

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

КРБ.СІ - 09.00.00.000 ПЗ

Група СІ-22-1

Ольга Слівінська

2026

Міністерство освіти і науки України
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
Факультет інформаційних технологій
Кафедра інформаційно-телекомунікаційних технологій і систем

Слівінська Ольга Романівна

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 622.691:621.515

(індекс)

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

«Розроблення системи контролю вібраційного стану
газоперекачувального агрегату (ГПА) на основі сучасних апаратно-
програмних засобів»

(назва роботи)

Системна інженерія – Інтернет речей

(назва освітньої програми)

151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

(шифр і назва спеціальності)

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

Здобувач освітнього ступеня О. Р. Слівінська

(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник Н. І. Іванюк, к.т.н., доц.

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

Допущено до захисту

В.о. Завідувача кафедри

к.т.н., доц. О. Л. Заміховська

(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

(повне найменування закладу вищої освіти)

Факультет Інформаційних технологій

Кафедра Інформаційно-телекомунікаційних технологій та систем

Освітній рівень бакалавр

Спеціальність 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

в.о. Завідувача кафедри ІТТС

к.т.н., доц. О. Л. Заміховська

« » травня 2026 року

З А В Д А Н Н Я НА БАКАЛАВРСЬКУ РОБОТУ

Слівінська Ольга Романівна

(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема бакалаврської роботи: «Розроблення системи контролю вібраційного стану газоперекачувального агрегату (ГПА) на основі сучасних апаратно-програмних засобів»

керівник роботи Іванюк Наталія Іванівна, доц., к.т.н.,

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

затверджена наказом закладу вищої освіти від № 166/7 від 07.04.2026 року

2. Термін здачі студентом закінченої роботи 10 червня 2026 року

3. Вихідні дані до проекту (роботи) Науково-технічна література за темою роботи.

4. Зміст розрахунково - пояснювальної записки (перелік питань, що підлягають розробці)

Вступ. Загальні відомості про газоперекачувальні агрегати та системи автоматичного керування ними. Аналіз існуючих систем автоматичного керування ГПА. Розроблення вузла діагностування ГПА та апаратно-програмного комплексу для моделювання САК ГПА. Склад та структура програмно-технічних засобів комплексу для моделювання САК ГПА. Програмне забезпечення моделюючого комплексу та використання його для керування режимами роботи ГПА. Автоматичний пуск ГПА у різних режимах. Аварійна зупинка зі стравлюванням газу. Висновки.

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

- Принципова схема трьохвальної ГТУ (листів - 1);
- Загальний вигляд ГПА-Ц-16С/76-1,44М1 на базі ГТД ДГ-90Л2.1 (листів - 1);
- Структурна схема САК ГПА (листів - 1);
- Загальна схема експлуатаційної діагностики ГПА (листів - 1);
- Апаратна конфігурація системи вібродіагностики ГПА на базі ПЛК SIMATIC S7-1200 та вібраційного модуля SM1281 (листів - 1);
- Структурна схема моделюючого комплексу (листів - 1);
- Структурна схема пристрою оператора моделюючого комплексу (листів - 1);

6. Дата видачі завдання 05.05.2026 року

Керівник, к.т.н., доцент

Н. І. Іванюк

(підпис)

Завдання прийняв студент-бакалавр

О. Р. Слівінська

(підпис)

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ п/п	Назва етапів бакалаврської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Загальні відомості про газоперекачувальні агрегати та системи автоматичного управління ними. Загальна конструкція і принцип роботи ГПА. Параметри ГПА та обмеження, що на них накладаються.	06.05 – 20.05.2026 р.	
2	Необхідність автоматизації процесу компримування газу та постановка задачі керування ГПА. Аналіз існуючих систем автоматичного управління ГПА.	16.05 – 24.05.2026 р.	
3	Розроблення вузла діагностування ГПА та апаратно-програмного комплексу для моделювання САК ГПА. Методи діагностування ГПА. Система вібродіагностування технічного стану ГПА. Опис основних частин алгоритмічного забезпечення моделюючого комплексу.	20.05 – 31.05.2026 р.	
4	Склад та структура програмно-технічних засобів комплексу для моделювання САК ГПА. Призначення програмного забезпечення моделюючого комплексу. Робота пристрою оператора та пристроїв керування ПК-А та ПК-Б.	24.05 – 31.05. 2026 р.	
5	Програмне забезпечення моделюючого комплексу та використання його для керування режимами роботи ГПА. Середовище розроблення програмного забезпечення. Середовище візуалізації програми. Використання комплексу для моделювання режимів роботи САК ГПА. Автоматичний пуск. Аварійна зупинка зі стравлюванням газу.	28.05 – 06.06.2026 р.	
6	Оформлення пояснювальної записки	31.05 – 10.06.2026 р.	
7	Оформлення графічного матеріалу	06.06 – 11.06.2026 р.	

Студент-бакалавр

Керівник роботи, к.т.н., доцент

(підпис)

(підпис)

О. Р. Слівінська

Н. І. Іванюк

РЕФЕРАТ

Бакалаврська робота складається зі вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Робота викладена на 83 сторінках, містить 5 таблиць, 24 рисунки та список використаних джерел із 20 найменувань.

Тема роботи: «Розроблення системи контролю вібраційного стану газоперекачувального агрегату на основі сучасних апаратно-програмних засобів».

Об'єкт дослідження – процес контролю та оцінювання технічного стану газоперекачувального агрегату під час його експлуатації.

Предмет дослідження – система контролю та діагностування вібраційного стану газоперекачувального агрегату.

Мета роботи – підвищення ефективності та надійності експлуатації газоперекачувального агрегату шляхом розроблення системи контролю його вібраційного стану на основі сучасних апаратно-програмних засобів.

У бакалаврській роботі проведено аналіз конструкції та принципу роботи газоперекачувальних агрегатів, досліджено особливості їх автоматизованого керування та розглянуто існуючі системи автоматичного керування ГПА.

У результаті виконання роботи:

- проаналізовано методи діагностування технічного стану газоперекачувальних агрегатів та обґрунтовано доцільність використання віброакустичного методу діагностування;

- обґрунтовано вибір системи вібраційного моніторингу на базі апаратно-програмних засобів Siemens, зокрема модуля SM1281 Condition Monitoring, та виконано опис її функціональних можливостей;

- розглянуто склад і структуру програмно-технічних засобів моделюючого комплексу на базі ПЛК SIMATIC S7-300, програмного комплексу STEP 7, редактора CFC та SCADA-системи WinCC;

– розроблено алгоритмічне забезпечення системи контролю вібраційного стану газоперекачувального агрегату;

– виконано моделювання режимів роботи ГПА та досліджено функціонування запропонованої системи контролю в різних експлуатаційних режимах.

ГАЗОПЕРЕКАЧУВАЛЬНИЙ АГРЕГАТ, СИСТЕМА АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ, ВІБРАЦІЙНИЙ КОНТРОЛЬ, ДІАГНОСТУВАННЯ, ТЕХНІЧНИЙ СТАН, АПАРАТНО-ПРОГРАМНІ ЗАСОБИ, МОДЕЛЮВАННЯ, АЛГОРИТМІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ.

ABSTRACT

The bachelor's thesis consists of an introduction, three chapters, conclusions, a list of references and appendices. The thesis is presented on 83 pages and contains 5 tables, 24 figures and 20 references.

Topic: “Development of a Vibration Monitoring System for a Gas Pumping Unit Based on Modern Hardware and Software Tools”.

Object of research – the process of monitoring and assessing the technical condition of a gas pumping unit during its operation.

Subject of research – a system for vibration monitoring and diagnostics of a gas pumping unit.

Purpose of the thesis – to improve the efficiency and reliability of gas pumping unit operation through the development of a vibration condition monitoring system based on modern hardware and software tools.

The bachelor's thesis analyzes the design and operating principles of gas pumping units, investigates the features of their automated control and reviews existing automatic control systems for gas pumping units.

As a result of the study:

- methods for diagnosing the technical condition of gas pumping units were analyzed and the feasibility of applying the vibroacoustic diagnostic method was substantiated;

- the selection of a vibration monitoring system based on Siemens hardware and software tools, including the SM1281 Condition Monitoring module, was justified and its functionality was described;

- the composition and structure of the simulation complex based on the SIMATIC S7-300 PLC, STEP 7 software package, CFC editor and WinCC SCADA system were considered;

- the algorithmic support of the vibration monitoring system for a gas pumping unit was developed;

– operating modes of the gas pumping unit were simulated and the operation of the proposed monitoring system under various operating conditions was investigated.

GAS PUMPING UNIT, AUTOMATIC CONTROL SYSTEM, VIBRATION MONITORING, DIAGNOSTICS, TECHNICAL CONDITION, HARDWARE AND SOFTWARE TOOLS, SIMULATION, ALGORITHMIC SUPPORT.

ЗМІСТ

	Ст.
ПЕРЕЛІК ОСНОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ.....	10
ВСТУП.....	11
1. ГАЗОПЕРЕКАЧУВАЛЬНІ АГРЕГАТИ ТА ОСОБЛИВОСТІ ЇХ АВТОМАТИЗОВАНОГО КЕРУВАННЯ.....	13
1.1 Конструктивні особливості та принцип функціонування газоперекачувальних агрегатів.....	13
1.2 Параметри газоперекачувальних агрегатів та експлуатаційні обмеження.....	24
1.3 Необхідність автоматизації процесу компримування газу та постановка задачі керування ГПА.....	27
1.4 Аналіз сучасних систем автоматичного керування газоперекачувальними агрегатами.....	34
1.5 Висновки та постановка задачі дослідження.....	48
2 РОЗРОБЛЕННЯ ПІДСИСТЕМИ ДІАГНОСТУВАННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ГПА ТА АПАРАТНО-ПРОГРАМНОГО КОМПЛЕКСУ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ САК ГПА.....	51
2.1 Аналіз сучасних методів діагностування технічного стану ГПА.....	51
2.2 Обґрунтування вибору віброакустичного методу діагностування ГПА.....	55
2.3 Обґрунтування вибору та структура системи вібраційного діагностування ГПА.....	59
2.4 Склад та структура програмно-технічних засобів комплексу для моделювання САК ГПА.....	62
2.5 Призначення програмного забезпечення моделюючого комплексу.....	64
2.6 Робота пристрою оператора та пристроїв керування ПК-А і ПК-Б.....	67

					КРБ. СІ - 09.00.00. 000 ПЗ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата	Розроблення системи контролю вібраційного стану газоперекачувального агрегату (ГПА) на основі сучасних апаратно-програмних засобів	Літ.	Арк.	Аркушів
Розроб.		Слівінська О.Р.						
Перевір.		Іванюк Н.І.					8	83
Реценз.						ІФНТУНГ СІ-22-1		
Н. контр.		Возний						
Затверд.		Заміховська						

З РОЗРОБЛЕННЯ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТА

МОДЕЛЮВАННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ ГПА.....70

3.1 Середовище розроблення та налагодження програмного забезпечення

САК ГПА.....70

3.2 Середовище візуалізації програми.....71

3.3 Відстеження ходу технологічного процесу ГПА з використанням

моделюючого комплексу.....73

3.4 Використання комплексу для моделювання режимів роботи САК

ГПА.....75

3.4.1 Моделювання режиму автоматичного пуску.....75

3.4.2 Моделювання режиму аварійної зупинки зі стравлюванням газу....76

ВИСНОВКИ.....78

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ НА ДЖЕРЕЛА.....80

БІБЛІОГРАФІЧНА ДОВІДКА.....83

					КРБ. СІ - 09.00.00. 000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дат		9

ПЕРЕЛІК ОСНОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ, СИМВОЛІВ ТА ОДИНИЦЬ

АП – автоматичний пуск
АПК – антипомпажний клапан
АПР – антипомпажне регулювання
АРМ – автоматизоване робоче місце
АЗ – аварійна зупинка
АПО – апарат повітряного охолодження
ВПП – валоповоротний пристрій
ГПА – газоперекачувальний агрегат
ЕМВ – електромагнітний вентиль
КС – камера згоряння
КЦ – компресорний цех
Н – нагнітач
НО – нормальна зупинка
ОК – осьовий компресор
ПВК – повітряно-випускний клапан
ПЗ – програмне забезпечення
ПІ- регулятор – пропорційно-інтегральний регулятор
ПК – програмно-інструментальний комплекс
ПКУ – пульт контролю та управління
ПРК – паливний регулюючий клапан
ПТЗ – програмно-технічні засоби
САК – система автоматичного керування
СПЗ – спеціальне (робоче) програмне забезпечення
ТВТ – турбіна високого тиску
ТД – турбодетандер
ТНТ – турбіна низького тиску

					КРБ. СІ - 09.00.00. 000 ПЗ	Арк.
						10
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дат		

ВСТУП

Газотранспортна система України є складним виробничо-технологічним комплексом, ефективне функціонування якого значною мірою залежить від надійності та технічного стану газоперекачувальних агрегатів (ГПА), що експлуатуються на компресорних станціях магістральних газопроводів.

Значна частина газоперекачувального обладнання експлуатується протягом тривалого часу, що зумовлює підвищені вимоги до систем контролю, моніторингу та діагностування його технічного стану. У процесі тривалої експлуатації окремі вузли та механізми агрегатів зазнають зношування, що може призводити до погіршення техніко-економічних показників роботи, збільшення витрат паливного газу, зниження коефіцієнта корисної дії та виникнення аварійних ситуацій.

Газоперекачувальні агрегати належать до складних технічних об'єктів, працездатність яких визначається станом великої кількості взаємопов'язаних вузлів і систем. Тому своєчасне виявлення ознак виникнення несправностей є важливою умовою забезпечення їх надійної, безпечної та економічно ефективної експлуатації.

Одним із найбільш інформативних показників технічного стану роторного обладнання є рівень вібрації. Аналіз вібраційних параметрів дозволяє своєчасно виявляти дисбаланс роторів, дефекти підшипникових вузлів, порушення центрування валів, послаблення кріплень, механічні пошкодження та інші відхилення, які негативно впливають на працездатність агрегатів.

Існуючі системи автоматичного керування газоперекачувальними агрегатами забезпечують контроль основних технологічних параметрів і реалізують функції автоматичного регулювання та захисту обладнання. Водночас можливості багатьох із них щодо комплексного оцінювання технічного стану агрегатів залишаються обмеженими. У зв'язку з цим

					КРБ. СІ - 09.00.00. 000 ПЗ	Арк.
						11
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дат		

актуальним напрямом удосконалення систем автоматизації є впровадження спеціалізованих підсистем вібраційного моніторингу та діагностування.

Стрімкий розвиток засобів промислової автоматизації, програмованих логічних контролерів, спеціалізованих модулів контролю вібрації та сучасного програмного забезпечення для оброблення діагностичної інформації створює широкі можливості для побудови ефективних систем контролю технічного стану газоперекачувального обладнання.

Таким чином, розроблення системи контролю вібраційного стану газоперекачувального агрегату на основі сучасних апаратно-програмних засобів є актуальним науково-технічним завданням, спрямованим на підвищення надійності, безпеки та ефективності функціонування об'єктів газотранспортної системи.

У бакалаврській роботі розроблено систему контролю вібраційного стану газоперекачувального агрегату на основі сучасних апаратно-програмних засобів, досліджено її структуру, алгоритмічне забезпечення та можливості використання для моніторингу й діагностування технічного стану обладнання.

					КРБ. СІ - 09.00.00. 000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дат		12

1 ГАЗОПЕРЕКАЧУВАЛЬНІ АГРЕГАТИ ТА ОСОБЛИВОСТІ ЇХ АВТОМАТИЗОВАНОГО КЕРУВАННЯ

1.1 Конструктивні особливості та принцип функціонування газоперекачувальних агрегатів

Газоперекачувальні агрегати є ключовими елементами компресорних станцій магістральних газопроводів, оскільки забезпечують підтримання необхідного тиску природного газу під час його транспортування. Ефективність роботи газотранспортної системи значною мірою визначається технічним станом, надійністю та енергетичними характеристиками таких агрегатів.

Основою більшості сучасних газоперекачувальних агрегатів є газотурбінна установка, яка використовується як привід відцентрового нагнітача. У процесі роботи газотурбінного двигуна теплова енергія, що утворюється внаслідок згоряння палива, перетворюється на механічну енергію обертання вала. Отримана механічна потужність передається компресорному обладнанню, яке забезпечує стискання та транспортування природного газу.

Принцип функціонування газотурбінної установки базується на безперервному протіканні термодинамічних процесів стискання повітря, підведення теплоти та розширення продуктів згоряння. Для реалізації такого циклу до складу установки входять компресор, камера згоряння та газова турбіна, робота яких є взаємопов'язаною.

На відміну від поршневих двигунів внутрішнього згоряння, де окремі стадії робочого циклу послідовно відбуваються в одному робочому об'ємі, у газотурбінних установках процеси стискання, нагрівання та розширення здійснюються одночасно в різних конструктивних елементах. Така особливість забезпечує безперервність роботи агрегату та можливість отримання значної потужності при відносно компактних габаритах обладнання.

Спрощена схема газотурбінної установки наведена на рисунку 1.1.

					КРБ. СІ - 09.00.00. 000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дат		13

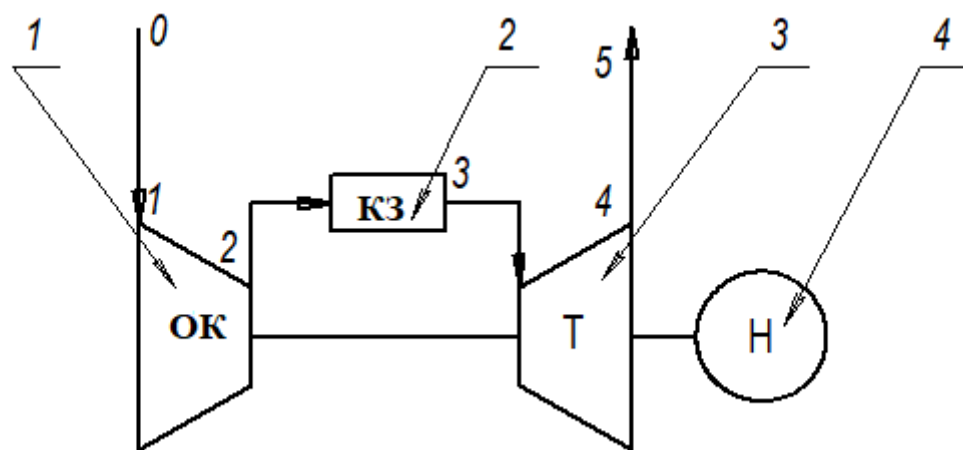


Рисунок 1.1 – Принципова схема найпростішої ГТУ

1 - осьовий компресор; 2 - камера згоряння; 3 - турбіна; 4 – нагнітач.

До її складу входять осьовий компресор, камера згоряння, турбіна та нагнітач. Під час роботи компресор здійснює забір атмосферного повітря та його стискання до необхідного тиску. Стиснене повітря надходить до камери згоряння, де змішується з паливом та бере участь у процесі горіння. Утворені продукти згоряння мають високу температуру та тиск, що забезпечує їх подальше розширення в проточній частині турбіни.

У турбіні теплова енергія газового потоку перетворюється на механічну роботу. Частина отриманої потужності використовується для приводу компресора, а решта передається на вал нагнітача або іншого виконавчого механізму. Після проходження турбіни відпрацьовані гази відводяться в атмосферу через вихлопну систему.

Для аналізу енергетичних процесів, що відбуваються в газотурбінній установці, використовують термодинамічні діаграми, зокрема Т–S діаграму, яка відображає зміну температури та ентропії робочого тіла протягом циклу.

Робочий цикл газотурбінної установки може бути представлений у вигляді послідовності термодинамічних процесів, що відображаються на Т–S діаграмі (рисунок 1.2).

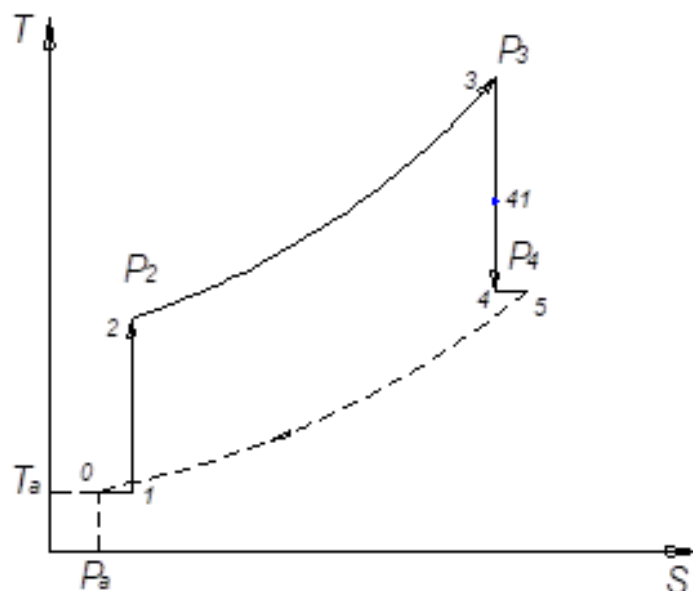


Рисунок 1.2 – T-S діаграма циклу найпростішої ГТУ

У процесі роботи атмосферне повітря через вхідний пристрій надходить до компресора, де його тиск і температура зростають у результаті стискання. Після цього стиснене повітря подається до камери згоряння, в якій відбувається змішування з паливом та виділення теплової енергії внаслідок процесу горіння.

Підведення теплоти супроводжується підвищенням температури робочого тіла за практично сталого тиску. Далі продукти згоряння надходять до турбіни, де відбувається їх розширення з одночасним зниженням тиску та температури. У результаті цього процесу частина внутрішньої енергії газового потоку перетворюється на механічну роботу, необхідну для приводу компресора та корисного навантаження.

Важливим параметром роботи компресора є ступінь підвищення тиску, який визначається відношенням тиску повітря після компресора до тиску на його вході та розраховується за формулою (1.1).

$$\pi_k = \frac{P_2}{P_1}, \quad (1.1)$$

де π_k – ступінь підвищення тиску в компресорі; P_2 – тиск повітря за компресором; P_1 – тиск перед компресором.

У камері згоряння (достатку 2-3) температура робочого тіла підвищується до T_3 при постійному тиску ($P_2 = P_3$).

Потім у турбіні суміш повітря і газу розширюється (адіабата 3-4), її тиск знижується до P_4 , а температура до T_4 .

Зі збільшенням цього показника підвищується ефективність циклу, однак одночасно зростають вимоги до конструкції компресора та енергетичних витрат на стискання повітря.

Аналогічно для турбіни використовується поняття ступеня розширення, що визначається співвідношенням тисків робочого тіла перед турбіною та після неї відповідно до формули (1.2).

$$\pi_m = \frac{P_3}{P_4}, \quad (1.2)$$

де π_m – ступінь розширення в турбіні; P_3 – тиск повітря перед турбіною; P_4 – тиск за турбіною.

Після розширення в турбіні відпрацьовані гази викидаються в атмосферу (ізотерма 4-5). Далі цикл умовно замикається з достатку 5-0.

Значення цього параметра безпосередньо впливає на величину потужності, яка може бути отримана в процесі розширення газового потоку.

Слід зазначити, що наведений термодинамічний цикл є ідеалізованою моделлю, оскільки не враховує механічні, гідравлічні та теплові втрати, які виникають у реальному обладнанні.

На практиці робочі процеси в компресорі, камері згоряння та турбіні супроводжуються додатковими втратами енергії, що призводить до зниження загального коефіцієнта корисної дії установки.

Залежно від конструктивного виконання та особливостей розподілу потужності між окремими вузлами газотурбінні установки поділяють на одновальні, двохвальні та трьохвальні.

					КРБ. СІ - 09.00.00. 000 ПЗ	Арк.
						16
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дат		

У газотранспортній галузі найбільшого поширення набули двохвальні газотурбінні установки, що поєднують високу надійність роботи, достатню енергоефективність та зручність регулювання режимів експлуатації.

Принципову схему двохвальної газотурбінної установки наведено на рисунку 1.3.

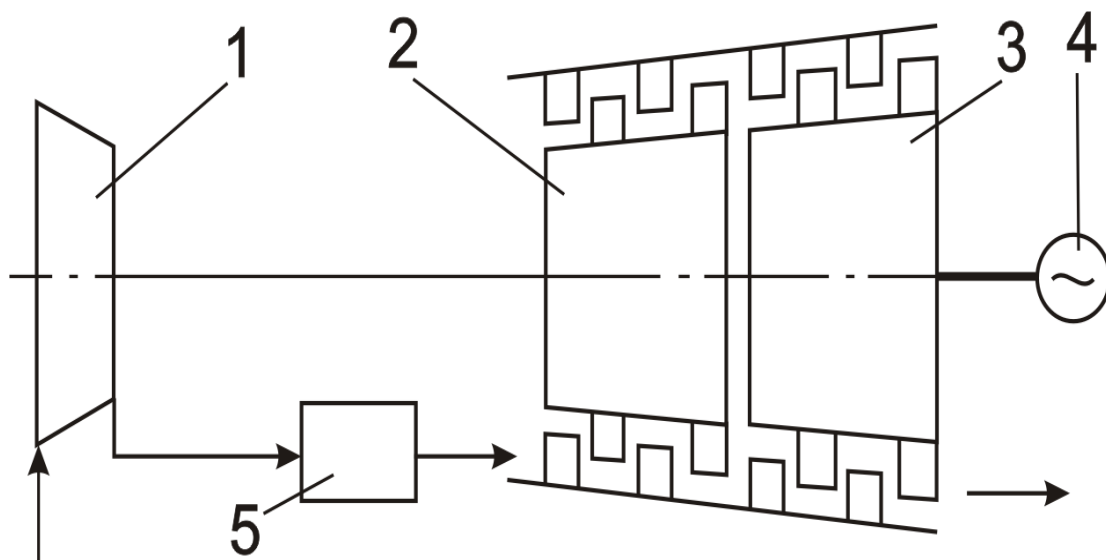


Рисунок 1.3 – Принципова схема двохвальної ГТУ

1 - осьвий компресор (ОК); 2 - турбіна високого тиску (ТВТ); 3 - турбіна низького тиску (ТНТ); 4 - нагнітач (Н); 5 - камера згорання (КЗ)

Особливістю такої конструкції є наявність двох окремих турбін, які виконують різні функції в енергетичному циклі агрегату. Турбіна високого тиску механічно з'єднана з компресором і забезпечує його привід, тоді як турбіна низького тиску використовується для передачі потужності на відцентровий нагнітач.

Поділ турбін на окремі функціональні ступені дозволяє підвищити ефективність використання енергії продуктів згорання та забезпечити більш гнучке регулювання роботи агрегату. Завдяки цьому зберігаються прийнятні значення коефіцієнта корисної дії навіть при зміні навантаження та роботі на неповних режимах.

До основних елементів двохвальної газотурбінної установки належать осьвий компресор, камера згорання, турбіна високого тиску, турбіна низького

тиску та відцентровий нагнітач. Узгоджена робота цих вузлів забезпечує безперервне перетворення енергії палива в механічну роботу, необхідну для транспортування природного газу магістральними трубопроводами.

Осьовий компресор є одним із ключових елементів газотурбінної установки та призначений для підвищення тиску атмосферного повітря перед його подачею до камери згоряння.

В сучасних газоперекачувальних агрегатах переважно використовуються багатоступеневі осьові компресори, які забезпечують високий ступінь стискання за відносно компактних габаритів і значної продуктивності. У процесі проходження повітря через послідовно розташовані ступені компресора його тиск і температура поступово збільшуються, що створює необхідні умови для ефективного згоряння паливної суміші.

Камера згоряння призначена для перетворення хімічної енергії палива в теплову енергію продуктів згоряння. У ній відбувається змішування стисненого повітря з природним газом та подальше безперервне горіння паливної суміші. Конструкція камери згоряння повинна забезпечувати стабільність процесу горіння в широкому діапазоні навантажень, мінімальні втрати тиску та допустимі значення викидів шкідливих речовин у навколишнє середовище.

Турбіна високого тиску розташована безпосередньо після камери згоряння та працює в умовах найбільших температур і тисків робочого середовища. Її основне призначення полягає у виробленні механічної потужності, необхідної для приводу компресора. Під час розширення продуктів згоряння в проточній частині турбіни частина їхньої внутрішньої енергії перетворюється на механічну роботу, яка через вал передається компресору.

Після проходження турбіни високого тиску робоче тіло надходить до турбіни низького тиску. У цьому вузлі відбувається подальше розширення газового потоку та додаткове перетворення його енергії на механічну роботу. Отримана потужність використовується для приводу відцентрового нагнітача, який є основним робочим органом газоперекачувального агрегату.

					КРБ. СІ - 09.00.00. 000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дат		18

Відцентровий нагнітач забезпечує підвищення тиску природного газу та його подальше транспортування магістральним газопроводом. Ефективність роботи нагнітача значною мірою визначає загальну продуктивність компресорної станції та економічність транспортування газу. Саме тому до його технічного стану та режимів роботи висуваються підвищені вимоги.

Зі зростанням одиничної потужності газоперекачувальних агрегатів широкого поширення набули трьохвальні газотурбінні установки, принципову схему яких наведено на рисунку 1.4.

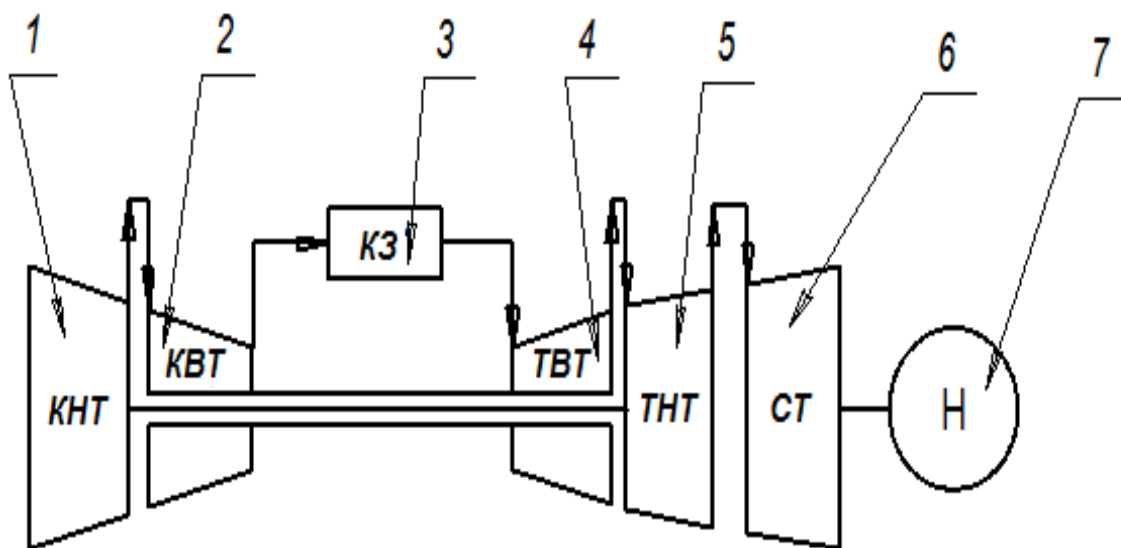


Рисунок 1.4 – Принципова схема трьохвальної ГТУ

1 – компресор низького тиску (КНТ); 2 – компресор високого тиску (КВТ); 3 – камера згоряння (КЗ); 4 – турбіна високого тиску (ТВТ); 5 – турбіна низького тиску (ТНТ); 6 – силова турбіна (СТ); 7 – нагнітач (Н).

Їх характерною особливістю є наявність двох компресорних каскадів і трьох окремих валів, що дозволяє забезпечити більш ефективний розподіл потужності між основними вузлами установки.

Необхідність застосування багатокаскадних компресорів обумовлена тим, що при високих ступенях стискання виникає нерівномірність розподілу повітряного потоку вздовж проточної частини компресора. Це може спричиняти нестійкі режими роботи та виникнення помпажу. Для усунення

таких явищ компресор поділяють на окремі каскади, кожен з яких працює зі своєю частотою обертання та приводиться відповідною турбіною.

Перевагою трьохвальної схеми є можливість незалежного регулювання параметрів окремих каскадів, що сприяє підвищенню економічності роботи установки та покращує її експлуатаційні характеристики в широкому діапазоні навантажень. Завдяки цьому такі газотурбінні установки активно використовуються у складі сучасних газоперекачувальних агрегатів великої потужності.

Для забезпечення надійної роботи ротори компресорів і турбін встановлюються на підшипникових опорах. Залежно від конструктивного виконання застосовуються підшипники ковзання або кочення. Наявність опорних та опорно-упорних підшипників забезпечує сприйняття радіальних і осьових навантажень, що виникають під час роботи агрегату.

На компресорних станціях газотранспортної системи України широко застосовуються газоперекачувальні агрегати типу ГПА-Ц-16С/76-1,44М1, створені на базі газотурбінного двигуна ДГ-90Л2.1 виробництва ДП НВКГ «Зоря–Машпроект».

Такі агрегати виконані у блочно-контейнерному варіанті та забезпечують високий рівень автоматизації, надійності та ремонтпридатності під час експлуатації.

Загальний вигляд зазначеного газоперекачувального агрегату наведено на рисунку 1.5, а його основні технічні характеристики подано в таблиці 1.1.

Вказані ГПА експлуатуються в компресорному цеху №3 Долинської площадки Богородчанського ЛВУ МГ ТОВ «Оператор ГТС. Західний регіон»

					КРБ. СІ - 09.00.00. 000 ПЗ	Арк.
						20
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дат		

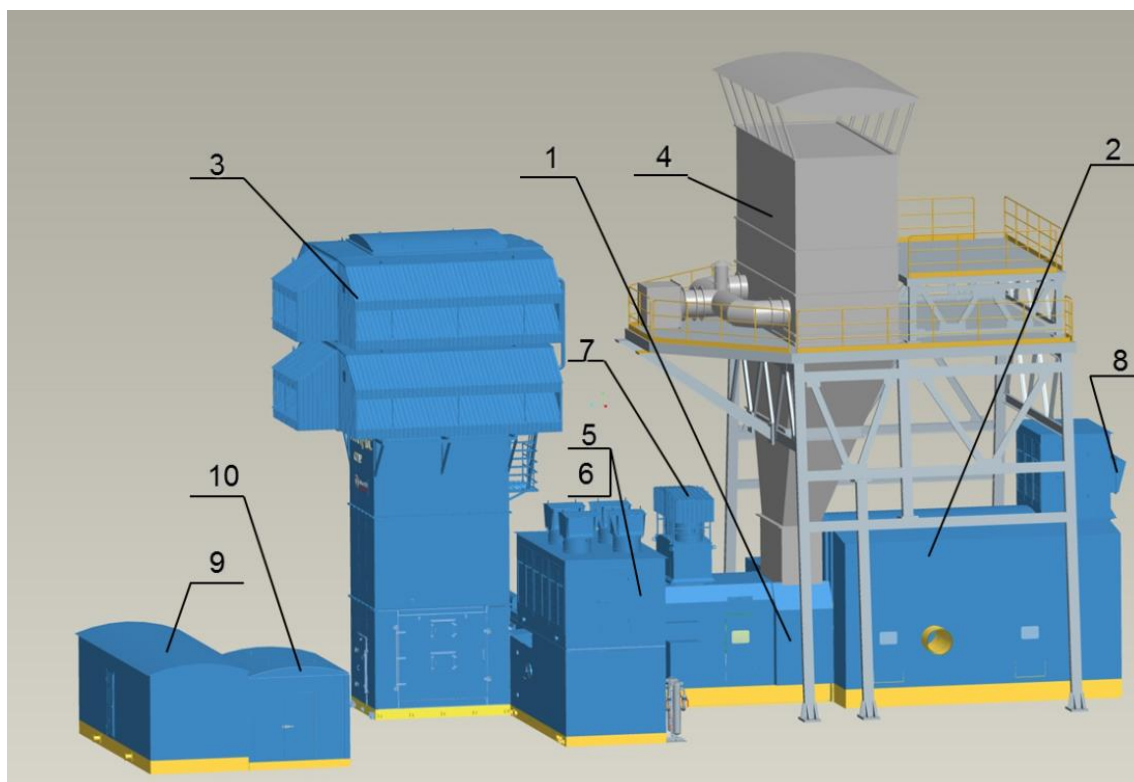


Рисунок 1.5 – Загальний вигляд ГПА-Ц-16С/76-1,44М1 на базі ГТД ДГ-90Л2.1 з електрозапуском

1 – блок силовий; 2 – блок компресора; 3 – всмоктуючий тракт; 4 – вихлопний тракт; 5 – блок маслоохолоджувачів двигуна; 6 – блок систем забезпечення; 7 – блок вентиляції; 8 – блок маслоохолоджувачів компресора; 9 – блок автоматики; 10 – блок пожежогасіння.

В табл. 1.1 наведені основні технічні характеристики ГПА-Ц-16С/76-1,44М1.

Таблица 1.1 – Технічні характеристики ГПА-Ц-16С/76-1,44М1

ПАРАМЕТР	Одиниця вимірювання	Значення
Продуктивність розрахункова, приведена до температури 293 К (+ 20 ° С) і тиску 0,101 МПа (1,033кг/см ²)	млн. м ³ / добу	29,5
Тиск початковий, абсолютний, розрахунковий	МПа	5,17

Продовження таблиці 1.1

Тиск кінцевий, абсолютний, розрахунковий	МПа	7,45
Відношення тисків, розрахункове	-	1,44
Політропний ККД компресора	%	87
Частота обертання ротора компресора, розрахункова	об/хв.	5100
Потужність, яка споживається компресором, розрахункова	МВт	14,4
Витратні показники по електроенергії споживаної ГПА, розрахункові: • встановлена потужність • споживана потужність при пуску (зима/літо) • споживана потужність при роботі (зима/літо)	кВт	257 187 / 147 57 / 47
Марка масла, яке використовують у ГПА	-	ТП22С
Обсяг масла для першої заправки маслосистеми: • газотурбінного двигуна • відцентрового компресора	т	2,2 4
Емісія шкідливих речовин, не більше: • NO _x • CO	мг/нм ³	75* 100*
Інші характеристики ГТД	-	У відповідності з ТУ
Габаритні розміри: • довжина • ширина • висота	мм	28 950 16 100 19 250

Аналіз наведених параметрів свідчить про можливість ефективної роботи агрегату в широкому діапазоні режимів транспортування природного газу.

					КРБ. СІ - 09.00.00. 000 ПЗ	Арк.
						22
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дат		

Режими роботи компресорної станції КС 3«Долина», наведені в таблиці 1.2, демонструють зміну основних технологічних параметрів залежно від умов експлуатації.

Таблиця 1.2– Режими роботи КС 3«Долина»

ПАРАМЕТР	Одиниця вимірювання	Значення						
Тиск початковий, абсолютний	МПа	4,66	4,35	3,96	5,34	5,33	5,31	5,13
Тиск кінцевий, абсолютний	МПа	5,59	5,85	6,09	6,91	7,34	7,34	7,35
Відношення тисків	-	1,20	1,34	1,54	1,29	1,38	1,38	1,43
Температура газу на вході в компресор	°С	8,0	8,2	8,0	10,3	10,9	14,7	14,7
Продуктивність ГПА, приведена до температури + 20 ° С і тиску 0,101 МПа (1,033кг/см ²)	млн. м ³ /добу	33	19	21,5	26,5	29	29	29

Зокрема, зміна початкового та кінцевого тиску безпосередньо впливає на продуктивність агрегату, відношення тисків та енергетичні показники роботи компресорної станції.

Одним із найважливіших елементів газоперекачувального агрегату є відцентровий компресор, конструкцію якого наведено на рисунку 1.6.

До його складу входять корпусні елементи, ротор, підшипникові вузли, ущільнення та допоміжні системи забезпечення.

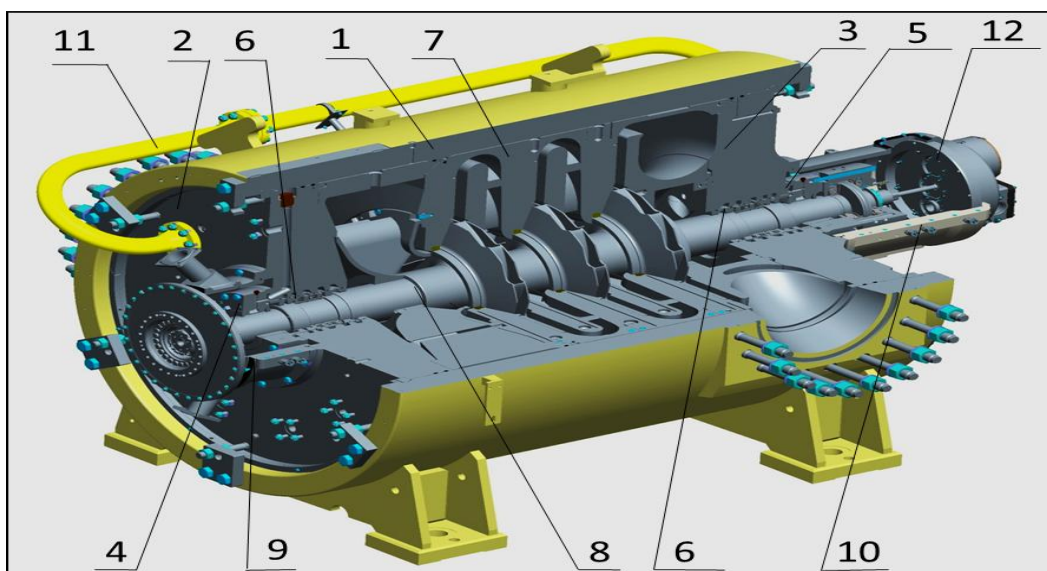


Рисунок 1.6 – Конструкція відцентрового компресора

1 – корпус; 2 – кришка передня; 3 – кришка задня; 4 – підшипник опорний; 5 – підшипник опорно-наполегливий; 6 – ТГВУ; 7 – корпус внутрішній; 8 – ротор; 9, 10 – кожух; 11 – трубопровід; 12 – маслonaсос.

Сукупність зазначених вузлів формує єдину конструкцію, призначену для надійного стискання та транспортування природного газу відповідно до заданих технологічних параметрів.

1.2 Параметри газоперекачувальних агрегатів та експлуатаційні обмеження

Під час експлуатації газоперекачувальних агрегатів необхідно забезпечувати підтримання низки технологічних параметрів у допустимих межах. Вихід окремих показників за встановлені значення може призвести до зниження ефективності роботи обладнання, прискореного зношування його вузлів або виникнення аварійних ситуацій. Саме тому сучасні ГПА оснащуються автоматизованими системами контролю та керування, які забезпечують безперервний моніторинг режимів роботи агрегату та оперативне реагування на відхилення.

					КРБ. СІ - 09.00.00. 000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дат		24

Одним із найважливіших параметрів є температура газового потоку перед турбіною високого тиску. Робочі лопатки та елементи першого ступеня турбіни функціонують в умовах значних механічних і теплових навантажень. Високі частоти обертання ротора у поєднанні зі значною температурою продуктів згоряння створюють складні умови експлуатації. Навіть незначне перевищення допустимої температури може спричинити прискорене старіння матеріалу лопаток, появу тріщин та подальше руйнування елементів турбіни.

З метою запобігання таким пошкодженням система керування повинна забезпечувати узгоджену зміну подачі палива та витрати повітря через компресор. Реалізація цього завдання в ручному режимі є практично неможливою, оскільки потребує швидкого аналізу великої кількості параметрів та миттєвого прийняття рішень. Тому підтримання температури перед турбіною високого тиску здійснюється автоматичними регуляторами.

Особливої уваги потребують режими пуску агрегату. У цей період необхідно контролювати не лише абсолютне значення температури, а й швидкість її зміни. Надто інтенсивне нагрівання деталей турбіни спричиняє виникнення додаткових температурних напружень, які разом із механічними навантаженнями можуть негативно впливати на довговічність ротора. Для обмеження таких явищ системи автоматичного керування забезпечують контроль допустимого температурного градієнта та підтримують оптимальну швидкість прогрівання обладнання.

Не менш важливим є контроль частоти обертання турбіни низького тиску. У разі різкого зменшення навантаження можливе швидке зростання частоти обертання ротора до небезпечних значень. Подібні режими можуть призвести до пошкодження лопаткового апарату або інших елементів турбіни. Для запобігання аварійним ситуаціям застосовуються спеціальні захисні алгоритми, які забезпечують оперативне зменшення енергетичного потоку через турбіну та стабілізацію її роботи.

					КРБ. СІ - 09.00.00. 000 ПЗ	Арк.
						25
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дат		

Високі вимоги висуваються також до контролю стану підшипникових вузлів. Температура підшипників є одним із найбільш інформативних показників їх технічного стану. Підвищення температури понад допустимі значення може свідчити про погіршення умов мащення, збільшення тертя або розвиток механічних дефектів. У таких випадках система автоматичного захисту формує попереджувальні сигнали або ініціює аварійну зупинку агрегату.

Окрім температурного контролю здійснюється безперервний моніторинг тиску мастила, параметрів систем ущільнення, стану регулювальної апаратури та інших технологічних показників. Загальна кількість контрольованих параметрів у сучасних газоперекачувальних агрегатах може досягати кількох десятків. Ефективне спостереження за такою кількістю даних можливе лише за допомогою автоматизованих систем контролю та діагностування.

Важливою функцією систем автоматизації є також реєстрація параметрів роботи обладнання. Безперервний запис технологічної інформації дає можливість аналізувати режими експлуатації, оцінювати технічний стан агрегату та своєчасно виявляти тенденції до розвитку несправностей.

Оскільки газоперекачувальні агрегати використовуються для транспортування природного газу в умовах змінних навантажень, параметри роботи нагнітача можуть суттєво змінюватися залежно від режимів функціонування газотранспортної системи. Зміна тиску на вході або виході компресора впливає на навантаження турбіни та частоту її обертання. Для забезпечення стабільної продуктивності агрегату застосовуються автоматичні регулятори, які підтримують необхідні режими роботи незалежно від зовнішніх впливів.

До переліку параметрів, що підлягають постійному контролю, належать також осьові зміщення валів, рівень вібрації, стан системи горіння та інші діагностичні показники. Збільшення осьового зсуву може свідчити про порушення роботи підшипникових вузлів або зміни навантаження на ротор.

					КРБ. СІ - 09.00.00. 000 ПЗ	Арк.
						26
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дат		

Контроль вібрації дозволяє своєчасно виявляти дисбаланс, розцентрування, дефекти підшипників та інші несправності механічної частини агрегату.

Особливу небезпеку становить згасання полум'я в камері згоряння під час подачі палива. За таких умов можливе накопичення паливоповітряної суміші та її подальше вибухове займання, що створює загрозу пошкодження обладнання. Саме тому контроль наявності факела належить до найважливіших функцій систем автоматичного захисту.

Отже, безпечна та ефективна експлуатація газоперекачувальних агрегатів неможлива без застосування сучасних засобів автоматизації. Автоматичні системи контролю, регулювання та захисту забезпечують підтримання технологічних параметрів у допустимих межах, своєчасне виявлення відхилень і запобігання розвитку аварійних ситуацій.

Враховуючи, що витрати на автоматизацію становлять незначну частину загальної вартості газоперекачувального агрегату, її використання є технічно та економічно обґрунтованим засобом підвищення надійності й безпеки роботи обладнання.

1.3 Необхідність автоматизації процесу компримування газу та постановка задачі керування ГПА

Сучасний газоперекачувальний агрегат є складним технічним комплексом, функціонування якого пов'язане не лише з процесами перетворення енергії в газотурбінному двигуні, а й із роботою значної кількості допоміжних систем і механізмів. До них належать системи паливостачання, мащення, охолодження, вентиляції, пожежогасіння, газоповітряного тракту та інші підсистеми, від справності яких залежить безпечна та ефективна експлуатація агрегату.

Керування окремими допоміжними механізмами зазвичай передбачає виконання простих операцій, таких як вмикання або вимикання обладнання,

					КРБ. СІ - 09.00.00. 000 ПЗ	Арк.
						27
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дат		

відкриття чи закриття запірної арматури. Проте необхідність суворого дотримання визначеної послідовності дій під час пуску, роботи та зупинки агрегату значно ускладнює процес керування в цілому. Крім того, робота кожного ГПА пов'язана з функціонуванням інших агрегатів компресорного цеху та загальностанційного обладнання, що формує складну систему взаємозалежних зв'язків.

Використання автоматизованих систем керування є необхідною умовою забезпечення надійної роботи газоперекачувальних агрегатів. Особливості побудови магістральних газопроводів, на яких експлуатується значна кількість однотипного обладнання, створюють сприятливі умови для комплексної автоматизації технологічних процесів транспортування природного газу. Саме автоматизація дозволяє підтримувати оптимальні режими роботи обладнання, підвищувати енергоефективність та мінімізувати ризик виникнення аварійних ситуацій.

Переваги автоматизації полягають не лише у скороченні витрат на обслуговування обладнання. Значно важливішим є забезпечення стабільної роботи агрегату в режимах, близьких до оптимальних. Для більшості газотурбінних установок оптимальні режими експлуатації одночасно знаходяться поблизу гранично допустимих значень основних параметрів. Зокрема, допустимі відхилення температури газу перед турбіною, частоти обертання ротора або тиску на виході нагнітача є незначними та становлять лише кілька відсотків від номінальних значень. За таких умов тривале підтримання необхідного режиму можливе лише за наявності автоматичних систем регулювання та захисту.

Функціональна структура системи автоматичного керування ГПА включає декілька взаємопов'язаних підсистем.

Підсистема автоматичного пуску та блокувань забезпечує виконання операцій запуску й зупинки агрегату у визначеній послідовності та відповідно

					КРБ. СІ - 09.00.00. 000 ПЗ	Арк.
						28
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дат		

до встановлених алгоритмів. Її основним завданням є мінімізація тривалості перехідних процесів при одночасному дотриманні технологічних обмежень.

Підсистема захисту призначена для виявлення аварійних ситуацій та запобігання їх подальшому розвитку. У випадку виникнення небезпечних відхилень вона формує відповідні команди на зупинку агрегату або переведення його у безпечний режим роботи.

Підсистема автоматичного регулювання підтримує задані значення основних технологічних параметрів та забезпечує стабільність роботи обладнання при зміні зовнішніх умов і навантаження.

Підсистема контролю та сигналізації здійснює збір інформації від первинних датчиків, її обробку, відображення та передачу оператору, а також формує попереджувальні й аварійні повідомлення.

Підсистема діагностування та випробувань використовується для перевірки працездатності обладнання після ремонтів, проведення налагоджувальних робіт та оцінювання технічного стану агрегату в процесі експлуатації.

Важливою вимогою до системи керування є її інтеграція із загальноцеховими та станційними системами автоматизації. Це дозволяє реалізувати централізоване керування обладнанням компресорної станції, здійснювати дистанційний контроль параметрів та забезпечувати взаємодію з системами телемеханіки газотранспортного підприємства.

У загальному випадку автоматичне керування газоперекачувальним агрегатом реалізується у двох основних режимах.

Перший режим охоплює процеси пуску та зупинки агрегату, які характеризуються значними змінами параметрів і потребують виконання чітко визначеної послідовності операцій.

Другий режим пов'язаний із підтриманням стабільних параметрів роботи під час експлуатації, зокрема стабілізацією частоти обертання турбіни низького тиску та забезпеченням необхідної продуктивності нагнітача.

					КРБ. СІ - 09.00.00. 000 ПЗ	Арк.
						29
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дат		

Математичний опис процесів керування ГПА базується на використанні систем диференціальних рівнянь, які відображають зміну основних параметрів агрегату в часі.

До таких параметрів належать температура робочого тіла перед турбіною, частоти обертання валів, тиск газу в окремих точках технологічного тракту, витрата робочого середовища та інші величини. Під час побудови математичної моделі обов'язково враховуються технологічні обмеження, що визначають допустимі межі зміни параметрів.

Автоматичне керування газоперекачувальним агрегатом може розглядатися як з математичної, так і з інженерної точки зору. Для аналізу процесів запуску використовується математична модель, яка описує зміну основних параметрів агрегату в часі та дозволяє формалізувати задачу керування.

Математичний опис ГПА – основного тракту перетворення енергії – має вигляд:

$$\frac{dx}{dt} = f(\chi, u) \quad (1.3)$$

де χ – вектор, який має складові $x_1, x_2, \dots, x_n$, під якими можна розуміти: $x_1 = t_1$ – температура робочого тіла перед ТВТ, $x_2 = \omega_e$ і $x_3 = \omega_H$ – кутова швидкість обертання відповідно ТВТ і ТНТ, $x_4 = p_1$ – тиск робочого тіла перед ТВТ, $x_5 = p_H$ – тиск газу після нагнітача, $x_6 = Q_H$ – витрата газу через нагнітач і т.ін.; $U = m$ – скалярний керуючий вплив, тобто положень не регулюючого клапана; $f(\chi, u)$ – вектор-функція з координатами $f_1, f_2, \dots, f_n$, якими характеризується закони перетворення енергії і протікання робочого тіла по проточній частині.

На складові вектора накладені обмеження:

$$A_i \leq x_i \leq B_i, \quad 0 \leq m \leq m_{\max}, \quad (1.4)$$

які уберігають турбіну від аварійних режимів.

					КРБ. СІ - 09.00.00. 000 ПЗ	Арк.
						30
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дат		

Запишемо декілька обмежень, враховуючи, що координати не можуть приймати від'ємних значень: $\bar{t}_e \leq x_1 \leq \bar{t}_{1\max}$; $0 \leq \omega_e \leq \omega_{e\max}$; $0 \leq \omega_H \leq \omega_{H\max}$; $p_0 \leq x_4 \leq p_{1\max}$, і т.д.

Обмеження можуть накладатися не на самі координати, але і на швидкості їх зміни. Так, під час пуску повинна бути обмежена швидкість наростання температури перед ТВТ, тобто

$$\frac{d\bar{t}_1}{dt} = \bar{t}_1 \leq \bar{t}_{1\max}. \quad (1.5)$$

Нехай в просторі станів дане початкове значення вектора χ у момент t_0 , тобто $\chi(t_0)$ і кінцевий стан цього вектора в момент t_1 тобто $\chi(t_1)$. Потрібно за допомогою керування $u(t)$ перевести вектор χ з початкового стану $\chi(t_0)$ в кінцевий $\chi(t_1)$. До руху між точками $\chi(t_0)$ і $\chi(t_1)$ можуть висуватися певні вимоги, тому дана загальна задача розпадається на дві власні.

1. Знайти таке керування $u(t)$, щоб час **переведення** вектора стану $t_1 - t_0$ був мінімальним. при виконанні всіх обмежень.

2. Знайти таке керування $u(t)$, щоб за даний час руху $t_1 - t_0 = \tau$ витрати палива були мінімальними при виконанні всіх обмежень.

Незважаючи на наявність математичної постановки задачі запуску газотурбінної установки, її практична реалізація залишається досить складною.

Основною причиною є те, що під час пуску в агрегаті протікають нестационарні термодинамічні процеси, які важко описати з необхідною точністю за допомогою аналітичних залежностей.

Реальні характеристики обладнання змінюються в часі та залежать від багатьох факторів, зокрема температурного стану вузлів, параметрів навколишнього середовища та технічного стану агрегату.

Додаткові труднощі пов'язані з тим, що не всі параметри, які впливають на надійність роботи турбіни, можуть бути безпосередньо виміряні в процесі

експлуатації. Наприклад, значний вплив на довговічність обладнання мають температурний стан лопаток турбіни, перепади температур у дисках ротора, а також величини робочих зазорів між рухомими та нерухомими елементами конструкції. Через відсутність можливості прямого вимірювання таких параметрів системи керування змушені використовувати непрямі методи оцінювання їхнього стану.

Реалізація оптимальних алгоритмів керування потребує виконання значної кількості математичних операцій у режимі реального часу. Для цього використовуються спеціалізовані програмно-технічні комплекси, здатні здійснювати оброблення інформації від великої кількості датчиків та формувати необхідні керувальні впливи. Однак надмірне ускладнення алгоритмів може негативно впливати на надійність системи, тому при проектуванні завжди досягається компроміс між точністю керування та складністю реалізації.

На практиці під час створення систем автоматичного керування широко використовуються результати експериментальних досліджень і накопичений досвід експлуатації газотурбінного обладнання. Це дозволяє формувати алгоритми, які хоча й не завжди є математично оптимальними, проте забезпечують необхідний рівень надійності, безпеки та економічності роботи агрегату.

Окрему групу задач становить стабілізація робочих режимів газоперекачувального агрегату під час зміни навантаження. Найчастіше така задача зводиться до підтримання заданої частоти обертання турбіни низького тиску та забезпечення стабільної продуктивності нагнітача. На відміну від режимів запуску, поблизу усталеного робочого режиму зміни параметрів є відносно незначними, що дає змогу застосовувати методи лінеаризації математичних моделей.

$$\frac{dx}{dt} = Ax + Bu, \quad (1.6)$$

де A і B – матриці з постійними елементами.

					КРБ. СІ - 09.00.00. 000 ПЗ	Арк.
						32
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дат		

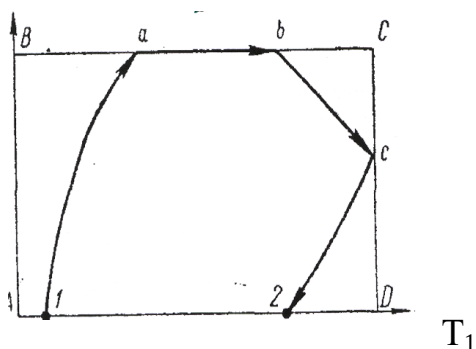
Рівняння (1.6) є лінеаризованою математичною моделлю системи автоматичного керування в околі заданого робочого режиму. Такий підхід дає можливість застосовувати методи аналізу та синтезу лінійних систем автоматичного керування для дослідження стійкості та якості регулювання.

Використання лінійних моделей значно спрощує аналіз стійкості системи автоматичного керування та дає можливість застосовувати відомі інженерні методи синтезу регуляторів. У результаті забезпечується отримання необхідних показників якості перехідних процесів та підтримання стабільної роботи агрегату в широкому діапазоні експлуатаційних режимів.

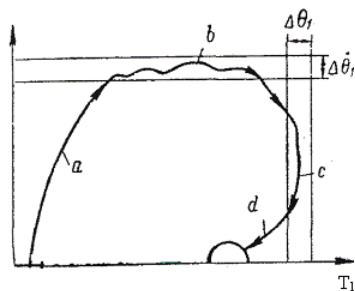
Для наочного пояснення розглянемо приклад керування температурою газів перед турбіною високого тиску (рис. 1.7).

Під час пуску обмежується швидкість зростання температури перед ТВТ, виходячи з допустимих термічних і механічних напружень на лопатках і диску робочого колеса. Обмежується і сама температура також з умов надійності роботи лопатевого апарату. Візьмемо простір станів, утворений координатами

T_1 і $\frac{dT_1}{dt} = T_4$ (рис.1.7).



а



б

Рисунок 1.7 – Управління температурою і швидкістю її зміни перед ТВТ

На рисунку 1.7 показано області допустимих значень температури перед турбіною високого тиску та швидкості її зміни. Траєкторія зміни параметрів під час запуску повинна знаходитися в межах встановлених обмежень. Це забезпечує збереження допустимого рівня термічних і механічних навантажень на елементи турбіни та підвищує надійність експлуатації агрегату.

Під час проєктування систем автоматичного керування важливе значення має правильний вибір допустимих областей зміни параметрів. Саме вони визначають межі нормальної роботи агрегату та умови спрацювання захисних функцій. У випадку виходу параметрів за встановлені межі система повинна автоматично перевести агрегат у безпечний режим або виконати його аварійну зупинку.

Таким чином, основною метою автоматичного керування газоперекачувальним агрегатом є забезпечення безпечного переведення установки між різними режимами роботи, підтримання стабільних технологічних параметрів, запобігання аварійним ситуаціям та здійснення безперервного контролю технічного стану обладнання. Реалізація цих функцій є необхідною умовою ефективної та надійної експлуатації сучасних газотранспортних систем.

1.4 Аналіз сучасних систем автоматичного керування газоперекачувальними агрегатами

Газоперекачувальні агрегати з газотурбінним приводом належать до складних об'єктів автоматизації, оскільки характеризуються значною кількістю контрольованих параметрів, наявністю взаємопов'язаних технологічних процесів та високими вимогами до надійності функціонування.

Розглянемо найбільш поширені системи автоматичного керування газоперекачувальними агрегатами, які застосовуються на об'єктах газотранспортної системи.

					КРБ. СІ - 09.00.00. 000 ПЗ	Арк.
						34
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дат		

У роботі [7] розглянуто САК ГПА, розроблену АТ «Хартрон» на базі програмно-технічного комплексу «Дельта-1».

Системи автоматизації газоперекачувальних агрегатів застосовуються протягом тривалого часу, проте широке впровадження сучасних систем автоматичного керування стало можливим завдяки розвитку мікропроцесорної техніки та програмованих логічних контролерів.

До основних функцій САК ГПА належать:

- регулювання оборотів нагнітача – підтримка заданого режиму роботи ДПА шляхом регулювання подачі паливного газу до двигуна;
- протипомпажне регулювання нагнітача – підтримка мінімально допустимого запасу по помпажу нагнітача, що дозволяє отримати максимально можливий для заданого режиму роботи ККД ГПА;
- аварійний захист ГПА;
- керування окремими механізмами ГПА;
- реєстрація та відображення інформації, що характеризує стан ГПА.

Крім того, САК ГПА забезпечує контроль справності датчиків, виконавчих механізмів, каналів зв'язку та програмно-технічних засобів системи керування.

Для реалізації перелічених вимог базова САК ГПА має необхідний набір каналів введення/виведення для сполучення з різними давачами та виконавчими пристроями.

У базовій САК ГПА приймаються:

- до 80 аналогових сигналів від різних датчиків (термометри опору, термопари, струмові та потенційні);
- до 4 частотних сигналів від датчиків частоти обертання;
- до 160 дискретних сигналів (типу «сухий контакт» або потенційних з напругою постійного або змінного струму від 24 до 220 В).

Базова САК ГПА видає:

- 4 аналогових сигнали (або ШІМ-сигналу) на регулятори;

					КРБ. СІ - 09.00.00. 000 ПЗ	Арк.
						35
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дат		

- до 120 дискретних сигналів на виконавчі механізми (напругами постійного або змінного струму до 220 В, до 2 А).

САК ГПА має мати високу надійність. Так, середній час напрацювання на відмову за функцією «пропуск аварії» має бути не менше 100 тисяч годин.

Температура навколишнього середовища для апаратури САК ГПА може змінюватися в межах від 0 до 50 °С.

На рисунку 1.8 наведено структурну схему САК ГПА виробництва АТ «Хартрон».

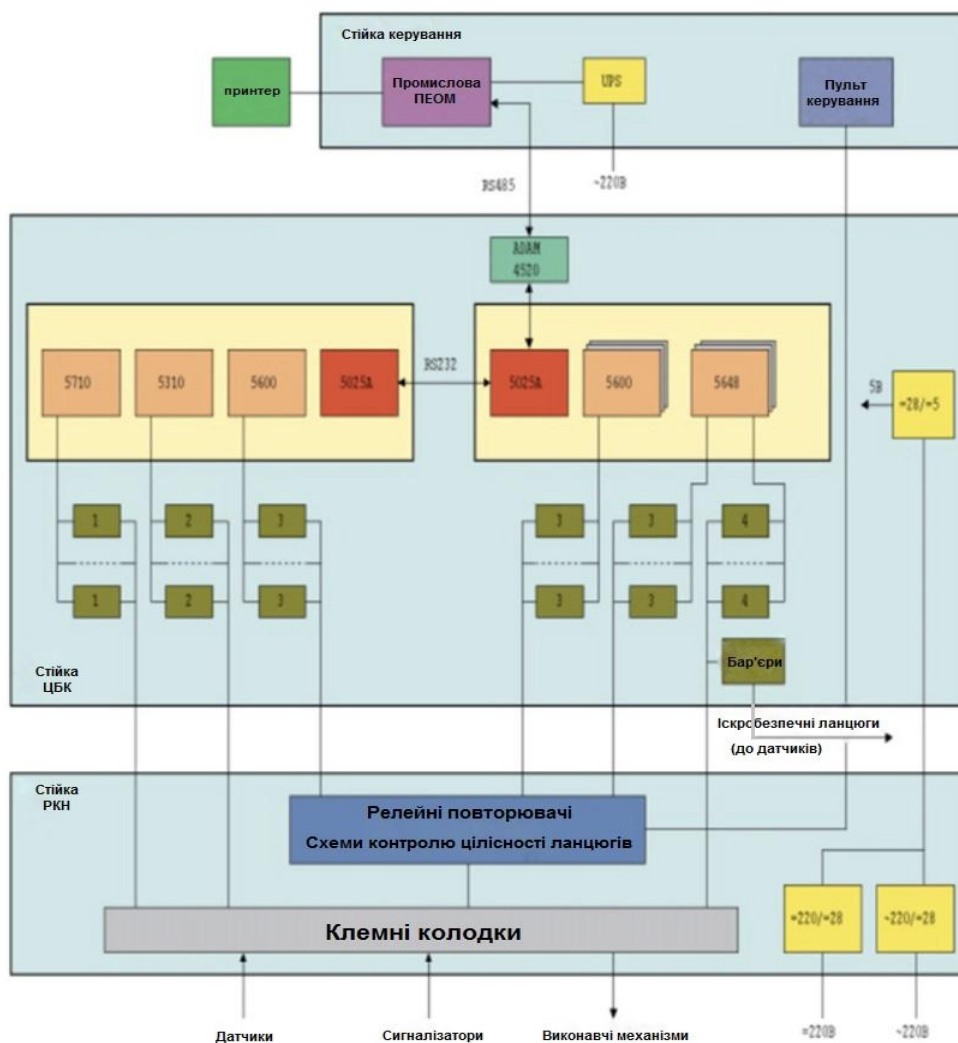


Рисунок 1.8 – Структурна схема САК ГПА

1 - модулі аналогового введення-виведення фірми Analog Devises, 2 - пристрої нормалізації сигналів датчиків частоти обертання; 3 - модулі дискретного введення-виводу фірми Grayhill, 4 - модулі аналогового введення фірми Grayhill

Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дат

Техніко-економічні та експлуатаційні характеристики САК ГПА значною мірою визначаються технічними засобами. У свою чергу, технічні засоби впливають на структурну схему САК ГПА.

З урахуванням досвіду попередніх розробок та сучасних технічних рішень для реалізації САК ГПА було обрано такі технічні засоби:

1. Процесор та плати розширення (дискретні та аналогові входи-виходи та ін.) – серія MicroPC фірми Octagon Systems.

2. Модулі аналогового введення з гальванічною розв'язкою – серія 7В фірми Analog Devices та серія 73G фірми Grayhill.

3. Модулі дискретного вводу/виводу – серія 70G фірми Grayhill.

4. Бар'єри іскробезпеки – серія MTL-755 фірми Measurement Technology.

5. Модуль гальванічної розв'язки RS-485 – ADAM 4520 фірми Advantech.

6. Побічні джерела живлення – серія PM фірми Lambda.

7. Реле (для дискретного виведення сигналів напругою 220 В постійного струму та комутації ланцюгів з піропатронами) – серія РЕН 33 Харківського релейного заводу.

8. Клемні з'єднувачі – пружинні клеми фірми WAGO.

9. Промислова ПЕОМ – AWS-822 фірми Advantech.

10. Джерела безперебійного живлення (від мережі змінного струму 220 В) – фірми Exide Electronics.

11. Двомережні джерела живлення (від мережі постійного струму 220 В та мережі змінного струму 220 В) – фірми Lambda Electronics.

Аналіз функцій, що виконуються САК ГПА, показує, що такі функції, як протипомпажне регулювання та аварійний протипомпажний захист, а також регулювання частоти обертання та аварійний захист двигуна за частотою обертання вимагають високої швидкодії САК (такт вирішення завдання – не більше 20 мс), інші ж функції САК такої швидкодії не вимагають. Враховуючи ці вимоги, а також досить великий загальний обсяг обробленої САК ГПА

					КРБ. СІ - 09.00.00. 000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дат		37

інформації, у САК ГПА «Дельта-1» використовують два контролери: один – для вирішення «швидких» завдань, другий – «повільних».

САК ГПА «Неман» [8] призначена для виконання функції автоматичного керування, регулювання, контролю та захисту, що забезпечують безаварійну тривалу роботу газоперекачувального агрегату. Вона інтегрується в АСК технологічного процесу (ТП) компресорного цеху (КЦ) та підключається до промислової мережі на базі Ethernet за допомогою оптичних або мідних ліній зв'язку. Система забезпечує регулювання параметрів агрегату та підтримання заданого режиму як безпосередньо за уставками диспетчера, так і спільно із САР КЦ.

Система виконана на базі ІВКУ «Неман» із використанням сучасних програмно-технічних засобів (ПТЗ) у тому числі із застосуванням контролерів у форматі CompactPCI та MicroPC.

Для САК ГПА «Неман» передбачено такі варіанти комплектації системи:

- повнофункціональна САК, що забезпечує логічне управління, паливне та антипомпажне регулювання;
- система без паливного та антипомпажного регулювання; САК ГПА інтегрує штатні системи регулювання;
- система паливного та антипомпажного регулювання (блок регулювання), призначена для доукомплектування діючих штатних систем.

Використання САК ГПА «Неман» забезпечує підвищення надійності керування агрегатом, зменшення ймовірності помилкових спрацювань захисту, розширення можливостей інтеграції із суміжними системами автоматизації та покращення енергоефективності експлуатації обладнання.

В таблиці 1.3 наведені види САК ГПА «Неман».

					КРБ. СІ - 09.00.00. 000 ПЗ	Арк.
						38
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дат		

Таблиця 1.3 – Типи САК ГПА «Неман»

Тип САУ	Тип ГПА/ГТД
САУ ГПА “Неман-10-4” ТУ 4318-103-00158818-2008	ГТК-10-4
САУ ГПА “Неман-6” ТУ 4318-113-00158818-2010	ГПА-Ц-6,3
САУ ГПА “Неман-16” ТУ 4318-076-00158818-2003	ГПУ-16
“Неман-ГТН-6” ТУ 4318-076-00158818-2003	ГТН-6

На рисунку 1.9, а наведено щит автоматики САК ГПА на базі ПЛК GE Rx3i, а на рисунку 1.9, б — апаратний блок-бокс САК ГПА «Неман».



Рисунок 1.9 – Щит автоматики САК ГПА на базі ПЛК GE Rx3i (а) та апаратний блок-бокс САК ГПА «Неман» (б)

На рисунку 1.10 наведено типову структуру САК ГПА «Неман». САК ГПА «Квант-NN» [8] призначена для автоматичного керування газоперекачувальними агрегатами компресорних станцій магістральних газопроводів та дожимних компресорних станцій, включаючи контроль технологічних параметрів та стану виконавчих механізмів ГПА, а також регулювання та захист на всіх режимах роботи.

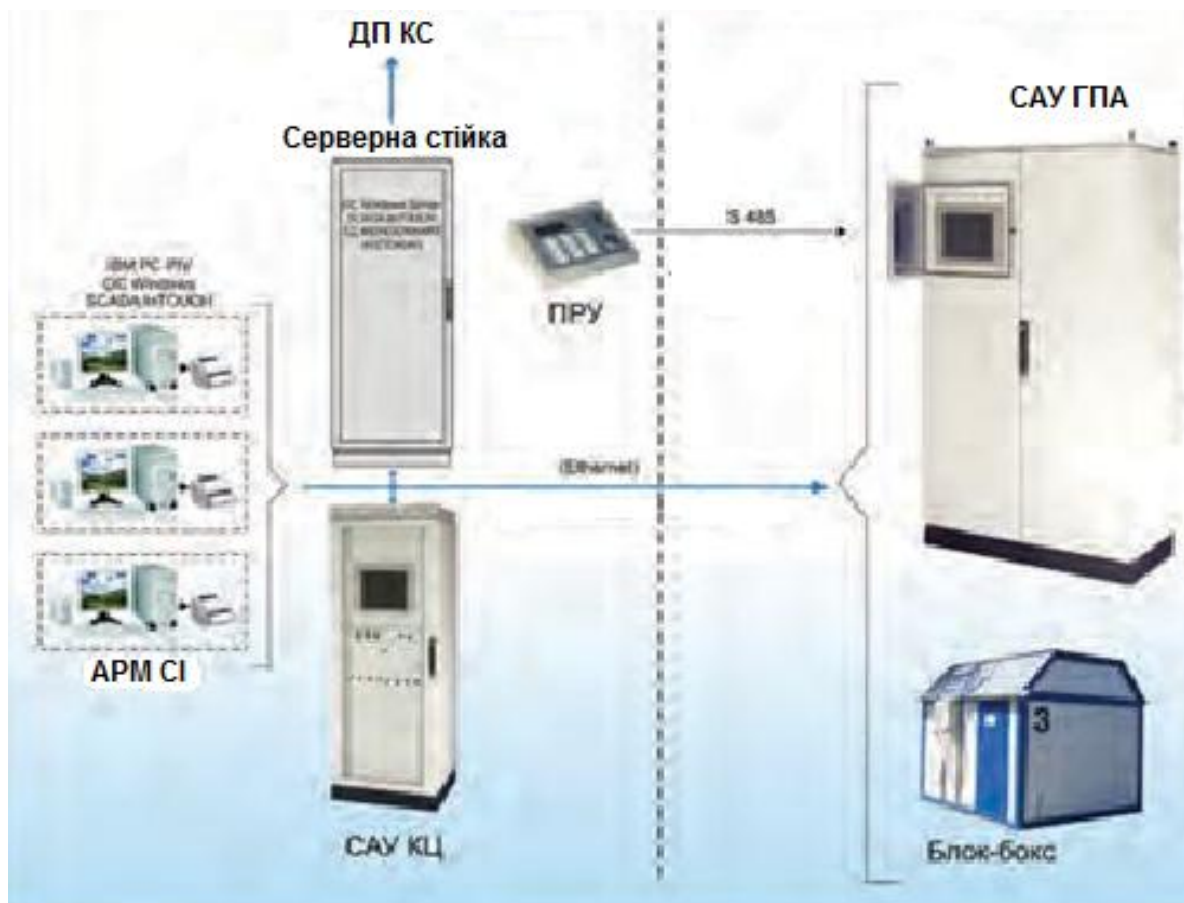


Рисунок 1.10 - Типова структура САК ГПА «Неман»

Система побудована за принципом розподіленої архітектури на базі програмованих логічних контролерів та промислових робочих станцій, що забезпечують високий рівень надійності, швидкодії та можливість інтеграції до сучасних автоматизованих систем керування технологічними процесами.

САК ГПА «Квант-NN» розробляється залежно від типу ГТД та типу ГПА (табл. 1.4).

Таблиця 1.4 – Типи САК ГПА «Квант»

№ п/п	Тип САК	Тип ГПА/ГТД
1	«Квант-1М»	ГТК-10-4, ГТК-750-6
2	«Квант-2»	НК-12(14,16,36)СТ
3	«Квант-2Э»	СТД-12500(4000)
4	«Квант-3»	ДР(ДЖ)59, ДГ90, ДИ70
5	«Квант-4»	АЛ-31СТ(СТН), ГТД-6,3РМ
6	«Квант-5»	ГТК-25И(Р)
7	«Квант-6М	ГТК-10И(Р)
8	«Квант-7»	SOLAR
9	«Квант-8»	PGT-10, PGT-21
10	«Квант-9»	ПС-90
11	«Квант-10»	ГТН-6У, ГТН-16
12	«Квант-11»	ЭГПА-25
13	«Квант-12»	ЭСН «Ruston»
14	«Квант-14»	ТКА ТНМ1203
15	«Квант-20»	ГМК8, ГМК10

В табл. 1.5. наведені технічні характеристики САК ГПА «Квант».

Таблиця 1.5 – Технічні характеристики САК ГПА «Квант»

Вхідні сигнали: - термоопору - термоелектричні - частотні - уніфіковані струми і напруги - положення	градування всіх типів 0 – 20 кГц 0 – 5 мА, 0 – 20 мА, 4 – 20 мА, - 10 – +10 В LVDT, RVDT
Вихідні сигнали: - дискретні - дискретні - аналогові	1,0 А; ~220 В, =220 В 5 А, =24 В 4 – 20 мА, +/- 10 В

Основна похибка вимірювання:	
- каналами вимірювання температур	0,2%
- каналами вимірювання струму, напруги, положення	0,2%
- каналами вимірювання частоти обертання	0,1%
Живлення:	
- напруга основного живлення	~ 220 В, 50 Гц
- напруга резервного живлення	= 220/110 В
- споживана потужність	не більше 1 кВт
Швидкодія:	
- опитування первинних перетворювачів	не більше 0,02с.,
- формування команд керування	не більше 0,1с.,
- цикл оновлення даних на моніторах	не більше 1 с

Аналіз наведених технічних характеристик свідчить, що система автоматичного керування «Квант» забезпечує необхідний рівень функціональності для сучасних газоперекачувальних агрегатів. До її переваг належать висока швидкодія, значна кількість каналів введення-виведення та можливість адаптації до різних типів газотурбінних двигунів.

Разом з тим розвиток цифрових технологій та засобів діагностування обумовлює необхідність подальшого вдосконалення таких систем, зокрема в частині прогнозування технічного стану обладнання та інтеграції з сучасними засобами моніторингу.

У роботі [9] розглянуто систему автоматичного керування ГПА-Ц-6,3В, побудовану на базі сучасних мікропроцесорних засобів. Система забезпечує автоматичне керування агрегатом, контроль технологічних параметрів, реалізацію функцій захисту та підтримання заданих режимів роботи газоперекачувального агрегату.

Система автоматичного керування газоперекачувальним агрегатом ГПА-Ц-6,3В, оснащеним двигуном НК-12СТ, призначена для автоматизації

управління ГПА з виконанням функцій автоматичного управління агрегатним обладнанням, регулювання, контролю та захисту для забезпечення безаварійної роботи ГПА в режимах тривалої роботи та зупинки.

Система автоматичного керування ГПА-Ц-6,3В розроблена для забезпечення ефективного керування агрегатом, підтримання заданих технологічних режимів, реалізації функцій захисту, підвищення надійності роботи обладнання та надання оперативному персоналу повної інформації про стан технологічного процесу.

Структура розробленої САК ГПА-Ц-6,3 В показана на рис. 1.11.

Відкритість програмно-апаратного забезпечення САК дозволяє використовувати перевірені часом рішення для різних типів ГПА. Особливістю запропонованих рішень є комплекс заходів, вжитих для підвищення живучості та надійності системи в цілому, яка визначає основні переваги даної САК ГПА-Ц-6,3 В перед аналогічними системами.

Проведений аналіз показує, що сучасні системи автоматичного керування газоперекачувальними агрегатами будуються за модульним принципом та забезпечують високий рівень надійності, резервування і функціональної безпеки. Використання стандартизованих програмно-технічних засобів спрощує модернізацію систем, їх технічне обслуговування та інтеграцію із загальноцеховими системами автоматизації.

САК ГПА «САС-ГПА» створена для автоматизації роботи та аварійного захисту одного газоперекачувального агрегату з газотурбінним приводом, який призначений для підтримки заданого тиску газу в магістральному газопроводі.

Газоперекачувальні агрегати об'єднують в групи від 3 до 12 агрегатів (компресорний цех) і встановлюють на певних ділянках газопроводів для забезпечення роботи газотранспортної системи в цілому.

					КРБ. СІ - 09.00.00. 000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дат		43

Компресорний цех крім газоперекачувальних агрегатів (кожен зі своєю автономною САК ГПА) включає також технологічне обладнання для забезпечення життєдіяльності цеху (установки підготовки, підігріву та охолодження газу, кранову обв'язку та ін.)

Все це обладнання управляється локальними системами автоматичного управління, які разом з агрегатними системами входять до складу системи автоматичного управління компресорного цеху.

«САС-ГПА» в різних модифікаціях створюються на базі програмованих логічних контролерів (ПЛК) RX7i, Rx3i, 90-70, VersaMax виробництва GE Fanuc Automation.

Відмовостійкість комплексу програмно-технічних засобів забезпечується:

- резервуванням каналів вимірювання обертів роторів ТНТ і ТВТ;
- резервуванням блоків живлення;
- створенням єдиного резервованого пульта управління агрегатами і суміжними системами рівня компресорного цеху;
- резервуванням та діагностикою цифрових каналів зв'язку пульта управління і систем автоматики, а також передачею відповідних команд по фізичних ланцюгах,
- вбудованими засобами самодіагностики програмно-технічного комплексу та автоматичним контролем цілісності вхідних і вихідних аналогових і дискретних ланцюгів.

Гарантована зупинка технологічного обладнання забезпечується блоком екстреної аварійної зупинки, функціонально незалежним від системи управління та таким, що має автономні канали захисту щодо перевищення граничної частоти обертання ротора ТНТ, перевищення середньої температури продуктів згоряння за ТНТ.

Блок забезпечує контроль працездатності основного ПЛК і безпечну зупинку ГПА з інформацією про основні параметри і положення запірної арматури в разі відмови основного ПЛК.

					КРБ. СІ - 09.00.00. 000 ПЗ	Арк.
						45
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дат		

Технічні засоби «САС-ГПА» забезпечують прийом сигналів:

- від датчиків імпульсних (О...2О) КГЦ - 8 шт.;
- від перетворювачів термоелектричних - 49 шт.;
- від термопреутворювачів опору - 40 шт.;
- від датчиків з уніфікованим сигналом (4-20) мА, (-10... + 10) В, (0.. + 10) В - 48 шт.;

- дискретних = 24 В - 128 шт.

Технічні засоби «САС-ГПА» забезпечують видачу сигналів управління:

- уніфікованих струмових сигналів (4-20) мА, (-10... + 10) В - 10 шт,
- дискретних - 96 шт.

Значення основної наведеної помилки інформаційно-вимірювальних і керуючих каналів (без урахування помилок датчиків і ліній зв'язку):

- від датчиків імпульсних (О...2О) КГЦ - 0,15%;
- від датчиків з уніфікованим сигналом (4-20)мА, (-10... + 10)В, (0... + 10)В - 0,1%.
- від термопреутворювачів опору і термоелектричних - 0,2%;
- уніфікованих струмових сигналів управління (4-20)мА, (-10... + 10)В - 0,1%.

Основні показники швидкодії системи «САС-ГПА» наведено нижче:

- період опитування первинних перетворювачів, задіяних в алгоритмах регулювання (крім перетворювачів термоелектричних і термопреутворювачів опору) - не більше 0,03 с;
- період опитування первинних перетворювачів і сигналізаторів, задіяних в алгоритмах логічного управління та захисту - не більше 0,1 с;
- період формування сигналів управління по каналах регулювання - не більше 0,03 с;
- період формування сигналів по каналах захисту та управління - не більше 0,1 с,

					КРБ. СІ - 09.00.00. 000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дат		46

- час циклу виконання програмних блоків регулювання технологічних параметрів - не більше 0,02 с;

- час циклу виконання програмних блоків логічного управління та захисту - не більше 0,02 с;

- період оновлення даних на моніторах - не більше 0,5 с;

- час очікування викликаного відеокадру - не більше 0,5 с.

Проведений аналіз сучасних систем автоматичного керування газоперекачувальними агрегатами показав, що вони забезпечують реалізацію основних функцій автоматизації, зокрема автоматичний пуск і зупинку агрегатів, регулювання технологічних параметрів, протипомпажний захист, аварійне відключення обладнання, а також збір і відображення інформації про стан технологічного процесу.

Більшість розглянутих систем характеризуються високою надійністю, розвиненими засобами діагностування та можливістю інтеграції до автоматизованих систем керування компресорними станціями.

Разом з тим аналіз показав, що в існуючих системах недостатньо уваги приділяється питанням безперервного моніторингу та оцінювання вібраційного стану газоперекачувальних агрегатів. Враховуючи те, що вібрація є одним із найбільш інформативних діагностичних параметрів, розроблення спеціалізованої системи контролю вібраційного стану дозволить підвищити ефективність технічного діагностування обладнання, своєчасно виявляти дефекти та запобігати виникненню аварійних ситуацій.

Саме тому подальші дослідження в роботі спрямовані на розроблення системи контролю вібраційного стану газоперекачувального агрегату на основі сучасних апаратно-програмних засобів.

					КРБ. СІ - 09.00.00. 000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дат		47

1.5 Висновки та постановка задачі дослідження.

У першому розділі бакалаврської роботи розглянуто конструктивні особливості та принцип функціонування газоперекачувальних агрегатів, які використовуються в газотранспортній системі України. Проведено аналіз одновальних, двохвальних і трьохвальних газотурбінних установок та встановлено, що найбільшого поширення в газотранспортній галузі набули двохвальні газотурбінні установки. Детально проаналізовано їх будову, принцип роботи та взаємодію основних вузлів у процесі транспортування природного газу.

Виконано аналіз основних технологічних параметрів газоперекачувальних агрегатів та обмежень, що накладаються на режими їх роботи. Встановлено, що для забезпечення надійної та безпечної експлуатації необхідно контролювати температуру газів перед турбіною високого тиску, швидкість її зміни, частоту обертання валів турбіни, температуру підшипникових вузлів, параметри систем мащення та інші технологічні показники. Показано, що підтримання зазначених параметрів у допустимих межах потребує використання сучасних засобів автоматичного керування, контролю та захисту.

Досліджено особливості автоматичного керування газоперекачувальними агрегатами та розглянуто основні функції систем автоматичного керування. Встановлено, що такі системи забезпечують автоматичний пуск і зупинку агрегатів, підтримання заданих технологічних режимів, реалізацію протипомпажного захисту, аварійне відключення обладнання, контроль параметрів технологічного процесу та інформування оперативного персоналу про стан обладнання.

Проведено аналіз сучасних систем автоматичного керування газоперекачувальними агрегатами, зокрема систем на базі програмно-технічних комплексів «Дельта-1», «Неман», «Квант» та інших спеціалізованих рішень. Встановлено, що розглянуті системи забезпечують високий рівень

					КРБ. СІ - 09.00.00. 000 ПЗ	Арк.
						48
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дат		

автоматизації процесів компримування газу, мають розвинені засоби захисту та контролю, а також підтримують інтеграцію із системами автоматизованого керування компресорними станціями.

Разом з тим аналіз існуючих систем показав, що їх основна увага зосереджена на контролі технологічних параметрів і забезпеченні безпечних режимів роботи агрегатів. Питання безперервного моніторингу та діагностування технічного стану газоперекачувального обладнання, зокрема на основі аналізу вібраційних параметрів, реалізовані недостатньо або мають обмежені функціональні можливості. Це ускладнює своєчасне виявлення дефектів вузлів і механізмів ГПА та може призводити до зниження ефективності роботи обладнання, збільшення експлуатаційних витрат і виникнення аварійних ситуацій.

Враховуючи результати проведеного аналізу, актуальною є розробка системи контролю вібраційного стану газоперекачувального агрегату на основі сучасних апаратно-програмних засобів, яка може бути інтегрована до складу існуючих систем автоматичного керування.

Для досягнення поставленої мети в бакалаврській роботі необхідно вирішити такі завдання:

- провести аналіз існуючих методів діагностування технічного стану газоперекачувальних агрегатів та визначити найбільш ефективні підходи до вібраційного контролю;
- обґрунтувати вибір методу вібраційного діагностування для контролю технічного стану газоперекачувального агрегату;
- розробити структуру системи контролю вібраційного стану ГПА та визначити склад її основних функціональних елементів;
- обґрунтувати вибір апаратних і програмних засобів для реалізації системи контролю;

					КРБ. СІ - 09.00.00. 000 ПЗ	Арк.
						49
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дат		

– виконати моделювання роботи системи контролю вібраційного стану газоперекачувального агрегату та оцінити ефективність запропонованих технічних рішень.

Отримані результати стануть основою для розроблення та дослідження системи контролю вібраційного стану газоперекачувального агрегату, що дозволить підвищити надійність його експлуатації та ефективність технічного діагностування.

					КРБ. СІ - 09.00.00. 000 ПЗ	Арк.
						50
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дат		

2 РОЗРОБЛЕННЯ ПІДСИСТЕМИ ДІАГНОСТУВАННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ГПА ТА АПАРАТНО-ПРОГРАМНОГО КОМПЛЕКСУ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ САК ГПА

2.1 Аналіз сучасних методів діагностування технічного стану ГПА

Підтримання належного технічного стану газоперекачувальних агрегатів є одним із найважливіших завдань забезпечення надійної та безпечної експлуатації компресорних станцій магістральних газопроводів. Своєчасне виявлення несправностей дозволяє запобігти виникненню аварійних ситуацій, зменшити витрати на ремонт обладнання та підвищити ефективність процесу транспортування природного газу. Саме тому важливе місце в системі технічної експлуатації ГПА займає діагностування їх технічного стану.

У процесі експлуатації газоперекачувальних агрегатів діагностування технічного стану, як правило, здійснюється в декілька послідовних етапів (рисунок 2.1).

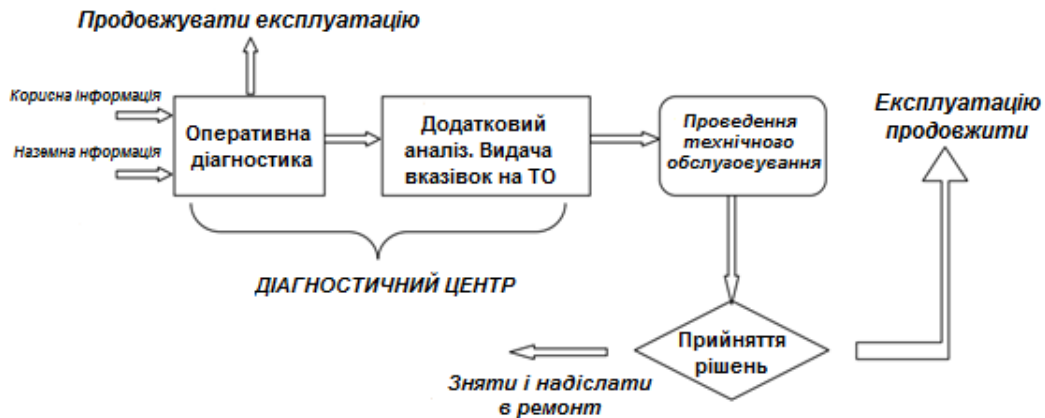


Рисунок 2.1 – Загальна схема експлуатаційної діагностики ГПА

Перший етап передбачає оперативне діагностування, основним завданням якого є визначення поточного стану обладнання та прийняття рішення щодо можливості подальшої експлуатації агрегату. На цьому етапі оцінюється відповідність контрольованих параметрів встановленим нормативним значенням та визначається наявність ознак несправностей.

Другий етап пов'язаний із проведенням поглибленого діагностичного аналізу. Його метою є уточнення причин виявлених відхилень та визначення переліку технічних заходів, необхідних для відновлення працездатності окремих вузлів і систем без демонтажу основного обладнання.

Третій етап передбачає виконання необхідних робіт з технічного обслуговування або ремонту. За результатами проведених заходів приймається рішення щодо подальшої експлуатації агрегату або необхідності його виведення з роботи для проведення капітального ремонту.

Сучасний розвиток засобів технічного діагностування дозволяє використовувати широкий спектр методів контролю стану газотурбінних двигунів, які є основними приводами газоперекачувальних агрегатів. Залежно від характеру отримуваної інформації всі методи діагностування умовно поділяються на дві групи: методи прямих вимірювань структурних параметрів та методи непрямого оцінювання технічного стану за експлуатаційними параметрами.

Методи прямих вимірювань базуються на безпосередньому визначенні характеристик окремих елементів конструкції, які відображають їх фактичний технічний стан.

Такі методи дозволяють отримувати досить точну інформацію щодо ступеня зношування або пошкодження окремих вузлів. Разом з тим їх використання часто потребує часткового або повного розбирання обладнання, що ускладнює застосування в умовах поточної експлуатації.

Більш поширеними є методи оперативного діагностування за непрямыми параметрами. Вони ґрунтуються на аналізі величин, які характеризують роботу агрегату та змінюються під впливом дефектів або порушень технічного стану.

Перевагою таких методів є можливість здійснення контролю без зупинки обладнання та втручання в його конструкцію.

До основних методів оперативного діагностування газотурбінних двигунів належать:

					КРБ. СІ - 09.00.00. 000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дат		52

- діагностування за термогазодинамічними параметрами;
- діагностування за тепловими параметрами;
- віброакустичне діагностування;
- трибодіагностування;
- оптико-візуальне діагностування;
- аналіз продуктів згоряння;
- контроль часу вибігу ротора.

Структуру основних методів та засобів діагностування газотурбінних двигунів наведено на рисунку 2.2.

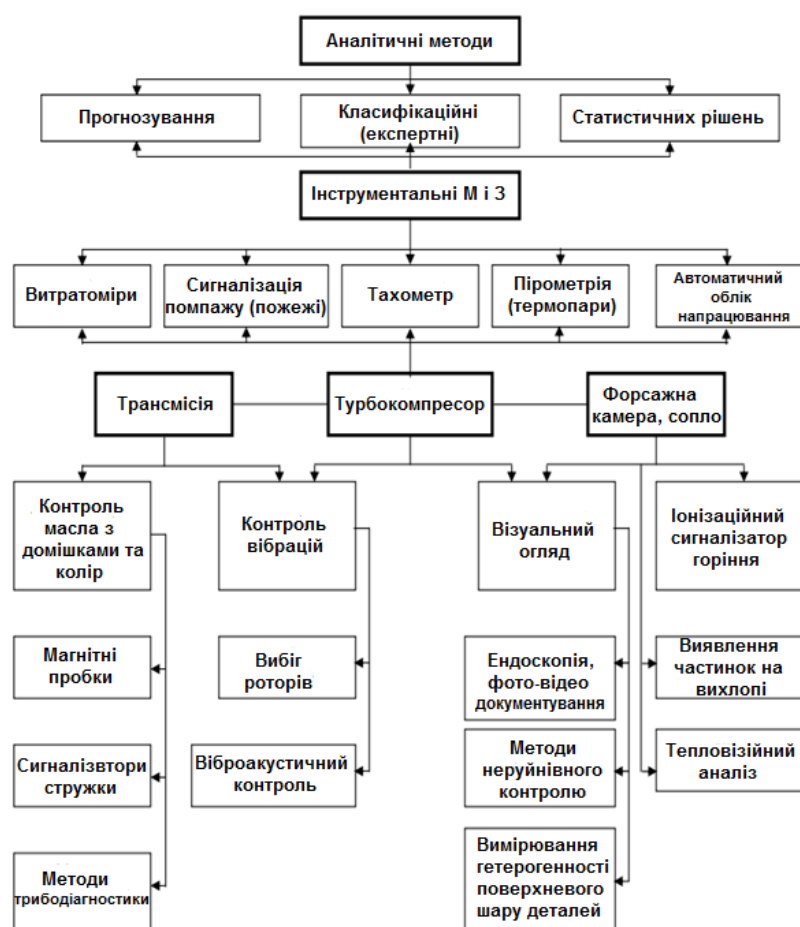


Рисунок 2.2 – Методи та засоби діагностування ГТД

Для реалізації зазначених методів використовуються різноманітні технічні засоби контролю. Наприклад, у системах трибодіагностування застосовуються магнітні пробки, фєрографічні аналізатори та спектрометри, які дозволяють

визначати наявність продуктів зношування у мастильних матеріалах. За результатами такого аналізу можна оцінювати технічний стан підшипникових вузлів, зубчастих передач та інших механічних елементів.

Методи теплового контролю базуються на вимірюванні температурних параметрів окремих вузлів агрегату за допомогою термоперетворювачів, пірометрів або тепловізійних систем. Відхилення температурних режимів від нормативних значень часто свідчить про виникнення дефектів або порушення умов експлуатації обладнання.

Для контролю вібраційного стану застосовуються різноманітні типи віброперетворювачів, акселерометрів та спеціалізованих систем оброблення сигналів. Аналіз вібраційних параметрів дозволяє своєчасно виявляти дисбаланс роторів, дефекти підшипників, порушення центрування валів, ослаблення кріплень та інші несправності механічної частини агрегату.

Необхідно зазначити, що жоден із відомих методів діагностування не забезпечує отримання вичерпної інформації про технічний стан обладнання. Кожний із методів має власні переваги та обмеження, а також характеризується різним рівнем інформативності щодо окремих типів дефектів. Саме тому на практиці найбільш ефективним є комплексний підхід, який передбачає використання декількох взаємодоповнюючих методів контролю.

Серед розглянутих методів особливий інтерес становить віброакустичне діагностування. Воно характеризується високою чутливістю до змін технічного стану обладнання, можливістю проведення безперервного моніторингу в режимі реального часу та відносно простим впровадженням у складі сучасних систем автоматичного керування. Саме тому вібраційний контроль доцільно розглядати як основу підсистеми діагностування технічного стану газоперекачувального агрегату.

Таким чином, для забезпечення ефективного контролю технічного стану газоперекачувальних агрегатів доцільно використовувати діагностичні параметри, які мають високу інформативність, можуть вимірюватися без

					КРБ. СІ - 09.00.00. 000 ПЗ	Арк.
						54
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дат		

зупинки обладнання та дозволяють своєчасно виявляти розвиток дефектів. Аналіз існуючих методів показує, що найбільш перспективним для реалізації в складі сучасних систем автоматичного керування є віброакустичний метод діагностування.

2.2 Обґрунтування вибору віброакустичного методу діагностування ГПА

Серед існуючих методів технічного діагностування газоперекачувальних агрегатів особливе місце займають віброакустичні методи контролю. Їх широке застосування зумовлене високою інформативністю вібраційних параметрів щодо технічного стану роторних машин, до яких належать газотурбінні двигуни та відцентрові нагнітачі газоперекачувальних агрегатів.

Віброакустичне діагностування базується на аналізі параметрів вібраційних сигналів, які виникають під час роботи обладнання. Будь-які зміни технічного стану вузлів агрегату супроводжуються зміною амплітудних, частотних або фазових характеристик вібраційного сигналу. Це дозволяє використовувати вібраційні параметри як діагностичні ознаки для оцінювання технічного стану обладнання.

Основною перевагою віброакустичного методу є можливість проведення контролю без зупинки технологічного процесу. На відміну від методів, що потребують розбирання обладнання або спеціальної підготовки об'єкта, вібраційний контроль може здійснюватися безпосередньо під час експлуатації агрегату. Завдяки цьому забезпечується безперервний моніторинг технічного стану обладнання та своєчасне виявлення несправностей на ранніх стадіях їх розвитку.

Для контролю вібраційного стану використовуються спеціалізовані віброперетворювачі, акселерометри та засоби цифрового оброблення сигналів. Виміряні параметри можуть аналізуватися як у часовій, так і в частотній

					КРБ. СІ - 09.00.00. 000 ПЗ	Арк.
						55
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дат		

областях. Найбільш поширеним є спектральний аналіз, який дозволяє встановлювати взаємозв'язок між окремими складовими спектра вібрації та конкретними дефектами обладнання.

За результатами аналізу вібраційних сигналів можуть бути виявлені такі характерні несправності:

- дисбаланс ротора;
- порушення центрування валів;
- дефекти підшипникових вузлів;
- ослаблення механічних з'єднань;
- пошкодження зубчастих передач;
- виникнення резонансних явищ;
- розвиток тріщин та інших дефектів конструктивних елементів.

Одним із найважливіших завдань вібраційного діагностування є встановлення зв'язку між параметрами вібраційного сигналу та технічним станом обладнання. Для цього використовуються спеціальні діагностичні моделі, які дозволяють інтерпретувати результати вимірювань та приймати рішення щодо працездатності агрегату.

У загальному випадку діагностична система може бути представлена у вигляді моделі «чорної скриньки», яка встановлює залежність між вхідними впливами та вихідними параметрами об'єкта контролю. Найпростіша схема такої моделі наведена на рисунку 2.3.

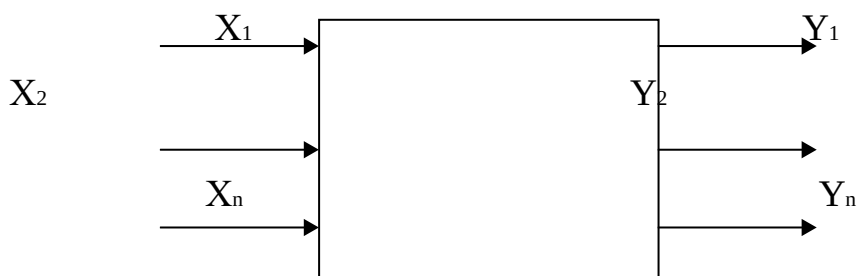


Рисунок 2.3 – Модель «чорної скриньки»

Під час експлуатації зміна технічного стану окремих вузлів агрегату призводить до зміни характеристик вихідного сигналу.

Порівняння отриманих результатів із еталонними значеннями дозволяє виявляти відхилення від нормального режиму роботи та формувати діагностичний висновок.

Для побудови систем діагностування використовуються різні типи математичних моделей, серед яких найбільш поширеними є структурно-наслідкові, динамічні та регресійні моделі.

Структурно-наслідкові моделі будуються на основі аналізу конструкції об'єкта та фізичних процесів, що відбуваються під час його функціонування. Вони дозволяють встановити взаємозв'язок між можливими дефектами та змінами діагностичних параметрів.

Динамічні моделі описують поведінку об'єкта як багатовимірної системи з певними вхідними та вихідними сигналами. Приклад такої моделі наведено на рисунку 2.4. Аналіз відхилення фактичних параметрів від параметрів еталонної моделі дозволяє оцінювати технічний стан обладнання та виявляти розвиток дефектів.

Зміна технічного стану обладнання призводить до зміни його динамічних характеристик. Порівняння параметрів реального об'єкта з параметрами еталонної моделі дозволяє виявляти відхилення від нормального режиму роботи та використовувати їх як діагностичні ознаки. Чим більшим є відхилення між фактичними та еталонними характеристиками, тим вища ймовірність наявності дефекту або розвитку несправності.

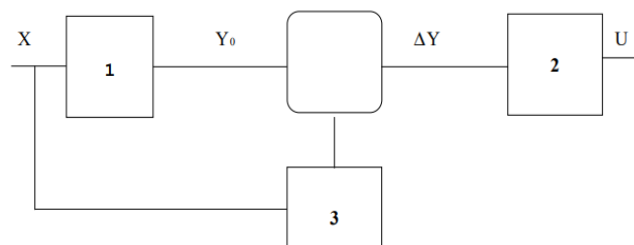


Рисунок 2.4 – Найпростіша схема динамічної ланки

- 1 - динамічна ланка об'єкта контролю;
- 2 - формуюча ланка;
- 3 - номінальна математична модель.

Регресійні моделі базуються на статистичному аналізі експериментальних даних та дозволяють встановлювати кількісні залежності між параметрами технічного стану та характеристиками вібраційних сигналів. Використання таких моделей забезпечує можливість прогнозування розвитку дефектів та оцінювання залишкового ресурсу обладнання.

Важливим напрямом розвитку сучасних систем вібраційного діагностування є застосування цифрових методів оброблення сигналів, засобів спектрального аналізу та елементів штучного інтелекту. Це дозволяє підвищити точність діагностування та автоматизувати процес прийняття рішень щодо технічного стану обладнання.

Проведений аналіз показав, що серед існуючих методів технічного діагностування газоперекачувальних агрегатів найбільш перспективним для використання у складі сучасних систем автоматичного керування є віброакустичний метод. Його перевагами є можливість безперервного моніторингу технічного стану обладнання, висока чутливість до розвитку дефектів механічних вузлів, відсутність необхідності втручання в конструкцію агрегату та можливість реалізації засобами сучасних програмно-технічних комплексів.

Вібраційні параметри містять значний обсяг інформації про технічний стан роторів, підшипникових вузлів, муфт та інших елементів газоперекачувального агрегату. Це дозволяє використовувати їх не лише для виявлення несправностей, а й для прогнозування подальшого розвитку дефектів та оцінювання залишкового ресурсу обладнання.

Практична реалізація вібраційного контролю потребує використання спеціалізованих апаратних і програмних засобів, здатних забезпечувати вимірювання, оброблення та аналіз вібраційних сигналів у режимі реального часу.

З огляду на наведені переваги саме віброакустичний метод доцільно використати як основу підсистеми контролю та діагностування технічного

					КРБ. СІ - 09.00.00. 000 ПЗ	Арк.
						58
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дат		

стану газоперекачувального агрегату, що розробляється в даній бакалаврській роботі.

2.3 Обґрунтування вибору та структура системи вібраційного діагностування ГПА

Для реалізації віброакустичного методу діагностування технічного стану газоперекачувального агрегату, розглянутого в підрозділі 2.2, необхідно застосувати спеціалізовані програмно-технічні засоби, які забезпечують вимірювання, оброблення та аналіз вібраційних сигналів у режимі реального часу. З огляду на це для побудови підсистеми вібраційного діагностування було обрано комплекс апаратно-програмних засобів концерну Siemens [15, 16], структурну схему якого наведено на рисунку 2.5.

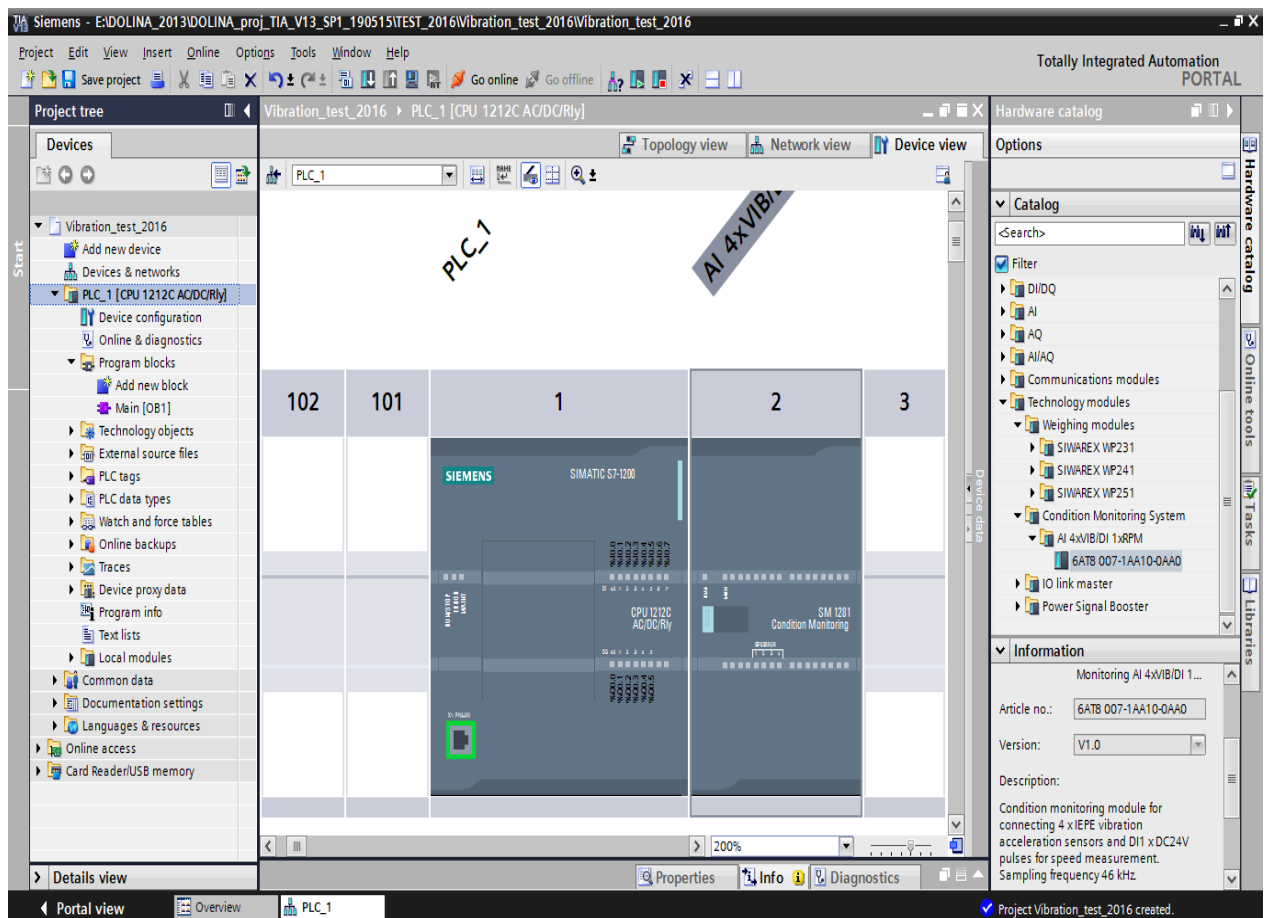


Рисунок 2.5 – Апаратна конфігурація інформаційно-вимірювальної системи на базі контролера Simatic S7-1200 та вібраційного модуля SM1281

До складу системи входять:

- вібраційний модуль SM1281 Condition Monitoring [17], призначений для збору та первинного оброблення вібраційних сигналів;
- програмований логічний контролер SIMATIC S7-1200 (CPU 1212C AC/DC/Rly) [18], який виконує функції керування та обміну даними між окремими елементами системи;
- інтегроване середовище розроблення TIA Portal V13 SP1 [18], що використовується для конфігурування обладнання, параметрування модулів та створення програмного забезпечення системи.

Основним елементом підсистеми діагностування є модуль SM1281 Condition Monitoring [19, 20], який належить до сучасних засобів моніторингу технічного стану промислового обладнання. Модуль підтримує підключення акселерометрів стандарту IEPЕ (Integrated Electronics Piezo-Electric) та забезпечує виконання вимірювань параметрів вібрації безпосередньо під час роботи обладнання.

Використання спеціалізованого вібраційного модуля дозволяє здійснювати безперервний контроль вібраційного стану агрегату, накопичувати результати вимірювань, виконувати їх попередню обробку та передавати отриману інформацію до контролера для подальшого аналізу.

Модуль SM1281 має чотири канали підключення вібродатчиків стандарту IEPЕ та один цифровий вхід для отримання інформації про частоту обертання контрольованого механізму. Така конфігурація забезпечує можливість одночасного контролю декількох точок вимірювання та синхронізації результатів вібраційного аналізу з режимами роботи обладнання.

Конструкцію та основні функціональні елементи модуля SM1281 наведено на рисунку 2.6.

					КРБ. СІ - 09.00.00. 000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дат		60

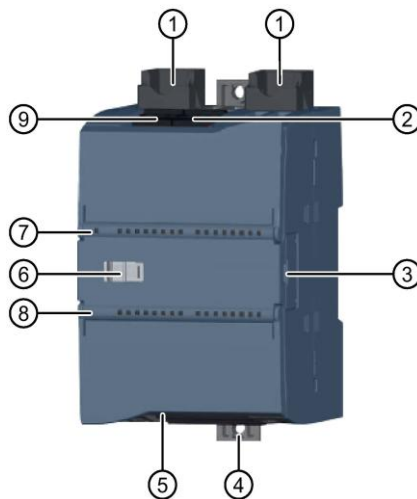


Рисунок 2.6 – Структура вібраційного модуля SM1281

До його складу входять інтерфейси підключення вібродатчиків, засоби зв'язку Ethernet, елементи підключення до внутрішньої системної шини, світлодіодні індикатори діагностики та контролю стану каналів, а також кола живлення.

Налаштування параметрів роботи вібраційного модуля виконується за допомогою інтегрованого середовища TIA Portal.

Структуру параметрування модуля SM1281 наведено на рисунку 2.7.

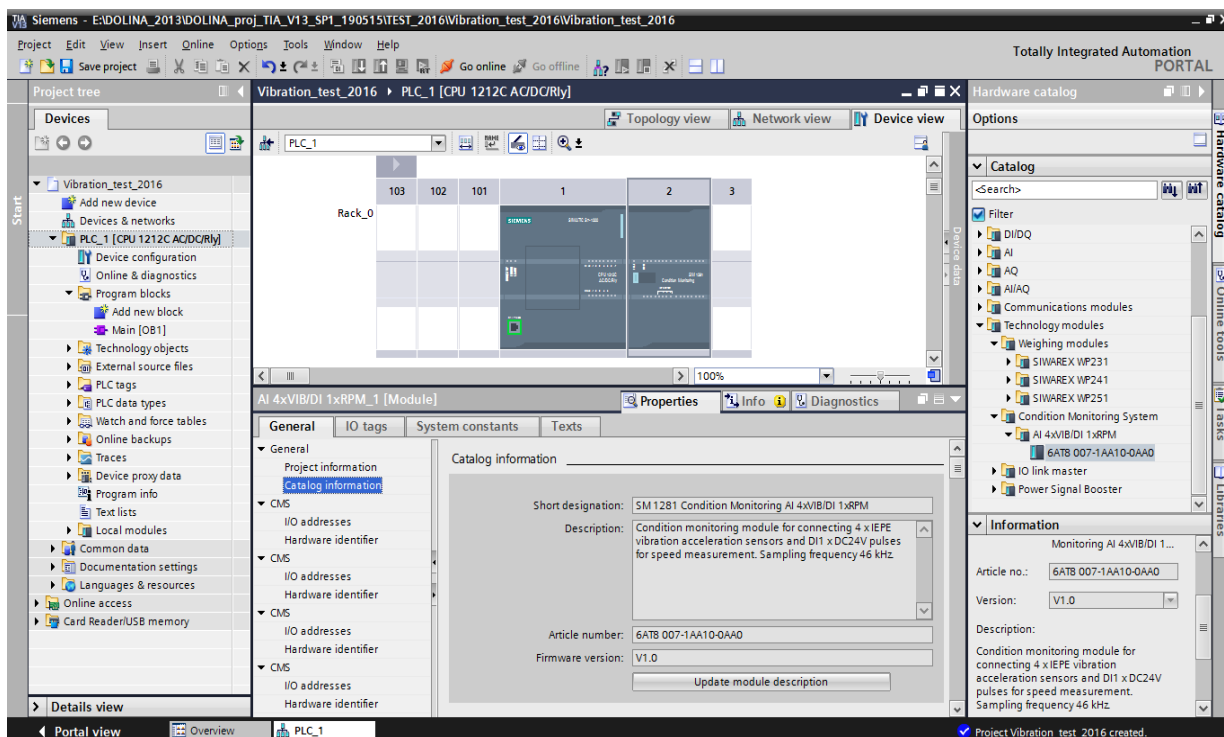


Рисунок 2.7 – Параметрування вібраційного модуля SM1281

					КРБ. СІ - 09.00.00. 000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дат		61

Використання середовища TIA Portal забезпечує виконання апаратної конфігурації системи, налаштування параметрів модулів введення-виведення, організацію обміну даними між компонентами системи та розроблення програмного забезпечення для реалізації алгоритмів контролю й діагностування.

Таким чином, використання програмно-технічних засобів Siemens дозволяє реалізувати ефективну підсистему вібраційного моніторингу та діагностування технічного стану газоперекачувального агрегату. Обраний комплекс забезпечує збір, оброблення та аналіз вібраційної інформації в режимі реального часу, а також може бути інтегрований до складу системи автоматичного керування ГПА..

2.4 Склад та структура програмно-технічних засобів комплексу для моделювання САК ГПА

Програмно-технічний комплекс моделювання САК ГПА призначений для дослідження алгоритмів автоматичного керування, перевірки функціонування програмного забезпечення та відпрацювання режимів роботи газоперекачувального агрегату ГТК-10-4. Крім того, комплекс може використовуватися для підготовки персоналу та набуття практичних навичок роботи із системою автоматичного керування газоперекачувальним агрегатом.

Структурну схему комплексу наведено на рисунку 2.8.

До складу комплексу входять пристрої керування ПК-04АМ (ПК-А) та ПК-04БМ (ПК-Б), пристрій оператора ПО-04М (ПО), первинні вимірювальні перетворювачі та лінії зв'язку.

До складу комплексу входять пристрої керування ПК-04АМ (ПК-А) та ПК-04БМ (ПК-Б), пристрій оператора ПО-04М (ПО), первинні вимірювальні перетворювачі та лінії зв'язку.

					КРБ. СІ - 09.00.00. 000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дат		62

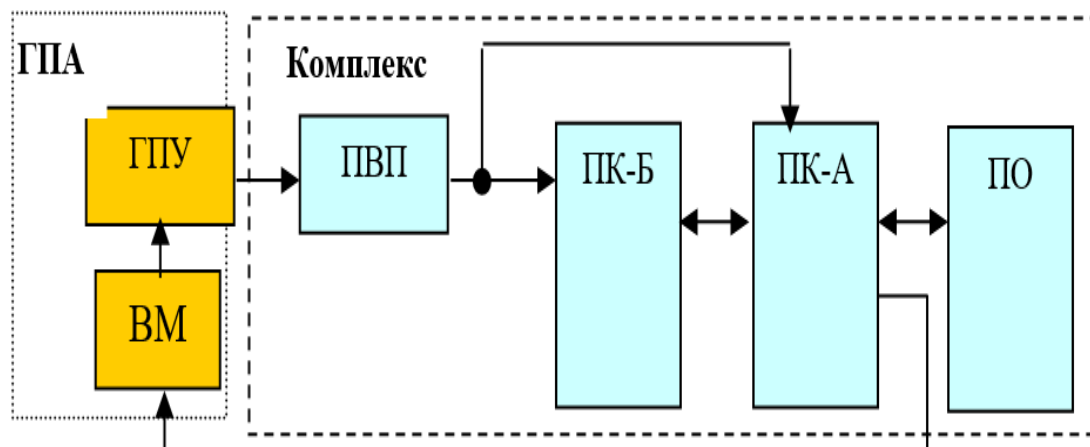


Рисунок 2.8 – Структурна схема моделюючого комплексу

Склад комплексу визначається кількістю та типами контрольованих параметрів, а також обсягом функцій, які реалізуються відповідно до вимог автоматизації газоперекачувального агрегату.

Модульний принцип побудови комплексу забезпечує можливість його подальшого розширення та модернізації шляхом зміни конфігурації програмно-технічних засобів без внесення конструктивних змін до пристроїв керування та пристрою оператора.

Інформація від первинних вимірювальних перетворювачів, зокрема давачів тиску, перепаду тиску, температури, вібрації, частоти обертання роторів турбіни та нагнітача, а також дискретних давачів, надходить до програмованих логічних контролерів для подальшого оброблення.

Отримані сигнали обробляються програмованими логічними контролерами відповідно до реалізованих алгоритмів керування. За результатами оброблення формуються керуючі сигнали для виконавчих механізмів та допоміжного обладнання газоперекачувального агрегату.

Уся оброблена інформація передається до пристрою оператора ПО-04М для відображення поточного стану технологічного процесу. Інформація архівується та може бути відтворена в будь-який момент часу на екрані монітора за запитом оператора або використана для формування звітної документації.

					КРБ. СІ - 09.00.00. 000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дат		63

Комплекс забезпечує автоматичне керування виконавчими механізмами ГПА в режимах холодної прокрутки, автоматичного пуску, нормальної експлуатації, штатної зупинки, аварійної та екстреної аварійної зупинки. Крім того, передбачено дистанційне керування допоміжним обладнанням та виконавчими механізмами за командами оператора.

Таким чином, програмно-технічний комплекс моделювання забезпечує дослідження алгоритмів керування газоперекачувальним агрегатом, перевірку працездатності програмного забезпечення та оцінювання ефективності функціонування САК ГПА в різних режимах експлуатації.

2.5 Призначення програмного забезпечення моделюючого комплексу

Програмне забезпечення моделюючого комплексу призначене для реалізації функцій керування, контролю та моніторингу роботи газоперекачувального агрегату, а також для відпрацювання алгоритмів функціонування системи автоматичного керування в різних режимах експлуатації.

Основними функціями програмного забезпечення є:

- вибір режимів роботи та оперативне керування газоперекачувальним агрегатом;
- дистанційне керування запірною арматурою, виконавчими механізмами та допоміжним обладнанням;
- збір, реєстрація, архівування та збереження технологічної інформації;
- відображення поточних параметрів роботи агрегату у вигляді мнемосхем, таблиць, графіків та діаграм;
- формування попереджувальної та аварійної сигналізації;
- створення та друк звітної документації.

Структурну схему пристрою оператора моделюючого комплексу наведено на рисунку 2.9.

					КРБ. СІ - 09.00.00. 000 ПЗ	Арк.
						64
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дат		

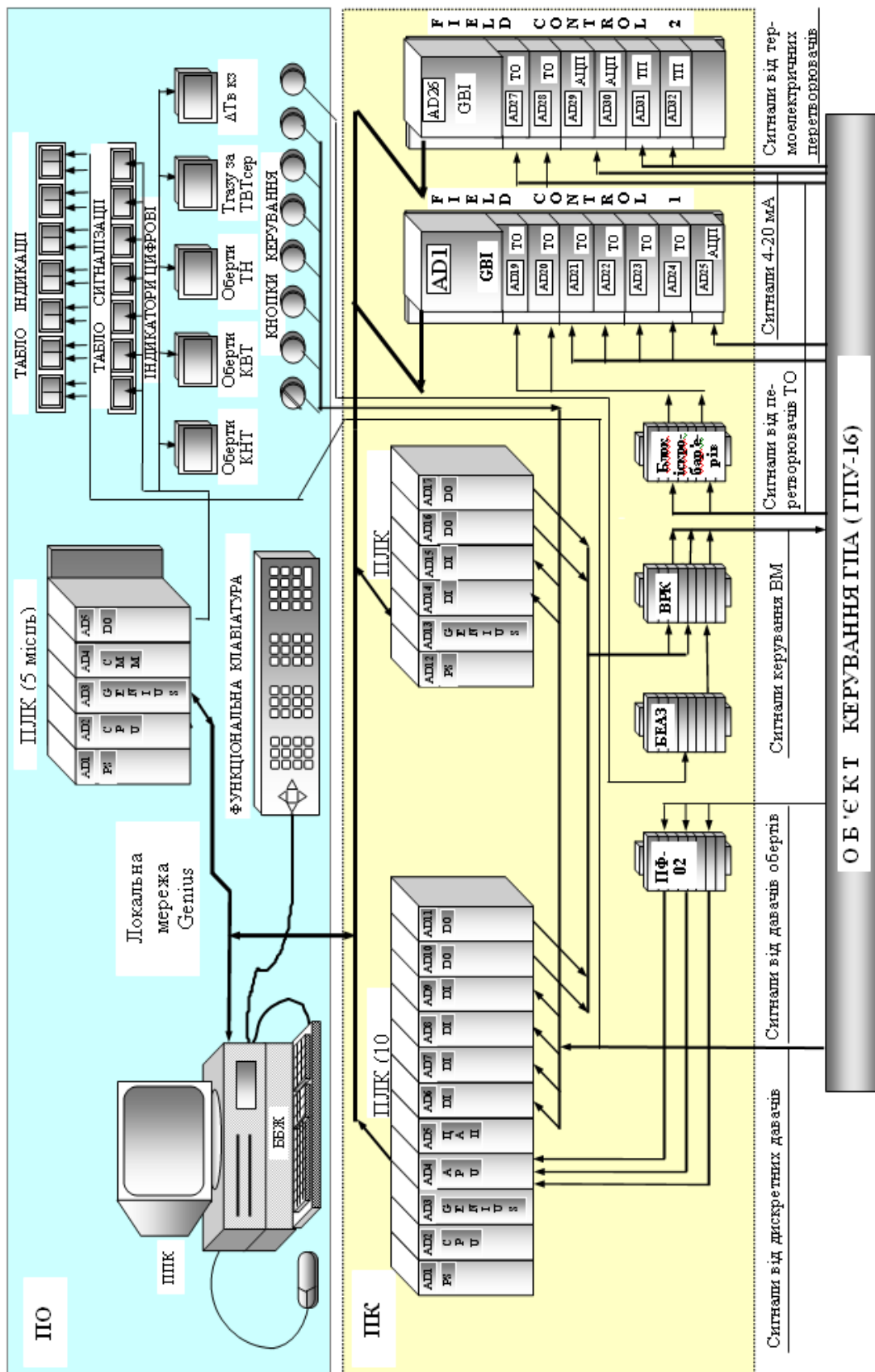


Рисунок 2.9 – Структурна схема пристрою оператора моделюючого комплексу

Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дат

КРБ. СІ - 09.00.00. 000 ПЗ

Арк.

65

До складу пристрою оператора входять персональний промисловий комп'ютер, засоби індикації режимів роботи агрегату, цифрові індикатори технологічних параметрів, блок безперебійного живлення, програмований логічний контролер, а також органи керування та комутації.

Основою пристрою оператора є персональний промисловий комп'ютер, до складу якого входять монітор, системний блок, клавіатура та маніпулятор типу «миша». За допомогою програмного забезпечення оператор отримує інформацію про стан обладнання, контролює технологічні параметри та здійснює керування режимами роботи агрегату.

Для реалізації алгоритмів автоматичного керування в комплексі використовуються програмовані логічні контролери, які забезпечують збір та оброблення інформації від первинних вимірювальних перетворювачів, формування керуючих впливів і обмін даними між окремими компонентами системи.

Пристрій керування ПК-А виконує функції збору, оброблення та аналізу інформації від давачів, реалізує алгоритми автоматичного керування газоперекачувальним агрегатом, формує сигнали керування виконавчими механізмами та забезпечує взаємодію з пристроєм оператора.

Пристрій ПК-Б призначений для збору та попереднього оброблення інформації від периферійних пристроїв, а також для обміну даними з пристроєм ПК-А.

Програмне забезпечення моделюючого комплексу забезпечує реалізацію режимів холодної прокрутки, автоматичного пуску, нормальної роботи, штатної зупинки, аварійної та екстреної аварійної зупинки газоперекачувального агрегату.

Крім того, забезпечується відображення поточних параметрів технологічного процесу, архівування інформації та формування звітів про роботу обладнання.

Таким чином, програмне забезпечення моделюючого комплексу

					КРБ. СІ - 09.00.00. 000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дат		66

забезпечує реалізацію функцій керування, контролю, моніторингу та діагностування газоперекачувального агрегату.

Використання комплексу дозволяє досліджувати алгоритми роботи САК ГПА, оцінювати ефективність прийнятих технічних рішень та виконувати моделювання різних режимів функціонування агрегату.

2.6 Робота пристрою оператора та пристроїв керування ПК-А і ПК-Б

Пристрій оператора (ПО) є складовою частиною програмно-технічного комплексу та призначений для контролю параметрів технологічного процесу, вибору режимів роботи газоперекачувального агрегату і формування команд керування. За допомогою функціональної клавіатури та кнопок оператор здійснює вибір режимів роботи, керування кранами та виконавчими механізмами агрегату.

Зовнішній вигляд органів керування та відображення інформації пристрою оператора наведено на рисунку 2.10.

На екрані монітора, табло сигналізації та цифрових індикаторах відображається інформація про поточний стан газоперекачувального агрегату, значення технологічних параметрів, повідомлення про режими роботи, а також попереджувальна та аварійна сигналізація.

					КРБ. СІ - 09.00.00. 000 ПЗ	Арк.
						67
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дат		

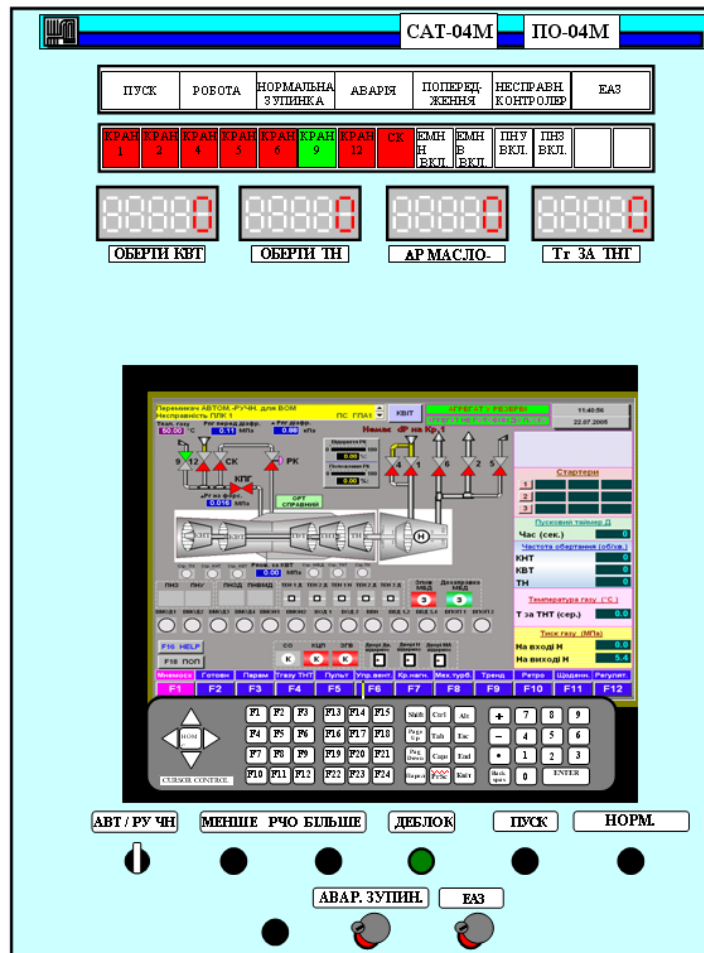


Рисунок 2.10 – Зовнішній вигляд органів керування та відображення ПО

Пристрій керування ПК-А виконує основні функції збору, оброблення та аналізу інформації, що надходить від первинних вимірювальних перетворювачів. На основі реалізованих алгоритмів керування формуються сигнали керування виконавчими механізмами газоперекачувального агрегату.

Інформаційний обмін між програмованими логічними контролерами та периферійними пристроями здійснюється за допомогою локальної мережі Genius. Зв'язок між контролерами ПЛК 1, ПЛК 2, блоком БВВ1 у ПК-А та блоками БВВ2 і БВВ3 у ПК-Б забезпечується мережею Genius 1. Обмін даними між пристроєм оператора та контролером ПК-А реалізується через мережу Genius 2. Для передавання інформації між персональним промисловим комп'ютером і контролером використовується мережа Ethernet із застосуванням протоколу TCP/IP.

Дані між абонентами мережі Genius можуть передаватися у двох режимах. Перший режим — ширококомовна передача даних (Broadcasting), коли один контролер передає інформацію одночасно всім іншим вузлам мережі. Другий режим — передача дейтаграм (Datagrams), за якого інформація передається між двома конкретними вузлами мережі.

Пристрій керування ПК-Б виконує функції збору, попереднього оброблення вхідної інформації та передавання її до мережі Genius 1 для подальшого опрацювання контролерами ПК-А.

Для забезпечення адресного обміну даними кожному контролеру та інтерфейсному модулю мережі Genius призначено унікальну адресу. Така організація мережевого обміну забезпечує надійну взаємодію між усіма компонентами програмно-технічного комплексу та дозволяє реалізувати функції керування, моніторингу й діагностування газоперекачувального агрегату в режимі реального часу.

Таким чином, спільна робота пристрою оператора та пристроїв керування ПК-А і ПК-Б забезпечує збір, оброблення, передавання та відображення технологічної інформації, а також реалізацію алгоритмів автоматичного керування газоперекачувальним агрегатом.

					КРБ. СІ - 09.00.00. 000 ПЗ	Арк.
						69
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дат		

З РОЗРОБЛЕННЯ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТА МОДЕЛЮВАННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ ГПА

3.1 Середовище розроблення та налагодження програмного забезпечення САК ГПА

Для програмної реалізації системи автоматичного керування газоперекачувальним агрегатом було використано інтегроване середовище розроблення VersaPro, призначене для створення, налагодження та супроводження програмного забезпечення програмованих логічних контролерів GE Fanuc.

Середовище VersaPro забезпечує розроблення програм у вигляді релейно-контактних схем (Ladder Logic Diagram), що є одним із найбільш поширених способів програмування промислових систем автоматизації. Використання цього середовища дозволяє реалізовувати складні алгоритми керування технологічними процесами та забезпечує зручність їх подальшого супроводження і модернізації.

Зовнішній вигляд інтегрованого середовища розроблення VersaPro наведено на рисунку 3.1.

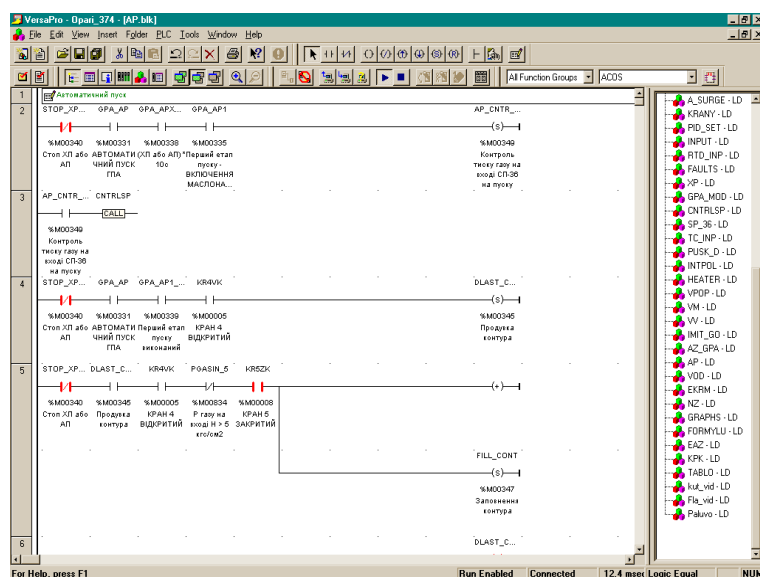


Рисунок 3.1 – Вигляд інтегрованого середовища розроблення VersaPro

					КРБ. CI - 09.00.00. 000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дат		70

До основних функціональних можливостей середовища VersaPro належать:

- використання контактів, котушок, таймерів і лічильників під час створення алгоритмів керування;
- підтримка роботи з різними типами даних, зокрема бітовими, цілочисловими та дійсними величинами;
- виконання математичних, логічних та порівняльних операцій;
- передавання та оброблення даних між окремими елементами програми;
- реалізація підпрограм, умовних і безумовних переходів;
- створення, редагування та налагодження програм у режимах ONLINE та OFFLINE;
- контроль і моделювання вхідних, проміжних та вихідних змінних у процесі виконання програми;
- передавання програмного забезпечення та конфігураційних даних між контролером і комп'ютером розробника;
- архівування та збереження програмних проєктів.

Середовище VersaPro дозволяє виконувати повний цикл розроблення програмного забезпечення для програмованих логічних контролерів: від створення структури проєкту та написання програмного коду до налагодження, тестування та введення системи в експлуатацію.

Таким чином, використання середовища VersaPro забезпечує реалізацію алгоритмів автоматичного керування газоперекачувальним агрегатом, їх налагодження та тестування, а також створює необхідні умови для моделювання різних режимів роботи ГПА у складі програмно-технічного комплексу.

3.2 Середовище візуалізації програми

Для реалізації функцій візуалізації та диспетчерського керування системою автоматичного керування газоперекачувальним агрегатом було використано SCADA-систему Simplicity HMI 6.0.

					КРБ. СІ - 09.00.00. 000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дат		71

Зовнішній вигляд середовища візуалізації Cimplicity HMI 6.0 наведено на рисунку 3.2.

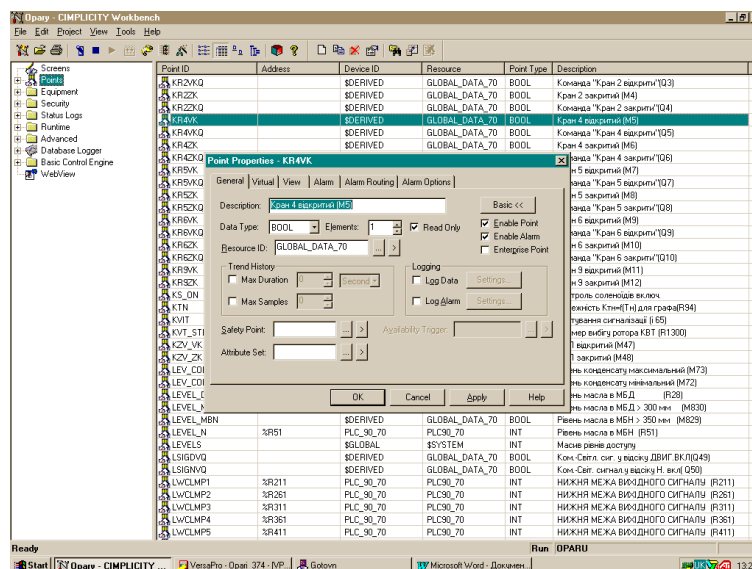


Рисунок 3.2 – Вигляд середовища візуалізації Simplicity HMI 6.0

- відображення поточних значень технологічних параметрів;
- візуалізацію стану обладнання та виконавчих механізмів;
- формування попереджувальної та аварійної сигналізації;
- архівування та збереження технологічної інформації;
- відображення трендів зміни параметрів у часі;
- ведення журналів подій та аварійних повідомлень;
- забезпечення взаємодії оператора із системою автоматичного керування.

Обмін даними між середовищем Simplicity HMI та програмованими логічними контролерами здійснюється за допомогою тегів, які містять інформацію про стан технологічного процесу та значення контрольованих параметрів. Це забезпечує відображення актуальної інформації в режимі

реального часу та своєчасне реагування оператора на зміну режимів роботи обладнання.

Програмний пакет Simplicity HMI 6.0 дозволяє створювати мнемосхеми технологічних процесів, інформаційні панелі, графічні індикатори та елементи керування, що забезпечують наочне представлення інформації про роботу газоперекачувального агрегату.

Таким чином, використання середовища Simplicity HMI 6.0 забезпечує ефективну візуалізацію технологічних параметрів, контроль режимів роботи обладнання та підтримку прийняття оператором рішень під час експлуатації газоперекачувального агрегату.

3.3 Відстеження ходу технологічного процесу ГПА з використанням моделюючого комплексу

За допомогою програмного забезпечення моделюючого комплексу обслуговуючий персонал має можливість здійснювати контроль перебігу технологічного процесу газоперекачувального агрегату в режимі реального часу.

Інформація про стан обладнання та параметри технологічного процесу відображається на екрані персонального промислового комп'ютера у вигляді спеціалізованих вікон, створених у середовищі Simplicity HMI 6.0.

У вікнах системи відображається інформація про підготовку агрегату до пуску, перевірку захистів, перебіг процесу запуску, вихід агрегату на робочий режим, поточні значення технологічних параметрів, а також режими нормальної та аварійної зупинки.

Для взаємодії оператора з системою використовується функціональна клавіатура, за допомогою якої здійснюється виклик необхідних вікон та перехід між окремими режимами відображення інформації.

					КРБ. СІ - 09.00.00. 000 ПЗ	Арк.
						73
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дат		

Зокрема, оператор має можливість переглядати мнемосхеми технологічного процесу, поточні параметри роботи агрегату, тренди зміни технологічних величин, журнали подій, повідомлення про аварійні та попереджувальні ситуації, а також вікна налаштування регуляторів і допоміжних підсистем.

За допомогою кнопок керування, розташованих на пристрої оператора, здійснюється вибір режимів роботи виконавчих механізмів, керування частотою обертання ротора, виконання процедур пуску та зупинки агрегату, а також активація аварійних режимів захисту.

Структурну побудову вікна відображення інформації наведено на рисунку 3.3.

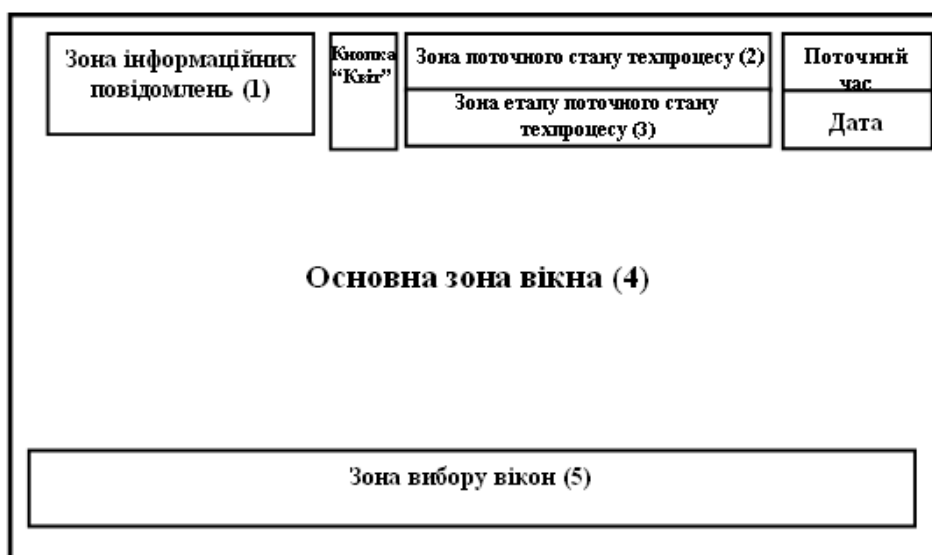


Рисунок 3.3 – Структурна побудова вікна для відображення інформації

Вікно відображення інформації умовно поділено на декілька функціональних зон: зону інформаційних повідомлень, зону поточного стану технологічного процесу, зону відображення етапу виконання технологічного процесу, основну робочу область та зону вибору вікон.

Крім того, передбачено кнопку квітування аварійних і попереджувальних повідомлень та вимкнення звукової сигналізації.

В основній зоні вікна відображається інформація про стан виконавчих механізмів і допоміжного обладнання, значення технологічних параметрів, тренди їх зміни, архівні дані, журнали подій та результати діагностики програмованих логічних контролерів.

У зоні інформаційних повідомлень відображаються повідомлення про спрацювання аварійних захистів, попереджувальної сигналізації та несправності каналів вимірювання. Інформація подається оператору у зручній для сприйняття формі, що дозволяє оперативно реагувати на зміну режимів роботи обладнання.

У зонах поточного стану та етапу технологічного процесу відображаються режими роботи агрегату, зокрема резервний режим, автоматичний пуск, холодна прокрутка, робота на кільці, робота на магістраль, нормальна або аварійна зупинка, а також окремі етапи виконання алгоритму керування.

Таким чином, використання моделюючого комплексу забезпечує ефективний контроль технологічного процесу, оперативне отримання інформації про стан обладнання та підтримку прийняття рішень оператором під час експлуатації газоперекачувального агрегату, що сприяє підвищенню надійності та безпеки його роботи.

3.4 Використання комплексу для моделювання режимів роботи САК ГПА

3.4.1 Моделювання режиму автоматичного пуску

Одним із основних режимів роботи системи автоматичного керування газоперекачувальним агрегатом є режим автоматичного пуску. Його призначення полягає у забезпеченні послідовного виконання операцій запуску агрегату відповідно до заданого алгоритму без безпосереднього втручання оператора.

					КРБ. СІ - 09.00.00. 000 ПЗ	Арк.
						75
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дат		

Перед початком автоматичного пуску система здійснює перевірку готовності обладнання до роботи, справності технологічних захистів та відповідності контрольованих параметрів установленим вимогам. Після підтвердження готовності агрегату запускається алгоритм автоматичного пуску.

У процесі автоматичного пуску виконуються операції запуску маслонасосів, підготовки газового контуру, відкриття та закриття необхідної запірної арматури, запуску газотурбінного двигуна, розгону роторів та виходу агрегату на режим холостого ходу. Після завершення прогріву агрегат автоматично переводиться на робочий режим із подальшим виходом на магістраль.

Усі етапи автоматичного пуску відображаються на екрані системи візуалізації та реєструються у журналі подій. Оператор має можливість контролювати перебіг технологічного процесу, спостерігати за зміною параметрів та аналізувати виконання керуючих команд.

Таким чином, використання моделюючого комплексу дозволяє досліджувати алгоритми автоматичного пуску ГПА, оцінювати правильність їх роботи та перевіряти функціонування системи автоматичного керування в різних режимах експлуатації.

3.4.2 Моделювання режиму аварійної зупинки зі стравлюванням газу

Режим аварійної зупинки зі стравлюванням газу призначений для переведення газоперекачувального агрегату в безпечний стан у разі виникнення аварійних ситуацій або спрацювання захисних функцій системи автоматичного керування.

Під час виконання аварійної зупинки система автоматично формує необхідні керуючі впливи на виконавчі механізми агрегату. При цьому здійснюється відключення подачі паливно газу, закриття відповідних кранів,

					КРБ. СІ - 09.00.00. 000 ПЗ	Арк.
						76
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дат		

запуск допоміжних систем та виконання операцій зі стравлювання газу відповідно до алгоритму захисту.

Інформація про причину аварійної зупинки відображається на екрані оператора та реєструється у журналі подій. Одночасно формується світлова та звукова сигналізація, що забезпечує оперативне інформування персоналу про виникнення аварійної ситуації.

Після завершення прогріву агрегат автоматично переводиться в робочий режим із подальшим виходом на магістральний режим роботи.

Після завершення аварійної зупинки система переводить агрегат у безпечний стан та забезпечує можливість аналізу причин спрацювання захисту за даними журналів подій і архівної інформації.

Отже, моделювання режиму аварійної зупинки дозволяє перевірити правильність роботи алгоритмів захисту, оцінити ефективність функціонування системи автоматичного керування та забезпечити безпечну експлуатацію газоперекачувального агрегату.

					КРБ. СІ - 09.00.00. 000 ПЗ	Арк.
						77
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дат		

ВИСНОВКИ

У процесі виконання бакалаврської роботи проведено аналіз конструкції, принципів функціонування та особливостей експлуатації газоперекачувальних агрегатів, що використовуються в газотранспортній системі України. Розглянуто обмеження, які накладаються на параметри роботи ГПА, та обґрунтовано необхідність застосування систем автоматичного керування і технічного діагностування.

Проведено аналіз сучасних систем автоматичного керування газоперекачувальними агрегатами та встановлено, що існуючі системи забезпечують контроль технологічних параметрів і реалізацію функцій захисту, проте мають обмежені можливості щодо діагностування технічного стану обладнання.

Розглянуто основні методи технічного діагностування газоперекачувальних агрегатів та обґрунтовано доцільність використання віброакустичного методу як найбільш інформативного для контролю технічного стану роторного обладнання.

Виконано вибір та аналіз апаратно-програмних засобів для побудови підсистеми вібраційного діагностування на базі обладнання Siemens, зокрема контролера SIMATIC S7-1200 та модуля SM1281 Condition Monitoring. Розглянуто структуру та принцип функціонування системи вібраційного моніторингу технічного стану ГПА.

Проаналізовано склад і структуру програмно-технічного комплексу для моделювання системи автоматичного керування газоперекачувальним агрегатом, а також розглянуто його програмне забезпечення.

Для реалізації алгоритмів автоматичного керування використано середовище розроблення VersaPro, а для створення операторського інтерфейсу та візуалізації технологічного процесу – SCADA-систему Simplicity HMI 6.0.

					КРБ. СІ - 09.00.00. 000 ПЗ	Арк.
						78
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дат		

Досліджено можливості моделюючого комплексу під час відпрацювання режимів автоматичного пуску та аварійної зупинки газоперекачувального агрегату. Показано, що використання комплексу дозволяє здійснювати контроль технологічних параметрів, аналізувати роботу алгоритмів керування та оцінювати ефективність функціонування системи автоматичного керування.

Результати виконаної роботи підтверджують доцільність використання сучасних апаратно-програмних засобів для побудови систем контролю та діагностування технічного стану газоперекачувальних агрегатів, що сприяє підвищенню надійності, безпеки та ефективності їх експлуатації.

					КРБ. СІ - 09.00.00. 000 ПЗ	Арк.
						79
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дат		

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ НА ДЖЕРЕЛА

1. Халатов А. А., Дрлінський А. М., Костенко Д. М., Боцула А. В. Критичний стан і шляхи вдосконалення механічного приводу для газотранспортної системи України. Вісник НАН України. 2009. № 9. С. 14–23.
2. Довідник працівника газотранспортного підприємства / В. В. Розгонюк, А. А. Руднік, В. М. Коломєєв та ін. Київ : Росток, 2001. 1092 с.
3. ГПА-Ц-16С. Керівництво з експлуатації 246.0000.000-01 РЭ (ГПА-Ц-16С/76-1,44) [Електронний ресурс]. URL: <https://www.turbinist.ru/25552-rukovodstvo-po-ekspluatacii-2460000000-01-re-gpa-c1-16s-76-144.html> (дата звернення: 08.06.2026).
4. Системи автоматичного керування газотурбінних двигунів : навч. посіб. / М. С. Кулик, І. І. Гвоздецький, Є. М. Карпов та ін. Київ : КМУЦА, 2000. 140 с.
5. Системи автоматичного керування газотурбінних установок і компресорів : навч. посіб. / В. П. Березльов, І. І. Гвоздецький, К. І. Капітанчук та ін. Київ : НАУ-друк, 2010. 164 с.
6. Системи автоматичного керування авіаційними силовими установками : навч. посіб. / М. С. Кулик, І. І. Гвоздецький, Є. М. Карпов, В. П. Березльов. Київ : НАУ, 2001. 128 с.
7. Система автоматичного управління газоперекачувальним агрегатом [Електронний ресурс]. URL: <https://www.ua-systems.com.ua/sistemy-avtomaticheskogo-upravleniy> (дата звернення: 08.06.2026).
8. Бляут Ю. Є. Система автоматичного керування агрегатом Ц-6,3 та метрологічне забезпечення її вимірювальних каналів. Нафтогазова енергетика. 2010. № 1(12). С. 46–49.
9. Система автоматичного управління газоперекачувальним агрегатом ГПА-Ц-6,3В. ТОВ «УА-Системи». 8 с.

					КРБ. СІ - 09.00.00. 000 ПЗ	Арк.
						80
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дат		

10. Błachnio J., Kułaszka A. Computer Aided Visual Inspection of the Technical Condition of Gas Turbine Blades During Their Operation Period. Journal of KONES. 2009. Vol. 16, No. 3. P. 23–30.

11. Бурай Н. І. Віброакустична діагностика тріщиноподібних пошкоджень турболопаточних машин на стаціонарних та нестационарних режимах : дис. ... д-ра техн. наук : 05.11.13. Київ, 2005. 397 с.

12. Zamikhovskiy L., Ivanyuk N. Vibration Monitoring of the Technical Condition of the Blade Unit of the Gas Pumping Unit GPA-C-16S. Innovative Ideas in Science 2018 [Electronic resource]. URL: <http://conf.cunbm.utcluj.ro/index.php/iis/iis2018/author/submission/254> (access date: 08.06.2026).

13. Заміховський Л. М., Іванюк Н. І. Моделювання вібраційного стану лопатевого апарату газоперекачувальних агрегатів. Нафтогазова енергетика – 2013 : матеріали Міжнародної науково-технічної конференції (Івано-Франківськ, 7–11 жовтня 2013 р.). Івано-Франківськ, 2013. С. 198–200.

14. Zamikhovsky L., Zamikhovska O., Ivanyuk N. Trends in the Development of Methods for Diagnostics of the Technical State of the Blades of Gas-Pumping Units. ScienceRise. 2021. No. 1(72). P. 33–40. DOI: 10.21303/2313-8416.2021.001678.

15. Заміховський Л. М., Іванюк Н. І. Система діагностування лопатевого апарату газоперекачувальних агрегатів. Інтелектуальний продукт вчених і винахідників Прикарпаття – 2016 : щорічний каталог винаходів, корисних моделей, промислових зразків і раціоналізаторських пропозицій. Івано-Франківськ, 2016. С. 116–120.

16. Заміховський Л. М., Заміховська О. Л., Іванюк Н. І., Павлик В. В. Удосконалення системи автоматичного управління газоперекачувальними агрегатами з врахуванням їх технічного стану. Нафтогазова енергетика. 2020. № 2(34). С. 104–113.

					КРБ. СІ - 09.00.00. 000 ПЗ	Арк.
						81
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дат		

17. SM 1281 Condition Monitoring. Інструкція з експлуатації. Siemens AG, 2015. A5E36912951-AA.

18. SIMATIC S7-1200 Controllers [Electronic resource]. URL: <https://www.siemens.com/global/en/home/products/automation/systems/industrial/plc/s7-1200.html> (access date: 08.06.2026).

19. STEP 7 Professional V14 (TIA Portal) [Electronic resource]. URL: <http://simatic-market.ru/catalog/Siemens-CA01/10317037/info/> (access date: 08.06.2026).

20. Condition Monitoring SIPLUS CMS [Electronic resource]. URL: https://www.ien.eu/uploads/tx_etim/Page_11_Siemens_43123.pdf (access date: 08.06.2026).

					КРБ. СІ - 09.00.00. 000 ПЗ	Арк.
						82
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дат		

БІБЛІОГРАФІЧНА ДОВІДКА

Тема бакалаврської роботи: – *«Розроблення системи контролю вібраційного стану газоперекачувального агрегату (ГПА) на основі сучасних апаратно-програмних засобів»*

Обсяг пояснювальної записки становить: 83 сторінки та містить 5 таблиць, 24 рисунки, список використаних джерел із 20 найменувань.

Перелік креслень графічної частини:

- КРБ. СІ-09.00.00.001 – Принципова схема трьохвальної ГТУ (аркушів – 1);
- КРБ. СІ-09.00.00.002 – Загальний вигляд ГПА-Ц-16С/76-1,44М1 на базі ГТД ДГ-90Л2.1 (аркушів – 1);
- КРБ. СІ-09.00.00.003 – Структурна схема САК ГПА (аркушів – 1);
- КРБ. СІ-09.00.00.004 – Загальна схема експлуатаційної діагностики ГПА (аркушів – 1);
- КРБ. СІ-09.00.00.005 – Апаратна конфігурація системи вібродіагностування ГПА на базі PLC SIMATIC S7-1200 і вібраційного модуля SM1281 (аркушів – 1);
- КРБ. СІ-09.00.00.006 – Структурна схема моделюючого комплексу (аркушів – 1);
- КРБ. СІ-09.00.00.007 – Структурна схема пристрою оператора моделюючого комплексу (аркушів – 1).

Дата закінчення бакалаврської роботи 12 червня 2026 року

Студент-бакалавр _____ **Слівінська О. Р.**