

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

МР.АКС–08.00.00.000 ПЗ

Група АКС_М-24-1

Роман Давидів

2025

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

Давидів Роман Ігорович

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 621.644.07:681.518.5

(індекс)

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

Розроблення інтелектуальної системи аналізу вібраційних сигналів ГПА на основі цифрових алгоритмів обробки даних

(назва роботи)

Комп'ютеризовані системи управління та автоматики

(назва освітньої програми)

174- Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка

(шифр і назва спеціальності)

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

Здобувач освітнього ступеня _____ *Р.І. Давидів*

(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник _____ *к.т.н. Н.І. Іванюк*

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

Допущено до захисту

Завідувач кафедри

д.т.н., проф. _____ *Л.М. Заміховський*

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

**Івано-Франківськ
2025**

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

(повне найменування закладу вищої освіти)

Інститут Інформаційних технологій

Кафедра Інформаційно-телекомунікаційних технологій та систем

Освітній рівень Магістр

Спеціальність 174 - Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ІТТС, д.т.н. проф

Л.М. Заміховський

« » грудня 2025 року

ЗАВДАННЯ НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ

Студенту Давидіву Роману Ігоровичу

(прізвище, ім'я, по-батькові)

**1. Тема проекту (роботи) Розроблення інтелектуальної системи аналізу
вібраційних сигналів ГПА на основі цифрових алгоритмів обробки даних**

керівник роботи к.т.н. Іванюк Наталія Івнівна

затверджені наказом закладу вищої освіти від “30” жовтня 2025 року № 690/7

2. Термін здачі студентом закінченого проекту (роботи) грудень 2025р.

**3. Вихідні дані до проекту (роботи) Аналіз ГПА, методів вібраційної
діагностики, дискретизація та квантування вібраційних сигналів, цифрова
фільтрація, вейлет-перетворення.**

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, що їх належить розробити)

1) Вступ

2) Аналіз газоперекачувальних агрегатів та методів вібраційної діагностики

3) Цифрові алгоритми обробки вібраційних сигналів ГПА

4) Розроблення та дослідження інтелектуальної системи аналізу вібраційних сигналів ГПА

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

1). Частотний спектр вібраційних сигналів транспортних ГТУ.

2). Схема етапів обробки та фільтрації вібраційного сигналу.

3). Класифікація дефектів газоперекачувальних агрегатів та причини їх виникнення

4). Вхідний (а) і вихідний (б) вібраційні сигнали модуля Вейвлет-перетворення

5). Схема реалізації алгоритму фільтрації.

б) Часові характеристики (а) і частотний спектр (б) записаного вібраційного сигналу.

7) Структурно-функціональна схема модуля аналізу спектрів.

8) Часо-частотні представлення вібраційних сигналів

6. Дата видачі завдання лютий 2025р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Номер і назва етапів випускної кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів випускної кваліфікаційної роботи	Примітка
1	Вступ	квітень 2025	Виконано
2	Аналіз ГПА та методів вібраційної діагностики	травень 2025	Виконано
3	Цифрові алгоритми обробки вібраційних сигналів ГПА	червень 2025	Виконано
4	Розроблення та дослідження інтелектуальної системи аналізу вібраційних сигналів ГПА	листопад–грудень 2025	Виконано

Студент

Р.І. Давидів

(особистий підпис)

(розшифровка підпису)

Керівник

Н.І. Іванюк

(особистий підпис)

(розшифровка підпису)

« » грудня 2025 р.

АНОТАЦІЯ

Магістерська робота присвячена розробленню інтелектуальної системи аналізу вібраційних сигналів газоперекачувальних агрегатів (ГПА) на основі цифрових алгоритмів обробки даних.

Актуальність дослідження зумовлена необхідністю підвищення надійності та безпеки експлуатації газоперекачувальних агрегатів шляхом своєчасного виявлення дефектів і відхилень у їх технічному стані за результатами вібраційної діагностики.

У роботі проаналізовано газоперекачувальні агрегати як об'єкти автоматизації, джерела вібраційних процесів та сучасні системи вібраційного контролю.

Розглянуто методи цифрової обробки вібраційних сигналів, зокрема дискретизацію, фільтрацію, спектральний і часово-частотний аналіз на основі швидкого перетворення Фур'є та вейвлет-перетворення.

Розроблено структуру та алгоритм функціонування інтелектуальної системи аналізу, програмне забезпечення реалізовано у середовищі MATLAB.

Наведено результати апробації алгоритмічного і програмного забезпечення, які підтверджують ефективність запропонованого підходу.

РЕФЕРАТ

Магістерська випускна робота складається зі вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел, бібліографічної довідки та додатка.

Загальний обсяг роботи становить 96 сторінок формату А4, робота містить 41 рисуноків, 5 таблиць, 1 додаток та 12 посилань на використані джерела.

У магістерській роботі розглянуто та запропоновано розроблення інтелектуальної системи аналізу вібраційних сигналів газоперекачувальних агрегатів на основі цифрових алгоритмів обробки даних.

Основну увагу приділено аналізу вібраційних процесів, застосуванню методів цифрової фільтрації, спектрального та часово-частотного аналізу, а також формуванню діагностичних ознак і прийняттю рішень інтелектуальним модулем.

Результати магістерської роботи можуть бути використані під час створення та модернізації автоматизованих систем контролю і діагностики технічного стану обертового обладнання компресорних станцій.

Ключові слова: ГАЗОПЕРЕКАЧУВАЛЬНИЙ АГРЕГАТ (ГПА), ВІБРАЦІЙНА ДІАГНОСТИКА, ВІБРАЦІЙНІ СИГНАЛИ, ЦИФРОВА ОБРОБКА СИГНАЛІВ, СПЕКТРАЛЬНИЙ АНАЛІЗ, ВЕЙВЛЕТ-ПЕРЕТВОРЕННЯ, ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА СИСТЕМА.

ABSTRACT

The master's thesis consists of an introduction, three chapters, conclusions, a list of references, a bibliographic note, and an appendix. The total volume of the thesis is 96 A4 pages; it contains 38 figures, 1 appendix, and 12 references.

The thesis presents the development of an intelligent system for the analysis of vibration signals of gas pumping units (GPU) based on digital data processing algorithms.

Particular attention is paid to the analysis of vibration processes, the application of digital filtering methods, spectral and time–frequency analysis, as well as the formation of diagnostic features and decision-making by an intelligent module.

The results of the master's thesis can be used in the development and modernization of automated systems for condition monitoring and diagnostics of rotating equipment at compressor stations.

Keywords: GAS PUMPING UNIT (GPU), VIBRATION DIAGNOSTICS, VIBRATION SIGNALS, DIGITAL SIGNAL PROCESSING, SPECTRAL ANALYSIS, WAVELET TRANSFORM, INTELLIGENT SYSTEM.

ЗМІСТ

с.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИННИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ, ТЕРМІНІВ.....	10
ВСТУП.....	11
1 АНАЛІЗ ГАЗОПЕРЕКАЧУВАЛЬНИХ АГРЕГАТИВ ТА МЕТОДІВ ВІБРАЦІЙНОЇ ДІАГНОСТИКИ.....	13
1.1. Газоперекачувальний агрегат (ГПА) як об'єкт автоматизації	13
1.2 Джерела та характеристики вібраційних процесів у ГПА.....	13
1.3 Джерела та характеристики вібраційних процесів у ГПА.....	18
1.4 Джерела вібрації в машинах роторного типу.....	22
1.5 Історичні аспекти розвитку вібраційного контролю та вібродіагностики машин.....	29
1.6 Аналіз існуючих систем контролю вібрації ГПА.....	34
1.7 Висновки і постановка задачі.....	44
2 ЦИФРОВІ АЛГОРИТМИ ОБРОБКИ ВІБРАЦІЙНИХ СИГНАЛІВ ГПА..	46
2.1 Вимоги до цифрової обробки вібраційних сигналів ГПА.....	46
2.2 Дискретизація та квантування вібраційних сигналів.....	46
2.3 Цифрова фільтрація та придушення шумів.....	47
2.4 Спектральний аналіз методом FFT.....	51
2.5 Часово-частотний аналіз на основі вейвлет-перетворення.....	53
3 РОЗРОБЛЕННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ СИСТЕМИ АНАЛІЗУ ВІБРАЦІЙНИХ СИГНАЛІВ ГАЗОПЕРЕКАЧУВАЛЬНИХ АГРЕГАТИВ.....	63
3.1 Загальна концепція інтелектуальної системи діагностик.....	63
3.2 Структура інтелектуальної системи аналізу.....	63
3.3 Алгоритм функціонування інтелектуальної системи.....	63

					МР.АКС -08.00.00.000 ПЗ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Розроблення інтелектуальної системи аналізу вібраційних сигналів ГПА на основі цифрових алгоритмів обробки даних <i>Пояснювальна записка</i>	Літ.	Арк.	Аркушів
Розроб.	Давидів					8	96	
Перевір.	Іванюк							
Н. контр.	Возний А.					ІФНТУНГ, АКСм-24-1		
Затв.	Заміховський							

3.4	Формування та аналіз вектора діагностичних ознак.....	64
3.5	Інтелектуальний модуль прийняття рішень.....	66
3.6	Дослідження роботи системи у середовищі MATLAB.....	67
3.7	Розробка програмного забезпечення для інтелектуальної системи аналізу вібраційних сигналів ГПА.....	71
3.8	Результати апробації алгоритмічного і програмного забезпечення системи діагностування ГПА.....	84
ВИСНОВКИ.....		91
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ НА ДЖЕРЕЛА.....		92
ДОДАТОК		94
БІБЛІОГРАФІЧНА ДОВІДКА.....		96

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, ОДИНИЦЬ І ВИМІРІВ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

ЛВУМГ – лінійне виробниче управління магістральних газопроводів.

КС – компресорна станція;

ГПА – газоперекачуючий агрегат;

ГТУ – газотурбінна установка;

ГТЕС – газотурбінна теплоелектростанція;

ТНТ – турбіна низького тиску;

ТВТ – турбіна високого тиску;

АЧХ – амплітудо-частотна характеристика;

ФЧХ – фазо-частотна характеристика;

ШПФ – швидке перетворення Фур'є;

ЕОМ – електронно-обчислювальна машина.

					<i>МР.АКС -08.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

ВСТУП

Сучасні газотранспортні системи характеризуються високим рівнем автоматизації та підвищеними вимогами до надійності й безпеки експлуатації обладнання.

Газоперекачувальні агрегати (ГПА) є ключовими елементами компресорних станцій, від технічного стану яких безпосередньо залежить безперебійність транспортування природного газу.

Одним з найбільш інформативних способів контролю стану обертового обладнання є вібраційна діагностика, що дає змогу виявляти дефекти на ранніх стадіях їх розвитку.

Вібраційні сигнали ГПА мають нестационарний характер, зашумленість та складну спектральну структуру, що ускладнює їх аналіз традиційними методами. У зв'язку з цим актуальним є застосування цифрових алгоритмів обробки сигналів та інтелектуальних підходів до аналізу даних, які забезпечують підвищення достовірності діагностичних рішень і зменшення впливу людського фактора.

Таким чином, розроблення інтелектуальної системи аналізу вібраційних сигналів газоперекачувальних агрегатів на основі сучасних методів цифрової обробки даних є актуальним науково-практичним завданням у галузі автоматизації та комп'ютеризованих систем управління.

Метою роботи є підвищення ефективності контролю технічного стану газоперекачувальних агрегатів шляхом розроблення інтелектуальної системи аналізу вібраційних сигналів на основі цифрових алгоритмів обробки даних.

Для досягнення поставленої мети у роботі необхідно розв'язати такі завдання:

- проаналізувати газоперекачувальний агрегат як об'єкт автоматизації та джерела виникнення вібраційних процесів.
- дослідити сучасні методи вібраційної діагностики та цифрової обробки сигналів, що застосовуються для контролю стану обертового обладнання.

					MP.AKC -25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

- обґрунтувати доцільність використання вейвлет-перетворення для аналізу нестационарних вібраційних сигналів.

- розробити алгоритм аналізу вібраційних сигналів газоперекачувального агрегату з використанням цифрових методів обробки даних.

- синтезувати структуру інтелектуальної системи аналізу вібраційних сигналів та формування діагностичних ознак.

- реалізувати запропоновані алгоритми у програмному середовищі MATLAB.

- провести моделювання та аналіз результатів роботи системи з метою оцінювання її ефективності.

Об'єктом дослідження є процеси вібрації газоперекачувальних агрегатів компресорних станцій.

Предметом дослідження є методи та алгоритми цифрової обробки і інтелектуального аналізу вібраційних сигналів ГПА.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у розробленні підходу до інтелектуального аналізу вібраційних сигналів газоперекачувальних агрегатів на основі поєднання цифрової фільтрації, спектрального та вейвлет-аналізу з формалізованою логікою прийняття діагностичних рішень.

Практична значущість роботи полягає у можливості використання розробленої інтелектуальної системи для підвищення надійності та безпеки експлуатації газоперекачувальних агрегатів, а також для впровадження у складі автоматизованих систем контролю технічного стану обладнання компресорних станцій.

					MP.AKS -25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1 АНАЛІЗ ГАЗОПЕРЕКАЧУВАЛЬНИХ АГРЕГАТІВ ТА МЕТОДІВ ВІБРАЦІЙНОЇ ДІАГНОСТИКИ

1.1 Газоперекачувальний агрегат (ГПА) як об'єкт автоматизації

Газотранспортна система України є складною інженерною інфраструктурою, що забезпечує транспортування природного газу на великі відстані. Ключовими елементами цієї системи є компресорні станції, основним технологічним обладнанням яких виступають газоперекачувальні агрегати (ГПА).

Газоперекачувальні агрегати призначені для підвищення тиску газу та компенсації гідравлічних втрат у магістральних трубопроводах. Надійність роботи ГПА безпосередньо впливає на енергетичну безпеку, економічну ефективність та екологічні показники газотранспортної системи.

Газоперекачувальний агрегат є складним динамічним об'єктом автоматизації, який працює в умовах безперервного навантаження та підвищених вимог до надійності. Типовий ГПА складається з привідного двигуна (газотурбінного або електричного), відцентрового компресора, систем змащування, охолодження, паливоподачі та автоматизованої системи керування.

З позицій теорії автоматичного керування ГПА є багатовимірним об'єктом із взаємопов'язаними параметрами, серед яких частота обертання ротора, тиск і температура газу, витрата палива та рівень вібрації. Технічний стан обертових елементів впливає на стабільність роботи агрегату, а виникнення дефектів супроводжується зміною вібраційних характеристик.

Основною складовою ГПА, що служить його приводом, є газотурбінна установка (ГТУ). Газотурбінний двигун (ГТД) – такий двигун, до якого в якості робочого тіла використовується неконденсований газ (повітря і

					<i>МР.АКС -08.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

продукти згоряння палива або нейтральні газу), а в якості тягового двигуна застосовується газова турбіна.

Турбіна і є двигуном, в якому механічна робота на валу машини виходить за рахунок перетворення кінетичної енергії газового струменя, який, у свою чергу, виходить в результаті перетворення потенціальної енергії – енергії згорілого палива в потоці повітря.

ГТУ класифікують за різними ознаками. Стосовно їх експлуатації в газотранспортній системі України то їх поділяють на одновальні, двохвальні та трьохвальні.

Найбільшого використання знайшли двохвальні ГТУ (рис. 1.1)

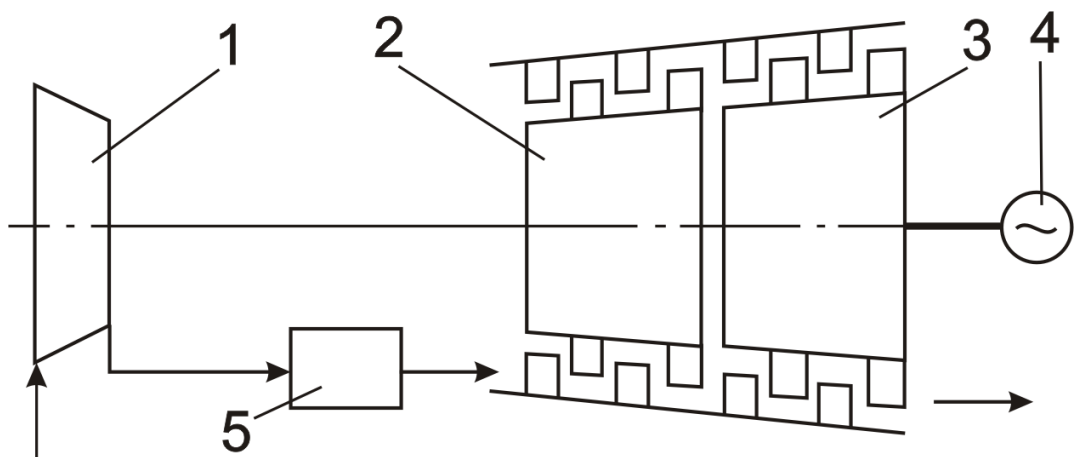


Рисунок 1.1 – Принципиальная схема двухвальной ГТУ

3 – осевий компресор ОК); 2 – турбіна високого тиску (ТВТ); 3 – турбіна низького тиску (ТНТ); 4 – нагнітач (Н); 5 – камера згоряння (КЗ).

У такій установці турбіна розділена на 2 частини (рис 1.1). Одна частина, зазвичай високого тиску 2, служить приводом компресора 1 і може працювати з змінним числом обертів.

Друга частина, силова турбіна 3, працює з постійним числом обертів, якщо вона призначена для приводу електрогенератора, і може мати

практично будь-яку швидкість обертання, якщо вона призначена для приводу нагнітача.

Регулювання в ГТУ цього типу здійснюється не тільки шляхом зміни витрати палива, а й за рахунок зміни витрати повітря, що подається компресором 1.

Такий метод дозволяє значно менше знижувати або взагалі не знижувати температуру робочого тіла за камерою згорання при роботі на часткових навантаженнях і тим самим підтримувати ККД. циклу на більш високому рівні.

Розглянемо більш детально принцип роботи і призначення агрегатів такої ГТУ.

Осьовий компресор (ОК) – багатоступеневий без проміжного охолодження. Тиск повітря в ньому підвищується від атмосферного p_0 до $p_1 = 3 \div 5 \text{ кг/см}^2$, а температура від зовнішньої $+0$ до $T_1 = 146.5 \div 165^\circ \text{C}$.

Газова турбіна для приводу компресора. На неї подається робоче тіло високого тиску і високої температури, тому вона отримала назву *турбіни високого тиску* (ТВТ).

Турбіна може бути одноступеневою і багатоступеневою. Вона має кутову швидкість обертання і розвиває момент, необхідний для подолання корисного моменту компресора.

Камера згорання *КЗ*, в якій проходить спалювання палива (природного газу), має конструкцію, яка забезпечує повне згорання палива. Температура в ній від T_1 до $T_2 = 330^\circ \text{C} \div 403^\circ \text{C}$.

В *регенераторі* або *теплообміннику* *ТО* (не показаний на рис.1.1), проходить додаткове підігрівання повітря після компресора відпрацьованим робочим тілом, яке має високу температуру. *ТО* – пластинчастий, з великою

					<i>МР.АКС -08.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

площею теплообміну і малими гідравлічними втратами. Температура в ньому підвищується від T_1 до $T_3 = 220^\circ C \div 256^\circ C$.

Турбіна низького тиску (ТНТ) розташовується по ходу робочого тіла безпосередньо після ТВТ. В ТНТ проходить перетворення внутрішньої енергії робочого тіла, яка залишається після ТВТ. ТНТ призначена для подолання корисного моменту приводу відцентрового нагнітача і характеризується кутовою частотою обертання ω_H і моментом M_H .

Нагнітач Н є корисним навантаженням ТНТ. Нагнітач підвищує тиск транспортуемого газу в газопроводі від P_B до P_H .

Сьогодні все більшого розповсюдження знаходять ГПА великої потужності на базі трьохвальної ГТУ, принципова схема якої наведена на рис. 1.2

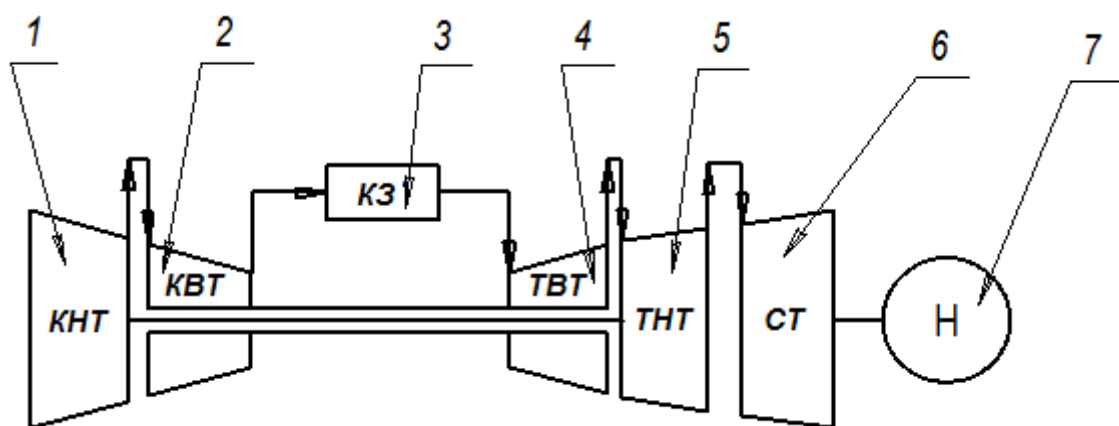


Рисунок 1.2 – Принципова схема трьохвальної ГТУ

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

При великих ступенях стиснення спостерігається відмінність витрат повітря на початку і в кінці проточної частини компресора, що може

					MP.AKC -08.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

призвести до помпажу. Для усунення цього явища компресор ділять на 2 і більше частинки називаються каскадами.

Кожен каскад має свою частоту обертання, за рахунок чого витрата повітря через них вирівнюється. Кожен каскад наводиться окремою турбіною.

У будь-якому випадку на кожному валу має бути не менше двох підшипникових вузлів: один – опорний, другий – опорно-наполегливий. При змінюються підшипники качання і ковзання.

На рис. 1.3 показано газоперекачувальний агрегат ГПА-Ц-16С/76-1,44М1 на базі ГТД ДГ-90Л2.1 з електрозапуском виробництва ДП НВКГ «Зоря-Машпроект» в блочно-контейнерному виконанні.

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

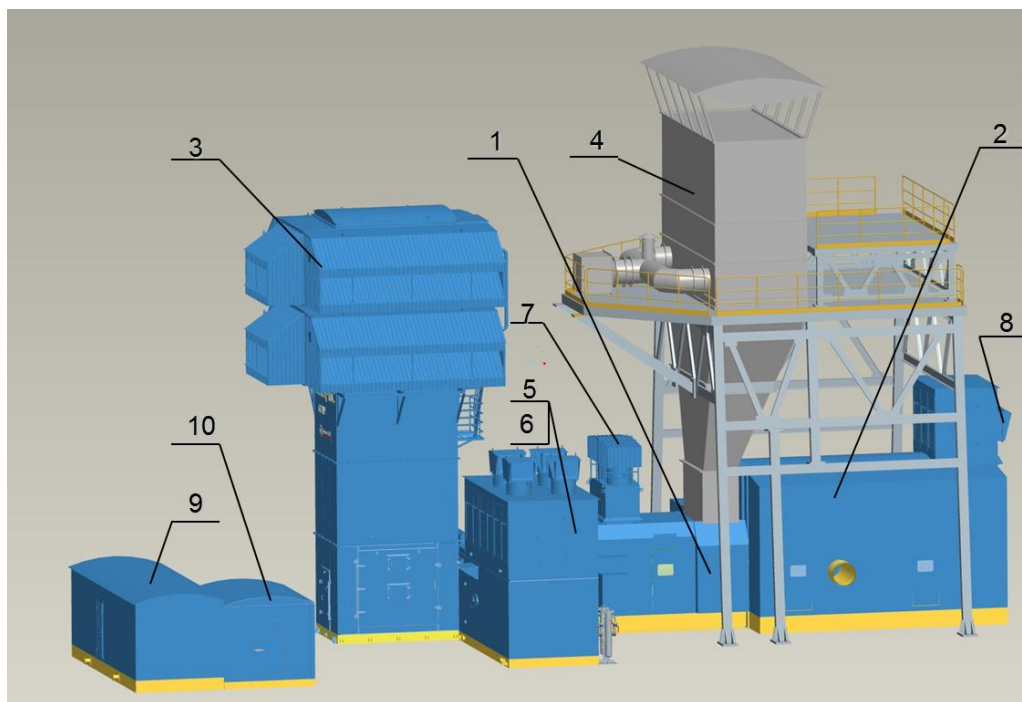


Рисунок 1.3 – Загальний вигляд ГПА-Ц-16С/76-1,44М1 на базі ГТД ДГ-90Л2.1 з електрозапуском

					<i>МР.АКС -08.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

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

Типовий газоперекачувальний агрегат складається з таких основних вузлів:

- привідного двигуна (газотурбінного або електричного);
- відцентрового компресора;
- валопроводу;
- системи змащування;
- системи охолодження;
- автоматизованої системи керування.

Обертіві елементи агрегату працюють в умовах високих швидкостей обертання та значних динамічних навантажень, що зумовлює підвищені вимоги до контролю їх технічного стану.

1.3 Джерела та характеристики вібраційних процесів у ГПА

Вібрація і шум – природні процеси, що протікають у машинах і устаткуванні, і утворюються вони тими ж динамічними силами, що є причинами зносу і різних видів дефектів. Природно, що вібрація і шум трансформуються один в одного на границях газового і твердого середовищ, а людина безпосередньо сприймає звук, і лише в обмеженому низькочастотному діапазоні – вібрацію.

За перехід вібрації в шум відповідає коливна швидкість, що прямо пропорційна звуковому тиску в повітрі біля вібруючої поверхні. Тому і норми на вібрацію, як правило, обмежують коливну швидкість машин і

					<i>МР.АКС -08.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

устаткування. Але вібраційний контроль і вібраційна діагностика – різні практичні задачі.

У діагностиці дефект визначається коливальною силою, що діє в зоні дефекту, а сила зв'язана лінійно з коливним прискоренням, а не зі швидкістю. Тому в діагностиці часто користуються вимірами віброприскорення, а для вібраційного контролю машин додатково вимірюють і віброшвидкість, причому лише в обмеженому низькочастотному діапазоні.

Для вимірювання вібрації, як правило, використовуються датчики віброприскорення, що працюють на п'єзоефекті. У таких датчиках електричний заряд на виході пропорційний силі, яка діє на датчик. Лише в ряді стаціонарних систем контролю вібрації великих машин з підшипниками ковзання використовуються датчики коливного зсуву, що вбудовуються в підшипник (по два датчики на підшипник). Ці датчики дозволяють вимірювати траєкторію руху центра вала в підшипниках (його орбіту) і, тим самим, безпосередньо визначати величину зносу вкладишів.

Для виміру шуму використовуються мікрофони з різними способами перетворення звукового тиску в електричний сигнал. Для діагностики машин іноді використовуються спрямовані мікрофони, що дозволяють визначати напрямок на точку випромінювання шуму. Практично мікрофоном можна дистанційно вимірювати вібрацію об'єкта, а саме величину віброшвидкості.

Є ще одна причина, по якій не рекомендується активно використовувати шум для діагностики машин. Ця причина – необхідність обліку форми коливань об'єкта в безпосередній близькості від місця виникнення дефекту. Тут значний внесок як у вібрацію, так і в шум вносять псевдоскладові складних форм, тобто ті, котрі в міру віддалення від джерела трансформуються в просту (хвильову) форму.

При вимірі шуму на відстані інформація, що міститься в псевдошумі чи псевдовібрації, пропадає. Після перетворення сигналу вібрації (шуму) в

					<i>MP.AKC -08.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

електричний сигнал, останній необхідно ретельно аналізувати, одержуючи, а не втрачаючи діагностичну інформацію. До приладів, що аналізуються, у діагностиці пред'являються самі жорсткі вимоги. До типових операцій, що повинні виконувати прилади, що аналізують вібрацію, варто віднести:

– Визначення рівня (загального) вібрації в смузі частот, необхідної стандартами вібраційного контролю і у необхідних стандартах одиницях виміру.

– Спектральний аналіз вібрації, тобто поділ вібрації на складові різної частоти, обумовлені природою коливальних сил.

– Аналіз коливань потужності окремих складових вібрації, попередньо виділених із сигналу вібрації. Це, як правило, аналіз спектра огинаючої випадкового високочастотного сигналу вібрації.

– Аналіз форми сигналу вібрації, тобто аналіз тимчасової розгортки сигналу (робота в режимі осцилографа).

Слід зазначити, що далеко не усі відносно прості прибори, можуть виконувати всі зазначені види аналізу, зокрема, з необхідною для діагностики якістю.

Якість і одиниці вимірювання вібрації.

Діагностика – це, в основному, пошук слабких компонентів сигналу на фоні сильних. Розрізняються слабкі і сильні компоненти переважно по частоті. По потужності ці компоненти можуть розрізнятися в 10^6 разів, тому вимірюють не їхню потужність, а амплітуду, і розрізнення між слабкими і сильними компонентами знижується до величин, порядку 10^3 разів. Але слабкий компонент необхідно не тільки знайти, але і визначити його властивості. Тому аналізатор сигналу повинний без будь-яких переключень забезпечувати динамічний діапазон аналізу порядку 10^4 разів.

					<i>МР.АКС -08.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

Взагалі машини можуть мати, наприклад, через різну частоту обертання, різну максимальну амплітуду вібрації, що відрізняється до 100 разів. Тоді очевидно, що хороший прилад без зміни датчика повинний мати динамічний діапазон вимірів порядку 10^6 разів.

Щоб було зручно порівнювати складові вібрації, що так відрізняються одна від одної, в акустиці прийнято відображати їхні величини в логарифмічному масштабі. Дві складові, що відрізняються по потужності в 10 разів, прийнято вважати в логарифмічному масштабі відрізняються на 10 децибел. Якщо подивитися розходження амплітуд цих складових – то воно інше. В акустиці розходження амплітуд складових у 10 разів у логарифмічному масштабі відповідає 20 дБ. Залишилося зв'язати точки відліку конкретних одиниць віброприскорення, віброшвидкості, вібропереміщення, звукового тиску і децибелів. У відповідності зі стандартами МЕК:

- $1 \text{ м/с}^2 = 120 \text{ дБ}$ віброприскорення,

- $1 \text{ мм/с} = 120 \text{ дБ}$ віброшвидкості,

- $1 \text{ мкм} = 120 \text{ дБ}$ вібропереміщення,

- $20 \text{ Па} = 120 \text{ дБ}$ звукового тиску.

Вібропереміщення, віброшвидкість і віброприскорення, що вимірюються в одній точці і виражені в децибелах, збігаються тільки на одній частоті - 1000 рад/с або 159 Гц .

Вібраційні процеси в газоперекачувальних агрегатах виникають унаслідок дії конструктивних та експлуатаційних факторів. Основними джерелами вібрації є дисбаланс ротора, неспіввісність валів, дефекти підшипників кочення та ковзання, а також аеродинамічні збурення газового потоку.

					<i>MP.AKC -08.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

Вібраційні сигнали ГПА мають складну структуру та включають гармонічні, імпульсні та шумові складові.

Частотний спектр таких сигналів охоплює широкий діапазон, а параметри сигналу змінюються у часі залежно від режиму роботи агрегату. Нестационарний характер вібрацій ускладнює їх аналіз у часовій області та зумовлює необхідність застосування цифрових методів обробки сигналів [4].

Вібрація є невід’ємною властивістю роботи обертових машин.

У справному стані рівень вібрації залишається в межах допустимих норм, однак при виникненні дефектів амплітуда та спектральний склад вібраційного сигналу змінюються.

Вібраційний сигнал $x(t)$ може бути представлений як сума гармонічних складових:

$$x(t) = \sum_{i=1}^N A_i \sin(2\pi f_i t + \varphi_i), \quad (1.1)$$

де A_i - амплітуди коливань, f_i - частоти, φ_i - фази.

Аналіз спектрального складу сигналу дозволяє виявляти дефекти на ранніх стадіях їх розвитку.

1.4 Джерела вібрації в машинах роторного типу

У кожній машині діють динамічні сили. Ці сили – джерело не тільки шуму і вібрації, але і дефектів, що змінюють властивості сил і, відповідно, характеристики шуму і вібрації.

Можна сказати, що функціональна діагностика машин без зміни режиму їхньої роботи – це вивчення динамічних сил, а не власне вібрації чи шуму. Останні просто містять у собі інформацію про динамічні сили, але в процесі перетворення сил у вібрацію чи шум, частина інформації губиться.

					<i>МР.АКС -08.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

Ще більше інформації губиться при перетворенні сил і чиненої ними роботи, в теплову енергію. Саме тому з двох видів сигналів (температура і вібрація) у діагностиці варто віддати перевагу вібрації.

Основні динамічні сили, що діють у машинах роторного типу, створюючи їхню вібрацію чи шум, приведені в таблиці 1. 1.

Таблиця 1.1 – Типи коливальних сил, що діють у машинах роторного типу

СИЛА	ДЖЕРЕЛО
1. Механічної природи	
Відцентрова	Незрівноваженість ротора
Кінематична	Нерівність поверхні
Параметрична	Флуктуації твердості вала, підшипників і т.д.
Сили тертя	Вузли тертя кочення і ковзання
Удари	Дефектні поверхні тертя
2. Електромагнітної природи	
Магнітні	Флуктуації об'єму повітряного зазору в магнітопроводі
Електродинамічні	Змінні складові струму і потоку
Магнітострикційні	Ефект магнітострикції в магнітопроводі
3. Гідро (аеро)динамічної природи	
Піднімальні (обтікання)	Рух лопасті в неоднорідному потоці чи в групі неоднакових лопат в однорідному потоці
Сили тертя	Границя потоку і нерухомих частин
Пульсації тиску	Турбулентність потоку, зрив вихрив, кавітація

Із сил механічної природи варто виділити:

- відцентрові сили, обумовлені незрівноваженістю обертових вузлів;
 - кінематичні сили, обумовлені нерівністю взаємодіючих поверхонь і, насамперед, поверхонь тертя в підшипниках;
- параметричні сили, обумовлені насамперед змінною складовою твердості обертових вузлів чи опор обертання;
- сили тертя, що далеко не завжди можна вважати механічними, але майже завжди вони є результатом сумарної дії безлічі мікроударів з деформацією (пружної) контактуючих мікронерівностей на поверхнях тертя;
- сили ударного виду, що виникають при взаємодії окремих елементів тертя, що супроводжується їхньою пружною деформацією.

Із сил електромагнітного походження в електричних машинах варто виділити:

- обумовлені змінами магнітної енергії у визначеному обмеженому просторі, як правило, в обмеженій по довжині ділянці повітряного зазору;
- електродинамічні сили, обумовлені взаємодією магнітного поля з електричним струмом;
- магнітострикційні сили, обумовлені ефектом магнітострикції, тобто зміною лінійних розмірів магнітного матеріалу під дією магнітного поля.

Із сил аеродинамічного походження варто виділити:

- піднімальні сили, тобто сили тиску на тіло, наприклад, лопатка робочого колеса, що рухається в потоці, або що обтікається потоком;
- сили тертя на границі потоку і нерухомих частин машини (внутрішньої стінки трубопроводу і т.п.);
- пульсації тиску в потоці, обумовлені його турбулентністю, зривом вихрів.

					<i>MP.AKC -08.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

Сили гідродинамічного походження, в основному, мають ту ж природу, що й у газовому середовищі, але до них додаються ще і пульсації тиску через кавітацію, що за певних умов може виникати в потоці рідини.

Динамічні сили в машинах створюють вібрацію або безпосередньо, або сили створюють шум, а шум – вібрацію корпусу. Вібрація, у залежності від природи сил, які її утворюють, може бути або детермінованою (частіше періодичною), або випадковою. Один з найпростіших прикладів детермінованого сигналу вібрації – гармонійне коливання (рис. 1.4).

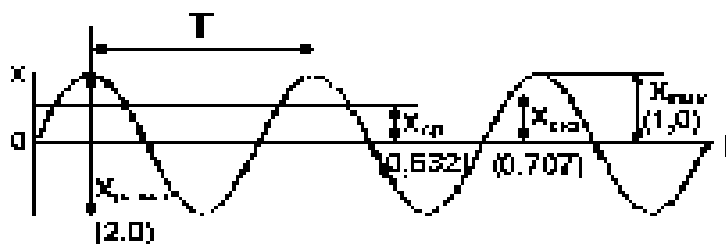


Рисунок 1.4 – Елементарне гармонійне коливання

Воно характеризується амплітудою (пікове значення $X_{\text{пик}}$, середньоквадратичне значення $X_{\text{скз}}$ чи середнє значення X_{cp} продетектованого сигналу), частотою $f=1/T$ і початковою фазою.

Випадковий сигнал (рис. 1.5) може приймати будь-яке значення у визначеному діапазоні, тому його характеризують не амплітудою, частотою і фазою, а піковим значенням, середньоквадратичним значенням, середнім значенням (продетектованого сигналу) і значенням від піка до піка.

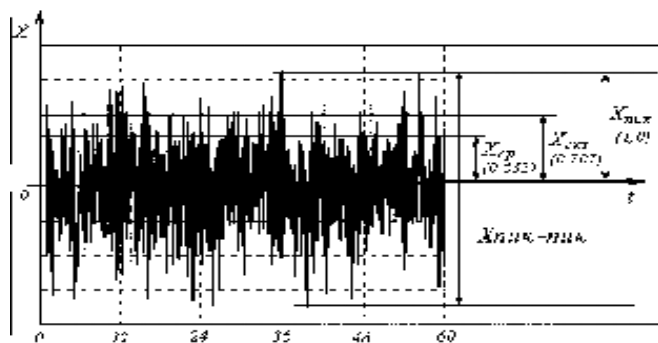


Рисунок 1.5 – Випадковий вібросигнал

Періодична вібрація може бути представлена у вигляді спектра. У ньому може бути одна складова (гармонійний сигнал) (рис. 1.6 а-б), чи багато кратних (рис.1.7)

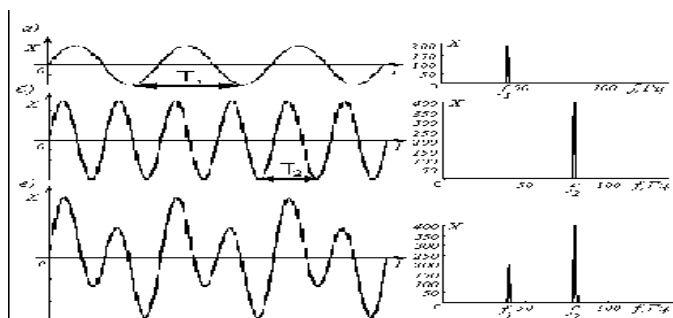


Рисунок 1.6 – Тимчасові сигнали вібрації і їхні спектри

Якщо сигнал являє собою комбінацію (рис. 1.6в) двох найпростіших гармонійних складових з різними частотами й амплітудами, то його спектр має вид (рис. 1.6 праворуч), де явно видна наявність саме цих двох гармонійних складових з різними частотами й амплітудами.

На рисунку 1.7 представлено часове розгорнення сигналу вібрації і його спектр.

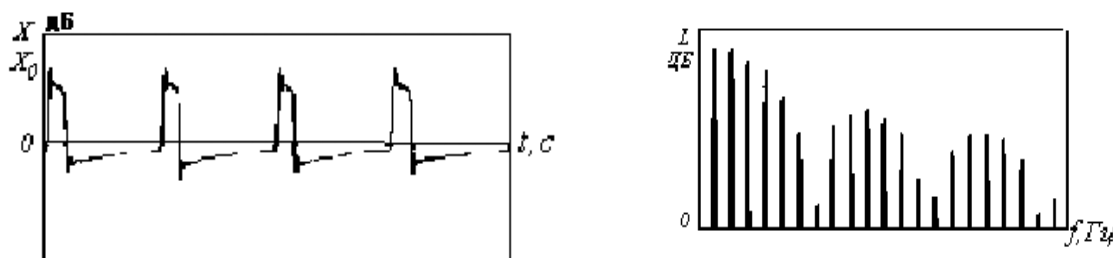


Рисунок 1.7 – Складний періодичний вібросигнал та його спектральна характеристика

Оскільки періодичні складові відображають спектром, то випадкові теж варто так само відображати, але спектр суцільною (рис. 1.8).

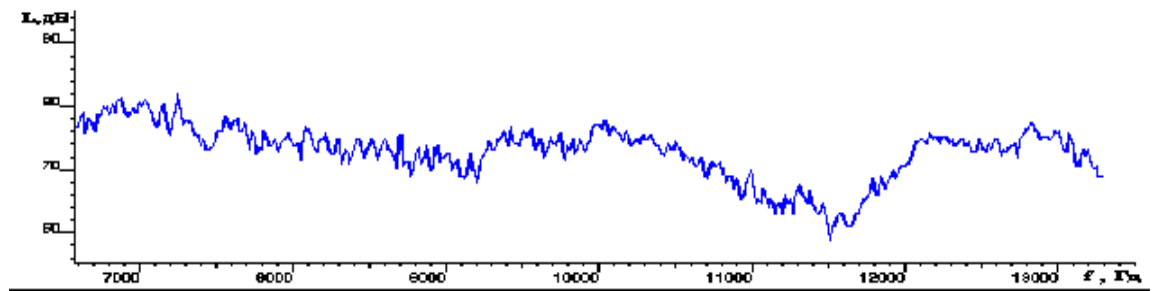


Рисунок 1.8 – Спектр випадкових компонентів вібрації

Спектр зручний тим, що він поділяє вібрацію на компоненти з різними властивостями, а досить часто і різної природи.

Типовий спектр (рис. 1.9) характеризується, як правило, великою кількістю гармонійних складових в області низьких частот. В міру збільшення частоти гармонійних складових стає менше і вони практично відсутні в області високих частот.



Рисунок 1.9 – Спектр сигналу вібрації

Для діагностики машин і устаткування при виборі частотної області вібрації варто враховувати властивості вібрації різної частоти.

Так, в області інфранизьких частот вібрація може створюватись навіть не самою контрольованою машиною, а, наприклад, працюючими поруч іншими машинами і, у тому числі, транспортом що проходить на порівняно великій відстані.

Особливість вібрації на низьких частотах полягає в тому, що вона слабо загасає в просторі, а отже, у точці встановлення датчика доходить вібрація від усіх вузлів контрольованої машини, від сполучених з нею інших машин і від сусіднього устаткування. Тому при аналізі вібрації на низьких частотах виникає проблема локалізації дефектного вузла і проблема завадозахищеності. На цих частотах (у діапазоні частот до 3-5 гармоніки частоти обертання) машина коливається як єдине ціле, тому потрібні великі сили і великі дефекти, щоб розгойдати всю машину.

На середніх частотах у будь-якій точці контролю вібрація створюється, в основному, коливальними силами, що діють у найближчих до неї вузлах машини. У спектрі вібрації спостерігається велика кількість гармонійних складових різної частоти, але через численність резонансів співвідношення амплітуд цих складових сильно відрізняються від співвідношень величин їхніх коливальних сил.

Наслідком спотворення інформації про дефекти – джерела цих коливальних сил і відсутність повторюваності результатів при найменшій зміні частоти обертання машини.

На високих частотах вібрація здобуває хвильовий характер, у спектрі мало ліній, мало (на перший погляд) інформації, але для порушення вібрації досить навіть малих сил .

Вібрація ультразвукових частот створюється, в основному, мікроударами, але поширюється тільки по однорідному середовищу (метал без болтів, зварених швів). До оптимальної точки її виміру, якщо це не судина чи трубопровід, часто важко чи неможливо добратися.

					<i>MP.AKC -08.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

1.5 Історичні аспекти розвитку вібраційного контролю та вібродіагностики машин.

У будь-якій області техніки від ідеї до її реалізації проходить 20-30 років. Ті ж терміни потрібні були для розвитку ефективної вібраційної діагностики машин. Так, основні методи діагностики з'явилися в 60-80-тих роках, коли вперше з'явилася техніка аналізу вібрації, що перевищує можливості слуху людини. Але для практичної реалізації цих методів треба було ще 2-3 десятиліття, і тільки в останні роки вона стала широко впроваджуватися практично у всіх галузях промисловості.

Вся діагностика практично з'явилася в середовищі військових моряків США, Великобританії, тобто там, де ця задача була найбільш актуальна, де не було проблем з фінансуванням на дослідження, де працювали кращі вчені й інженери.

Але засоби вимірювання не стали в той час настільки розповсюдженими, щоб вібраційна діагностика стала настільки популярною, як зараз. Реально ці засоби з'явилися на початку 90-х років, коли прилади стали створюватися на базі мікрокомп'ютерів. Лише тоді складні види аналізу сигналів стали доступні широкому класу споживачів. Зараз нове покоління комп'ютерів з'являється кожні 2-3 роки, і кожні два-три роки обновляється вимірювальна і аналізуюча техніка.

Можна говорити про те, що сучасний прилад – це датчик плюс мікрокомп'ютер.

Широке поширення одержали віртуальні прилади, коли прилад – це датчик плюс персональний комп'ютер. Але глибока діагностика машин і устаткування по вібрації - це не тільки методи діагностики й апаратура для виміру й аналізу процесів. Є ще дві обов'язкові складові частини:

					<i>MP.AKC -08.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29

– база даних по вимірах великої кількості устаткування протягом тривалого часу з можливістю оперативного отримання будь-яких даних і проводити їхній аналіз;

– способи прийняття діагностичних рішень.

У першому питанні лідерами завжди були фірми США, що створювали протягом багатьох років ефективні комп'ютерні системи моніторингу, тобто спостереження за процесами, що протікають, у тому числі і за вібрацією машин і устаткування. До складу програмного забезпечення входила база даних з характеристиками контрольованого устаткування і результатами вимірів, зручний інтерфейс користувача із різними порогоми, можливістю графічного аналізу з побудовою трендів, і іншими засобами представлення даних фахівцю-діагносту.

Друге питання в більшості систем діагностики вирішується одним способом – залученням експерта по діагностиці конкретного виду приладів. У багатьох країнах, і насамперед у США, існує система підготовки і перепідготовки таких експертів. У ряді країн, і в тому числі в Європейських країнах, така підготовка відсутня.

Але є ще два напрямки рішення другого питання – розробка штучного інтелекту.

Перший напрямок – вивчення штучного інтелекту, де навчання проводить спочатку розроблювач системи, потім користувач доповнює систему потрібними йому правилами. Другий напрямок – самонавчальна (адаптивна) система з твердими алгоритмами навчання, заданими розроблювачами.

В даний час в енергетичній галузі йде стрімке збільшення частки газотурбінних установок (ГТУ) у виробництві електроенергії. Цей ріст обумовлений введенням в експлуатацію як нових парогазових блоків теплоелектростанцій, так і блокових газотурбінних теплоелектростанцій (ГТЕС), що використовуються для електрифікації і енергозабезпечення

					<i>MP.AKS -08.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

процесу газовидобутку у віддалених районах. Для великих ГТЕС застосовуються потужні газові турбогенератори (40-150 МВт), для малих (блокових ГТЕС потужністю 5-10 МВт) – транспортні газотурбінні двигуни, в основному, авіаційного і суднового типу.

Крім того, газотурбінні установки, як найбільш економічно ефективні, використовуються як привід газоперекачувальних агрегатів на підприємствах транспортування природного газу. Більшість підприємств цієї галузі експлуатують транспортні ГТУ авіаційного і суднового типу. У даному проекті розглядаються особливості діагностування транспортних ГТУ (рис. 1.10), виявлені при натурних дослідженнях двигунів двох марок:

1. ДР59Л суднового типу, виробництва Криворізького турбінного заводу. Вихідна потужність 10,4 МВт, номінальна швидкість обертання ротора низького тиску 5300 об/хв, високого тиску – 7200 об/хв, ротора силової турбіни – 4500 об/хв, маса 14000 кг, повний ресурс 82500 год. (рис. 1.10 а).

2. НК-12СТ авіаційного типу, виробництва Самарського моторобудівного об'єднання. Потужність на вихідному валу 6,3 МВт, номінальна швидкість обертання ротора турбокомпресора 8280 об/хв, силової турбіни - 8200 об/хв, маса 3500 кг, призначений ресурс 33000 год. (рис. 1.10).



а) суднового типу – ДР59Л;

б) авіаційного типу – НК-12СТ

Рисунок 1.10 – Транспортні газотурбінні установки в складі газоперекачувального агрегату

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

3. Суттєвою конструктивною відмінністю суднових енергетичних установок є наявність каскадів високого і низького тиску, не зв'язаних кінематично між собою, і міжвального роликотпідшипника.

Формування сигналу вібрації ГТУ визначається малими габаритами і використанням підшипників кочення з одного боку, і високою енергонасиченістю конструкції й оборотами роторів компресорів і турбін, з другого.

Зазначені особливості конструкції й умови роботи агрегатів обумовлюють як більш низький, у порівнянні з паровими турбінами міжремонтний ресурс (1000-1500 годин), так і істотні труднощі при розробці методики діагностування.

Методи вібраційної діагностики ґрунтуються на аналізі сигналів, отриманих від датчиків вібрації, встановлених у контрольних точках агрегату. Найбільш поширеними є методи часової та спектральної обробки сигналів, які дозволяють оцінювати середньоквадратичні значення, амплітудні та частотні характеристики вібрацій.

Спектральний аналіз дозволяє ідентифікувати дефекти, пов'язані з обертальною частотою ротора, а також характерними частотами підшипників. Проте класичні методи спектрального аналізу мають обмежену ефективність у разі аналізу нестационарних процесів, що потребує використання більш гнучких часово-частотних методів [5].

2. Основний метод діагностики підшипників кочення – аналіз спектра огибаючої високочастотної випадкової вібрації – малоефективний по двох причинах:

а) підшипникові вузли недоступні для безпосередньої установки датчиків вібрації;

б) високочастотна вібрація корпусу й опор містить сильні гармонійні складові, що створюють «помилковий» сигнал модуляції при справному підшипнику кочення.

					<i>MP.AKC -08.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

2. У зв'язку з відносно невеликою масою корпусу і високих температур робочого тіла сигнал високочастотної вібрації, вимірюваний у точках контролю на корпусі установки, містить, в основному, інформацію про локальні аеродинамічні процеси.

3. Навантаження на робочі і направляючі (соплові) лопатки визначаються, як правило, відцентровими силами, що діють на ротор і силами аеродинамічного опору лопаток. Причому змінна складова останніх визначається несиметрією аеродинамічного опору лопатки і за своїм впливом на вібрацію близька до моментної незрівноваженості ротора, але величина формуючих коливальних сил, а, отже, і вібрації, залежить від навантаження на агрегат.

4. Аеродинамічні характеристики повітря і продуктів згорання природного газу в проточній частині мають підвищену турбулентність і, як наслідок, з'являється нелінійна взаємодія найближчих ступеней (як робочих, так і соплових). У результаті цього виникають коливальні сили на субгармоніках лопаткових частот і на комбінаційних частотах.

5. У трьохвальних установках міжвальний підшипник, що не є несучою опорою ротора, навантажується при прогинах роторів, неспіввісності і/чи аеродинамічних проблемах, що приводить до нелінійної взаємодії відцентрових сил каскадів високого і низького тиску і взаємної модуляції вібрації на частотах обертання цих роторів.

6. Близькі значення частот обертання різних каскадів установки, а також велика кількість ступіней з різною кількістю лопаток обумовлює високе число комбінаційних і лопаткових складових вібрації у всьому діапазоні частот, що істотно утрудняє постановку діагнозу й автоматизацію алгоритму.

Після аналізу перерахованих вище особливостей формування вібраційного сигналу і впливу дефектів на його параметри вироблений основний підхід до діагностики ГТУ даного типу – інтегральна оцінка стану

					<i>MP.AKC -08.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33

установки при наявності розвинутих дефектів. Оскільки виявлення дефектів кожного вузла, що зароджуються, ГТУ утруднено, а ознаки середніх дефектів істотно змінюють своє значення при зміні навантаження, прийняте рішення про «відсторонену» оцінку – виявленні діагностичних ознак тільки розвинутих дефектів і відмова від точок контролю вібрації на корпусі проточної частини.

Два основних положення методики:

1. Об'єктивна оцінка стану агрегату можлива при контролі вібрації в точках, по можливості рівновіддалених від основних джерел корпусної вібрації.

2. З високою вірогідністю можна знайти тільки розвинуті дефекти, тому що сигнал вібрації, що створюється зароджуваними дефектами, практично загасає при проходженні до обраних точок контролю.

Для реалізації цього підходу найбільш ефективним є спектральний аналіз вібрації машини в контрольних точках у площині кріплення опор ротора в двох напрямках у зоні кожної з опор обертання.

В результаті проведених досліджень розроблена методика діагностування ГТУ, яка ґрунтується на вимірі спектрів вібрації в трьох частотних діапазонах: низькочастотному (до 1 кГц), середньочастотному (до 5 кГц) і високочастотному (до 25 кГц).

Періодичність вимірів переносними віброаналізуючими засобами розробленої методики складає >1000 годин наробітку агрегату, але не рідше 1 разу протягом 3 місяців, і скорочується по розвитку дефектів до 100 годин.

1.6 Аналіз існуючих систем контролю вібрації ГПА

Існуючі промислові системи контролю вібрації газоперекачувальних агрегатів здебільшого реалізують пороговий принцип оцінювання параметрів та потребують участі оператора для інтерпретації результатів. Такий підхід

					<i>MP.AKC -08.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		34

не забезпечує повної автоматизації процесу діагностики та ускладнює прогнозування розвитку дефектів.

Перспективним напрямом розвитку систем вібраційної діагностики є впровадження інтелектуальних алгоритмів аналізу даних, що дозволяють автоматизувати формування діагностичних ознак і прийняття рішень щодо технічного стану обладнання [6].

Сьогодні в практику експлуатації ГПА впроваджується прогресивний і економічно ефективний спосіб експлуатації за фактичним технічним станом. У цьому випадку перебиранню чи заміні підлягають ті деталі і вузли ГПА, які є дефектними і не відповідають технічним вимогам.

Такий метод експлуатації за фактичним станом забезпечує більш високий рівень надійності вузлів ГПА і агрегата в цілому та суттєво зменшує збитки, заподіяні періодичними профілактичними оглядами і зупинками ГПА. Згідно статистичним даним витрати на необґрунтоване обслуговування і ремонт відповідно до системи планово-попереджувальних ремонтів складають майже 7.0% по відношенню до всіх витрат на експлуатацію.

Таким чином, широке впровадження системи обслуговування ГПА за фактичним технічним станом можливе на основі використання методів і засобів технічної діагностики, зокрема, віброакустичної, які базуються на принципах безрозбірності, оперативності та універсальності.

Технічна діагностика вирішує три основні задачі [1]:

Контроль технічного стану, пошук дефектів і прогнозування стану.

Перша задача обов'язково вирішується при діагностуванні об'єктів будь-якого призначення. Контроль технічного стану передбачає перевірку відповідності значень діагностичних ознак вимогам технічної документації.

При цьому можливі два види контролю: якісний (допусковий) і кількісний (запас працездатності). В тому випадку, коли об'єкт діагностування – ГПА – втратив працездатність або запас працездатності значно понизився, вирішується друга задача – пошук дефекту. Доцільність її

					<i>MP.AKC -08.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

визначається можливістю відновлення об'єкту, тобто усунення дефекту, який виник.

В свою чергу, усунути дефект можна лише в тому випадку, коли об'єкт ремонтпридатний, тобто пристосований до усунення дефектів, які виникли в ньому, і обслуговуючий персонал має засоби і час для його відновлення.

В цьому випадку пошук дефекту починається, як правило, за умови, що вже відомо про наявність дефекту, і невідомо лише, який саме дефект виник. При вирішенні третьої задачі вивчається характер зміни діагностичних параметрів і на основі сформованих тенденцій передбачається значення параметрів на майбутній період часу.

Найбільш розповсюдженим поєднанням задач, які вирішуються в процесі діагностування, є [1]:

- контроль працездатності (запасу працездатності) і пошук дефекту;
- контроль працездатності (запасу працездатності) і прогнозування стану;
- контроль працездатності (запасу працездатності), пошук дефекту і прогнозування стану.

Вібраційна діагностика – один з напрямків технічної діагностики, який використовує за діагностичні ознаки вібраційні сигнали, що генеруються елементами і вузлами ОД. Широкий частотний діапазон вібраційних сигналів обумовлює їх швидку, практично миттєву реакцію на зміну стану об'єкта. Тому методи вібродіагностики незамінні у тих випадках, коли потрібен швидкий діагноз і швидке прийняття рішення.

Тут слід відмітити, що більшість дефектів ГПА обумовлені безпосередньо вібрацією або пов'язані з нею. Тому на долю дефектів, виявлених за допомогою вібраційних методів, припадає близько 35% від їх загальної кількості.

Враховуючи, що основні задачі дисертаційної роботи пов'язані з контролем вібраційного стану ГПА і його трубопровідної обв'язки, тобто

вирішенням першої задачі технічної діагностики – контролем працездатності, в розділі більш детально зупинимося на його методичних засадах і коротко – на вирішенні другої задачі пошуку дефектів.

Досвід експлуатації ГПА показує, що розвиток більшості дефектів призводить до підвищення вібрації, що, в свою чергу, викликає швидке зношування вузлів і механізмів та є причиною передчасного виходу агрегатів з ладу. Рівень вібрації агрегату залежить від того, наскільки якісно він спроектований і зібраний.

В умовах експлуатації встановлено, що між характеристиками вібрації машин і їх технічним станом існує прямий зв'язок [2]. Тому при визначенні ступеня небезпеки вібрації для ГПА в процесі його експлуатації необхідно знати граничні інтенсивності вібрації, при яких ще можна його експлуатувати на протязі тривалого періоду часу, або експлуатацію можна продовжити, але з обережністю і під постійним контролем, або ж подальша експлуатація може призвести до аварії і агрегат необхідно зупинити.

При нормуванні вібрації використовуються різноманітні підходи. Як правило, нормування вібрації базується на великому статистичному матеріалі та досвіді експлуатації установок даного класу.

При відсутності статистичних даних можна задатися граничним збільшенням вібрації на бдБ.

Ця величина в зарубіжних стандартах [3] характеризує відмінність між сусідніми класами технічного стану механізму. При подвоєнні рівня вібрації механізму рекомендується провести його ремонт [4].

Існуючі норми вібрації статора представляють експертні оцінки, що базуються на узагальненні досвіду експлуатації. Більш точне обґрунтування норм можливе на основі оптимізаційного підходу, що враховує, з одного боку, вірогідність пошкодження вузлів та збиток внаслідок їх відмови, з іншого – збільшення періоду експлуатації у випадку занадто частого перевищення нормативного рівня вібрацій.

					<i>МР.АКС -08.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		37

Схожий метод застосовується і для попереднього обґрунтування часових норм вібрації осердя та обмотки статора гідрогенератора. З погляду нормування важливо мати дані про гранично допустимі величини вібрацій, що визначаються несучою здатністю конструктивних вузлів, в тому числі гранично допустимими напруженнями матеріалів.

Основи систематизованої оцінки технічного стану машин від рівня їх вібрації вперше були подані в [5]. Ці матеріали є складовою частиною або враховуються майже у всіх документах, що регламентують рівні вібрації різних типів машин і деталей, що мають обертові рухи.

Численні вітчизняні і зарубіжні науково-дослідницькі і конструкторські інститути та міжнародні організації розробляють критерії оцінки небезпеки вібрації обладнання.

Математична модель вібрації, розроблена на базі даних вібраційного стану однотипних ГПА, передбачає порівняння загального рівня віброшвидкості ГПА з допустимим значенням (нормою) віброшвидкості V_{ef} аналогічно середньоквадратичному значенню випадкової віброшвидкості.

Для граничного значення V_{zp} використовується правило “3 σ – трьох сігм”:

$$V_{ef} = K_1 \sigma(V_1) \sqrt{1 + 4(\alpha / K_1)^2 \sigma^2(V_1)}; \quad (1.2)$$

$$V_{zp} = 1.5 K_1 \sigma(V_1) \sqrt{1 + 7(\alpha / K_1)^2 \sigma^2(V_1)}; \quad (1.3)$$

$$\alpha = \frac{3K_p \omega_p^2 \omega_k^2 K \sqrt{H^2 + x_0}}{16K_k \omega^5 \Delta x_0 (1 - x_0)^3},$$

де $V_1 \sigma^2(V_1)$ – амплітуда і дисперсія першої роторної гармоніки віброшвидкості;

K, K_1 – коефіцієнти, зв’язані з видом розподілу густини роторних гармонік спектра вібрації;

K_p, K_k – коефіцієнти жорсткості ротора і корпусу;

ω_p, ω_k – власна частота ротора і корпусу;

					<i>MP.AKC -08.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		38

ω – частота обертання ротора;
 Δ – зазор підшипника ковзання;
 x_0 – відносний ексцентриситет цапфи підшипника ковзання, що відповідає положенню стійкої рівноваги.

Ці вирази були застосовані для нормування вібрації ГПА, що поставлялися ВО “Невський завод” з використанням даних експериментальних досліджень.

Корінь квадратний з дисперсії амплітуди першої роторної гармоніки визначали приблизно з гістограми бездефектних агрегатів у вигляді:

$$\sigma(V_1) = V_{\max} / 3,$$

де V_{\max} - максимальне значення амплітуди віброшвидкості на гістограмі.

Максимальне значення першої роторної гармоніки у вертикальному напрямі бездефектного агрегату ГТК-10 і ГТ-750-6 складає $V_1=11.2$ мм/с, $\sigma(V_1)=4$ мм/с.

Для вищезгаданого значення дисперсії розрахунок допустимого і граничного загального рівня віброшвидкості проводили при наступних початкових даних: $\Delta=0,32$ мм; $\omega=531$ І/с; $X_0=0,74$; $K_1=1,15$; $K=1.86$

$$\frac{K_p}{K_k} = 0.48 \frac{\omega_p^2 \omega_k^2}{\omega^4} = \frac{5}{8}.$$

Граничне значення загального рівня вібрації $V_{sp} = 11,4$ мм/с є межею, що допускає експлуатацію ГПА (за нормами вібрації $V_{sp} = 11.2$ мм/с).

Допустиме значення загального рівня віброшвидкості $V_d=4,5$ мм/с в перерахунку до існуючих норм відповідає градації "добре", яка характеризується мінімальною вірогідністю появи дефектів в контрольованих вузлах впродовж міжремонтного пробігу агрегату.

Розроблена методика застосовувалася для нормування вібрації всіх типів ГПА галузі, в тому числі і для тих, що проектуються. Для них дисперсія першої роторної гармоніки обчислювалася за допомогою даних з нормування

дисбалансу ротора. Діапазон $V_d \div V_{zp}$ розбитий на зони. Залежно від інтенсивності вібрації вузлів ГПА передбачені наступні якісні оцінки їх вібраційного стану: "відмінно", "добре", "допустимо", "вимагає прийняття заходів", "неприпустимо".

Враховуючи, що ГПА з судовим приводом знаходяться під постійним контролем систем вібродіагностування, оскільки відмови газотурбінних двигунів цих агрегатів обумовлені їх занадто високою вібрацією, у 1981 році були випущені тимчасові норми вібрації агрегатів ГПА-10 і методика вимірювання вібрації. Однак складність їх впровадження на той час полягала у відсутності штатної системи контролю вібрації.

Є методика визначення зон станів агрегату і прогнозу його працездатності на основі статистичної обробки даних діагностування з використанням регресійного аналізу. Представлені програми впорядкування статистичних матеріалів і обчислення середніх характеристик масиву агрегатів з напрацювання, визначення розподілу станів (гіпотеза про логнормальності), апроксимації тренда стану ГПА з напрацювання експоненціальною функцією методом найменших квадратів, побудови зон "справний" (працездатний), "несправний" (ремонтний) стан ГПА і прогнозу його працездатності.

Згідно регламенту вимірювань, необхідних для діагностування ГПА, технологічних обв'язок і загально станційного обладнання КС контрольні вимірювання 1-го рівня діагностування передбачають вимірювання загального рівня вібрації в п'яти штатних точках щодобово з метою контролю технічного стану силових елементів, в 34 штатних точках щоквартально з метою контролю загального вібростану ГПА. При цьому вибір штатних точок на корпусі ГПА та їх кількість не обґрунтовується.

Стосовно трубопровідної обв'язки, то регламентом рекомендується вимірювати рівень вібрації в точках, які розташовані рівномірно по довжині (в середньому через 1м), знову ж таки не обґрунтовуючи напрями

					<i>MP.AKCM -08.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		40

вимірювання вібрації, в тому числі при встановленні вібродавачів на опорах, на фундаментах опор, тощо.

Піднімаються питання нормування вібрації ГПА, а саме норми вібрації ГПА на заміну “тимчасових норм”, 1974 року вводу в дію. В цих нормах за параметр нормування також вибрана ефективна віброшвидкість. Прийнята градація по зонам інтенсивності вібрації, а також класифікація агрегатів і вибір максимально допустимих значень V_{ef} для різних класів базуються на рекомендаціях стандартів ISO і РЕВ.

Для конвертованих судових і авіаційних двигунів за основу градації за зонами інтенсивності вібрації прийняті значення встановлені заводами – виготовлювачами.

Нормування вібрації за загальним рівнем є не зовсім досконалим методом з точки зору задач вібродіагностики. Для точного поділу бездефектного і дефектного станів агрегатів необхідно застосувати нормування за найбільш характерними складовими частотного спектра, тобто нормування в полосах частот. Останнє повинне базуватися на значній кількості статистичних даних (спектрів вібрації значної кількості агрегатів) на базі яких можна отримати середньостатистичні (опорні спектри), що будуть з деякою імовірністю характеризувати нормальну роботу агрегату.

Середньостатистичні значення окремих складових спектра з врахуванням середньоквадратичних відхилень будуть вважатися мірилом бездефектного стану окремих вузлів, тобто можуть бути прийняті за основу для нормування.

Таким чином у вібродіагностиці ГПА можна виділити два підходи до визначення вібростану агрегату.

Перший передбачає використання для аналізу станів вузлів максимальної амплітуди в деякому, достатньо широкому діапазоні частот.

					<i>MP.AKCM -08.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		41

Другий – виділення в широкому діапазоні найхарактерніших частот (спектральні і кореляційні методи). Використання вказаних підходів залежить від можливостей і технічної оснащеності КС.

Для першого підходу характерне вивчення значення ефективної віброшвидкості і порівняння її з нормованими значеннями за існуючою методикою.

Другий (спектральний) підхід можна віднести до вирішення другої задачі діагностики – пошуку дефектів. При цьому діагностичною ознакою дефекту є значення ефективної віброшвидкості у вибраній зоні частотного спектру вузла, який підлягає діагностуванню.

Такий підхід має практичний вихід на методику вібродіагностики стану ГПА-10 і ГПА-10-01.

Вирішення другої задачі технічної діагностики – пошуку дефектів, вимагає визначення сукупності діагностичних ознак (параметрів чи характеристик), зміна яких відображає зміну технічного стану (структурного параметру) елемента чи вузла, що підлягає діагностуванню [1].

Стосовно ГПА такими елементами і вузлами є:

- ротор;
- лопатевий апарат;
- підшипникові вузли;
- корпус двигуна;
- опорна система;
- вузли з'єднання роторів силових турбін і нагнітачів;
- інші механізми.

Виявлення і дослідження діагностичних ознак станів елементів вузлів ГПА є достатньо складною науковою задачею. Особливості ГПА, що визначають специфіку вирішення вібродіагностичних задач не дозволяють отримати універсальні технічні рішення стосовно методів і засобів їх діагностування. Останнє визначає розробку методів вібродіагностики

					<i>MP.AKC -08.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		42

розглянутих вище елементів і вузлів ГПА, базуючись на методологічних задачах.

Сьогодні в цьому напрямку працює багато науковців, що обумовлює значну кількість наукових публікацій з напрямку вдосконаленню вібродіагностичних методів і засобів контролю ГПА великої одиничної потужності; розробці вібродіагностичних систем для компресорних установок та розробці методів вібродіагностики газотурбінних двигунів ГПА.

Стосовно окремих елементів і вузлів ГПА існують методи діагностування роторів, лопаткового апарату, зокрема діагностування послаблення ступені диска турбіни на вал та діагностування тріщин в робочих лопастях; підшипникових вузлів; опорної системи.

Для діагностування не розрахункових переміщень корпусів і газоходів ГПА за діагностичну ознаку зацемлення викидних газоходів ГТК-10-01 було вибрано відношення амплітуди вібрації фундаментальних колон і блока ТНТ

$$L = \frac{A_k}{A_{\text{ТНТ}}}, \quad (1.4)$$

де A_k – максимальне значення поперечної складової віброзміщення будь-якої з чотирьох задніх колон фундаменту;

$A_{\text{ТНТ}}$ – максимальне значення однієї з компонент віброзміщення (вертикальної, поперечно-горизонтальної, поздовжньої), виміряне на кришці блока ТНТ.

Реалізація задач контролю працездатності ГПА і пошуку дефектів його вузлів і елементів вимагає відповідних технічних засобів, розробці яких також приділяється значна увага.

Сьогодні ГПА вітчизняного та зарубіжного виробництва обладнані апаратурою, яка дозволяє вимірювати значення ряду параметрів, що характеризують найбільш важливі технологічні процеси та технічний стан основних вузлів.

					MP.AKCM -08.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		43

Сьогодні проводяться роботи по створенню систем діагностування, які працюють одночасно із системами агрегатної автоматики. На КС ДК “Укртрансгаз” експлуатується вібраційно-діагностичний комплекс ВДК для оцінки технічного стану ГПА.

Імпортні ГПА типу ГТК-10 укомплектовані системою захисту від вібрації нагнітача і турбокомпресора фірми “BENTLI NEVADA”.

Система призначена для захисту нагнітача від надмірної вібрації і осьового зсуву, здійснює контроль вібрації підшипників нагнітача у двох площинах і осьовий зсув ротора. Система захисту турбокомпресора включає контроль температури, частоту обертання, вібраційні параметри і інші.

Не дивлячись на різні схемотехнічні рішення, основу будь-якої системи вібродіагностування складають: вібродавачі, нормуючі підсилювачі з мультиплексором, ЦАП та мікропроцесор. Вибір останнього обумовлює функціональні можливості системи і визначається як її системним, так і прикладним програмним забезпеченням.

1.7 Висновки і постановка задачі

У першому розділі проаналізовано газоперекачувальний агрегат як об’єкт автоматизації та визначено основні джерела й характеристики вібраційних процесів. Показано обмеженість класичних методів аналізу вібраційних сигналів при роботі з нестационарними процесами та обґрунтовано доцільність застосування сучасних цифрових алгоритмів обробки даних.

Проведений аналіз сучасного стану проблеми віброконтролю і діагностування ГПА показав, що сьогодні існує велика кількість різноманітних систем діагностування окремих вузлів і елементів ГПА побудованих на базі реалізації методів віброакустичної діагностики.

					<i>MP.AКСM -08.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						44
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Перша задача діагностування контролю технічного стану ГПА реалізована лише для силових елементів – підшипників на основі методів вібродіагностики. Крім того, сьогодні відсутні методи контролю вібраційного стану трубопровідної обв'язки і визначення через нього напружено-деформованого стану з метою виявлення найбільш небезпечних, з точки зору подальшої відмови, її ділянок, а конструктивні особливості ГПА призводять у процесі його експлуатації до накладання вібраційних сигналів від розташованих поряд джерел вібрації і занулення корисних сигналів, що обумовлює необхідність їх фільтрації.

Отримані результати є підґрунтям для розроблення алгоритмів аналізу вібраційних сигналів та інтелектуальної системи діагностики, що розглядаються у наступних розділах.

Виходячи з викладеного, в магістерській роботі необхідно вирішити наступні задачі:

- проаналізувати відомі методи обробки сигналів, фільтрації, зокрема цифрової фільтрації.
- обґрунтувати вибір методу обробки вібраційних сигналів на основі швидкого “wavelet”- перетворення;
- розробити інтелектуальну систему аналізу вібраційних сигналів ГПА на основі цифрових алгоритмів обробки даних та його програмного забезпечення;
- провести апробацію розробленого алгоритму на експериментальних даних по вібраційному стану ГПА.

					<i>МР.АКСМ -08.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		45

2 ЦИФРОВІ АЛГОРИТМИ ОБРОБКИ ВІБРАЦІЙНИХ СИГНАЛІВ ГПА

2.1 Вимоги до цифрової обробки вібраційних сигналів ГПА

Вібраційні сигнали газоперекачувальних агрегатів (ГПА) формуються в умовах змінних режимів роботи та впливу зовнішніх завад і є результатом складної взаємодії механічних та аеродинамічних процесів.

Для таких сигналів характерні процеси ривчистості, широкосмуговість і наявність значного рівня шумів. Це зумовлює необхідність застосування спеціалізованих цифрових алгоритмів обробки сигналів, здатних виділяти інформативні компоненти та забезпечувати високу достовірність діагностики.

Тому до алгоритмів цифрової обробки висуваються вимоги стійкості до шумів, здатності працювати з нестационарними процесами та забезпечувати виділення інформативних ознак у широкому частотному діапазоні.

Додатковою вимогою є можливість реалізації алгоритмів у режимі, наближеному до реального часу, з метою використання їх у складі автоматизованих систем діагностики.

Цифрова обробка сигналів передбачає дискретизацію аналогового сигналу з частотою, що задовольняє теорему Котельникова, квантування за амплітудою та подальшу математичну обробку відліків сигналу.

Частота дискретизації повинна задовольняти умову:

Вибір параметрів дискретизації істотно впливає на точність спектрального та часово-частотного аналізу [7].

2.2 Дискретизація та квантування вібраційних сигналів

Перехід від аналогового вібраційного сигналу до цифрової форми здійснюється шляхом дискретизації та квантування.

					<i>МР.АКС -08.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

Дискретизація та квантування вібраційних сигналів – це ключові етапи їх перетворення з неперервного аналогового вигляду на цифровий, де дискретизація відбирає миттєві значення сигналу через рівні проміжки часу (визначає частота дискретизації), а квантування округлює ці значення до найближчого дозволеного рівня (визначає розрядність), створюючи цифрове подання, що дозволяє обробляти дані за допомогою комп'ютерів, але додає помилку квантування.

Частота дискретизації f_s повинна задовольняти умову теореми Котельникова:

$$f_s \geq 2f_{max} \quad (2.1)$$

де f_{max} — максимальна інформативна частота сигналу.

Недотримання цієї умови призводить до явища накладання спектрів (aliasing), що унеможливорює коректний спектральний аналіз. У практичних системах вібраційної діагностики ГПА частота дискретизації вибирається з запасом та зазвичай становить 8–20 кГц.

2.3 Цифрова фільтрація та придушення шумів

Під фільтрацією сигналів розуміють виділення корисного сигналу на фоні шумових компонент. Найбільш розповсюджений тип фільтрації – це частотна фільтрація. Якщо відома область частот, яку займають корисні сигнали, то достатньо виділити цю область та усунути ті області, які займає шум.

Фільтрацію даних спостережень також можна здійснювати з метою згладжування процесу, виділення складових в окремих частотних діапазонах і дослідження їх властивостей.

При фільтрації вимірюваних сигналів вирішуються два основних типи задач: виділення корисного сигналу, що спостерігається на фоні завад, і частотний аналіз.

					<i>MP.AKC -08.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						47
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Фільтрація може бути лінійною і нелінійною. При лінійній фільтрації в якості фільтрів використовуються динамічні лінійні системи, при нелінійній фільтрації – нелінійні. Лінійна фільтрація використовується набагато частіше, ніж нелінійна. Це пояснюється, по-перше, складністю аналізу нелінійних систем, і, по-друге, тим, що задовільною моделлю вірогідності більшості вимірювальних сигналів є гаусівські випадкові процеси, для яких лінійні фільтри забезпечують можливість виділення з необхідними показниками корисної інформації.

Найбільше поширення отримали реальні фільтри Гауса, Бесселя, Баттерворта, Чебишева, Кауера. Перевагу тому чи іншому типу фільтрів надають в залежності від мети його застосування.

Порівняльна характеристика фільтрів наведена в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Порівняльна характеристика фільтрів різних типів

Назва	Переваги	Недоліки
Фільтри Гауса	Відсутність складності в реалізації, відсутність коливачь з надмірною амплітудою в перехідній характеристиці	Великий час наростання перехідної характеристики, різке зниження амплітуди і помітний зсув фаз вже в області пропускання
Фільтри Баттерворта	Малий час наростання перехідної характеристики, пізній початок спаду амплітуди в області пропускання	Непропорційна частоті фазова характеристика вже на початку області пропускання, що викликає спотворення сигналу по часу; коливачь з надмірною амплітудою при перехідному процесі, більш тривалий час встановлення коливачь

Фільтри Чебишева	Крутий перехід з області пропускання до області затухання; АЧХ найбільш близько приближається до характеристики ідеального фільтра	Сильна хвилястість АЧХ в області пропускання; сильно змінна фазова характеристика в області пропускання; коливання з надмірною амплітудою і більший час встановлення коливань по перехідній характеристиці
Фільтри Кауера (еліптичні фільтри), подвійні фільтри Чебишева	Крутий перехід з області пропускання до області затухання; дуже круте падіння амплітуди	Хвилястість АЧХ в області пропускання і в області затухання; сильна залежність зсуву фаз від частоти

Перетворення Уолша, Адамара. До двомірного сигналу можна застосувати двомірний спектральний аналіз. Для цього сигнал можна перетворити в двовимірний спектр $S[n, m]$ по системі двовимірних базисних функцій $\varphi_{n,m}(k, l)$. В якості останніх можуть бути використані двовимірні дискретні функції Хаара, Уолша, Адамара та ряд інших базисів, багато з яких створюються для кодування визначеного виду двовимірних сигналів.

Критерій вибору базису для спектрального аналізу такий же, як і в випадку одномірних сигналів – система функцій повинна забезпечувати хорошу апроксимацію мінімальним числом елементів.

Наприклад, двовимірні функції Уолша, що мають вигляд:

$$\varphi_{n,m}(k, l) = wal(n, k)wal(m, l), \quad (2.2)$$

тоді пара двовимірних дискретних перетворень Уолша визначається виразами:

$$S[n, m] = \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{l=0}^{N-1} s[k, l] wal(n, k) wal(m, l), \quad (2.3)$$

$$n, m = 0, 1, \dots, N-1$$

$$s[k, l] = \frac{1}{N^2} \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{N-1} S[n, m] wal(n, k) wal(m, l), \quad (2.4)$$

$$k, l = 0, 1, \dots, N-1$$

Ці перетворення володіють тими ж властивостями, що й одновимірне дискретне перетворення Уолша. Для обчислення двовимірного ДПУ потрібно затратити N^4 операцій додавання.

Перепишемо вираз у вигляді:

$$S[n, m] = \sum_{k=0}^{N-1} wal(n, k) \sum_{l=0}^{N-1} s[k, l] wal(m, l), \quad (2.5)$$

Внутрішня сума

$$S_{\bar{n}\delta\delta}[k, m] = \sum_{l=0}^{N-1} s[k, l] wal(m, l) \quad (2.6)$$

представляє собою двовірну функцію, кожен рядок якої є не що інше, як одновимірне дискретне перетворення Уолша рядка k початкового сигналу.

Далі шуканий двовимірний спектр $S[n, m]$ визначається як одновимірне дискретне перетворення Уолша по всіх стовпцях $S_{\text{стр}}[k, m]$:

$$S_{\bar{n}\delta\delta}[n, m] = \sum_{k=0}^{N-1} S_{\bar{n}\delta\delta}[k, m] wal(n, k) \quad (2.7)$$

Таким чином, рядково-стовпцевий метод обчислення двовимірного дискретного перетворення Уолша складається з двох етапів, на яких послідовно обчислюється одновимірне дискретне перетворення Уолша над рядками початкового масиву, а потім над стовпцями одержаного проміжного масиву. Очевидно, що при обчисленні ДПУ можна застосувати алгоритми швидкого перетворення Уолша, при цьому загальне число операцій додавання скорочується до $2N^2 \log N$.

Зворотне двовимірне дискретне перетворення Уолша симетричне прямому і отже, може бути обчислене тим же методом в зворотному порядку.

Для підвищення відношення сигнал/шум застосовується цифрова фільтрація. У магістерській роботі використано смугову фільтрацію, яка дозволяє обмежити аналіз частотним діапазоном, характерним для дефектів обертових елементів ГПА.

Математична модель цифрового фільтра з нескінченною імпульсною характеристикою (IIR — Infinite Impulse Response) у часовій області описується лінійним різницеvim рівнянням із постійними коефіцієнтами:

$$y[n] = \sum_{k=0}^M b_k x[n-k] - \sum_{k=1}^N a_k y[n-k] \quad (2.8)$$

де $y(n)$ — поточне значення вихідного сигналу;

$x(n)$ — поточне значення вхідного сигналу;

$x(n-1)$ та $y(n-j)$ — попередні значення (відліки) вхідного та вихідного сигналів відповідно;

b_i — коефіцієнти прямого зв'язку (чисельника);

a_j — коефіцієнти зворотного зв'язку (знаменника);

M та N — порядки фільтра.

Застосування фільтрації дозволяє зменшити вплив низькочастотних коливань та високочастотного шуму, що підвищує точність подальшого спектрального аналізу.

2.4 Спектральний аналіз методом FFT

При аналізі стаціонарних сигналів, як правило, застосовують спектральний аналіз на основі швидкого перетворення Фур'є (ШПФ).

Спектральний аналіз методом FFT (Швидкого перетворення Фур'є) — це ефективний алгоритм обчислення дискретного перетворення Фур'є, який дозволяє швидко розкласти сигнал (наприклад, звук, вібрацію) на його складові частоти, виявляючи приховані періодичні коливання та частотний

вміст, що є критично важливим у цифровій обробці сигналів, телекомунікаціях та акустиці для розуміння структури сигналу.

FFT перетворює часовий сигнал у частотну область, роблячи його аналіз набагато швидшим і доступнішим, хоча має особливості при роботі з неперіодичними сигналами.

Основними проблемами при цьому є: збільшення відношення сигнал-шум, яке досягається шляхом усереднення і синхронного накопичення та мала роздільна здатність аналізу у високочастотній області, що вимагає застосування процедур детектування (аналіз огинаючої).

Найочевиднішим шляхом застосування ШПФ до аналізу нестационарних сигналів є розбиття реалізації на окремі короткі однакової довжини ділянки з подальшим застосуванням алгоритму ШПФ до кожного з них.

Цей прийом широко відомий в практиці аналізу сигналів як ШПФ на коротких реалізаціях (Short time FFT). Відмінною особливістю аналізу на коротких реалізаціях є необхідність застосування згладжуючих вікон (наприклад, вікон Хеммінга, Ханна, вікна "flet-top" і ін.).

Як відомо, без них посилюється вплив ефекту розтікання дискретних складових в бічні пелюстки. Обмежене число ділянок розбиття (число спектрів) обмежує роздільну здатність аналізу в часовій області, тому в подальшому було запропоновано ряд алгоритмів аналізу з ковзаючими згладжуючими і усереднюючими вікнами.

Найбільш відомим є ранній варіант аналізу з ковзаючим гаусовським вікном Габора, а найбільш розвинутий і ефективний аналіз цього типу відомий як розподіл Вігнера-Віллі (WW Distribution).

Застосування алгоритмів аналізу з ковзаючими вікнами дозволяє істотно збільшити роздільну здатність аналізу в часовій області при збереженні достатньої високої роздільної здатності в частотній області, проте зв'язано із значним збільшенням об'єму обчислень, а отже і із збільшенням

часу розрахунку.

Слід зазначити, що широке використання як базис розкладання гармонійних функцій (розкладання Фур'є) створює ілюзію його єдиності.

Спектральний аналіз є базовим методом ідентифікації дефектів, пов'язаних із періодичними коливаннями.

Дискретне перетворення Фур'є визначається формулою:

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)e^{-j\frac{2\pi kn}{N}}, \quad (2.9)$$

де N — кількість відліків сигналу.

Використання алгоритму FFT дозволяє зменшити обчислювальну складність та забезпечити ефективну реалізацію спектрального аналізу у комп'ютеризованих системах.

Амплітудні піки спектра відповідають характерним частотам дефектів, що використовується для їх діагностики.

2.5 Часово-частотний аналіз на основі вейвлет-перетворення

Для аналізу нестационарних вібраційних сигналів використовується вейвлет-перетворення, яке дозволяє локалізувати зміни спектральних характеристик у часі [12]. Неперервне вейвлет-перетворення має вигляд:

$$W(a,b) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)\psi^*\left(\frac{t-b}{a}\right)dt \quad (2.10)$$

Вейвлет-перетворення має перевагу перед перетворенням Фур'є перш за все за рахунок наявності властивості локальності у вейвлетів. При Фур'є аналізі в якості основних базисних функцій використовуються синуси, косинуси і комплексні експоненти. Вони простягаються вздовж всієї дійсної осі. В той же час вейвлети строго локалізовані. Це дозволяє аналізувати локальні властивості сигналу, тож як перетворення Фур'є не дасть ніякої інформації, скажімо, про місце, де частота сигналу змінилась.

На відміну від Фур'є, аналізуюча функція якого покриває всю часову вісь, двохпараметрична функція одновимірного вейвлет-перетворення добре локалізована і по часу і по частоті.

Вейвлет-перетворення одновимірного сигналу складається з його розкладу по базису, сконструйованому з визначеними властивостями солітоноподібної функції (вейвлета) посередництвом масштабних змін і переносів. Кожна з функцій цього базису характеризує як визначену просторову (часову) частоту, так і її локалізацію в часі.

Таким чином, на відміну від традиційно застосовуваного для аналізу сигналів перетворення Фур'є, вейвлет-перетворення забезпечує двовимірну розгортку досліджуваного одновимірного сигналу, при цьому частота і координата розглядаються як незалежні змінні.

При обробці сигналів зазвичай цікавляться величиною флуктуацій на різних масштабах, тому що по них можна отримати дані про походження цих флуктуацій.

1) Вейвлет-розклад володіє майже всіма перевагами перетворення Фур'є. За виключенням діагоналізації інваріантно-часових операторів. Можна сказати, що вейвлет-базиси близькі до діагональних для таких операторів.

2) В залежності від вибору функцій φ і ψ вейвлет-базиси можуть бути достатньо локалізованими як по частоті так і по часу. Параметр локалізації s (або 2^{-j}) грає важливу роль як для часової локалізації так і для виділення визначеного масштабу, що характеризує протікання процесу.

3) Вейвлет-базиси на відміну від базиса Фур'є – не єдині. Відомо багато вейвлет-базисів, властивості яких орієнтовані на вирішення різних задач. Для вирішення цієї проблеми було запропоновано метод віконного перетворення Фур'є.

Всі дослідження, які працюють в галузі розробки методів і засобів вібродіагностики ГПА відмічають, що виміряні за допомогою вібродавців в

штатних точках на корпусі ГПА сигнали, мають завади. Останнє обумовлюється конструктивними особливостями агрегату, що не дозволяє чітко розділити джерела вібрації, якими є його віброактивні елементи і вимагає застосування процедури фільтрації сигналів.

Дискретне вейвлет-перетворення дозволяє здійснювати багаторівневу декомпозицію сигналу та виділяти імпульсні складові, характерні для дефектів підшипників.

Апаратним аналогом одного з видів вейвлет-аналізу є багатоканальна смугова фільтрація сигналу при постійному відношенні ширини смуги фільтру до центральної частоти.

В даний час wavelet-перетворення широко застосовується в задачах обробки і кодування сигналів і зображень самої різної природи (мова, супутникові зображення, рентгенограми внутрішніх органів), розпізнавання образів, при вивченні властивостей поверхонь кристалів і нанооб'єктів і в багатьох інших випадках.

Основні питання використання wavelet методів відображені на сайті www.mathsoft.wavelets.com фірми MathSoft InC, та на сайті www.wavelet.org.

Практична реалізація wavelet-перетворень має декілька основних алгоритмів з яких найбільш популярним є алгоритм Малла (Mallat algorithm) швидкого wavelet-перетворення.

Як було відмічено вище він дає змогу в реальному часі проводити аналіз сигналу, його розділення на складові та відтворення за коефіцієнтами.

Цей алгоритм є реалізованим в програмному пакеті Matlab, який є частиною програмного забезпечення процесу збору, обробки і аналізу вібраційних сигналів, знятих з контрольних точок на корпусі ГПА.

Блок-схема моделі Mallat algorithm приведена на рисунку 2.1.

					<i>MP.AKC -08.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		55

Аналогічним чином проводилася фільтрація реалізацій вібраційних процесів, отриманих з контрольних точок ГПА, результати якої наведені нижче.

Здійснення вейвлет-перетворень в програмному пакеті Matlab можна проводити кількома різними способами.

Це може бути складання схеми фільтрації (з використанням блоків вейвлет-фільтрів) в Simulink, написання програмних М-файлів і запуск їх на виконання в командному вікні, або аналіз сигналів з використанням графічного інтерфейсу.

Розглянемо дослідження за допомогою написання М-файлів.

Для цього в меню Файл створимо новий М-файл, де й буде записуватись наша програма. Далі потрібно завантажити сигнал, який ми будемо аналізувати. Побудуємо графік нашого вхідного сигналу до перетворень (рис. 2.4).

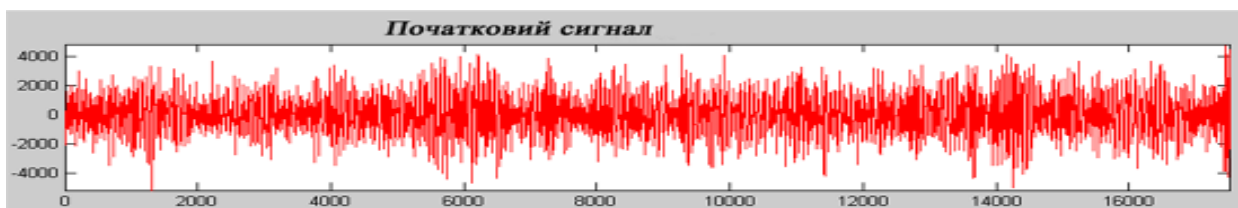


Рисунок 2.4 – Початковий сигнал

Будуємо набір апроксимуючих та детальних коефіцієнтів (рис. 2.5),

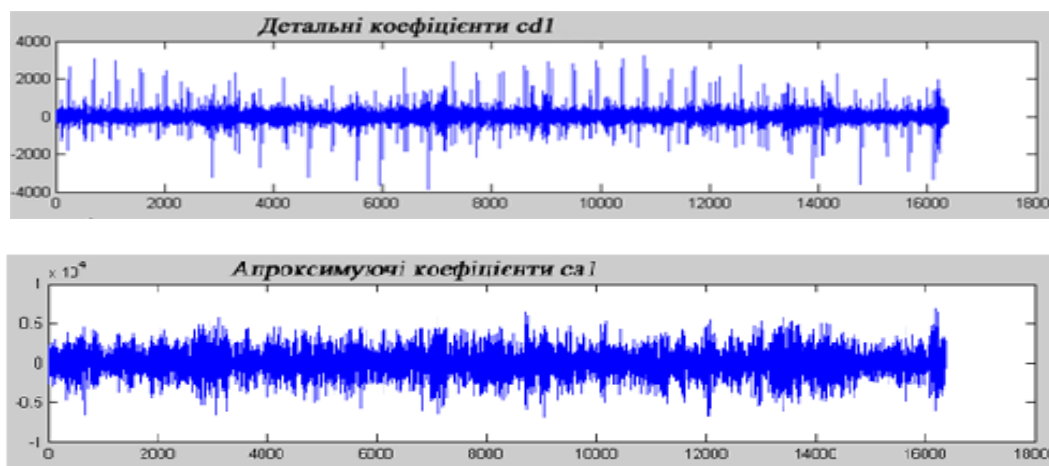


Рисунок 2.5 – Коефіцієнти апроксимації та деталізації

потім робимо однокрокове відтворення сигналу за коефіцієнтами $ca1$ та $cd1$, виконуємо декомпозицію сигналу з використанням перетворення haar до 3-го рівня (рис. 2.6)

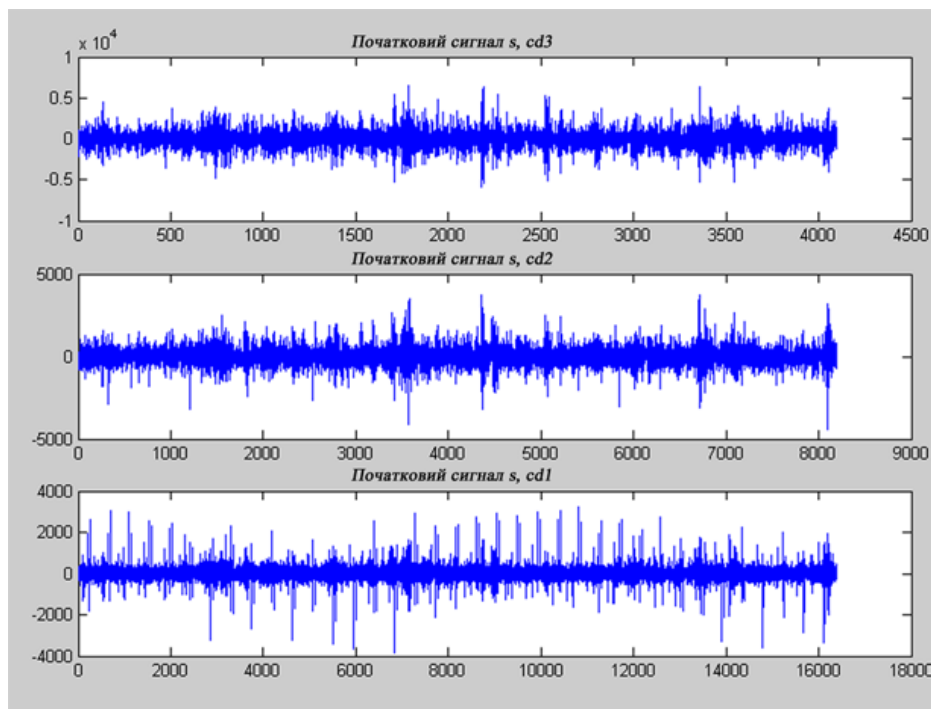


Рисунок 2.6 – Розкладання сигналу

Знаходимо апроксимуючі коефіцієнти для 3-го рівня з перетвореного сигналу, детальні коефіцієнти для 1,2,3 рівнів з перетвореного сигналу.

Відтворюємо низькочастотну складову сигналу для 3-го рівня з перетвореного сигналу, відтворюємо детальні (високочастотні складові сигналу), відтворюємо вихідний сигнал за всіма складовими.

Операція реконструкції здійснюється за допомогою функції `idwt`. Команда `idwt` представляє один рівень одновимірної вейвлет реконструкції з урахуванням вейвлета або особливості вейвлет реконструкції фільтрів (Lo_R і Hi_R) які ви обрали.

$X = idwt(cA, cD, 'wname')$ повертає один рівень реконструкції наближених коефіцієнтів на яких базується вектор X

Наприклад, програма для знаходження коефіцієнтів, одного рівня ДВП та для обчислення помилки між початковим та відтвореним сигналами виведе нам такий результат (рис. 2.7)

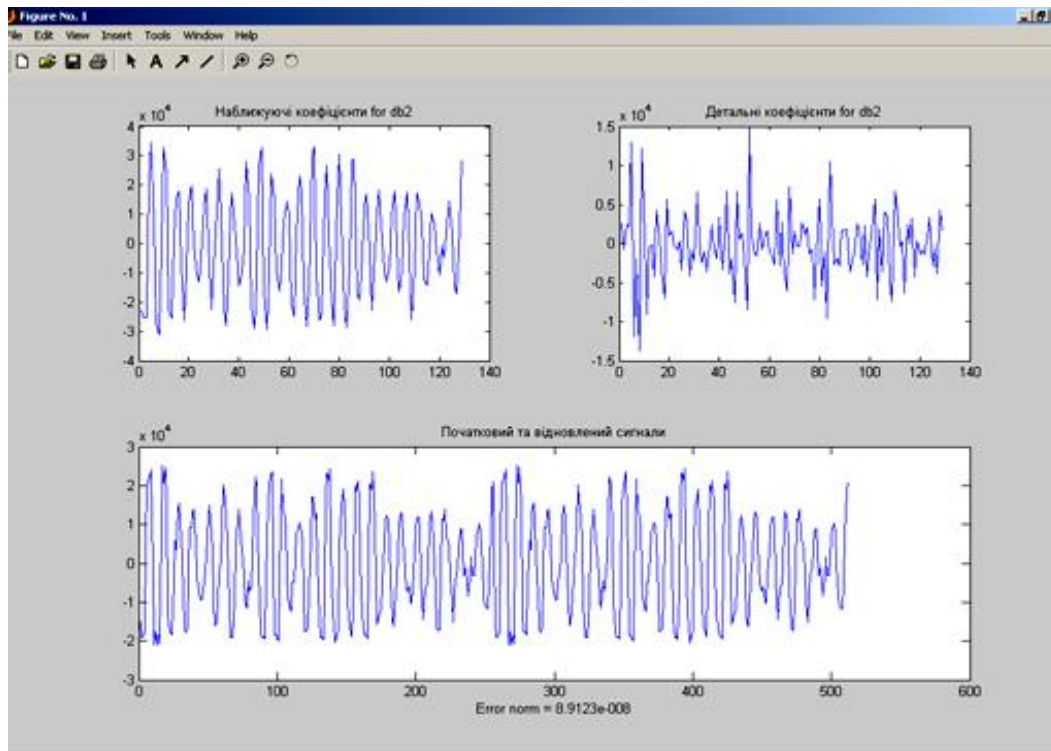


Рисунок 2.7 – Графіки дискретного вейвлет-перетворення

Тепер розглянемо як здійснюється ДВП з використанням графічного інтерфейсу. Для цього заходимо в Wavelet Toolbox і вибираємо в меню Wavelet 1D. У нас з'явиться вікно з набором інструментів та команд для здійснення аналізу сигналу.

Для завантаження сигналу в меню „Файл” вибираємо команду „Load signal” і вибираємо файл, з якого потрібно отримати сигнал.

Тепер наш сигнал є завантаженим до Wavelet Toolbox.

В правому верхньому кутку екрану маємо вікно, де вказано розмір нашого сигналу, і є вікна для вибору типу вейвлета та числа рівнів декомпозиції.

Виберемо вейвлет db1 і 1 рівень декомпозиції. Запустимо для аналізу кнопку Analyze.

"Separate Mode," який показує детальні і апроксимуючі коефіцієнти в розділених віконцях.

"Superimpose Mode," який показує детальні коефіцієнти накладені на один графік але зображені різними кольорами.

"Tree Mode," показує дерево декомпозиції і одну компоненту на вибір.

"Show and Scroll Mode," показує 3 вікна. Перше показує початковий сигнал який накладається на апроксимацію за вашим вибором. Інше показує детальні коефіцієнти які ви обрали. Третє вікно показує вейвлет-коефіцієнти.

Видалення шуму з сигналу.

Графічний інтерфейс оснащений інструментами, які дозволяють без зусиль видалити шум з сигналу. При виборі кнопки De-noise у нас з'явиться таке вікно (рис. 2.9):

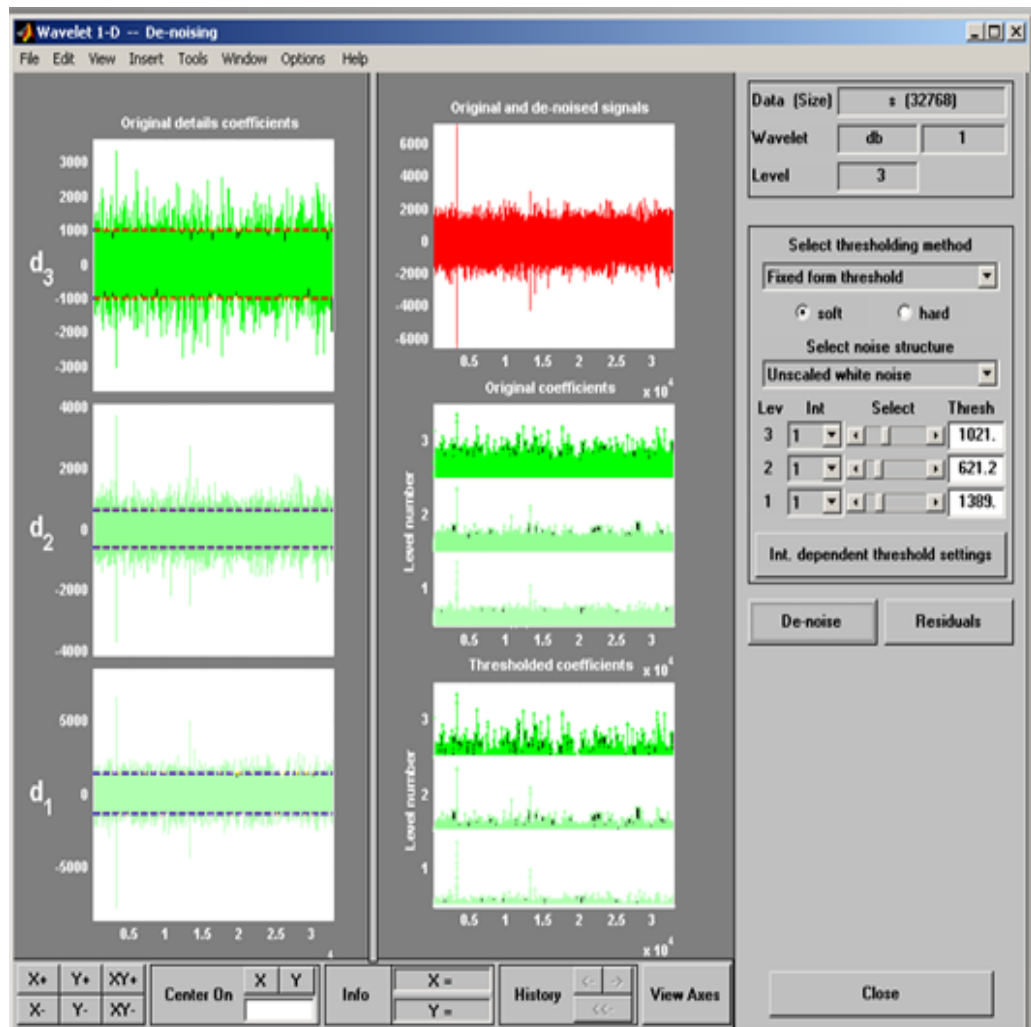


Рисунок 2.9 – Вікно для шумопригнічення сигналу

Операція реконструкції також здійснюється дуже легко, після натискання на кнопку Compress у нас з'явиться таке вікно:

Крім того, натиснувши кнопку Statistics в головному вікні, ми зможемо переглянути як відбувалася декомпозиція, побачити коефіцієнти на всіх рівнях і т. д. Наприклад, вигляд відтворених апроксимуючих коефіцієнтів на першому рівні.

					<i>MP.AKS -08.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		62

3 РОЗРОБЛЕННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ СИСТЕМИ АНАЛІЗУ ВІБРАЦІЙНИХ СИГНАЛІВ ГАЗОПЕРЕКАЧУВАЛЬНИХ АГРЕГАТІВ

3.1 Загальна концепція інтелектуальної системи діагностики

Інтелектуальна система аналізу вібраційних сигналів газоперекачувальних агрегатів призначена для автоматизованого контролю технічного стану обертового обладнання в умовах змінних режимів роботи.

Основною відмінністю запропонованої системи від традиційних систем контролю є використання сукупності цифрових алгоритмів обробки сигналів та елементів інтелектуального аналізу даних.

Концепція системи базується на поетапній обробці вібраційного сигналу: від збору та попередньої фільтрації до формування діагностичних ознак і прийняття рішення щодо технічного стану агрегату.

Такий підхід дозволяє зменшити вплив шумів і підвищити достовірність діагностичних висновків.

3.2 Структура інтелектуальної системи аналізу

Структурно інтелектуальна система аналізу вібраційних сигналів складається з п'яти взаємопов'язаних модулів:

1. модуль збору вібраційних даних;
2. модуль попередньої цифрової обробки;
3. модуль аналізу та виділення ознак;
4. модуль інтелектуального прийняття рішень;
5. модуль візуалізації та взаємодії з оператором.

Модуль збору даних забезпечує приймання сигналів від вібраційних датчиків, встановлених у контрольних точках газоперекачувального агрегату.

Подальша обробка сигналів виконується у цифровій формі, що забезпечує гнучкість алгоритмів та можливість їх програмної модифікації.

3.3 Алгоритм функціонування інтелектуальної системи

Алгоритм функціонування інтелектуальної системи аналізу вібраційних сигналів реалізується у вигляді послідовності етапів.

На першому етапі здійснюється попередня обробка сигналу, яка включає видалення постійної складової та смугову цифрову фільтрацію.

Це дозволяє зосередити подальший аналіз на інформативному частотному діапазоні.

На другому етапі виконується спектральний аналіз сигналу з використанням алгоритму швидкого перетворення Фур'є.

Отриманий амплітудний спектр використовується для виявлення характерних частот, що відповідають дефектам обертових елементів.

На третьому етапі здійснюється вейвлет-декомпозиція сигналу, яка дозволяє виділити імпульсні складові та локальні аномалії, характерні для дефектів підшипників.

На завершальному етапі формується вектор діагностичних ознак, який подається на вхід модуля прийняття рішень.

3.4 Формування та аналіз вектора діагностичних ознак.

Формування та аналіз вектора діагностичних ознак є ключовим етапом у створенні систем технічної діагностики, медичних експертних систем та алгоритмів машинного навчання.

Вектор діагностичних ознак формується на основі результатів спектрального та часово-частотного аналізу.

					<i>MP.AKC -08.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		64

До складу вектора включаються як часові, так і частотні характеристики сигналу.

Комбінування часових та частотних характеристик у єдиному векторі дозволяє отримати всебічне уявлення про стан об'єкта, оскільки вони розкривають різні аспекти природи дефекту.

1. Часові характеристики (Time-Domain Features) :

Описують загальну енергетику сигналу та його форму. Вони зазвичай чутливі до появи гострих імпульсів та загального зносу.

- Пікове значення та розмах: Дозволяють виявити ударні процеси (наприклад, тріщини в підшипниках).

- Середньоквадратичне значення (RMS): Відображає загальну потужність вібрації або сигналу; є базовим індикатором справності.

- Коефіцієнт ексцесу (Kurtosis): Вказує на наявність гострих піків (імпульсного шуму), що часто свідчить про ранні стадії руйнування поверхні.

- Коефіцієнт амплітуди (Crest Factor): Відношення піка до RMS, допомагає ідентифікувати зародження дефектів при низькому загальному рівні шуму.

2. Частотні характеристики (Frequency-Domain Features):

Дозволяють локалізувати дефект, прив'язуючи його до конкретного вузла (через частоту його роботи).

- Амплітуди на характерних частотах: Наприклад, зростання амплітуди на обертовій частоті вказує на дисбаланс, а на гармоніках зубчастого зачеплення - на знос шестерень.

- Спектральні моменти: Центроїд спектра (середня частота) та середньоквадратична ширина спектра.

- Енергія в частотних смугах: Дозволяє виділити специфічні високочастотні зони, де проявляється тертя або кавітація.

Переваги змішаного вектора:

					<i>MP.AKC -08.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		65

1) Підвищена достовірність: Часові параметри можуть зафіксувати факт несправності, а частотні — визначити її причину та місце.

2) Виявлення дефектів на різних стадіях: Наприклад, ексцес (час) добре реагує на зародження мікротріщин, тоді як спектральні складники (частота) стають інформативними вже при розвиненому дефекті.

3) Стійкість до завад: Одночасний аналіз двох доменів дозволяє відфільтрувати випадкові шуми, які можуть імітувати несправність лише в одному з представлень.

3. Синтез вектора:

При формуванні такого вектора важливо виконувати процедуру нормалізації, оскільки значення амплітуд спектра та коефіцієнта ексцесу можуть відрізнятися на кілька порядків. Це критично для коректної роботи алгоритмів класифікації (таких як SVM або k-NN).

Таблиця 3.1 – Склад вектора діагностичних ознак

№	Ознака	Фізичний зміст
1	RMS	Загальний рівень вібрації
2	Peak	Максимальна амплітуда
3	Crest factor	Імпульсність сигналу
4	FFT peak	Характерна частота дефекту
5	Wavelet energy	Енергія імпульсних складових

Застосування комплексного набору ознак дозволяє підвищити точність класифікації технічного стану агрегату.

3.5 Інтелектуальний модуль прийняття рішень

Модуль прийняття рішень реалізує класифікацію технічного стану газоперекачувального агрегату на основі аналізу вектора діагностичних ознак.

У магістерській роботі використано правилний підхід, який базується на порівнянні поточних значень ознак з еталонними.

Технічний стан агрегату класифікується за такими класами:

- справний стан;
- допустимий стан;
- передаварійний стан;
- аварійний стан.

Результати класифікації можуть бути використані для формування рекомендацій щодо технічного обслуговування або зупинки обладнання.

3.6 Дослідження роботи системи у середовищі MATLAB

Для перевірки працездатності розробленої інтелектуальної системи виконано моделювання її роботи у середовищі MATLAB. У якості вхідних даних використовувалися модельні вібраційні сигнали, що імітують різні технічні стани газоперекачувального агрегату.

У процесі моделювання здійснювалася цифрова фільтрація сигналів, спектральний аналіз та вейвлет-декомпозиція. Отримані результати дозволили підтвердити ефективність запропонованого підходу та можливість автоматизованого виявлення дефектів.

При записі вібросигналів з давача застосовувався програмний продукт WaveLab, спеціально розроблений для роботи з акустичними сигналами. На рисунку 3.1 та 3.2 зображено часові розгортки та частотний спектр записаних вибірок вібраційного сигналу.

					<i>MP.AKC -08.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		67

– усунення дрібних компонент сигналу, які, як правило, є наведеними шумами, за допомогою Wavelet–перетворення з метою очистки частотного спектру від випадкових компонент.

3. Використання розробленого програмного забезпечення передбачало:

– побудову частотних спектрів двох вибірок (без фільтру та відфільтрованої) за допомогою швидкого перетворення Фур'є (ШПФ) та їх аналіз за частотними гармоніками кратних 1, 2, 3, 4 та 1/2, 1/3, 2/5, 1/4 основній роторній частоті;

– вибір інформативної смуги частот та аналіз ефективної віброшвидкості V_{ef} в цій смузі та в усьому частотному діапазоні.

Для покращення оцінки частотних спектрів розглянемо можливість їх розбиття на низькочастотну та високочастотні складові за допомогою вейвлет-перетворення та їх аналіз.

В середовищі Matlab є можливість програмування на вбудованій мові програмування, на якій було написано програмний модуль, блок схема якого наведена на рисунку 3.3, який дає змогу відокремити низькочастотну та високочастотні складові сигналу, що в подальшому дозволяє після побудови їх частотних спектрів, проаналізувати зміни по кожній складовій окремо, непомітні в загальному сигналі.

Текст програми розкладу вібраційного сигналу на складові наведений в Додатку А.

За допомогою даної програми було виконано розділення сигналу з контрольної точки № 2 на низькочастотну та три високочастотні складові.

Низькочастотна складова не викликала значного інтересу, а високочастотні складові (рисунок 3.4) відрізнялись між собою досить помітно навіть на часовій розгортці сигналу, а після проведення швидкого перетворення Фур'є цих складових помітними на фоні загального шуму стали гармоніки вищих порядків.

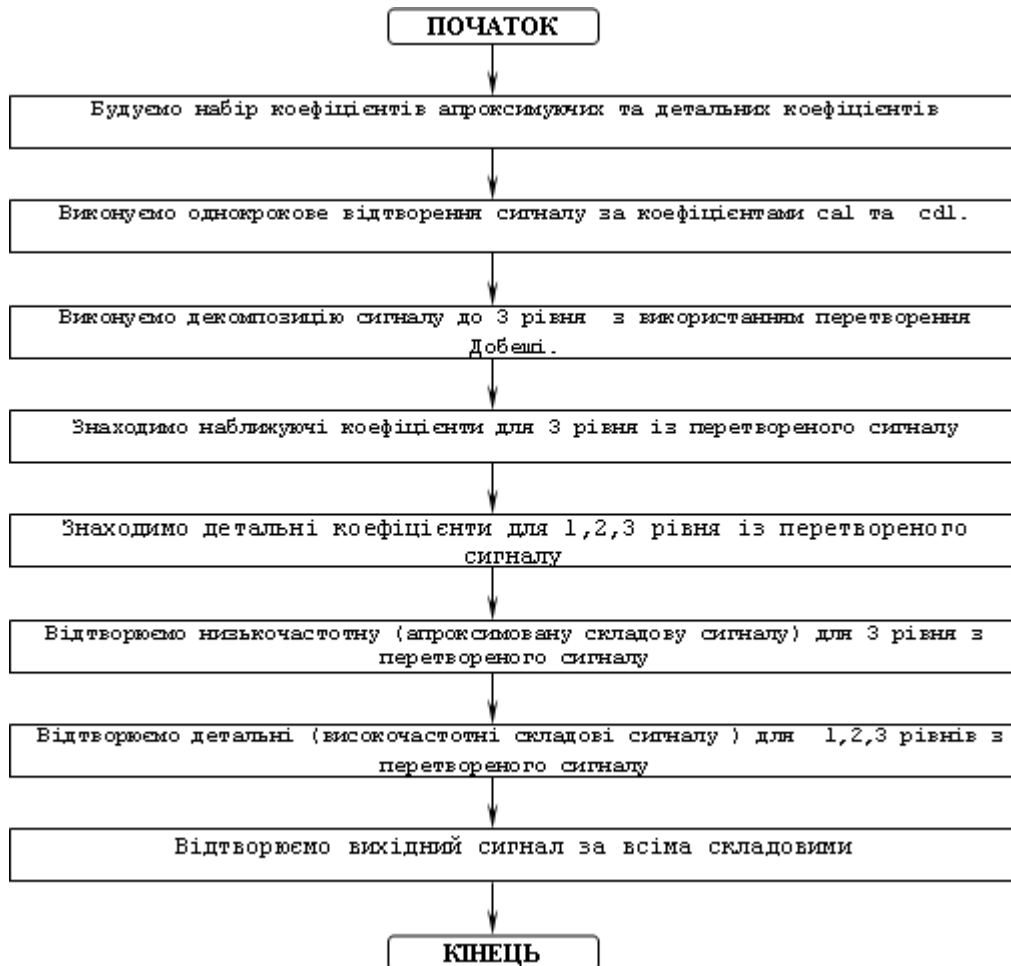


Рисунок 3.3 – Структурно-функціональна схема модуля аналізу спектрів

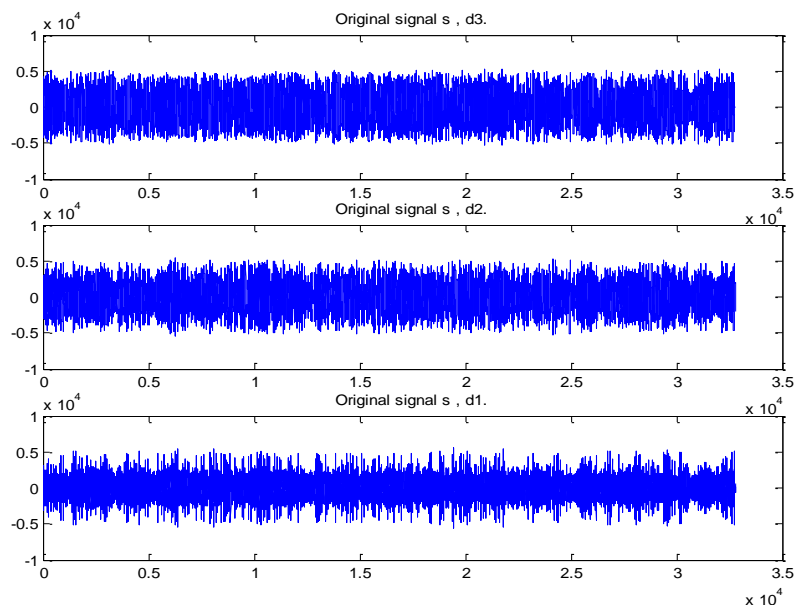


Рисунок 3.4 – Високочастотні складові сигналу на перших трьох рівнях вейвлет-розкладу

В подальшому при аналізі вібраційних сигналів використовувався програмний пакет Matlab з розробленим програмним модулем.

Розроблене спеціальне програмне забезпечення є складовою частиною програмного забезпечення системи контролю вібраційного стану ГПА.

3.7 Розробка програмного забезпечення для інтелектуальної системи аналізу вібраційних сигналів ГПА

Пакет програмного забезпечення системи контролю складається з наступних функціональних модулів:

- Модуля збору вібраційних сигналів з 34 контрольних точок через 32 вібродавачі.
- Модуля перегляду часової розгортки записаних вібросигналів
- Модуль занесення даних в базу даних та побудови схем прив'язки характерних точок до вібродавачів.
- Модуля огляду записів з бази даних (включаючи інформацію про дату останнього запису в кожній точці).
- Модуля аналізу та обробки спектрів за гармонічними складовими.
- Модуля автопобудови спектрів на основі записаних вібраційних сигналів

Для завантаження програми потрібно запустити файл Gra_16.exe, який знаходиться в тому каталозі, куди було проведено інсталяцію програмного забезпечення.

Після запуску на екрані з'являється головне вікно програми, показане на рисунку 3.5. Основними складовими частинами вікна є функціональна схема ГПА з нанесеними на ній контрольними точками, яка розміщена з правого боку вікна, одразу ж під нею розміщена інформаційна панель, дерево каталогів бази даних (в лівій частині вікна) та кнопочна панель для операцій з базою даних (в нижній частині вікна), а також панель вибору

Панель дерева каталогів, яка дає можливість навігації по базі даних, поділена на дві частини: верхня – відображає дерево каталогів та вибраний поточний каталог, нижня – виводить список файлів, які містяться в даному каталозі. Щоб перейти до потрібного каталогу з записами користувачу необхідно курсором миші вибрати бажаний каталог з дерева та стати на нього, після чого в списку записів, розміщеному нижче з’являться всі знайдені записи вібросигналів у цьому каталозі, а на функціональній схемі – синім кольором будуть виділені всі точки, що відповідають цим записам.

Переглянути записи користувач має змогу або двічі клікнувши мишкою на назві запису, або безпосередньо вибравши підсвічену точку на функціональній схемі, натиснувши на неї та обравши потрібний напрямок. Аналогічно проводиться вибірка точок і в режимі занесення даних для прив’язки до файлу, та в режимі запису даних для прив’язки до давача.

Панель функціональних кнопок (рисунок 3.6) призначена для одифікації, перейменування, групування, видалення записів з бази даних, а також для виклику діалогових вікон властивостей файлу, допомоги по програмі та установок програми.

Панель містить наступні кнопки (рисунок 3.6):

F1 Допомога	- виклик вікна допомоги по програмі;
F4 Атрибути файла	- виклик діалогового вікна атрибутів;
F6 Перейменувати	- перейменування запису в базі даних;
F7 Новий каталог	- створення нового каталогу в базі даних;
F8 Вихід	- вихід з програми;
F9 Установки	- виклик установок програми;
F10 Аналізатор	- виклик вікна аналізатора спектрів.

Рисунок 3.6 – Панель функціональних кнопок

Клавіша F1 призначена для виклику довідкової інформації по користуванні програмним забезпеченням. Вікно атрибутів файлу (каталогу), що викликається клавішею F4 дає змогу проглядати інформацію про файл.

Клавіша F10 викликає вікно аналізатора спектрів, загальна блок-схема роботи даного модуля показана на рисунку 3.8, а зовнішній вигляд на рисунку 3.9, вікно викликається при огляді вибраного запису (режим роботи програми “Огляд”), та при прив’язці вибраного файлу з даними до контрольної точки (режим “Занесення”).

В центрі вікна розміщено графік на якому відображається спектр сигналу, або його часова функція, режим відображення можна вибирати на панелі в правому верхньому куті вікна, під нею розміщена інформаційна панель наведена на рисунку 3.10, на якій відображається значення частот та амплітуд основних цілих та дробових гармонік спектру.

					<i>MP.AKS -08.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		75

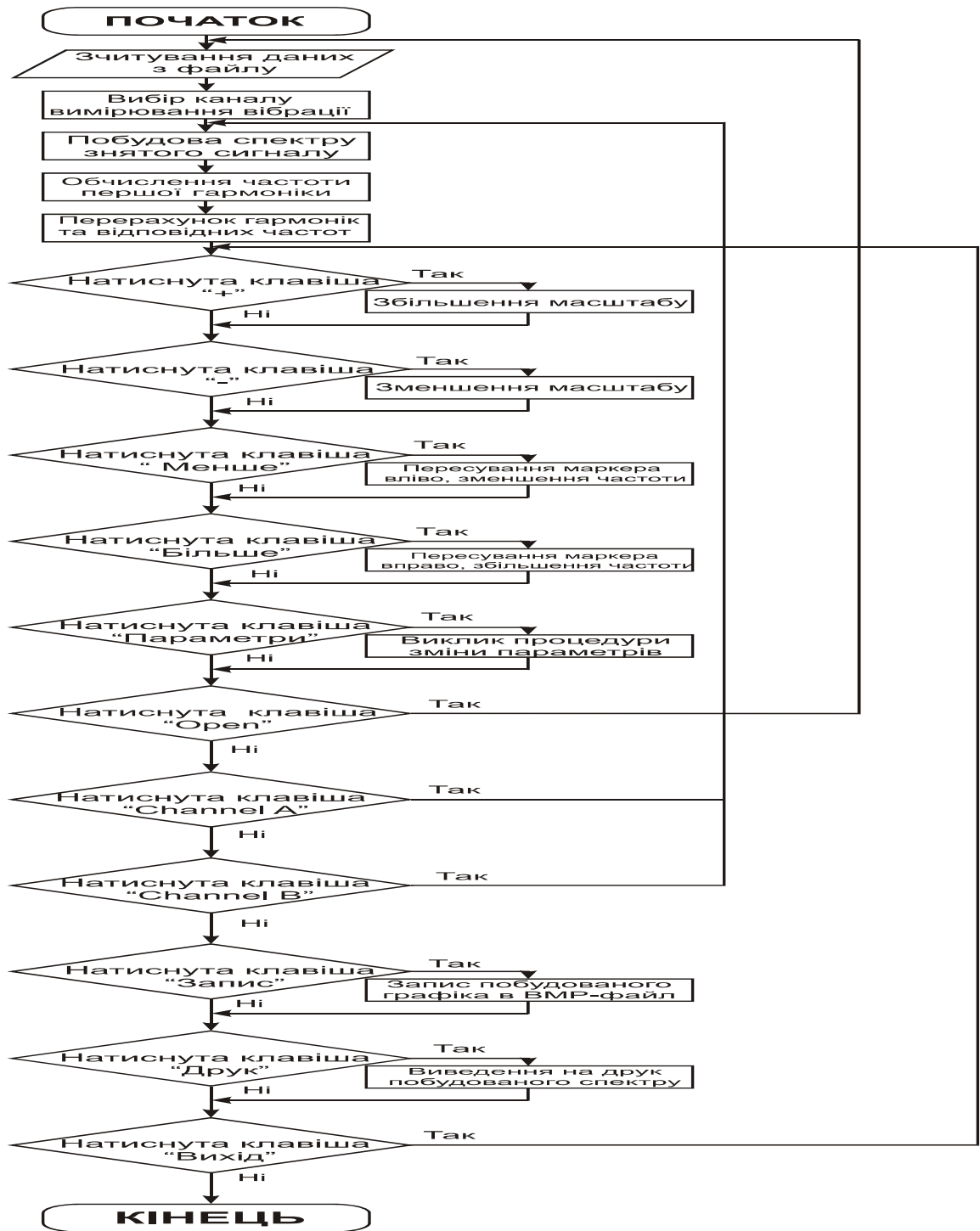


Рисунок 3.8 – Блок-схема модуля аналізатора спектрів

В третьому режимі роботи – при записі вібросигналів, який вибирається на панелі вибору режимів роботи, вікно програми має вигляд, що показаний на рисунку 3.13. В центральній частині вікна розміщена схема ГПА, під нею показана інформаційна панель, де відображається інформація про поточну контрольну точку та час останнього запису з неї. Зліва від схеми розміщена панель вибору давачів та побудови схем привязки давачів до контрольних точок, оскільки технічна частина системи передбачає підключення 32 давачів, а кількість контрольних точок становить 34, причому потрібно вимірювати в кожній точці вібрацію в 3-ох напрямках, тому було прийняте рішення, щоб кожен давач можна було прив'язати до довільної точки та напрямку, для чого й служить ця панель.

Щоб прив'язати давач до точки, потрібно двічі клікнути мишкою на номері потрібного давача, після того на схемі ГПА з'являться всі контрольні точки та напрямки, далі слід вибрати на схемі потрібну точку та натиснувши на неї вибрати напрям – в результаті навпроти номера давача з'явиться напрям та номер вибраної точки та відмітка про те, що даний давач є включений в схему прив'язки.

Під списком давачів розміщені наступні кнопки:

- *скасувати зміну* – не прив'язувати поточний давач до точки (доступна коли процес прив'язки розпочався, але ще не завершився);
- *відмітити всі* – відмітити всі давачі в списку, тобто включити їх всіх в схему прив'язки при запису;
- *очистити всі* – забрати відмітку для всіх давачів в списку, тобто виключити їх всіх з схеми прив'язки при запису;
- *завантажити* – завантажити з файлу раніше збережену схему прив'язки;
зберегти – зберегти в файл поточну схему прив'язки давачів.

					MP.AKC -08.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		80

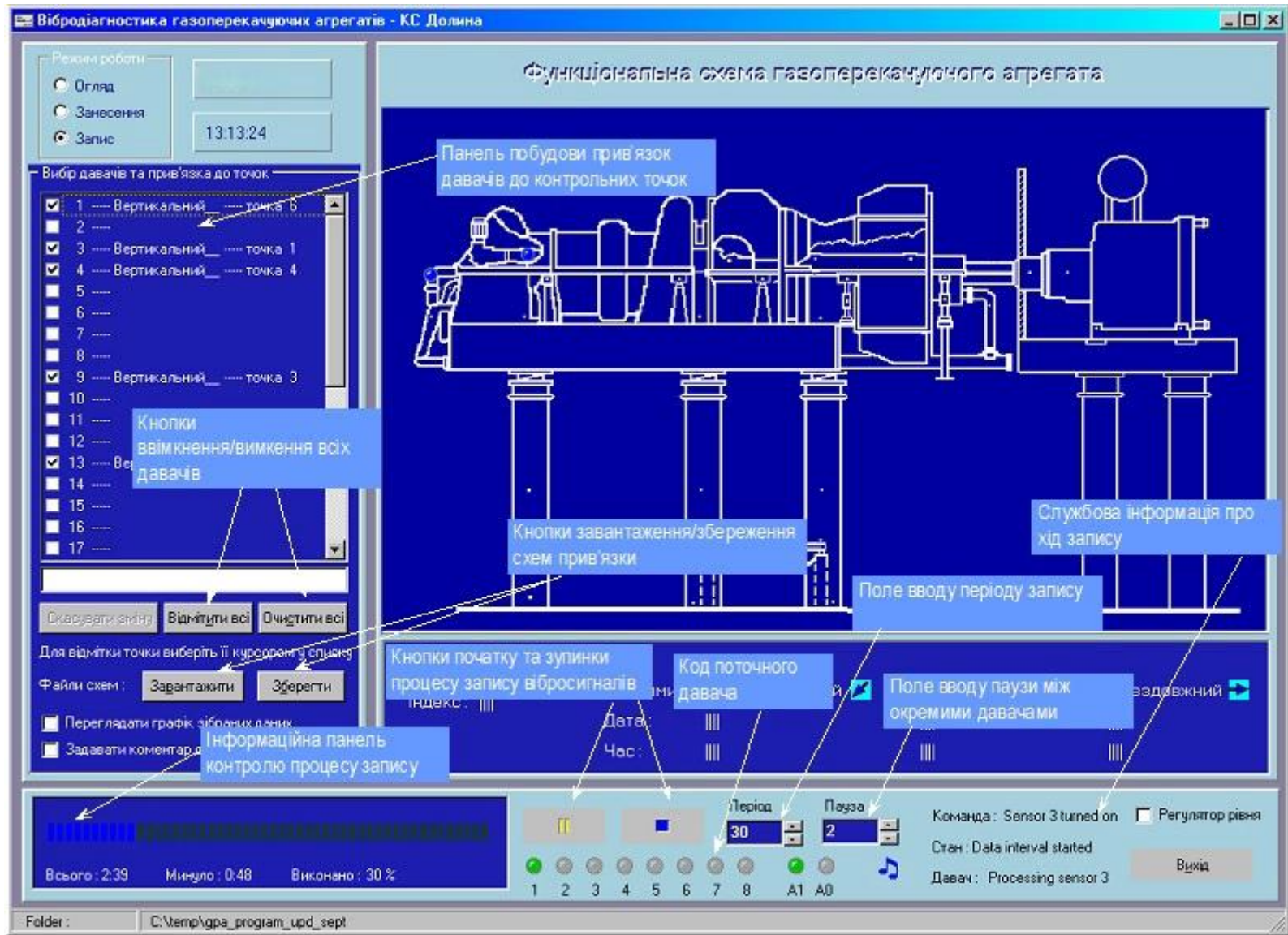


Рисунок 3.13 – Робота програмного забезпечення в режимі реєстрації даних

Під кнопками розміщені два вимикачі:

- “задавати коментар до запису” – якщо ввімкнений цей вимикач то при початку запису програма пропонує оператору ввести рядок тексту який буде поміщений в журнал записів як коментар до зібраних даних;
- “переглядати графік зібраних даних ” – якщо ввімкнений цей вимикач то після завершення процесу запису на екрані з’являється форма, показана нижче, на якій оператор може переглянути часову розгортку сигналу з вібродавачів, яка також містить в ряді випадків діагностичну інформацію, яка є доповнюючою для аналізу в ряді випадків, до частотного спектру.

Форма (рисунок 3.14) містить графік, на якому виводиться часова розгортка сигналу, справа від графіка розміщений список всіх давачів, з яких збирались дані в даному процесі запису, оператор може переглянути сигнал від кожного давача вибравши його в списку за допомогою мишки.

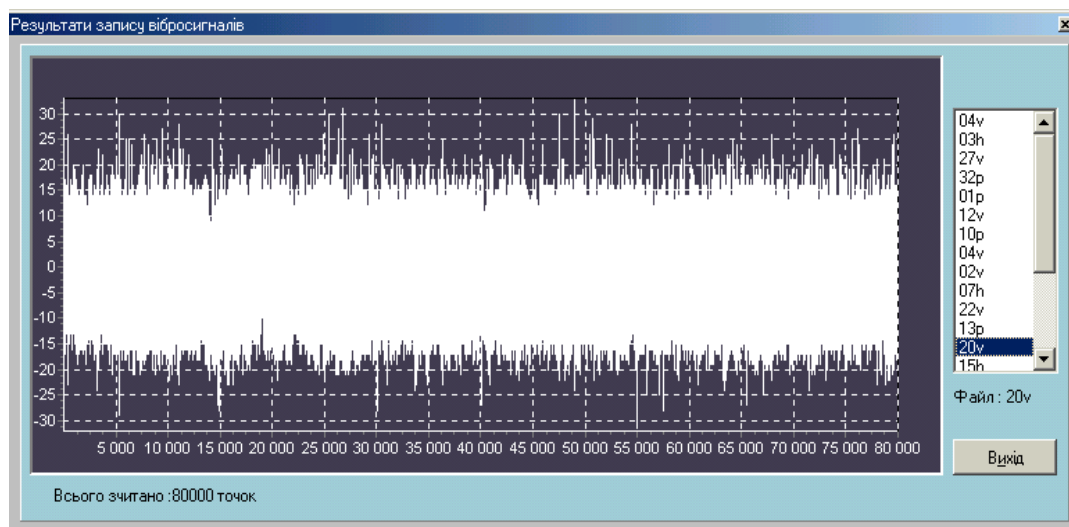


Рисунок 3.14 – Візуалізація сигналу у часовій області

Графік можна масштабувати, виділяючи необхідну ділянку мишкою, а саме потрібно вибрати мишкою верхній лівий кут ділянки, натиснути ліву кнопку миші та не відпускаючи її провести курсором до нижньої правої точки після чого відпустити клавішу) та скасовувати зміну

масштабу (виділяючи ділянку від верхнього правого до нижнього лівого кута екрану).

В нижній ділянці головної форми програми, наведена інформаційна панель контролю процесу запису (рисунок 3.15), що служить для задання параметрів запису та контролю стану процесу запису.

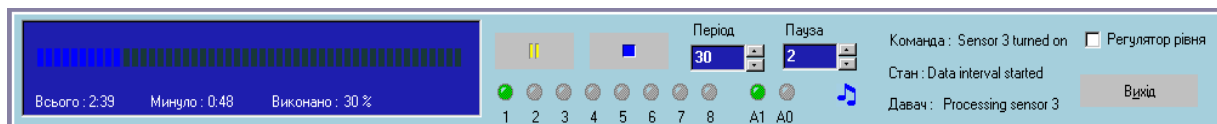


Рисунок 3.15 – Панель управління записом сигналів

На панелі в центрі розміщені кнопки початку та зупинки процесу запису, правіше від кнопок розміщені поля для вводу періоду запису з кожного давача та паузи між записами. Час вводиться в секундах. В лівій частині панелі розміщений індикатор ходу запису, весь прогнозований час запису, час що минув та значення в відсотках від прогнозованого часу.

Під кнопками розміщені індикатори, що відображають стан блоку давачів, а саме двійковий код вибраного в даний момент давача. Кнопка викликає вікно встановлення рівня запису з лінійного та мікрофонного входів, зовнішній вигляд якого показаний на рисунку 3.16.



Рисунок 3.16 – Форма управління рівнем запису

На цій формі розташовані повзунки-регулятори рівня сигналу та наступні кнопки:

- “Показати” – відобразити під поточними значення рівнів запису ті значення, що вказані в вікні установок;
- “Відновити” – встановити значення рівнів запису до тих значень, що вказані в вікні установок;
- “Вихід” – закрити форму.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Щоб провести процес запису вібросигналів з давачів оператору потрібно спочатку завантажити з файлу, або створити власну схему прив'язки, виставити значення інтервалу збору даних та паузи між давачами і натиснути кнопку початку запису. Після завершення процесу запису буде проведено автоматичну побудову спектрів та запис їх в базу даних.

3.8 Результати апробації алгоритмічного і програмного забезпечення системи діагностування ГПА

За результатами проведення обробки часових реалізацій записів вібраційних сигналів на агрегаті типу ГТК-10-4 на КС Долинського ЛВУМ будувалися частотні спектри з метою виявлення в них інформаційних ділянок, які в подальшому послуговують основою для розрахунку значення ефективної віброшвидкості V_{ef} по кожній з контрольних точок.

В процесі проведення експерименту на ГПА було штатно встановлено п'ять давачів віброприскорення типу MV-39 в точках, обумовлених технологічним регламентом. Запис вібраційних сигналів з решти точок проводився за допомогою розробленої системи.

Так, 1-й давач (№0) – встановлений в точці № 6 (маслопровід), 2-й давач (№3) в контрольній точці №1 (місце установки 1-го опорного підшипника), 3-й давач (№13) в контрольній точці №2 (місце установки 2-го опорного підшипника), 4-й давач (№9) в контрольній точці №3 (ТНТ 3-й підшипник), 5-й давач (№4) в контрольній точці №4 (опорний 4-й підшипник.).

Після установки давачів та проведення пуску агрегату здійснювали запис вібросигналів при різних режимах роботи агрегату. Витяг з журналу записів режиму роботи агрегату наведено нижче.

Крім нормального режиму з варіацією в сторону збільшення та зменшення частоти обертання валу турбіни ГПА було здійснено запис

					<i>MP.AKC -08.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						84
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

режиму роботи з підвищеним навантаженням на ГПА штучно створеним закриттям байпасного крана, режиму роботи при виникненні явища помпажу та режиму зупинки агрегату.

Під час аналізу побудованих спектрів прийняли до уваги значення:

- синхронних гармонік спектру, а саме першої гармоніки f_0 , яка вказує найперше на дисбаланс обертових мас різної природи; другої $2 f_0$, що вказує на якість центрування агрегатів, кріплення фундаменту, $3f_0 \div 8 f_0$ – різні механічні дефекти, більше $10 f_0$ – тертя в ущільненнях.

- субгармонік ($1/nf_0$) – ослаблення натягу і посадки деталей. Із них особливу увагу було звернуто на $\frac{1}{2} f_0$ гармоніку – так звану масляну гармоніку.

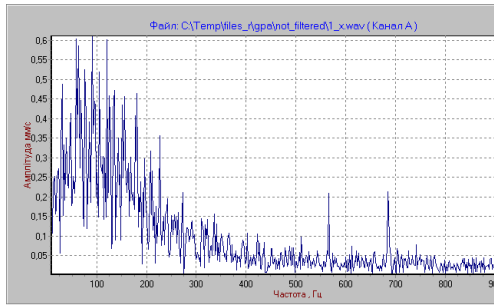
- дробових гармонік ($2/5f_0, 3/4f_0$) – які, як правило, обумовлюють процеси зачіпання, ослаблення, обкатування, тощо.

В процесі аналізу побудованих спектрів було відзначено зростання високочастотної складової та гармонік $4 + \frac{1}{2} f_0$ та $1 + \frac{1}{3} f_0$ та зникнення $2 + \frac{1}{4} f_0$ гармоніки в контрольній точці № 1, що обумовлене підвищенням навантаження на ГПА.

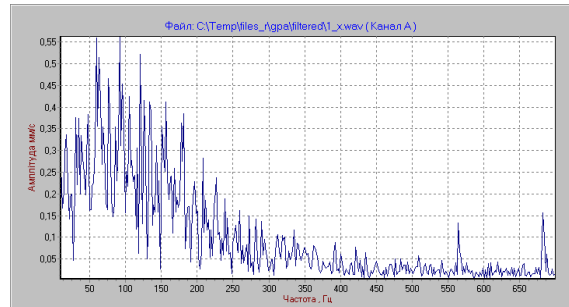
Аналізуючи нормальний режим роботи ГПА було відмічено зростання після переведення агрегату в інший режим роботи $1 + \frac{1}{3} f_0, 6 + 1/2 f_0$ та $7f_0$ гармонік на 2 підшипнику

При переведенні агрегату в інший технологічний режим виникло явище помпажу, що відобразилось на спектрі значним ростом рівня вібрації по всіх контрольних точках, зокрема на спектрі контрольної точки № 1 (1-й опорний підшипник) зросли на $2f_0$ та $1 + \frac{1}{3} f_0$ гармоніки, спектр точки № 2 (2-й підшипник) характерний зростанням рівня гармонійних і субгармонійних складових на високочастотній ділянці спектра, зокрема 5-

					MP.AKC -08.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		85



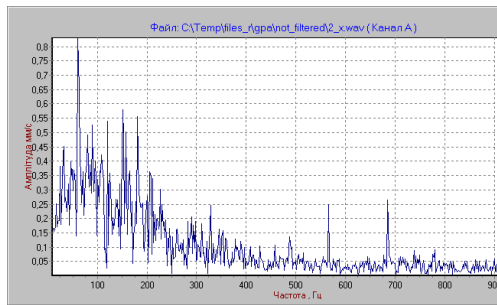
а)



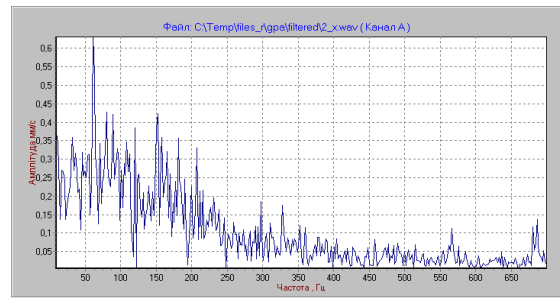
б)

Рисунок 3.17 – Спектрограми вібраційних сигналів

а) – у смузі 0-1000Гц без фільтрації; б) – у смузі 0-700Гц з фільтрацією сигналів, отриманих з 1-ої точки контролю



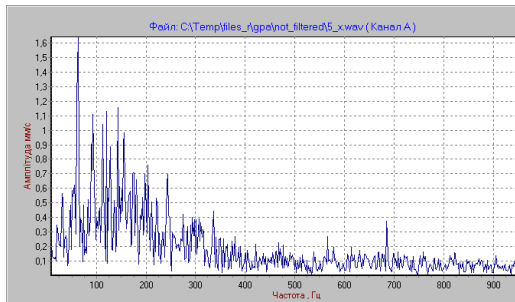
а)



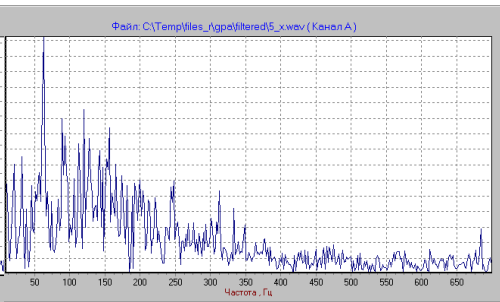
б)

Рисунок 3.18 – Спектрограми вібраційних сигналів

а) у смузі 0-1000Гц без фільтрації; б) у смузі 0-700Гц з фільтрацією сигналів, отриманих з 2-ої точки контролю



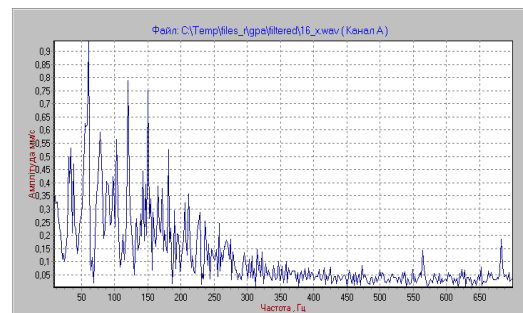
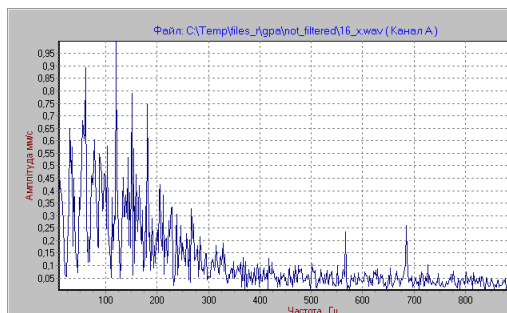
а)



б)

Рисунок 3.19 – Спектрограми вібраційних сигналів

а) у смузі 0-1000Гц без фільтрації; б) у смузі 0-700Гц з фільтрацією сигналів, отриманих з 5-ї точки контролю

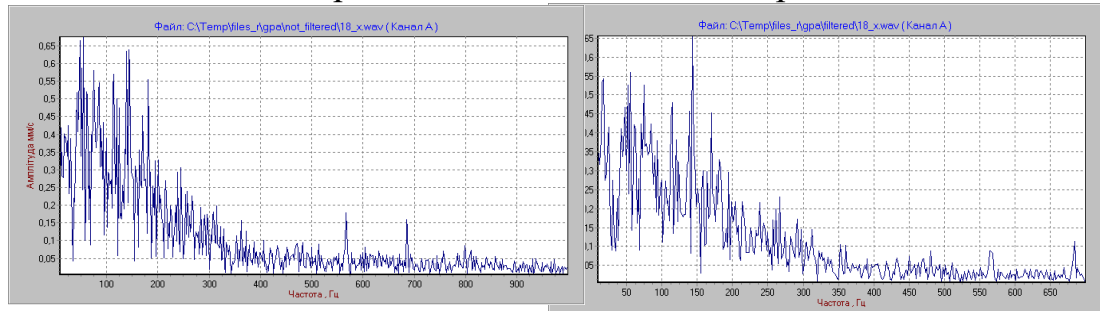


Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

а)

б)

Рисунок 3.20 – Спектрограми вібраційних сигналів
а) у смузі 0-1000Гц без фільтрації; б) у смузі 0-700Гц з фільтрацією
сигналів, отриманих з 16- ої точки контролю

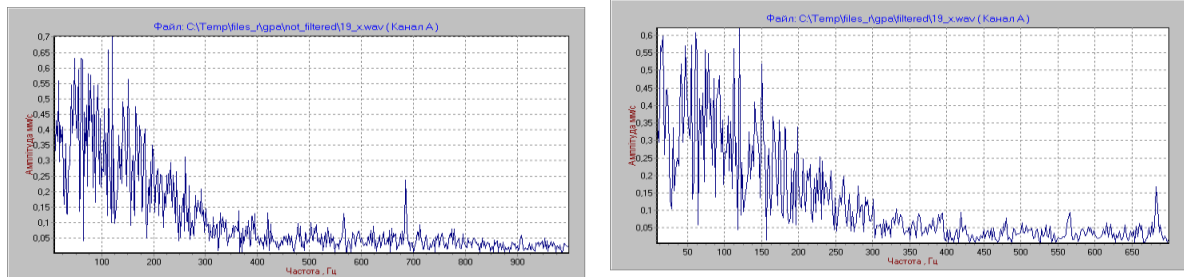


а)

б)

Рисунок 3.21 – Спектрограми вібраційних сигналів

а) у смузі 0-1000Гц без фільтрації; б) у смузі 0-700Гц з фільтрацією
сигналів, отриманих з 18-ої точки контролю



а)

б)

Рисунок 3.22 – Спектрограми вібраційних сигналів

а) у смузі 0-1000Гц без фільтрації; б) у смузі 0-700Гц з фільтрацією
сигналів, отриманих з 19-ої точки контролю

Спектрограми вібраційних сигналів, отриманих з найбільш інформативних точок ГПА з використанням процедури фільтрації і без неї у вказаних діапазонах частот наведені також на рис.3.17–3.18, а чисельні значення їх ефективної віброшвидкості – в таблицях 3.2– 3.3.

Крім того, в таблицях наведені значення V_{ef3} , розраховані для роторної частоти 60.0Гц $n_p=3600\text{об/хв}$. ГТК–10-4№9, де V_{ef1} – смуга $f_1 = 10 \div 1000\text{Гц}$ (без фільтрації), V_{ef2} – смуга $f_1 = 10 \div 700\text{Гц}$.

					<i>MP.AKCM -08.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		88

Більш небезпечним може бути випадок класифікації стану як "задовільний", хоча реально його можна віднести до "вимагає прийняття заходів", чи "незадовільний".

Для горизонтального напрямку вимірювань вібрацій різниця складає від 14.31% для точки № 15 до 15.8% для точок №11 і № 18. Середнє значення відхилення V_{ef} складає 15.4%. Аналогічно для поздовжнього напрямку вимірювання вібрації в контрольних точках ця різниця складе від 14.8% для точки № 16 до 16.4% для точки № 2, а середнє відхилення V_{ef} по всіх точках, тобто значення вібростану в цілому по ГПА на 15.5 % буде більшим.

Таким чином, вибір найбільш інформативних точок контролю на корпусі ГПА і частотних смуг вібраційних сигналів з цих точок, які можна отримати на основі аналізу значної кількості статистичних даних по V_{ef} в цих точках, дозволить практично до 16% підвищити точність контролю вібростану ГПА.

					<i>MP.AKC -08.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		90

ВИСНОВКИ

У магістерській роботі розв'язано актуальну науково-практичну задачу підвищення ефективності контролю технічного стану газоперекачувальних агрегатів шляхом застосування цифрових алгоритмів обробки та інтелектуального аналізу вібраційних сигналів.

– Проаналізовано газоперекачувальний агрегат як об'єкт автоматизації та визначено основні джерела і характеристики вібраційних процесів.

– Досліджено сучасні методи вібраційної діагностики та цифрової обробки сигналів, обґрунтовано доцільність використання вейвлет-перетворення для аналізу нестационарних сигналів.

– Розроблено алгоритм аналізу вібраційних сигналів ГПА, що включає етапи попередньої фільтрації, спектрального та вейвлет-аналізу і формування інформативних діагностичних ознак.

– Синтезовано структуру інтелектуальної системи аналізу вібраційних сигналів із формалізованою логікою прийняття діагностичних рішень.

– Реалізовано програмну модель системи у середовищі MATLAB та проведено моделювання її роботи.

– Отримані результати підтвердили ефективність запропонованого підходу для підвищення достовірності діагностики технічного стану газоперекачувальних агрегатів.

Результати магістерської роботи можуть бути використані при створенні та модернізації автоматизованих систем контролю і діагностики обертового обладнання компресорних станцій.

					<i>MP.AKC -08.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		91

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ НА ДЖЕРЕЛА

1. Заміховський Л. М., Калявін В. П. Основи теорії надійності та технічної діагностики систем. Навч. посібник. Івано-Франківськ, Вид-во “Полум’я”, – 2004. – 230с.
2. Sankar T.S. and Xistris G.D. Failure prediction through the theory of stochastic excursions of extreme vibration amplitudes, ASME paper – 71 – Vibr. – 60 (1971), с. 87-92.
3. Collacot Ralph A. Vibration monitoring and Diagnosis; Techniques for cost - effective Plant maintenance. London -New-York, 1979.
4. Instruments and Control -system, 1975. - vol: 48,N2 -P. 59-62.
5. Rathobone T.C. Vibration Tolerance // Power Plant Enqi-neering. - 1939. - Vol. 43. - P. 721-724.
6. ISO 2372. Mechanical Vibrations of machines with operating speeds from 10 to 200 rel / s. - Nov., 1974.
7. VDI. Beurteilungs masstabe fur mechanische Schwingungen von Maschinen, VDI 2056. VDI-Veriag Cmbh. Dusseldorf, Okt. 1964.
8. Zamikhovskiy L. Ivanuyk N. Vibration Monitoring of the Technical Condition of the Blade Unit of the Gas Pumping Unit Gpa-Ts-16S. OPEN CONFERENCE SYSTEMS, INNOVATIVE IDEAS IN SCIENCE 2018. URL: <http://conf.cunbm.utcluj.ro/index.php/iis/iis2018/author/submission/254>.
9. Zamikhovskyi L., Ivanyuk N., Mirzoieva O., Pavlik V. A COMPLEX APPROACH TO THE DEVELOPMENT OF METHODS OF CONTROL AND DIAGNOSIS OF THE TECHNICAL CONDITION OF GAS PUMPING UNITS. “Dynamics of the development of world science”: The 10th International scientific and practical conference (Vancouver, Canada, 10-12 June, 2020) Perfect Publishing. Vancouver, Canada, 2020. p. 215-224. ISBN 978-1-4879-3791-1.

					<i>МР.АКС -08.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		92

10. Іванюк Н.І. Вібраційний контроль технічного стану лопатевого апарату газоперекачувальних агрегатів [Текст]: дис. канд. техн. наук: 05.11.13 / Іванюк Наталія Іванівна – Івано-Франківськ, 2021. – 320 с.

11. Заміховський Л.М., Іванюк Н.І., Павлик В.В. Використання вейвлет-перетворення для визначення технічного стану газоперекачувальних агрегатів. Сучасні прилади, матеріали і технології для неруйн. контролю і техн. діагност. машинобуд. і нафтогазопром. обладн.: VIII Міжнар. наук.-техн. конф.(Івано-Франківськ, 14-16 лист. 2017). С.132-133.

12. Теорія і практика обробки сигналів у малохвильовій (wavelet) області А.Й. Наконечний, І.І Лагун., З.Є. Верес [та ін.] під редакцією А.Й. Наконечного: Монографія. Львів: Растр-7, 2020. 470 с.

					<i>MP.AKS -08.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						93
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ДОДАТОК А

Програмний код фільтрації з використанням вейвлет-перетворення

```
%% Завантаження сигналу
dat = load('D:\txt_files\28_y.wav.txt');
s = dat(:,2);
ls = length(s);
clear dat

%% Однорівневе DWT
[ca1, cd1] = dwt(s, 'db1');
a1 = upcoef('a', ca1, 'db1', 1, ls);
d1 = upcoef('d', cd1, 'db1', 1, ls);

%% Трирівневе вейвлет-перетворення
[c, l] = wavedec(s, 3, 'db1');

ca3 = appcoef(c, l, 'db1', 3);
cd3 = detcoef(c, l, 3);
cd2 = detcoef(c, l, 2);
cd1_tr = detcoef(c, l, 1);

a3 = wrcoef('a', c, l, 'db1', 3);
d3 = wrcoef('d', c, l, 'db1', 3);
d2 = wrcoef('d', c, l, 'db1', 2);
d1_tr = wrcoef('d', c, l, 'db1', 1);

a0 = waverec(c, l, 'db1');

%% Розрахунок спектрів
Fs = 1000; % частота дискретизації (поставте свою)
f = linspace(0, Fs/2, floor(ls/2));

S_fft = abs(fft(s));
A1_fft = abs(fft(a1));
D1_fft = abs(fft(d1));

%% Візуалізація: часова та частотна інформація
figure('Name','Wavelet Signal &
Spectrum','NumberTitle','off');
```

Продовження Додатку А

```
% --- Часові сигнали ---
subplot(3,3,1); plot(1:ls, s, 'r'); title('(a) Original
signal');
subplot(3,3,2); plot(1:ls, a1); title('(б) Reconstructed
a1');
subplot(3,3,3); plot(1:ls, d1); title('(в) Reconstructed
d1');

% --- Детальні коефіцієнти трирівневої декомпозиції ---
subplot(3,3,4); plot(1:length(d3), d3); title('(г) Detail
d3');
subplot(3,3,5); plot(1:length(d2), d2); title('(д) Detail
d2');
subplot(3,3,6); plot(1:length(d1_tr), d1_tr); title('(e)
Detail d1');

% --- Частотні спектри ---
subplot(3,3,7); plot(f, S_fft(1:floor(ls/2))); title('(ж)
Spectrum original');
subplot(3,3,8); plot(f, A1_fft(1:floor(ls/2))); title('(з)
Spectrum a1');
subplot(3,3,9); plot(f, D1_fft(1:floor(ls/2))); title('(и)
Spectrum d1');
```

БІБЛІОГРАФІЧНА ДОВІДКА

Тема магістерської роботи: «Розроблення інтелектуальної системи аналізу вібраційних сигналів ГПА на основі цифрових алгоритмів обробки даних»

Обсяг пояснювальної записки: 96 аркушів, 41 рисунок, 5 таблиць.

Дата закінчення магістерської роботи
року

грудень 2025

Студент–магістер

Р.І. Давидів

					<i>MP.AKS-08.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		96

