиск вимірюваного середовища:**  $0 \div 0,6$  МПа
- **Похибка:** не більше 0,5% на кожні 10 °С

Термоперетворювач ТХК-2788 має високу стійкість до корозії та здатність працювати в умовах високого тиску і температури, що робить його ідеальним вибором для нашого технологічного процесу.

##### **Зовнішній вигляд термоперетворювача ТХК-2788**

Зовнішній вигляд термоелектричного термоперетворювача ТХК-2788 зображено на рисунку 4.3 нижче

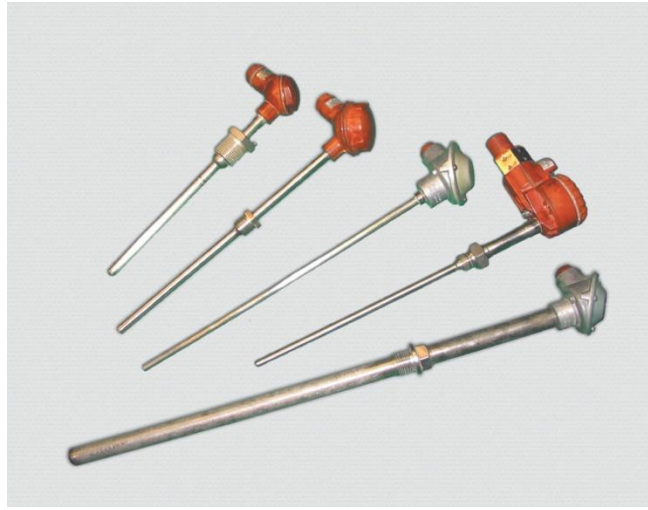


Рисунок 4.3 – Зовнішній вигляд датчика температури ТХК-2788

Окрім зазначених характеристик, важливо звернути увагу на простоту інтеграції цього датчика в існуючу систему автоматизації, що забезпечить безперебійну роботу та легкість в обслуговуванні. Термоперетворювач ТХК-2788 також має можливість підключення до сучасних систем моніторингу та управління, що підвищує ефективність контролю та регулювання технологічного процесу.

#### **Термоперетворювач ТСМ101**

Датчики температури цієї групи здатні безперервно вимірювати температуру середовищ будь-якого агрегатного стану: рідина, газ, тверді тіла тощо. Вони забезпечують високу точність і надійність вимірювань, що є критично важливим для стабільного функціонування технологічного процесу.

Технічні характеристики ТСМ101:

- Чутливий елемент: 100М
- Діапазон вимірювання температури:  $-40 \div +180$  °С
- Показник теплової інерції: не більше 15 с
- Тиск вимірюваного середовища: не більше 10 МПа
- Межа основної абсолютної похибки, °С:  $[0,15+0,002(t)]$

Термоперетворювач ТСМ101 відзначається здатністю працювати під високим тиском, що робить його ідеальним вибором для багатьох промислових застосувань.

Зовнішній вигляд термоперетворювача ТСМ101

Зовнішній вигляд датчика температури ТСМ101 зображено на рисунку 4.4 нижче:

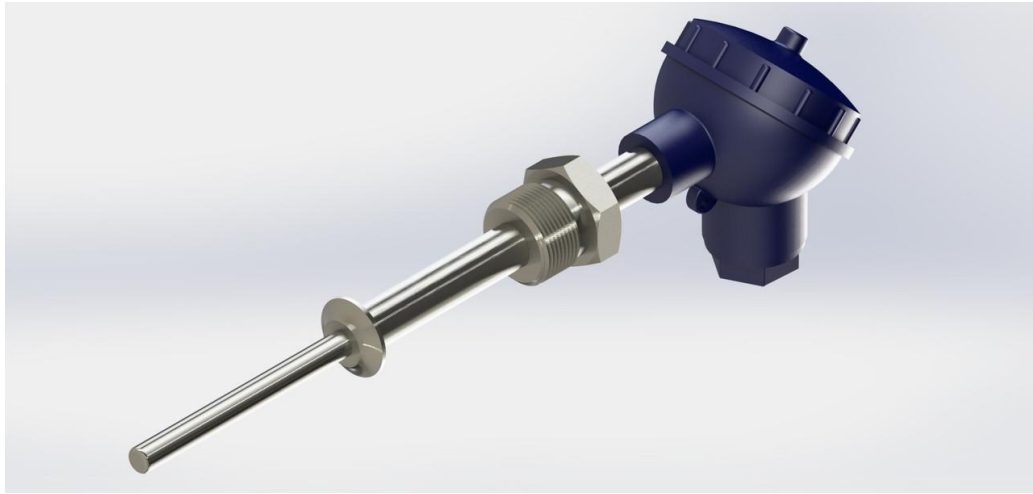


Рисунок 4.4 – Зовнішній вигляд датчика температури TSM101

Як видно з наведених характеристик, ТХК-2788 та TSM101 мають подібні параметри, забезпечують високу надійність і точність вимірювань. Проте, термоперетворювач TSM101 має суттєву перевагу в економічному плані, оскільки коштує майже вдвічі менше.

Враховуючи економічні аспекти проектування, доцільним вибором для використання в якості датчика температури є термоперетворювач TSM101. Це рішення дозволить не лише забезпечити надійність і точність вимірювань, але й знизити загальні витрати на реалізацію проекту, що є важливим фактором у сучасному виробничому середовищі.

До того ж, TSM101 відзначається простотою інтеграції в існуючі системи автоматизації та можливістю підключення до сучасних систем моніторингу і управління. Це сприяє ефективному контролю та регулюванню технологічного процесу, підвищуючи загальну продуктивність і безпеку виробництва.

#### **4.1.3. Вибір рівнемірів**

##### **Вибір датчика рівня**

Перед тим як перейти до вибору датчика рівня, коротко розглянемо класифікацію датчиків вимірювання рівня за принципом роботи:

- буйкові
- гідростатичні
- електромагнітні
- ємнісні
- звукові



- поплавкові

### **Датчик рівня Liquicap FMI51**

Цей датчик[9] є первинним перетворювачем ємнісного типу і призначений для безперервного вимірювання рівня різних рідин.

#### **Технічні характеристики Liquicap FMI51:**

- Діапазон вимірювання: від 0,1 до 4,0 м
- Температура вимірюваного середовища: -80 до +200 °С
- Похибка повторюваності: 0,1%
- Вихідні сигнали: струмовий 4-20 мА
- Робочий тиск: 0-1 МПа

Зовнішній вигляд рівнеміра Liquicap FMI51 зображено на рисунку 4.5 нижче:



Рисунок 4.5 – Зовнішній вигляд рівнеміра Liquicap FMI51

### **Датчик рівня ОВЕН ПДУ-И**

Це поплавковий рівнемір для рідких середовищ, який однаково ефективно працює як в звичайних резервуарах, так і в тих, що знаходяться під тиском. Датчик відноситься до категорії первинних перетворювачів, стійкий до агресивних середовищ і має захищене виконання.

#### **Технічні характеристики ОВЕН ПДУ-И:**

- Діапазон вимірювання: від 0,25 до 4,0 м
- Температура вимірюваного середовища: -60 до +125 °С
- Похибка повторюваності: 0,2%
- Вихідні сигнали: струмовий 4-20 мА
- Робочий тиск: 0-2 МПа
- Живлення: 12-36 В постійного струму

Зовнішній вигляд рівнеміра ОВЕН ПДУ-И [8] зображено на рисунку 4.6 нижче:



Рисунок 4.6 – Зовнішній вигляд рівнеміра ОВЕН ПДУ-И

При порівнянні датчиків рівня Liquisap FM151 та ОВЕН ПДУ-И можна побачити, що вони мають подібні сфери застосування та технічні характеристики. Обидва датчики забезпечують точність і надійність вимірювань, підходять для використання в агресивних середовищах і можуть працювати в умовах високого тиску.

Проте, економічні аспекти відіграють важливу роль при виборі обладнання. Вітчизняне виробництво та більш доступна ціна датчика ОВЕН ПДУ-И надають йому перевагу.

#### **4.2 Вибір клапанів та виконавчих механізмів**

Виконавчий механізм приводить у дію регулюючий орган, змінюючи його положення або стан. Це, в свою чергу, впливає на об'єкт управління, змінюючи значення відповідної фізичної величини.

Для нашої системи управління ми оберемо регулюючі органи та виконавчі механізми, що розташовані в окремих корпусах. Мова йде про сідельний клапан H6200W630-S7 з електроприводом Belimo GV12-230-3-T [10].

#### **Технічні характеристики Belimo GV12-230-3-T:**

- Температура вимірюваного середовища:  $-10 \div +120$  °C
- Керування: трьохточкове
- Допустимий перепад тиску: 400 кПа
- Живлення: 240 В змінного струму

Зовнішній вигляд електроприводу Belimo GV12-230-3-T зображено на рисунку 4.7  
нижче:

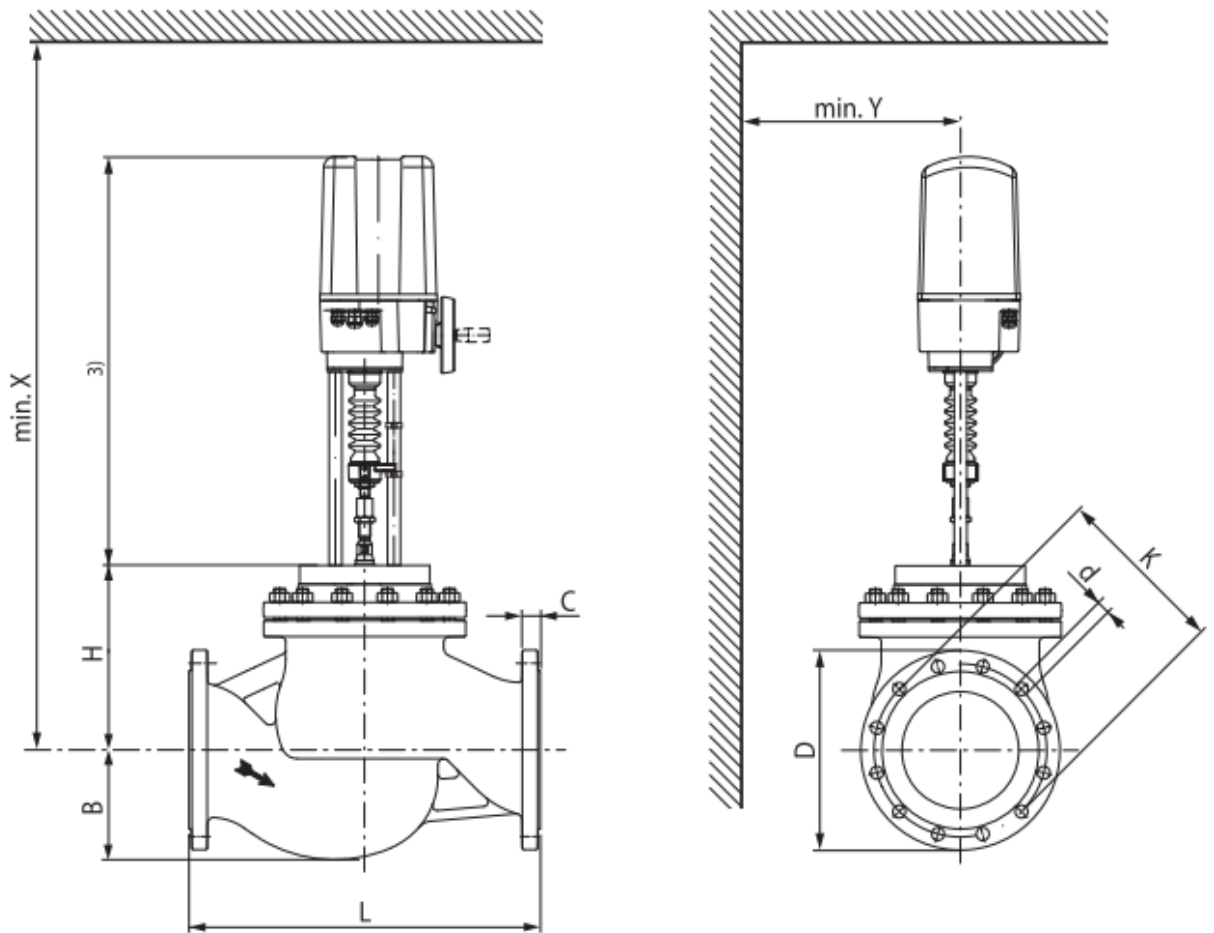


Рисунок 4.7 – Зовнішній вигляд сідельного клапану H6200W630-S7 з електроприводом Belimo GV12-230-3-T

### 4.3 Вибір контролера

Після детального вивчення процесів, що відбуваються в установці ми дійшли висновку, що процес має кілька складних і відповідальних ділянок, де важливі точність, надійність та безпомилковість роботи. Не менш важливо враховувати можливість масштабування та модернізації системи управління.

Беручи до уваги ці вимоги, вибір припав на програмований логічний контролер (ПЛК). Компанія ОВЕН є одним з найбільших вітчизняних виробників засобів автоматизації для промисловості, тому обиратимемо серед ПЛК цієї компанії.

### Вимоги до входів/виходів ПЛК

Спираючись на функціональну схему автоматизації та специфікацію технічних засобів автоматизації, висунемо вимоги до входів/виходів ПЛК. Контролер має забезпечувати:

- Необхідну кількість цифрових та аналогових входів для підключення датчиків температури, рівня та інших вимірювальних пристроїв.
- Необхідну кількість цифрових та аналогових виходів для керування виконавчими механізмами, такими як електроприводи та клапани.
- Високу швидкодію для забезпечення точного та своєчасного виконання команд.
- Можливість підключення до мережі для інтеграції в загальну систему автоматизації підприємства.
- Простоту в налаштуванні та обслуговуванні, щоб забезпечити ефективне управління та можливість оперативного втручання при необхідності.

З урахуванням усіх цих факторів, обраний ПЛК забезпечить надійне та ефективне управління процесів, що відбуваються в установці, сприяючи підвищенню продуктивності та безпеки виробництва. Вимоги до входів/виходів контролера зведені в таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 - Вимоги до входів/виходів контролера.

Види сигналів	Кількість сигналів
Вхідні аналогові сигнали	10
Вхідні дискретні сигнали	8
Вихідні аналогові сигнали	0
Вихідні дискретні сигнали	28

#### **4.3.1 Контролер для систем управління Овен ПЛК200-01-CS**

Програмований логічний контролер Овен ПЛК200-01-CS [11] призначений для малих та середніх систем автоматизації. Його зовнішній вигляд зображено на рисунку 4.8 нижче:



Рисунок 4.8 – Зовнішній вигляд програмованого логічного контролера Овен ПЛК200-01-CS

Цей ПЛК має моноблокове виконання з вбудованими модулями дискретних та аналогових входів/виходів, що забезпечує компактність і зручність у використанні.

Технічні характеристики:

- Пам'ять: ROM 512 Мбайт (NAND), RAM 256 Мбайт (DDR3), RETAIN 64 Кбайт (MRAM)
- Корпус: Ергономічний дизайн з можливістю кріплення на DIN-рейку
- Клемники: Знімні, з невідпадаючими гвинтами для полегшення монтажу та обслуговування
- Комунікації: Ethernet для швидкого опитування ПЛК та різних варіантів топології мережі
- Підтримка протоколів: Modbus RTU / ASCII / TCP, OPC UA (Server), MQTT, NTP
- Хмарні технології: Підтримка OwenCloud

Детальні технічні характеристики Овен ПЛК200-01-CS можна знайти на офіційному сайті компанії ОВЕН.

#### 4.3.2 Додаткові модулі розширення контролера

Базова комплектація контролера Овен ПЛК200-01-CS не повністю відповідає всім вимогам нашої системи, що зазначені в таблиці 2. Тому разом з контролером необхідно замовити додаткові модулі розширення:

- Модуль вводу аналогових сигналів з Ethernet MB210-101 – 2 шт.
- Модуль виводу аналогових сигналів з Ethernet MU210-402 – 1 шт.

Вибір програмованого логічного контролера Овен ПЛК200-01-CS разом з додатковими модулями розширення забезпечить високу точність і надійність управління установкою. Цей ПЛК відповідає всім вимогам сучасної автоматизації, забезпечуючи легкість інтеграції, гнучкість та можливість подальшого масштабування системи. Використання хмарних технологій та підтримка широкого спектру протоколів дозволяють легко адаптувати систему до змінних умов та вимог виробництва.

## 5 РОЗРАХУНКОВА ЧАСТИНА

Початковий етап включає збір даних щодо процесу, таких як температурні показники, характеристики реакцій та параметри обладнання. Після збору даних необхідно провести їх аналіз для виявлення залежностей між різними змінними та визначення факторів, які впливають на температурні режими та хімічні реакції у установці.

На основі аналізу даних вибирається математична модель, яка найкраще відображає зв'язки між вхідними та вихідними змінними. Вибір моделі може бути лінійним або нелінійним, статичним або динамічним, залежно від складності процесу. Після вибору моделі проводиться ідентифікація її параметрів, що включає визначення коефіцієнтів, які враховують вплив різних факторів на процес.

Після побудови математичної моделі здійснюється її перевірка на експериментальних даних. Якщо модель не точно відтворює поведінку реального процесу, можливе внесення коректив та налаштування параметрів.

### Розробка та впровадження контролера

На основі математичної моделі розробляється контролер, який відповідає за регулювання температури та інших ключових параметрів процесу. Після реалізації контролера проводиться тестування його роботи на реальному об'єкті, а також можуть бути внесені додаткові налаштування для оптимізації його роботи.

### Підтримка стабільного температурного режиму

Одним з найважливіших аспектів автоматизації виробництва є підтримка стабільного температурного режиму. Гази подаються на охолоджувач, які підтримують необхідну температуру вздовж виробничого процесу. Температура газів, яка охолоджує суміш, з урахуванням розподілу тепла, повинна бути в межах  $-30^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  [1]. Це забезпечить оптимальні умови для протікання реакцій та збереження якості кінцевого продукту.

Зважаючи на температуру охолодження компонентів у процесі, маємо такі дані:

- **Температура кислороду :**  $*-30^{\circ}\text{C}$
- **Температура азоту:**  $-29^{\circ}\text{C}$

Ці дані будуть використані для налаштування контролера та підтримання оптимальних умов у виробничому процесі.

Процес автоматизації включає в себе кілька важливих етапів: збір та аналіз даних, вибір та ідентифікація математичної моделі, розробка та впровадження контролера, а також підтримка стабільного температурного режиму. Використання сучасних

технологій та методів автоматизації забезпечить ефективність, надійність та високу якість роботи установки.

Максимальна температура:  $T_{max} = -28^{\circ}\text{C}$

Мінімальна температура:  $T_{min} = -32^{\circ}\text{C}$

Період адаптації:  $t_p = 145$  сек

Зайве коригування: = 10%

### 5.1 Математична модель об'єкта управління.

Після введення одиничного ступінчастого сигналу ми спостерігаємо типовий графік зміни процесу, який можна охарактеризувати як криву розгону [4]. Ця крива (рис. 5.1) відображає перехідний процес, коли система прагне досягти стану рівноваги після зміни вхідного сигналу.

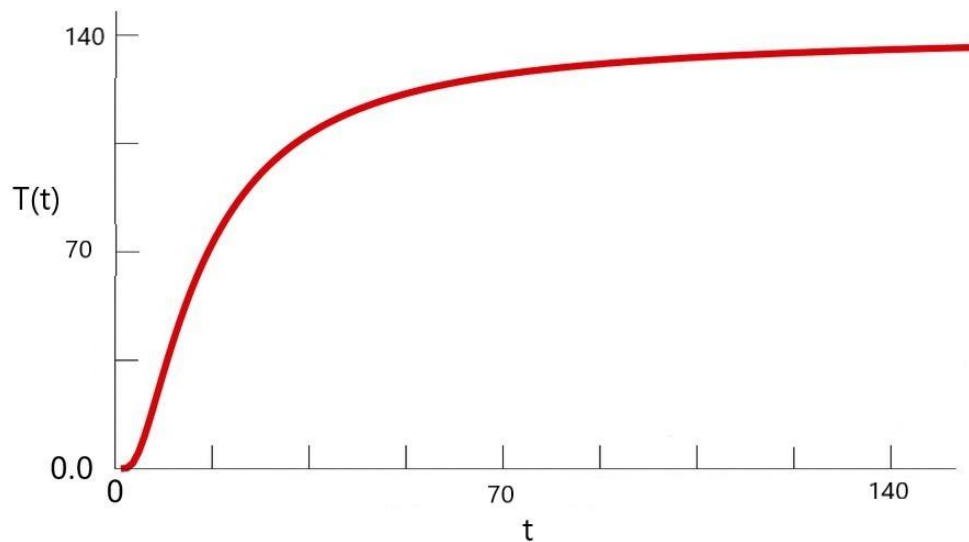


Рисунок 5.1 - Графік розгону процесу керування.

Спершу нормалізуємо всі значення вихідної змінної до вихідного значення ( $T_{уст} = -30$ ). Нормалізований графік розгону наведено на Рисунку 5.2.

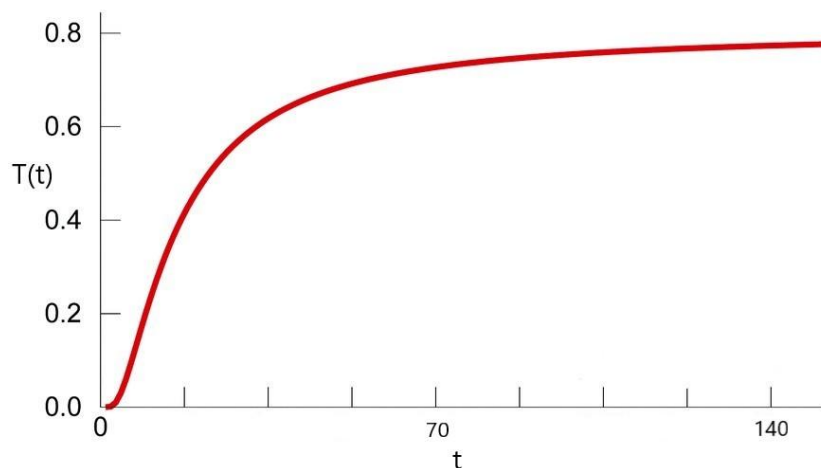




Рисунок 5.2 - Графік зміни параметрів у нормованому вигляді.

Для спрощення розрахунків крива розгону піддається нормалізації, що означає приведення значень вихідної змінної до діапазону від 0 до 1, який відповідає одиничному вхідному впливу. Для визначення передавальної функції використовується метод Ормансу. Цей метод дозволяє на основі нормованої кривої розгону визначити два домінуючі параметри об'єкта управління за моделлю, що подається у вигляді:

$$W(p) = \frac{Ke^{-\tau p}}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)}$$

Отримання передавальної функції об'єкта управління виконується наступним чином: з нормованої кривої розгону визначаємо момент часу, коли значення досягає  $h_N = 0.6h$ , і позначаємо його як  $t_7$ . З графіка цей момент часу становить 37,09 секунд. Отриманий інтервал часу розділяється на три рівні частини. Перпендикуляр, побудований до кривої розгону в точці  $t_7$ , допомагає визначити величину  $h_{N4}$ . Згідно з нашим графіком,  $h_{N4} = 0.03$ . Всі необхідні побудови показані на Рисунку 5.3

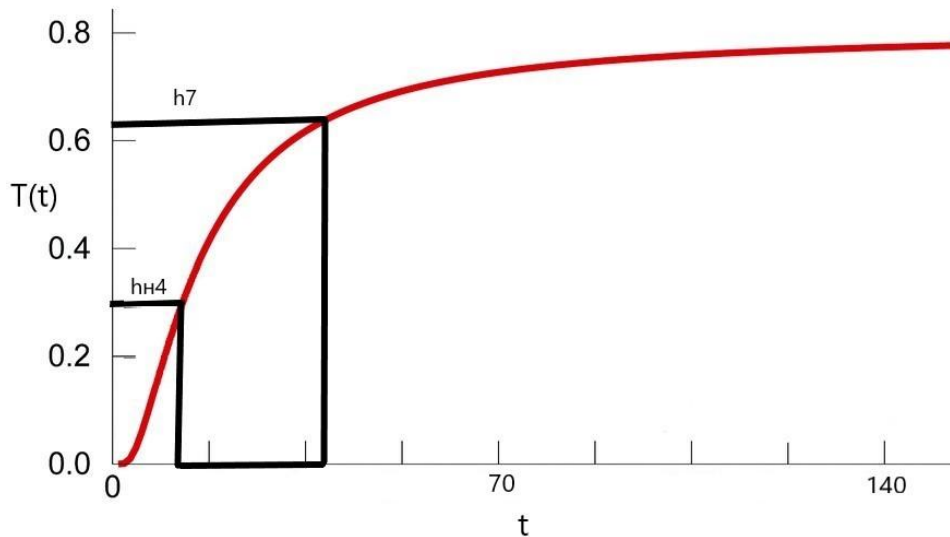


Рисунок 5.3 - Графік розгону з необхідними конструкціями.

Встановлено аналітичний зв'язок між точками розгону процесу та характеристиками моделі, зокрема  $t_7 = 1.3(T_1 + T_2)$ . Постійні часу об'єкта управління  $T_1$  і  $T_2$  визначаються за допомогою допоміжної величини  $Z_2$ .

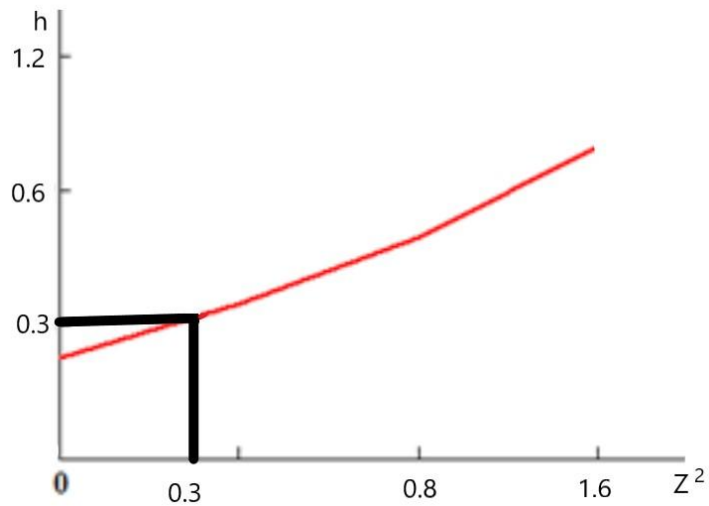


Рисунок 5.4 - Номограмма для розрахунку значення  $Z_2$ .

Підставимо значення температур та періоду адаптації у вирази для обчислення  $T_1$  та  $T_2$ :

$$T_1 = \frac{t_7}{2.4}(1+z) \quad T_2 = \frac{t_7}{2.4}(1-z)$$

$$T_1 = (36.68 * (1 + 0.436)) / 2.4 \approx 22.19 \text{ с}$$

$$T_2 = (36.68 * (1 - 0.436)) / 2.4 \approx 8.70 \text{ с}$$

Якщо врахувати запізнення в 4 секунди, отримаємо передаточну функцію:

$$W(p) = (22.19p + 1) * (8.70p + 1) * 150 * e^{(-4p)}$$

Проведемо порівняльний аналіз перехідних характеристик отриманої передавальної функції об'єкта управління та вихідної кривої розгону. На цьому графіку експериментальна крива розгону позначена як  $T(t)$ , тоді як аналітично отримана перехідна характеристика позначена як  $h(t)$ .

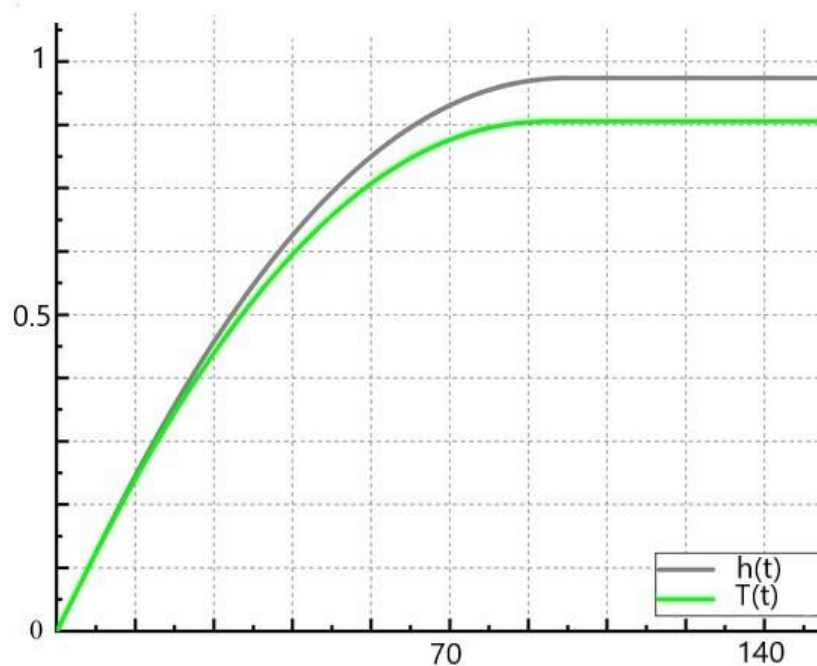


Рисунок 5.5 – Перехідні характеристики

Оцінимо збіжність перехідних характеристик, отриманих аналітично та експериментально, за методом Фішера. Для цього розділимо весь часовий інтервал на 10 сегментів і визначимо  $Y_{\text{ex}}$  і  $Y_{\text{mod}}$ . Потім ці обчислені значення заносимо до таблиці для зручності аналізу.

Таблиця 10 – Зведені обчислені дані

$Y_{\text{ex}}$	0.35	0.7	0.77	0.85	0.91	0.95	0.97	0.979	0.986	1
$Y_{\text{mod}}$	0.36	0.42	0.58	0.64	0.75	0.83	0.88	0.94	0.98	1
N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Використовуємо наступну формулу для визначення оцінки дисперсії.

$$S = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{10} (Y_i - Y^{-2})$$

Обчислюємо у програмному забезпеченні МатКад, що є математичним пакетом, спеціально розробленим для виконання різноманітних математичних обчислень та аналізу даних при  $n = 10$

Y1 = 0.35	Yn1 = 0.36
Y2 = 0.7	Yn2 = 0.42
Y3 = 0.77	Yn3 = 0.58
Y4 = 0.85	Yn4 = 0.64
Y5 = 0.91	Yn5 = 0.75
Y6 = 0.95	Yn6 = 0.83
Y7 = 0.97	Yn7 = 0.88
Y8 = 0.979	Yn8 = 0.94
Y9 = 0.986	Yn9 = 0.98
Y10 = 1	Yn10 = 1

$$s_1 := \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{10} (Y_i - Y_{cp})^2 = 0.046 \quad s_2 := \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{10} (Y_i - Y_{cp})^2 = 0.044$$

Використовуємо цю формулу для обчислення критерію.

$$K = \frac{S_{max}}{S_{min}}$$

$$K = \frac{0.046}{0.044} = 1.045$$

Ми використовуємо таблицю Фішера [13] для визначення значення критерію при ступенях свободи  $f_1=10$  та  $f_2=10$ . Отримане значення критерію становить 2.76. Порівнюючи це значення з отриманим критерієм, який дорівнює 1.045, ми бачимо, що воно менше за значення критерію Фішера. Це свідчить про те, що наша модель є адекватною згідно з обраним критерієм. Такий висновок зроблено на основі порівняння двох критеріїв і підтверджує адекватність моделі стосовно наших умов.

## 5.2 Вибір та розрахунок параметрів регулятора

Ми проводимо вибір і розрахунок значень параметрів для регулятора з урахуванням різноманітних аспектів, таких як характеристики системи, вимоги до точності керування, стійкість системи, а також можливість адаптації до змінних умов. Цей процес включає аналіз і вибір типу регулятора, а також налаштування його параметрів для досягнення оптимальної ефективності та стабільності в різних умовах експлуатації.

Для ролі регулятора, який буде використовуватися в системі САУ, розглядаються три варіанти: пропорційний (П), пропорційно-інтегральний (ПІ) і пропорційно-інтегрально-диференціальний (ПІД) регулятори.

Технологічний процес розподілу оцтової кислоти та бензолу представляє собою складну систему з великою кількістю потенційних помилок та нестабільностей. У цьому контексті регулятори типу ПД контролюють процес більш чутливо та реагують на різноманітні впливи з більшою відзивчивістю, що може призвести до надмірної реакції навіть на найменші зміни. Крім того, їх впровадження та налаштування вимагає значних зусиль і складнощів у порівнянні з простішими П та ІІ регуляторами. У зв'язку з цим, було прийнято рішення відмовитися від використання регуляторів ПД і зосередитися на простіших та менш чутливих альтернативах.

### 5.2.1 Розрахунок параметрів налаштування П регулятора

Пропорційний закон регулювання встановлює взаємозв'язок між сигналом на виході регулятора та відхиленням від заданого значення. Це означає, що вихідний сигнал регулятора змінюється пропорційно рівню відхилення. Використання пропорційного закону регулювання дозволяє ефективно реагувати на зміни в системі, але може виникнути проблема перевищення, коли реакція системи є надто рішучою, що може призвести до нестабільності або коливань.

Проведення розрахунків та налаштувань П регулятора забезпечить стабільну роботу системи, враховуючи всі фактори та можливі зміни в процесі.

$$W(p) = \frac{R_{OC}}{R_{BX}} = K$$

$K$  – настроювальний параметр - коефіцієнт пропорційності регулятора

Для розрахунку П регулятора використовується метод Ротача. Цей метод дозволяє визначити оптимальні параметри регулятора, враховуючи показник коливальності. Таким чином, замкнена система керування буде мати запас стійкості, який не опуститься нижче заданого рівня коливальності:

$$M \leq M_3$$

Цей підхід забезпечує ефективну роботу системи та її стабільність у різних умовах експлуатації. Загалом, вважається, що ефективність системи автоматичного управління (САУ) визначається її здатністю підтримувати необхідний рівень стійкості. Одним з ключових показників цієї стійкості є показник коливальності.

$$M = 1.3 \dots 2.3$$

Якщо цей показник знаходиться в певному діапазоні, це свідчить про те, що САУ має достатній запас стійкості для ефективного функціонування в різних умовах. Це відображає взаємозв'язок з рівнем згасання.

$$\psi = 0.95 \dots 0.75$$

Враховуючи наведене вище пояснення, ми вирішили встановити показник коливальності на рівні  $M = 1.55$ . Передавальна функція об'єкта управління з використанням П регулятора буде представлена у вигляді частотної передавальної функції:

$$W_{об}(\omega) = \frac{1}{3.97 \cdot 10^4 \cdot (j \cdot \omega)^2 + 761 \cdot j \cdot \omega + 1}$$

Застосуємо програмний математичний пакет Mathcad для створення графіків, що відображають амплітудно-фазово-частотні характеристики (АФЧХ) розімкненої системи:

$$W(\omega) = W_n(\omega) \cdot W_{об}(\omega)$$

Ці графіки покажуть те, як система реагує на сигнали різних частот, а також про зміщення фази у відповідь на ці частоти.

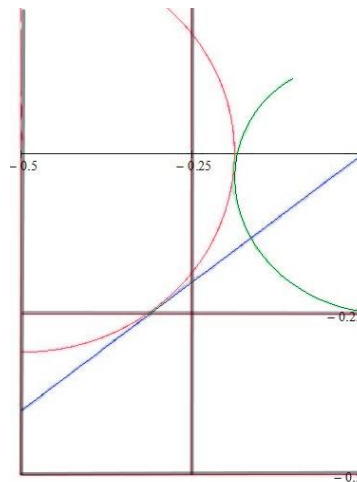


Рисунок 5.6 - Амплітудно-фазова характеристика (АФХ) відкритої системи керування та заборонена область.

де –

синій –  $Y(X, 1.6)$

зелений –  $Vp(\omega)$

червоний – I(ω 1,Ms)

При побудові амплітудно-частотної характеристики (АЧХ) ми визначаємо такий коефіцієнт підсилення, при якому ця характеристика торкається окружності, що відповідає заданому рівню коливальності. Такий підхід дозволяє точно описати вплив коефіцієнта підсилення на стійкість системи та її динаміку.

$$k_p = \frac{M}{M^2 - 1} \cdot \frac{1}{r_{окр}}$$

r – радіус забороненої області

Після розрахунку отримаємо  $K_p = 28.013$

Після налаштування оптимальних параметрів регулятора ми зможемо побудувати графік перехідної характеристики замкненої системи. Цей графік (рис. 5.7) дозволить візуально оцінити реакцію системи на зміни та швидкість досягнення стабільного стану після зміни вхідних параметрів.

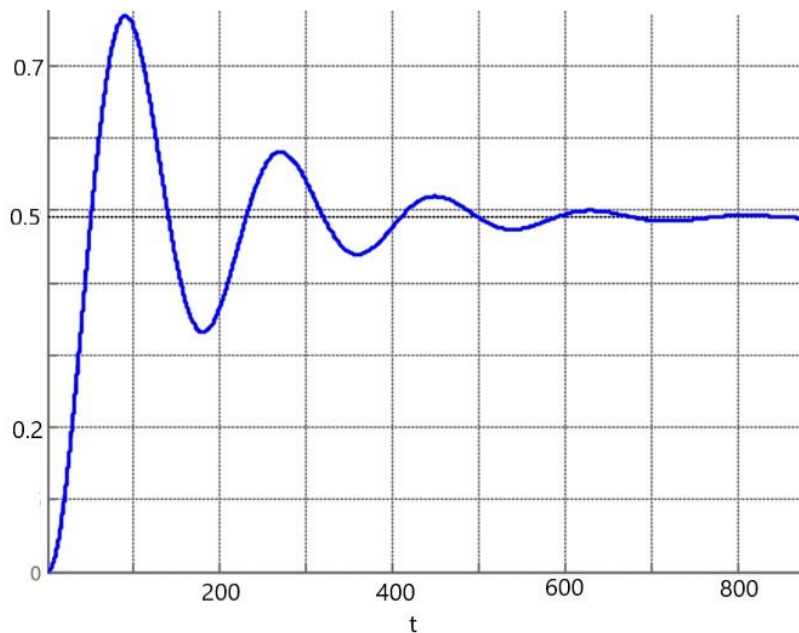


Рисунок 5.7 - При значенні  $K_p = 27.2$  вигляд перехідної характеристики замкненої системи керування.

### 5.2.2 Розрахунок параметрів ПІ регулятора

Передаточна функція ПІ регулятора представлена таким чином

$$W_p(p) = k_p \cdot \left( 1 + \frac{1}{T_u p} \right)$$

$W_p(p)$  – передавальна функція регулятора

$K_p$  – коефіцієнт передачі регулятора

$T_i$  – час інтегрування

$p$  – комплексна частота

Перепишемо. Вигляд передавальної функції в ПІ-регуляторі у частотній області такий:

$$W_p(\omega) = k_p + \frac{1}{T_u \cdot j \cdot \omega}$$

Будемо створювати сімейство передаточних функцій розімкненої системи для різних значень часу нахилу ізодроми, використовуючи програмний математичний пакет МатКад (рис. 5.8)

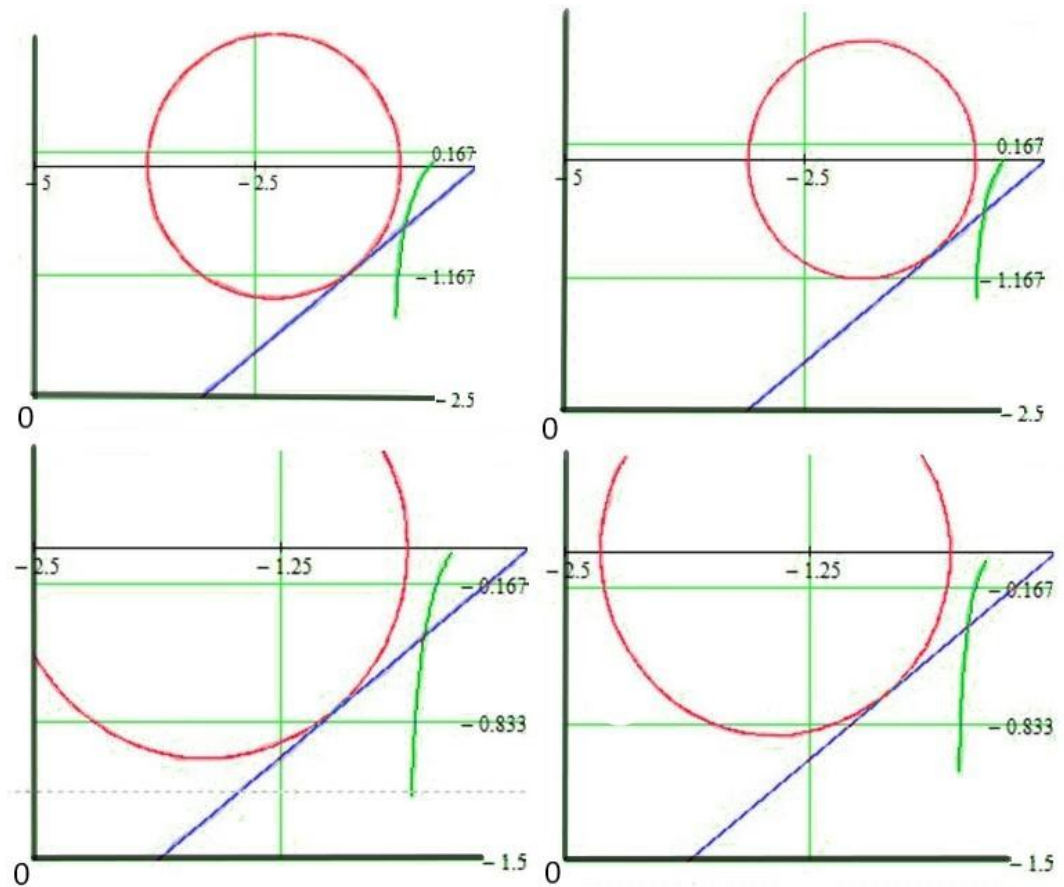


Рисунок 5.8 – Набір частотних характеристик відкритої системи

де –

синій –  $Y(X, 1.6)$



зелений –  $V_p(\omega)$

червоний –  $I(\omega, Ms)$

Розглянемо процес масштабування та визначимо такі значення коефіцієнта підсилення  $K_p$ , при яких характеристики будуть максимально наближені до контуру, враховуючи заданий рівень коливальності.

Для визначення значення коефіцієнта підсилення для ПІ регулятора необхідно провести детальний аналіз для кожного варіанту часу інтегрування  $T_i$ . Цей аналіз включає ітеративний процес, під час якого ми експериментуємо з різними значеннями  $K_p$  для кожного  $T_i$ , щоб досягти оптимального компромісу між швидкістю реакції та стійкістю системи..

$$2 = 0.132$$

$$4 = 0.341$$

$$6 = 0.484$$

$$8 = 0.618$$

$$10 = 0.722$$

$$12 = 0.876$$

$$14 = 1.068$$

$$16 = 1.183$$

$$18 = 0$$

$$20 = 0$$

Відтворимо графічну діаграму (рис. 5.9), яка відобразить отримані результати та відносні зв'язки між ними. Цей процес включає аналіз і інтерпретацію даних для побудови відповідного візуального зображення, що демонструватиме взаємозв'язки між змінними та їх вплив на досліджувану систему.

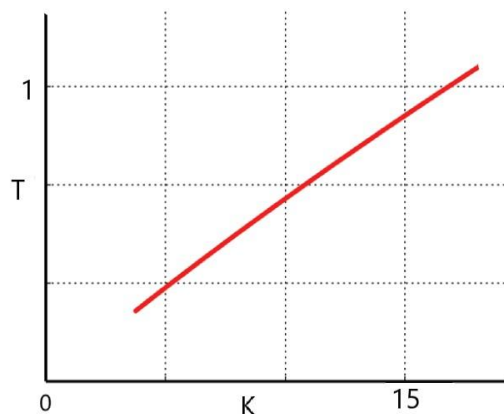


Рисунок 5.9 – Границя діапазону значень, що визначає задану коливальність.

На наступному етапі, використовуючи знайдені пари значень, ми розробляємо графіки перехідних характеристик для замкнутої системи. Цей процес включає не тільки побудову графіків, але й детальний аналіз їхньої форми, швидкості збігу та стійкості системи при кожному наборі параметрів. Завдяки цьому аналізу ми можемо визначити оптимальну комбінацію налаштувань, яка забезпечить найкращі показники якості роботи системи відповідно до наших вимог (рис. 5.10).

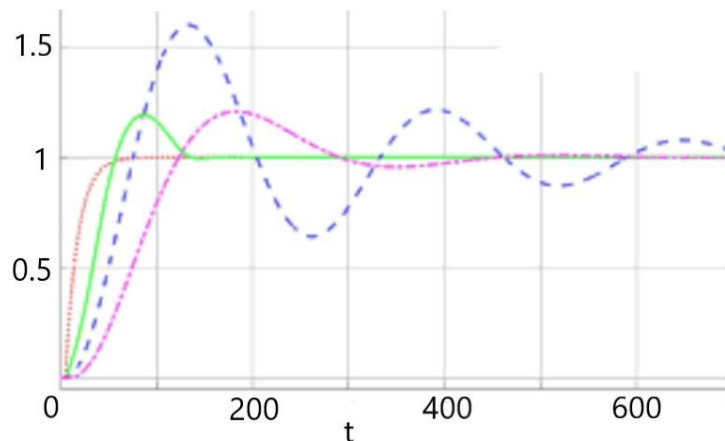


Рисунок 5.10 – Перехідні відгуки САУ при фіксованій величині коливальності та різних значеннях часу іздрома.

Пара налаштувань регулятора  $K_p = 7.32$  та  $T_i = 44$  с забезпечила найкращі показники якості. Нижче наведено графік (рис. 5.11) відповідної перехідної характеристики замкнутої системи.:

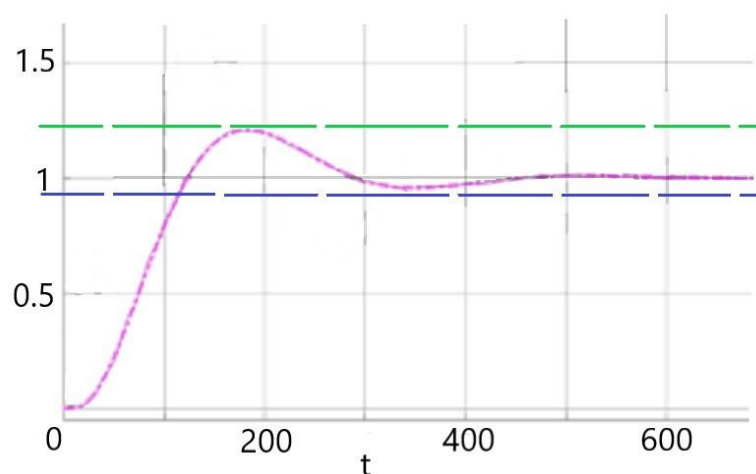


Рисунок 5.11 – Оптимальні характеристики.

Прямі показники якості, згідно з отриманим графіком, такі:

Перерегулювання - 4%;

Час перехідного процесу - 143 секунд.

Порівняльний аналіз результатів експериментів показує, що П-регулятор є недостатньо ефективним для вирішення поставленої задачі через його виражену коливальність та значне перерегулювання. Ці характеристики роблять його непридатним для досягнення бажаної стабільності та точності в роботі системи. На відміну від П-регулятора, ПІ-регулятор виявляється більш привабливим варіантом, оскільки він забезпечує аперіодичний перехідний процес та мінімальне перерегулювання. Такий вибір зумовлений прагненням забезпечити оптимальне керування температурою в нагрівачі з мінімальними відхиленнями від заданих значень..

## 6 АЛГОРИТМ РОБОТИ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ

Розроблено автоматизовану систему управління технологічним процесом (АСУТП) установки розділення повітря.

Автоматизована система управління технологічним процесом (АСУТП) є комплексом технічних і програмних засобів, призначених для автоматизації та оптимізації управління технологічними процесами в різних галузях промисловості. Основна мета АСУТП - підвищення ефективності, безпеки та якості виробничих процесів за рахунок автоматичного контролю та регулювання параметрів, зменшення людського фактору та забезпечення стабільної роботи обладнання.

АСУТП для установки розділення повітря призначена для забезпечення стабільної роботи процесу розділення повітря на його складові компоненти (кисень, азот, аргон тощо) з використанням дроселювання і попереднього охолодження. Система включає наступні основні компоненти:

- Контролери та сенсори
- Виконавчі механізми (клапани, дроселі, насоси)
- Інтерфейс оператора (SCADA-система)
- Системи аварійного захисту

Основні функції АСУТП:

1. Моніторинг параметрів процесу
  - Вимірювання температури, тиску, витрати повітря та інших критичних параметрів.
  - Збирання та аналіз даних з сенсорів у реальному часі.
2. Регулювання технологічних параметрів
  - Автоматичне регулювання температури та тиску за допомогою ПД-регуляторів.
  - Управління дроселями та клапанами для підтримання стабільних умов процесу.
3. Аварійний захист та сигналізація
  - Виявлення та реагування на аварійні ситуації (перевищення допустимих значень параметрів, відмова обладнання).
  - Автоматичне увімкнення аварійних режимів та сигналізація оператору.
4. Інтерфейс оператора
  - Надання оператору інформації про поточний стан системи.
  - Можливість ручного управління та налаштування параметрів процесу.

- Збереження історії даних для аналізу та оптимізації.

## 5. Графічна схема АСУТП

Для повної розробки АСУТП необхідно створити графічну схему, яка показує взаємодію всіх компонентів системи. Вона включатиме:

- Всі сенсори та їх підключення до контролерів.
- Виконавчі механізми та їх підключення до контролерів.
- Інтерфейс оператора з відображенням основних параметрів процесу.

В якості SCADA системи було обрано CoDeSys (Controller Development System) - це програмне забезпечення для розробки і реалізації програмованих логічних контролерів (PLC) та систем управління. Це інтегроване середовище для програмування, яке підтримує всі п'ять мов програмування за стандартом IEC 61131-3 (модульний конструктор, мова функціональних блоків, мова контактних планів, структурований текст, інструкційний список). Ця система постачається безкоштовно разом з контроллерами ОВЕН, тому і було прийняте рішення використати саме її при розробці нашої системи.

CoDeSys (або CODESYS) - це платформа для розробки програмного забезпечення, яка включає в себе середовище розробки, інструменти для діагностики та налагодження, а також широкий спектр бібліотек та компонентів для побудови АСУТП. Ця система дозволяє створювати повністю функціональні SCADA-додатки, що інтегруються з PLC для управління технологічними процесами.

CoDeSys має великий спектр переваг:

1. Підтримка стандарту IEC 61131-3. CoDeSys підтримує всі мови програмування за стандартом IEC 61131-3, що робить його гнучким і універсальним для різних типів завдань.
2. Інтегроване середовище розробки. Усі інструменти для розробки, налагодження та діагностики зібрані в одному місці, що спрощує процес створення програм.
3. Масштабованість. CoDeSys підходить як для малих, так і для великих проектів, дозволяючи легко розширювати і модернізувати систему в майбутньому.
4. Міжплатформність. Підтримує різні операційні системи (Windows, Linux) та різні апаратні платформи, що забезпечує гнучкість в розробці та експлуатації.
5. Багатий набір бібліотек. Наявність великої кількості готових бібліотек та компонентів дозволяє швидко створювати додатки для різних галузей промисловості.

6. Інтуїтивний інтерфейс. Зручний і зрозумілий інтерфейс користувача полегшує процес розробки, навіть для користувачів з обмеженим досвідом програмування.
7. Підтримка мережевих протоколів. CoDeSys підтримує різні промислові мережеві протоколи, такі як Modbus, CANopen, Ethernet/IP, що дозволяє інтегрувати систему з іншими пристроями і системами.

CoDeSys є потужним і гнучким інструментом для створення АСУТП, який забезпечує широкий спектр можливостей для розробки, налагодження та експлуатації систем управління. Незважаючи на деякі недоліки, такі як складність освоєння для початківців та вартість ліцензії, його переваги роблять його привабливим вибором для багатьох промислових застосувань.

CoDeSys містить вбудований модуль для розробки візуалізації мнемосхем автоматизованого робочого місця оператора, який дозволяє створювати інтуїтивні та інтерактивні інтерфейси для моніторингу та управління технологічними процесами. Цей модуль забезпечує графічний редактор, де можна легко розміщувати елементи управління, такі як кнопки, індикатори, графіки та діаграми, що представляють стан різних частин процесу. Мнемосхема до розробляємої системи зображена на рисунку 6.1:

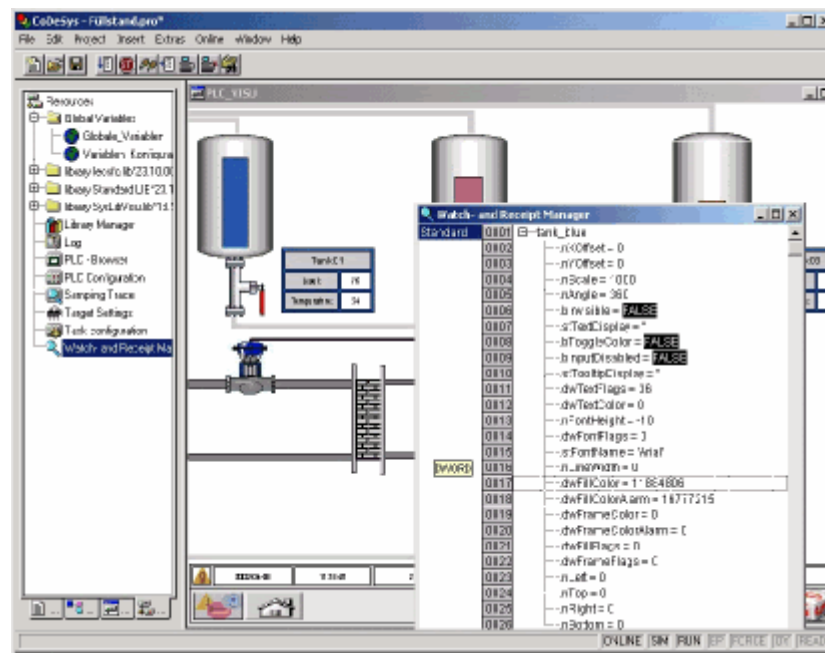


Рисунок 6.1 – Мнемосхема установки розділення повітря.

Також було розроблено алгоритм роботи системи керування установкою розділення повітря, який в загальному вигляді має наступні етапи:

1. Ініціалізація системи
  - Запуск установки та перевірка початкового стану всіх компонентів.

- Перевірка наявності необхідних ресурсів (електроенергія, охолоджувач тощо).
  - Ініціалізація контролерів та сенсорів.
2. Запуск попереднього охолодження
- Увімкнення системи попереднього охолодження.
  - Встановлення необхідної температури охолодження.
  - Перевірка досягнення заданої температури.
3. Подача повітря до установки
- Відкриття клапанів для подачі повітря в установку.
  - Регулювання потоку повітря за допомогою дроселів.
  - Контроль температури та тиску повітря на вході.
4. Процес розділення повітря
- Перевірка та підтримання необхідних параметрів (температура, тиск) у процесі розділення.
  - Моніторинг роботи теплообмінників, колон розділення та інших основних компонентів.
  - Регулювання параметрів процесу на основі даних від сенсорів.
5. Контроль та регулювання процесу
- Відстеження параметрів процесу в реальному часі.
  - Використання ПІД-регуляторів для автоматичного регулювання параметрів.
  - Внесення коригувань у випадку відхилень від заданих значень.
6. Відведення продуктів розділення
- Контроль відведення продуктів розділення (кисень, азот, аргон тощо).
  - Перевірка якості отримуваних продуктів.
  - Регулювання процесу відведення для забезпечення стабільного виходу.
7. Аварійна сигналізація та захист
- Моніторинг стану установки на предмет аварійних ситуацій.
  - Увімкнення аварійної сигналізації у випадку виявлення відхилень від норми.
  - Виконання заходів захисту та зупинка установки у випадку серйозних аварій.
8. Зупинка установки
- Плавне зниження параметрів процесу до безпечних значень.

- Закриття клапанів та вимкнення системи охолодження.
  - Перевірка стану компонентів після зупинки.
9. Запис та аналіз даних
- Збереження даних про роботу установки для подальшого аналізу.
  - Аналіз продуктивності та ефективності роботи системи.
  - Внесення рекомендацій щодо покращення процесу на основі отриманих даних.

Зовнішній вигляд загального алгоритму роботи системи наведено на рис. 6.2



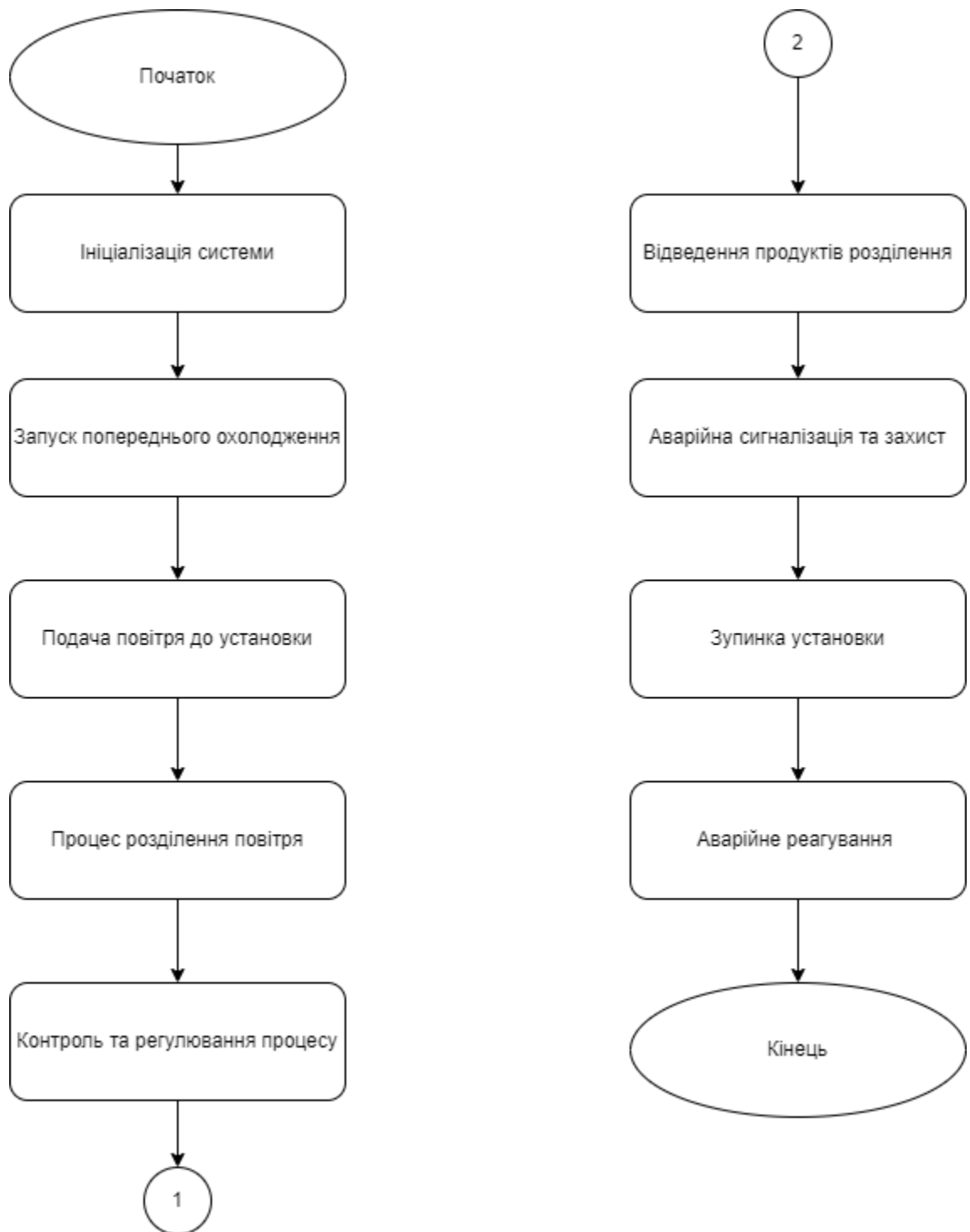


Рисунок 6.2 – Загальний алгоритм роботи системи.

## ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній бакалаврській роботі було розглянуто і детально проаналізовано систему управління установки розділення повітря з дроселюванням і попереднім охолодженням. Детально розглянуто основні компоненти та технологічні процеси, що відбуваються в установці. Визначено ключові параметри, які впливають на ефективність та стабільність роботи системи. Вибрані параметри забезпечують максимальну продуктивність та ефективність установки при мінімальних енергетичних витратах. Проведено аналіз впливу різних параметрів на якість розділення повітря.

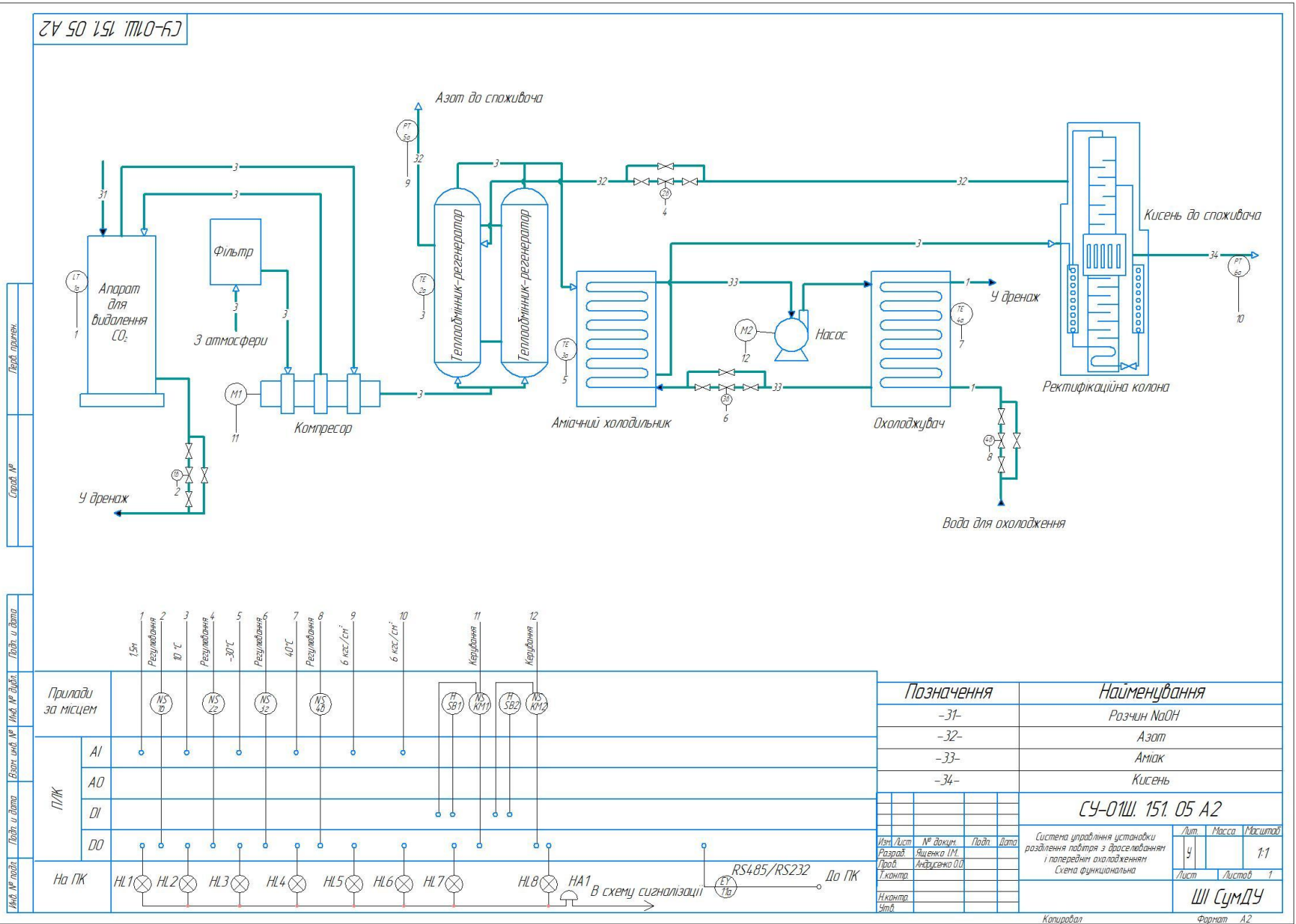
Обрано критичні параметри, контроль яких є необхідним для забезпечення стабільної та безпечної роботи установки. Розроблено схему автоматизованої системи контролю та управління. Вибрано сучасні програмно-технічні засоби, які забезпечують високу точність вимірювань та надійність управління процесами. Описано технічні характеристики та переваги вибраних засобів. Виконані розрахунки підтвердили ефективність обраних рішень та дозволили визначити оптимальні параметри роботи установки. Описано основні етапи та логіку роботи системи, що забезпечує автоматичне регулювання технологічних параметрів. Алгоритм дозволяє досягти стабільної роботи установки при змінних зовнішніх умовах.

Таким чином, у процесі виконання даної роботи було розроблено ефективну систему управління установкою розділення повітря з дроселюванням і попереднім охолодженням. Запропоновані рішення сприяють підвищенню продуктивності, зниженню енергоспоживання та забезпеченню високої якості отримуваних продуктів розділення. Отримані результати можуть бути використані для модернізації існуючих та проектування нових установок розділення повітря.

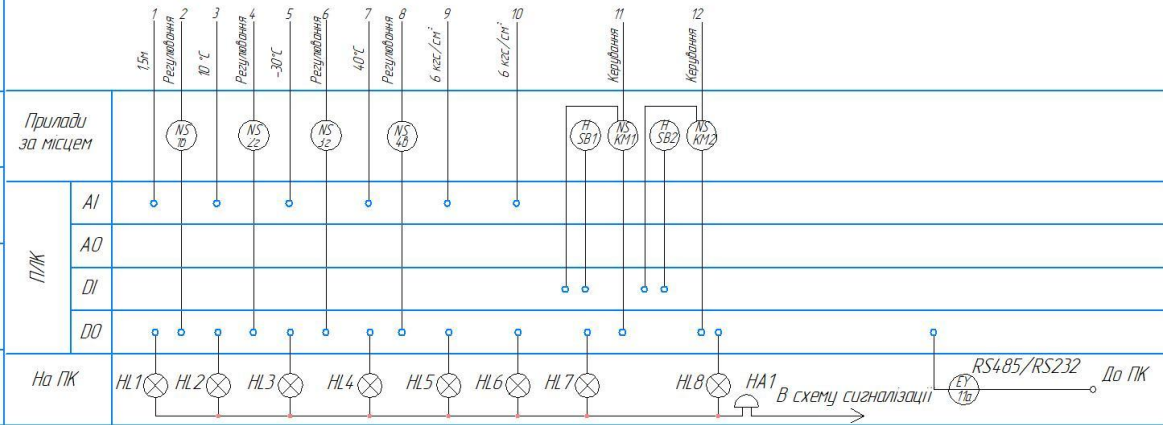
## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- 1 Юкельсон І.І. Технологія основного органічного синтезу. М.: «Хімія», 2008, 846 с.
- 2 Колесников А.Л. Технический анализ продуктов органического синтеза. М.: Высшая школа, 1966, 232 с.
- 3 Основные процессы и аппараты химической технологии: Касаткин А.Г. - Москва, 1988. - 832с;
- 4 Жученко А. І. Математичні моделі цифрових систем керування [Текст]: Навч. посібник / А. І. Жученко ; Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут". - К. : [б.в.], 1997. - 238 с.
- 5 Інформаційний ресурс [el.kpi.ua/handle/123456789/27717](http://el.kpi.ua/handle/123456789/27717)
- 6 Интеллектуальні перетворювачі тиску [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу <https://aqteck.com.ua/ru/datchiki/pd310-intellektualnye-preobrazovateli-davleniya>
- 7 ПД200-ДД. Високоточний датчик тиску з індикацією [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://aqteck.com.ua/ua/arhiv-produkciji/pd200-vysokotochnyi-datchik-tysku-z-indykacieju>
- 8 Овен датчик температуры [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://owen.ua/ua/datchyky/dtsxx5miyermoperetvorjuvachi-oporu-z-vyhidnym-sygnalom4...20ma>.
- 9 Датчик рівня Liquicap FMI51 GV12-230-3-T [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.eus.endress.com/ru/Tailor-made-field-instrumentation/uroven/Liquicap-FMI51?t.tabId=product-overview>
- 10 Технічні характеристики Belimo [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://belimo.com.ua/shop/zaporno-reguliruyushhaya-armatura-s-elektroprivodami/privody-dlya-zapornoj-armatury/privodi-sedelnyx-klapanov/belimo-gv12-230-3-t/>
- 11 ПЛК фірми ОВЕН [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://aqteck.com.ua/ru/programmiruemye-logicheskie-kontrollery>
- 12 Проектирование систем автоматизации технологических процессов: Справочное пособие / Под ред. А. С. Ключева. – 2-ое изд., перераб. и доп. – М.:Энергоатомиздат, 1990. – 464 с.
13. Теорія автоматичного управління: конспект лекцій: у 2 частинах. Ч. 2 «Синтез лінійних систем автоматичного управління» / укладач Г. М. Худолей. – Суми: Сумський державний університет, 2012. - 87с.

СЧ-01Ш. 151.05 А2



Лист 1  
Лист 2  
Лист 3  
Лист 4  
Лист 5  
Лист 6  
Лист 7  
Лист 8  
Лист 9  
Лист 10  
Лист 11  
Лист 12



Позначення	Найменування
-31-	Розчин NaOH
-32-	Азот
-33-	Аміак
-34-	Кисень

СЧ-01Ш. 151.05 А2		Лист	Масштаб
Система управління установкою розділення повітря з дрессуванням і попереднім охолодженням		у	1:1
Схема функціональна		Лист	Листів 1