

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

МУКОМЕЛА Роман Володимирович

АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ КОМПРЕСОРНИМ  
АГРЕГАТОМ. /AUTOMATED COMPRESSOR UNIT CONTROL SYSTEM.

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

Випускна кваліфікаційна робота  
здобувача другого (магістерського) рівня освіти

Виконав: студент групи АКІТм–21  
Мукомела Р. В.

---

Науковий керівник:  
к.т.н., доцент А. І. Сегін

---

Випускну кваліфікаційну роботу  
допущено до захисту:  
"\_\_\_" \_\_\_\_\_ 2025 р.

Завідувач кафедри СКС  
\_\_\_\_\_ А. І. Сегін

Тернопіль 2025

Факультет комп'ютерних інформаційних технологій  
Кафедра спеціалізованих комп'ютерних систем  
Освітній ступінь "магістр"  
спеціальність: 174 – Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та  
робототехніка  
освітньо-професійна програма – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані  
технології

ЗАТВЕРДЖУЮ:  
зав. кафедри СКС

\_\_\_\_\_ А. І. Сегін  
"04" грудня 2024р.

**ЗАВДАННЯ**  
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ  
МУКОМЕЛІ Роману Володимировичу

(прізвище, ім'я по-батькові)

**1. Тема кваліфікаційної роботи**

Автоматизована система керування компресорним агрегатом. /Automated  
compressor unit control system.

керівник роботи к.т.н., доцент Сегін А. І.

затверджено наказом по університету від « 28 » листопада 2024 р. № 938

**2. Строк подання студентом закінченої кваліфікаційної роботи**

1 грудня 2025р.

**3. Вихідні дані до кваліфікаційної роботи:**

1. Будова, характеристики та принципи функціонування компресорної установки.

2. Вимоги до автоматизованої системи керування компресорною  
установкою.

**4. Основні питання, які потрібно розробити**

1. Проаналізувати будову і функціонування компресорної установки та  
обґрунтувати найбільш підходящу концепцію розробки системи управління нею.

2. Розробити структурну та функціональну схеми системи керування  
компресорним агрегатом.

3. Виконати математичне моделювання процесу керування та оцінити динамічні  
характеристики системи.

4. Розробити алгоритми керування та програмне забезпечення для контролера.

5. Провести оцінку ефективності впровадження розробленої системи.

## 5. Перелік графічного матеріалу у роботі:

1. Узагальнена схема стандартного виконання поршневого компресора.
2. Логічна схема блоку сигналізації та дозволу на пуск компресора ПК-1.
3. Функціональна схема регулювання електродвигуна компресора з використанням перетворювача частоти.

## 6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
1	Сегін А. І.		
2	Сегін А. І.		
3	Сегін А. І.		

## 7. Дата видачі завдання 1 грудня 2025р.

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назви етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Опис функціонування компресорної установки комплексу гідроочищення моторного палива (Л-24/6)	01.01. 2025. – 31.03. 2025р.	виконано
2	Створення логічної моделі системи управління компресорнонь установки	01.03. 2025р.– 20.05.2025 р.	виконано
3	Апаратна реалізація системи управління компресорною установкою	21.05.2025р. – 30.09. 2025 р.	виконано
4	Остаточне оформлення та подача кваліфікаційної роботи на перевірку щодо плагіату	1.10.2025р. – 30.11.2025р.	виконано

Студент

\_\_\_\_\_

(підпис)

Мукомела Р. В.

Керівник роботи

\_\_\_\_\_

(підпис)

к.т.н., доц. Сегін А. І.

## АНОТАЦІЯ

Мукомела Р. В. Автоматизована система керування компресорним агрегатом. – Рукопис.

Дослідження на здобуття освітнього ступеня «магістр» за спеціальністю 174 – Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка, освітньо-професійна програма – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології. – Західноукраїнський національний університет, Тернопіль. 2024.

У кваліфікаційній роботі розроблено макет системи управління на основі структурно-інформаційної моделі поведінки компресорної установки, яка дозволить підвищити ефективність функціонування комплексу гідроочищення за рахунок оптимального режиму роботи.

## ANNOTATION

Mukomela R. V. Automated control system for a compressor unit. – Manuscript.

Research for the degree of “Master” in specialty 174 – Automation, computer-integrated technologies and robotics, educational and professional program – Automation and computer-integrated technologies. – Western Ukrainian National University, Ternopil. 2024.

The qualification work develops a control system model based on a structural information model of the behavior of a compressor unit, which will allow to increase the efficiency of the hydrotreatment complex due to the optimal operating mode.

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
1. ОПИС ФУНКЦІОНУВАННЯ КОМПРЕСОРНОЇ УСТАНОВКИ КОМПЛЕКСУ ГІДРООЧИЩЕННЯ МОТОРНОГО ПАЛИВА (Л-24/6)..	10
1.1 Склад та призначення окремих вузлів компресорної установки .....	10
1.2 Структура системи керування компресорною установкою.....	16
1.3 Визначення основних завдань синтезу системи керування компресорної установки.....	20
1.4 Особливості параметрів систем управління.....	23
2. СТВОРЕННЯ ЛОГІЧНОЇ МОДЕЛІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ КОМПРЕСОРНОЇ УСТАНОВКИ.....	33
2.1 Аналіз та розробка структурної схеми конструктивних та технологічних елементів механізму руху поршневого компресора	33
2.2 Розгляд віброакустичних характеристик отриманої моделі.....	37
2.3 Моделювання алгоритму керування у програмному пакеті математичного моделювання MATLAB.....	40
2.4 Синтез системи керування приводу компресорної установки..	41
2.5 Реалізація коригувальних пристроїв на регуляторах.....	48
3. АПАРАТНА РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ КОМПРЕСОРНОЮ УСТАНОВКОЮ.....	51
3.1 Вибір платформи системи керування та відповідних контролерів.....	51
3.2 Вибір датчиків системи управління для визначення параметрів компресорної установки.....	62
ВИСНОВКИ .....	75
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....	76
ДОДАТКИ .....	79

## ВСТУП

**Актуальність теми.** У сучасних умовах інтенсивного розвитку промисловості та енергетики особливе значення набуває ефективне використання технічних ресурсів і впровадження автоматизованих систем керування. Компресорні агрегати часто є невід’ємною частиною більшості технологічних процесів — вони забезпечують подачу стисненого повітря, газу або іншого робочого середовища для приводу пневматичного обладнання, транспортування матеріалів, охолодження, вентиляції тощо. Їхня безперервна і надійна робота визначає стабільність функціонування всього виробництва.

Проте в більшості підприємств досі експлуатуються застарілі системи керування компресорними установками, які мають низький рівень автоматизації, не дозволяють ефективно регулювати робочі параметри, не враховують зміни навантаження та зовнішніх умов. У результаті це призводить до перевитрати електроенергії, частих аварійних зупинок, підвищеного зносу механічних вузлів і погіршення загальної економічної ефективності виробництва.

Автоматизована система керування компресорним агрегатом дозволяє не лише оптимізувати технологічні параметри — тиск, температуру, витрату повітря чи газу, — але й реалізувати моніторинг стану обладнання в реальному часі, виявлення несправностей, прогнозування технічного обслуговування та інтеграцію у загальну виробничу інформаційну систему підприємства. Це сприяє підвищенню рівня цифровізації виробництва, переходу до концепції «розумного заводу» (Smart Factory) та забезпечує досягнення високих показників надійності й енергоефективності.

Таким чином, актуальність теми кваліфікаційної роботи зумовлена необхідністю розроблення сучасних автоматизованих систем керування компресорними агрегатами, які відповідають вимогам промисловості до

енергозбереження, гнучкості, надійності та інтеграції з комп'ютерно-інтегрованими технологіями.

**Метою кваліфікаційної роботи** є розроблення автоматизованої системи керування компресорним агрегатом, яка забезпечує підтримання оптимальних режимів роботи, зниження енергоспоживання та підвищення надійності системи.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі завдання:

1. Проаналізувати будову і функціонування компресорної установки та обґрунтувати найбільш підходящу концепцію розробки системи управління нею.

2. Розробити логічну, структурно-інформаційну та математичну моделі функціонування компресорної установки як об'єкта управління.

3. Розробити структурну та функціональну схеми системи керування компресорним агрегатом.

4. Виконати математичне моделювання процесу керування та оцінити динамічні характеристики системи.

5. Розробити структуру системи автоматизованого управління компресорною установкою та здійснити підбір технічних засобів.

**Об'єкт дослідження** – процес керування роботою компресорного агрегату.

**Предмет дослідження** – система автоматизованого управління компресорним агрегатом та відповідні моделі, алгоритми та засоби автоматизації.

**Методи дослідження.** У роботі використано аналітичні, математичні та експериментальні методи дослідження. Для моделювання та аналізу динамічних процесів застосовано сучасні програмні засоби, зокрема MATLAB/Simulink. Також використано методи системного аналізу, теорії автоматичного керування, моделювання логічних та інформаційних процесів та цифрової обробки сигналів.

**Наукова новизна кваліфікаційної роботи** полягає у розробленні структурно-функціональної моделі автоматизованої системи керування компресорним агрегатом з адаптивним алгоритмом регулювання, який забезпечує оптимізацію режимів роботи залежно від змін навантаження та зовнішніх умов.

**Практичне значення кваліфікаційної роботи** полягає у можливості впровадження запропонованої системи в промислових умовах для оптимізувати режими роботи компресорної установки, підвищення енергоефективності компресорного обладнання, зменшити споживання енергоресурсів, зниження витрат на обслуговування та продовження терміну його експлуатації, масштабувати систему або інтегрувати її з новими компонентами без значних фінансових витрат. Розроблені моделі та структура забезпечення можуть бути використані для модернізації існуючих систем керування компресорними станціями.

#### **Апробація.**

1. Мукомела Р. В. Автоматизована система керування компресорним агрегатом. / Р. В. Мукомела, В. В. Жовток, Д. П. Біловус // Збірник матеріалів науково-практичного симпозиуму Технології інтернету речей: системи та рішення (ТІР: СМ –2025). Тернопіль, 2025. С.78 –86.

1. Сегін А.І. Автоматизована система діагностики частотно-регульовального асинхронного електроприводу / А.І. Сегін, А.О. Рибін, Р.В. Мукомела // Збірник матеріалів науково-практичного симпозиуму Технології інтернету речей: системи та рішення (ТІР: СМ –2025). Тернопіль, 2025. С.91 –97.

# 1. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО КОМПРЕСОРНУ УСТАНОВКУ, ЇЇ СКЛАД, ПРИЗНАЧЕННЯ ОКРЕМИХ ВУЗЛІВ ТА ПРИНЦИПІВ ПОБУДОВИ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ

## 1.1 Склад та призначення окремих вузлів компресорної установки

До складу стаціонарної компресорної установки входять: поршневий крейцкопфний компресор, електродвигун, а також системи охолодження, змащування, автоматичного керування та захисту.

Поршневий компресор крейцкопфний з опозитним чи кутовим розташуванням циліндрів. Конструкції компресорів побудовані на основі прийнятих на заводі-виробнику нормальних параметричних рядів діаметрів циліндрів. Основою параметричних рядів є опозитна база 4М та кутові бази 5П та 2П, проте зустрічаються і спеціально розроблені системи для орієнтованого виробництва типу 5ГЦ, 5РЦ.

Компресор включає такі основні вузли: базу, циліндри, систему охолодження та привід.

Узагальнену схему виконання поршневого компресора представлено на рисунку 1.1

Запуск компресора відбувається електродвигуном.

Змащення компресорів забезпечується двома незалежними системами:

- циркуляційною системою змащування низького тиску;
- системою змащування високого тиску – для подачі масла в циліндр.

Для запобігання попаданню мастила з рами в порожнину стиснення, кожен циліндр в компресорах без змащування циліндрів забезпечений ліхтарем, маслослизуючим ущільнювальним пристроєм, масловідбойником і кільцями маслослизуючими.

Компресори бувають з закритою та відкритою системою охолодження, в якій вода струменем подається на компресор та газоохолоджувачі з

розсіюванням струменя через відповідні лійки.

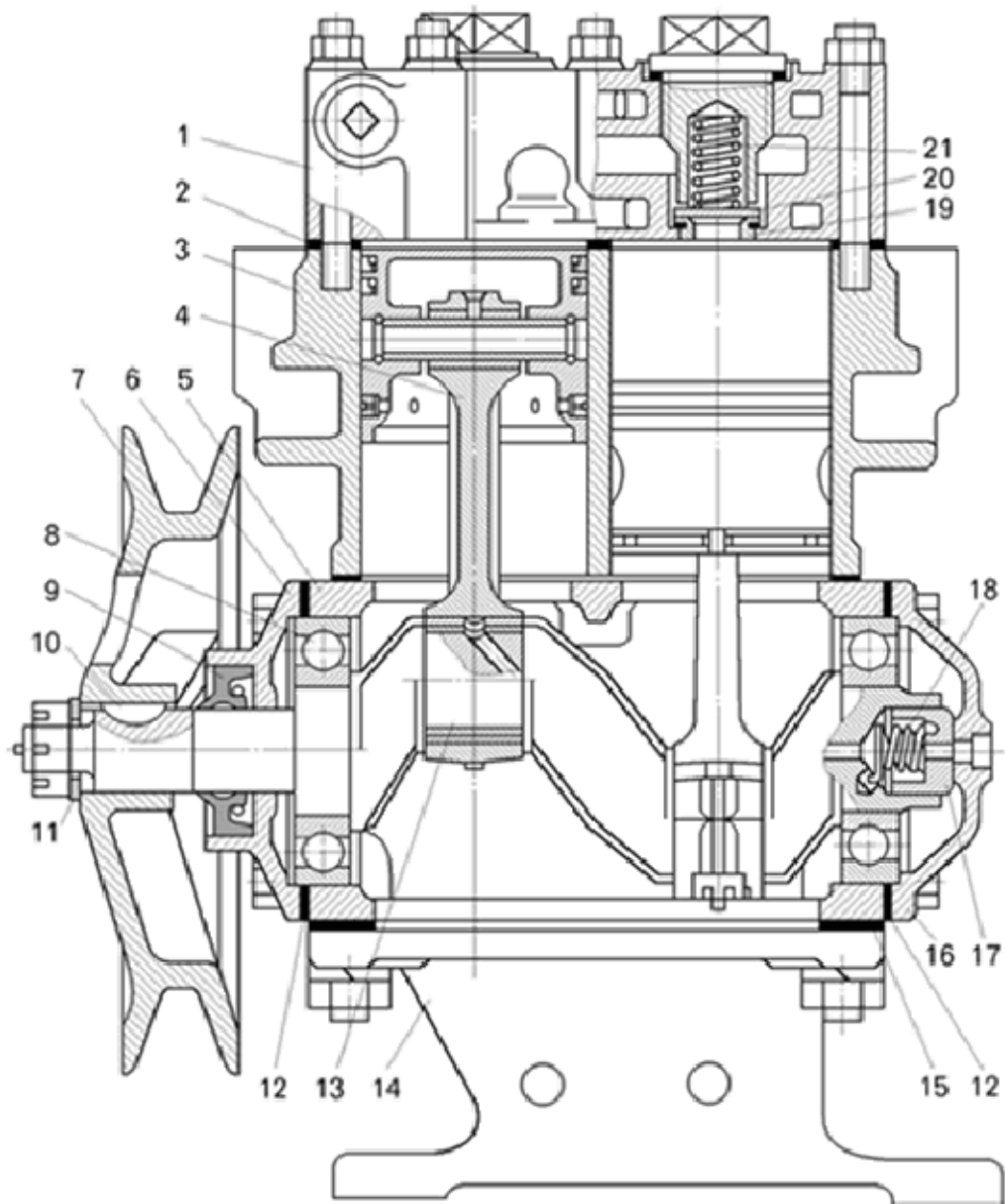


Рисунок 1.1 – Узагальнена схема стандартного виконання поршневого компресора:

1 – головка блоку циліндрів; 2 – прокладка головки блоку; 3 – блок циліндрів; 4 – шатун; 5 – картер; 6 – передня кришка; 7 – шків; 8 – шарикопідшипник; 9 – ущільнювальна манжета; 10 – шпонка; 11 – шайба; 12, 15 – прокладки; 13 – колінчастий вал; 14 – нижня кришка картера; 16 – задня кришка; 17 – ущільнювач; 18 – пружина ущільнювача; 19 – сідло; 20 – нагнітальний клапан; 21 – пружина клапана.

Система автоматики призначена для управління роботою, захисту та контролю параметрів компресорних машин.

Система автоматики складається з низки підсистем та в сукупності з електроприводом залежно від призначення компресорних машин (для стиснення повітря або газу) здійснює аварійне припинення роботи компресорної установки із зупинкою приводного електродвигуна.

У компресорних установках для стиснення газу такі аварійні зупинки здійснюються в наступних випадках:

- a) при зниженні тиску води у системі охолодження компресора;
- b) при коротких замиканнях та пошкодженнях у системі електроприводу та керування;
- c) при падінні тиску масла в циркуляційній системі мастила механізму руху;
- d) при відхиленнях тиску газу від допустимих значень лінії всмоктування;
- e) при підвищенні тиску газу вище допустимого після кожного ступеня стиснення;
- f) при припиненні продування повітрям корпусу електродвигуна;
- g) при підвищенні тиску газу вище від допустимого в корпусі компресора.

Аварійне відключення електродвигуна компресорів супроводжується подачею світлового та звукового сигналів.

У системі автоматики компресорних машин для стиснення газу передбачено дистанційну пневматичну передачу показань контрольованих параметрів на прилади релейної шафи. Відстань передачі вихідного сигналу на пневмотрасі не більше 200 м.

Крім того, системи автоматики компресорів відрізняються залежно від модифікації функціональними можливостями та елементною базою (релейною, мікроелектронною, мікропроцесорною).

Технічні параметри в різних режими роботи компресорної установки представлені в таблицях 1.1 –1.3

Таблиця 1.1 – Показники режиму

Найменування показників режиму	Одиниця виміру	Допустимі межі технологічних параметрів	Необхідний клас точності вимірювальних приладів	Примітка
Тиск масла на ПК-1	кгс/см <sup>2</sup>	2 1,2 - 3,0	1,0	Реєстр.
Тиск води на охолодження олії	кгс/см <sup>2</sup>	2 1,0 – 3,0	1,0	Реєстр.
Температура газу прийомі ПК -1	°С	110	0,5	Реєстр.
Температура підшипників, не більша за ПК-1	°С	65	1,0	Реєстр.
Тиск повітря на обдув електродвигуна компресора	мм. вод. ст.	20 - 40	1,0	Реєстр.
Перепад тиску між прийомом та викидом, не більше		1,8	1,0	Реєстр.
Витрата циркуляційного газу	м <sup>3</sup> /год	20000 – 40000	1,0	Реєстр.
Температура газу на нагнітанні ПК-1	°С	110	0,5	Реєстр.

Для візуального спостереження робочого стану компресорної установки безпосередньо на контрольних точках встановлені дисплеї, що відображають значення вимірюваних величин:

– датчики тиску оснащені РК панелями з показами вимірюваних значень, завдяки яким операторами візуально контролюються параметри;

Таблиця 1.2 – Коротка характеристика технологічного обладнання

Найменування обладнання (Тип, найменування апарату, призначення)	Номер позиції приладу за схемою,	К-ть, шт.	Матеріал	Технічна характеристика
Ресивер азоту високого тиску прийомі компресорів. Вертикальний, циліндричний апарат, пустотілий, зі сферичними днищами	Б-2	1	Ст. 20	Розрахунковий тиск - 64 кгс/см <sup>2</sup> Розрахункова температура – 40°С Діаметр – 1000 мм. Висота - 4000 мм. Об'єм - 4 м <sup>3</sup>
Сепаратор прийому ПК. Горизонтальний, циліндричний, пустотілий апарат зі сферичними днищами	С-7 С-5	2	Ст.20	Розрахунковий тиск – 50 кгс/см <sup>2</sup> ; Діаметр - 2000 мм; Довжина - 7400 мм; Об'єм -20м <sup>3</sup>
Компресор для циркуляції ВСГ	ПК-1	3	Збірний	Марка 5Г-600-42/60 Витрата -36000м <sup>3</sup> /год; Тиск прийому -42кгс/см <sup>2</sup> ; Тиск на викиді - 60кгс/см <sup>2</sup> Потужність ЕД -840 кВт; Число оборотів -167 об/хв.; Вик. ВЗГ
Холодильник циркуляційного газу. Горизонтальний, циліндричний кожухотрубний апарат, одноходовий по трубному та міжтрубному простору	Х-3 Х-4	2	Ст.3	Розрахунковий тиск у корпусі -60кгс/см <sup>2</sup> , у трубках - 3 кгс/см <sup>2</sup> ; Температура у корпусі - 60 °С, у трубках - 40 °С Діаметр корпусу – 425 мм Довжина – 6877 мм

Таблиця 1.3 – Перелік блокувань та сигналізації

Найменування параметра	Найменування обладнання	Величина параметра, що встановлюється		Блокування		Сигналізація		Операції з відключення, перемикання та іншого впливу
Температура газу нагнітання ПК-1	ПК-1		110 °С		120 °С		110 °С	Звукова та світлова сигналізація. Вимкнення ЕД компресора ПК-1
Температура підшипників ПК-1	Підшипники ПК-1		60 °С		65 °С		60 °С	Звукова та світлова сигналізація. Вимкнення ЕД компресора ПК-1
Тиск масла до ПК-1	ПК-1	0,15 Мпа		0,12 МПа		0,15 МПа		Звукова та світлова сигналізація. Заборона запуску Вимкнення ЕД компресора ПК-1
Тиск охолоджувальної води до ПК-1	ПК-1	0,12 МПа		0,1 МПа		0,12 МПа		Звукова та світлова сигналізація. Заборона запуску Вимкнення ЕД компресора ПК-1
Тиск повітря під кожухом ПК-1	ПК-1	0,25 Мпа		0,2 КПа		0,25 КПа		Звукова та світлова сигналізація. Заборона запуску Вимкнення ЕД компресора ПК-1
Перепад тиску на ПК-1	ПК-1		1,8 Мпа		2,0 МПа		1,8 МПа	Звукова та світлова сигналізація. Вимкнення ЕД компресора ПК-1
Тиск ВСГ на всмоктуванні ПК-1	ПК-1	1,5 МПа		0,5 МПа		1,5 МПа		Звукова та світлова сигналізація. Заборона запуску Вимкнення ЕД компресора ПК-1

– локальні датчики температури за опціонально оснащуються сенсорними дисплеями.

– датчики вібрації та система стеження стану валу компресора не мають засобів відображення, проте на них присутні світлові індикатори відстеження та сигналізації.

## 1.2 Структура системи керування компресорною установкою

Розподілена система автоматизованого керування (РСАК) технологічними процесами компресорної установки — це сукупність технічних і програмних компонентів, призначених для нагляду та регулювання роботи обладнання. Центральним елементом системи виступає багатоканальний контролер DeltaV серії M5+, який виконує функції нижнього рівня керування.

Верхній рівень РСАК представлений операторською станцією, що працює на базі персонального комп'ютера з установленим програмним комплексом DeltaV. Ця станція забезпечує візуалізацію технологічних параметрів, керування процесом, ведення архівів, реєстрацію дій персоналу, формування сигналізацій та підготовку звітів.

Автоматизована система управління компресорною установкою реалізує такі ключові функції: організація безперервного контролю та регулювання процесів стиснення і транспортування газу відповідно до заданих режимів; підтримання високого рівня безпеки технологічного обладнання; постійний аналіз змін параметрів та запобігання виходу їх за допустимі межі; виконання надійних алгоритмів пуску, зупинки та необхідних перемикань; керування засобами захисту, що запобігають виникненню та розвитку аварійних ситуацій.

Система здійснює постійний моніторинг стану агрегатів, подає попереджувальні та аварійні сигнали за відхилення параметрів, забезпечує

дистанційне управління виконавчими механізмами, виконує протиаварійні функції, проводить техніко-економічні розрахунки та формує архівні бази даних.

АСУ ТП компресорної установки структурована як багаторівнева система оперативного керування, що розташована в центральній операторській. Вона складається з двох основних рівнів: верхній рівень — оперативно-виробнича служба (ОПС); – нижній рівень — система автоматизованого керування (САК) технологічними об'єктами.

Функції оперативно-виробничої служби включають:

- організацію людино-машинного інтерфейсу;
- відображення й реєстрацію стану технологічного обладнання;
- управління процесом у реальному часі;
- подання попереджувальних та передаварійних сигналів;
- дистанційне керування виконавчими пристроями та привідними механізмами;
- ведення архівів параметрів та подій;
- формування та друк технологічної документації.

На цьому рівні оператори контролюють режими роботи установки та задають необхідні параметри для її функціонування.

Рівень САК охоплює комплекси автоматичних засобів контролю та регулювання, які забезпечують підтримання встановлених режимів, здійснюють аварійний захист та передають інформацію на верхній рівень. Основні завдання цього рівня: вимірювання технологічних параметрів; автоматична стабілізація режимів роботи обладнання; управління виконавчими механізмами; – реалізація функцій безпеки та аварійного відключення.

Важливою складовою АСУ ТП є система протиаварійного захисту (ПАЗ), яка здійснює розпізнавання небезпечних режимів роботи шляхом аналізу критичних відхилень параметрів. У разі загрози аварії ПАЗ

автоматично переводить установку в безопасний стан та формує звукові й світлові сигнали. Алгоритм роботи ПАЗ наведено на рисунку 1.2.

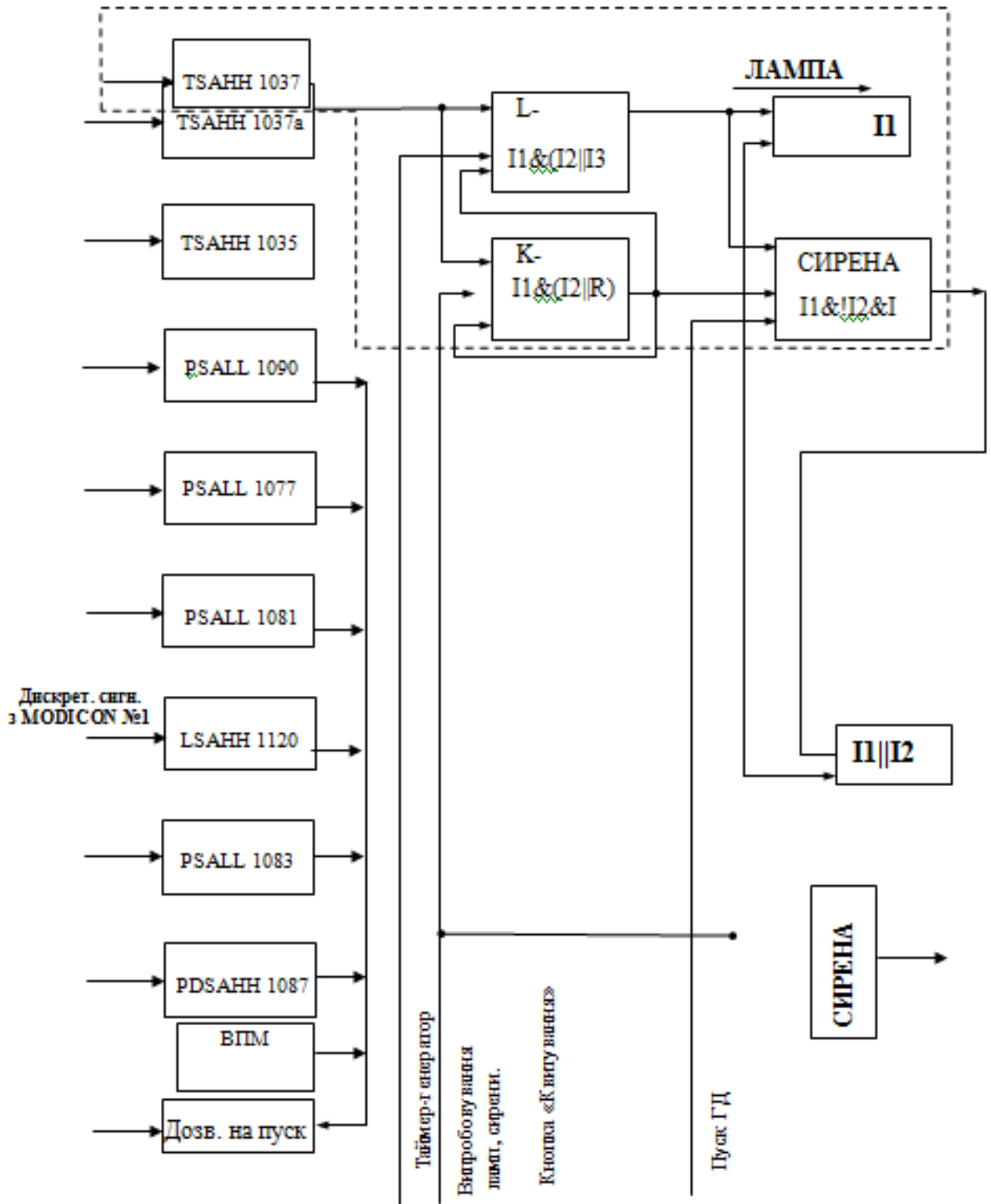


Рисунок 1.2 – Логічна схема блоку сигналізації та дозволу на пуск компресора ПК-1

Система протиаварійного захисту перебуває у стані повної готовності на всіх режимах роботи компресорного агрегату — від моменту пуску й під час стандартного функціонування до етапу зупинки. Такий підхід забезпечує автоматичне та своєчасне переведення установки в безпечний режим у разі досягнення небезпечних значень параметрів, зазначених у таблиці 1.3. Через складність і динамічність технологічного процесу до ПАЗ висуваються особливо високі вимоги щодо надійності. Її забезпечують завдяки:

- дублюванню елементів обладнання;
- застосуванню функціональної і часової надлишковості;
- використанню діагностичних та самодіагностичних систем;
- введенню порогових значень для переходу між режимами захисту.

Для безперервного функціонування АСУ ТП електроживлення подається через джерело безперебійного живлення (ДБЖ). Воно гарантує роботу системи на час, необхідний для перемикання на інше джерело живлення або для коректної зупинки технологічного обладнання.

У вибухонебезпечних зонах, де використовуються електронні вимірювальні пристрої, застосування іскробезпечних бар'єрів є обов'язковою вимогою. Це пов'язано з тим, що при розриві контуру сигналу 4–20 мА напруга на датчику може зрости до рівня напруги живлення. Оскільки бар'єри мають поріг спрацювання 24 В, перевищення цього значення спричиняє появу струму витoku в діапазоні 0–4 мА, який можна помилково трактувати як справний сигнал.

Щоб уникнути таких помилкових ситуацій, у системах контролю розриву кола 4–20 мА рекомендується зменшувати напругу живлення датчика на 0,2–0,3 В нижче порогового значення бар'єра або встановлювати у коло живлення послідовний діод. Приклад вибору діода та схема його підключення подані на рисунку 1.3.

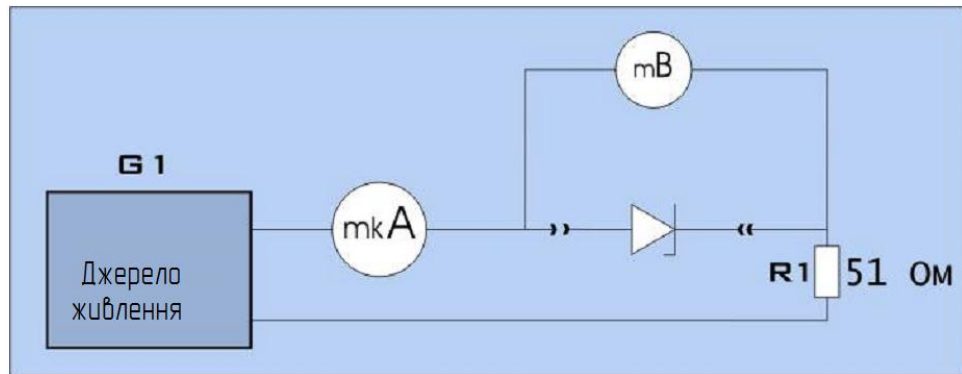


Рисунок 1.3 – Схема підключення діода для контролю обриву електричного кола.

САУ КУ має задовольняти вимогам безпеки, охорони праці та виробничої санітарії відповідно до ДСТУ та Закону України «Про охорону праці».

### 1.3 Визначення основних завдань синтезу системи керування компресорної установки

На основі режимних характеристик, наведених у таблиці 1.1, визначається перелік ключових функцій системи керування компресорною установкою (КУ). Для полегшення логіки роботи та покращення структуризації система поділена на окремі функціональні модулі. Кожен модуль відповідає за свій набір операцій і контроль певних технологічних параметрів, а коректна робота установки забезпечується завдяки правильному переходу між цими модулями.

Запуск компресора типу 5ГЦ починається з подачі електроживлення на електродвигун, тому алгоритм «Пуск компресора» охоплює всі дії з підготовки до ввімкнення, перевірку передпускових умов та формування сигналу «Компресор готовий до пуску» для системи верхнього рівня. Якщо хоча б один із необхідних параметрів не відповідає нормам, сигнал готовності

не видається. Система КВПіА передає його у вигляді «сухого контакту», одночасно змінюючи повідомлення на екрані з «Підготовка компресора до пуску» на «Компресор до пуску готовий».

Для підтвердження готовності компресора повинні виконуватися такі умови:

1. Тиск газу на вході до шафи керування (РТ1) — не менше 6,2 кгс/см<sup>2</sup>.
2. Тиск масла у напірному колекторі (ВР108) — не нижчий за 1,5 кгс/см<sup>2</sup>.
3. Температура масла у напірному колекторі (ВК2) — понад 45 °С.

У процесі підготовки система КВПіА запускає основний маслonaсос лише за умови виконання всіх вимог. Якщо хоча б одна з них не дотримана, вмикання насоса блокується, а оператор отримує попередження: «Пуск масляного насоса заборонено: РТ4 нижче 1,5 кгс/см<sup>2</sup>». Вибір основного насоса здійснюється автоматично шляхом аналізу напрацювання, та перемикання здійснюється лише тоді, коли жоден насос не працює. Після запуску насоса на мнемосхемі повинно з'явитися відповідне індикаційне позначення.

Факт пуску компресора фіксується або за сигналом САУ у вигляді «сухого контакту», або після досягнення частотою обертання 300 об/хв. Протягом усього періоду пуску система КВПіА контролює параметри з таблиці 1.1 та зберігає їх у пам'яті з позначенням часу. Типовий пуск без тиристорної системи керування електроприводом триває близько 830 секунд до виходу на номінальну швидкість. На цей період пороги попереджувальної та аварійної сигналізації щодо параметрів вібрації автоматично збільшуються вдвічі

для:

- радіальних вібропереміщень шийок ротора (S1В, S1Г, S2В, S2Г);
- осьового зміщення (OS1, OS2).

Пуск вважається завершеним, коли частота ротора досягає 8412 об/хв — після цього на екрані повинно з'явитися повідомлення «Робота

компресора». Якщо ж після досягнення 300 об/хв установка не виходить на 8412 об/хв, можливі два варіанти:

1. Частота падає до  $0 \pm 10$  об/хв — компресор зупинився, і система виконує алгоритм аварійної зупинки.
2. Частота коливається в діапазоні між 0 та 8412 об/хв — система продовжує очікувати або успішного завершення пуску, або переходу до аварійної зупинки.

Під час нормальної роботи компресора система постійно відслідковує параметри з таблиці 1.1, відображає їх у графічному чи табличному вигляді, а кожні 8–12 годин автоматично зберігає дані на жорсткий диск.

У разі зниження тиску масла (BP108) до  $1,4 \text{ кгс/см}^2$  система повинна автоматично запускати резервний маслonaсос, а при підвищенні тиску до  $2,0 \text{ кгс/см}^2$  — вимкати його. Якщо основний насос вимикається через аварійний захист, резервний має вмикатися негайно, щоб уникнути критичного падіння тиску. За кожного спрацювання сигналізації активуються звукові та світлові сигнали, а всі події фіксуються окремими записами. Після нормалізації параметрів сигналізація вимикається.

Нормальна зупинка компресора, як і його запуск, ініціюється через вимкнення електроживлення приводу. Початок зупинки фіксується або за сигналом САУ («сухий контакт»), або за фактом зниження частоти обертання до 10 % номінального значення (приблизно 7570 об/хв). У цей період порогові значення для вібраційних сигналів (S1В, S1Г, S2В, S2Г та осьовий зсув) повинні бути збільшені вдвічі. Усі параметри записуються в пам'ять комп'ютера із зазначенням часу.

Зупинка вважається повною, коли маслonaсос вимкнений, а тиск у напірному колекторі (BP108) становить  $0\text{--}0,05 \text{ кгс/см}^2$ .

Аварійна зупинка може відбуватися у двох випадках:

1. якщо причина не пов'язана з перевищенням технологічних параметрів;
2. якщо зафіксовано вихід параметрів за аварійні межі.

У першому випадку порядок аварійної зупинки повторює алгоритм звичайної. У другому — система формує аварійне відключення електроприводу («сухий контакт»), вмикає світлову та звукову сигналізацію, а подальші дії виконуються за стандартним алгоритмом зупинки з додатковим занесенням до пам'яті параметра, який спричинив спрацювання захисту.

#### 1.4 Особливості параметрів систем управління

Система керування повинна постійно контролювати власний технічний стан, а також перевіряти працездатність усіх своїх складових — датчиків, вимірювальних пристроїв, модулів живлення та інших елементів. Якщо система фіксує несправність, на екрані оператора має з'явитися відповідне попереджувальне або інформаційне повідомлення.

Алгоритм самодіагностики розробляється з урахуванням вимог до функціонування, часових характеристик та необхідного рівня безпеки. Частота опитування датчиків повинна відповідати таким показникам:

- для вібродатчиків серії TX 3654 — 10 000 Гц;
- для датчиків тиску Rosemount — не менше 12 вимірів за секунду;
- для температурних датчиків — не рідше одного вимірювання за секунду.

Дані на екрані оператора, у таблицях та на групових графічних відображеннях мають оновлюватися з інтервалом 1 секунда.

У випадку виходу з ладу будь-якого датчика в нижній частині екрана повинна з'являтися таблиця з деталізацією несправності, а також активуватися світлова та звукова сигналізація.

Однією з важливих вимог до подібних систем є побудова продуманої, логічно впорядкованої ієрархії обладнання, що дозволяє усунути вплив

другорядних факторів та зосередитися на формуванні оптимальних алгоритмів пуску та стабілізації робочих параметрів.

Схематичне відображення принципів регулювання тиску (напору) та продуктивності компресора при зміні опору мережі подано на рисунку 1.4.

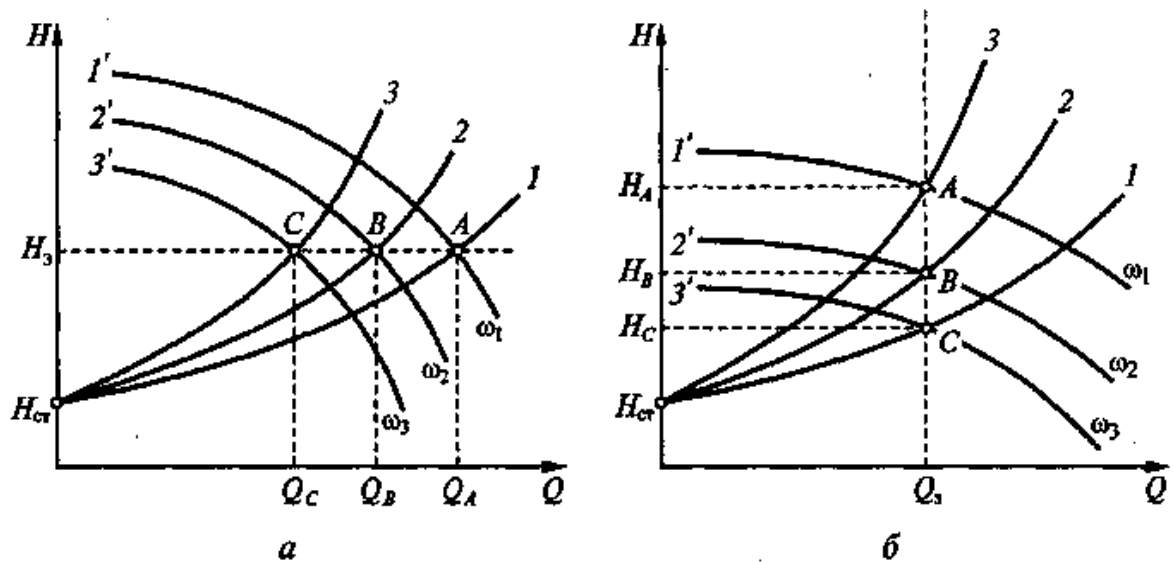


Рисунок 1.4 – Подача компресора при зміні характеристик мережі

Щоб підтримувати напір на рівні заданого значення  $H_3$  незалежно від того, як змінюються характеристики мережі (криві 1–3 на рисунку 1.4 а), здійснюється вимірювання тиску в магістралі. На основі цих даних регулятор тиску автоматично змінює частоту обертання компресора (від  $\omega_1$  до  $\omega_2$ ). У результаті робоча характеристика компресора переходить від кривої 1' до 3', а продуктивність змінюється від  $Q_A$  до  $Q_C$ . Точки А, В, С на відповідних характеристиках є робочими режимами для різних гідравлічних опорів мережі. При зміні встановленого значення  $H_3$  будуть змінюватися й характеристики компресора.

У промислових умовах компресори, як правило, працюють у складі компресорної станції, тобто кілька агрегатів функціонують паралельно на одну систему. Принцип регулювання продуктивності станції шляхом зміни частоти обертання окремих компресорів наведено на рисунку 1.5.

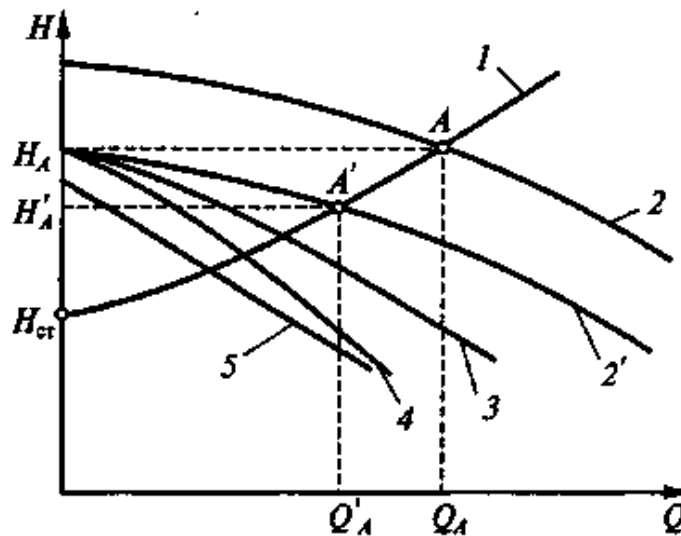


Рисунок 1.5 – Регулювання подачі компресорної станції зміною частоти обертання компресорів

Якщо два компресори, сумарна характеристика яких відповідає кривій 2, працюють у точці А з подачею  $Q_A$ , а потрібно зменшити витрату до рівня  $Q_{A'}$ , це можна реалізувати двома способами:

- одночасно зменшити швидкість обертання обох агрегатів (криві 3 і 4, нова сумарна характеристика 2');
- знизити частоту обертання лише одного компресора, але в більшому діапазоні.

Ефективність обох методів приблизно дорівнює ефективності регулювання частоти приводу під час роботи одного компресора. З позиції економії енергії найраціональнішим варіантом є синхронне регулювання швидкості всіх компресорів, що працюють паралельно. Проте така схема потребує оснащення кожного машино-компресорного агрегату частотно-регульованим приводом, що істотно підвищує загальну вартість станції. Тому на практиці зазвичай використовують один компресор із регульованою частотою, а значне коригування продуктивності забезпечують шляхом вмикання або вимикання додаткових машин.

Більшість промислових компресорів не вимагає зміни частоти обертання, оскільки більшість заводських установок розрахована на роботу з постійною швидкістю. Для них застосовують асинхронні або синхронні двигуни змінного струму (останні переважно потужністю понад 300 кВт), які запускаються магнітними або безконтактними пускачами. Пуск таких агрегатів здійснюють за схемами прямого включення або через реактори та автотрансформатори.

У виробничих системах зазвичай працює кілька нагнітачів. Їх одночасне використання зумовлене такими чинниками:

- один нагнітач не може забезпечити потрібний тиск чи подачу, а встановлення більш продуктивного обладнання є неможливим;
- коливання витрати або зміни гідравлічного опору в мережі потребують періодичного вмикання чи вимикання частини нагнітачів;
- підвищення загальної надійності системи;
- складні мережеві схеми, які потребують рівномірного розподілу потоків газу чи повітря.

Нагнітачі можна з'єднувати паралельно, послідовно або комбіновано. Паралельне підключення застосовують тоді, коли потрібно збільшити продуктивність, а збільшення частоти обертання чи габаритів обладнання є небажаним через конструктивні або шумові обмеження.

На рисунку 1.6 представлено основні схеми паралельної роботи: повністю паралельну (а) та два типи частково паралельних схем (б, в). Усі нагнітачі мають однакові характеристики. Для спрощення аналізу вважається, що опір окремих ділянок трубопроводу (1–2) дуже малий і ним можна знехтувати. Оскільки залежність тиску від подачі у нагнітачів має складний характер і зазвичай задається графічно у вигляді кривої  $P=f(L)$ , найзручнішим способом аналізу є саме графічний метод. Найчастіше використовують побудову сумарної характеристики групи нагнітачів.

Оскільки в точках 1 і 2 створюваний тиск однаковий, а загальна подача дорівнює сумі витрат кожного нагнітача, сумарну характеристику формують шляхом додавання подач за однакових значень тиску.

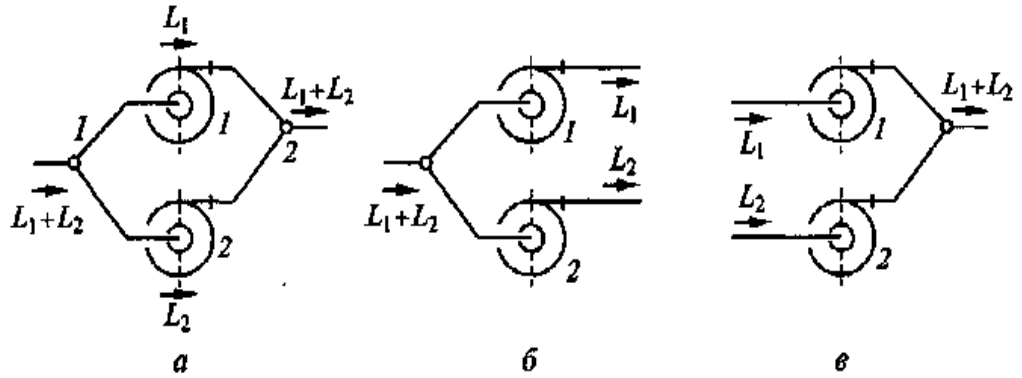


Рисунок 1.6– Включення в мережу нагнітачів з однаковими характеристиками.

Побудова сумарної характеристики тиску показано на рисунку 1.7.

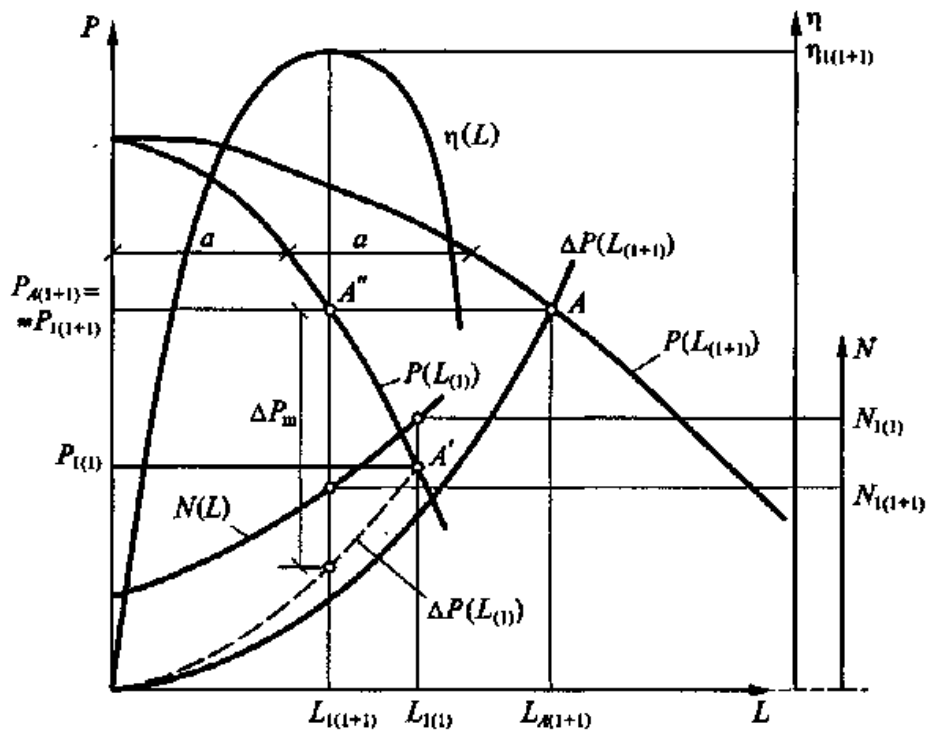


Рисунок 1.7 – Графік сумарної характеристики тиску

«Абсциси  $a$ , що є подачею одного нагнітача, додаються при кожному значенні тиску. При включенні нагнітачів у мережу з характеристикою (1+1) режим роботи визначається точкою А. При цьому, сумарна подача нагнітачів визначається величиною  $L_{A(1+1)}$  а сумарний тиск – величиною  $P_{1(1+1)}$ , у своїй  $P_{1(1+1)} = P_{A(1+1)}$ , тобто. тиск, створюваний кожним нагнітачем при спільній роботі, дорівнює сумарному тиску. подача кожного нагнітача становить половину загальної і може бути визначена графічно за положенням точки А", тобто  $L_{1(1+1)} = 0,5L_{A(1+1)} = L_A$ . ККД обох нагнітачів дорівнює ККД кожного з них і визначається перетином ординати, що проходить через точку А", з характеристикою. Перетин цієї ординати з характеристикою потужності визначає витрати потужності кожним нагнітачем. Сумарні витрати потужності дорівнюють сумі потужностей окремих нагнітачів:  $N_{A(1+1)} = 2N_{1(1+1)}$ .» [5].

При відключенні одного з нагнітачів характеристика мережі  $\Delta P(L_{(1)})$  стає крутішою внаслідок зменшення площі поперечного перерізу для проходу повітря між точками 1 та 2. Робоча точка переходить із положення А до положення А' ( рисунок 1.7). При цьому параметрами роботи нагнітачів стають  $L_{1(1)} > L_{1(1+1)}$ ,  $P_{1(1)} < P_{1(1+1)}$  та  $N_{1(1)} > N_{1(1+1)}$ . Це призводить до перегрівання обмоток електродвигуна. Тому при виключенні одного з нагнітачів його індивідуальну ділянку необхідно перекрити клапаном (щоб виключити марне перетікання газу по ньому через різницю тисків  $P_2 - P_1$ ), а в мережу нагнітачів, що залишився в роботі, ввести додатковий тиск РШ так, щоб робоча точка перемістилася в положення «А».

Побудова сумарної характеристики нагнітачів із різними характеристиками у принципі не відрізняється від попередньої побудови.

При паралельній роботі нагнітачів з різними характеристиками доцільно визначати середній ККД нагнітачів:

$$\eta_{CP} = \frac{P_1 L_1 + P_2 L_2}{\frac{P_1 L_1}{\eta_1} + \frac{P_2 L_2}{\eta_2}} \quad (1.1)$$

з формули (1.1) випливає, що найбільш потужні нагнітачі мають працювати в режимі максимального ККД, а зміну витрати в системі доцільно виконувати за допомогою агрегату меншої потужності. Метод побудови сумарної характеристики групи нагнітачів, описаний раніше, придатний для будь-якої їх кількості.

Послідовне з'єднання двох і більше нагнітачів застосовують у ситуаціях, коли одного агрегату недостатньо, щоб створити тиск, здатний подолати загальний опір мережі.

У разі послідовного включення одна й та сама кількість газу проходить через усі нагнітачі, тоді як необхідний для подолання мережевого опору тиск дорівнює сумі тисків, що створюють кожен агрегат. Оскільки кінетична енергія, надана потоку першим нагнітачем, не втрачається на ударних процесах, підсумковий статичний тиск буде навіть більшим за просту суму статичних тисків окремих нагнітачів. Наприклад, три однакові агрегати у послідовній схемі здатні забезпечити повний тиск  $3P_1$  (1+1+1).

Якщо малопотужний нагнітач працює послідовно з потужнішим, його подача може зрости до значень, що значно перевищують власну нормативну продуктивність. У такій ситуації менш потужний агрегат фактично створює додатковий гідравлічний опір для потужнішого, і при збереженні напрямку потоку ( $L > 0$ ) різниця тисків на вході та виході змінює знак.

Робота нагнітача є фізично можливою в таких режимах:

- $L > 0, P > 0$  (I квадрант);
- $L < 0, P > 0$  (II квадрант);
- $L > 0, P < 0$  (IV квадрант).

Функціонування в III квадранті неможливе, оскільки потік не здатен

рухатися назад ( $L < 0$ ), якщо тиск до нагнітача вищий, ніж після нього. У практиці характеристики зазвичай визначають лише в I квадранті, тобто під час нормальної роботи, оскільки дослідження в II та IV квадрантах потребують спеціального дослідницького обладнання.

Найбільш прогресивним способом регулювання роботи компресорів є використання частотних перетворювачів. Вони забезпечують плавну зміну частоти обертання електродвигуна, дозволяють підтримувати потрібний тиск у системі за будь-яких витрат газу та зменшують енергоспоживання. За малої витрати газу двигун працює на низькій швидкості, необхідній лише для підтримки номінального тиску, не споживаючи зайвої енергії. Коли витрата збільшується, перетворювач підвищує частоту обертання, збільшуючи продуктивність компресора за умови стабільного тиску.

На рисунку 1.8 наведено функціональну схему керування електроприводом компресора з використанням частотного перетворювача Micromaster440 виробництва компанії «Siemens».

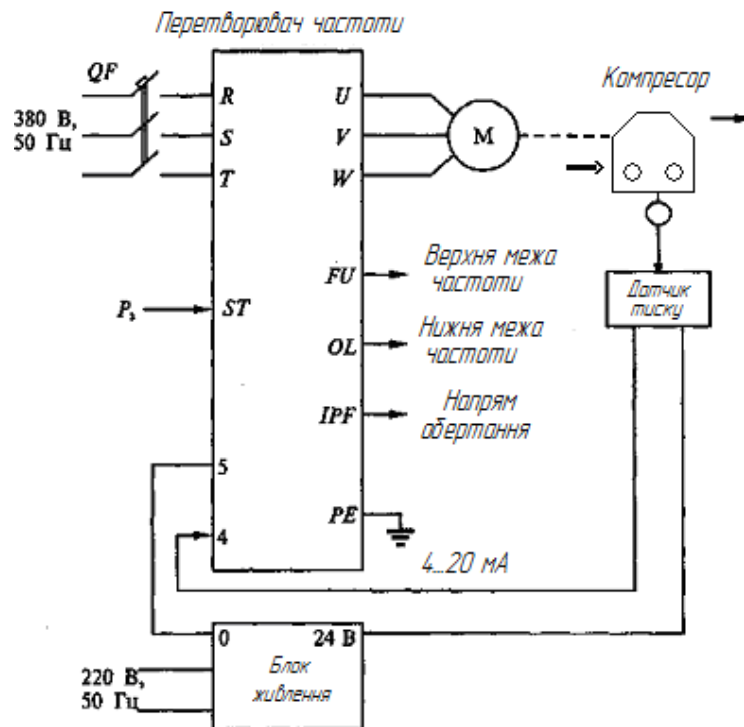


Рисунок 1.8 – Функціональна схема регулювання електродвигуна компресора з використанням перетворювача частоти

На вхід системи подаються сигнали завдання тиску та сигнал реального тиску, що отримується з датчика тиску, встановленого в ланцюзі зворотного зв'язку. Відхилення між реальним та заданим значеннями тиску перетворюється ПІД-регулятором на сигнал завдання частоти для перетворювача. Під впливом сигналу завдання перетворювач змінює частоту обертання електродвигуна компресора та прагне привести різницю між заданим та реальним значеннями до нуля.

Ця схема є модульною і застосовна до створення проекту, у якому буде реалізований алгоритм управління.

Сучасні перетворювачі частоти дозволяють створювати системи управління (СУ) без додаткових апаратних засобів, оскільки мають вбудовані програмні функції, що дозволяють реалізовувати порівняльний вузол і ПІД-регулятор. Однак у складних системах регулювання тиску в системі з використанням простих засобів реєстрації не дає бажаного ефекту. Тому даний спосіб регулювання поєднують з мікропроцесорною системою управління.

Система управління (рисунок 1.9) включає мікропроцесорну систему і перетворювач частоти, що дозволяє регулювати подачу компресора зміною його частоти обертання.

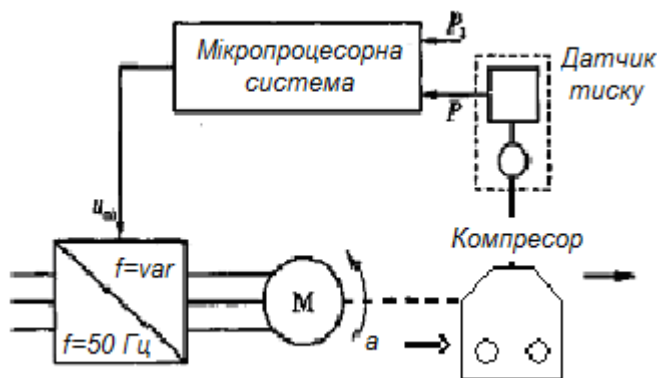


Рисунок 2.9 – Мікропроцесорна система управління

Формування правил обробки вхідних та вихідних сигналів, а також алгоритмів прийняття рішень базується на програмному забезпеченні, закладеному в контролер системи керування, який відслідковує перебіг технологічного процесу.

Величина тиску  $P$  визначається відповідним датчиком, сигнал з якого після 12-розрядного аналого-цифрового перетворення надходить до мікропроцесорного блока управління у вигляді цілочисельного значення в діапазоні 0–4000.

Для підвищення якості керування в системі застосовують динаміко-математичні моделі, що враховують складні закономірності зміни параметрів середовища. Крім того, система використовує низку похідних параметрів, необхідних для розрахунків. Одним із таких є швидкість зміни тиску  $v_P$ , яка дозволяє оцінювати динаміку процесу та формує специфіку внутрішньої логіки регулювальних дій.

Під час керування за допомогою частотного перетворювача швидкість обертання електроприводу компресора задається сигналом  $v_\omega$ , який формується цифро-аналоговим виходом мікропроцесорного контролера. Керуючий сигнал визначається у вигляді цілого числа, що задає необхідну частоту обертання. У термінах лінгвістичних змінних зміна частоти може мати кілька рівнів, залежно від потрібної точності управління та складності динамічної моделі.

Використання частотно-регульованого електроприводу забезпечує низку додаткових переваг:

- зменшення зношування комутаційної апаратури завдяки відсутності значних пускових струмів;
- оптимізація тиску в пневматичній мережі та зниження втрат стислого повітря;
- збільшення ресурсу електродвигуна через зменшення навантаження та усунення важких режимів пуску.

## 2. СТВОРЕННЯ ЛОГІЧНОЇ МОДЕЛІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ КОМПРЕСОРНОЇ УСТАНОВКИ

2.1 Аналіз і формування структурної схеми конструктивних та технологічних елементів механізму руху поршневого компресора

Поршневий компресор є складним технічним об'єктом, у складі якого можуть налічуватися від  $10^4$  до  $10^6$  конструктивних (КЕ) та технологічних елементів (ТЕ).

Одним із найефективніших підходів до проєктування таких систем є впровадження сучасних інформаційних технологій, зокрема застосування CALS-методології. Ця концепція формує набір правил та вимог, що регламентують взаємодію всіх учасників життєвого циклу виробу.

Широке використання новітніх ІТ спричинило зміну традиційних підходів до проєктування. Уже недостатньо створити лише геометричну чи математичну модель виробу та комплект креслень. Під час моделювання необхідно отримувати повноцінні динамічні просторові моделі, які відображають структуру виробу, характеристики елементів і характер їх роботи. Формування такої електронної моделі є ключовою метою CALS-технологій.

Згідно з принципами CALS, розроблення складних технічних систем повинно починатися зі структурно-функціонального аналізу та моделювання як повної системи, так і її підсистем. Для цього використовують сімейство методологій IDEF, які дозволяють досліджувати структуру об'єктів, їхні параметри та функціональні характеристики. У сучасний стек входять такі методики:

- IDEF0 — метод функціонального моделювання, що будує графічну модель системи у вигляді взаємопов'язаних функцій та потоків

інформації й матеріальних ресурсів. Це початковий етап аналізу будь-якої системи.

- IDEF1 — засіб побудови інформаційної моделі, що описує структуру інформаційних потоків, необхідних для підтримки функціонування системи.
- IDEF1X — метод для проектування реляційних структур даних («сутність–зв’язок»), що використовується при створенні баз даних.
- IDEF2 — метод динамічного моделювання, який дозволяє описати розвиток поведінки системи в часі.
- IDEF3 — метод побудови сценаріїв та послідовностей операцій для різних процесів системи.
- IDEF4 — інструмент об’єктно-орієнтованого моделювання та проектування, що описує структуру об’єктів і їх взаємодію.
- IDEF5 — метод формування онтології (словника) системи, який дозволяє визначити терміни, правила та властивості об’єктів для їх достовірного опису.
- IDEF9 — методологія моделювання вимог до системи.

Ключовою вимогою системного підходу є розгляд об’єкта як єдиної цілісної системи — «чорної скриньки» з конкретно визначеними входами, виходами та межами. Контекст моделі встановлює область охоплення, описує взаємозв’язки з оточуючими процесами та визначає єдиний суб’єкт моделювання. У IDEF0 ця інформація відображається на контекстній діаграмі, а схеми нижчих рівнів деталізують структуру та функції системи.

Контекстна діаграма механізму руху та балансування поршневого компресора представлена на рисунку 2.1, а структурно-функціональна модель подано на рисунку 2.2.

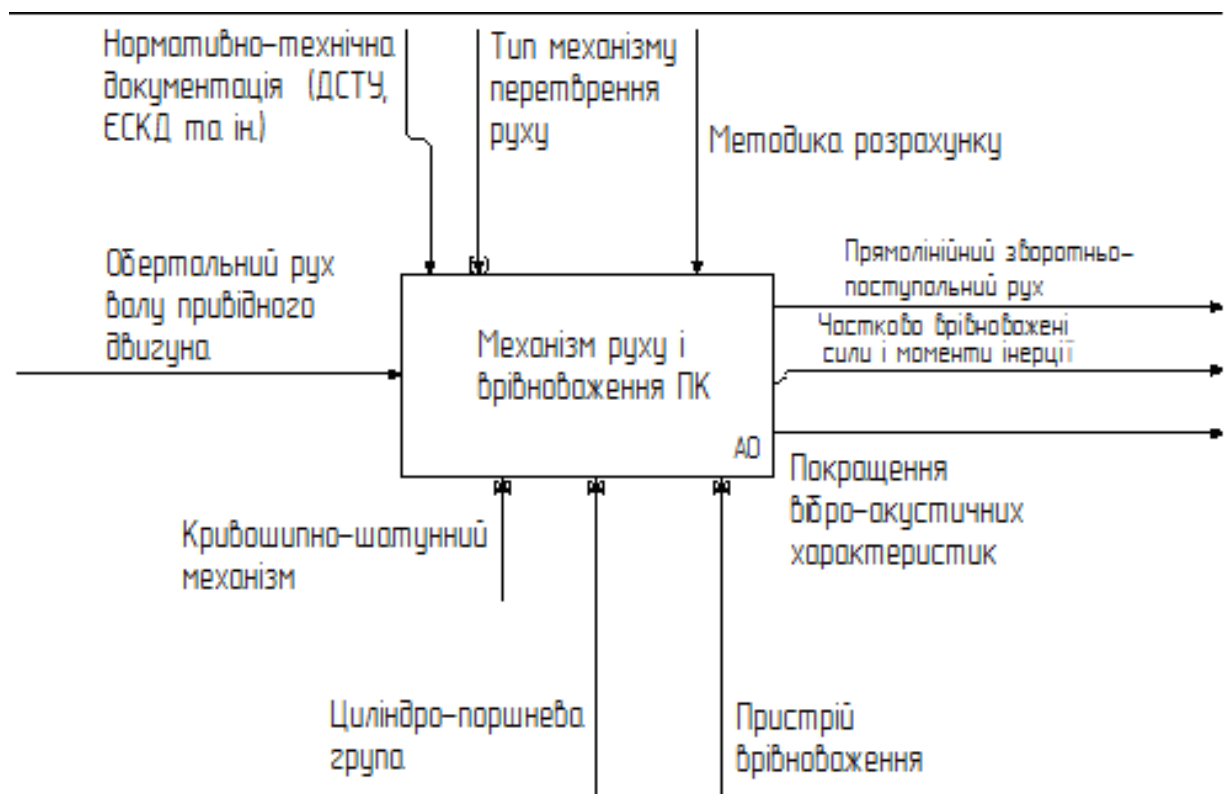


Рисунок 3.1 - Контекстна діаграма механізму руху та врівноваження ПК

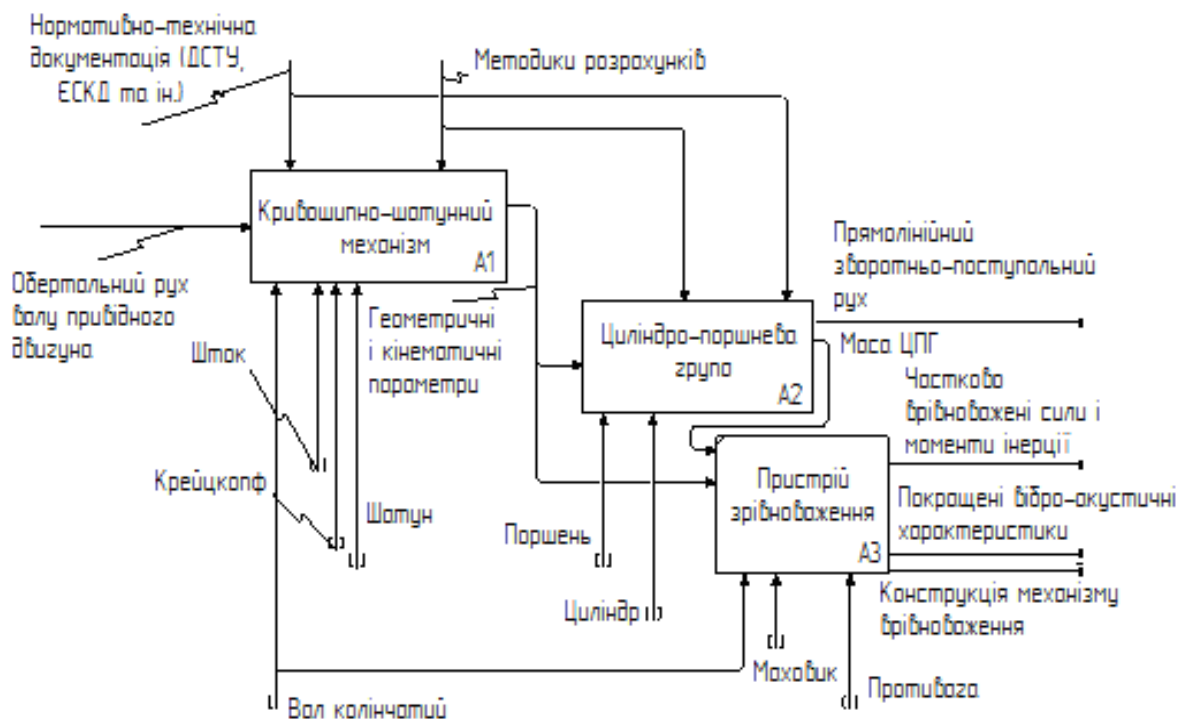


Рисунок 2.2 – Структурно-функціональна діаграма механізму руху та врівноваження ПК

Методологія IDEF0 базується на принципі декомпозиції, який спирається на об'єктно-орієнтований підхід, тобто на розгляд об'єкта проєктування як сукупності взаємозалежних елементів. Інформація, отримана в ході аналізу, подається у вигляді ієрархічної структури, що відображається графічно у формі деревовидних діаграм.

Відповідно до об'єктно-орієнтованих принципів проєктування необхідно здійснити детальне розбиття структури виробу до рівня конструктивних (КЕ) та технологічних елементів (ТЕ) із забезпеченням їх чіткої ідентифікації за допомогою єдиної системи позначень. У цьому зв'язку пропонується розглянути структурну модель механізму руху та балансування поршневого компресора як системи (СВПК), у якій виділено ключові конструктивні, технологічні та функціональні складові.

На верхньому, нульовому рівні ієрархії (рисунок 3.3) знаходиться СВПК, що розглядається як метасистема. У її межах виділено три підсистеми першого рівня: кривошипно-шатунний механізм, циліндро-поршнева група та механізм врівноваження. Подальша декомпозиція передбачає детальний аналіз кожної з цих підсистем, які в наступних рівнях структури розглядаються як окремі системи нижчого порядку.

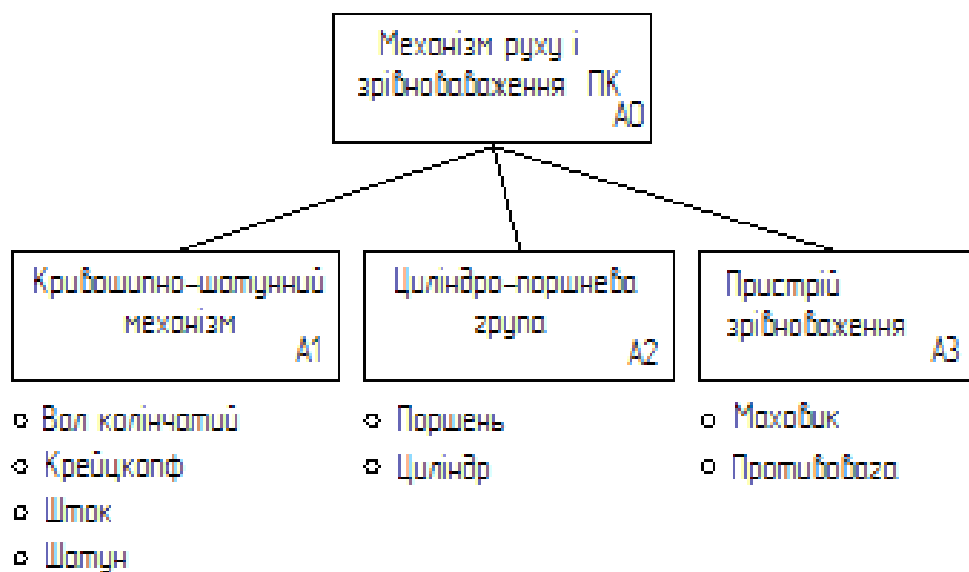


Рисунок 2.3 – Верхні рівні (0-й – 2-й) діаграми вузлів

Детальна декомпозиція кожної підсистеми на всіх рівнях дала змогу сформуванню діаграму, що виступає структурною моделлю досліджуваного об'єкта. У ній відображено основні конструктивні та технологічні елементи, а також їхні ключові параметри. Побудована схема враховує специфіку конструкції та забезпечує достатньо повний опис модельованої системи до рівня КЕ та ТЕ.

## 2.2 Аналіз віброакустичних властивостей сформованої моделі

У поршневих машинах через зворотно-поступальний рух поршня формується нестационарний характер динамічних навантажень, що відрізняється від роторних агрегатів складнішою структурою вібраційного процесу (рисунок 2.4). Це спричиняє появу додаткових джерел вібрацій, серед яких:

- дисбаланс інерційних сил обертових ( $F_r$ ) та поступальних ( $F_s$ ) мас;
- момент інерційних сил  $M_i$  для обох типів мас;
- перекидний момент  $M_{opr}$ ;
- крутильні коливання колінчастого вала;
- зміна тиску газу в циліндрах та міжступневих трубопроводах;
- ударні взаємодії елементів механізму руху, циліндро-поршневої групи та клапанного механізму.

Важливою особливістю діагностування поршневих агрегатів є те, що коливання, пов'язані з несправностями, накладаються на загальний фон вібрацій від неврівноваженості мас. Це зумовлює необхідність застосування двох підходів:

1. дослідження вібрацій компресора як суцільної системи, що реагує на власну неврівноваженість;
2. аналіз локальних коливань окремих вузлів, спричинених дефектами.

Ще однією характерною особливістю поршневих машин є робота елементів механізму руху в умовах періодично змінних навантажень, що часто призводить до виникнення ударних процесів. Визначення швидкості зіткнень та моменту появи ударних імпульсів для кожної пари елементів дає змогу ідентифікувати їх у віброакустичному сигналі

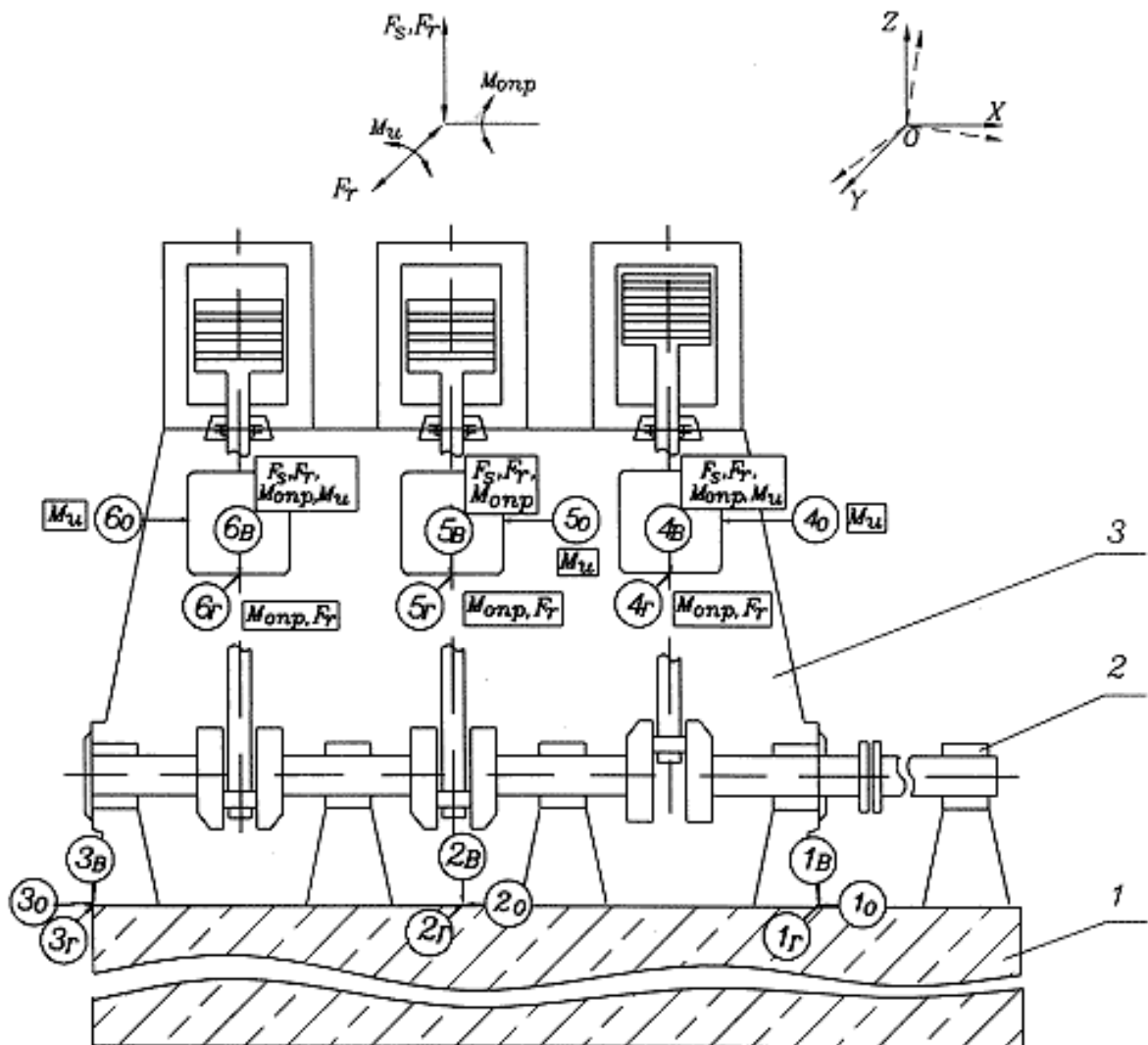


Рисунок 2.4 – Схема компресора з контрольними точками вимірювання вібрації: 1-6 – контрольні точки; 1 – фундамент; 2 – електродвигун; 3 – станина компресора.

Проведений динамічний аналіз механізму руху поршневого компресора з урахуванням зазорів у кінематичних з'єднаннях дав можливість отримати наступні результати:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_j} - \frac{\partial T}{\partial q_j} = Q_j + Q_j^R \quad (2.1)$$

$$Q_j^R = \sum_{a=1}^S \lambda_a \frac{\partial f_a}{\partial q_j}$$

де  $\lambda_a$  – множник, що характеризує реакцію зв'язку  $a$ ;

$T$  – кінетична енергія механічної системи (механізму руху компресора),

$Q_j^R$  і  $Q_j$  – відповідно узагальнена реактивна та активна сили;

$f_a$  – рівняння зв'язку контактної руху деталей;

$R$  – кількість узагальнених координат.

При цьому в якості узагальнених координат  $q_j$  розглядався відносний рух деталей спряжених в полі зазору і кут повороту колін валу. Зазори враховувалися у вузлах "поршень-циліндр", "черевик крейцкопфа-направляюча", а також у підшипниках ковзання крейцкопфа та шатуна. Введення в рівняння руху реактивної складової дозволило описати весь цикл віброударного режиму роботи механізму за допомогою тих самих залежностей.

Для виділення інформативних діагностичних ознак в амплітудному спектрі, за результатами моделювання, було визначено основний характер взаємодії функціональних вузлів:

$$P(k) = \frac{2\tau \max T}{\pi} \frac{\cos\left(\frac{k\pi\tau}{T}\right)}{T^2 - 4k^2\tau^2} \quad (2.2)$$

### 2.3 Моделювання алгоритму керування у програмному пакеті математичного моделювання MATLAB

Для проведення розрахункового аналізу було створено математичні моделі різних варіантів циклів зрідження — як одноступінчастих, так і двоступінчастих. Ці моделі працюють у межах параметрів тиску та температури газу на вході в УСПГ: 3,5–5,5 МПа та 233–288 К відповідно.

Моделювання динамічної поведінки механізму руху компресора з урахуванням наявних зазорів дає можливість визначити силові навантаження у вузлах, що необхідні для подальших розрахунків на статичну та втомну міцність. Наразі такі розрахунки виконуються згідно з описаними вище методиками, де нормальні та дотичні складові реакцій знаходяться на основі кінестатичного підходу. Проте результати теоретичних досліджень показують, що цей метод є коректним лише в наближеному вигляді. У моменти ударних контактів пікові значення сил можуть перевищувати відповідні реакції механізму без урахування зазорів більш ніж удвічі.

Крім того, як видно з рисунка 3.4, у режимі контактної взаємодії деталей виникають високочастотні модульовані коливання, що мають періодичний характер зміни навантаження у вузлі. Амплітуда реакції при цьому циклічно змінюється від максимального до мінімального значення. Частота таких коливань залежить від швидкості обертання колінчастого вала, величини зазорів у кінематичних з'єднаннях, умов тертя та інших факторів. Виявлено, що поява ВЧ коливань пов'язана з тим, що відносний рух елементів механізму відбувається не плавно, а стрибкоподібно, що обумовлено наявністю зазорів у підшипникових опорах.

Для отримання оптимальних характеристик компресорної установки на етапі адаптації можна не враховувати високочастотні складові вібрацій, оскільки їхній вплив є незначним і частотно узгоджується з режимом усталеного функціонування двигуна. Водночас всі елементи системи

взаємодіють через спільний параметр, приведений до загального рівня відносно опорної точки. Тому узагальнене рівняння, яке встановлює взаємозв'язок між вхідними вузлами компресора та параметрами газового потоку в трубопроводі, можна подати у такому вигляді:

$$W(p) = \frac{K_{no}}{p(T_{no}^2 p^2 + 2\xi T_{no} p + 1)} \quad (2.3)$$

При врахуванні наявності у системі заходів стабілізації, які реалізується у вигляді контуру регулювання як швидкості, так і струму якоря двигуна, можна знехтувати динамічними коефіцієнтами опору газу в трубопроводі і поштовхоподібні сигнали на виході.

#### 2.4 Синтез системи керування приводу компресорної установки

Складемо структурні схеми вихідної системи. Визначимо передавальні функції ланок (таблиця 2.1).

Таблиця 2.1 – Визначення передавальної функції ланок

Назва ланки	Передаточна функція	
	Формула	Розрахунок
Компресор	$W_{\kappa}(p) = \frac{K_{no}}{p(T_{no}^2 \cdot p^2 + 2\xi T_{no} \cdot p + 1)}$	$W_{\kappa}(s) = \frac{0.7}{S(0.009S^2 + 0.0054S + 1)}$
Ланка ланцюга якоря	$W_{\text{ЛЯ}}(p) = \frac{1}{R_{\text{Я}}(T_{\text{Я}}p + 1)}$	$W_{\text{ля}}(s) = \frac{1}{100(0.5S + 1)}$
Механічна частина двигуна	$W_{\text{МЧ}}(p) = \frac{R_{\text{Я}}}{cT_{\text{М}}p}$	$W_{\text{мч}}(s) = \frac{100}{10^5 * 0.02S}$
Перетворювач	$W(p) = \frac{K_{\text{П}}}{T_{\text{П}}p + 1}$	$W_n(s) = \frac{7}{0.01S + 1}$

$$\begin{aligned}
W_{вих} &= W_n \times W_{ля} \times W_{мч} \times W_{к} = \\
&= \frac{7}{0.01S+1} \times \frac{1}{100(0.5S+1)} \times \frac{100}{10^5 * 0.02S} \times \frac{0.7}{S(0.009S^2 + 0.0054S + 1)} = \\
&= \frac{0.00245}{0.0078s^4 + 0.5154s^2 + s^2} \tag{2.4}
\end{aligned}$$

Перевіримо вихідну систему на стійкість, тобто отримаємо графік перехідного процесу (рисунок 2.5):

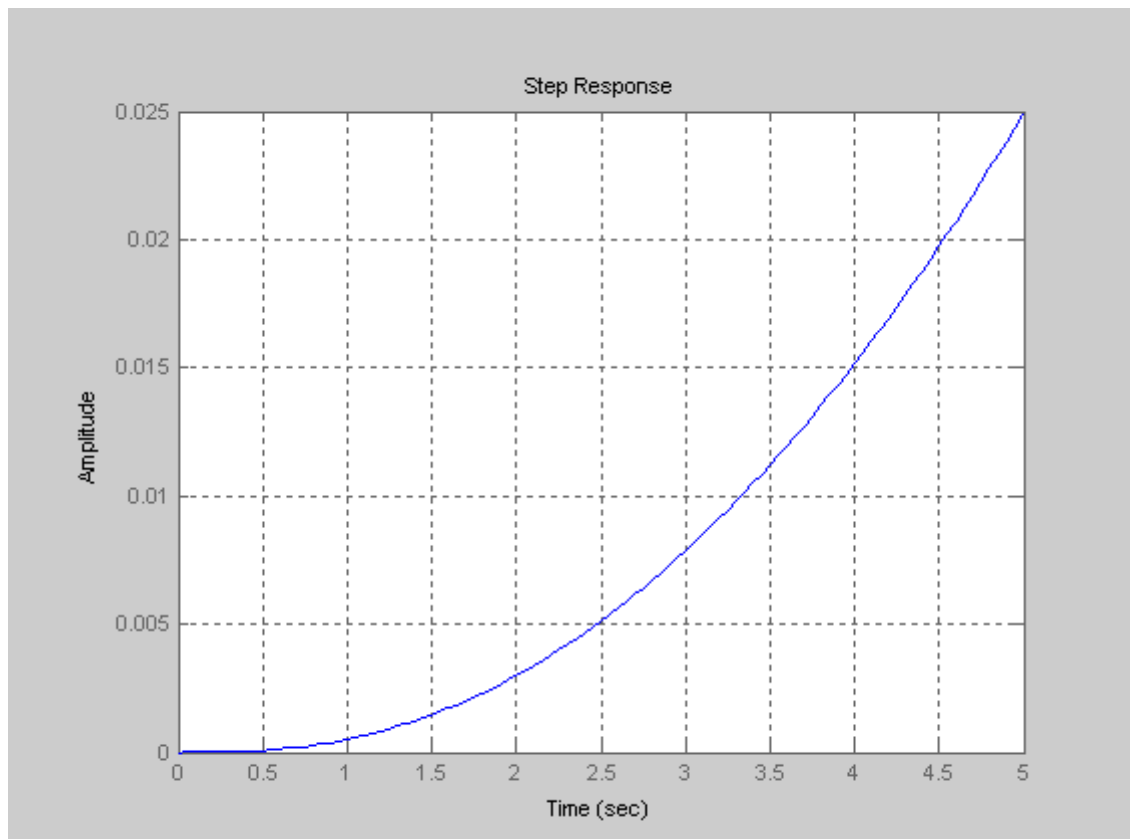


Рисунок 2.5 – Графік перехідного процесу

З рисунку видно, що перехідний процес є розбіжним, отже вихідна система нестійка і потребує регулювання.

Перший контур регулювання представлено на рисунку 2.6.

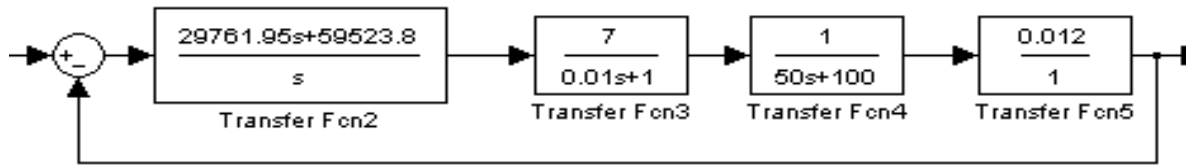


Рисунок 2.6. – Структурна схема системи автоматичного регулювання першого контуру:

$$K_T = 0,1/8 = 0,012 \quad (2.5)$$

Знайдемо вихідну передавальну функцію 1 контуру:

$$W_{вих} = W_n \times W_{ля} \times K_T, \quad (2.6)$$

$$W_{вих} = \frac{7}{0,01s} \times \frac{1}{100(0.5s+1)} \times 0.012 = \frac{0.00084}{(0.01s+1)(0.5s+1)}, \quad (2.7)$$

Налаштовуватимемо внутрішній контур на технічний оптимум.

При налаштуванні на технічний оптимум бажана передавальна функція прийме вигляд:

$$W_{жс1}(p) = \frac{1}{K_T 2T_\mu p(T_\mu p + 1)} = \frac{1}{0.012 \cdot 2 \cdot 0.02 p(0.02 p + 1)} = \frac{1}{0.00084 p(0.02 p + 1)} \quad (3.8)$$

З однієї сторони  $W_{жс1}(p) = W_{рез1}^*(p) \times W_{вих1}(p)$ , відповідно:

$$W_{pez1}(p) = \frac{W_{\delta l}(p)}{W_{vux1}(p)} \quad (2.9)$$

$$W_{pez1}(p) = \frac{59523,8(0,5p+1)}{p} \quad (2.10)$$

Виконаємо перевірку. Знайдемо бажану передавальну функцію замкнутої системи:

$$\begin{aligned} \Phi_{\delta 1} &= \frac{W_{\delta l}(p)}{1 + W_{\delta l}(pp)} = \frac{\frac{1}{0,02p(0,01p+1)}}{1 + \frac{1}{0,02p(0,01p+1)}} = \frac{1}{0,02p(0,01p+1) + 1} = \\ &= \frac{1}{0,0002p^2 + 0,02p + 1} \approx \frac{1}{0,02p + 1} \end{aligned} \quad (2.11)$$

Знайдемо передавальну функцію замкнутого першого контуру:

$$\Phi_1(S) = \frac{W_{pez1} \times W_{vux1}}{1 + W_{pez1} \times W_{vux1}} = \frac{1}{0,0002p^2 + 0,02p + 1}, \quad (3.12)$$

Для подальших розрахунків прийmemo:

$$\Phi_1(S) \approx \frac{1}{0,02s + 1}, \quad (3.13)$$

Розрахунки виконані правильно оскільки  $\Phi_1(S) = \Phi_{\delta 1}(S)$ .

Введемо другий контур регулювання

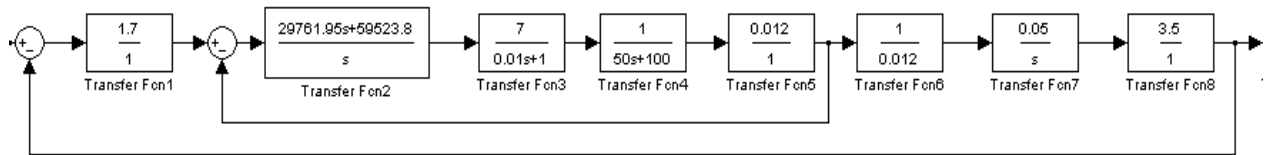


Рисунок 2.7 – Структурна схема системи автоматичного регулювання другого контуру

$$K = 27,8 / 8 = 3,5 \quad (2.14)$$

$$W_{вх2}(p) = K_T^{-1} \cdot \Phi_1(p) \cdot W_{МЧ}(p) \cdot K_C = \frac{1}{0,02p+1} * \frac{1}{0,012} * 3,5 * \frac{100}{10^5 * 0,02p} =$$

$$= \frac{230}{0,02p(0,02p+1)} \quad (2.15)$$

Бажана передатна функція 2 контуру має вигляд:

$$W_{\delta 2}(p) = \frac{1}{4k_c T_n p(T_n p + 1)} \quad (2.16)$$

$$W_{\delta 2} = \frac{0,07}{0,01S(0,02S + 1)} \quad (2.17)$$

$$W_{рег2}(p) = \frac{W_{\delta 2}(p)}{W_{вх}(p)} = 0,85 \frac{0,02p}{0,01p} = 1,7 \quad (2.18)$$

Знайдемо бажану передавальну функцію замкнутої системи

$$\Phi_{\delta 2}(p) = \frac{W_{\delta 2}(p)}{1 + W_{\delta 2}(p)} = \frac{\frac{0,07}{0,01p(0,02p+1)}}{1 + \frac{0,07}{0,01p(0,02p+1)}} = \frac{0,07}{0,01p(0,02p+1) + 0,07} =$$

$$= \frac{1}{0,0028p^2 + 0,14p + 1} \quad (2.19)$$

Знайдемо передавальну функцію замкнутого другого контуру

$$\Phi_2(p) = \frac{W_{pez2} \cdot W_{вix2}}{1 + W_{pez2} \cdot W_{вix2}} = \frac{1}{0,0028p^2 + 0,14p + 1}, \quad (2.20)$$

$$\Phi_2(S) \approx \frac{1}{0,14p + 1} \quad (3.21)$$

Введемо третій контур регулювання:

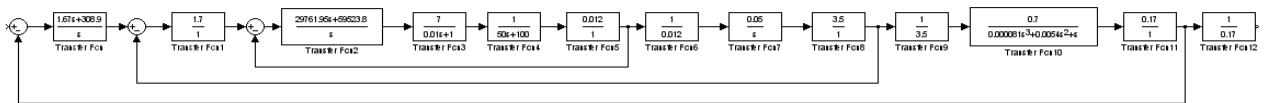


Рисунок 2.8 – Структурна схема системи автоматичного регулювання третього контуру

$$K_D = 8/60 = 0.14 \quad (3.22)$$

$$\begin{aligned} W_{вix2}(p) &= K_C^{-1} \cdot \Phi_2(p) \cdot W_K(p) \cdot K_D = \frac{1}{0,14p + 1} * \frac{0,7}{p(0,009^2 p^2 + 0,0054p + 1)} * \frac{1}{3,5} * 0,17 = \\ &= \frac{0,033}{(0,14p + 1)p(0,009^2 p^2 + 0,0054p + 1) * 0,28} \end{aligned} \quad (2.23)$$

Бажана передатна функція 3 контуру має вигляд

$$W_{ж2}(p) = \frac{1}{8k_D T_M p (T_M p + 1)}, \quad (2.24)$$

$$W_{ж2}(S) = \frac{0,74}{0,02S(0,02S + 1)} \quad (2.25)$$

$$W_{\text{РЕГ3}}(p) = \frac{W_{\text{ж2}}(p)}{W_{\text{ИСХ2}}(p)} = \frac{(0.0054p + 1)p * 0.28}{1.36 * 0.02p * 0.033} = \frac{308.9(0.0054p + 1)}{p} \quad (2.26)$$

Знайдемо бажану ПФ замкнутої системи

$$\Phi_{\text{ж3}}(p) = \frac{W_{\text{ж3}}(p)}{1 + W_{\text{ж3}}(p)} = \frac{\frac{0.74}{0.02p(0.02p+1)}}{1 + \frac{0.74}{0.02p(0.02p+1)}} = \frac{0.74}{0.02p(0.02p+1) + 0.74} = \frac{37}{0.02p^2 + p + 1}; \quad (2.27)$$

Знайдемо ПФ замкнутого першого контуру

$$\Phi_2(p) = \frac{W_{\text{рез2}} * W_{\text{вих2}}}{1 + W_{\text{рез2}} * W_{\text{вих2}}} = \frac{37}{0.02p^2 + p + 1}, \quad (2.28)$$

Знайдемо ПФ замкнутої та розімкнутої системи.

$$W_{\text{роз}} = \Phi_3 * \frac{1}{K_D} = \frac{37}{p(0.02p + 1)} * \frac{1}{0.17} = \frac{217.6}{p(0.02p + 1)}, \quad (2.29)$$

$$W_{\text{зам}} = \frac{W_{\text{раз}}}{1 + W_{\text{раз}}} = \frac{1}{0.00009p^2 + 0.0046p + 1}, \quad (2.30)$$

Перевіримо систему на стійкість, тобто отримаємо графік перехідного процесу (рисунок 2.10):

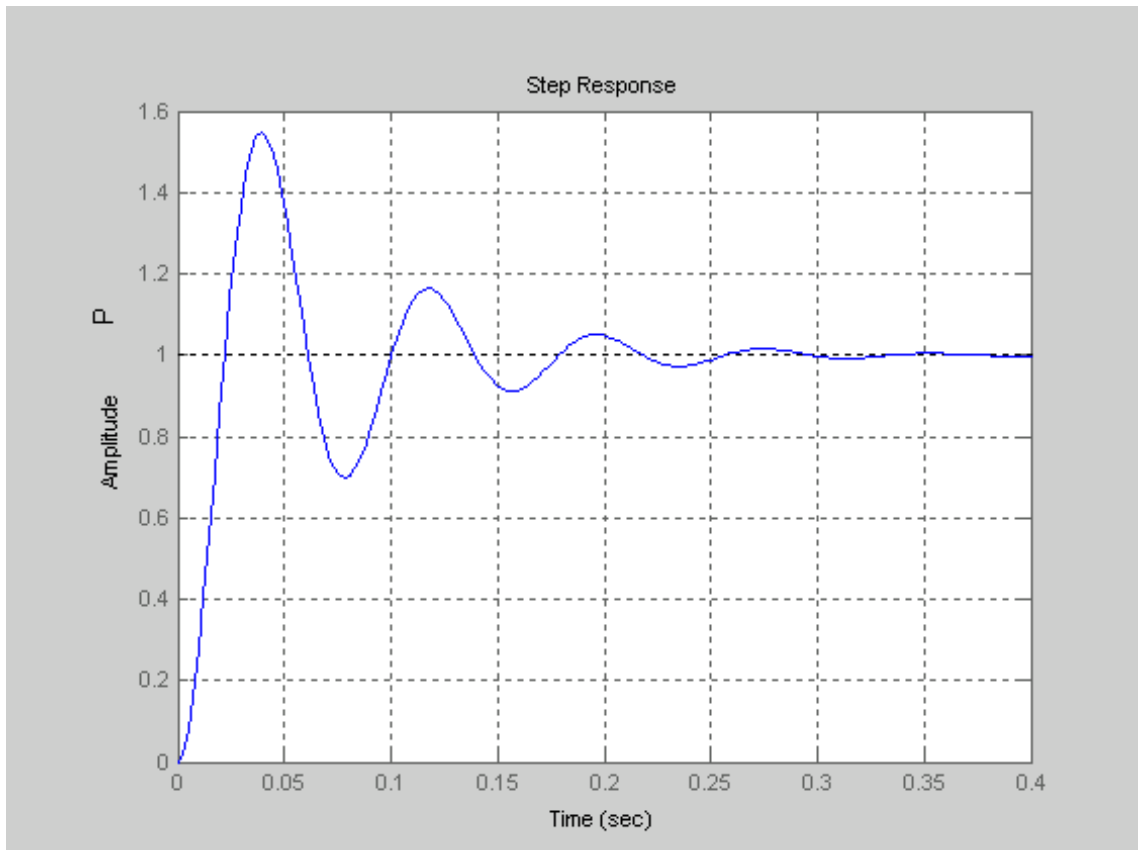


Рисунок 2.10 – Графік перехідного процесу

З рисунка 2.10 видно, що час перехідного процесу дорівнює 0,3 сек, отже розрахований регулятор підходить для даної системи і вона є стійкою.

## 2.5 Реалізація коригувальних пристроїв на регуляторах

У зв'язку з тим, що контролер, який використовується в системі керування ТП, працює дискретно, то й регулятори мають бути представлені в дискретному вигляді (апроксимація Тустена або  $Z$  - перетворення).

Існують різні методи синтезу цифрових регуляторів, засновані на теорії  $Z$  – перетворення та простору станів. Ці методи вимагають дуже громіздких

математичних перетворень і використовують у особливо точних системах управління.

Розглянемо більш простий підхід, що полягає у попередньому синтезі безперервних регуляторів відомими методами теорії автоматичного регулювання для безперервних систем та подальшому переході до цифрового регулятора, еквівалентного синтезованого аналогового.

Завдання переобладнання аналогових регуляторів вирішується як завдання апроксимації передавальної функції даного регулятора дискретною функцією передачі цифрового регулятора.

В інженерній практиці найбільше застосування знайшла апроксимація, отримана на основі білінійного перетворення або апроксимація Тустена.

Відповідно до цієї апроксимації:

$$z = \frac{1 + p \frac{T}{2}}{1 - p \frac{T}{2}}; p = \frac{2}{T} \cdot \frac{z - 1}{z + 1}, \quad (2.31)$$

де  $T$  - інтервал дискретизації за часом.

Однак, цим методом можна користуватися тільки тоді, коли інтервал дискретизації за часом для цифрової системи  $T$  малий у порівнянні з найменшою постійною системою часу управління  $T_{\mu}$ . Відповідно до теореми Котельникова - Шеннона безперервний сигнал досить точно відновлюється за сукупністю його дискретних значень, якщо

$$T \leq 0,5 T_{\mu}. \quad (2.32)$$

На практиці необхідно мати більший коефіцієнт запасу

$$T \leq (0,1 - 0,2) T_{\mu}. \quad (2.33)$$

Визначимо період дискретизації (T): це зворотна величина від частоти контролера, але краще взяти частоту АЦП, яка у разі дорівнює 48КГц=48000Гц. Вибір частоти АЦП пов'язані з тим, що швидкість обробки інформації насамперед залежить від швидкості роботи АЦП.

$$T = \frac{1}{48000} = 0.0000208, \quad (2.34)$$

Перевіримо дотримання умови (теорема Котельникова – Шеннона)

$$T \leq 0,5 T_{\mu}. \quad (2.35)$$

$$0.00001 \leq 0,5 * 0.02, \quad (2.36)$$

$$0.00001 \leq 0.01, \quad (2.37)$$

Умови дотримуються, тому період дискретизації обраний правильно.

Зробимо переведення отриманих регуляторів у дискретні. Синтез цифрових регуляторів за допомогою програми MatLab

$$W_{\text{рег1}}(p) = \frac{29761.95p + 59523.8}{p}, \quad (2.38)$$

$$W_{\text{рег1}}(z) = \frac{2978z - 2976}{z - 1}, \quad (2.39)$$

$$W_{\text{рег1}}(p) = 1.7, \quad (2.40)$$

$$W_{\text{рег1}}(z) = 1.7, \quad (2.41)$$

$$W_{\text{рег3}}(p) = \frac{1.67p + 308.9}{p}, \quad (2.42)$$

$$W_{\text{рег3}}(z) = \frac{1.673z - 1.667}{z - 1}, \quad (2.43)$$

### 3. АПАРАТНА РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ КОМПРЕСОРНОЮ УСТАНОВКОЮ

#### 3.1 Вибір платформи системи керування та відповідних контролерів

Система управління, що відповідає сучасним вимогам, може бути або відкритого типу з можливістю інтеграції стороннього програмного забезпечення, або постачатися як готовий комплекс апаратних та програмних засобів. У даному випадку обрано другий варіант, оскільки він забезпечує ряд важливих переваг:

- повний комплект технічної та програмної документації для встановлених компонентів;
- відсутність потреби у додатковому програмному забезпеченні завдяки продуманій структурі САУ та чітко реалізованим функціям керування;
- наявність центра технічної підтримки;
- широка база практичних прикладів реалізованих систем.

Однією з таких комплексних систем є повнофункціональна розподілена система управління технологічним процесом DeltaV. У її складі польові пристрої FOUNDATION FIELDBUS, контролери та робочі станції взаємодіють між собою, забезпечуючи управління на відповідних рівнях.

Ця система здобула популярність на українському ринку завдяки надійності та великій кількості модулів, що дозволяє створювати на її основі практично будь-які складні системи управління. Для ефективного проєктування DeltaV необхідно чітко визначити вимоги до інтерфейсу програмного забезпечення процесу та належним чином налаштувати робочу станцію.

Системи DeltaV добре підходять для управління мережами різного масштабу. Вони дозволяють гнучко планувати та моделювати конфігурацію

мережі так, щоб вона максимально відповідала конкретним вимогам управління процесом. На рисунку 3.1 наведено мінімальний комплект компонентів системи DeltaV, включаючи кількість робочих станцій, контролерів та необхідного обладнання, яке повинно входити до складу системи.

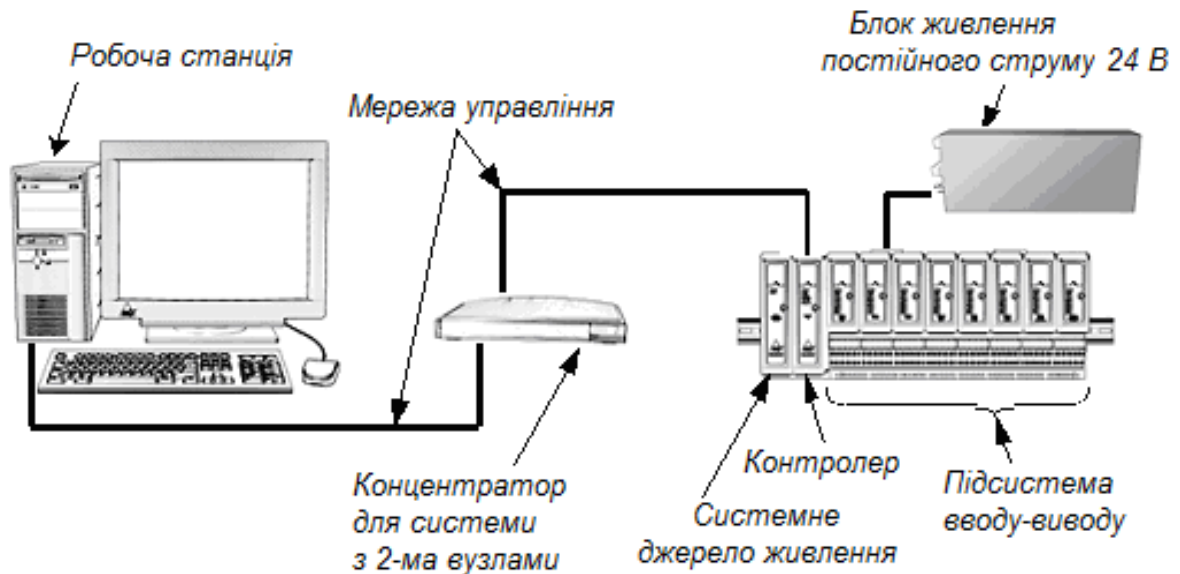


Рисунок 3.1 – Мінімальний комплект системи DeltaV

До складу комплекту компонентів входять:

- мережа управління, яка забезпечує обмін даними між робочими станціями та контролерами;
- робоча станція з графічним інтерфейсом для користувача;
- контролер, що здійснює керування та забезпечує обмін даними між підсистемою введення-виводу і мережею управління;
- підсистема введення-виводу для обробки сигналів від польових пристроїв;
- системне джерело живлення DeltaV;
- групове джерело живлення для польових пристроїв, інтегрованих у DeltaV;

– несучі панелі, що встановлюються на DIN-рейки та забезпечують розподіл живлення й передачу даних між контролером і платами введення-виводу.

Мережа керування DeltaV є ізольованою Ethernet-мережею, яка забезпечує обмін інформацією між контролером і операторською станцією. Для підключення ліній зв'язку використовуються Ethernet-концентратори та комутатори.

При проектуванні топології мережі враховуються такі вимоги:

- мережа керування може підтримувати до 120 вузлів;
- вона має бути повністю виділеною, що забезпечує високу продуктивність і надійність; підключення сторонніх пристроїв або інших мереж неприпустиме;
- взаємодія з обладнанням та мережами поза DeltaV здійснюється через інтеграційні станції.

Для нашої системи обрана симплексна топологія мережі керування з резервованими контролерами, схема якої наведена на рисунку 3.2.

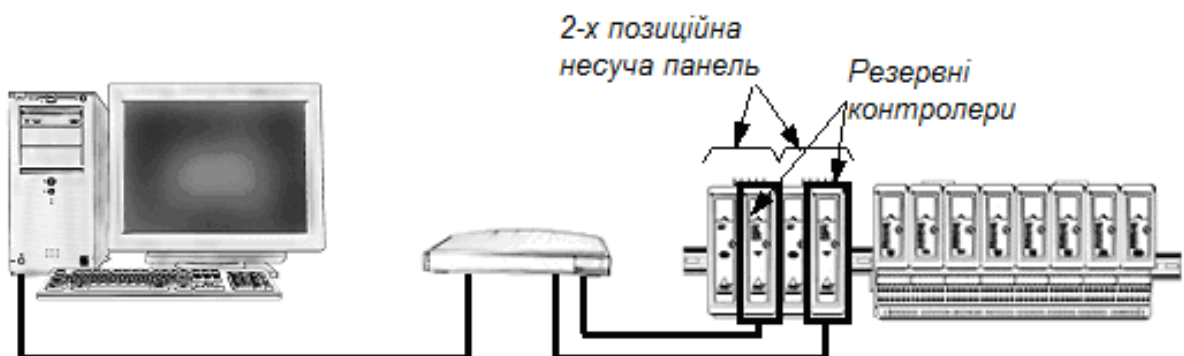


Рисунок 3.2 - Симплексна мережа управління і резервні контролери

Хоча резервний контролер використовує два порти концентратора, він вважається одним вузлом мережі.

За потреби збільшення відстані між вузлами застосовують:

- перетворювачі середовища передачі даних;

- каскадне з'єднання концентраторів;
- концентратори зі стековим підключенням;
- оптоволоконні лінійні подовжувачі.

Оскільки система допускає кілька варіантів модернізації, детально розглянемо один із них.

#### Перетворювачі середовища передачі даних

Такі перетворювачі дозволяють з'єднувати мідний кабель стандарту 10Base-T з оптичним кабелем і навпаки. Зазвичай їх встановлюють парами між портом концентратора та операторською станцією або контролером. Між перетворювачами прокладають оптоволоконний кабель, довжина якого може досягати сотень і навіть тисяч метрів.

Будь-яку робочу станцію чи контролер у мережі керування можна під'єднати до концентратора через такі перетворювачі, значно збільшуючи допустиму довжину лінії.

Перетворювачі, що застосовуються в DeltaV, мають відповідати стандартам IEEE 802.3 (Ethernet) і 10Base-FL (для оптоволокна), а також містити щонайменше один порт 10Base-T та пару ST-роз'ємів для оптичного кабелю. Для одного оптоволоконного сегмента потрібні два перетворювачі: один для переходу з міді на оптоволокно, інший — у зворотному напрямку.

Такі пристрої виробляють багато компаній, зокрема Black Box, Hirschmann, Transition Networks та інші. Існують моделі, здатні передавати сигнал на відстань від кількох сотень метрів до 15 км.

Згідно з рисунком 3.2, у системі використовується резервований контролер, що підвищує загальну надійність роботи. Резервований варіант складається з двох модулів. Контролер виконує керуючі функції та забезпечує обмін даними між мережею керування та підсистемою вводу-виводу.

Контролер може бути налаштований для виконання таких задач:

- збір і обробка даних;
- виконання обчислень;

- дискретне (покрокове) керування;
- неперервне регулювання;
- керування періодичними технологічними процесами (рецептурне керування).

На рисунку 3.3 наведено приклад монтажу резервованого контролера на двосекційних несучих панелях.

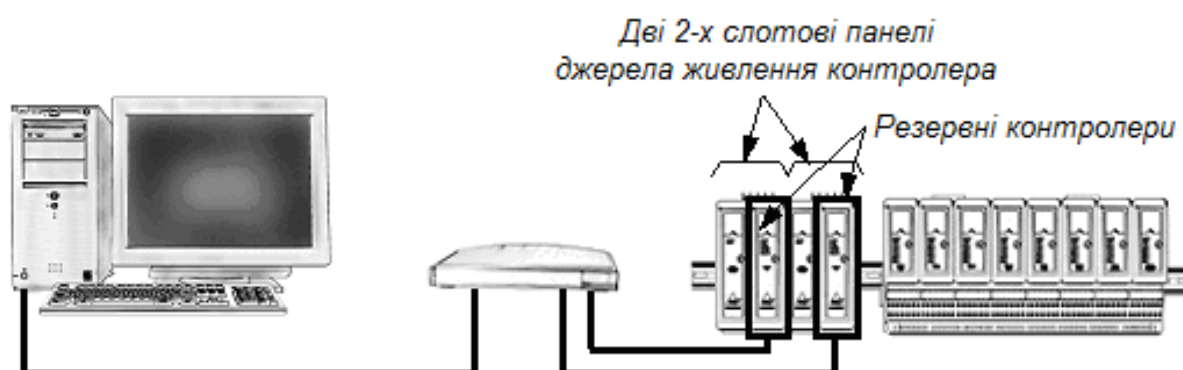


Рисунок 3.3 – Схема підключення зарезервованого контролера і несучої панелі

У системі DeltaV використовуються контролери трьох моделей: M3, M5 та M5 Plus. Варто зазначити, що при наявності більше трьох контролерів у системі додавання наступних пристроїв зменшує ефективність роботи. Кожен контролер встановлюється у правий слот двосекційної несучої панелі джерела живлення, тому для одного резервного контролера необхідно дві такі панелі. Для нашої системи обрано M5 Plus через його високу сумісність із пакетом Professional Plus.

Для повноцінного функціонування DeltaV потрібно провести комплексне ліцензування, що передбачає визначення:

- загальної кількості тегів параметрів пристроїв (ТПУ), які використовуються для моніторингу;
- кількості ТПУ, задіяних у керуванні процесами.

Теги, що застосовуються для моніторингу, виконують такі функції:

перегляд параметрів, архівацію даних, масштабування та формування сигналів тривоги. Якщо тег бере участь у керуванні процесом, його відносять до керуючих ТПУ.

Теги, призначені лише для відображення, не підлягають ліцензуванню та не враховуються у загальній кількості ТПУ. Вони проходять через контролер і інтеграційну станцію, проте не використовуються у керуючих модулях та логіці тривог, водночас можуть відображатися на екрані, записуватися у тренди та зберігатися в архіві.

Підсистема введення-виводу DeltaV може включати блоки для традиційного аналогового та дискретного вводу-виводу, модулів HART, послідовного інтерфейсу, польової шини FOUNDATION, а також шин AS-i і Profibus DP. Кожен інтерфейсний блок складається з електронної плати введення-виводу та клемного блоку. До контролера можна підключити до 64 інтерфейсних блоків у будь-якому поєднанні, якщо загальна кількість ТПУ не перевищує 500. Існує також іскробезпечна підсистема для підключення польових пристроїв у вибухонебезпечних зонах.

Для нашої системи обрано інтерфейсні блоки традиційного аналогового введення-виводу, послідовного інтерфейсу та польової шини FOUNDATION. Система підтримує уніфіковані аналогові сигнали (4–20 мА, 1–5 В, мілівольтні, омичні), а також стандартні вхідні сигнали термопар та термоопорів, що забезпечує сумісність із більшістю аналогових сенсорів.

Кожна плата послідовного інтерфейсу має два порти, кожен з яких може підтримувати до 16 наборів даних, де один набір включає до 100 регістрів або реле ПЛК. Порт RS-485 дозволяє шлейфове підключення до 16 пристроїв, а також реалізує функції тестування та організації локального пульта спостереження.

Інтелектуальна панель H1 – це двослотовая плата, яка встановлюється поруч із польовими пристроями та перетворює дискретні сигнали у сигнали польової шини FOUNDATION. Це дозволяє передавати аналогові й дискретні

сигнали у одному сегменті шини, скорочуючи довжину сегментів і зменшуючи споживання електроенергії.

Панель Н1 живиться від зовнішнього джерела та кріпиться на DIN-рейку, стіні або панелі. Плати Н1 встановлюються на стандартній 8-слотовій панелі DeltaV і підтримують до двох сегментів польової шини з можливістю підключення до 16 пристроїв на сегмент. У нашій системі використано один модуль Н1 з повним завантаженням обох сегментів.

Для дотримання вимог:

1. До одного інтерфейсного блоку Н1 підключають два сегменти шини;
2. На кожному сегменті – до 16 пристроїв;
3. Кожен сегмент живиться від окремого регулятора напруги 24 В, який ізолює напругу та подає її на сегмент;
4. Загальна довжина кабелів сегмента Н1 не перевищує 1,9 км;
5. Максимальна довжина відвідного кабелю від пристрою до клемної коробки – 120 м;
6. Кінці магістрального кабелю повинні завершуватися термінаторами;
7. Використовуються стандартні кабелі типу А (Belden 3076F) та конектори VE6957/VE6958;
8. Невикористані роз'єми клемних коробок закриваються заглушками VE6955;
9. На кожному польовому пристрої встановлюється адаптер кабельного введення VE6959 для підключення гніздового конектора;
10. Іскробезпечна система включає 8-канальне аналогове введення та виведення 4–20 мА, 16-канальне дискретне введення, 4-канальне дискретне виведення та іскробезпечне джерело живлення, ізолятор локальної шини забезпечує ізоляцію від контролера та системного джерела живлення.

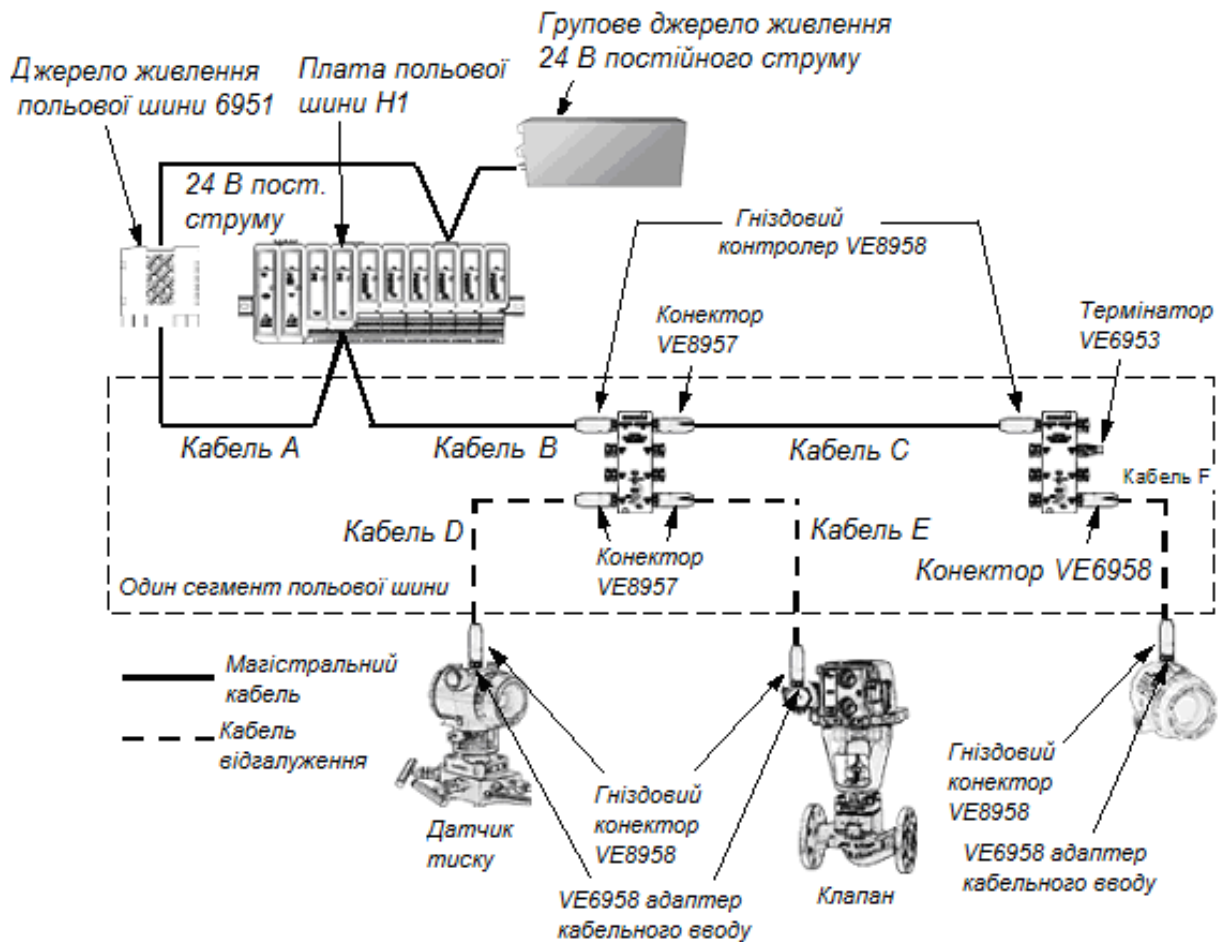


Рисунок 3.4 – Один сегмент польової шини H1.

У загальному випадку система набуде вигляду, представленого на рисунку 3.5

Системне джерело живлення VE5002, показане на рисунку 3.6, як правило, використовується в системах DeltaV з декількома контролерами та підсистемами в/в, де загальне живлення системи здійснюється від мережі змінного струму 120/240 V AC. Джерело живлення VE5002 приймає 12 V DC і перетворює на необхідні системі напруги 12 В, 5 В і 3.3 В для живлення контролера та підсистеми введення-виведення. Це джерело живлення встановлюється безпосередньо ліворуч від плати контролера.

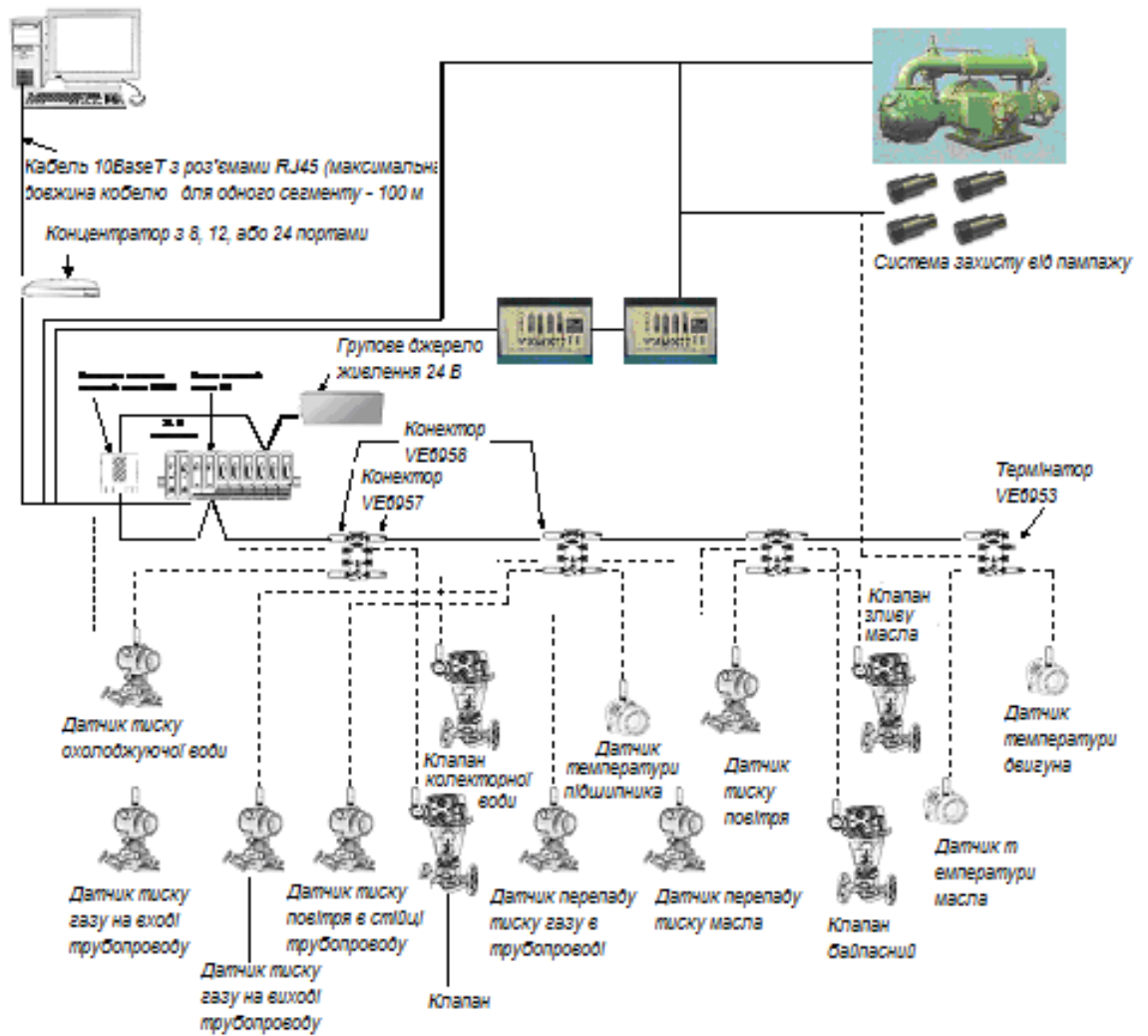


Рисунок 3.5 – Структурна схема САУ компресора

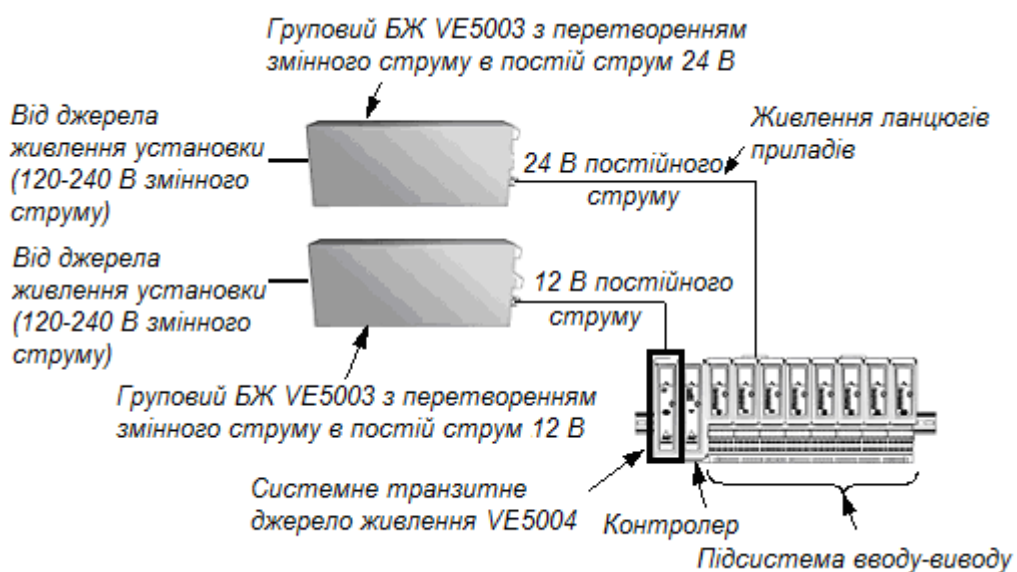


Рисунок 3.6 – Системне транзитне джерело живлення VE5002

У даній системі передбачено використання кількох джерел живлення через наступні фактори: по-перше, наявність резервного контролера, по-друге, велика кількість плат введення-виводу, що підключені до контролера.

Другим джерелом живлення, що працює від 120/240 В змінного струму, буде групове джерело VE5004 (120–240 Vac / 12 Vdc).

Для досягнення оптимальної продуктивності системи DeltaV особливу увагу приділяють правильному заземленню. Ланцюги змінного та постійного струму необхідно заземлювати окремо до загальної точки заземлення установки. На рисунку 3.7 показана електрична схема заземлення системи DeltaV із застосуванням системного джерела живлення VE5002.

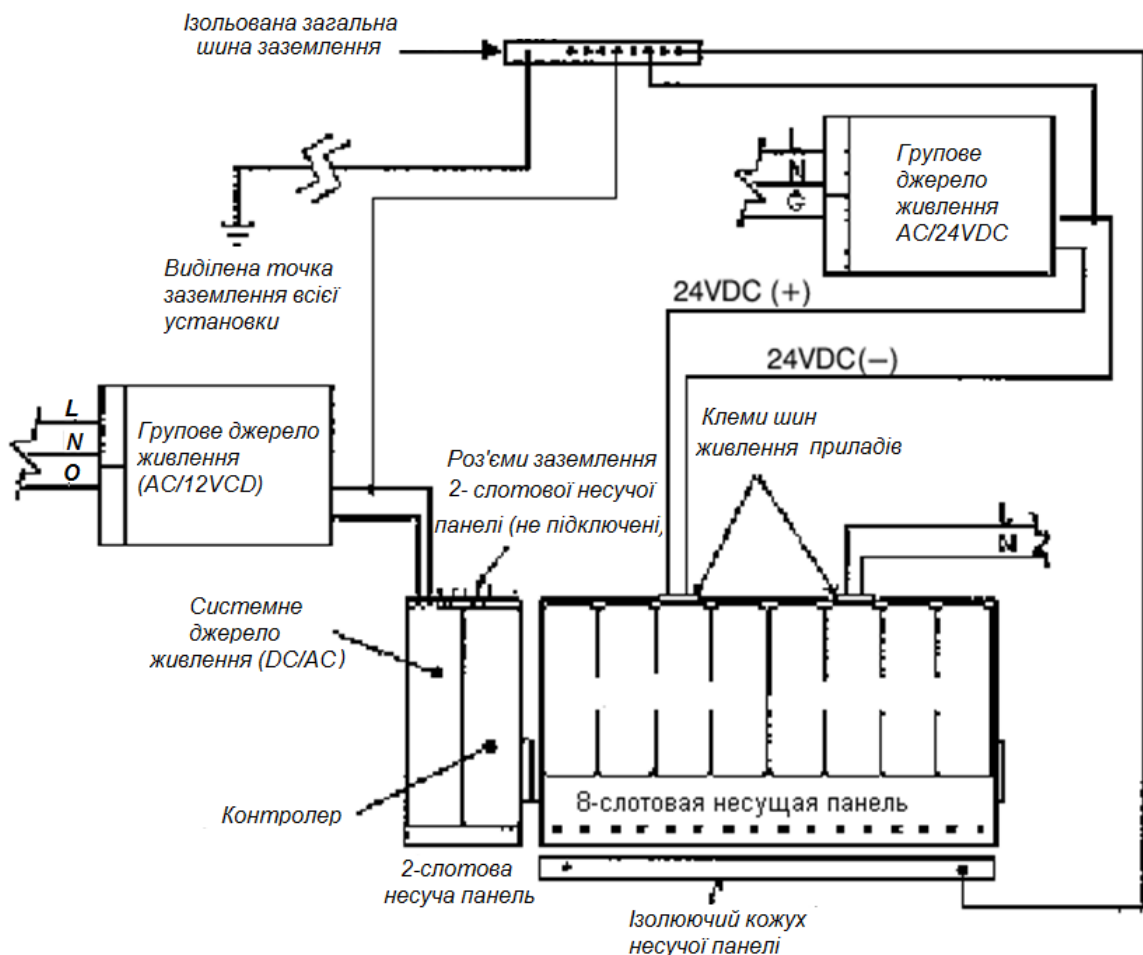


Рисунок 3.7 – Електрична схема заземлення системи DeltaV, де використовується транзитне джерело живлення VE5002

Групове джерело живлення VE5004 приймає 120/230 В змінного струму та перетворює його на 24 В постійного струму, які подаються на системне джерело VE5002 або на транзитне джерело VE5008. Джерело VE5004 забезпечує достатню потужність для живлення чотирьох наборів симплексних контролерів і модулів введення-виводу, до кожного з яких підключено окреме джерело живлення VE5002.

Якщо в системі використовуються резервовані контролери, необхідно використовувати другу пару джерел VE5002, як показано на Рис.5.10. Для кожного контролера потрібно виділене транзитне джерело живлення, а використання двох джерел VE5004 виключає зупинку системи через відмову одного джерела живлення.

У разі резервованого контролера друга 2-слотова панель забезпечить посадкове місце для другого контролера резервної пари (рисунок 3.8).

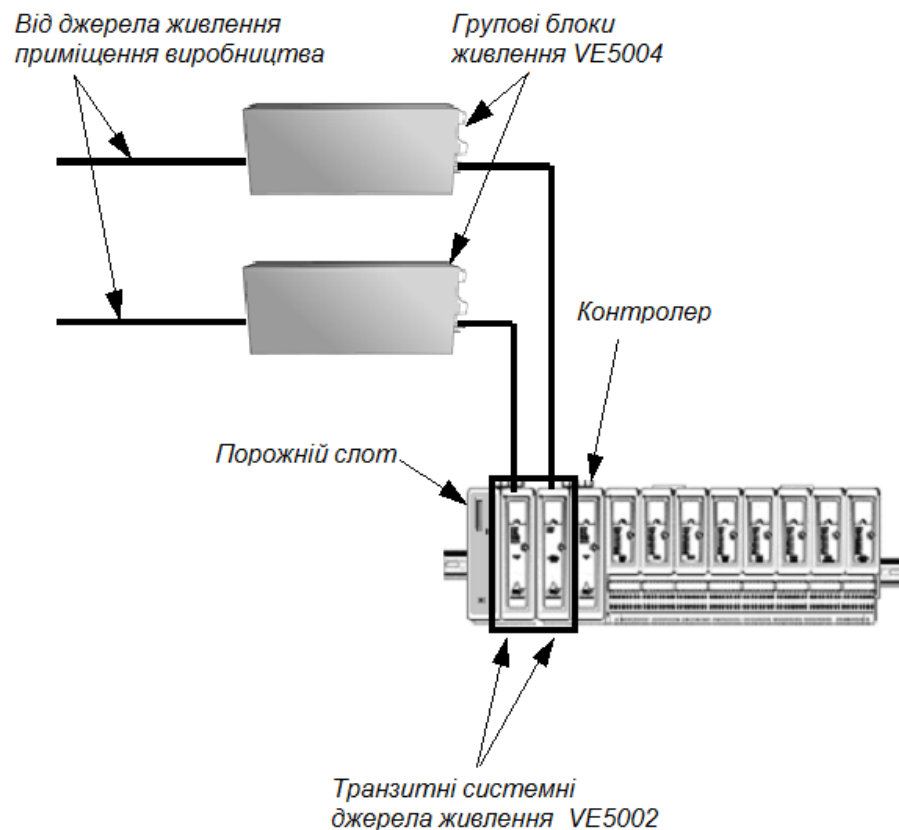


Рисунок 3.8 – Резервування джерел живлення VE5002 для симплексного контролера

Для живлення модулів іскробезпечного введення-виведення необхідне спеціальне іскробезпечне джерело живлення. Воно працює від напруги 18,5–36 VDC і перетворює її на 12 VDC із максимальним струмом 5 А.

Первинне джерело живлення системи DeltaV повинно гарантувати безперебійну роботу при перервах електропостачання тривалістю до 20 мілісекунд. Перебої довше цього часу можуть призвести до втрати керування, тимчасової втрати конфігурації та даних процесу. У разі ймовірних перебоїв електропостачання, що перевищують 20 мс, необхідно застосовувати джерела безперебійного живлення (БДЖ).

У проєктованій системі використовується БДЖ моделі VE5006, що забезпечує безперебійну подачу 24 В для польових пристроїв підсистеми введення-виведення DeltaV. Для живлення застосовується комбінація транзитного системного джерела VE5002 та групового джерела живлення VE5004.

### 3.2. Вибір датчиків для системи керування параметрами компресорної установки

Датчики тиску серії SMART FAMILY, модель 3051 компанії Rosemount Inc., встановлюють новий стандарт вимірювання тиску. Ці датчики поєднують високу точність, стабільність і надійність з гнучкістю платформи Coplanar, забезпечуючи сумісність із сучасними технологічними вимогами.

Модель 3051 пропонує всебічну оцінку якості вимірювання, враховуючи еталонну точність, вплив температури та тиску на лінії. Це дозволяє вибирати датчик на основі реальних експлуатаційних характеристик, а не лише номінальної точності.

Обрання датчиків цієї серії обумовлене наступними перевагами: стабільність параметрів у часі, менша мінливість сигналу та швидкість відгуку, можливість модернізації та заміни, широка сумісність платформи

Sorplanar, різноманітні вихідні сигнали, рідкокристалічний дисплей, локальне калібрування нуля та шкали, захист від перехідних процесів і тривалий термін служби.

Для вимірювання перепаду тиску між входом та виходом компресора використовується модель 3051С. Цей датчик відзначається високою точністю (0,075%), масштабною похибкою 100:1, калібруванням шкал від 0,5 дюймів Н<sub>2</sub>О до 2000 psі, шкали надлишкового тиску 2,5 дюймів Н<sub>2</sub>О – 4000 psig та шкали абсолютного тиску 0,167 psia – 4000 psia. Розбірна схема датчика наведена на рисунку 3.9.

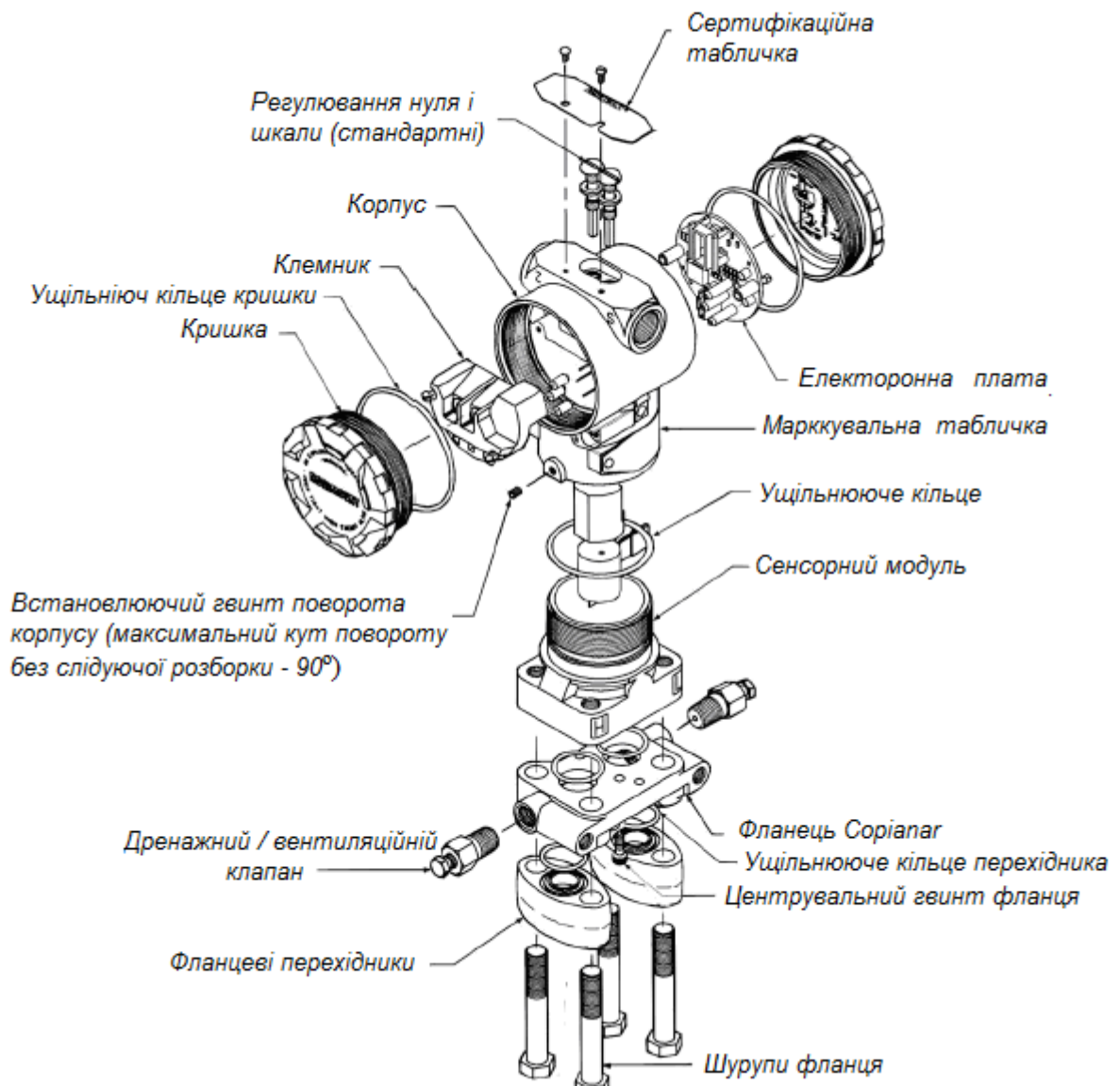


Рисунок 3.9 – Конструкція типового датчик 3051 С у розбірному стані

Датчик надлишкового та абсолютного тиску моделі 3051Т (використовується на трубопроводі входу та виходу газу) характеризується - високою точністю 0,075%; каліброваністю шкали абсолютного тиску від 0,3 дюймів Н2О до 10000 psia; калібровані шкали надлишкового тиску від 0,3 дюймів Н2О до 10000 psig; ізоляторами технологічного середовища з нержавіючої сталі та Hastelloy С. Монтажна та розмірна схеми представлені на рисунку 3.10.

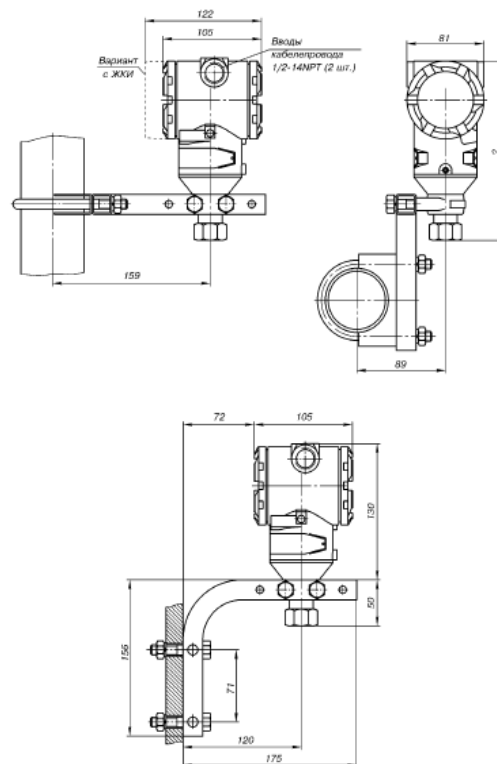


Рисунок 3.10 - Монтажна та розмірна схема датчика 3051Т

Датчик тиску моделі 3051S (використовується на трубопроводі аналізу тиску води, масла та повітря) Smart - єдиний у світі економічний датчик тиску, точність 0,075%.

Загальний вигляд датчика моделі 3051S представлений на рисунку 3.11.



Рисунок 3.11 – Датчик моделі 3051S у загальному вигляді

Датчик температури пірометричний серії M18 (використовується для аналізу температури повітря в корпусі двигуна). Діапазон вимірювання температур: 0...300 °С. Розмірну схему представлено на рисунку 3.12.

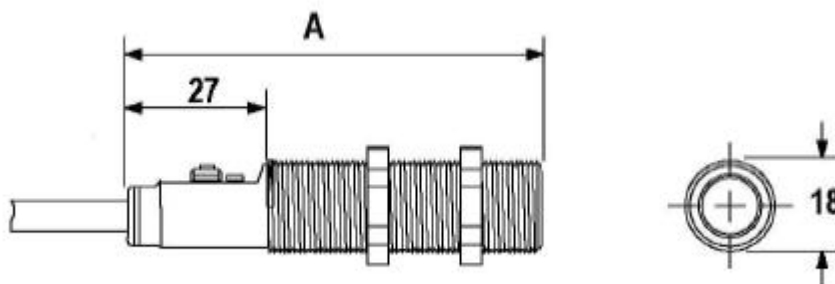


Рисунок 3.12 – Розмірна схема датчика M18.

Різноманітність пропонованих аналогових датчиків дає величезні можливості у виборі обладнання з необхідними показниками. Основними факторами при доборі засобів вимірювання були:

- широкий функціональний набір;
- підвищені термоелектрична стабільність та робочий ресурс;
- малий показник теплової інерції;
- додатковий захист термоелектродів від впливу робочого середовища;

- наявність можливості індикації стану та вимірюваних величин;
- діагностика та самодіагностика об'єкта;
- вибухозахисне виконання.

Відповідно до перелічених факторів обрано датчики описані нижче.

Температурний перетворювач ТСМУ – 274 з уніфікованим вихідним сигналом (розташований безпосередньо в місці аналізу температури мастила компресора та охолоджувальної води).

- вихідний сигнал: 4-20 мА;
- діапазон перетворюваних величин: 0-180 0С;
- межа основної наведеної похибки: 0.25, 0.5;
- залежність вихідного сигналу від температури: лінійна;
- максимальна температура застосування: 8000С;
- маркування вибухозахисту: 1ExdIICT6 з видом вибухозахисту вибухонепроникна оболонка d;
- показник теплової інерції: 40 с;
- ермін служби: не менше 5 років;
- міжповірочний інтервал: 1 рік;
- кліматичне виконання: Т6 (від - 20 0С до + 45 0С).

Габаритні та приєднувальні розміри датчика представлені на рисунку 3.13.

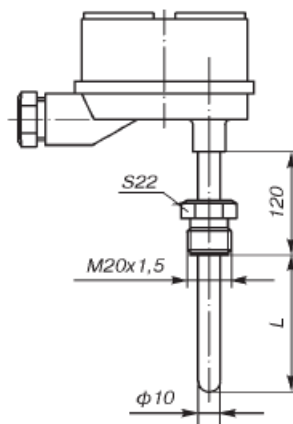


Рисунок 3.13 - Температурний перетворювач ТСМУ – 274 з уніфікованим вихідним сигналом із габаритними розмірами

Термоелектричний перетворювач ТХА 241 (аналіз стану температури опорного підшипника)

- кількість чутливих елементів: 1;
- чутливий елемент: кабель термодарний КТМС;
- клас допуску: 2;
- діапазон вимірюваних температур: - 40...200 0С;
- робочий спай: ізольований;
- перевірка: раз на рік;

– кліматичне виконання: ТЗ (верхнє значення температури навколишнього середовища + 850С);

- термін служби: не менше 3 років.

Габаритні та приєднувальні розміри датчика представлені на рисунку 3.14

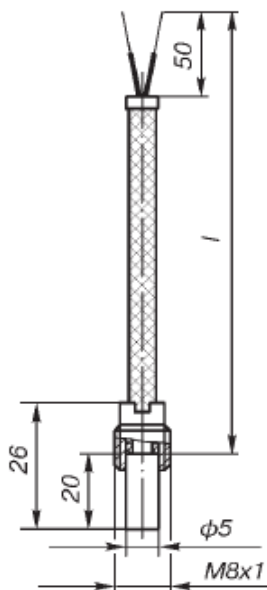


Рисунок 3.14 – Термоелектричний перетворювач ТХА - 241 з габаритними розмірами

Датчик вібрації серії ТХ 5634 (аналіз стану двигуна)

- діапазон частот: 2 Гц ... 10 кГц (прискорення), 2 Гц ... 1 кГц (швидкість);
- принцип вимірювання: п'єзо електричний;
- лінійність:  $\square$  1%;
- температура навколишнього середовища: - 25 0С ... 80 0С;
- аналоговий вихід: 4-20 мА;
- матеріал: нержавіюча сталь;
- виконання: IP67;
- маркування вибухозахисту: EEX ia I;
- максимальна вібрація: 50g;
- діапазон вимірювань: 1,2,5,10,20 г (прискорення), 10,20,25,50,10 мм/с (швидкість);
- резонанс: 18 кГц (номінал).

Загальний вигляд датчика представлені на рисунку 3.15.



Рисунок 3.15 - Датчик вібрації серії TX 5634 у загальному вигляді

Вимірювач осьового зсуву ротора ТС – 201 А в комплекті з датчиком типу КТ – 136С (аналіз стану двигуна):

- діапазон вимірювання осьового зсуву ротора: від -2,0 до 1,5 мм;
- межі абсолютної похибки приладу, що допускається, при вимірюванні зазору:  $(10 + 0,07 \cdot Z)$  мкм;
- діапазон значень вихідного струму: 4-20 мА;
- час встановлення робочого режиму, не більше: 5 хв;

- середнє напрацювання на відмову, не менше: 10000 годин;
- середній термін служби, не менше: 8 років;
- середній час відновлення працездатності, не більше: 2 години;
- температура навколишнього повітря: 10 ... 55 0С;
- відносна вологість повітря при температурі 35 С, (без конденсації): 93.3%.

Система контролю осьового зміщення є однією з ключових у комплексі заходів безпеки компресорних машин. Хоча інші несправності обладнання також можуть призводити до серйозних наслідків, проблеми з підшипником осьового зміщення можуть розвиватися дуже швидко і практично непомітно, що здатне спричинити повне руйнування машини. Тому першочергове завдання – забезпечити надійні методи вимірювання осьового зсуву та уникати помилок при монтажі захисних систем.

Сьогодні перетворювачі частоти все частіше замінюють традиційні механічні способи регулювання швидкості обертання електродвигунів, пропонуючи простіше управління та менші витрати на технічне обслуговування. Компанія Siemens вже кілька десятиліть виробляє такі перетворювачі.

На російському ринку з'явилися сучасні перетворювачі частоти четвертого покоління, що володіють розширеними можливостями. До основних переваг таких пристроїв належить збільшений робочий температурний діапазон, ширший спектр потужностей, доступна ціна, універсальність опцій та можливість тонкого налаштування параметрів під конкретні умови роботи.

Прикладом є MICROMASTER 430, основні технічні характеристики якого такі:

- Потужність: 7,5–250 кВт, 400 В, 3-фазний змінний струм;
- Робоча напруга: 380–480 В  $\pm 10\%$ ;
- Вхідна частота: 47–63 Гц;

- Коефіцієнт потужності:  $\cos \Phi \geq 0,7$ ;
- Пусковий струм: не перевищує номінального;
- ККД: 97%;
- Робочий температурний діапазон:  $-10\dots+40$  °С; температура зберігання:  $-40\dots+70$  °С;
- Допустима відносна вологість: до 95%;
- Ступінь захисту: IP20 / NEMA 1;
- Вихідна частота: 0–650 Гц; роздільна здатність: 0,01 Гц;
- Перевантажувальна здатність: 110% номінального струму протягом 60 с, 140% – протягом 3 с (кожні 300 с);
- Способи регулювання: потокозчеплення (FCC), лінійний (U/f), квадратичний (U/f<sup>2</sup>), енергозберігаючий режим, довільне налаштування;
- Цифрові входи: 6 (18 функцій);
- Аналоговий вхід: 0–10 В, 0–20 мА, біполярний  $\pm 10$  В, роздільна здатність 10 біт;
- Релейний вихід: 30 В DC 2 А, 240 В AC 0,8 А параметрований;
- Інтерфейс RS485: присутній;
- Методи гальмування: генераторне, динамічне, комбіноване;
- Швидке обмеження струму: присутнє;
- Функції захисту: знижена напруга, перенапруга, перевантаження, витік на землю, коротке замикання, блокування двигуна, перегрів двигуна, перегрів перетворювача;
- Регулятор: вбудований ПД-регулятор із живленням 24 В для датчика ПД;
- Відповідає нормам Держгіртехнагляду.

Схему принципу регулювання наведено на рисунку 3.16.

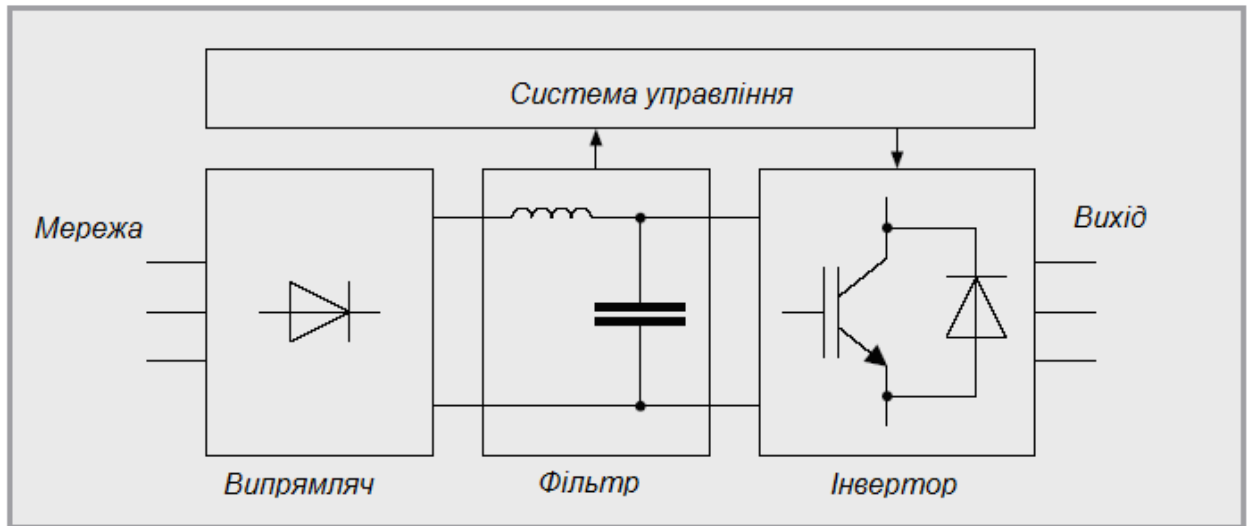


Рисунок 3.16 – Структурна схема перетворювача частоти з проміжним контуром постійного струму

Трубопровідна арматура, така як вентиля та зворотні клапани, служить для керування потоками газу в трубопроводах, ізоляції окремих їх ділянок, а також для підключення або відключення технологічних агрегатів, апаратів і резервуарів.

Для роботи запірної арматури на компресорних установках характерні такі умови: підвищений тиск транспортованого газу (до 7,5 МПа), доволі висока температура газу на виході з компресорної станції (60–130 °С), а також наявність у газовому середовищі механічних домішок та компонентів, що можуть спричиняти корозійні та ерозійні пошкодження металу.

До основних вимог щодо запірної арматури належать: забезпечення надійної герметичності при відключенні окремих ділянок газопроводів, апаратів і ємностей від технологічної системи; збереження цієї герметичності упродовж тривалого часу; висока надійність роботи; стійкість до корозії та вибухобезпечність.

На компресорних установках застосовують різні типи запірної арматури, у представленій системі передбачено використання клапанів

виробництва EMERSON Process Management. Підтримка даними клапанами протоколів Fieldbus дозволяє інтегрувати їх у сучасні системи автоматизації.

Регулюючий клапан серії GX призначений для керування потоком робочого середовища — як для плавного регулювання, так і для повного перекриття. Це односідельний клапан з напрямом потоку вгору, змінним сідлом, та одним із трьох варіантів внутрішнього вузла (триму): із напрямними на штоку, із напрямним сідлом або з розвантаженим плунжером. Привід — пневматичний, багатопружинний (MIM).

Для кожного типорозміру клапана можливе виконання з нерозвантаженим плунжером, що усуває так звані «мертві зони», у яких можливе накопичення та полімеризація робочого середовища. Повнопрохідні та обмежені за пропускною здатністю клапани можуть мати лінійну або процентну характеристику витрати.

Вибір цього обладнання ґрунтувався на таких критеріях:

- стабільність витрати через клапан;
- широкий вибір матеріалів, у тому числі спеціальних сплавів;
- можливість роботи з високою пропускною спроможністю;
- уніфікація деталей для всіх типорозмірів;
- змінний комплект внутрішніх елементів;
- можливість реверсування приводу безпосередньо на місці експлуатації;
- простота технічного обслуговування.

Загальний вигляд обладнання цього класу представлено на рисунку 3.17.



Рисунок 3.17 – Регулюючий клапан

Програмне забезпечення системи керування та контролю DeltaV підтримує створення керувальних стратегій на основі мов, що відповідають стандарту IEC 61131-3, а також функціональних блоків FOUNDATION Fieldbus. Розроблення й редагування таких стратегій здійснюється у графічному середовищі. Інтуїтивно зрозумілий інтерфейс спрощує процес навчання та дозволяє новачкам швидко опанувати роботу. До мов IEC 61131-3 належать діаграми функціональних блоків (FBD), діаграми послідовностей (SFC) та структурований текст (ST), які дають змогу реалізовувати системи будь-якої складності.

У DeltaV діаграми функціональних блоків застосовуються для виконання обчислень, керування процесом і реалізації безперервних стратегій. На схемах блоки з'єднуються графічними лініями, кожною з яких може передаватися один або кілька наборів даних. Обмін інформацією всередині DeltaV відбувається автоматично. Хоча функціональні блоки відповідають стандарту FOUNDATION Fieldbus, вони були розширені для забезпечення більшої гнучкості під час побудови стратегій керування. Завдяки сумісності зі стандартом польової шини можливе розподілене керування безпосередньо на рівні польових пристроїв.

Структурований текст дає змогу створювати програми зі складними обчисленнями та логічними операціями, використовуючи широкий набір математичних і тригонометричних функцій, а також умовні та циклічні конструкції.

Система забезпечує засоби візуалізації, трендовий аналіз, генерацію аварійних сигналів і роботу як із внутрішніми, так і з зовнішніми даними. Усі програми DeltaV можуть взаємодіяти із зовнішніми джерелами інформації так само, як із власними даними системи. Під час роботи модуль обробки подій передає відповідні повідомлення системним додаткам, а глобальна база конфігурації полегшує керування та доступ до цих даних.

У DeltaV параметри застосовуються у функціональних блоках, модулях, конфігураціях вводу/виводу та діагностиці. Вони дають доступ до значень змінних і постійних величин, що характеризують роботу різних програм. Це дозволяє налаштовувати логіку модулів, здійснювати читання та запис за певними адресами вводу/виводу та виконувати діагностику помилок.

Стратегії керування в DeltaV створюються модульно. Керувальні модулі є окремими функціональними одиницями системи, а основним їх елементом виступає функціональний блок. Кожен блок містить певний керувальний алгоритм, наприклад PID-регулятор, аналоговий вхід чи вихід. До складу функціональних блоків також входять алгоритми вдосконаленого керування, зокрема елементи нечіткої логіки. Об'єднання кількох блоків у визначеній структурі формує повноцінний керувальний модуль.

## ВИСНОВОК

В результаті роботи над проектом було проведено аналіз компресорної установки як об'єкта автоматизації. Вибрано найбільш підходящу концепцію розробки системи управління. Реалізовано логічну модель, графіки функціонування якої підтверджують правильність обраних керуючих алгоритмів. Розроблено макет системи управління на основі структурно-інформаційної моделі поведінки об'єкта.

Проведено підбір необхідних реалізації системи апаратних засобів та розроблено принцип функціонування керуючого середовища.

На підставі чого, можна сказати, що впровадження системи управління дозволить підвищити ефективність функціонування комплексу гідроочищення за рахунок оптимального режиму роботи компресорної установки, підвищення продуктивності обладнання та оперативності управління технологічним процесом, знизити споживання енергоресурсів, а також зменшити аварійність та підвищити термін служби обладнання, зменшити вплив людського фактора у виробничому процесі та експлуатації.

Розроблена система має широкі можливості щодо інтеграції з іншими існуючими або новоствореними системами і при необхідності, без значних витрат, нарощувати кількість функцій і каналів обробки сигналів.

## ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Конспект лекцій по дисципліні «Компресори та компресорні станції» для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня за спеціальністю 144 – Теплоенергетика / Укладач Р.О. Клімов. – Кам’янське: ДДТУ, 2016. – 96с.
2. Компресорне устаткування в технологіях видобутку вуглеводнів : монографія / А. Ф. Булат, Г. В. Кирик, Г. А. Бондаренко та ін. ; за заг. ред. акад. НАН України А. Ф. Булата. – Суми : Сумський державний університет, 2016. – 305 с.
3. Компресорні станції транспортних засобів: навч. посіб. / В. Х. Далека, М. А. Голтв’янський, А. В. Коваленко, В. І. Скуріхін; Харк. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Х: ХНУМГ, 2014. – 128 с.
4. Федоров О.Г. Компресорні станції та компресорні установки. Навчальний посібник. Одеська національна академія харчових технологій. Одеса. 2013. – 130 с.
5. Експериментальна оцінка параметрів компресора об’ємної дії. Методичні вказівки для студентів напряму підготовки 6.051701 «Харчові технології та інженерія» ОР Бакалавр Факультет агротехнологій та екології-Таврійський державний агротехнологічний університет, 2019 - 16с.
6. Шефер О.В. Автоматизований електропривод загальнопромислових механізмів: конспект лекцій. – Полтава: ПолтНТУ, 2020. – 154 с.
7. Попович М.Г., Лозинський О.Ю., Клепіков В.Б. та інш. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи. Навч. посіб. за напрямом «Електромеханіка» / М.Г. Попович, О.Ю. Лозинський, В.Б. Клепіков та інш. – К.: Либідь, 2005. – 680 с. Ч1.
8. . Попович М.Г., Лозинський О.Ю., Клепіков В.Б. та інш. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи.

Навч. посіб. за напрямом «Електромеханіка» / М.Г. Попович, О.Ю. Лозинський, В.Б. Клепиков та інш. – К.: Либідь, 2005. – 680 с. Ч2.

9. UA-Systems. Автоматизована система управління компресоною станцією (цехом) Режим доступу: <https://www.ua-systems.com.ua/asu-ks-ks>

10. Автоматехком (AutomaTech.Com, Ltd). Автоматизація Компресорних Установок | Сучасні Рішення для Підвищення Ефективності Виробництва. Режим доступу: <https://automatech.com.ua/kompresorni-ustanovki>

11. Компанія АКУТЕК. Автоматизована система керування компресором. Режим доступу: [https://aqteck.ua/ua/projects/avtomatizovana\\_sistema\\_keruvanya\\_kompressorom](https://aqteck.ua/ua/projects/avtomatizovana_sistema_keruvanya_kompressorom)

12. ООО «Констрак». Система управління компресорами. Режим доступу: <https://konstrack.com/kompresori-airpol/sistema-upravlinnya-kompresorami-ms-connect/>

13. Цабенко М. В. Системи антипомпажного керування відцентровим компресором. // Електротехніка та електроенергетика. 2016. № 1. С. 125 – 140

14. Aben E. H. Bifurcation analysis of surge and rotating stall in axial flow compressors [Text] / E. H. Aben, P. K. Houpt, W. M. Hosny // Journal of Turbomachinery. – 1993. – № 115. – P. 724–817.

15. . Gravidahl J. T. Modeling and Control of surge and rotating stall in compressor [Text] / J. T. Gravidahl // Journal of Turbomachinery. – 1998. – № 152. – P. 544–615.

16. Venturini M. Development and experimental validation of a compressor dynamic model [Text] / M. Venturini // Journal of Turbomachinery. – 2005. – № 127. – P. 599–608.

17. R. Kokoshko, O. Kril, B. Kril. Selection of Functional Diagram of Air Multi-Compressor Control System. // ENERGY ENGINEERING AND CONTROL SYSTEMS. Volume 5, Number 1, 2019. – С. 47 –56.

18. Compressor Control: Maximizing Safety and Efficiency.  
<https://www.emerson.com/documents/automation/brochure-emerson-solution-for-optimal-turbomachinery-control-deltav-en-587900.pdf>

19. Sherine Y F., Fyzal Badarudeen. A review of automatic compressor control using programmable logic controller. // International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET). Volume: 08 Issue: 07 | July 2021. P. 1932–1938.

20. Gregory K. McMillan. Centrifugal and Axial Compressor Control. Momentum Press, LLC., New York. 2020. 172 p.

21. McMillan, G.K., Essentials of Modern Measurements and Final Elements in the Process Industry—A Guide to Design, Configuration, Installation, and Maintenance, ISA, 2010 – 172 c.