

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА
КРБ.СІ - 03.00.00.000 ПЗ

Група СІ-22-1

Назарій Максимів

2026

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

Максимів Назарій Романович

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 531.7
(індекс)

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

«Розроблення технічних засобів для системи діагностування лопатевого апарату ГПА»

(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 Н. Р. Максимів

(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

Максимів Назарій Романович

(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема бакалаврської роботи: «Розроблення технічних засобів для системи діагностування лопатевого апарату ГПА»

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 12 червня 2026 року

3. Вихідні дані до проекту (роботи) Нормативно-технічна та науково-технічна література за тематикою

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

Вступ. Конструктивні особливості лопатевого апарату ГПА та технічні засоби його контролю. Робочі лопаті агрегатних вузлів ГПА як об'єкт контролю і діагностування. Розроблення технічного забезпечення системи діагностування лопатевого апарату ГПА. Розроблення структурної схеми системи діагностування лопатевого апарату ГПА. Вибір та калібрування вібродавачів для системи діагностування технічного стану лопатевого апарату. Висновки.

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

- Блок-схема визначення частоти власних коливань лопаті та апаратна конфігурація системи діагностування на базі PLC SIMATIC S7-1200 і вібраційного модуля SM1281 (1 арк.);
- Структурна схема вимірювання параметрів вібрації та частотні характеристики вібродавача (1 арк.);
- Структурна схема системи діагностування лопатевого апарату ГПА (1 арк.);
- Зовнішній вигляд тривісного акселерометра ADXL345 (1 арк.);
- Схема підключення акселерометра ADXL345 до плати Arduino та фрагмент програми його калібрування (1 арк.).

6. Дата видачі завдання 05.05.2026 року

Керівник, к.т.н., доцент

(підпис)

Завдання прийняв студент-бакалавр

(підпис)

Н. І. Іванюк

Н. Р. Максимів

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ п/п	Назва етапів бакалаврської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Конструктивні особливості лопатевого апарату ГПА та технічні засоби його контролю. Робочі лопаті агрегатних вузлів ГПА як об'єкт контролю і діагностування	06.05 - 20.05.2026 р.	
2	Засоби візуального і вимірювального контролю робочих лопатей. Технічні засоби контролю і діагностування лопатевого апарату в процесі експлуатації	16.05 - 24.05.2026 р.	
3	Технічні засоби реалізації віброакустичних методів контролю і діагностування лопатевого апарату ГПА. Розроблення технічного забезпечення системи діагностування лопатевого апарату газоперекачувальних агрегатів	20.05 - 31.05.2026 р.	
4	Вимоги до вібродавачів як складової системи діагностування лопатевого апарату ГПА. Діагностування лопатевого апарату за діагностичними ознаками.	24.05 – 31.05. 2026 р.	
5	Система вібраційного контролю та діагностики. Розроблення структурної схеми системи діагностування лопатевого апарату ГПА. Вибір та калібрування вібродавачів для системи діагностування технічного стану лопатевого апарату	28.05 – 05.06.2026 р.	
6	Оформлення пояснювальної записки	31.05 – 11.06.2026 р.	
7	Оформлення графічного матеріалу	06.06 – 11.06.2026 р.	

Студент-бакалавр

Керівник роботи, к.т.н., доцент

(підпис)

(підпис)

Н. Р. Максимів

Н. І. Іванюк

РЕФЕРАТ

Бакалаврська робота містить вступ, два розділи, висновки та список використаних джерел. Загальний обсяг роботи становить 67 сторінок. У роботі наведено 47 рисунків, 1 таблицю та використано 30 літературних джерел.

Тема бакалаврської роботи: «Розроблення технічних засобів для системи діагностування лопатевого апарату ГПА».

Об'єкт дослідження – процеси погіршення технічного стану лопатевого апарату газоперекачувальних агрегатів під впливом експлуатаційних навантажень, вібраційних впливів та інших дестабілізуючих факторів.

Предмет дослідження – технічні засоби контролю та діагностування стану лопатевого апарату газоперекачувальних агрегатів.

Мета роботи полягає у підвищенні надійності функціонування лопатевого апарату та ефективності експлуатації газоперекачувального агрегату шляхом розроблення технічних засобів контролю і діагностування його фактичного технічного стану.

У процесі виконання бакалаврської роботи проведено аналіз сучасних методів та засобів діагностування лопатевого апарату газоперекачувальних агрегатів.

За результатами дослідження:

- сформовано вимоги до вібраційних датчиків, що застосовуються в системах діагностування лопатевого апарату, та визначено критерії забезпечення необхідної точності, достовірності й інформативності вимірювань;
- розроблено структурну схему системи діагностування лопатевого апарату ГПА з використанням SCADA-технологій та засобів імітаційного моделювання;
- обґрунтовано вибір тривісного акселерометра ADXL345 для реєстрації вібраційних параметрів, реалізовано його взаємодію з платформою Arduino через інтерфейс I²C та розроблено програмний код для зчитування вимірювальної інформації;
- розглянуто структуру стенда для калібрування акселерометрів, описано методику калібрування датчика ADXL345 та розроблено програмне забезпечення для виконання цієї процедури.

Ключові слова: ГАЗОПЕРЕКАЧУВАЛЬНИЙ АГРЕГАТ, ЛОПАТЕВИЙ АПАРАТ, ТЕХНІЧНЕ ДІАГНОСТУВАННЯ, СИСТЕМА КОНТРОЛЮ, ВІБРАЦІЙНИЙ ДАТЧИК, АКСЕЛЕРОМЕТР, КАЛІБРУВАННЯ, SCADA-СИСТЕМА, ДЕФЕКТ, ТЕХНІЧНИЙ СТАН.

ABSTRACT

The bachelor's thesis consists of an introduction, two chapters, conclusions, and a list of references. The total volume of the thesis is 67 pages. The work contains 47 figures, 1 table, and 30 references.

Topic of the bachelor's thesis: Development of Technical Means for Diagnosing the Blade Apparatus of a Gas Pumping Unit.

Object of research – degradation processes occurring in the blade apparatus of gas pumping units under the influence of operational loads, vibration effects, and other factors that affect its technical condition.

Subject of research – technical means for monitoring and diagnosing the condition of the blade apparatus of gas pumping units.

The purpose of the thesis is to improve the reliability of the blade apparatus and enhance the operational efficiency of a gas pumping unit through the development of technical means for monitoring and diagnosing its actual technical condition during operation.

During the implementation of the bachelor's thesis, an analysis of modern methods and tools for diagnosing the blade apparatus of gas pumping units was carried out. Based on the obtained results:

- the requirements for vibration sensors used in blade apparatus diagnostic systems were determined, and the criteria for ensuring measurement accuracy, reliability, and informativeness were substantiated;
- a structural scheme of the blade apparatus diagnostic system based on SCADA technologies and simulation modeling tools was developed;
- the selection of the three-axis ADXL345 accelerometer for vibration parameter acquisition was justified; its integration with the Arduino platform via the I²C communication interface was implemented, and software for data acquisition was developed;
- the structure of the accelerometer calibration stand was described, the calibration procedure for the ADXL345 sensor was considered, and the corresponding calibration software was developed.

Keywords: GAS PUMPING UNIT, BLADE APPARATUS, TECHNICAL DIAGNOSTICS, MONITORING SYSTEM, VIBRATION SENSOR, ACCELEROMETER, CALIBRATION, SCADA SYSTEM, DEFECT, TECHNICAL CONDITION.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК ОСНОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ, СИМВОЛІВ ТА	
ОДИНИЦЬ	8
ВСТУП.....	10
1. ЛОПАТЕВИЙ АПАРАТ ГАЗОПЕРЕКАЧУВАЛЬНОГО АГРЕГАТУ ЯК	
ОБ'ЄКТ ДІАГНОСТУВАННЯ ТА АНАЛІЗ ТЕХНІЧНИХ	
ЗАСОБІВ КОНТРОЛЮ	13
1.1 Лопатевий апарат газоперекачувального агрегату як об'єкт технічного	
діагностування.....	13
1.2 Характерні дефекти та причини пошкодження лопатевого апарату ГПА..	15
1.3 Сучасні технічні засоби контролю та діагностування лопатевого	
апарату ГПА.....	22
1.3.1 Технічні засоби візуального та інструментального контролю	
лопатевого апарату.....	22
1.3.2 Засоби моніторингу та діагностування лопатевого апарату в	
експлуатаційних умовах.....	26
1.3.3 Віброакустичні системи контролю та діагностування лопатевого	
апарату ГПА.....	30
1.4 Висновки до розділу та постановка задач дослідження.....	34
2. РОЗРОБЛЕННЯ ТЕХНІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМИ	
ДІАГНОСТУВАННЯ ЛОПАТЕВОГО АПАРАТУ ГПА	37
2.1 Обґрунтування вимог до вібродавачів як складової системи	
діагностування лопатевого апарату ГПА.....	37
2.2 Особливості діагностування лопатевого апарату за віброакустичними	
діагностичними ознаками	42
2.3 Аналіз та побудова системи вібраційного контролю і діагностування.....	46

					КРБ. СІ - 03.00.00.000 ПЗ						
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата							
Розроб.		Максимів Н.Р.			«Розроблення технічних засобів для системи діагностування лопатевого апарату ГПА»			Літ.	Арк.	Аркушів	
Перевір.		Іванюк Н.І.								6	67
Реценз.								ІФНТУНГ СІ -22-1			
Н. контр.		Возний									
Затверд.		Заміховська									

2.4 Розроблення структурної схеми системи діагностування лопатевого апарату ГПА із застосуванням SCADA-технологій.....	49
2.5 Вибір та калібрування акселерометра для системи діагностування технічного стану лопатевого апарату.....	53
ВИСНОВКИ.....	60
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ НА ДЖЕРЕЛА.....	62
ДОДАТОК А.....	65
БІБЛІОГРАФІЧНА ДОВІДКА.....	67

					КРБ. СІ - 03.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дат		7

ПЕРЕЛІК ОСНОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ, СИМВОЛІВ ТА ОДИНИЦЬ

АЦП – аналого-цифровий перетворювач;

АСВ – автоматизована система стендових випробувань;

БД – база даних;

ВВК – візуально-вимірювальний контроль;

ГПА – газоперекачувальний агрегат;

ГТУ – газотурбінна установка;

ЕС – експертна система;

ІПМ – інтелектуальний пірометричний модуль;

КІО – канали інформаційного обміну;

ККД – коефіцієнт корисної дії;

ОК – осьовий компресор;

ПЗВ – приймально-здавальні випробування;

СКВ – середньоквадратичне відхилення;

ТВТ – турбіна високого тиску;

ТЗП – термозахисне покриття;

ТНТ – турбіна низького тиску;

ТО – технічне обслуговування;

ТС – технічний стан;

ЧВК – частота власних коливань.

ADXL345 – тривісний цифровий акселерометр;

I2C (Inter-Integrated Circuit) – послідовний інтерфейс обміну даними;

IEPE (Integrated Electronics Piezo-Electric) – стандарт підключення
п'єзоелектричних вібродавачів;

PLC (Programmable Logic Controller) – програмований логічний контролер;

RAW – необроблені (сирі) дані вимірювань;

SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) – система диспетчерського

					КРБ. СІ - 03.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дат		8

керування та збору даних;

SPI (Serial Peripheral Interface) – послідовний периферійний інтерфейс.

					КРБ. СІ - 03.00.00.000 ПЗ	Арк.
						9
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дат		

ВСТУП

На сучасному етапі розвитку газотранспортної галузі особлива увага приділяється забезпеченню надійної та безпечної експлуатації газоперекачувальних агрегатів (ГПА), які є ключовими елементами компресорних станцій магістральних газопроводів. Ефективність функціонування газотранспортної системи значною мірою залежить від технічного стану основних вузлів ГПА, серед яких важливе місце займає лопатевий апарат компресорної частини.

У процесі тривалої експлуатації лопатевий апарат зазнає впливу значних механічних, теплових та вібраційних навантажень. Наслідком цього можуть бути ерозійне та корозійне зношування поверхонь, утворення тріщин, деформації, порушення геометрії лопаток та інші дефекти. Розвиток таких пошкоджень призводить до погіршення аеродинамічних характеристик агрегату, зниження його продуктивності, збільшення енергетичних витрат і може стати причиною аварійних ситуацій.

Складність конструкції газоперекачувальних агрегатів та різноманітність можливих дефектів обумовлюють необхідність застосування сучасних засобів контролю та технічного діагностування. Досвід експлуатації свідчить, що своєчасне виявлення початкових ознак несправностей дозволяє суттєво знизити витрати на ремонт, підвищити надійність роботи обладнання та продовжити термін його безпечної експлуатації.

Для оцінювання технічного стану ГПА використовують різноманітні методи діагностування, серед яких найбільш поширеними є вібраційні, акустичні, термодинамічні та газодинамічні методи. Особливе місце займають вібраційні методи контролю, оскільки зміна параметрів вібрації є одним із перших інформативних проявів розвитку дефектів у лопатевому апараті. Ефективність таких методів значною мірою визначається

					КРБ. СІ - 03.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дат		10

характеристиками використовуваних датчиків, якістю вимірювальної апаратури та можливостями програмних засобів оброблення даних.

Сучасні концепції технічної експлуатації газоперекачувальних агрегатів орієнтовані на перехід від регламентного обслуговування до обслуговування за фактичним технічним станом. Реалізація такого підходу потребує впровадження високоточних систем контролю та діагностування, здатних забезпечувати безперервний моніторинг параметрів роботи обладнання і своєчасне виявлення небезпечних змін його технічного стану.

У зв'язку з цим актуальним завданням є розроблення технічних засобів для системи діагностування лопатевого апарату газоперекачувального агрегату, які дозволять підвищити достовірність контролю, оперативність виявлення дефектів та ефективність експлуатації обладнання.

Актуальність роботи полягає у необхідності вдосконалення засобів контролю та діагностування лопатевого апарату газоперекачувальних агрегатів для забезпечення своєчасного виявлення дефектів, підвищення надійності роботи обладнання та зменшення ризику виникнення аварійних ситуацій.

Метою роботи є розроблення технічних засобів для системи діагностування лопатевого апарату газоперекачувального агрегату на основі використання сучасних вібраційних датчиків та засобів оброблення діагностичної інформації.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- провести аналіз конструкції лопатевого апарату газоперекачувального агрегату та основних причин виникнення його дефектів;
- дослідити сучасні методи та засоби діагностування технічного стану лопатевого апарату;
- обґрунтувати вибір вібраційного датчика для побудови системи діагностування;

					КРБ. СІ - 03.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дат		11

- розробити структурну схему системи діагностування лопатевого апарату ГПА;
- реалізувати програмні засоби зчитування та оброблення інформації з акселерометра;
- розробити стенд і методику калібрування вимірювального датчика.

Об'єктом дослідження є деградаційні процеси, що виникають у лопатовому апараті газоперекачувального агрегату під впливом експлуатаційних факторів.

Предметом дослідження є технічні засоби контролю та діагностування технічного стану лопатевого апарату газоперекачувального агрегату.

Практичне значення одержаних результатів полягає у розробленні технічних засобів контролю вібраційних параметрів лопатевого апарату, які можуть бути використані під час створення та модернізації систем діагностування газоперекачувальних агрегатів.

					КРБ. СІ - 03.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дат		12

1 ЛОПАТЕВИЙ АПАРАТ ГАЗОПЕРЕКАЧУВАЛЬНОГО АГРЕГАТУ ЯК ОБ'ЄКТ ДІАГНОСТУВАННЯ ТА АНАЛІЗ ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ КОНТРОЛЮ

1.1 Лопатевий апарат газоперекачувального агрегату як об'єкт технічного діагностування

Газоперекачувальні агрегати є основним технологічним обладнанням компресорних станцій магістральних газопроводів. Їх ефективна та безпечна робота значною мірою залежить від технічного стану окремих вузлів і систем, серед яких особливе місце займає лопатевий апарат компресорної та турбінної частин агрегату. Саме лопатевий апарат забезпечує перетворення енергії робочого середовища та визначає основні експлуатаційні характеристики газоперекачувального агрегату.

Лопатевий апарат являє собою сукупність робочих і напрямних лопаток, які входять до складу компресора та турбіни. Під час експлуатації лопатки перебувають під дією значних механічних, теплових, аеродинамічних та вібраційних навантажень. Крім того, на їх технічний стан впливають агресивні компоненти газового середовища, механічні домішки, температурні перепади та циклічні зміни режимів роботи агрегату.

Досвід експлуатації газотурбінного обладнання свідчить, що значна частина відмов газоперекачувальних агрегатів пов'язана саме з пошкодженнями елементів проточної частини. Виникнення навіть незначних дефектів на поверхні лопаток може призводити до погіршення аеродинамічних характеристик компресора або турбіни, зростання рівня вібрації, зниження коефіцієнта корисної дії та поступового розвитку більш серйозних пошкоджень.

Особливістю лопатевого апарату як об'єкта діагностування є складність його конструкції та обмежений доступ до більшості контрольованих

					КРБ. СІ - 03.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дат		13

поверхонь. Значна кількість потенційно небезпечних дефектів розвивається всередині конструкції або у важкодоступних місцях, що ускладнює їх своєчасне виявлення традиційними методами контролю. Саме тому до систем діагностування висуваються підвищені вимоги щодо достовірності, чутливості та оперативності отримання діагностичної інформації.

У процесі експлуатації лопатевого апарату можуть виникати різноманітні пошкодження, серед яких найбільш поширеними є ерозійне та корозійне зношування, механічні пошкодження кромок, утворення тріщин, деформації, втомне руйнування матеріалу, а також зміна геометричних параметрів лопаток. Розвиток таких дефектів призводить до зміни режимів обтікання лопаток потоком робочого середовища, що безпосередньо впливає на робочі характеристики агрегату.

Для оцінювання технічного стану лопатевого апарату застосовують різні методи неруйнівного контролю та діагностування. До найбільш поширених належать візуально-оптичні, ультразвукові, вихрострумові, капілярні, акустичні та вібраційні методи. Кожен із них має свої переваги та обмеження щодо виявлення певних типів дефектів.

Серед сучасних підходів до контролю технічного стану газоперекачувальних агрегатів особливого значення набувають методи, засновані на аналізі вібраційних процесів. Це пов'язано з тим, що більшість дефектів лопатевого апарату супроводжується зміною параметрів вібрації, які можуть бути зафіксовані спеціалізованими датчиками ще на початкових стадіях розвитку пошкодження. Таким чином забезпечується можливість раннього виявлення несправностей без зупинки обладнання та втручання в його конструкцію.

Ефективність вібраційного контролю значною мірою залежить від правильного вибору вимірювальних перетворювачів, їх метрологічних характеристик та способу встановлення на контрольованому об'єкті. В сучасних системах моніторингу широко використовуються акселерометри,

					КРБ. СІ - 03.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дат		14

які забезпечують високу точність реєстрації параметрів вібрації та дозволяють здійснювати подальший аналіз отриманих сигналів за допомогою цифрових методів оброблення даних.

Враховуючи складність конструкції лопатевого апарату, різноманітність можливих дефектів та високі вимоги до надійності роботи газоперекачувальних агрегатів, розроблення сучасних технічних засобів діагностування є актуальним науково-технічним завданням. Застосування автоматизованих систем контролю дає змогу своєчасно виявляти ознаки деградації елементів лопатевого апарату, прогнозувати розвиток дефектів і приймати обґрунтовані рішення щодо подальшої експлуатації обладнання.

Таким чином, лопатевий апарат газоперекачувального агрегату є складним та відповідальним об'єктом технічного діагностування, від стану якого значною мірою залежать надійність, безпечність та ефективність функціонування всієї газотранспортної системи.

1.2 Характерні дефекти та причини пошкодження лопатевого апарату ГПА

Лопатевий апарат належить до найбільш навантажених елементів газоперекачувального агрегату. У процесі експлуатації його елементи працюють в умовах дії змінних механічних навантажень, високих температур, вібраційних впливів та агресивного середовища. Сукупна дія зазначених факторів спричиняє поступове погіршення технічного стану лопаток компресора і турбіни, що може призводити до зниження ефективності роботи агрегату або виникнення аварійних ситуацій.

Аналіз результатів експлуатації газотурбінного обладнання показує, що дефекти лопатевого апарату можуть виникати як на стадії виготовлення, так і в процесі роботи обладнання. Відповідно до причин виникнення їх доцільно поділяти на конструктивно-виробничі та експлуатаційні.

					КРБ. СІ - 03.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дат		15

До конструктивно-виробничих дефектів належать відхилення геометричних параметрів профілю лопаток, порушення технології виготовлення, наявність прихованих металургійних дефектів, а також помилки складання окремих вузлів. Такі дефекти можуть бути присутніми ще до введення обладнання в експлуатацію та створювати передумови для подальшого розвитку пошкоджень.

Експлуатаційні дефекти формуються безпосередньо під час роботи агрегату внаслідок дії механічних, теплових та аеродинамічних навантажень. Найбільш поширеними причинами їх виникнення є потрапляння сторонніх предметів у проточну частину, тривала робота в режимах, близьких до помпажу, наявність пилу та абразивних домішок у повітрі, перевищення допустимих температурних режимів, а також розвиток втомних процесів у матеріалі лопаток.

Розглянемо види дефектів лопаток осьового компресора.

Пошкодження лопаток осьового компресора є однією з найпоширеніших причин погіршення експлуатаційних характеристик газоперекачувальних агрегатів. До найбільш характерних дефектів належать механічні пошкодження кромки лопаток, ерозійне та корозійне зношування, деформації, втомні тріщини та руйнування окремих елементів.

Механічні пошкодження виникають переважно внаслідок потрапляння сторонніх предметів у проточну частину компресора. Навіть незначні вибоїни або деформації поверхні можуть стати концентраторами напружень і сприяти розвитку тріщин (рисунок 1.2).

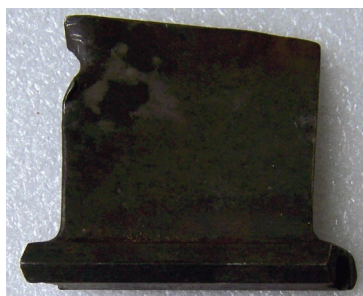


Рисунок 1.2 – Лопатка компресора з механічним пошкодженням кромки

					КРБ. СІ - 03.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дат		16

У процесі подальшої експлуатації механічні пошкодження часто супроводжуються утворенням тріщин у матеріалі лопатки, що суттєво знижує її міцність та довговічність (рисунок 1.3).



Рисунок 1.3 – Пошкодження лопатки компресора із розвитком тріщини

Серйозну небезпеку становить робота компресора в нестійких режимах, зокрема поблизу зони помпажу. У таких умовах виникають додаткові динамічні навантаження, які можуть спричиняти руйнування лопатевого апарату.



Рисунок 1.4 – Руйнування лопаток компресора внаслідок роботи в помпажному режимі

Одним із наслідків контактів лопаток з елементами корпусу або сторонніми предметами є локальні деформації кромки, які порушують аеродинамічні характеристики проточної частини.

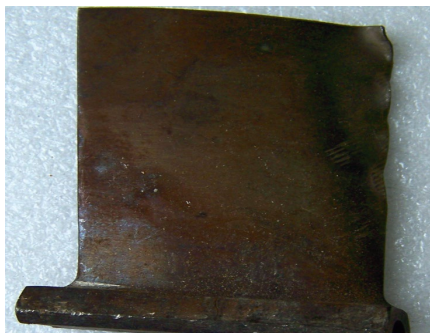


Рисунок 1.5 – Деформація вхідної кромки профілю лопатки компресора

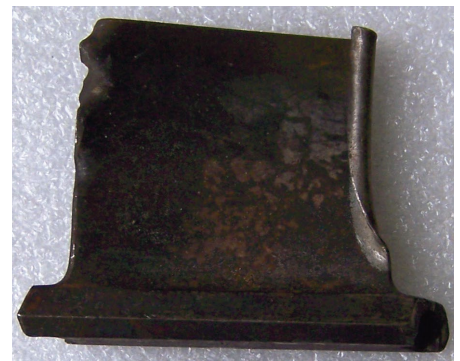


Рисунок 1.6 – Пошкодження лопатки внаслідок механічного впливу

Крім механічних пошкоджень, для лопаток компресора характерним є ерозійне зношування. Воно виникає в результаті тривалої дії пилу та інших твердих частинок, що містяться у повітряному потоці. Ерозія призводить до зміни геометрії профілю лопаток, збільшення шорсткості поверхні та зниження ефективності роботи компресора.

Розглянемо види дефектів соплового апарату.

У процесі експлуатації соплові апарати турбіни також зазнають значних термічних та механічних навантажень. Для них характерні такі дефекти, як тріщини, пори, деформації, викришування матеріалу, руйнування покриттів та локальні пошкодження поверхонь (рисунок 1.7).

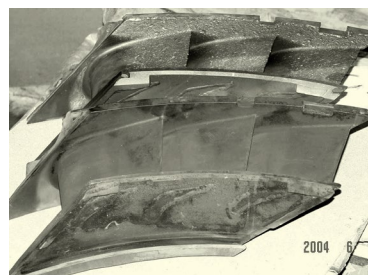


Рисунок 1.7 – Загальний вигляд сегментів соплового апарату після тривалої експлуатації

Одним із найбільш небезпечних дефектів є виникнення тріщин на поверхні лопаток соплового апарату, оскільки вони можуть призводити до подальшого руйнування елементів конструкції.

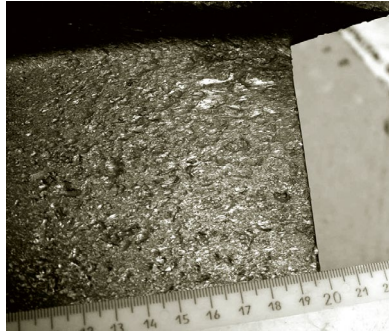


Рисунок 1.8 – Тріщини та механічні пошкодження соплового апарату

Розвиток термоциклічних навантажень може спричиняти утворення мережі поверхневих тріщин у матеріалі корпусних елементів соплового апарату (рисунок 1.9)



Рисунок 1.9 – Розтріскування елементів соплового апарату

Деформації та локальні вириви матеріалу погіршують газодинамічні характеристики турбіни та можуть бути джерелом вторинних пошкоджень.



Рисунок 1.10 – Деформація поверхні сегмента соплового апарату

					КРБ. СІ - 03.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дат		19

Розглянемо види дефектів робочих лопаток турбіни.

Умови роботи турбінних лопаток характеризуються високими температурами та значними відцентровими навантаженнями. Це обумовлює виникнення специфічних дефектів, пов'язаних із термічною втомою, корозією, ерозією та тепловими перевантаженнями.

Пошкодження лопаток сторонніми предметами можуть спричиняти локальні дефекти поверхні та порушення міцності конструкції (рисунок 1.11).



Рисунок 1.11 – Механічне пошкодження лопатки турбіни

Перевищення допустимих температурних режимів призводить до розвитку термовтомних процесів та появи тріщин у матеріалі лопаток (рисунок 1.12).

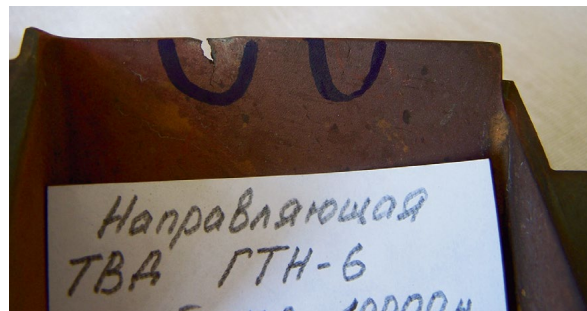


Рисунок 1.12 – Термічне розтріскування лопатки турбіни

Однією з ознак перегріву є зміна кольору поверхні металу, що свідчить про структурні зміни матеріалу (рисунок 1.13).

					КРБ. СІ - 03.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дат		20



Рисунок 1.13 – Ознаки термічного перевантаження лопатки турбіни

Подальший розвиток температурних пошкоджень може завершуватися повним руйнуванням лопатки та виходом агрегату з ладу (рисунок 1.14).



Рисунок 1.14 – Руйнування робочої лопатки турбіни внаслідок теплового удару

Таким чином, аналіз експлуатаційних пошкоджень показує, що основними причинами деградації лопатевого апарату газоперекачувальних агрегатів є механічні, вібраційні, ерозійні, корозійні та термічні впливи.

Своєчасне виявлення зазначених дефектів є необхідною умовою забезпечення надійної та безпечної роботи ГПА, що обумовлює необхідність застосування сучасних засобів контролю та діагностування технічного стану лопатевого апарату.

1.3 Сучасні технічні засоби контролю та діагностування лопатевого апарату ГПА

Надійність роботи лопатевого апарату газоперекачувального агрегату значною мірою визначається можливістю своєчасного виявлення дефектів на ранніх стадіях їх розвитку. Більшість пошкоджень лопаток виникає поступово, тому ефективність технічного обслуговування залежить від застосування сучасних засобів контролю та діагностування, які забезпечують отримання достовірної інформації про технічний стан обладнання без його демонтажу.

Для оцінювання стану лопатевого апарату використовуються різні методи неруйнівного контролю, що відрізняються фізичними принципами роботи, чутливістю до дефектів та сферою застосування. Найбільш поширеними є візуально-вимірювальні, оптичні, капілярні, металографічні та віброакустичні методи контролю.

Залежно від умов експлуатації та типу обладнання технічні засоби діагностування можуть використовуватися як під час планових ремонтів і технічних оглядів, так і безпосередньо в процесі роботи газоперекачувального агрегату.

1.3.1 Технічні засоби візуального та інструментального контролю лопатевого апарату

Візуально-вимірювальний контроль є одним із найбільш поширених методів оцінювання технічного стану лопатевого апарату. Його застосовують під час виготовлення, ремонту та експлуатації обладнання для виявлення поверхневих дефектів, контролю геометричних параметрів та оцінювання загального стану лопаток.

					КРБ. СІ - 03.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дат		22

Контроль здійснюється на спеціально обладнаних робочих місцях із використанням вимірювального інструменту, шаблонів, оптичних приладів та допоміжного обладнання.



Рисунок 1.15 – Проведення візуально-вимірювального контролю лопаток



Рисунок 1.16 – Вимірювання геометричних параметрів лопаток

Одним із недоліків візуального контролю є неможливість безпосереднього доступу до внутрішніх порожнин і важкодоступних зон конструкції. Для вирішення цієї проблеми використовуються ендоскопічні системи контролю, які дозволяють здійснювати огляд внутрішніх поверхонь без розбирання агрегату.

Ендоскопічний контроль забезпечує виявлення тріщин, корозійних пошкоджень, відкладень та інших дефектів у місцях, недоступних для прямого огляду.

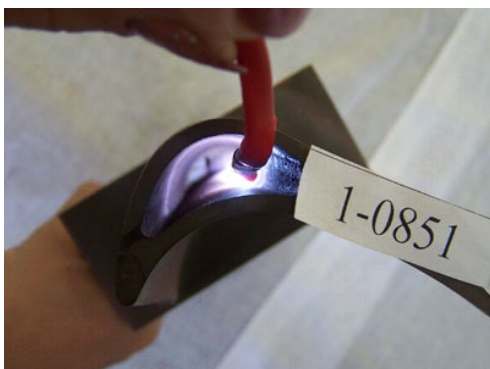


Рисунок 1.17 – Контроль внутрішніх поверхонь лопатки



Рисунок 1.18 – Використання ендоскопа для діагностування внутрішніх дефектів

Для виявлення поверхневих тріщин та інших дрібних дефектів широко застосовується капілярний неруйнівний контроль. Його принцип ґрунтується на проникненні спеціальної індикаторної рідини у поверхневі несплошності матеріалу та подальшому візуальному виявленні дефектів.



Рисунок 1.19 – Проведення капілярного контролю лопаток

Для реалізації методу використовуються спеціалізовані дефектоскопічні комплекти, що містять пенетрант, очищувач та проявник.



Рисунок 1.20 – Комплект засобів для капілярного контролю



Рисунок 1.21 – Виявлення дефектів методом капілярної дефектоскопії

Додаткову інформацію про структуру матеріалу та стан захисних покриттів забезпечують металографічні методи контролю. Вони використовуються для дослідження мікроструктури металу, оцінювання якості покриттів та аналізу причин руйнування деталей.

Контроль товщини захисних покриттів здійснюється за допомогою спеціалізованих вимірювальних приладів.



Рисунок 1.22 – Обладнання для підготовки металографічних зразків

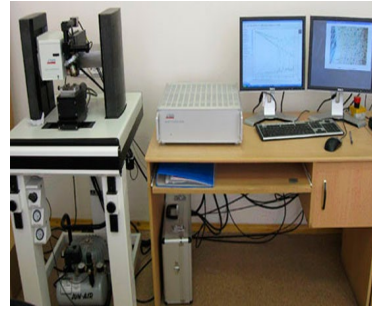


Рисунок 1.23 – Прилад для дослідження характеристик покриттів

Для контролю геометричних параметрів складнопрофільних деталей застосовуються сучасні системи тривимірного сканування та оптичного вимірювання.

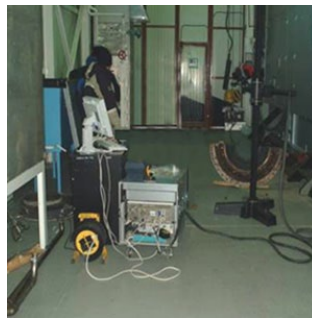


Рисунок 1.24 – Система оптичного вимірювання геометричних параметрів лопаток

Оцінювання механічних властивостей матеріалу виконується шляхом визначення характеристик міцності, твердості та мікротвердості на спеціальному випробувальному обладнанні.



а)



б)

Рисунок 1.25 – Обладнання для визначення механічних характеристик матеріалу при: а - кімнатній температурі, б - при підвищеній температурі

Розглянуті методи дозволяють ефективно виявляти поверхневі дефекти та контролювати геометричні характеристики лопаток, однак їх застосування переважно пов'язане з проведенням планових оглядів та ремонтних робіт.

1.3.2 Засоби моніторингу та діагностування лопатевого апарату в експлуатаційних умовах

Сучасні концепції технічного обслуговування газоперекачувальних агрегатів передбачають перехід від регламентного контролю до безперервного моніторингу технічного стану обладнання. Такий підхід дозволяє своєчасно виявляти початкові ознаки розвитку дефектів, прогнозувати їх подальший розвиток та приймати обґрунтовані рішення щодо проведення технічного обслуговування або ремонту.

Залежно від фізичних принципів отримання діагностичної інформації сучасні методи контролю та діагностування лопатевого апарату можна умовно поділити на три основні групи:

- методи, що базуються на аналізі параметрів власних і вимушених коливань лопаток;
- методи, основані на цифровому обробленні вібраційних сигналів та виділенні характерних діагностичних ознак із використанням спектрального, кореляційного та вейвлет-аналізу;
- методи, що ґрунтуються на дослідженні аеродинамічної взаємодії робочих і напрямних лопаток та аналізі параметрів газового потоку.

Найбільшого практичного поширення набули перші дві групи методів, оскільки вони дозволяють здійснювати контроль технічного стану лопатевого апарату без демонтажу обладнання та безпосередньо в процесі його експлуатації.

Одним із важливих діагностичних параметрів є власні частоти коливань робочих лопаток. Відомо, що поява дефектів, зміна геометричних параметрів

					КРБ. СІ - 03.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дат		26

або накопичення втомних пошкоджень призводять до зміни динамічних характеристик конструкції. Тому визначення власних частот і форм коливань дозволяє оцінювати технічний стан лопатевого апарату та виявляти передумови до виникнення небезпечних резонансних режимів.

Для визначення частот власних коливань використовуються спеціалізовані вимірювальні комплекси, до складу яких входять електромагнітний збуджувач коливань, первинний вимірювальний перетворювач, генератор сигналів та засоби візуалізації результатів вимірювання. Принцип роботи таких систем ґрунтується на створенні вимушених коливань лопатки та реєстрації її резонансної реакції.

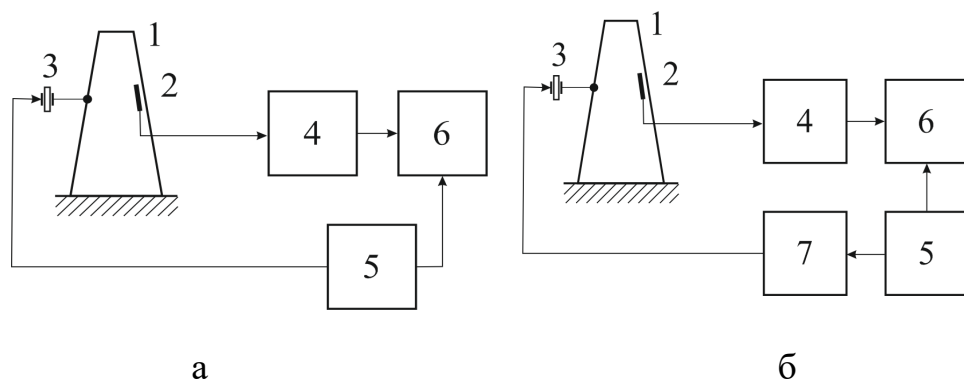


Рисунок 1.26 – Структурна схема визначення частот і форм власних коливань робочої лопатки:

а — збурення коливань і визначення ЧВК: 1 — робоча лопать; 2 — п'єзокристал АФО-1; 3 — електромагнітний збудник ТА-56М; 4 — вольтметр ВЗ-7; 5 — генератор ГЗ-34; 6 — електронний осцилограф С1-19Б;
б — збурення коливань і визначення форм ЧСК: 1 - робоча лопать; 2 – віброщуп; 3 - електромагнітний збудник ТА-56М; 4 - вольтметр ВЗ-7; 5 - генератор ГЗ-34; 6 - електронний осцилограф С1-19Б; 7 - підсилювач потужності ТУ-50М.

У процесі вимірювання на поверхні лопатки встановлюється чутливий елемент, який реєструє її коливання. Порівняння параметрів сигналу з сигналом збудження дає змогу визначити резонансну частоту, а послідовне

переміщення вимірювального елемента дозволяє встановити форму коливань та положення вузлових ліній.

Отримані результати використовуються для оцінювання вібраційного стану лопатевого апарату та виявлення можливих відхилень від нормативних характеристик.

Поряд із вібраційними методами для оцінювання технічного стану робочих лопаток застосовуються сучасні безконтактні засоби температурного контролю. Високі температури та їх циклічні зміни є одним із основних факторів деградації матеріалу лопаток турбіни, тому контроль температурного режиму має важливе значення для прогнозування їх ресурсу.

Одним із перспективних напрямів є використання багатоканальних оптичних пірометричних систем, які забезпечують безперервний контроль температури поверхні робочих лопаток без втручання в конструкцію агрегату. Такі системи дозволяють отримувати інформацію в режимі реального часу та інтегрувати її в автоматизовані системи контролю і діагностування.

Для підвищення ефективності моніторингу застосовуються інтелектуальні пірометричні модулі, які поєднують функції вимірювання температури, первинної обробки сигналів та передачі діагностичної інформації до системи керування. Вони забезпечують одночасний аналіз експериментальних даних і результатів математичного моделювання теплонапруженого стану лопаток.

До складу такого модуля, як правило, входять багатоканальний оптико-електронний перетворювач температури, блок первинного оброблення сигналів та вбудований обчислювальний пристрій із спеціалізованим програмним забезпеченням.

					КРБ. СІ - 03.00.00.000 ПЗ	Арк.
						28
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дат		

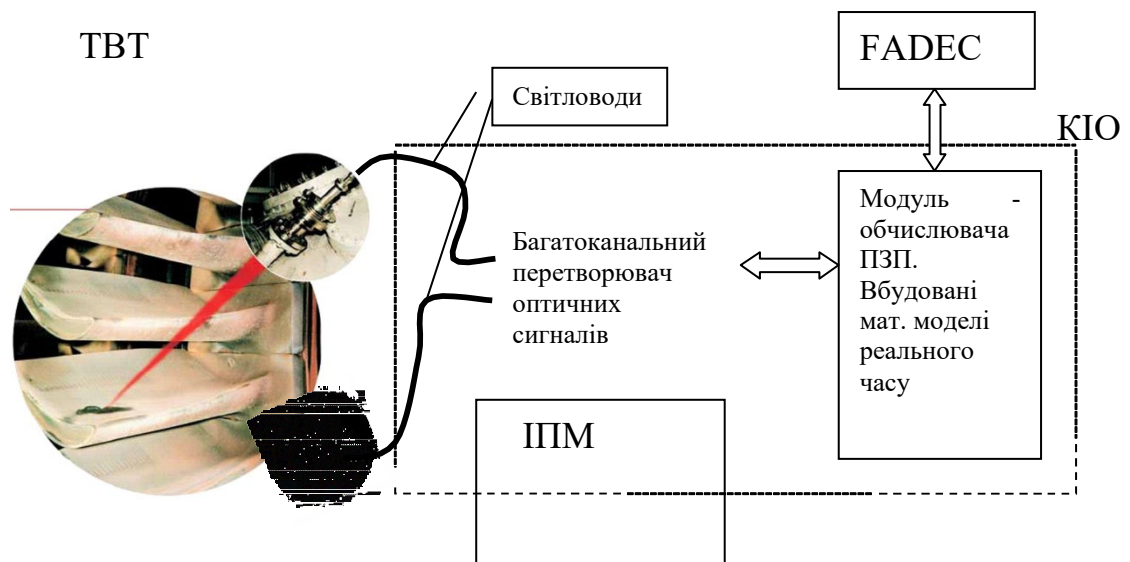


Рисунок 1.27 – Структура інтелектуального пірометричного модуля

Використання сучасних цифрових технологій забезпечує інтеграцію пірометричної системи із загальною системою моніторингу газоперекачувального агрегату.

Використання засобів безконтактного температурного контролю дозволяє:

- здійснювати безперервний контроль температурного стану робочих лопаток;
- оцінювати вплив теплових навантажень на ресурс деталей;
- своєчасно виявляти локальні перегріви та інші аномалії;
- прогнозувати розвиток термовтомних пошкоджень;
- підвищувати достовірність оцінювання технічного стану обладнання шляхом комплексування інформації від різних вимірювальних каналів.

Отже, сучасні технічні засоби контролю в процесі експлуатації забезпечують отримання об'єктивної інформації про динамічний та температурний стан лопатевого апарату газоперекачувального агрегату.

Поєднання методів аналізу вібраційних процесів із засобами безконтактного температурного моніторингу створює основу для побудови

високоєфективних систем діагностування, здатних виявляти дефекти на ранніх стадіях їх розвитку та забезпечувати підвищення надійності роботи ГПА.

1.3.3 Віброакустичні системи контролю та діагностування лопатевого апарату ГПА

Традиційні методи неруйнівного контролю, зокрема ультразвукова, магнітопорошкова, капілярна та вихрострумова дефектоскопія, забезпечують виявлення вже сформованих дефектів матеріалу, таких як тріщини, пори, розшарування чи корозійні пошкодження. Однак застосування цих методів здебільшого пов'язане з проведенням планових оглядів або ремонтних робіт, що не дозволяє здійснювати безперервний контроль технічного стану лопатевого апарату в процесі експлуатації.

У зв'язку з цим особливої актуальності набувають віброакустичні методи діагностування, які базуються на реєстрації та аналізі коливальних процесів, що супроводжують роботу газоперекачувального агрегату. Відомо, що розвиток більшості дефектів призводить до зміни динамічних характеристик вузлів та агрегатів, а отже, відображається у зміні параметрів вібрації та акустичного сигналу.

Перевагою віброакустичних методів є можливість здійснення безперервного моніторингу без зупинки обладнання. При цьому інформація про технічний стан отримується шляхом аналізу первинних вібраційних сигналів або їх діагностичних ознак, сформованих за допомогою сучасних цифрових методів оброблення даних.

Процес вимірювання вібраційних параметрів включає декілька етапів: перетворення механічних коливань у електричний сигнал, його підсилення та фільтрацію, аналіз отриманих даних і формування діагностичного висновку.

Якість оцінювання технічного стану значною мірою залежить від характеристик первинних вимірювальних перетворювачів, алгоритмів цифрового оброблення та програмного забезпечення системи.

					КРБ. СІ - 03.00.00.000 ПЗ	Арк.
						30
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дат		

На сучасному етапі розвитку систем технічної діагностики використовуються два основних підходи до організації вібраційного контролю:

- застосування портативних віброметрів і віброаналізаторів для періодичного контролю окремих вузлів;
- використання стаціонарних систем моніторингу, які забезпечують безперервне спостереження за технічним станом обладнання в режимі реального часу.

Портативні віброметри та віброаналізатори знайшли широке застосування в різних галузях промисловості завдяки мобільності та простоті використання. Вони дозволяють оперативно визначати рівень вібрації окремих вузлів і виконувати спектральний аналіз сигналів. Проте для діагностування лопатевого апарату газоперекачувальних агрегатів такі засоби мають певні обмеження, оскільки не забезпечують безперервного контролю та накопичення статистичної інформації про розвиток дефектів.

Перспективнішим напрямом є створення стаціонарних автоматизованих систем вібродіагностики, побудованих на базі сучасних засобів промислової автоматизації. Такі системи, як правило, використовують програмовані логічні контролери, спеціалізовані вимірювальні модулі та SCADA-системи, що забезпечують централізований збір, оброблення та архівування діагностичної інформації.

Завдяки розвитку цифрових технологій сучасні системи вібродіагностики виконують не лише функції аварійного захисту обладнання, а й забезпечують формування інформаційної бази для прогнозування технічного стану та залишкового ресурсу агрегатів. Це дає можливість реалізувати концепцію обслуговування за фактичним технічним станом і своєчасно виявляти початкові ознаки розвитку несправностей.

Останніми роками створено низку спеціалізованих програмно-технічних комплексів для моніторингу та діагностування енергомеханічного

					КРБ. СІ - 03.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дат		31

обладнання. Їх функціональні можливості включають автоматичне виявлення аномалій, аналіз тенденцій зміни параметрів, формування попереджувальних повідомлень та підтримку прийняття рішень щодо подальшої експлуатації обладнання.

Значний інтерес для задач діагностування лопатевого апарату становлять сучасні модулі моніторингу технічного стану обладнання, що інтегруються у структуру автоматизованих систем керування технологічними процесами. Одним із таких засобів є вібраційний модуль **SM1281 Condition Monitoring**, призначений для безперервного контролю параметрів вібрації відповідальних вузлів машин і механізмів.

На основі цього модуля та програмованого логічного контролера **SIMATIC S7-1200** може бути побудована система діагностування лопатевого апарату ГПА, яка забезпечує збір даних від акселерометрів, їх первинне оброблення та передачу результатів у SCADA-систему для подальшого аналізу.

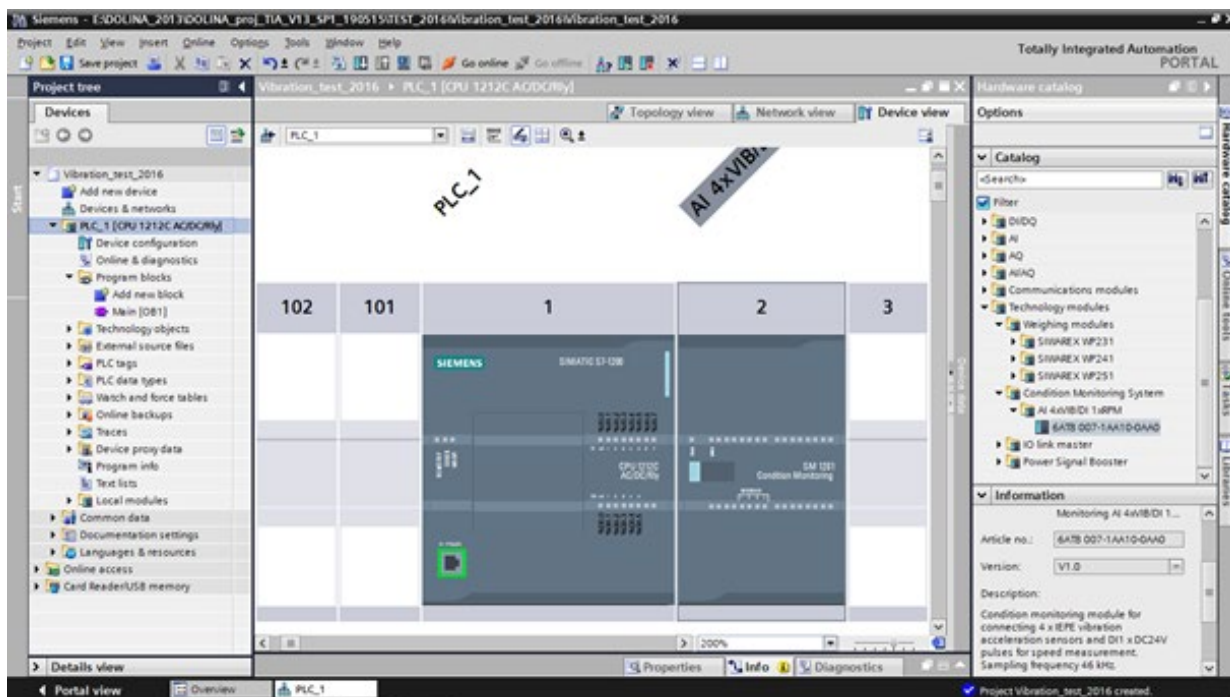


Рисунок 1.28 – Апаратна конфігурація системи діагностування на базі PLC SIMATIC S7-1200 та вібраційного модуля SM1281

Основним елементом такої системи є вібраційний модуль SM1281, який працює спільно з комплектом промислових акселерометрів стандарту IEPЕ (Integrated Electronics Piezo-Electric). Модуль забезпечує одночасне підключення декількох вимірювальних каналів, оброблення аналогових сигналів та передачу інформації до програмованого контролера.

Важливою перевагою використання програмно-апаратної платформи Siemens є можливість гнучкого налаштування параметрів вимірювання та інтеграції системи діагностування з іншими компонентами автоматизованої системи керування компресорною станцією.

Параметрування вібраційного модуля здійснюється в середовищі інженерного проєктування **TIA Portal**, яке забезпечує конфігурування апаратної частини, налаштування каналів вимірювання, організацію інформаційного обміну та створення алгоритмів первинного аналізу вібраційних сигналів.

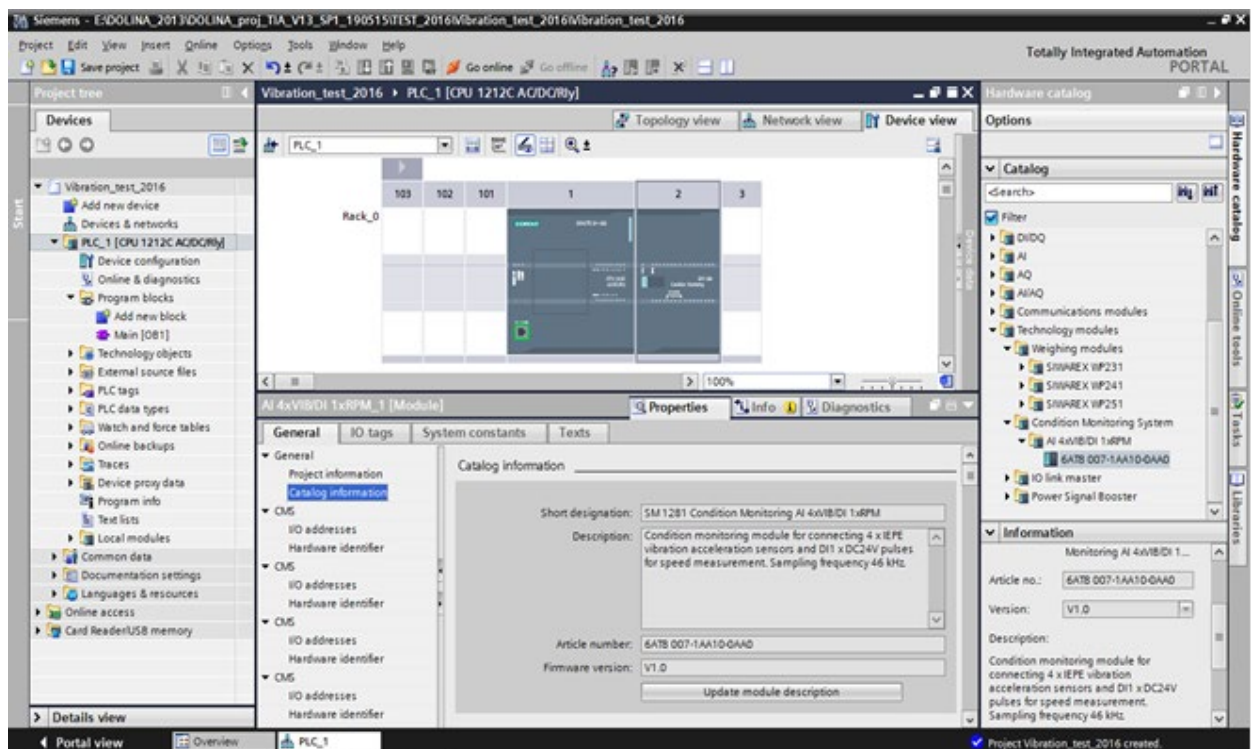


Рисунок 1.29 – Налаштування параметрів роботи вібраційного модуля SM1281 у середовищі TIA Portal

Використання сучасних вібраційних модулів у поєднанні з програмованими логічними контролерами та SCADA-технологіями створює передумови для побудови ефективних систем моніторингу технічного стану лопатевого апарату газоперекачувальних агрегатів. Такі системи дозволяють автоматизувати процес збору та оброблення інформації, своєчасно виявляти розвиток дефектів і підвищувати надійність експлуатації газотранспортного обладнання.

Проведений аналіз сучасних технічних засобів контролю та діагностування показує, що найбільш перспективним напрямом є створення автоматизованих систем вібродіагностики, побудованих на базі сучасних промислових контролерів, вібраційних модулів та цифрових акселерометрів.

Саме такий підхід покладено в основу подальших досліджень і розроблення технічних засобів для системи діагностування лопатевого апарату газоперекачувального агрегату, що розглядаються в наступному розділі бакалаврської роботи.

1.4 Висновки до розділу та постановка задач дослідження

У першому розділі бакалаврської роботи проведено аналіз лопатевого апарату газоперекачувального агрегату як об'єкта технічного діагностування. Встановлено, що лопатевий апарат є одним із найбільш відповідальних і конструктивно складних вузлів ГПА, працездатність якого безпосередньо впливає на надійність, економічність та безпеку функціонування всього агрегату. Особливості конструкції та умови експлуатації ускладнюють своєчасне виявлення дефектів, що обумовлює необхідність застосування сучасних методів і засобів контролю технічного стану.

У результаті аналізу основних видів пошкоджень встановлено, що найбільш характерними дефектами лопатевого апарату є механічні пошкодження, ерозійне та корозійне зношування, утворення тріщин,

деформації, термовтомні руйнування та локальні перегріву. Розвиток таких дефектів може призводити до погіршення робочих характеристик агрегату, зниження його ресурсу та виникнення аварійних ситуацій.

Проведений огляд сучасних технічних засобів контролю показав, що традиційні методи неруйнівного контролю, зокрема візуально-вимірний, ендоскопічний, капілярний, металографічний та інші методи, дозволяють ефективно виявляти поверхневі та внутрішні дефекти, однак переважно застосовуються під час технічних оглядів і ремонтних робіт. Їх використання не забезпечує безперервного контролю технічного стану лопатевого апарату безпосередньо в процесі експлуатації газоперекачувального агрегату.

Розглянуто сучасні методи діагностування, що реалізуються на основі аналізу параметрів коливальних процесів, цифрового оброблення вібраційних сигналів та застосування автоматизованих систем моніторингу. Встановлено, що найбільш перспективним напрямом є використання віброакустичних методів контролю, які базуються на вимірюванні та аналізі параметрів вібрації, що містять інформацію про фактичний технічний стан лопатевого апарату.

Аналіз сучасних програмно-апаратних комплексів показав доцільність застосування автоматизованих систем вібродіагностики, побудованих на базі програмованих логічних контролерів, спеціалізованих вібраційних модулів та цифрових акселерометрів. Використання таких систем дозволяє реалізувати безперервний моніторинг стану обладнання, автоматизувати процес збору та оброблення інформації, а також забезпечити раннє виявлення дефектів і прогнозування їх розвитку.

На підставі проведеного аналізу для досягнення поставленої мети в бакалаврській роботі необхідно вирішити такі основні завдання:

					КРБ. СІ - 03.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дат		35

- провести аналіз особливостей побудови системи діагностування лопатевого апарату газоперекачувального агрегату на основі віброакустичних методів контролю;
- обґрунтувати вимоги до первинних вимірювальних перетворювачів (вібродавачів), які використовуються у складі системи діагностування;
- розробити структурну схему системи діагностування лопатевого апарату ГПА із застосуванням сучасних програмно-апаратних засобів та SCADA-технологій;
- виконати обґрунтований вибір цифрового акселерометра як основного елемента вимірювального каналу системи діагностування;
- розробити програмно-апаратні засоби зчитування та оброблення інформації від вібродавача;
- розглянути процедуру калібрування акселерометра та описати функціональну структуру стенда для його калібрування.

Вирішення поставлених завдань дозволить створити технічне забезпечення системи діагностування лопатевого апарату газоперекачувального агрегату, що сприятиме підвищенню достовірності контролю його технічного стану та ефективності експлуатації газотранспортного обладнання.

2 РОЗРОБЛЕННЯ ТЕХНІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМИ ДІАГНОСТУВАННЯ ЛОПАТЕВОГО АПАРАТУ ГПА

2.1 Обґрунтування вимог до вібродавачів як складової системи діагностування лопатевого апарату ГПА

Ефективність системи діагностування лопатевого апарату газоперекачувального агрегату значною мірою визначається характеристиками первинних вимірювальних перетворювачів. Саме вібродавачі забезпечують реєстрацію механічних коливань елементів конструкції та їх перетворення в електричний сигнал, придатний для подальшого цифрового оброблення й аналізу.

Вібраційні процеси, що виникають під час роботи ГПА, містять значний обсяг інформації про технічний стан агрегату. Зміна амплітудних, частотних або фазових характеристик коливань може свідчити про розвиток дефектів лопатевого апарату, порушення балансування ротора, зміну жорсткості конструктивних елементів або появу резонансних явищ. Тому до систем вимірювання параметрів вібрації висуваються підвищені вимоги щодо точності, швидкодії та завадостійкості.

Типова структура вимірювального каналу системи вібродіагностики включає первинний давач, пристрій узгодження сигналу, підсилювач, блок аналого-цифрового перетворення, модуль оброблення інформації та пристрій відображення або реєстрації результатів.

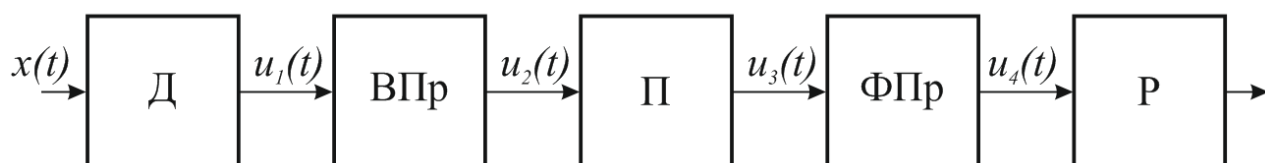


Рисунок 2.1 – Узагальнена структурна схема системи вимірювання параметрів вібрації

Під час аналізу роботи вимірювального каналу його можна розглядати як сукупність послідовно з'єднаних лінійних функціональних блоків. У такому випадку результуюча частотна характеристика системи визначається добутком частотних характеристик окремих її елементів:

$$K_{\Sigma}(f) = \prod_{i=1}^N K_i(f), \quad (2.1)$$

де $K_{\Sigma}(f)$ – загальна частотна характеристика вимірювального каналу;
 $K_i(f)$ – частотна характеристика i -го функціонального блока;
 N – кількість послідовно з'єднаних елементів системи.

Для забезпечення достовірного відтворення вимірюваного сигналу необхідно, щоб у межах робочого частотного діапазону коефіцієнт передачі системи залишався практично незмінним. Ця вимога може бути записана у вигляді:

$$K_{\Sigma}(f) \approx \text{const}, \quad f_{\min} \leq f \leq f_{\max}, \quad (2.2)$$

де $f_{\min}$ та $f_{\max}$ – відповідно нижня і верхня межі робочого діапазону частот.

Виконання умови (2.2) забезпечує мінімальні амплітудні та фазові спотворення сигналу, що особливо важливо під час проведення спектрального аналізу та виділення діагностичних ознак дефектів лопатевого апарату.

До основних вимог, які висуваються до вібродавачів у складі систем діагностування ГПА, належать:

- широкий робочий діапазон частот;
- висока чутливість і стабільність метрологічних характеристик;
- лінійність амплітудної характеристики;
- низький рівень власних шумів;
- висока завадостійкість;
- невеликі габарити та маса;
- надійність роботи в умовах підвищених температур і вібраційних навантажень.

					КРБ. СІ - 03.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дат		38

Залежно від принципу дії для вимірювання параметрів вібрації використовують п'єзоелектричні, п'єзореzystивні, індукційні, ємнісні та тензометричні віброперетворювачі. У сучасних системах технічної діагностики найбільшого поширення набули п'єзоелектричні акселерометри, які характеризуються високою чутливістю, широким динамічним діапазоном та можливістю роботи у складних умовах експлуатації.

Принцип роботи п'єзоелектричного акселерометра ґрунтується на використанні прямого п'єзоелектричного ефекту. Під дією інерційної сили, що виникає при механічних коливаннях, відбувається деформація п'єзoeлемента, внаслідок чого на його поверхні формується електричний заряд. Величина цього заряду є пропорційною прикладеному прискоренню:

$$Q = d \cdot F, \quad (2.3)$$

де Q – електричний заряд, що виникає на поверхні п'єзoeлемента;

d – п'єзоелектричний коефіцієнт матеріалу;

F – сила, прикладена до чутливого елемента.

Оскільки інерційна сила визначається другим законом Ньютона,

$$F = m \cdot a, \quad (2.4)$$

де m – маса інерційного елемента;

a – віброприскорення,

то вихідний сигнал акселерометра є пропорційним прискоренню контролюваного об'єкта.

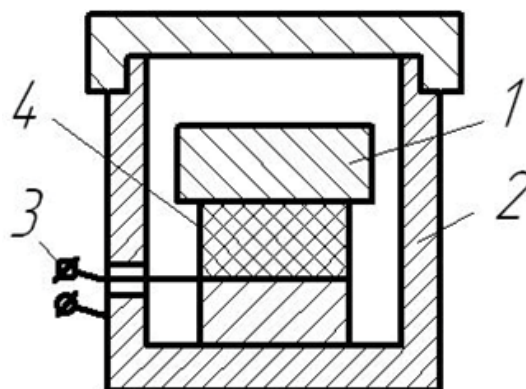


Рисунок 2.2 – Принципова схема п'єзоелектричного вібродавача

Конструкція сучасних вібродавачів передбачає наявність чутливого елемента, інерційної маси та корпусу, що забезпечує жорстке механічне з'єднання з контрольованою поверхнею. Від способу кріплення давача значною мірою залежить точність вимірювання та ширина робочого частотного діапазону.

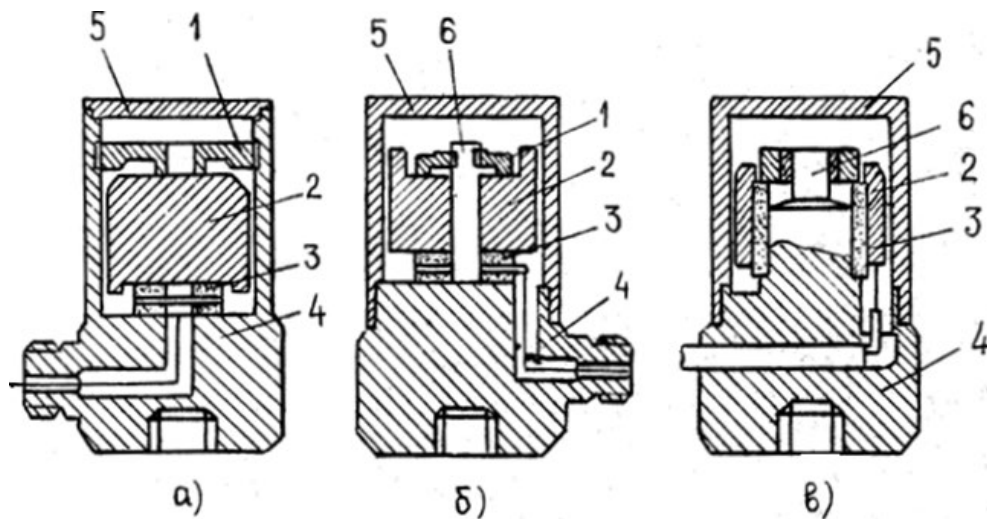


Рисунок 2.3 – Варіанти конструктивного виконання вібродавачів:
1 - пружина, 2 – сейсмічна маса, 3 - п'єзоелемент, 4 - основа,
5 - кришка, 6 – вісь

Однією з найважливіших характеристик віброперетворювача є його власна (резонансна) частота. Для забезпечення коректних вимірювань верхня межа робочого діапазону повинна бути істотно меншою від резонансної частоти сенсора.

На практиці рекомендується, щоб верхня межа робочого частотного діапазону не перевищувала 20–30 % від значення власної (резонансної) частоти вібродавача.

На точність вимірювання впливають також якість монтажу, жорсткість кріплення та характеристики поверхні встановлення. Ненадійне кріплення може призводити до виникнення додаткових резонансів і спотворення вимірюваного сигналу.

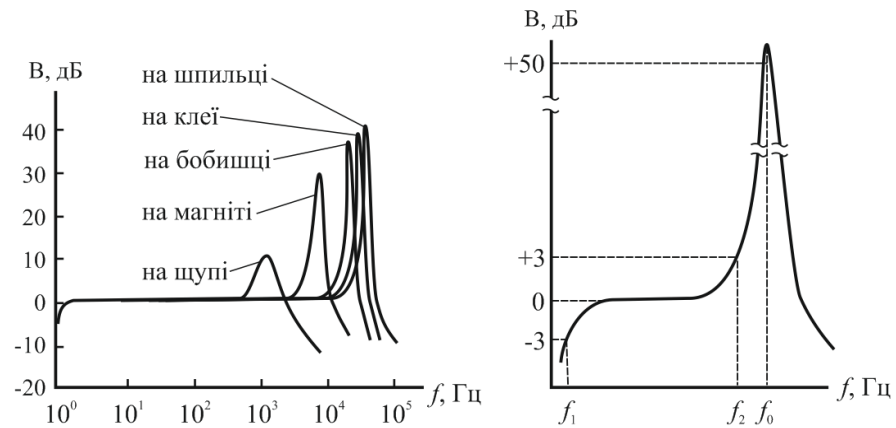


Рисунок 2.4 – Вплив способу встановлення вібродавача на його частотну характеристику

Проведений аналіз показує, що для побудови системи діагностування лопатевого апарату газоперекачувального агрегату найбільш доцільним є використання акселерометрів як первинних вимірювальних перетворювачів. Вони забезпечують широкий робочий частотний діапазон, високу точність реєстрації вібраційних процесів та можливість інтеграції із сучасними програмно-апаратними комплексами збору й оброблення діагностичної інформації.

Саме ці особливості стали підставою для вибору акселерометричного принципу побудови системи діагностування, яка розробляється в даній бакалаврській роботі.

2.2 Особливості діагностування лопатевого апарату за віброакустичними діагностичними ознаками

Одним із найбільш ефективних напрямів контролю технічного стану лопатевого апарату газоперекачувальних агрегатів є використання віброакустичних методів діагностування. Їх застосування ґрунтується на тому, що будь-які зміни технічного стану робочих елементів агрегату супроводжуються зміною характеристик механічних коливань та акустичних процесів, які виникають під час його роботи.

У процесі експлуатації лопатевий апарат піддається дії змінних аеродинамічних та механічних навантажень. Поява дефектів окремих лопаток, порушення геометрії профілю, розвиток тріщин або виникнення деформацій призводять до зміни структури газового потоку, характеру аеродинамічної взаємодії між робочими та напрямними лопатками, а також до зміни спектральних характеристик вібраційних сигналів.

Для аналізу отриманих діагностичних сигналів використовують сучасні методи цифрової обробки даних, серед яких найбільш поширеними є:

- спектральний аналіз на основі швидкого перетворення Фур'є;
- аналіз спектра огинаючої;
- кепстральний аналіз;
- кореляційний аналіз;
- вейвлет-перетворення.

Застосування зазначених методів дозволяє виділити характерні діагностичні ознаки, які відповідають певним видам дефектів лопатевого апарату та нестійким режимам роботи компресора.

Відомо, що неоднорідності аеродинамічного потоку, які виникають унаслідок пошкодження лопаток, призводять до зміни структури кромкових слідів та імпульсів аеродинамічних сил. Оскільки періодичні зміни параметрів потоку можуть бути представлені рядом Фур'є, у спектрі вібраційних сигналів з'являються додаткові гармонічні складові, частоти яких пов'язані з частотою обертання ротора.

Лопатева (лопаткова) складова визначається співвідношенням

$$f_l = Z_l \cdot f_P, \quad (2.5)$$

де f_l – частота проходження лопаток;

Z_l – кількість робочих лопаток колеса;

f_P – частота обертання ротора.

При виникненні дефектів типу «биття робочого колеса» або порушенні геометрії лопатевого вінця відбувається модуляція поля кромкових слідів із

					КРБ. СІ - 03.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дат		42

частотою обертання ротора. У цьому випадку поблизу основної лопатевої складової виникають додаткові бічні гармоніки, частоти яких визначаються виразом:

$$f_B = Z_L \cdot f_P \pm f_P, \quad (2.6)$$

де f_B – частоти бічних складових спектра, f_P – частота обертання ротора.

Поява та зміна амплітуд цих гармонік є важливою діагностичною ознакою, яка дозволяє ідентифікувати розвиток дефектів лопатевого апарату ще на ранніх стадіях.

Для підвищення достовірності діагностування використовують аналіз не лише спектра вібрації, але й спектра огибаючої сигналу. Такий підхід дозволяє виділити низькоамплітудні модульовані складові, які часто є більш інформативними щодо початкових стадій розвитку пошкоджень.

У таблиці 2.1 наведено характерні інформаційні частоти спектрів вібрації та спектра огибаючої, які можуть використовуватися для ідентифікації окремих видів дефектів лопатевих вузлів.

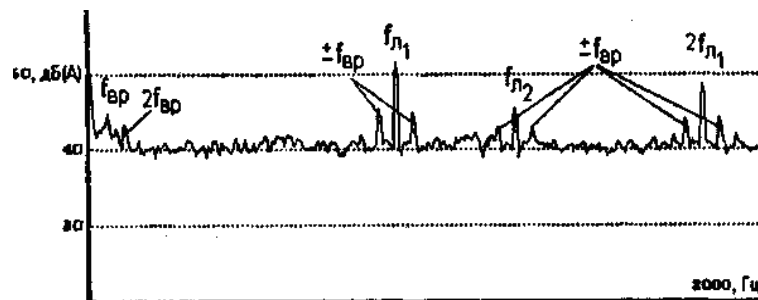
Таблиця 2.1 – Характерні інформаційні частоти для ідентифікації дефектів лопатевого апарату ГПА.

N п/п	Вид дефекту	Інформаційні частоти	
		Характерні ознаки у спектрі вібрації	Характерні ознаки у спектрі огибаючої
1.	Биття робочого колеса	Поява бічних складових біля лопатевої частоти $f_L = Z_L \cdot f_P$	Виражені гармоніки з частотами $f_L \pm f_P$
2.	Автоколивання лопаток	Зростання амплітуди окремих резонансних складових	Поява низькочастотної модуляції сигналу
3.	Дефекти окремих лопаток (тріщини, деформації, сколи)	Зміна амплітуди лопатевої частоти та поява додаткових гармонік	Зростання амплітуд бічних складових та розширення спектра огибаючої

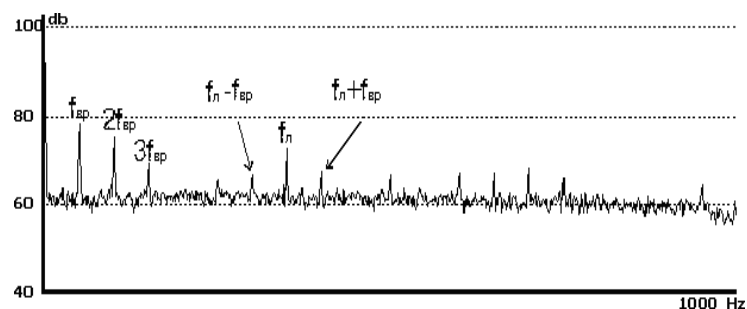
4.	Обертний зрив	Поява додаткових компонентів з частотами $f_l \pm k \cdot f_p$	Виражена амплітудна модуляція сигналу
5.	Передпомпажний режим	Зростання шумової складової спектра та зміна співвідношення гармонік	Збільшення низькочастотних складових спектра огинаючої

Практичне застосування спектрального аналізу показує, що різні типи дефектів мають власні характерні ознаки у частотній області. Наприклад, биття робочого колеса супроводжується появою бічних складових біля лопатевої частоти, тоді як розвиток дефекту окремої лопатки призводить до зміни амплітуд окремих гармонік та структури спектра огинаючої.

Приклад характерних спектрів огинаючої вібраційного сигналу для багатоступінчастого компресора з різними видами пошкоджень наведено на рис. 2.5.



а



б

Рисунок 2.5 – Спектри огинаючої вібрації багатоступінчастого компресора:
а – при битті робочого колеса; б – при наявності дефекту лопатки

Окрему увагу слід приділити діагностуванню нестійких режимів роботи компресора, зокрема режимів обертового зриву та помпажу. Такі режими супроводжуються суттєвою зміною структури аеродинамічних процесів у проточній частині агрегату та можуть бути передвісниками серйозних аварійних ситуацій.

Експериментальні дослідження показують, що під час розвитку обертового зриву у спектрі віброакустичних процесів поблизу лопатевих складових виникають додаткові бічні гармоніки, частоти яких визначаються співвідношенням

$$f_B = Z_L \cdot f_P \pm k f_{zp}, \quad (2.7)$$

де f_B - частоти бічних складових спектра, f_{zp} - частота обертання зон зриву, k - кількість зон зриву.

Поява цих складових пояснюється тим, що області зриву здійснюють періодичну модуляцію поля швидкостей газового потоку, що призводить до зміни параметрів аеродинамічної взаємодії між елементами лопатевого апарату.

Важливим інструментом оцінювання газодинамічної стійкості компресора є аналіз спектрального складу пульсацій тиску в газоповітряному тракті. Порівняння спектрів, отриманих у номінальному режимі та при наближенні до межі газодинамічної стійкості, дозволяє виявити характерні зміни структури сигналу.

При зменшенні запасу газодинамічної стійкості спостерігається зростання шумової складової спектра та одночасне зменшення амплітуд вищих гармонік лопатевих частот. Це пов'язано зі збільшенням турбулентності потоку та зміною форми кромкових слідів, які стають більш згладженими.

Порівняння спектрів пульсацій тиску для різних режимів роботи компресора наведено на рис. 2.6.

					КРБ. СІ - 03.00.00.000 ПЗ	Арк.
						45
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дат		

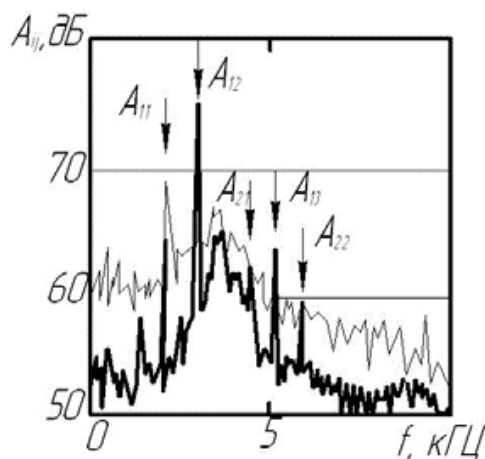


Рисунок 2.6 – Вплив режиму роботи компресора на спектр пульсацій тиску:

а – номінальний режим роботи; б – режим поблизу межі газодинамічної стійкості; A_{ij} - амплітуда i -ї лопатевої складової від j -го робочого колеса

Таким чином, аналіз віброакустичних сигналів та їх спектральних характеристик є ефективним інструментом оцінювання технічного стану лопатевого апарату газоперекачувального агрегату.

Використання діагностичних ознак, сформованих на основі аналізу спектра вібрації, спектра огинаючої та пульсацій тиску, забезпечує можливість раннього виявлення дефектів, оцінювання ступеня їх розвитку та своєчасного попередження аварійних режимів роботи обладнання. Це створює підґрунтя для побудови сучасних автоматизованих систем моніторингу і діагностування лопатевого апарату ГПА.

2.3 Система вібраційного контролю та діагностування

Система вібраційного контролю та діагностування являє собою комплекс взаємопов'язаних апаратних і програмних засобів, призначених для збору, передавання, оброблення та аналізу інформації про вібраційний стан газоперекачувального агрегату. Основною метою її функціонування є своєчасне виявлення дефектів елементів конструкції та оцінювання технічного стану агрегату в процесі експлуатації.

До складу системи входять первинні вимірювальні перетворювачі (вібродавачі), модулі узгодження та підсилення сигналів, засоби аналого-цифрового перетворення, пристрої збору та зберігання інформації, а також програмне забезпечення для цифрової обробки даних і формування діагностичних висновків.

Як первинні вимірювальні перетворювачі в системах вібродіагностики газотурбінного обладнання найчастіше застосовують акселерометри, які забезпечують вимірювання параметрів вібрації в широкому діапазоні частот та характеризуються високою точністю і стабільністю роботи. Встановлення вібродавачів здійснюється безпосередньо на контрольованих вузлах агрегату у точках, найбільш інформативних з погляду реєстрації вібраційних процесів.

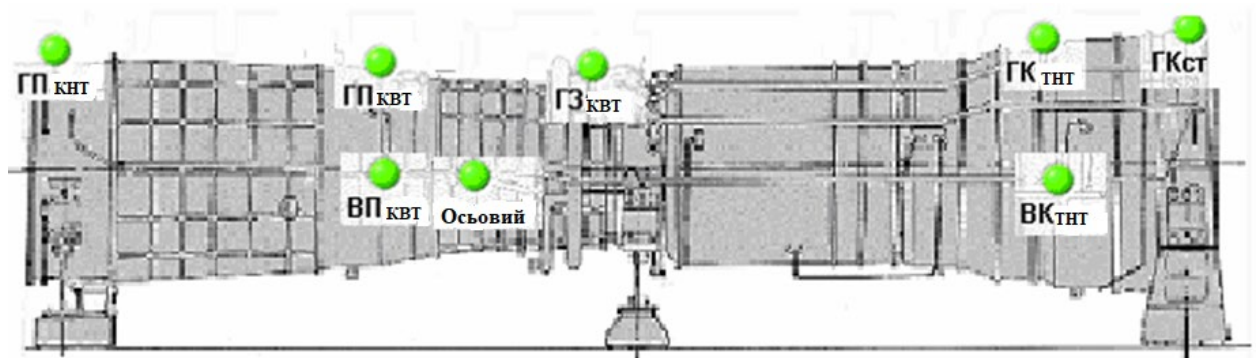


Рисунок 2.7 – Схема розташування вібраційних перетворювачів (акселерометрів) на газотурбінному двигуні

Залежно від місця встановлення та орієнтації чутливого елемента акселерометри забезпечують вимірювання коливань у вертикальному, горизонтальному або осьовому напрямках, що дозволяє отримати повну інформацію про динамічний стан контрольованого об'єкта.

Сигнали від акселерометрів надходять до модулів первинної обробки, де здійснюється їх підсилення та аналого-цифрове перетворення. Подальша цифрова обробка включає фільтрацію сигналів, спектральний аналіз, визначення діагностичних ознак і формування параметрів, необхідних для оцінювання технічного стану лопатевого апарату.

У сучасних системах вібродіагностики застосовується багатоканальний принцип збору інформації, який дозволяє одночасно реєструвати сигнали від декількох вимірювальних каналів. Це забезпечує можливість комплексного аналізу взаємозв'язків між окремими вузлами агрегату та підвищує достовірність діагностичних висновків.

Важливою складовою системи є програмне забезпечення, яке реалізує функції налаштування параметрів вимірювання, збору та накопичення експериментальних даних, їх статистичного і спектрального аналізу, а також формування діагностичних повідомлень для оператора. Використання сучасних алгоритмів цифрової обробки сигналів дозволяє автоматизувати процес контролю технічного стану обладнання та мінімізувати вплив людського фактора.

Типовий програмний комплекс системи вібраційного контролю забезпечує:

- налаштування параметрів вимірювальних каналів;
- збір та архівування вібраційних сигналів;
- побудову часових реалізацій та спектрів сигналів;
- аналіз спектрів огинаючої та інших діагностичних характеристик;
- визначення діагностичних ознак розвитку дефектів;
- відображення поточного стану обладнання та формування звітної інформації.

Однією з основних переваг сучасних систем вібродіагностики є можливість їх інтеграції із системами автоматичного керування та SCADA-комплексами. Це забезпечує безперервний моніторинг стану обладнання, централізоване накопичення інформації та оперативне отримання даних про зміну технічного стану газоперекачувального агрегату.

Використання результатів вимірювання та аналізу вібраційних сигналів дає можливість виявляти розвиток дефектів на ранніх стадіях, прогнозувати зміну технічного стану агрегату та своєчасно приймати рішення щодо

					КРБ. СІ - 03.00.00.000 ПЗ	Арк.
						48
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дат		

проведення профілактичних або ремонтних робіт. Реалізація такого підходу сприяє підвищенню надійності роботи газоперекачувального обладнання, зменшенню витрат на його експлуатацію та запобіганню виникненню аварійних ситуацій.

Таким чином, сучасні системи вібраційного контролю та діагностування є важливою складовою технічної експлуатації газоперекачувальних агрегатів. Використання багатоканальних засобів збору даних, цифрових методів оброблення сигналів і сучасного програмного забезпечення створює основу для побудови ефективної автоматизованої системи діагностування лопатевого апарату ГПА.

2.4 Розроблення структурної схеми системи діагностування лопатевого апарату ГПА

Підвищення надійності та ефективності експлуатації газоперекачувальних агрегатів потребує застосування сучасних інформаційних технологій для моніторингу та оцінювання їх технічного стану. Одним із перспективних напрямів є використання автоматизованих систем діагностування, які поєднують засоби збору даних, цифрового оброблення сигналів, SCADA-технології та математичне моделювання.

Під час розроблення структурної схеми системи діагностування лопатевого апарату ГПА доцільно використовувати принцип поєднання реальних експлуатаційних даних із результатами імітаційного моделювання. У такій системі інформація про технологічні та віброакустичні параметри роботи агрегату надходить від первинних вимірювальних перетворювачів до SCADA-системи, де здійснюється її накопичення та первинна обробка.

На основі отриманих даних імітаційна модель формує розрахункові значення контрольованих параметрів для поточного режиму роботи ГПА. Далі відбувається порівняння розрахункових та фактичних значень, що

					КРБ. СІ - 03.00.00.000 ПЗ	Арк.
						49
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дат		

дозволяє оцінити ступінь відхилення параметрів від номінальних і сформулювати діагностичний висновок щодо технічного стану лопатевого апарату.

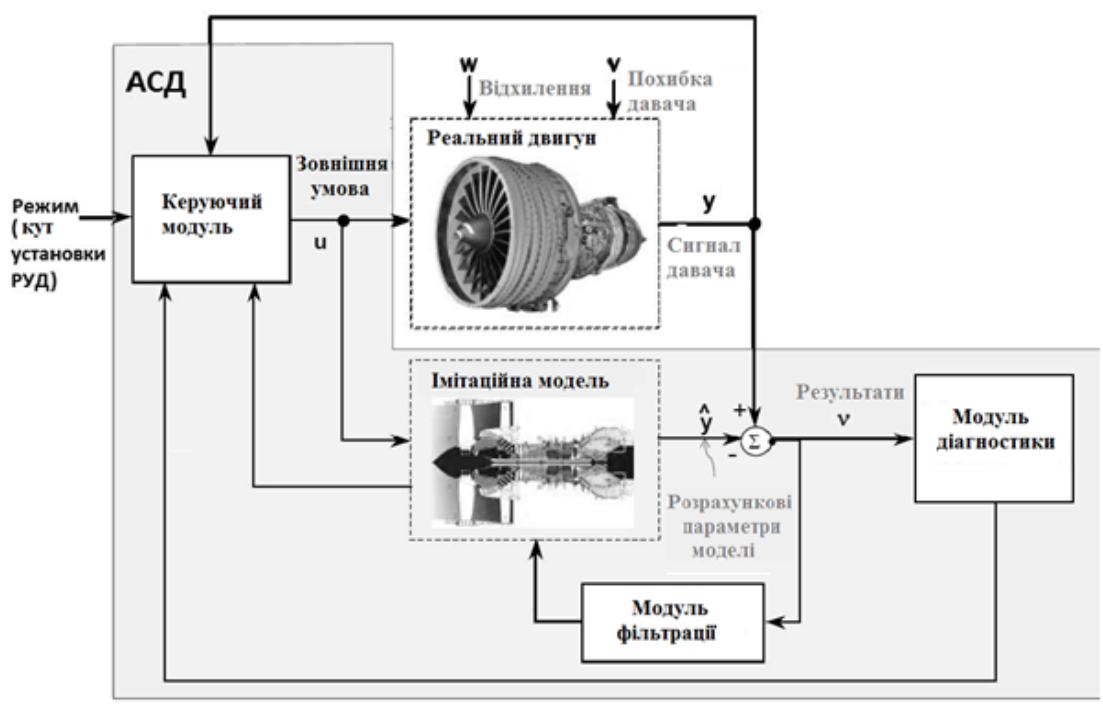


Рисунок 2.11 – Структурна схема системи діагностування лопатевого апарату ГПА з використанням SCADA-технологій та імітаційного моделювання

Запропонована структурна схема системи діагностування включає такі основні функціональні модулі:

- об'єкт діагностування (лопатевий апарат ГПА);
- підсистему збору технологічних та віброакустичних даних;
- SCADA-систему моніторингу;
- імітаційну математичну модель;
- модуль діагностування;
- керуючий модуль;
- базу даних результатів контролю та діагностики.

SCADA-система забезпечує безперервне отримання інформації про режим роботи агрегату та значення контрольованих параметрів. До них

належать технологічні параметри (тиск, температура, частота обертання ротора тощо) та віброакустичні характеристики, що реєструються вимірювальними каналами системи.

Імітаційна модель використовується для розрахунку еталонних значень параметрів відповідно до поточного режиму роботи ГПА. Отримані результати порівнюються з фактичними даними, що надходять із системи моніторингу. За результатами такого порівняння формується інформація про величину відхилень контрольованих параметрів та можливу наявність дефектів лопатевого апарату.

Особливістю запропонованого підходу є можливість постійного уточнення параметрів математичної моделі на основі накопичених експлуатаційних даних. Це дозволяє адаптувати систему діагностування до змін умов роботи обладнання та підвищити достовірність отриманих результатів.

Для реалізації алгоритму діагностування доцільно використовувати інструментарій експертних систем, який забезпечує аналіз сукупності взаємопов'язаних діагностичних ознак та формування висновку щодо технічного стану лопатевого апарату.

Основними етапами функціонування такого алгоритму є:

- оцінювання впливу дефектів лопатевого апарату на технологічні та віброакустичні параметри ГПА;
- аналіз взаємозв'язків між контрольованими параметрами;
- визначення найбільш імовірної причини відхилення параметрів від нормативних значень;
- формування діагностичного повідомлення та рекомендацій щодо подальшої експлуатації обладнання.

Важливою складовою системи є база даних, у якій накопичуються результати вимірювань, спектрального аналізу та математичного моделювання. Збереження історії зміни параметрів дозволяє здійснювати

					КРБ. СІ - 03.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дат		51

статистичний аналіз, будувати тренди та прогнозувати розвиток дефектів ще на початкових стадіях їх виникнення.

Сучасні автоматизовані системи діагностування повинні забезпечувати не лише контроль поточного технічного стану обладнання, але й підтримувати можливість адаптації до нових алгоритмів оброблення інформації та розширення функціональних можливостей. Тому програмне забезпечення доцільно будувати за модульним принципом, що дозволяє інтегрувати нові методи аналізу сигналів і вдосконалювати математичні моделі без зміни загальної архітектури системи.

Подальший розвиток запропонованої системи пов'язаний із вдосконаленням алгоритмів оброблення віброакустичної інформації, використанням інтелектуальних методів підтримки прийняття рішень та розширенням функціональних можливостей керуючого модуля.

Узагальнена структура комплексної автоматизованої системи діагностування ГПА наведена на рис. 2.12.

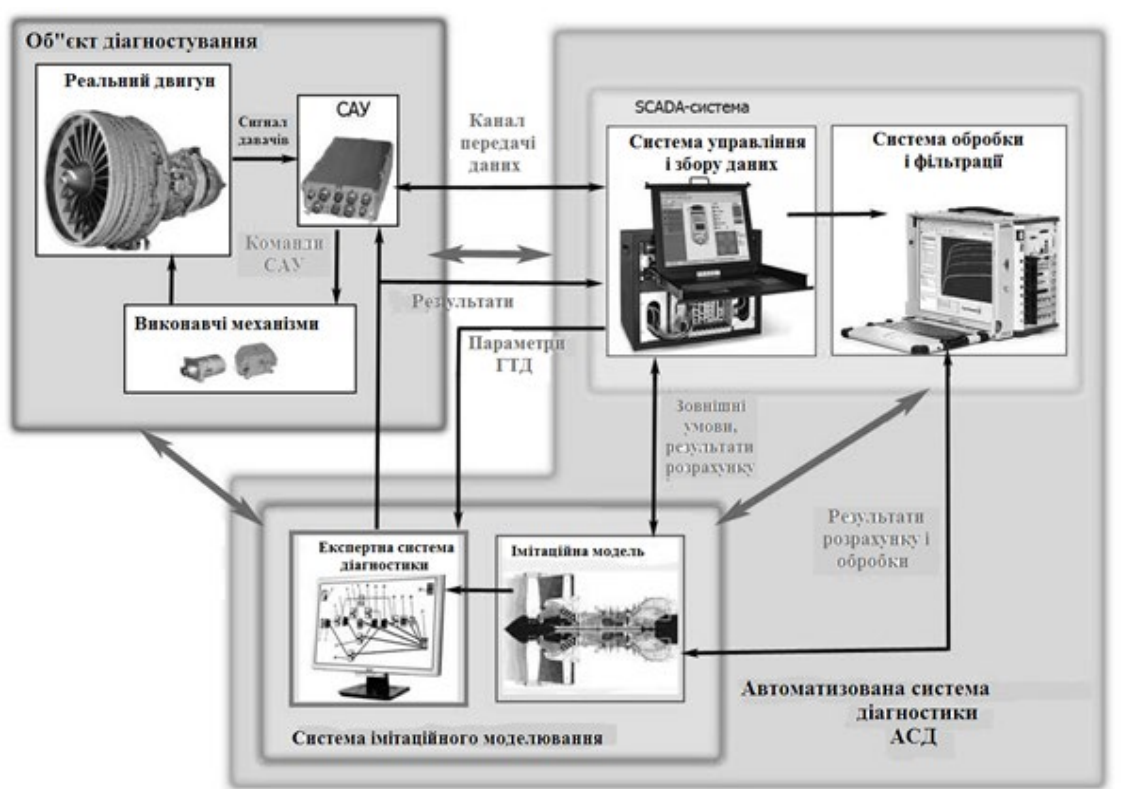


Рисунок 2.12 – Комплексна автоматизована система діагностування ГПА

Комплексна автоматизована система діагностування забезпечує інтеграцію засобів збору, оброблення та аналізу технологічної й віброакустичної інформації в єдиному інформаційному середовищі. Це створює можливість реалізації безперервного моніторингу технічного стану газоперекачувального агрегату, своєчасного виявлення дефектів лопатевого апарату та підтримки прийняття рішень щодо його подальшої безпечної експлуатації.

Таким чином, використання SCADA-технологій у поєднанні з імітаційним моделюванням та елементами експертних систем створює основу для побудови ефективної автоматизованої системи діагностування лопатевого апарату ГПА. Запропонована структурна схема забезпечує безперервний моніторинг технічного стану обладнання, своєчасне виявлення дефектів та підтримку прийняття рішень щодо подальшої безпечної експлуатації газоперекачувального агрегату.

2.5 Вибір та калібрування вібродавачів для системи діагностування технічного стану лопатевого апарату

Як було зазначено в підрозділі 2.1, особливістю п'єзоелектричних віброперетворювачів є високий вихідний опір, що зумовлює необхідність використання підсилювально-перетворювальних пристроїв для попереднього оброблення вібраційного сигналу перед його подачею на вхід вимірювальної та аналізуючої апаратури. Такі пристрої можуть виконуватися як у вигляді окремих функціональних модулів, так і бути інтегрованими до складу багатоканальних систем збору та оброблення інформації.

Основними функціями підсилювально-перетворювальних пристроїв є:

- підсилення вхідного вібраційного сигналу;
- фільтрація сигналу для зменшення впливу зовнішніх завад;

					КРБ. СІ - 03.00.00.000 ПЗ	Арк.
						53
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дат		

- узгодження рівнів сигналів із засобами аналого-цифрового перетворення;
- забезпечення передавання інформації до системи подальшого аналізу та діагностування.

Вибір конкретного типу вібродавача та параметрів вимірювального каналу здійснюється на основі аналізу його технічних характеристик і передбачає проведення процедури калібрування (тарування) на спеціалізованому стендовому обладнанні.

Для проведення калібрування вібродавачів використовується лабораторний стенд, призначений для відтворення механічних коливань із заданими параметрами та оцінювання метрологічних характеристик вимірювальної апаратури.

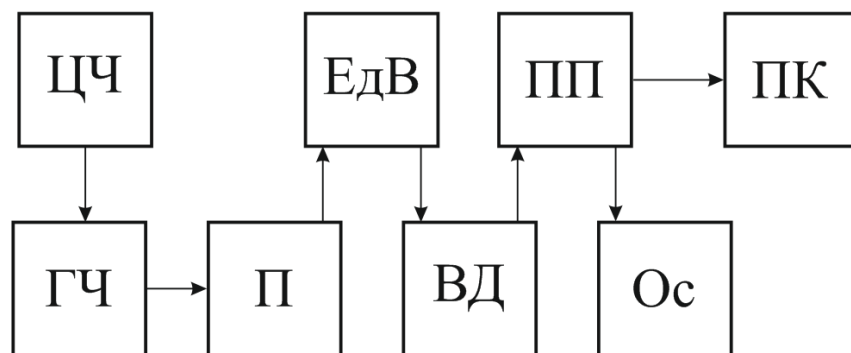


Рисунок 2.13 – Стенд для калібрування (тарування) вібровимірювальної апаратури

До складу стенду входять електродинамічний вібробудувач, генератор сигналів, підсилювач потужності, цифровий частотомір, досліджуваний вібродавач, підсилювально-перетворювальний модуль, аналого-цифровий перетворювач та персональний комп'ютер для реєстрації й оброблення отриманої інформації.

Під час проведення калібрування генератор формує гармонічний електричний сигнал заданої частоти та амплітуди, який після підсилення

подається на електродинамічний вібробудувач. У результаті відбувається перетворення електричних коливань у механічні коливання платформи стенду, на якій закріплено досліджуваний вібродавач. Під дією механічних коливань вібродавач формує електричний сигнал, пропорційний величині прискорення. Після попередньої обробки сигнал надходить до аналого-цифрового перетворювача та персонального комп'ютера для подальшого аналізу.

Для реалізації системи діагностування технічного стану лопатевого апарату в даній бакалаврській роботі обрано тривісний цифровий акселерометр **ADXL345**, який забезпечує вимірювання прискорень одночасно вздовж трьох взаємно перпендикулярних координатних осей.



Рисунок 2.14 – Зовнішній вигляд тривісного акселерометра ADXL345

Акселерометр ADXL345 призначений для вимірювання як статичних, так і динамічних прискорень. До статичних належить прискорення вільного падіння, а до динамічних – коливання, удари та вібрації, які виникають під час роботи обладнання.

Основні технічні характеристики акселерометра ADXL345:

- напруга живлення – 3,3...5 В;
- інтерфейс зв'язку – I2C або SPI;
- діапазон вимірювання прискорень – від $\pm 2g$ до $\pm 16g$;
- частота оновлення даних – від 0,1 до 3200 Гц;
- низьке енергоспоживання та компактні габаритні розміри.

Принцип роботи акселерометра полягає у визначенні проєкцій прискорення на три координатні осі X, Y та Z. Результати вимірювання передаються в цифровому вигляді через інтерфейси I2C або SPI, що дозволяє інтегрувати сенсор до складу сучасних інформаційно-вимірювальних систем.

Якщо акселерометр розташований горизонтально, а його вісь Z спрямована вертикально вгору, вихідний сигнал за цією віссю становить приблизно (+1g), тоді як сигнали за осями X та Y близькі до нуля.

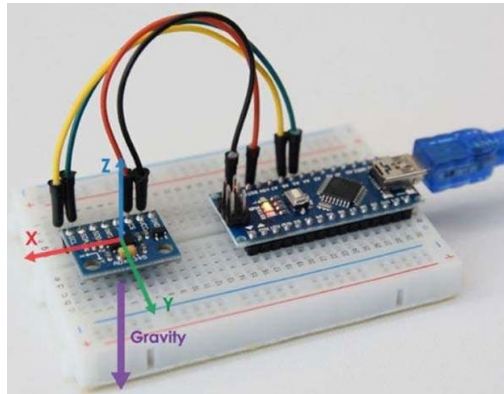


Рисунок 2.15 – Орієнтація координатних осей акселерометра ADXL345

Для взаємодії акселерометра ADXL345 з мікроконтролерною платформою Arduino використовується інтерфейс I2C, який забезпечує простоту підключення та обмін даними лише за допомогою двох інформаційних ліній.

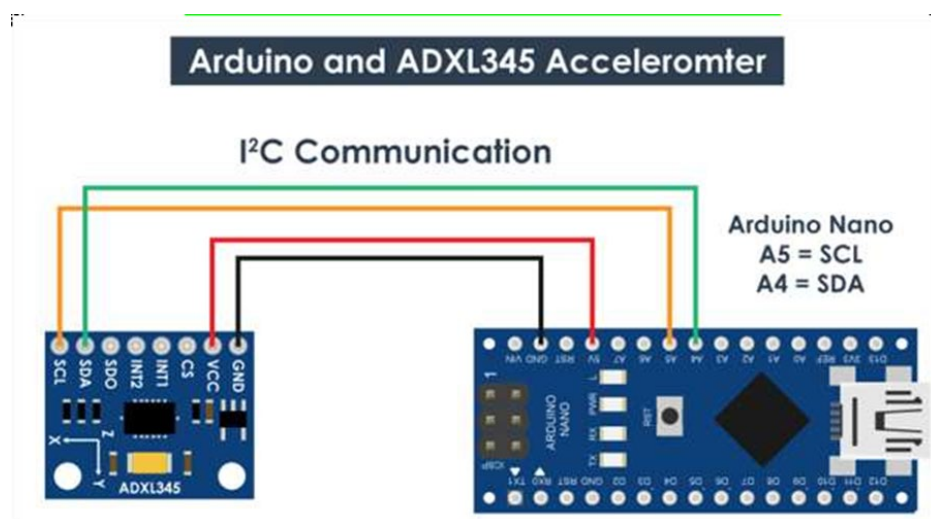


Рисунок 2.16 – Схема підключення акселерометра ADXL345 до плати Arduino

Для реалізації алгоритму збору та первинного оброблення даних було розроблено програмне забезпечення для платформи Arduino із використанням стандартної бібліотеки **Wire.h**.

Програмний модуль забезпечує ініціалізацію акселерометра, зчитування значень прискорень за координатними осями X, Y та Z, а також передачу отриманих даних до персонального комп'ютера через послідовний інтерфейс. Повний лістинг програми наведено у **додатку А**.

Перед використанням акселерометра у складі системи діагностування необхідно провести його калібрування. Метою калібрування є визначення та компенсація систематичних похибок вимірювання, які виникають унаслідок технологічних особливостей сенсора та умов його встановлення.

Процедура калібрування полягає у встановленні акселерометра в еталонне положення та зчитуванні сирих (RAW) значень прискорень без програмного масштабування.

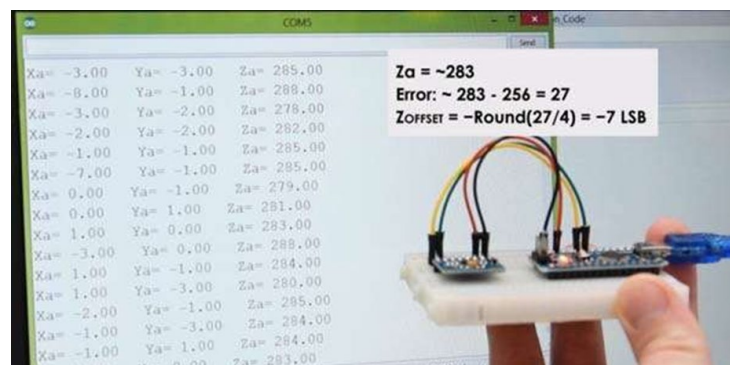


Рисунок 2.17 – Отримання сирих (RAW) даних під час калібрування акселерометра

На основі отриманих даних визначається величина зміщення для кожної координатної осі, після чого виконується програмна корекція результатів вимірювання шляхом запису відповідних значень у регістри калібрування акселерометра. Це дозволяє мінімізувати систематичну похибку та підвищити точність вимірювань.

Алгоритм програмної реалізації процедури калібрування акселерометра ADXL345 передбачає автоматичне визначення поправок за кожною координатною віссю та їх використання під час подальших вимірювань. Фрагмент програмного коду, що реалізує процедуру калібрування, наведено на рис. 2.18, а повний текст програми подано в додатку А.

```
// Запис поправок у реєстри калібрування

// Вісь X
Wire.beginTransaction(ADXL345);
Wire.write(0xE);
Wire.write(offsetX);
Wire.endTransmission();

// Вісь Y
Wire.beginTransaction(ADXL345);
Wire.write(0xF);
Wire.write(offsetY);
Wire.endTransmission();

// Вісь Z
Wire.beginTransaction(ADXL345);
Wire.write(0x20);
Wire.write(offsetZ);
Wire.endTransmission();
```

Рисунок 2.18 – Фрагмент програмного коду для калібрування акселерометра ADXL345

Після завершення калібрування на основі вимірних значень прискорень можуть бути визначені просторові кути орієнтації акселерометра – кут крену та кут тангажу, які розраховуються за такими співвідношеннями:

$$\text{roll} = \arctan\left(\frac{Y}{\sqrt{X^2 + Z^2}}\right) \cdot \frac{180}{\pi}, \quad (2.8)$$

$$\text{pitch} = \arctan\left(\frac{-X}{\sqrt{Y^2 + Z^2}}\right) \cdot \frac{180}{\pi}, \quad (2.9)$$

де X , Y , Z – значення прискорень, отримані за відповідними координатними осями акселерометра; **roll** – кут крену; **pitch** – кут тангажу.

Визначення просторової орієнтації акселерометра та контроль зміни параметрів прискорення дозволяють використовувати отримані дані для оцінювання вібраційного стану досліджуваного об'єкта та формування діагностичних ознак можливих дефектів лопатевого апарату.

					КРБ. СІ - 03.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дат		58

Таким чином, використання тривісного цифрового акселерометра ADXL345 у поєднанні з мікроконтролерною платформою Arduino забезпечує можливість створення простого та ефективного вимірювального модуля для системи діагностування лопатевого апарату ГПА.

Проведення калібрування акселерометра та програмної корекції результатів вимірювання дозволяє підвищити точність визначення вібраційних параметрів і забезпечити високу достовірність діагностичної інформації, необхідної для оцінювання технічного стану лопатевого апарату.

					КРБ. СІ - 03.00.00.000 ПЗ	Арк.
						59
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дат		

ВИСНОВКИ

У процесі виконання бакалаврської роботи проведено дослідження особливостей контролю та діагностування лопатевого апарату газоперекачувальних агрегатів і розроблено технічні засоби для реалізації системи його діагностування.

За результатами виконаної роботи отримано такі основні результати:

- проведено аналіз лопатевого апарату ГПА як об'єкта контролю та діагностування і встановлено, що він є складним технічним об'єктом, технічний стан якого визначається сукупністю механічних, аеродинамічних та теплових процесів;

- розглянуто основні дефекти робочих лопатей та причини їх виникнення, а також встановлено необхідність використання сучасних методів і технічних засобів для своєчасного виявлення пошкоджень на ранніх стадіях розвитку;

- проаналізовано існуючі технічні засоби контролю і діагностування лопатевого апарату ГПА та встановлено, що традиційні методи неруйнівного контролю (візуально-вимірювальний, оптичний, капілярний, ультразвуковий та інші) не забезпечують можливості безперервного контролю технічного стану лопатевого апарату безпосередньо в процесі експлуатації агрегату;

- досліджено сучасні методи контролю і діагностування лопатевого апарату в експлуатаційних умовах та встановлено, що найбільш перспективними є методи віброакустичної діагностики, які базуються на вимірюванні й аналізі вібраційних сигналів, що містять інформацію про технічний стан агрегатних вузлів ГПА;

- обґрунтовано вимоги до вібродавачів як складової системи діагностування лопатевого апарату, які визначають інформативність, достовірність та точність вимірювання параметрів вібрації у робочому діапазоні частот;

					КРБ. СІ - 03.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дат		60

- обґрунтовано вибір діагностичних ознак у вигляді інформаційних частот спектрів вібрації та їх огинаючої, які можуть бути використані для виявлення характерних дефектів лопатевого апарату;

- проаналізовано загальну архітектуру систем вібраційного контролю та діагностування й визначено принципи побудови сучасної автоматизованої системи діагностування технічного стану лопатевого апарату ГПА;

- розроблено структурну схему системи діагностування лопатевого апарату ГПА з використанням SCADA-технологій та імітаційного моделювання. Запропонована структура дозволяє інтегрувати модуль діагностування з елементами експертної системи для аналізу взаємозв'язку між параметрами роботи ГПА та можливими дефектами лопатевого апарату;

- обґрунтовано вибір тривісного цифрового акселерометра ADXL345 як первинного вимірювального перетворювача системи діагностування. Розглянуто особливості його взаємодії з мікроконтролерною платформою Arduino із використанням інтерфейсу I2C та розроблено програмне забезпечення для зчитування і первинного оброблення даних акселерометра;

- описано структуру та функціональні блоки стенда для калібрування вібродавачів, розглянуто процедуру калібрування акселерометра ADXL345 та наведено алгоритм програмної реалізації корекції його метрологічних характеристик.

Таким чином, у бакалаврській роботі розроблено технічне забезпечення системи діагностування лопатевого апарату газоперекачувального агрегату на основі сучасних засобів вимірювання, мікроконтролерних технологій та методів цифрової обробки сигналів.

Запропоновані технічні рішення можуть бути використані під час створення автоматизованих систем моніторингу та діагностування технічного стану газоперекачувальних агрегатів з метою підвищення надійності та безпечності їх експлуатації.

					КРБ. СІ - 03.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дат		61

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ НА ДЖЕРЕЛА

1. Іванюк Н. І. Вібраційний контроль технічного стану лопатевого апарату газоперекачувальних агрегатів : дис. ... канд. техн. наук : 05.11.13. Івано-Франківськ, 2021. 320 с.
2. Заміховський Л. М., Заміховська О. Л., Іванюк Н. І., Мірзоєва О. С., Николайчук М. Я. Anti-surge protection system for gas compressor units based on hardware and software vibration monitoring tools // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2025. № 4 (136). Р. 48–61. DOI: 10.15587/1729-4061.2025.337736.
3. Заміховський Л. М., Заміховська О. Л., Іванюк Н. І., Могилин В. В., Павлик В. В. Educational stand for researching the operation of automation elements and devices // *Sciences of Europe*. 2025. № 166. Р. 76–82. DOI: 10.5281/zenodo.15654567.
4. Randall R. B. *Vibration-based Condition Monitoring: Industrial, Aerospace and Automotive Applications*. Chichester : John Wiley & Sons, 2021. 448 p.
5. Mobley R. K. *An Introduction to Predictive Maintenance*. 3rd ed. Amsterdam : Elsevier, 2020. 432 p.
6. Boyes W. *Instrumentation Reference Book*. 5th ed. Oxford : Butterworth-Heinemann, 2019. 928 p.
7. Lei Y., Lin J., He Z., Zuo M. J. A review on empirical mode decomposition in fault diagnosis of rotating machinery // *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2020. Vol. 35. P. 108–126.
8. Yan R., Gao R. X., Chen X. Wavelets for fault diagnosis of rotary machines: A review // *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2021. Vol. 96. P. 1–18.
9. Jardine A. K. S., Lin D., Banjevic D. A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance // *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2006. Vol. 20, No. 7. P. 1483–1510.

					КРБ. СІ - 03.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дат		62

10. Peng Z. K., Chu F. L. Application of the wavelet transform in machine condition monitoring and fault diagnostics: A review with bibliography // *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2004. Vol. 18. P. 199–221.
11. ISO 20816-1:2016. *Mechanical vibration — Measurement and evaluation of machine vibration — Part 1: General guidelines*. Geneva : International Organization for Standardization, 2016.
12. ISO 13373-1:2002. *Condition monitoring and diagnostics of machines — Vibration condition monitoring — Part 1: General procedures*. Geneva : International Organization for Standardization, 2002.
13. ДСТУ ISO 13373-1:2017. Контроль стану та діагностика машин. Вібраційний контроль стану машин. Частина 1. Загальні методики. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2017.
14. Siemens AG. *SIMATIC S7-1200 Programmable Controller System Manual*. Nuremberg : Siemens AG, 2023. 520 p.
15. Siemens AG. *SM 1281 Condition Monitoring. Manual*. Nuremberg : Siemens AG, 2022. 168 p.
16. Siemens AG. *Totally Integrated Automation Portal (TIA Portal). System Manual*. Nuremberg : Siemens AG, 2023. 410 p.
17. Analog Devices. *ADXL345: Small, Low Power, 3-Axis ± 2 g/ ± 4 g/ ± 8 g/ ± 16 g Digital Accelerometer. Data Sheet*. Norwood, MA, USA : Analog Devices, 2024. 40 p.
18. Arduino. *Arduino UNO Rev3. Technical Specifications* [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://docs.arduino.cc/hardware/uno-rev3> (дата звернення: 10.06.2026).
19. Analog Devices. *ADXL345 Product Page* [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.analog.com/en/products/adxl345.html> (дата звернення: 10.06.2026).
20. Siemens AG. *TIA Portal* [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.siemens.com/tia-portal> (дата звернення: 10.06.2026).

					КРБ. СІ - 03.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дат		63

21. National Instruments. *PXI Platform and Modular Instrumentation* [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.ni.com> (дата звернення: 10.06.2026).
22. International Organization for Standardization. *ISO Standards Catalogue* [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.iso.org/standards.html> (дата звернення: 10.06.2026).
23. Bently D. E., Hatch C. T. *Fundamentals of Rotating Machinery Diagnostics*. Minden, NV : Bently Pressurized Bearing Press, 2002. 726 p.
24. Rao S. S. *Mechanical Vibrations*. 6th ed. Boston : Pearson, 2018. 944 p.
25. Inman D. J. *Engineering Vibration*. 4th ed. Boston : Pearson, 2014. 640 p.
26. Ewins D. J. *Modal Testing: Theory, Practice and Application*. 2nd ed. Baldock : Research Studies Press, 2000. 562 p.
27. McConnell K. G., Varoto P. S. *Vibration Testing: Theory and Practice*. 2nd ed. Hoboken : John Wiley & Sons, 2008. 624 p.
28. Worden K., Farrar C. R., Haywood J., Todd M. A review of nonlinear dynamics applications to structural health monitoring // *Structural Control and Health Monitoring*. 2008. Vol. 15. P. 540–567.
29. Farrar C. R., Worden K. *Structural Health Monitoring: A Machine Learning Perspective*. Chichester : John Wiley & Sons, 2013. 656 p.
30. Salgado D. R., Alonso F. J. Adaptive model-based condition monitoring of rotating machinery // *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2021. Vol. 150. Article 107261.

ДОДАТОК А

ЛІСТИНГ ПРОГРАМИ ДЛЯ ЗЧИТУВАННЯ ТА КАЛІБРУВАННЯ ДАНИХ АКСЕЛЕРОМЕТРА ADXL345

У додатку наведено програмний код для мікроконтролерної платформи Arduino, який забезпечує ініціалізацію акселерометра ADXL345, зчитування даних за координатними осями X, Y та Z, а також реалізацію процедури калібрування сенсора.

```
#include <Wire.h>          // Підключення бібліотеки Wire

int ADXL345 = 0x53;        // I2C-адреса акселерометра ADXL345
float X_out, Y_out, Z_out;

void setup()
{
    Serial.begin(9600);
    Wire.begin();

    // Переведення акселерометра у режим вимірювання
    Wire.beginTransmission(ADXL345);
    Wire.write(0x2D);
    Wire.write(8);
    Wire.endTransmission();

    delay(10);
}

void loop()
{
    // Зчитування даних акселерометра
    Wire.beginTransmission(ADXL345);
    Wire.write(0x32);
    Wire.endTransmission(false);

    Wire.requestFrom(ADXL345, 6, true);

    X_out = (Wire.read() | Wire.read() << 8);
    X_out = X_out / 256;

    Y_out = (Wire.read() | Wire.read() << 8);
    Y_out = Y_out / 256;

    Z_out = (Wire.read() | Wire.read() << 8);
    Z_out = Z_out / 256;

    Serial.print("Xa = ");
    Serial.print(X_out);

    Serial.print("\tYa = ");
    Serial.print(Y_out);
```

```

Serial.print("\tZa = ");
Serial.println(Z_out);

delay(100);
}

```

Фрагмент програми калібрування акселерометра ADXL345

```

}

int offsetX = 0;
int offsetY = 0;
int offsetZ = 0;

// Запис поправок у регістри зміщення

Wire.beginTransmission(ADXL345);
Wire.write(0x1E);      // OFSX
Wire.write(offsetX);
Wire.endTransmission();

Wire.beginTransmission(ADXL345);
Wire.write(0x1F);      // OFSY
Wire.write(offsetY);
Wire.endTransmission();

Wire.beginTransmission(ADXL345);
Wire.write(0x20);      // OFSZ
Wire.write(offsetZ);
Wire.endTransmission();

```

Примітка. Наведений програмний код використано для реалізації експериментального стенда збору та калібрування даних тривісного акселерометра ADXL345 у складі системи діагностування лопатевого апарату ГПА.

БІБЛІОГРАФІЧНА ДОВІДКА

Тема бакалаврської роботи: *«Розроблення технічних засобів для системи діагностування лопатевого апарату ГПА»*

Обсяг пояснювальної записки складає: 67 сторінок та містить 1 таблицю, 47 рисунків та список використаних джерел із 30 найменувань.

Перелік креслень графічної частини:

- КРБ. СІ-03.00.00.001 – Класифікація методів неруйнівного контролю турбомашин (1 арк.);
- КРБ. СІ-03.00.00.002 – Дефекти лопатевого апарату (1 арк.);
- КРБ. СІ-03.00.00.003 – Структурна схема визначення частот і форм власних коливань робочої лопатки. Апаратна конфігурація системи діагностування на базі PLC SIMATIC S7-1200 та вібраційного модуля SM1281 (1 арк.);
- КРБ. СІ-03.00.00.004 – Узагальнена структурна схема системи вимірювання параметрів вібрації (1 арк.);
- КРБ. СІ-03.00.00.005 – Структурна схема системи діагностування лопатевого апарату ГПА (1 арк.);
- КРБ. СІ-03.00.00.006 – Зовнішній вигляд тривісного акселерометра ADXL345 (1 арк.);
- КРБ. СІ-03.00.00.007 – Схема підключення акселерометра ADXL345 до плати Arduino та фрагмент програми його калібрування (1 арк.).

Дата закінчення бакалаврської роботи 12 червня 2026 року

Студент-бакалавр

_____ **Максимів Н. Р**