

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Кіберфізична система віброаналізу стану вузлів автомобіля
Назва теми

Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)

Галузь знань 12 «Інформаційні технології»
Шифр, назва

Спеціальність 123 «Комп'ютерна інженерія»
Шифр, назва

Освітня програма «Комп'ютерна інженерія та програмування»
Назва

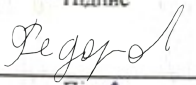
Шифр КвРКІ 22039.22.04.16 ПЗ

Виконав здобувач IV курсу, група КІ2-22-4


Підпис

Богдан КОРЧАК
Ініціали, прізвище

Керівник доктор техн наук, проф.
Науковий ступінь, учене звання


Підпис

Євгеній ФЕДОРОВ
Ініціали, прізвище

Нормоконтролер канд.фіз.-мат.наук, доц.
Науковий ступінь, учене звання


Підпис

Тетяна КИСІЛЬ
Ініціали, прізвище

До захисту допускаю:
завідувач кафедри КІС


Підпис

Ольга ПАВЛОВА
Ініціали, прізвище

«01» червня 2026 р.
дата

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Кафедра КОМП'ЮТЕРНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ

Рівень вищої освіти ПЕРШИЙ (БАКАЛАВРСЬКИЙ)

Галузь знань 12 ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

Спеціальність 123 КОМП'ЮТЕРНА ІНЖЕНЕРІЯ

Освітня програма «КОМП'ЮТЕРНА ІНЖЕНЕРІЯ ТА ПРОГРАМУВАННЯ»

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувачка кафедри КІПС

Ольга ПАВЛОВА

“ 10 ” 01 2026 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Корчак Богдан Андрійович

Прізвище, ім'я, по батькові студента

1. Тема проекту (роботи) Система аналізу вібраційних сигналів для діагностики технічного стану вузлів автомобіля

Керівник проекту (роботи) Федоров Євген Євгенович, доктор наук, професор

Прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання

Затверджена наказом ректора університету від 20.01.2026 р. № 16

2. Термін подання здобувачем роботи на кафедру 01.06.2026 р.

3. Вихідні дані до роботи Завдання на кваліфікаційну роботу

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

Аналіз предметної області та постановка задачі

Проектування системи аналізу вібраційних систем

Програмна реалізація та тестування системи

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

Апаратне забезпечення проекту

Архітектура ПЗ кіберфізичної системи

Архітектура ПЗ проекту

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання при

7. Дата видачі завдання « 07 » 02 2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН


№з/п	Назва етапів (розділів) дипломного проекту (роботи)	Термін виконання етапів проекту (роботи)	Прим.
1	Вибір напрямку дослідження та узгодження тематики кваліфікаційної роботи з керівником	10.01.2026	ВИКОНА
2	Ознайомлення з предметною областю; формулювання мети та задач дослідження; визначення об'єкта та предмета дослідження	01.02.2026	ВИКОНА
3	Робота над розділом 1 – дослідження предметної області та постановка задачі	01.03.2026	ВИКОНА
4	Робота над розділом 2 – вибір компонентів для проєктування системи моніторингу стану температури вузлів автомобіля	01.04.2026	ВИКОНА
5	Робота над розділом 3 – проєктування системи кіберфізичного віброаналізу вузлів автомобіля	29.04.2026	ВИКОНА
6	Оформлення пояснювальної записки згідно вимог	25.05.2026	ВИКОНА
7	Попередній захист ВКР	26.05.2026	ВИКОНА
8	Захист ВКР на засіданні ЕК	Червень 2026 року	

Здобувач


Підпис

Богдан КОРЧАК
Імя, ПРІЗВИЩЕ

Керівник кваліфікаційної роботи


Підпис

Євген ФЕДОРОВ
Імя, ПРІЗВИЩЕ

АНОТАЦІЯ

Тема кваліфікаційної роботи: «Система аналізу вібраційних сигналів для діагностики технічного стану вузлів обладнання».

Автор роботи: Богдан Корчак.

Керівник роботи: Євген ФЕДОРОВ.

Пояснювальна записка: 63 с., 10 рис., 7 табл., 5 дод., 49 джерел.

Графічна частина: 3 креслення.

ВІБРАЦІЙНИЙ АНАЛІЗ, FFT-АНАЛІЗ, СПЕКТРАЛЬНИЙ АНАЛІЗ, RMS, АКСЕЛЕРОМЕТР, ФІЛЬТРАЦІЯ ШУМІВ, ДІАГНОСТИКА ОБЛАДНАННЯ.

Метою дипломної роботи є розробка програмної системи для аналізу вібраційних сигналів, що забезпечує визначення технічного стану механічних вузлів на основі цифрової обробки сигналів та спектрального аналізу.

Об'єктом дослідження є процес вібраційної діагностики технічного обладнання.

Предметом дослідження є програмні методи аналізу вібраційних сигналів, алгоритми фільтрації шумів, FFT-аналізу та визначення параметрів технічного стану вузлів.

У процесі розробки було реалізовано програмний застосунок мовою C# із використанням технології Windows Forms, бібліотеки ScottPlot для побудови графіків та бібліотеки MathNet.Numerics для виконання швидкого перетворення Фур'є.

Програмна система забезпечує генерацію та аналіз вібраційних сигналів, фільтрацію шумів методом ковзного середнього, побудову графіків сигналу та спектру, обчислення RMS, пікових значень і домінуючої частоти, а також автоматичне визначення стану вузла: справний стан, допустиме відхилення або можливий дефект.



Підпис здобувача

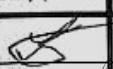
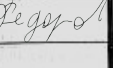
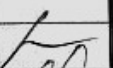

30.05.2026

Дата

ЗМІСТ

Вступ	4
1 Аналіз предметної області та постановка задачі	9
1.1 Вібраційний моніторинг у технічній діагностиці	9
1.2 Природа вібраційного сигналу та його характеристики	12
1.3 Методи аналізу вібраційних сигналів	14
1.4 Дискретне та швидке перетворення Фур'є	16
1.5 Цифрова фільтрація сигналів	20
1.6 Огляд існуючих рішень та обґрунтування власного підходу	24
1.7 Постановка задачі	32
1.8 Висновки до першого розділу	35
2 Проектування системи аналізу вібраційних сигналів	38
2.1 Архітектура програмної системи	38
2.2 Модуль імітації вібраційного датчика	41
2.3 Модуль FFT-аналізу	46
2.4 Модуль фільтрації сигналу	49
2.5 Розрахунок діагностичних показників та класифікація стану	52
2.6 Модуль збереження результатів	54
2.7 Висновки до другого розділу	58
3 Програмна реалізація та тестування системи	62
3.1 Вибір засобів реалізації та середовища розробки	62
3.2 Реалізація генератора сигналу	64
3.3 Реалізація FFT-аналізу та фільтрації	66
3.4 Реалізація діагностичного модуля та збереження результатів	67
3.5 Організація інтерфейсу користувача	68

КвРКІ.22039.22.04.16 ПЗ

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата				
Виконав		Богдан КОРЧАК			Система аналізу вібраційних сигналів для діагностики технічного стану вузлів обладнання	Літера	Аркуш	Аркуші
Перевір.		Євген ФЕДОРОВ				у	2	72
Н.контр.		Тетяна КИСІЛЬ				ХНУ КІ2-22-4		
Затвер.		Ольга ПАВЛОВА						

3.6 Тестування системи та аналіз результатів	70
3.7 Висновки до третього розділу.....	72
Висновки	73
Перелік джерел посилань.....	75
Додаток А Алгоритм роботи системи	79
Додаток Б Апаратне забезпечення проєкту.....	80
Додаток В Архітектура ПЗ кіберфізичної системи.....	81
Додаток Г Архітектура ПЗ проєкту.....	82
Додаток Д Повний лістинг програми.....	83

ВСТУП

Актуальність дослідження. На сучасному етапі розвитку промисловості питання забезпечення безперервної та надійної роботи технологічного обладнання є одним із факторів ефективності виробничих процесів. Зростання рівня автоматизації, складності технічних систем та інтенсивності експлуатації обладнання висуває підвищені вимоги до методів контролю його технічного стану. Будь-які незаплановані зупинки виробництва, пов'язані з відмовами механічних вузлів, призводять не лише до фінансових втрат, але й до порушення технологічних процесів, зниження якості продукції та потенційних ризиків для безпеки персоналу.

У сучасних промислових системах значна частина обладнання працює у режимах високих навантажень, в умовах постійних механічних коливань, температурних перепадів та динамічних впливів. За таких умов навіть незначні дефекти, що виникають у підшипниках, валах, роторах чи зубчастих передачах, можуть поступово розвиватися та призводити до серйозних аварій. Статистичні дослідження у сфері технічної діагностики показують, що понад 40 % відмов обертового обладнання пов'язані саме з механічними дефектами, які могли б бути виявлені на ранніх стадіях розвитку за допомогою сучасних методів моніторингу.

Одним із найбільш ефективних методів контролю технічного стану механічного обладнання є вібраційний моніторинг. Його основна перевага полягає у тому, що вібраційний сигнал містить значний обсяг інформації про динамічні процеси, які відбуваються всередині механічної системи. Будь-які зміни у роботі вузлів – зношення підшипників, дисбаланс ротора, розцентрування валів, механічні удари або поява тріщин – супроводжуються зміною параметрів вібрації. Аналізуючи ці зміни, можна виявляти ознаки дефектів задовго до настання критичних пошкоджень або повної відмови обладнання.

					КВРКІ.22039.22.04.16 ПЗ	Арк.
						4
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Особливого значення вібраційний моніторинг набуває в умовах переходу від планово-попереджувального технічного обслуговування до обслуговування за фактичним станом (Condition-Based Maintenance). Традиційний підхід до технічного обслуговування передбачає проведення ремонтів через встановлені проміжки часу незалежно від реального стану обладнання. Такий підхід часто призводить або до передчасної заміни справних елементів, або навпаки – до пропуску розвитку дефекту між плановими перевірками. На відміну від цього, системи моніторингу стану дозволяють виконувати обслуговування лише тоді, коли це дійсно необхідно, що значно знижує витрати та підвищує ефективність використання обладнання..

Вібраційна діагностика широко застосовується у різних галузях промисловості: енергетиці, машинобудуванні, транспорті, авіаційній та нафтогазовій галузях. Вона використовується для контролю стану електродвигунів, насосів, компресорів, турбін, вентиляторів та інших обертових механізмів. При цьому сучасні системи вібраційного моніторингу все частіше інтегруються у цифрові платформи індустрії 4.0, що дозволяє здійснювати віддалений контроль обладнання, автоматичний аналіз даних та прогнозування можливих відмов.

Поряд із практичним застосуванням у промисловості, вібраційна діагностика є важливою науковою та навчальною дисципліною у галузі інформаційних технологій, технічної кібернетики, автоматизації та цифрової обробки сигналів. Для підготовки сучасних фахівців необхідно забезпечити можливість практичного вивчення методів аналізу сигналів, спектрального аналізу, цифрової фільтрації та автоматичної класифікації технічного стану систем. Однак використання реального вимірювального обладнання у навчальному процесі часто є складним через його високу вартість, обмежену доступність та складність експлуатації.

Більшість сучасних комерційних систем вібраційного моніторингу є дорогими спеціалізованими рішеннями, орієнтованими на промислове

					КВРКІ.22039.22.04.16 ПЗ	Арк.
						5
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

використання. Такі системи часто мають закриту архітектуру, що ускладнює можливість їх модифікації або використання у навчальних цілях. Крім того, промислові рішення потребують спеціалізованих датчиків, контролерів та програмного забезпечення, що значно підвищує вартість впровадження. Водночас відкриті програмні бібліотеки для цифрової обробки сигналів, такі як NumPy, SciPy та Matplotlib, хоча й надають потужний математичний інструментарій, не забезпечують готового середовища для демонстрації повного циклу вібраційного аналізу в від генерації сигналу до діагностики стану механічного вузла.

У зв'язку з цим виникає необхідність створення програмної системи, яка поєднує можливості моделювання вібраційних сигналів, цифрової обробки даних, спектрального аналізу та автоматичної діагностики технічного стану. Особливо актуальним є створення системи, що дозволяє імітувати роботу реального вібраційного датчика без використання фізичного обладнання. Такий підхід забезпечує можливість тестування алгоритмів обробки сигналів, проведення навчальних досліджень та демонстрації принципів технічної діагностики у доступному програмному середовищі.

Метою кваліфікаційної роботи є розроблення програмної системи VibrationAnalyzer, яка імітує роботу вібраційного датчика та реалізує повний цикл обробки вібраційного сигналу: генерацію сигналу із шумами та штучними дефектами, FFT-аналіз, цифрову фільтрацію, розрахунок діагностичних параметрів, класифікацію технічного стану вузла та збереження результатів аналізу.

Для досягнення поставленої мети у роботі необхідно вирішити такі завдання:

Проаналізувати теоретичні основи вібраційного моніторингу та технічної діагностики механічних вузлів.

Дослідити природу вібраційного сигналу, його фізичні характеристики та математичний опис.

					КВРКІ.22039.22.04.16 ПЗ	Арк.
						6
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розглянути методи спектрального аналізу сигналів та принцип роботи алгоритму швидкого перетворення Фур'є (FFT).

Проаналізувати застосування оконних функцій та їх вплив на результати спектрального аналізу.

Вивчити методи цифрової фільтрації сигналів та обґрунтувати вибір фільтра Баттерворта.

Провести огляд сучасних програмних систем та бібліотек для аналізу вібраційних сигналів.

Розробити архітектуру програмної системи VibrationAnalyzer за модульним принципом.

Реалізувати модуль генерації вібраційного сигналу з додаванням шумів та дефектів.

Реалізувати FFT-аналізатор із використанням вікна Ханна.

Реалізувати модуль цифрової фільтрації сигналу.

Реалізувати модуль розрахунку RMS, пікових значень та автоматичної класифікації стану вузла.

Реалізувати механізм збереження результатів аналізу у файл.

Провести тестування системи за різними сценаріями роботи та оцінити ефективність реалізованих алгоритмів.

Об'єктом дослідження є процес аналізу вібраційних сигналів у системах технічної діагностики механічного обладнання.

Предметом дослідження є програмні методи моделювання вібраційних сигналів, алгоритми спектрального аналізу та цифрової обробки сигналів, а також методи автоматичної класифікації технічного стану механічних вузлів.

Методи дослідження. У процесі виконання роботи використано методи системного аналізу та декомпозиції складних систем, методи математичного моделювання сигналів, спектрального аналізу на основі перетворення Фур'є, методи цифрової обробки сигналів, методи цифрової фільтрації та статистичного аналізу. Для перевірки працездатності програмної системи застосовано методи

					КВРКІ.22039.22.04.16 ПЗ	Арк. 7
Зм.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата		

функціонального тестування, тестування за сценаріями та експериментального аналізу результатів.

Практичне значення роботи полягає у створенні програмної системи, яка може бути використана у навчальному процесі для демонстрації методів вібраційного аналізу, у наукових дослідженнях для тестування алгоритмів технічної діагностики, а також як основа для подальшого розвитку більш складних систем моніторингу технічного стану обладнання. Розроблена система дозволяє виконувати повний цикл аналізу вібраційних сигналів без необхідності використання фізичних датчиків та промислового обладнання, що значно спрощує проведення експериментів і навчальних досліджень.

Перспективи подальшого розвитку системи полягають у можливості інтеграції з реальними акселерометрами та мікроконтролерами для збору, передачі та обробки даних безпосередньо з фізичних пристроїв у режимі реального часу. Це дозволить використовувати розроблену систему не лише як програмний симулятор, а і як повноцінний інструмент для моніторингу та аналізу вібраційних процесів у різних технічних системах. Важливим напрямом удосконалення є впровадження більш складних алгоритмів цифрової обробки сигналів, зокрема вейвлет-перетворення, спектрального аналізу та адаптивної фільтрації, що забезпечить вищу точність виявлення аномалій і прихованих закономірностей.

Структура роботи. Кваліфікаційна робота складається зі вступу, трьох розділів, висновків, переліку джерел посилань та двох додатків. Загальний обсяг пояснювальної записки становить 91 сторінка.

					КВРКІ.22039.22.04.16 ПЗ	Арк.
						8
Зм.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата		

1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ ТА ПОТАНОВКА ЗАДАЧІ

1.1 Вібраційний моніторинг у технічній діагностиці

На сучасному етапі розвитку промисловості важливе значення має забезпечення безперервної, надійної та безпечної роботи технологічного обладнання. У більшості галузей промисловості використовується велика кількість механічних систем, які працюють у складних умовах експлуатації: при високих навантаженнях, значних швидкостях обертання, впливі температурних перепадів та постійних динамічних навантаженнях. У процесі тривалої роботи елементи механізмів поступово зношуються, що може призводити до появи дефектів і, як наслідок, до аварійних ситуацій або повної відмови обладнання.

Одним із найбільш ефективних способів контролю технічного стану механічних систем є вібраційний моніторинг. Даний метод базується на аналізі механічних коливань, що виникають під час роботи обладнання. Практично будь-який механізм у процесі функціонування створює певний рівень вібрації. Параметри цих коливань залежать від технічного стану вузлів, точності складання, рівномірності обертання та наявності механічних пошкоджень [1].

Вібраційний сигнал містить значний обсяг інформації про процеси, що відбуваються всередині механічної системи. Навіть незначні дефекти, такі як початкове зношення підшипників, дисбаланс ротора або розцентрування валів, викликають зміни у характеристиках вібрації. Завдяки цьому аналіз вібраційного сигналу дозволяє виявляти несправності ще на ранніх стадіях розвитку, до виникнення критичних пошкоджень.

Основною перевагою вібраційного моніторингу є можливість здійснення діагностики без зупинки обладнання. Це дозволяє проводити контроль технічного стану безпосередньо під час роботи механізму, що значно підвищує ефективність експлуатації та зменшує втрати, пов'язані з простоєм виробництва. [2] Крім того, системи вібраційного моніторингу можуть працювати у режимі реального часу, забезпечуючи постійний контроль параметрів обладнання.

					КВРКІ.22039.22.04.16 ПЗ	Арк.
						9
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для реєстрації вібраційних сигналів використовуються спеціальні датчики – акселерометри або датчики вібрації.

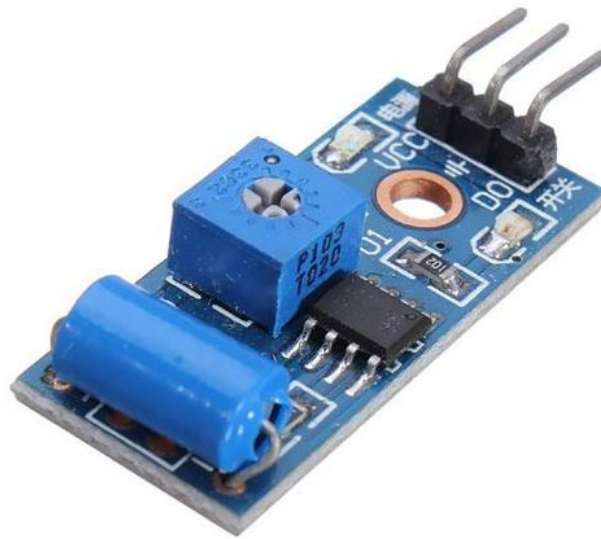


Рисунок 1.1 – Наведено приклад промислового вібраційного датчика [49]

Вони перетворюють механічні коливання у цифровий або аналоговий сигнал, який надалі обробляється програмними засобами. Отримані дані можуть містити корисний сигнал, шуми, випадкові перешкоди та гармонічні складові різної частоти.

У процесі аналізу вібраційного сигналу важливу роль відіграють методи цифрової обробки сигналів. До основних етапів обробки належать:

1. Зчитування або генерація сигналу.
2. Попередня фільтрація шумів.
3. Побудова графіка сигналу.
4. Спектральний аналіз.
5. Визначення параметрів сигналу.
6. Автоматична класифікація технічного стану.

Одним із методів аналізу є спектральний аналіз сигналу. Його основна мета полягає у визначенні частотних складових вібрації. Для цього використовується швидке перетворення Фур'є (FFT), яке дозволяє перейти від часової області

сигналу до частотної. Спектральний аналіз дає можливість виявити домінуючі частоти, гармоніки та аномальні компоненти, що можуть свідчити про наявність дефектів [3].

Середньоквадратичне значення RMS характеризує загальний рівень енергії вібрації та широко використовується для оцінки ступеня зношення обладнання. Пікові значення дозволяють виявляти різкі імпульсні зміни сигналу, які можуть виникати при механічних ударах або дефектах поверхонь [4].

У сучасній промисловості вібраційний моніторинг використовується у багатьох галузях: машинобудуванні, енергетиці, транспортній галузі, авіаційній промисловості, нафтогазовій сфері, автоматизованих виробничих системах [5].

Найчастіше вібраційна діагностика застосовується для контролю стану: електродвигунів, насосів, компресорів, вентиляторів, турбін, редукторів, обертових механізмів.

Сучасні системи технічної діагностики все частіше інтегруються у цифрові системи моніторингу та концепцію Industry 4.0 [6]. Це дозволяє автоматизувати процес збору та аналізу даних, здійснювати віддалений контроль обладнання та прогнозувати можливі несправності.

Важливою особливістю сучасних систем вібраційного аналізу є використання програмних засобів для обробки сигналів. Саме програмна реалізація дозволяє моделювати різні режими роботи обладнання, виконувати аналіз сигналів у реальному часі, будувати графіки та автоматично формувати висновки про технічний стан вузлів [7].

У даній кваліфікаційній роботі розробляється програмна система аналізу вібраційних сигналів, яка реалізує основні етапи технічної діагностики: генерацію сигналу, фільтрацію шумів, FFT-аналіз, визначення основних характеристик та автоматичне визначення стану механічного вузла. Такий підхід дозволяє створити навчально-дослідницьке програмне середовище для демонстрації принципів вібраційного моніторингу та цифрової обробки сигналів.

1.2 Природа вібраційного сигналу та його характеристики

Вібраційний сигнал механічного вузла є складним за своєю природою. У загальному випадку він являє собою суму детермінованих складових (основних гармонік та їх обертонів, пов'язаних з кінематикою механізму) та стохастичних складових (широкосмугового шуму, що виникає внаслідок тертя, мікроударів та інших випадкових процесів) [8].

Кількість значущих гармонік залежить від типу механізму та наявності дефектів.

Стохастична складова може бути змодельована як гаусівський (нормальний) білий шум або кольоровий шум із певною спектральною щільністю. Гаусівський шум характеризується нульовим математичним сподіванням та заданим середньоквадратичним відхиленням σ . Сума детермінованого сигналу та гаусівського шуму є достатньо хорошою моделлю для більшості практичних застосувань [9].

Важливою характеристикою вібраційного сигналу є його стаціонарність. Сигнал справного механізму, що працює в усталеному режимі, є стаціонарним – його статистичні характеристики не змінюються з часом. Розвиток дефекту порушує стаціонарність сигналу: виникають локальні нестаціонарні ділянки (ударні імпульси), що відповідають моментам взаємодії елементів, що мають дефект [10].

Основними числовими характеристиками вібраційного сигналу, що використовуються в діагностиці, є:

1. Середньоквадратичне значення (RMS) характеризує енергію сигналу та загальний рівень вібрації.
2. Пікове значення (Peak) максимальна абсолютна амплітуда, чутлива до ударних імпульсів.
3. Пік-фактор (Crest Factor) відношення пікового значення до RMS, характеризує імпульсний характер сигналу.

					КВРКІ.22039.22.04.16 ПЗ	Арк. 12
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4. Коефіцієнт ексцесу (Kurtosis) четвертий стандартизований центральний момент, є чутливим індикатором ударних явищ.

Середнє абсолютне значення (MAV) та форм-фактор додаткові статистичні показники.

Таблиця 1.1 – Числові характеристики вібраційного сигналу

Показник	Формула	Фізичний зміст	Застосування
RMS	$\sqrt{\frac{1}{N} \sum x^2}$	Енергія сигналу	Загальний рівень вібрації
Peak	$\max(x_i)$	Максимальна амплітуда	Ударні навантаження
Crest Factor	$\frac{Peak}{RMS}$	Імпульсність сигналу	Ранні стадії дефектів
Kurtosis	$E \frac{[(x - \mu)^4]}{\sigma^4}$	Гострота розподілу	Локальні дефекти

Для імітації дефектів у програмній системі використовується модель локальних аномалій: у певних часових точках сигналу до нього додаються короткочасні стрибки амплітуди з характерною тривалістю кількох вибірок [11]. Це відповідає фізичній моделі ударного імпульсу, що виникає при контакті тіла кочення з дефектом на доріжці. Трапецієподібна форма імпульсу обрана для наближення до реального фізичного процесу [12].

Частота дискретизації f_s визначає максимальну аналізовану частоту відповідно до теореми відліків. У даній системі $f_s = 1000$ Гц, що дозволяє аналізувати частоти до 500 Гц – достатньо для демонстрації принципів у роботі алгоритмів [13].

1.3 Методи аналізу вібраційних сигналів

Для аналізу вібраційних сигналів у сучасних системах технічної діагностики використовується широкий спектр математичних та

обчислювальних методів. Вибір конкретного методу залежить від характеру сигналу, типу досліджуваного обладнання та задачі діагностики. У більшості випадків аналіз виконується у часовій, частотній або часово-частотній областях, кожна з яких має свої особливості та область застосування [14].

Аналіз у часовій області є базовим етапом обробки сигналів та використовується для первинної оцінки стану механічної системи [15]. У цьому випадку сигнал розглядається як функція часу без переходу до інших представлень. Основними методами є статистичний аналіз та оцінка амплітудних характеристик сигналу. До найпоширеніших параметрів належать середньоквадратичне значення (RMS), пікове значення, а також різні похідні статистичні показники [16]. Часовий аналіз дозволяє швидко оцінити загальний рівень вібрації та виявити значні відхилення від нормального режиму роботи обладнання [17].

Перевагою часової області є простота обчислень та висока швидкість обробки даних, що робить її придатною для реалізації в реальному часі. Водночас даний підхід має обмежену інформативність, оскільки не дозволяє безпосередньо визначати частотний склад сигналу, який є ключовим для ідентифікації типу дефекту [18].

Частотний аналіз базується на математичному перетворенні сигналу з часової області у частотну за допомогою перетворення Фур'є. Найбільш поширеною реалізацією є швидке перетворення Фур'є (FFT), яке дозволяє ефективно обчислювати спектр сигналу. Частотна область є основною у вібраційній діагностиці, оскільки більшість механічних дефектів мають характерні частотні ознаки [19].

Наприклад, дисбаланс ротора проявляється на оборотній частоті, дефекти підшипників створюють характерні високочастотні складові, а розцентрування валів призводить до появи додаткових гармонік [20]. Таким чином, аналіз спектра сигналу дозволяє не лише виявити наявність аномалій, але й зробити припущення щодо їх природи.

					КВРКІ.22039.22.04.16 ПЗ	Арк. 14
Зм.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата		

Часово-частотні методи аналізу застосовуються для дослідження складних нестационарних сигналів, характеристики яких змінюються з часом. До таких методів належать короткочасне перетворення Фур'є (STFT), вейвлет-перетворення та інші спеціалізовані підходи [21]. Вони дозволяють одночасно аналізувати як часові, так і частотні характеристики сигналу, що є особливо корисним для діагностики змінних режимів роботи обладнання [22].

Окрему роль у вібраційній діагностиці відіграє метод аналізу огибаючої сигналу. Він широко використовується для виявлення дефектів підшипників кочення [23]. Суть методу полягає у виділенні високочастотної складової сигналу, її демодуляції та подальшому спектральному аналізі отриманої огибаючої. Це дозволяє виявляти характерні частоти ударних процесів, які не завжди помітні у звичайному спектрі сигналу [24].

У межах даної роботи основна увага зосереджена на методах, які можуть бути реалізовані у спрощеній програмній системі. Зокрема, використовується аналіз у часовій області (обчислення RMS та пікових значень) та частотний аналіз за допомогою FFT [25]. Такий підхід дозволяє продемонструвати базові принципи вібраційної діагностики без надмірного ускладнення алгоритмічної реалізації. Запропоновані методи є достатньо інформативними для виявлення характеристик змін у структурі вібраційних сигналів. Вони забезпечують наочне предтавлення результатів аналізу та сприяють кращому розумінню процесів цифрової обробки

Таблиця 1.2 – Порівняння методів аналізу вібраційних сигналів

Метод	Область	Переваги	Недоліки	Реалізовано
Статистичний	Часова	Простота, швидкість	Мала інформативність	Так
FFT-аналіз	Частотна	Ідентифікація дефектів	Тільки стаціонарні	Так
Фільтрація	Часова/частотна	Видалення шуму	Вибір параметрів	Так

Кінець таблиці 1.2

STFT	Часово-частотна	Нестаціонарні сигнали	Компроміс роздільності	Ні
Вейвлет	Часово-частотна	Локалізація в часі	Складність	Ні
Огинаюча	Частотна	Дефекти підшипників	Потрібна смугова фільтрація	Ні

1.4 Дискретне та швидке перетворення Фур'є

Перетворення Фур'є є одним із фундаментальних математичних інструментів цифрової обробки сигналів, який дозволяє виконувати аналіз складних сигналів шляхом їх представлення у вигляді сукупності гармонічних складових. Основна ідея методу полягає в тому, що будь-який сигнал, незалежно від його складності, може бути розкладений на набір синусоїдальних коливань різних частот, амплітуд та фаз.

Такий підхід має важливе фізичне обґрунтування. У реальних механічних системах вібраційний сигнал формується як результат накладання великої кількості процесів: обертання валів, взаємодії деталей, тертя, ударів та мікродефектів. Кожен із цих процесів має свою характерну частотну складову. Саме тому аналіз сигналу у часовій області є недостатнім для повного розуміння його структури, тоді як частотна область дозволяє виділити приховані закономірності [26].

Неперервне перетворення Фур'є

У теоретичному випадку сигнал описується неперервною функцією часу $x(t)$. Його перетворення Фур'є визначається інтегральним виразом:

$$X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)e^{-j2\pi ft} dt$$

де:

$X(f)$ – спектральна функція сигналу;

$x(t)$ – сигнал у часовій області;

f – частота;

j – уявна одиниця.

Даний вираз означає, що сигнал “проектуються” на набір базисних функцій – комплексних експонент, які відповідають синусоїдальним коливанням різних частот.

Фізично це можна пояснити так: ми визначаємо, наскільки сильно кожна можлива частота “присутня” у сигналі.

Фізичний зміст перетворення Фур’є

Перетворення Фур’є не є просто математичною операцією – воно має глибокий фізичний зміст.

Будь-який періодичний або квазіперіодичний процес можна представити як суму гармонік. Це означає, що складний сигнал розкладається на прості коливання:

1. низькочастотні компоненти відповідають повільним змінам системи.
2. високочастотні компоненти часто пов’язані з шумами або дефектами.
3. домінуючі частоти відповідають основним механічним процесам.

У вібраційній діагностиці це особливо важливо, оскільки кожен тип дефекту має свій “частотний підпис”.

Дискретизація сигналу

У реальних цифрових системах сигнал не є неперервним. Він отримується шляхом дискретизації з певною частотою f_s , тобто значення сигналу вимірюються через рівні інтервали часу.

Це приводить до використання дискретного сигналу $x[n]$ де n – номер відліку.

Дискретне перетворення Фур’є (DFT)

Для дискретного сигналу довжиною N використовується дискретне перетворення Фур’є:

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] * e^{-j\frac{2\pi}{N}kn}$$

де:

1. $x[n]$ – дискретний сигнал.
2. $X[k]$ – спектральний коефіцієнт.
3. N – кількість відліків.
4. k – номер частотної складової.

Кожен коефіцієнт $X[k]$ відповідає певній частоті:

$$f_k = \frac{k * f_s}{N}$$

При великих значеннях N це стає критичним обмеженням для систем реального часу, особливо при обробці сигналів у режимі онлайн.

Швидке перетворення Фур'є (FFT)

Для вирішення цієї проблеми було розроблено алгоритм швидкого перетворення Фур'є (FFT – Fast Fourier Transform), який базується на принципі “розділяй і володарюй”.

Його ідея полягає у розбитті вихідної задачі на менші підзадачі, що дозволяє суттєво зменшити кількість обчислень.

Складність FFT становить:

$$O(N \log_2 N)$$

що є значно ефективнішим порівняно з прямим DFT.

Наприклад, для сигналу довжиною 1024 відліки:

1. DFT потребує $\approx 1\,000\,000$ операцій,
2. FFT – приблизно 10 000 операцій.

Застосування FFT у вібраційній діагностиці

У даній роботі FFT використовується для побудови амплітудного спектра сигналу. В результаті отримується набір значень, які показують розподіл енергії сигналу за частотами.

Амплітудний спектр визначається як:

$$|X[k]| = \sqrt{\text{Re}(X[K])^2 + \text{Im}(X[K])^2}$$

де:

1. $\text{Re}(X[k])$ – дійсна частина;
2. $\text{Im}(X[k])$ – уявна частина.

Саме амплітудний спектр використовується для візуального аналізу та визначення домінуючих частот.

Теорема Найквіста

Це означає, що частота дискретизації повинна бути щонайменше вдвічі більшою за максимальну частоту сигналу.

Інтерпретація спектра. У практичних задачах вібраційного аналізу спектр сигналу дозволяє: визначити частоту обертання механізму, виявити гармоніки, знайти аномальні піки, оцінити стан вузлів.

1.5 Цифрова фільтрація сигналів

Цифрова фільтрація є одним із найважливіших етапів цифрової обробки сигналів у сучасних інформаційних системах. Вона широко застосовується у системах автоматизації, телекомунікаціях, медичній техніці, аудіообробці, радіоелектроніці та технічній діагностиці. Основним призначенням цифрової фільтрації є покращення якості сигналу шляхом пригнічення небажаних компонентів та виділення корисної інформації. У системах вібраційного аналізу

цифрова фільтрація використовується для усунення шумів, випадкових коливань та перешкод, які можуть негативно впливати на результати діагностики.

У реальних умовах вібраційний сигнал практично ніколи не є ідеальним. Під час роботи механічного обладнання на сигнал впливають численні фактори: електромагнітні перешкоди, механічні удари, нестабільність обертання, випадкові коливання та похибки вимірювальної системи. У результаті до корисного сигналу додається шумова складова, яка може ускладнювати визначення характеристик вібрації та погіршувати точність спектрального аналізу [27].

Наявність шуму є особливо критичною для систем технічної діагностики, оскільки алгоритми аналізу чутливі до випадкових високочастотних змін сигналу. Наприклад, при виконанні FFT-аналізу шумові компоненти можуть створювати додаткові спектральні піки, які ускладнюють визначення домінуючих частот та можуть бути помилково інтерпретовані як ознаки дефектів. Саме тому перед виконанням спектрального аналізу сигнал зазвичай проходить етап попередньої цифрової фільтрації [28].

Принцип цифрової фільтрації полягає у математичному перетворенні дискретного сигналу. Після оцифрування аналогового сигналу формується послідовність відліків, над якими виконуються арифметичні операції відповідно до певного алгоритму. Результатом такої обробки є новий сигнал із покращеними характеристиками та зменшеним рівнем шуму.

Однією з головних переваг цифрових фільтрів над аналоговими є їх програмна реалізація. На відміну від аналогових схем, цифрові фільтри не залежать від температурної нестабільності електронних компонентів, не потребують складного апаратного налаштування та можуть легко модифікуватися шляхом зміни програмного коду [29]. Це робить цифрову фільтрацію особливо зручною для програмних систем аналізу сигналів.

Головною характеристикою будь-якого фільтра є його амплітудно-частотна характеристика (АЧХ), яка описує залежність коефіцієнта передачі від

частоти. Саме форма АЧХ визначає, які частоти будуть проходити через фільтр без значного ослаблення, а які – пригнічуватимуться. У загальному випадку цифрові фільтри поділяються на низькочастотні, високочастотні, смугові та режекторні.

Низькочастотні фільтри пропускають низькі частоти та пригнічують високочастотні складові. Саме такі фільтри найчастіше використовуються для згладжування сигналів та усунення шуму. Високочастотні фільтри, навпаки, виділяють швидкі зміни сигналу та пригнічують повільні коливання. Смугові фільтри дозволяють виділяти певний діапазон частот, а режекторні – пригнічувати вузькі частотні області [30].

У задачах вібраційної діагностики цифрова фільтрація відіграє особливо важливу роль. Вібраційні сигнали механічних систем часто містять велику кількість випадкових шумів та перешкод, які можуть приховувати корисні ознаки дефектів. Для ефективного аналізу необхідно виділити основні коливання системи та зменшити вплив випадкових високочастотних змін. Після фільтрації сигнал стає більш гладким та інформативним, що суттєво покращує результати подальшого FFT-аналізу [31].

У промислових системах обробки сигналів використовуються різноманітні методи цифрової фільтрації, зокрема фільтри Баттерворта, Чебишова, Бесселя, FIR- та IIR-фільтри. Такі методи забезпечують високу якість фільтрації та точне формування необхідної амплітудно-частотної характеристики. Проте реалізація складних цифрових фільтрів потребує значних обчислювальних ресурсів та ускладнює програмну систему [32].

У межах даної роботи для фільтрації вібраційного сигналу використовується метод ковзного середнього (Moving Average Filter), який є одним із найпростіших та найбільш поширених методів цифрової обробки сигналів. Основна ідея цього методу полягає у згладжуванні сигналу шляхом усереднення сусідніх значень.

Принцип роботи фільтра полягає у тому, що кожне значення сигналу замінюється середнім арифметичним сусідніх відліків. У результаті випадкові короточасні зміни сигналу згладжуються, а основна форма коливань зберігається.

Фізично це можна пояснити тим, що шум зазвичай має випадковий характер та швидко змінюється у часі. Під час усереднення позитивні та негативні випадкові відхилення частково компенсують одне одного, через що рівень шуму зменшується. Водночас основні гармонічні компоненти сигналу змінюються повільніше, тому вони практично не втрачаються після фільтрації.
[33]

Метод ковзного середнього має низьку обчислювальну складність, що є важливою перевагою для програмних систем аналізу даних. Реалізація такого фільтра не потребує складних математичних операцій або спеціалізованих бібліотек. Саме тому цей підхід широко використовується у навчальних та демонстраційних системах цифрової обробки сигналів [34].

У програмній системі VibrationAnalyzer фільтрація реалізована шляхом проходження по всіх елементах сигналу та обчислення середнього значення у вікні фіксованого розміру. Для кожного елемента масиву формується локальна область сусідніх відліків, після чого обчислюється їх середнє арифметичне. Отримане значення записується у новий масив, який і є результатом фільтрації
[35].

Важливим параметром методу є ширина вікна згладжування. При малому розмірі вікна рівень шуму зменшується незначно, тоді як надто велике вікно може призвести до втрати важливих деталей сигналу. У даній роботі використовується компромісне значення параметра, яке забезпечує достатнє пригнічення шуму без суттєвого спотворення форми сигналу [36].

Після виконання фільтрації сигнал стає більш плавним та стабільним. Це покращує візуальне сприйняття графіка, спрощує визначення амплітудних характеристик та підвищує точність FFT-аналізу. Крім того, згладжений сигнал

дозволяє більш надійно визначати RMS-значення та пікові характеристики, які використовуються для оцінки технічного стану механічного вузла.

Однією з особливостей методу ковзного середнього є його низькочастотний характер. Такий фільтр ефективно пригнічує швидкі високочастотні зміни сигналу, проте може частково послаблювати різкі імпульсні компоненти. У задачах технічної діагностики це необхідно враховувати, оскільки деякі типи дефектів можуть проявлятися саме у вигляді короткочасних імпульсів [37]. Проте для навчальної системи аналізу вібрацій та демонстрації основ цифрової обробки сигналів метод ковзного середнього є цілком достатнім та забезпечує хороший баланс між простотою реалізації та ефективністю фільтрації.

Таким чином, цифрова фільтрація є важливим етапом обробки вібраційних сигналів, який дозволяє зменшити рівень шуму, покращити якість спектрального аналізу та підвищити точність визначення діагностичних параметрів. Використання методу ковзного середнього у системі VibrationAnalyzer забезпечує ефективне згладжування сигналу та створює необхідні умови для подальшого аналізу технічного стану механічного обладнання [38].

1.6 Огляд існуючих рішень та обґрунтування власного підходу

На сучасному ринку програмного забезпечення існує значна кількість систем для вібраційного аналізу, моніторингу технічного стану обладнання та діагностики дефектів механічних вузлів. Такі системи широко використовуються у промисловості, енергетиці, машинобудуванні, транспортній сфері та наукових дослідженнях. Їх основне призначення полягає у зборі, обробці та аналізі сигналів вібрації з метою виявлення несправностей обладнання на ранніх стадіях розвитку дефектів.

Більшість сучасних систем вібраційного аналізу забезпечують широкий спектр функцій: спектральний аналіз сигналів, цифрову фільтрацію, побудову

					КВРКІ.22039.22.04.16 ПЗ	Арк. 23
Зм.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата		

часових та частотних характеристик, автоматичне визначення параметрів дефектів, а також довготривалий моніторинг стану механізмів. Однак різні програмні продукти мають суттєві відмінності за функціональністю, вартістю, вимогами до обладнання та можливістю використання у навчальних або дослідницьких цілях.

Для оцінки існуючих рішень доцільно розглянути найбільш відомі програмні комплекси, які застосовуються у сфері аналізу вібрацій, та визначити їх переваги й недоліки з точки зору створення навчальної або дослідницької системи.

Одним із найбільш відомих рішень є LabVIEW від National Instruments у поєднанні з пакетом Sound and Vibration Toolkit. Це потужне середовище для створення систем вимірювання, збору та аналізу даних, яке широко застосовується у промисловій автоматизації та наукових дослідженнях.

Основною особливістю LabVIEW є використання графічного програмування, де алгоритми створюються у вигляді блок-схем. Такий підхід дозволяє швидко реалізовувати системи збору та обробки сигналів без необхідності написання великої кількості текстового коду. Пакет Sound and Vibration Toolkit містить готові інструменти для аналізу вібраційних сигналів, зокрема функції швидкого перетворення Фур'є (FFT), октавного аналізу, спектрального аналізу, цифрової фільтрації та обчислення параметрів порядків обертання.

Серед переваг цього рішення слід виділити високу функціональність, стабільність роботи, підтримку професійного вимірювального обладнання та можливість інтеграції з апаратними платформами National Instruments DAQ. Система дозволяє створювати складні автоматизовані комплекси моніторингу технічного стану обладнання у реальному часі.

Проте використання LabVIEW має і низку суттєвих недоліків. Насамперед це висока вартість ліцензії, яка разом із додатковими модулями та обладнанням може становити тисячі доларів. Крім того, система є закритою екосистемою, що

обмежує гнучкість інтеграції з іншими платформами. Для повноцінної роботи зазвичай необхідне реальне вимірювальне обладнання, що ускладнює використання системи у навчальних цілях або для самостійних досліджень.

Ще одним відомим рішенням є SKF @ptitude Analyst від SKF – спеціалізований програмний комплекс для моніторингу стану промислового обладнання та діагностики дефектів. Дана система створена одним із провідних світових виробників підшипників і орієнтована переважно на промислове застосування.

SKF @ptitude Analyst забезпечує професійний аналіз вібраційних сигналів та містить вбудовані бази даних характерних частот дефектів підшипників, валів, зубчастих передач та інших механічних вузлів. Система підтримує автоматичне визначення типових несправностей, формування діагностичних звітів і рекомендацій щодо технічного обслуговування обладнання.

Перевагою цього рішення є висока точність діагностики, орієнтація на промислові задачі та наявність готових алгоритмів аналізу. Система дозволяє реалізовувати безперервний моніторинг обладнання на підприємствах та виявляти дефекти ще до виникнення аварійних ситуацій.

Однак SKF @ptitude Analyst має низку обмежень. Система є повністю комерційною та потребує дорогого спеціалізованого обладнання для збору даних. Вона орієнтована насамперед на великі промислові підприємства, а не на навчальні або науково-дослідні задачі. Крім того, користувач фактично залежить від екосистеми виробника та сумісних апаратних рішень.

Важливе місце у сфері аналізу сигналів займають відкриті бібліотеки мови програмування Python, зокрема NumPy, SciPy та Matplotlib. Ці бібліотеки забезпечують потужний математичний апарат для цифрової обробки сигналів та активно використовуються у наукових дослідженнях і навчанні.

Бібліотека NumPy реалізує ефективні засоби роботи з багатовимірними масивами та математичними операціями. SciPy містить широкий набір алгоритмів цифрової обробки сигналів, включаючи FFT-аналіз, цифрову

					КВРКІ.22039.22.04.16 ПЗ	Арк. 25
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

фільтрацію, спектральний аналіз та статистичні методи. Matplotlib забезпечує побудову графіків та засобів візуалізації результатів обробки даних.

Головною перевагою використання Python-бібліотек є їх відкритість та безкоштовність. Користувач має повний доступ до вихідного коду, може змінювати алгоритми відповідно до власних потреб та інтегрувати систему з іншими програмними рішеннями. Також Python має велику спільноту користувачів і значну кількість готових прикладів та документації.

Проте використання лише окремих бібліотек Python має і певні недоліки. Незважаючи на наявність потужного математичного інструментарію, відсутні готові комплексні рішення для вібраційної діагностики. Для реалізації повного циклу аналізу необхідно самостійно створювати систему збору даних, алгоритми фільтрації, FFT-аналізу, візуалізації та автоматичної діагностики. Це потребує значного обсягу програмного коду та часу на розробку [39].

Крім того, більшість бібліотек не містять готових інструментів, які одночасно поєднують імітацію роботи датчика, генерацію сигналів, цифрову фільтрацію, спектральний аналіз та автоматичне визначення дефектів в єдиному програмному інтерфейсі.

Ще одним популярним середовищем для аналізу сигналів є MATLAB та пакет Signal Processing Toolbox від MathWorks. MATLAB широко використовується у наукових дослідженнях, інженерних розрахунках та освітньому процесі завдяки великій кількості готових математичних функцій. [40]

Signal Processing Toolbox надає засоби для спектрального аналізу, цифрової фільтрації, вейвлет-аналізу, аналізу часових рядів та моделювання сигналів. MATLAB забезпечує зручний графічний інтерфейс, високу точність математичних обчислень та велику кількість вбудованих інструментів для роботи з даними.

Перевагами MATLAB є висока функціональність, простота побудови алгоритмів та якісна документація. Система широко використовується у вищих

					КВРКІ.22039.22.04.16 ПЗ	Арк. 26
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

навчальних закладах та дослідницьких лабораторіях для вивчення цифрової обробки сигналів.

Разом із тим MATLAB має і суттєві недоліки. Основним із них є висока вартість ліцензії, особливо при використанні додаткових пакетів розширення. Крім того, система є закритою платформою, що обмежує можливості модифікації внутрішніх алгоритмів.

У результаті можна зробити висновок, що існує потреба у створенні доступної програмної системи, яка б поєднувала генерацію тестових сигналів, цифрову фільтрацію, FFT-аналіз, візуалізацію результатів та елементи автоматичної діагностики в межах єдиного програмного комплексу. Особливо актуальним є створення такого рішення для навчальних і дослідницьких цілей, де важливими факторами є низька вартість, відсутність необхідності використання дорогого обладнання та можливість модифікації алгоритмів відповідно до потреб користувача [41].

Таблиця 1.3 – Порівняння існуючих рішень

Рішення	Тип	Вартість	Потребує обладнання	Навчальне застосування
LabVIEW + SVT	Комерційне	Висока	Так	Обмежена
SKF @plitude	Комерційне	Висока	Так	Ні
MATLAB Signal Proc.	Комерційне	Висока	Ні	Часткова
NumPy/SciPy	Відкрите	Безкоштовно	Ні	Часткова
VibrationAnalyzer	Власна розробка	Безкоштовно	Ні	Повна

Проведений аналіз існуючих програмних рішень показав, що більшість сучасних систем вібраційної діагностики орієнтовані переважно на промислове використання та роботу з реальним вимірювальним обладнанням. Такі системи характеризуються високою функціональністю, однак водночас мають значну

вартість, складність інтеграції та потребують спеціалізованих датчиків, контролерів і професійного програмного забезпечення [42]. Це суттєво обмежує можливість їх використання у навчальному процесі, науково-дослідних роботах та демонстраційних системах.

У зв'язку з цим у межах даної кваліфікаційної роботи було обрано підхід, заснований на створенні автономної програмної системи VibrationAnalyzer, яка реалізує основні принципи вібраційного моніторингу без необхідності використання фізичних датчиків та промислового обладнання. Основною ідеєю запропонованого підходу є програмне моделювання вібраційного сигналу та подальша реалізація повного циклу його цифрової обробки в єдиному програмному середовищі.

На відміну від більшості промислових рішень, розроблена система не орієнтується на вузькоспеціалізовані задачі конкретного типу обладнання. Її головною метою є демонстрація принципів цифрової обробки вібраційних сигналів, спектрального аналізу та автоматичної класифікації технічного стану механічних вузлів. Саме тому під час проектування системи особлива увага приділялася простоті реалізації, наочності роботи алгоритмів та можливості подальшого розширення функціональності [43].

В основі системи лежить модель генерації тестового вібраційного сигналу, що імітує роботу механічного вузла у різних технічних станах. Для формування сигналу використовується сума гармонічних компонентів та випадкових шумових складових. Такий підхід дозволяє відтворити поведінку реальних механічних систем, у яких вібрація формується як результат взаємодії регулярних періодичних коливань та випадкових збурень.

Сигнал справного вузла моделюється як основна гармоніка з незначним рівнем шуму та слабкими додатковими коливаннями. Для моделювання дефектного стану до сигналу додаються додаткові гармонічні складові та збільшується рівень випадкового шуму. Критичний стан характеризується значним зростанням амплітуди коливань, появою високочастотних компонентів

та суттєвим підвищенням рівня шуму [44]. Такий підхід дозволяє наочно продемонструвати зміну характеристик сигналу залежно від технічного стану механічного вузла.

Особливістю розробленої системи є реалізація повного циклу аналізу вібраційного сигналу. Після генерації сигналу виконується його цифрова фільтрація з метою зменшення впливу шумових компонентів. У даній роботі для спрощення реалізації використовується метод ковзного середнього, який дозволяє ефективно згладжувати високочастотні випадкові коливання та покращувати якість подальшого аналізу. Незважаючи на простоту, такий метод добре підходить для демонстраційних та навчальних задач, оскільки дозволяє наочно спостерігати процес очищення сигналу від шуму.

Після фільтрації сигналу виконується FFT-аналіз, який є основним методом спектрального аналізу у системі. Для реалізації швидкого перетворення Фур'є використовується бібліотека MathNet.Numerics, яка забезпечує ефективне обчислення спектра сигналу [45]. FFT-аналіз дозволяє перейти від часової області до частотної та визначити домінуючі частоти сигналу. Саме спектральний аналіз забезпечує можливість виявлення характерних ознак дефектів, оскільки різні механічні несправності проявляються у вигляді специфічних частотних компонентів.

Важливим елементом власного підходу є автоматичне визначення діагностичних параметрів сигналу. У системі реалізовано розрахунок середньоквадратичного значення (RMS), пікових значень сигналу та домінуючої частоти спектра. RMS використовується як основний інтегральний показник енергії вібрації, тоді як пікове значення дозволяє оцінити максимальні амплітудні навантаження. Домінуюча частота визначається шляхом пошуку найбільшої спектральної компоненти у результаті FFT-аналізу [46].

На основі отриманих параметрів система автоматично виконує класифікацію технічного стану механічного вузла. Для цього використовується пороговий метод прийняття рішень, у якому значення RMS порівнюється з

попередньо визначеними межами. Залежно від отриманого результату система визначає один із трьох станів: «справний», «допустиме відхилення» або «можливий дефект». Такий підхід дозволяє реалізувати базову автоматизовану діагностику без використання складних алгоритмів машинного навчання та забезпечує достатню наочність для навчальних цілей.

Ще однією важливою особливістю системи є наявність графічного інтерфейсу користувача. Для побудови графіків сигналу та спектра використовується бібліотека ScottPlot, яка забезпечує швидку візуалізацію даних у середовищі Windows Forms. Інтерфейс системи дозволяє одночасно відображати вихідний сигнал, відфільтрований сигнал та FFT-спектр, що значно підвищує наочність роботи алгоритмів та спрощує аналіз результатів.

Для реалізації програмної системи було обрано мову програмування C# та платформу .NET. Такий вибір обумовлений кількома факторами. По-перше, C# забезпечує зручні засоби створення графічних інтерфейсів та підтримує об'єктно-орієнтований підхід до розробки програмного забезпечення. По-друге, платформа .NET містить значну кількість готових бібліотек для роботи з файлами, математичними обчисленнями та візуалізацією даних. Крім того, Windows Forms дозволяє швидко реалізовувати інтерактивні програмні системи з мінімальними витратами часу на розробку інтерфейсу.

Важливою перевагою запропонованого підходу є відсутність необхідності використання реального вимірювального обладнання. Це суттєво спрощує проведення експериментів та дозволяє використовувати систему навіть на звичайних персональних комп'ютерах без додаткових апаратних засобів. Завдяки цьому система може ефективно застосовуватися у навчальному процесі для демонстрації принципів цифрової обробки сигналів, FFT-аналізу та технічної діагностики.

Розроблена система також має модульну структуру, що спрощує її подальший розвиток. У майбутньому система може бути розширена шляхом інтеграції з реальними акселерометрами, реалізації більш складних методів

цифрової фільтрації, впровадження вейвлет-аналізу, методів машинного навчання та створення веб-інтерфейсу для дистанційного моніторингу сигналів у режимі реального часу.

Таким чином, запропонований власний підхід дозволяє поєднати простоту реалізації, наочність роботи алгоритмів та достатню функціональність для демонстрації основних принципів вібраційної діагностики. Розроблена система VibrationAnalyzer забезпечує реалізацію повного циклу аналізу вібраційних сигналів – від генерації сигналу до автоматичної оцінки технічного стану механічного вузла – та може використовуватись як навчальна, дослідницька або демонстраційна програмна платформа.

1.7 Постановка задач

На основі проведеного аналізу предметної області, методів цифрової обробки сигналів та існуючих програмних рішень було сформульовано задачу розроблення програмної системи VibrationAnalyzer.

Основною метою розробки є створення програмної системи мовою C# у середовищі .NET Windows Forms, яка реалізує імітацію роботи вібраційного датчика та забезпечує повний цикл аналізу вібраційного сигналу без використання реального вимірювального обладнання.

Система повинна забезпечувати генерацію тестового сигналу, цифрову фільтрацію, FFT-аналіз, розрахунок діагностичних параметрів, автоматичну оцінку технічного стану механічного вузла, візуалізацію результатів та формування текстового звіту.

Під час проєктування системи особлива увага приділялася простоті використання, наочності роботи алгоритмів та можливості використання системи у навчальних і демонстраційних цілях. А також зручності налаштування тестування та подальшої модернізації програмного забезпечення.

Для реалізації поставленої задачі система повинна забезпечувати виконання таких функцій:

					КВРКІ.22039.22.04.16 ПЗ	Арк. 31
Зм.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата		

1. Генерація вібраційного сигналу:

- формування гармонічного сигналу на основі синусоїдальної функції;
- моделювання різних технічних станів вузла;
- формування додаткових гармонічних складових для імітації дефектів.

2. Цифрова фільтрація сигналу:

- згладжування сигналу методом ковзного середнього;
- зменшення впливу випадкових шумових складових;
- покращення якості подальшого спектрального аналізу.

3. FFT-аналіз:

- виконання швидкого перетворення Фур'є;
- побудова амплітудного спектра;
- визначення домінуючої частоти сигналу;

4. Розрахунок діагностичних параметрів:

- обчислення середньоквадратичного значення RMS;
- визначення пікового значення сигналу;
- визначення домінуючої частоти спектра.

5. Автоматична класифікація технічного стану:

- визначення стану «Healthy»;
- визначення стану «Acceptable deviation»;
- визначення стану «Possible defect»;

6. Візуалізація результатів:

- відображення вихідного сигналу;
- відображення відфільтрованого сигналу;
- побудова FFT-спектра;
- відображення діагностичних параметрів у графічному інтерфейсі.

7. Збереження результатів аналізу:

- формування текстового звіту;
- збереження результатів у файл;

Для реалізації програмної системи використовується мова програмування C#, бібліотека MathNet.Numerics для FFT-аналізу та бібліотека ScottPlot для побудови графіків сигналів і спектрів.

Таблиця 1.4 – Функціональні вимоги до системи VibrationAnalyzer

Функція	Вимога	Метод реалізації	Пріоритет
Генерація сигналу	Синусоїда + шум + дефекти	Math.Sin + Random	Обов'язкова
FFT-аналіз	Амплітудний спектр	MathNet.Numerics FFT	Обов'язкова
Фільтрація	Згладжування сигналу	Moving Average	Обов'язкова
Діагностика	RMS, Peak, класифікація	LINQ + умовна логіка	Обов'язкова
Збереження	Текстовий звіт	File.WriteAllText	Обов'язкова
Візуалізація	3 графіки + показники	ScottPlot	Обов'язкова

1.8 Висновки до першого розділу

У першому розділі проведено аналіз предметної області та теоретичних основ, необхідних для розроблення програмної системи VibrationAnalyzer.

Розглянуто принципи вібраційного моніторингу як одного з основних методів технічної діагностики механічного обладнання. Проаналізовано фізичну природу вібраційних сигналів, їх структуру та основні характеристики. Встановлено, що вібраційний сигнал містить значний обсяг інформації про технічний стан механічних вузлів, а зміна параметрів сигналу може свідчити про виникнення дефектів або відхилень у роботі обладнання.

Досліджено основні числові характеристики вібраційних сигналів, зокрема середньоквадратичне значення RMS, пікове значення та домінуючу частоту.

Визначено їх практичне значення для задач технічної діагностики та оцінки рівня вібрації.

Розглянуто основні методи аналізу вібраційних сигналів у часовій та частотній областях, які широко застосовуються для оцінювання технічного стану механічних систем і виявлення можливих дефектів обладнання. У часовій області проаналізовано такі характеристики сигналів, як амплітуда, середнє значення, середньоквадратичне значення (RMS), пікові значення та інші статистичні параметри, що дозволяють оцінити загальний рівень вібрації та виявити відхилення від нормального режиму роботи. Особливу увагу приділено швидкому перетворенню Фур'є (FFT) як одному з найефективніших інструментів спектрального аналізу вібраційних сигналів. Детально розглянуто математичні основи дискретного перетворення Фур'є, принципи його застосування до цифрових сигналів та особливості переходу від часової області до частотної.

Показано, що спектральний аналіз дозволяє визначати частотні компоненти сигналу, які часто містять важливу діагностичну інформацію про стан підшипників, валів, зубчастих передач та інших елементів механічних вузлів. Також проаналізовано принцип роботи алгоритму FFT, який забезпечує значне скорочення обчислювальної складності порівняно з прямим обчисленням дискретного перетворення Фур'є.

Завдяки цьому FFT широко використовується у сучасних системах моніторингу та діагностики в режимі реального часу. Розглянуто особливості інтерпретації спектрів, вплив частоти дискретизації та кількості відліків на точність аналізу.

Також досліджено методи цифрової фільтрації сигналів та їх роль у зменшенні впливу шумових компонентів. Розглянуто основні типи цифрових фільтрів, принципи згладжування сигналів та метод ковзного середнього, який використовується у розробленій системі.

Проведено огляд сучасних програмних рішень для вібраційного аналізу та технічної діагностики, зокрема LabVIEW, SKF @plitude Analyst, MATLAB та відкритих бібліотек цифрової обробки сигналів. Встановлено, що більшість існуючих систем орієнтовані переважно на промислове використання, потребують дорогого обладнання або не забезпечують готового інтегрованого середовища для навчального моделювання та демонстрації принципів вібраційної діагностики.

На основі проведеного аналізу обґрунтовано доцільність створення власної програмної системи VibrationAnalyzer, яка забезпечує генерацію вібраційного сигналу, цифрову фільтрацію, FFT-аналіз, розрахунок діагностичних параметрів, автоматичну класифікацію технічного стану механічного вузла та візуалізацію результатів у межах єдиного програмного середовища. Запропонований підхід дозволяє об'єднати основні етапи обробки сигналів у межах одного програмного комплексу, що значно спрощує проведення досліджень, тестування алгоритмів та оцінювання ефективності методів технічної діагностики.

Особливістю розроблюваної системи є її модульна структура, яка забезпечує простоту подальшого розширення функціональних можливостей та адаптації до нових вимог. Завдяки цьому система може використовуватися не лише як демонстраційний інструмент, а й як основа для створення більш складних програмних рішень у сфері моніторингу технічного стану обладнання.

У результаті сформульовано основні функціональні вимоги до програмної системи, визначено ключові програмні модулі, а також окреслено напрямки подальшої реалізації та вдосконалення програмного комплексу у наступних розділах роботи.

					КВРКІ.22039.22.04.16 ПЗ	Арк. 35
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2 ПРОЄКТУВАННЯ СИСТЕМИ АНАЛІЗУ ВІБРАЦІЙНИХ СИГНАЛІВ

2.1 Архітектура програмної системи

Програмна система VibrationAnalyzer розроблена за модульним принципом, який забезпечує логічне розділення функціональності між окремими компонентами системи. Такий підхід дозволяє спростити процес розроблення, тестування та подальшої модифікації програмного забезпечення. Кожен модуль відповідає за виконання окремого етапу обробки даних та взаємодіє з іншими компонентами через передачу результатів обчислень.

Використання модульної архітектури забезпечує низку важливих переваг. Насамперед це підвищення зрозумілості структури програми, оскільки кожен компонент виконує чітко визначену задачу. Крім того, модульний підхід дозволяє незалежно тестувати окремі частини системи, спрощує пошук помилок та забезпечує можливість подальшого розширення функціональності без суттєвої зміни вже реалізованих компонентів.

Архітектура системи складається з шести основних функціональних модулів:

1. Модуль генерації сигналу (SignalGenerator).
2. Модуль FFT-аналізу (FFTAlyzer).
3. Модуль цифрової фільтрації (SignalFilter).
4. Модуль діагностики (DiagnosticsEngine).
5. Модуль збереження результатів (ResultSaver).
6. Модуль візуалізації (Visualizer).

Модуль генерації сигналу виконує імітацію роботи вібраційного датчика. У ньому формується базовий гармонічний сигнал, до якого додається гаусівський шум та штучні дефекти у вигляді короточасних ударних імпульсів. У результаті формується тестовий вібраційний сигнал, який за своїми характеристиками наближений до реальних сигналів механічних систем.

Модуль FFT-аналізу реалізує спектральний аналіз сигналу на основі алгоритму швидкого перетворення Фур'є. Перед виконанням FFT до сигналу застосовується вікно Ханна, що дозволяє зменшити ефект витoku спектра та підвищити точність визначення частотних компонентів.

Модуль цифрової фільтрації виконує очищення сигналу від високочастотних шумових складових за допомогою низькочастотного фільтра Баттерворта четвертого порядку. Для усунення фазових спотворень використовується двохпрохідна фільтрація методом `filtfilt`.

Модуль діагностики виконує обчислення основних статистичних параметрів сигналу, зокрема RMS та пікового значення. На основі отриманих параметрів реалізується автоматична класифікація технічного стану вузла за трьома рівнями: нормальний стан, допустиме відхилення та можливий дефект.

Модуль збереження результатів забезпечує запис діагностичних параметрів у текстовий файл із міткою часу. Такий підхід дозволяє накопичувати результати аналізу та використовувати їх для подальших досліджень або порівняння.

Модуль візуалізації формує графічне представлення результатів роботи системи. Користувачу відображаються часовий сигнал, амплітудний спектр FFT, відфільтрований сигнал та панель із діагностичними показниками. Візуалізація реалізована засобами бібліотеки `Matplotlib`.

З точки зору організації потоків даних архітектура системи реалізує лінійний конвеєр обробки інформації. Спочатку формується вхідний сигнал, після чого він передається до модулів FFT-аналізу та фільтрації. Отримані результати використовуються модулем діагностики для розрахунку параметрів стану системи. Після цього результати зберігаються у файл та передаються до модуля візуалізації для побудови графіків.

На рисунку 2.1 наведено загальну архітектуру програмної системи `VibrationAnalyzer` та взаємодію її основних модулів.

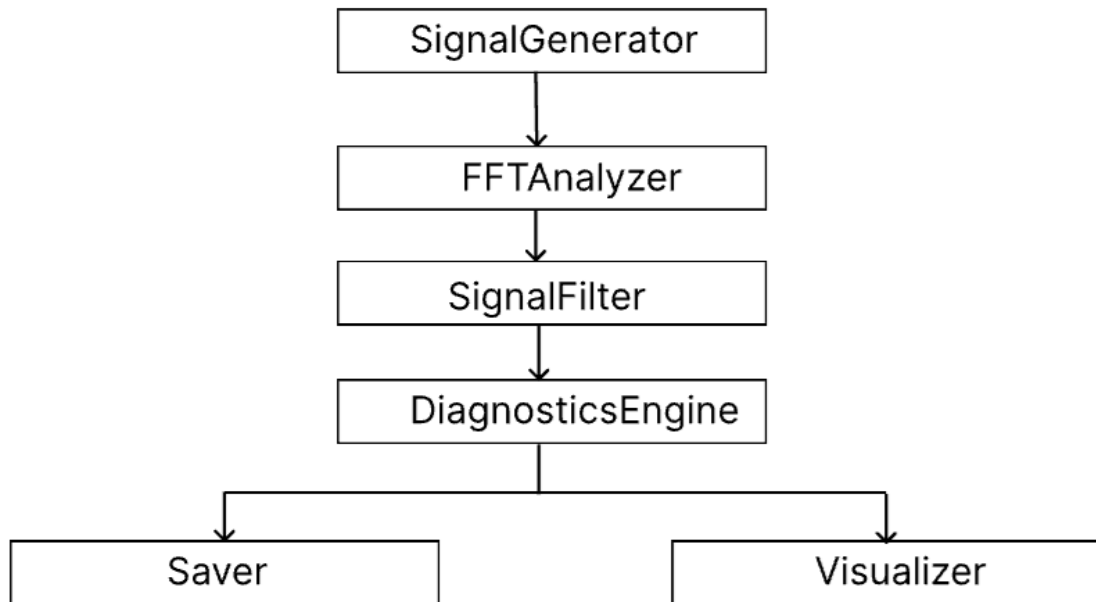


Рисунок 2.1 – Схема рхітектури та потік даних системи

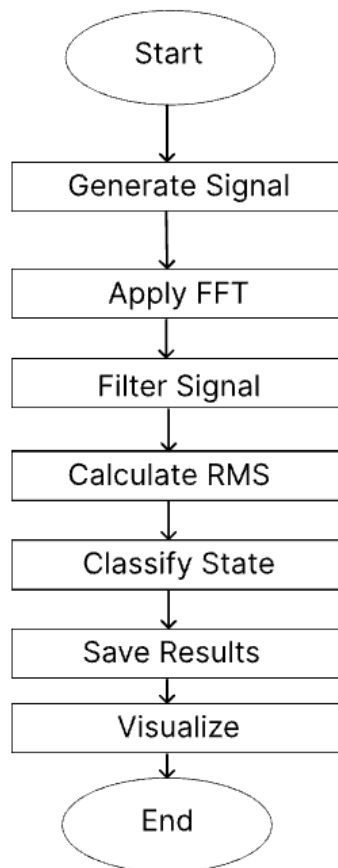


Рисунок 2.1 –Блок-схема рхітектури та потік даних системи

Під час проектування системи розглядалися два основних підходи до реалізації архітектури: об'єктно-орієнтований та функціональний. У межах даної роботи було обрано функціональний підхід, оскільки він є простішим для реалізації та більш наочним у навчальних цілях. Враховуючи відносно невеликий обсяг системи, використання окремих функцій замість складної ієрархії класів дозволило зберегти простоту структури програмного коду та покращити його читабельність.

Усі модулі системи реалізовані у межах одного Python-файлу `vibration_analyzer.py`. Головна функція `main()` виконує послідовну координацію роботи всіх компонентів системи: генерацію сигналу, FFT-аналіз, цифрову фільтрацію, діагностику, збереження результатів та побудову графіків. Основні параметри системи винесені у глобальні константи, що забезпечує зручність налаштування та тестування програмного забезпечення.

Запропонована архітектура забезпечує достатню гнучкість для подальшого розвитку системи. У майбутньому вона може бути розширена модулями роботи з реальними акселерометрами, системами потокової обробки даних, алгоритмами машинного навчання або веб-інтерфейсом для дистанційного моніторингу стану обладнання.

2.2 Модуль імітації вібраційного датчика

Одним із компонентів програмної системи `VibrationAnalyzer` є модуль імітації вібраційного датчика. Основне призначення даного модуля полягає у формуванні штучного вібраційного сигналу, характеристики якого максимально наближені до сигналів реальних механічних систем. Використання програмної моделі замість фізичного датчика дозволяє проводити тестування алгоритмів аналізу без необхідності застосування дорогого промислового обладнання та спеціалізованих вимірювальних систем.

					КВРКІ.22039.22.04.16 ПЗ	Арк. 39
Зм.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата		

У реальних умовах сигнали вібрації формуються внаслідок механічних коливань елементів обладнання: валів, підшипників, роторів, зубчастих передач та інших рухомих вузлів. Під час роботи механізмів виникають як регулярні гармонічні коливання, пов'язані з частотою обертання, так і випадкові шумові компоненти, що спричиняються тертям, ударами, люфтами та зовнішніми перешкодами. Крім того, при появі дефектів у конструкції обладнання у сигналі виникають локальні імпульсні аномалії, які є важливими ознаками технічної несправності.

Для наближення програмної моделі до реальних умов роботи обладнання в системі використовується комбінована модель сигналу, що складається з трьох основних компонентів:

$$x(t) = x_{base}(t) + x_{noise}(t) + x_{defects}(t)$$

де:

1. $x_{base}(t)$ – базовий гармонічний сигнал.
2. $x_{noise}(t)$ – шумова складова.
3. $x_{defects}(t)$ – штучні дефекти у вигляді імпульсів.

Базовий сигнал формується як гармонічне коливання:

$$x_{base}(t) = A \sin(2\pi ft)$$

де:

1. A – амплітуда сигналу.
2. f – основна частота коливань.
3. t – часовий параметр.

Використання синусоїдальної моделі пояснюється тим, що більшість обертових механізмів у нормальному режимі роботи створюють саме періодичні гармонічні коливання. Основна частота сигналу відповідає частоті обертання

механічного вузла та надалі використовується для аналізу спектрального складу сигналу.

Для формування часового масиву використовується частота дискретизації. Часовий вектор створюється рівномірно з кроком:

$$\Delta t = \frac{1g}{f_8}$$

Тривалість сигналу у системі становить 2 секунди, тому загальна кількість вибірок визначається співвідношенням:

$$N = f_8 * duration$$

Для параметрів системи: $N=1000*2=2000$

Таким чином, кожен згенерований сигнал містить 2000 дискретних відліків.

Для імітації реальних умов вимірювання до базового гармонічного сигналу додається гаусівський шум. Шумова складова генерується за допомогою функції `numpy.random.normal()`, яка формує випадкові значення з нормальним розподілом. Гаусівський шум використовується як модель випадкових перешкод вимірювальної системи та паразитних механічних коливань. У більшості практичних задач цифрової обробки сигналів саме нормальний розподіл використовується для опису випадкових шумових процесів.

Рівень шуму задається параметром `noise_level`. При значенні `noise_level = 0.1` амплітуда шуму становить приблизно 10 % від амплітуди основного сигналу, що відповідає реальним умовам вимірювання вібрацій.

Особливу роль у системі відіграє моделювання штучних дефектів. У реальних механічних системах дефекти підшипників, валів або зубчастих передач часто проявляються короткочасними ударними імпульсами. Саме такі імпульси є одними з головних індикаторів несправності обладнання.

					КВРКІ.22039.22.04.16 ПЗ	Арк. 41
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

У системі VibrationAnalyzer дефекти реалізуються як локальні трапецієподібні імпульси, які додаються до сигналу у випадкових точках часового ряду. Для формування дефекту використовується масив вагових коефіцієнтів: [0.3, 0.7, 1.0, 0.7, 0.3]

Така форма імпульсу була обрана як компроміс між простотою реалізації та наближенням до реальних фізичних процесів. На відміну від прямокутного імпульсу, трапецієподібна форма створює менше спектральних артефактів та забезпечує більш природний вигляд сигналу.

Кількість дефектів задається параметром num_defects. При збільшенні кількості або амплітуди імпульсів зростає середньоквадратичне значення сигналу RMS, що безпосередньо впливає на результат автоматичної діагностики.

На рисунку 2.6 наведено приклад згенерованого вібраційного сигналу, сформованого модулем імітації датчика.

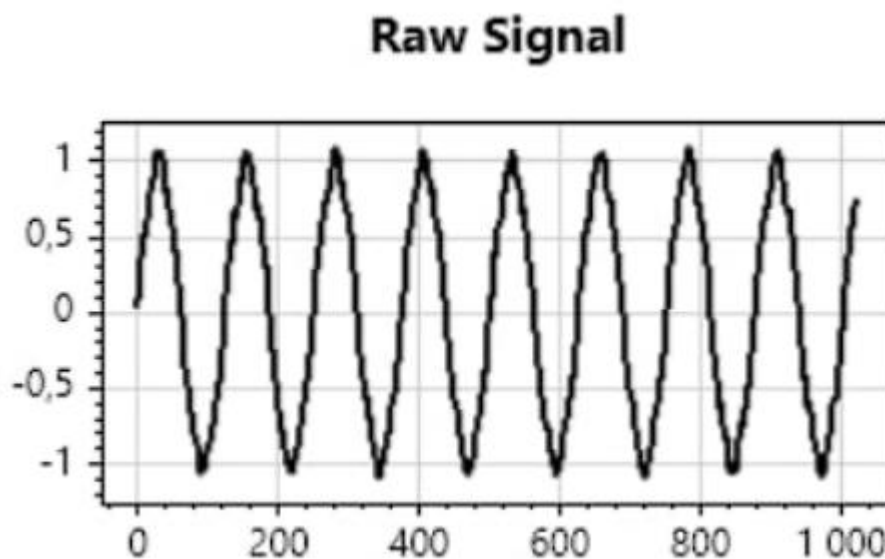


Рисунок 2.3 – Зображення кількості та ампліту в імпульсів

На графіку можна спостерігати гармонічний характер основного сигналу, на який накладаються випадкові шумові коливання та локальні імпульсні аномалії. Основна синусоїдальна складова формує регулярну структуру

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

коливань, що відповідає нормальному режиму роботи механічної системи. Шумова складова створює дрібні хаотичні відхилення амплітуди, які імітують випадкові перешкоди реального вимірювального середовища.

Особливу увагу на графіку привертають локальні імпульсні відхилення сигналу. Саме ці ділянки відповідають штучно змодельованим дефектам механічного вузла. У часовій області такі імпульси проявляються як короткочасні різкі зміни амплітуди, а у спектральній області призводять до появи додаткових гармонік та збільшення високочастотних компонентів.

Побудова графіка виконується засобами бібліотеки Matplotlib. Для відображення сигналу використовується часовий масив та відповідний масив значень амплітуди. Візуалізація сигналу дозволяє наочно оцінювати характер коливань, рівень шуму та наявність дефектів ще до виконання спектрального аналізу.

Графічне представлення сигналу є важливою частиною системи, оскільки саме візуальний аналіз дозволяє оператору або досліднику швидко оцінити стан механічної системи. У реальних системах вібраційного моніторингу часові графіки використовуються для виявлення аномалій, аналізу ударних процесів та попереднього визначення можливих несправностей.

Для реалізації модуля генерації сигналу використовуються бібліотеки NumPy та random. NumPy забезпечує ефективну роботу з масивами даних та математичними операціями, що дозволяє швидко формувати часові ряди великої довжини. Генерація шуму та математичні операції виконуються у векторизованому вигляді, що значно підвищує продуктивність системи.

Таблиця 2.1 – Параметри модуля генерації сигналу

Параметр	Позначення	За замовч.	Вплив на результат
Частота	freq	50 Гц	Формування базової гармоніки

Кінець таблиці 2.1

Амплітуда	amplitude	1.0	Масштаб коливань
Частота дискретизації	fs	1000 Гц	Формування часової сітки
Тривалість	duration	2.0 с	Кількість вибірок
Рівень шуму	noise_level	0.1	Інтенсивність шумових компонентів
Кількість дефектів	num_defects	3	Кількість імпульсних аномалій

Таким чином, модуль імітації вібраційного датчика забезпечує формування реалістичного тестового сигналу, який поєднує гармонічну основу, шумові компоненти та локальні дефекти. Отриманий сигнал використовується як вхідні дані для подальших етапів цифрової обробки, FFT-аналізу. авіа

2.3 Модуль FFT-аналізу

Модуль FFT-аналізу є одним із перших компонентів програмної системи VibrationAnalyzer, оскільки саме він забезпечує перехід від часової області представлення сигналу до частотної. У задачах вібраційної діагностики саме частотна область є основним джерелом діагностичної інформації, оскільки більшість дефектів механічних систем проявляються у вигляді характерних частотних компонентів або появи додаткових гармонік у спектрі сигналу.

У розробленій системі модуль FFT-аналізу реалізує класичний підхід цифрової спектральної обробки сигналів на основі швидкого перетворення Фур'є (FFT – Fast Fourier Transform), який є ефективною обчислювальною реалізацією дискретного перетворення Фур'є. Вхідними даними для модуля є

часовий масив вібраційного сигналу, сформований модулем генерації або отриманий після цифрової фільтрації.

Перед виконанням перетворення сигнал проходить попередню обробку із застосуванням віконної функції. Це є важливим етапом, оскільки FFT аналізує скінченний фрагмент сигналу, і різкі обриви на межах цього фрагмента призводять до виникнення ефекту спектрального витоку. Для мінімізації цього ефекту у системі використовується вікно Ханна, яке плавно зменшує амплітуду сигналу на краях аналізованого інтервалу та забезпечує більш коректне спектральне представлення.

Після цього до віконованого сигналу застосовується алгоритм швидкого перетворення Фур'є, результатом якого є комплексний спектр сигналу. Для практичного аналізу використовується лише його модульна складова, яка відповідає амплітудному спектру.

Коефіцієнт нормування використовується для коректного відображення амплітуд у випадку аналізу лише позитивної частини спектра, оскільки енергія сигналу симетрично розподілена між позитивними та негативними частотами..

Практичний результат роботи модуля FFT-аналізу представлений у вигляді амплітудного спектру, який відображає розподіл енергії сигналу за частотами.

Рисунок 2.2 – Амплітудний спектр вібраційного сигналу (FFT-аналіз системи VibrationAnalyzer)

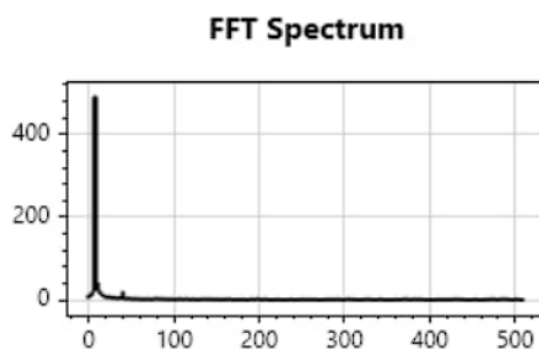


Рисунок 2.4 – Зображення результату модуля FFT-аналізу

На представленому спектрі (Рисунок 2.2) зображено результат роботи модуля FFT-аналізу для згенерованого вібраційного сигналу. По осі X відкладено частоту сигналу в герцах, а по осі Y – нормовану амплітуду спектральних складових.

Основним елементом спектра є чітко виражений пік на частоті 50 Гц, який відповідає базовій синусоїдальній складовій, сформованій модулем генерації сигналу. Наявність цього піку підтверджує коректність роботи алгоритму FFT та правильність попередньої обробки сигналу з використанням вікна Ханна.

Окрім основної гармоніки, на спектрі також спостерігаються додаткові складові меншої амплітуди. У реальних системах такі додаткові компоненти можуть відповідати механічним несправностям, таким як дисбаланс ротора, знос підшипників або люфти в механічних з'єднаннях.

Важливою особливістю отриманого спектру є відсутність значного розмиття основної гармоніки. Це свідчить про ефективність використання вікна Ханна, яке зменшує спектральний витік та дозволяє отримати більш точну локалізацію частотних компонентів. Без застосування віконної функції енергія основного сигналу розподілялася б по сусідніх частотах, що ускладнило б подальшу діагностику.

Отриманий спектр також демонструє правильне обмеження діапазону аналізу до частот Найквіста. Це дозволяє уникнути ефекту накладання спектрів (aliasing) та забезпечує коректність частотного аналізу.

Таким чином, реалізований модуль FFT-аналізу забезпечує повноцінне перетворення сигналу з часової області у частотну, що є основою для подальшої діагностики технічного стану механічних вузлів у системі VibrationAnalyzer.

2.4 Модуль фільтраційного сигналу

У даній системі реалізовано низькочастотну цифрову фільтрацію на основі фільтра Баттерворта четвертого порядку. Вибір саме цього типу фільтра

					КВРКІ.22039.22.04.16 ПЗ	Арк. 46
Зм.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата		

зумовлений його максимально гладкою амплітудно-частотною характеристикою в смузі пропускання, що дозволяє уникнути викривлення корисного сигналу.

Перед побудовою фільтра виконується визначення основних параметрів системи, зокрема частоти дискретизації та частоти Найквіста. Для заданої частоти дискретизації $f_s = 1000$ Гц частота Найквіста становить.

Це означає, що всі частотні компоненти вище 500 Гц не можуть бути коректно представлені у цифровому сигналі та підлягають придушенню.

Саме це значення використовується для побудови цифрового фільтра Баттерворта за допомогою стандартних алгоритмів бібліотеки SciPy.

Коефіцієнти фільтра обчислюються функцією `butter(order=4, Wn=0.3, btype='low')`, яка формує передавальну функцію фільтра у вигляді пари коефіцієнтів чисельника та знаменника. Подальша обробка сигналу виконується за допомогою двохпрохідної фільтрації `filtfilt`, що дозволяє усунути фазові спотворення.

Особливістю функції `filtfilt` є застосування фільтра спочатку у прямому, а потім у зворотному напрямку. Це забезпечує компенсацію фазового зсуву, який зазвичай виникає у класичних цифрових фільтрах. У результаті вихідний сигнал зберігає правильне розташування характерних піків у часовій області, що є критично важливим для діагностики імпульсних дефектів.

Порядок фільтра $n = 4$ було обрано як компроміс між ефективністю пригнічення високочастотних складових та обчислювальною стабільністю. При цьому ефективний порядок системи після двохпрохідної фільтрації фактично подвоюється і становить 8, що забезпечує значне пригнічення шумових компонентів поза смугою пропускання.

Частота зрізу 150 Гц підібрана таким чином, щоб зберегти основну гармонічну складову сигналу (50 Гц) та її низькочастотні гармоніки, одночасно ефективно пригнічуючи шумові високочастотні компоненти, які переважно знаходяться у діапазоні понад 200 Гц.

Filtered Signal

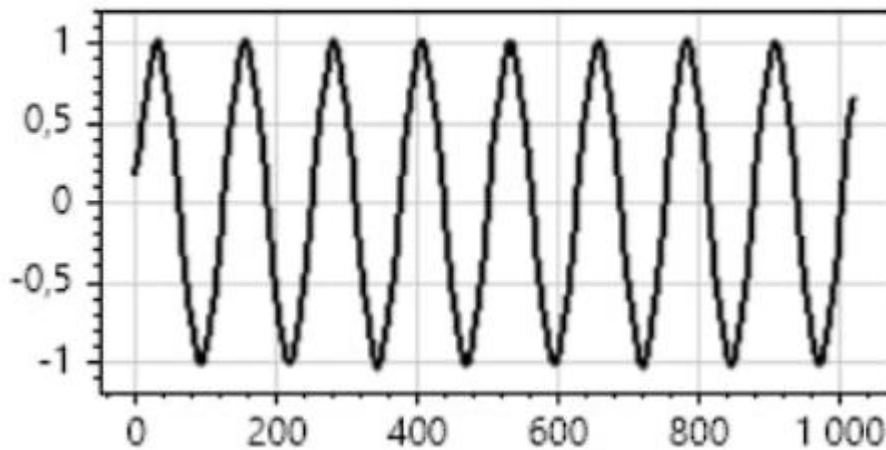


Рисунок 2.5 – Зображення відфільтрований вібраційний сигнал після застосування низькочастотного фільтра Баттерворта

На представленому графіку (Рисунок 2.3) зображено результат роботи модуля цифрової фільтрації. По осі X відкладено час сигналу, а по осі Y – амплітуду вібраційного сигналу після обробки.

Порівняно з вихідним сигналом, відфільтрований сигнал має значно більш згладжену форму. Високочастотні шумові коливання, які були присутні у сирому сигналі, практично повністю усунені. Це дозволяє краще виділити основну синусоїдальну складову, яка відповідає базовій роботі механічної системи.

Водночас важливо зазначити, що короткочасні імпульси, які моделюють дефекти, частково зберігаються у відфільтрованому сигналі. Це пояснюється тим, що такі імпульси містять як високочастотні, так і низькочастотні компоненти. Фільтр пригнічує лише високочастотну частину, тому загальна форма дефекту залишається помітною, але з меншою амплітудою.

Таким чином, застосування цифрової фільтрації дозволяє значно покращити співвідношення сигнал/шум, що є критично важливим для подальшого FFT-аналізу та розрахунку діагностичних параметрів. Очищений

сигнал забезпечує більш стабільні значення RMS та зменшує вплив випадкових шумових коливань на результати класифікації технічного стану системи.

Отриманий результат підтверджує ефективність обраного підходу до фільтрації та його доцільність у складі системи VibrationAnalyzer.

2.5 Розрахунок діагностичних показників та класифікація стану

Модуль діагностики є завершальним етапом обробки вібраційного сигналу в системі VibrationAnalyzer і відповідає за формування висновку про технічний стан досліджуваного вузла. Його основна функція полягає у перетворенні числових характеристик сигналу у зрозумілу інтерпретацію стану механічної системи, що є ключовим етапом у задачах технічної діагностики та прогнозного обслуговування.

У розробленій системі для оцінки стану використовуються класичні статистичні параметри сигналу, які широко застосовуються у вібраційній діагностиці промислового обладнання. Основним з них є середньоквадратичне значення сигналу (RMS – Root Mean Square), яке характеризує енергетичний рівень коливального процесу.

Математично RMS визначається як:

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum x_i^2}$$

де N – кількість відліків сигналу,

x_i – значення сигналу в дискретний момент часу.

Фізично RMS відображає середню потужність вібраційного процесу. Для ідеального гармонічного сигналу з амплітудою A середньоквадратичне значення становить $\frac{A}{\sqrt{2}} \approx 0.707A$. У реальних умовах експлуатації механічних систем

RMS зазвичай перевищує це значення через наявність шумів, ударних імпульсів та додаткових коливальних складових.

Другим важливим параметром є пікове значення сигналу, яке визначається як максимальна абсолютна амплітуда

Цей показник є особливо чутливим до короточасних імпульсних збурень, які часто відповідають локальним дефектам механічних елементів, таким як удари, зазори або нерівномірності поверхонь. У поєднанні з RMS він дозволяє оцінити імпульсний характер сигналу через похідний параметр – пік-фактор (Peak/RMS).

Зі збільшенням ступеня деградації механічної системи спостерігається зростання як RMS, так і пікових значень, однак найбільш інформативним для загальної оцінки стану в даній роботі обрано саме RMS як інтегральну характеристику енергетичного стану сигналу.

На основі обчисленого RMS у системі реалізовано трирівневу класифікацію технічного стану вузла. Такий підхід є спрощеною моделлю промислових систем моніторингу стану обладнання (Condition Monitoring), де аналогічні порогові критерії використовуються для прийняття рішень щодо технічного обслуговування.

Порогові значення $RMS = 0.8$ та $RMS = 1.5$ були визначені експериментально на основі моделювання сигналів із різними рівнями шуму та кількістю штучних дефектів. Значення 0.8 відповідає межі нормальної експлуатації з урахуванням допустимих коливань і шумів вимірювальної системи. У цьому діапазоні сигнал характеризується стабільною поведінкою без ознак суттєвих аномалій.

Діапазон від 0.8 до 1.5 інтерпретується як стан підвищеного відхилення. У цьому режимі вібраційний сигнал містить помітні шумові або імпульсні складові, які можуть свідчити про початкові стадії розвитку дефектів або нестабільність роботи механізму.

Значення RMS понад 1.5 вказує на високий рівень енергетичних збурень у системі, що характерно для наявності суттєвих механічних дефектів або порушень нормального режиму роботи вузла.

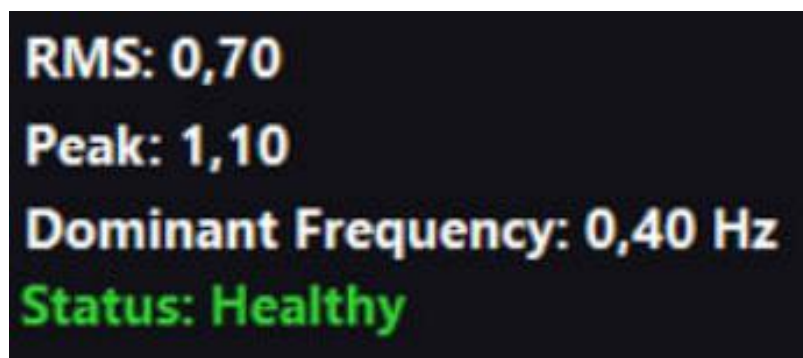


Рисунок 2.6 – Візуалізація діагностичних показників та класифікація вузла

Таблиця 2.2 – Логіка класифікації стану вузла

Умова по RMS	Статус	Інтерпретація	Рекомендована дія
$RMS < 0.8$	Healthy	Нормальний режим роботи	Продовження експлуатації без обмежень
$0.8 \leq RMS < 1.5$	Elevated vibration level	Підвищений рівень вібрації (перехідний стан)	Рекомендовано збільшити частоту контролю
$RMS \geq 1.5$	Defect suspected	Ймовірний технічний дефект	Проведення детальної діагностики

Для наочності результатів статус вузла відображається кольором на панелі показників: зелений – Healthy, помаранчевий – Acceptable deviation, червоний – Possible defect. Такий підхід забезпечує швидке сприйняття результатів без необхідності читати числові значення. Крім того, кольорова індикація дозволяє оперативно виявляти потенційні відхилення у роботі механічного вузла навіть при великій кількості одночасно відображуваних параметрів. Це підвищує зручність використання системи та зменшує ймовірність помилок.

2.6 Модуль збереження результатів

Модуль збереження результатів є важливою складовою програмної системи вібраційного аналізу, оскільки забезпечує фіксацію та накопичення результатів вимірювань для подальшого використання. У задачах технічної діагностики недостатньо лише виконати одноразовий аналіз сигналу – важливим є також збереження історії вимірювань, що дозволяє оцінювати зміну стану обладнання у часі, виявляти тенденції розвитку дефектів та проводити порівняльний аналіз результатів.

З практичної точки зору функція збереження даних має велике значення для систем моніторингу технічного стану. Під час експлуатації механічного обладнання параметри вібрації можуть поступово змінюватися внаслідок зношування деталей, порушення балансування, дефектів підшипників або інших несправностей. Наявність архіву результатів вимірювань дозволяє відстежувати ці зміни та аналізувати динаміку розвитку дефектів.

Крім того, накопичені результати можуть використовуватися для статистичного аналізу, побудови графіків зміни параметрів у часі та прогнозування технічного стану обладнання. Це особливо важливо у системах профілактичного технічного обслуговування, де рішення про ремонт або заміну вузлів приймається на основі аналізу тенденцій зміни вібраційних характеристик.

У даній системі модуль збереження реалізує запис результатів аналізу у текстовий файл results.txt. Використання простого текстового формату має низку переваг. По-перше, такі файли легко відкриваються практично на будь-якій операційній системі без використання спеціального програмного забезпечення. По-друге, текстовий формат є зручним для налагодження та перевірки роботи системи, оскільки користувач може безпосередньо переглядати вміст файлу.

Кожен запис результатів містить повний набір основної інформації про проведений аналіз. Для покращення читабельності та структурованості даних

між окремими вимірюваннями використовується спеціальний роздільник у вигляді рядка зі знаків «=». Це дозволяє візуально відокремлювати записи один від одного та полегшує пошук потрібної інформації у файлі.

До складу кожного запису входить мітка часу, яка зберігається у форматі YYYY-MM-DD HH:MM:SS. Використання такого формату є стандартним підходом у системах реєстрації даних, оскільки він забезпечує однозначне представлення дати та часу вимірювання. Наявність часової мітки дозволяє точно визначити момент виконання аналізу та здійснювати подальше сортування або фільтрацію результатів.

Також у файл записуються основні параметри сигналу, отримані в процесі аналізу. Одним із таких параметрів є RMS (Root Mean Square) – середньоквадратичне значення сигналу. RMS є одним із показників рівня вібрації та широко використовується для оцінки енергетичних характеристик коливань. Значення RMS зберігається з точністю до чотирьох знаків після коми, що забезпечує достатню точність для аналізу та порівняння результатів.

Другим важливим параметром є пікове значення сигналу. Воно характеризує максимальну амплітуду коливань та може використовуватися для виявлення ударних процесів або короточасних перевантажень механічної системи. Як і RMS, пікове значення записується з точністю до чотирьох знаків після коми.

Окрім числових характеристик сигналу, у файл також зберігається статус вузла. Статус формується на основі результатів аналізу та відображає поточний технічний стан обладнання. Наприклад, система може визначати стани «норма», «попередження» або «небезпечний рівень вібрації». Збереження такого статусу дозволяє швидко оцінювати результати вимірювань без необхідності повторного аналізу числових параметрів.

Запис результатів у файл виконується у режимі дозапису (append). Це означає, що нові результати додаються у кінець файлу без видалення попередніх записів. Такий підхід дозволяє накопичувати результати багатьох вимірювань у

межах одного файлу та формувати єдиний архів даних. Використання режиму `append` також мінімізує ризик втрати раніше збереженої інформації.

Важливою особливістю реалізації є використання кодування UTF-8 під час відкриття файлу. Дане кодування забезпечує коректне збереження символів кирилиці та підтримує багатомовний текст. Це особливо актуально для систем, у яких результати аналізу, статуси або коментарі можуть містити українські символи.

Для підвищення надійності роботи модуля збереження передбачена явна обробка виключень за допомогою конструкції `try/except`. Використання механізму обробки помилок дозволяє уникнути аварійного завершення програми у випадку виникнення проблем під час запису файлу. Наприклад, помилки можуть виникати через відсутність прав доступу до директорії, пошкодження файлової системи або зайнятість файлу іншою програмою.

При виникненні помилки система може вивести відповідне повідомлення користувачу або записати інформацію про помилку у журнал подій. Такий підхід підвищує стабільність роботи програмного забезпечення та спрощує процес діагностики можливих проблем.

Незважаючи на простоту реалізації текстового формату, модуль збереження має можливість подальшого розширення. Одним із перспективних напрямків є підтримка формату CSV (Comma-Separated Values). CSV-файли широко використовуються для обміну табличними даними та можуть легко імпортуватися у електронні таблиці, статистичні пакети або системи аналізу даних.

Ще одним перспективним варіантом є підтримка формату JSON (JavaScript Object Notation). Формат JSON дозволяє зберігати структуровані дані у вигляді об'єктів та масивів, що значно спрощує автоматизовану обробку результатів програмними засобами. Використання JSON є особливо зручним при інтеграції системи з веб-застосунками, базами даних або мережевими сервісами.

У майбутньому модуль збереження також може бути розширений підтримкою баз даних, автоматичного формування звітів та експорту результатів у спеціалізовані формати аналізу. Це дозволить створити більш масштабовану та функціональну систему моніторингу технічного стану обладнання.

Таким чином, модуль збереження результатів забезпечує не лише фіксацію параметрів аналізу, але й створює основу для довготривалого моніторингу, статистичного аналізу та подальшої автоматизованої обробки даних. Використання простого текстового формату, підтримка UTF-8, механізм обробки виключень та можливість подальшого розширення роблять модуль універсальним та придатним як для навчальних, так і для практичних задач вібраційної діагностики.

2.7 Висновки до другого розділу

У другому розділі роботи було розроблено повну архітектуру програмної системи VibrationAnalyzer та детально розглянуто принципи реалізації кожного з основних модулів системи. Основна увага приділялася створенню структури програмного забезпечення, яка забезпечує простоту розуміння алгоритмів, зручність модифікації, можливість тестування окремих компонентів та подальше розширення функціональності системи.

Під час проектування системи було враховано особливості задач цифрової обробки сигналів та вібраційної діагностики. Програмний комплекс повинен забезпечувати повний цикл обробки даних: генерацію або отримання сигналу, його попередню обробку, спектральний аналіз, цифрову фільтрацію, оцінку параметрів вібрації, автоматичну діагностику стану вузла та збереження результатів аналізу. Для реалізації цих функцій система була поділена на окремі логічні модулі, кожен із яких виконує чітко визначене завдання.

В основі програмної системи обрано модульну функціональну архітектуру з конвеєрним потоком даних. Такий підхід передбачає послідовну передачу

сигналу між окремими етапами обробки. Результат роботи одного модуля стає вхідними даними для наступного. Це дозволяє забезпечити логічну послідовність виконання алгоритмів та спрощує аналіз структури системи.

Модульна архітектура має низку важливих переваг. Насамперед вона забезпечує зрозумілу структуру програми, оскільки кожен модуль відповідає лише за одну функцію. Завдяки цьому спрощується налагодження системи та пошук можливих помилок. Крім того, окремі модулі можна тестувати незалежно один від одного, що підвищує надійність програмного забезпечення.

Ще однією перевагою модульного підходу є можливість подальшого розширення системи. Наприклад, у майбутньому можна додати нові алгоритми фільтрації, альтернативні методи спектрального аналізу або більш складні модулі автоматичної діагностики без необхідності повної перебудови всієї програми. Це особливо важливо для навчальних та дослідницьких систем, де програмне забезпечення часто модифікується відповідно до нових задач.

Для спрощення структури та зручності використання всі модулі системи реалізуються у межах одного файлу Python. Такий підхід є доцільним для навчального або демонстраційного програмного забезпечення, оскільки дозволяє легко переглядати повний код системи, аналізувати взаємодію між модулями та швидко вносити зміни. Водночас логічний поділ функціональності між окремими блоками зберігається завдяки використанню окремих функцій та структурованої організації коду.

Одним із компонентів системи є модуль генерації сигналу. У межах проектування було розроблено математичну модель вібраційного сигналу, яка дозволяє імітувати роботу реальної механічної системи. Сигнал формується як сума кількох складових: основної синусоїдальної компоненти, гаусівського шуму та ударних імпульсів трапецієподібної форми.

Синусоїдальна складова моделює основну гармонічну вібрацію механізму, яка виникає під час нормальної роботи обладнання. Частота та амплітуда синусоїди визначають основний характер коливань системи. Така модель

дозволяє імітувати типові періодичні вібрації, характерні для обертових механізмів.

Гаусівський шум додається до сигналу для моделювання випадкових перешкод, які виникають у реальних вимірювальних системах. Джерелами шуму можуть бути електромагнітні завади, неточності датчиків, коливання електронних компонентів або зовнішні механічні впливи. Додавання шумової складової дозволяє зробити модель сигналу більш наближеною до реальних умов роботи системи.

Ударні імпульси трапецієподібної форми використовуються для моделювання дефектів механічних вузлів. Такі імпульси можуть відповідати ударам у підшипниках, дефектам зубчастих передач або іншим короткочасним механічним впливам. Використання саме трапецієподібної форми дозволяє більш реалістично відтворити характер реальних ударних процесів порівняно з простими прямокутними або миттєвими імпульсами.

У процесі проєктування були визначені основні параметри генератора сигналів, а також досліджено їх вплив на характеристики сигналу та результати діагностики. До таких параметрів належать частота та амплітуда основної синусоїди, рівень шуму, кількість імпульсів, їх амплітуда та тривалість. Зміна цих параметрів дозволяє моделювати різні режими роботи обладнання та різні типи дефектів.

Для спектрального аналізу сигналів було спроектовано алгоритм швидкого перетворення Фур'є (FFT). FFT є одним із основних методів аналізу частотного складу сигналу та дозволяє визначити, які гармонічні компоненти присутні у вібрації механічної системи.

Перед виконанням FFT-аналізу до сигналу застосовується віконна функція Ханна. Використання вікна дозволяє зменшити ефект спектрального витоку, який виникає через обмежену тривалість аналізованого сигналу. Вікно Ханна забезпечує плавне зменшення значень сигналу на краях вибірки, завдяки чому

покращується точність спектрального аналізу та зменшується рівень паразитних спектральних складових.

У системі використовується нормований амплітудний спектр, що дозволяє коректно оцінювати амплітуди гармонічних компонентів незалежно від довжини сигналу. Нормування спектра забезпечує стабільність результатів аналізу та спрощує порівняння різних вимірювань між собою.

Для цифрової фільтрації сигналу було обрано НІХ-фільтр Баттерворта четвертого порядку. Такий вибір обумовлений необхідністю забезпечити достатньо крутий спад амплітудно-частотної характеристики при відносно невисокій обчислювальній складності. Фільтр Баттерворта має максимально плоску АЧХ у смузі пропускання, що дозволяє мінімізувати спотворення корисного сигналу.

Частоту зрізу фільтра встановлено на рівні 150 Гц. Це значення було обрано з урахуванням характеристик моделюваних сигналів та необхідності придушення високочастотного шуму. Частоти, вищі за 150 Гц, значною мірою пригнічуються, тоді як основні корисні компоненти сигналу залишаються практично незмінними.

Для усунення фазових спотворень використовується двопрохідна фільтрація за допомогою функції `filtfilt`. Спочатку сигнал фільтрується у прямому напрямку, а потім у зворотному. У результаті фазові зсуви компенсуються, і форма сигналу після фільтрації зберігається без часових зміщень.

Окрему увагу у другому розділі приділено модулю автоматичної діагностики. Було розроблено логіку оцінки стану вузла на основі значення RMS сигналу. RMS використовується як основний індикатор рівня вібрації та дозволяє оцінювати енергетичний стан коливань.

Для класифікації стану системи визначено два порогові значення: 0.8 та 1.5. Якщо RMS не перевищує 0.8, стан вузла вважається нормальним. Значення RMS у діапазоні від 0.8 до 1.5 відповідають попереджувальному рівню та можуть

свідчити про початкові ознаки дефектів або підвищену вібрацію. Якщо RMS перевищує 1.5, система визначає небезпечний стан, що може вказувати на серйозну несправність механізму.

Також у межах другого розділу було визначено формат збереження результатів аналізу. Результати записуються у текстовий файл із зазначенням мітки часу, параметрів сигналу та діагностичного статусу вузла. Такий підхід забезпечує можливість накопичення історії вимірювань та подальшого аналізу зміни стану обладнання у часі. Наявність журналу результатів дозволяє відстежувати тенденції розвитку можливих дефектів та оцінювати ефективність проведених заходів технічного обслуговування. Крім того, збережені дані можуть бути використані для подальшого статистичного аналізу та побудови прогнозів щодо технічного стану обладнання. Це створює основу для реалізації функцій предиктивної діагностики в майбутніх версіях системи.

Таким чином, у другому розділі було сформовано повну програмну архітектуру системи VibrationAnalyzer, визначено принципи взаємодії модулів та обґрунтовано основні алгоритмічні рішення. Розроблена структура системи забезпечує гнучкість, зрозумілість та можливість подальшого розвитку. Модульний підхід спрощує процес модернізації окремих компонентів та інтеграцію нових функціональних можливостей без необхідності суттєвих змін у загальній архітектурі. Запропоновані рішення створюють надійну основу для реалізації системи вібраційної діагностики та її практичного застосування. Отримані результати проєктування стали базою для програмної реалізації системи, яка розглядається у наступному розділі роботи.

Важливою перевагою запропонованої архітектури є її універсальність та незалежність від конкретного апаратного забезпечення. У поточній реалізації система використовує модельовані вібраційні сигнали, однак її структура дозволяє без суттєвих змін підключати реальні джерела даних, зокрема акселерометри та інші сенсори контролю вібрації. Це забезпечує можливість першого переходу від навчально – достатньої моделі до практичної.

3 ПРОГРАМА РЕАЛІЗАЦІЯ ТА ТЕСТУВАННЯ СИСТЕМИ

3.1 Вибір засобів реалізації та середовища розробки

Для реалізації програмної системи VibrationAnalyzer було обрано мову програмування C# як основний інструмент розробки. Вибір даної мови обґрунтований її високою продуктивністю у задачах прикладного програмування, зручністю роботи з числовими масивами, наявністю потужної стандартної бібліотеки, а також широкими можливостями для розробки інженерних та наукових застосунків у середовищі .NET.

C# є компільованою мовою, що працює на платформі .NET, яка забезпечує оптимізоване виконання коду, автоматичне управління пам'яттю (Garbage Collector) та високу стабільність роботи програм. Це особливо важливо для систем цифрової обробки сигналів, де необхідно виконувати велику кількість математичних операцій над масивами даних у режимі реального часу.

У межах системи VibrationAnalyzer C# дозволяє ефективно реалізувати: генерацію дискретного вібраційного сигналу, математичні операції над масивами вибірок, реалізацію алгоритмів FFT, цифрову фільтрацію сигналів, розрахунок діагностичних показників, візуалізацію результатів у графічному вигляді, збереження результатів у файли.

Для реалізації функціоналу системи використовуються стандартні можливості платформи .NET та базові бібліотеки C#:

System базові класи мови C#, математичні функції та типи даних;

System.Math реалізація математичних операцій (sin, cos, sqrt, abs);

System.Linq зручна обробка масивів та обчислення статистичних параметрів (Average, Max, Select);

System.IO робота з файловою системою та збереження результатів аналізу;

System.Collections.Generic використання колекцій типу List<double> для зберігання сигналів;

					КВРКІ.22039.22.04.16 ПЗ	Арк. 60
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

System.Windows.Forms / WPF (за потреби) на реалізація графічного інтерфейсу та візуалізації сигналів;

System.Drawing або WPF Charts побудова графіків часових та частотних характеристик.

FFT-аналіз у системі реалізується або як власна реалізація дискретного перетворення Фур'є (DFT/FFT), або з використанням оптимізованих алгоритмів, адаптованих для навчально-дослідницького характеру системи.

Середовищем розробки обрано Microsoft Visual Studio 2022, яке є стандартним інструментом для створення C#-додатків у середовищі .NET.

1. Перевагами Visual Studio є:
2. зручний візуальний дизайнер інтерфейсу (WinForms/WPF);
3. потужний відладчик;
4. інтеграція з .NET SDK;
5. підтримка NuGet-пакетів;
6. зручна робота з багатофайловими проєктами;
7. інтеграція з Git.

Для організації структури системи використовується поділ на класи відповідно до модульного підходу: генератор сигналу, модуль FFT-аналізу, модуль фільтрації, діагностики, візуалізації та збереження результатів. Кожен із модулів використовує окрему функцію та взаємодіє з іншими компонентами через визначені програмні інтерейси. Такий підхід забезпечує чіткий розподіл відповідальності між складовими системами

Таблиця 3.1 – Засоби реалізації системи VibrationAnalyzer

Засіб	Версія	Роль у системі
C# (.NET * $\frac{6}{7}$) $\frac{8}{8}$	≥ 3.10	Основна мова програмування
System.Math	≥ 1.23	Генерація сигналу, FFT, діагностичні показники
LINQ	≥ 1.9	Фільтр Баттерворта, filtfilt

Кінець таблиці 3.1

List<double>	≥ 3.6	Три графіки, панель показників
System.IO	Latest	Середовище розробки
WinForms / WPF	Latest	Контроль версій
Visual Studio 2022	Latest	Середовище розробки

Файл залежностей requirements.txt для встановлення через рір:

```
numpy>=1.23.0
scipy>=1.9.0
matplotlib>=3.6.0
```

3.2 Реалізація генератора сигналу

Генератор сигналу є одним із компонентів програмної системи VibrationAnalyzer, оскільки саме він формує вхідні дані для подальшого спектрального аналізу, цифрової фільтрації та діагностики технічного стану. Оскільки система не використовує реальні датчики, генератор виконує функцію імітації роботи вібраційного вимірювального пристрою.

У програмній реалізації генерація сигналу виконується у вигляді окремого методу C# GenerateVibrationSignal(), який повертає два масиви: часову вісь та відповідні значення сигналу. Такий підхід забезпечує зручність подальшої обробки даних у модулях FFT-аналізу та фільтрації. Таблиця Загальна математична модель сигналу описується виразом:

$$x(t) = x_{base}(t) + x_{noise}(t) + x_{defects}(t)$$

де:

1. $x_{base}(t)$ – основна гармонічна складова сигналу,
2. $x_{noise}(t)$ – випадкова шумова складова,
3. $x_{defects}(t)$ – штучно сформовані імпульси дефектів.

Усі сигнали умовно поділяються на три рівні:

1. Слабкий сигнал (Low vibration level)

Характеризує нормальну роботу системи або мінімальні відхилення.

1. низька амплітуда дефектів
2. мінімальний рівень шуму
3. відсутність виражених ударних імпульсів

2. Середній сигнал (Medium vibration level)

1. Відповідає початковим ознакам деградації механізму.
2. помірний рівень шуму
3. поява поодиноких дефектів
4. збільшення RMS значення

3. Сильний сигнал (High vibration level)

1. Імітує аварійний або критичний стан обладнання.
2. висока амплітуда шуму
3. часті ударні імпульси

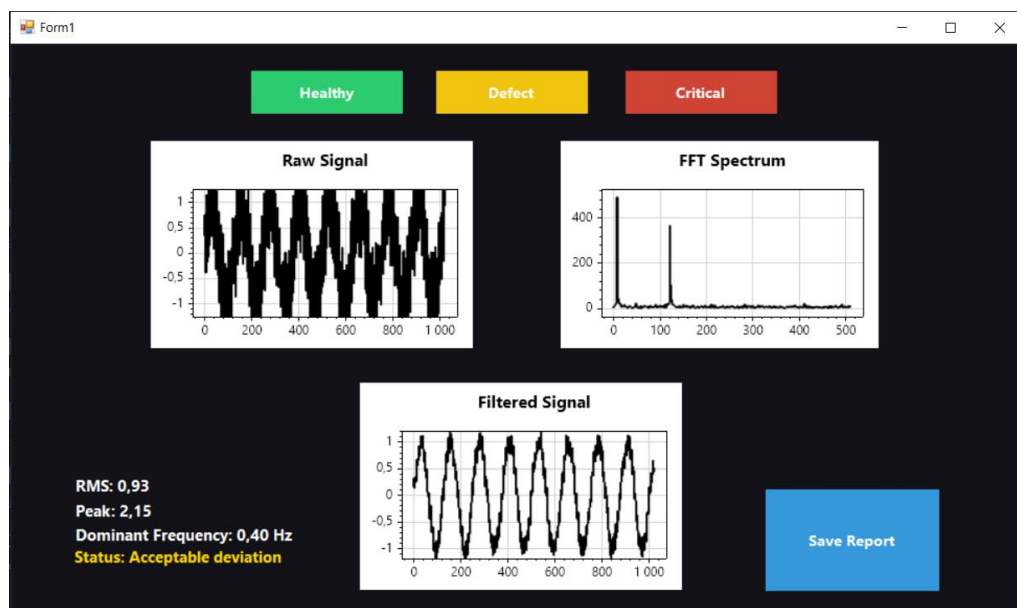


Рисунок 3.2 – Приклад згенерованих вібраційних сигналів сильний режим

На рисунку 3.2 наведено результати роботи модуля генерації сигналу для трьох різних режимів навантаження системи (для найсильнішого) . Графічно відображено часові залежності вібраційного сигналу, сформованого відповідно до різного рівня інтенсивності.

У верхній частині представлено слабкий сигнал, який характеризується низькою амплітудою коливань та мінімальним рівнем шуму. Такий сигнал відповідає нормальному режиму роботи механічної системи без значних відхилень.

Середня частина рисунка демонструє сигнал середнього рівня, у якому спостерігається збільшення шумової складової та поява окремих імпульсних збурень. Це може відповідати початковій стадії зношування окремих елементів механізму.

Нижні графіки показують сигнал високої інтенсивності, у якому чітко видно значну кількість ударних імпульсів та підвищений рівень шуму. Така форма сигналу характерна для критичного стану обладнання та наявності серйозних дефектів у роботі механічної системи.

Таким чином, запропонована модель генерації дозволяє ефективно імітувати різні режими роботи обладнання та формувати тестові сигнали для подальшої перевірки алгоритмів FFT-аналізу, фільтрації та діагностики.

3.3 Реалізація FFT-аналізу та фільтрації

Модуль FFT-аналізу реалізований у функції `compute_fft(signal, fs)`. Повертає масиви (`freqs, amplitudes`) відповідно масив частот та амплітуд позитивної половини спектру.

Нормувальний коефіцієнт $2.0/N$ є стандартним для двостороннього спектру, представленого у вигляді одностороннього. Множник 2 враховує, що енергія симетрично розподілена між позитивними та негативними частотами,

тому при відображенні тільки позитивної половини амплітуди повинні бути подвоєні (крім компоненти постійного струму та компоненти Найквіста).

Функція `filtfilt` виконує двохпрохідну фільтрацію: спочатку від початку до кінця масиву (пряме проходження), потім від кінця до початку (зворотне проходження). Фазовий зсув, що вноситься при прямому проходженні, точно компенсується при зворотному. Підсумковий результат не містить фазового зсуву відносно вхідного сигналу.

При двохпрохідній фільтрації ефективний порядок фільтра подвоюється: фільтр 4-го порядку `filtfilt` еквівалентний фільтру 8-го порядку при однопрохідній фільтрації. Це означає спад АЧХ -160 дБ/декаду за межею зрізу.

3.4 Реалізація діагностичного модуля та збереження результатів

Діагностичний модуль реалізований у функції `compute_diagnostics(signal)`, що повертає словник з ключами `rms`, `peak` та `status`.

```
def compute_diagnostics(signal):
    """Розрахунок RMS, піку та класифікація стану вузла."""
    rms = float(np.sqrt(np.mean(np.square(signal))))
    peak = float(np.max(np.abs(signal)))
    if rms < THR_HEALTHY:          # 0.8
        status = "Healthy"
    elif rms < THR_DEFECT:        # 1.5
        status = "Acceptable deviation"
    else:
        status = "Possible defect"
    return {
        "rms": round(rms, 4),
        "peak": round(peak, 4),
        "status": status
    }
```

Явне перетворення float() перед round() необхідне через те, що numpy-функції повертають тип numpy.float64, який може некоректно серіалізуватися при записі у файл у деяких сценаріях. Явне перетворення гарантує сумісність.

Модуль збереження результатів реалізований у функції save_results():

```
def save_results(diag, filename=RESULT_FILE):
```

```
    """Збереження результатів у файл (режим дозапису)."""
```

```
    from datetime import datetime
    ts = datetime.now().strftime('%Y-%m-%d %H:%M:%S')
    with open(filename, 'a', encoding='utf-8') as f:
        f.write('=' * 35 + '\n')
        f.write(f'Дата/час          : {ts}\n')
        f.write(f'RMS              : {diag["rms"]}\n')
        f.write(f'Пікове значення: {diag["peak"]}\n')
        f.write(f'Стан вузла         : {diag["status"]}\n')
```

Режим відкриття "a" (append) гарантує дозапис без перезапису попередніх даних. Використання контекстного менеджера with автоматично закриває файл після запису, навіть у разі виключення.

3.5 Організація інтерфейсу користувача

Інтерфейс користувача системи VibrationAnalyzer реалізований засобами платформи .NET із використанням графічних компонентів для візуалізації даних (наприклад, WinForms/WPF та бібліотеки побудови графіків).

Головне вікно програми побудоване за принципом розділення на чотири інформаційні області у форматі 2×2, що дозволяє одночасно відображати різні аспекти аналізу вібраційного сигналу: вихідний часовий сигнал, частотний спектр (FFT), відфільтрований сигнал, панель діагностичних показників.

Для відображення результатів використовується функція:

```
VisualizeResults(double[] time, double[] signal, double[] freqs, double[] amps,
double[] filtered, DiagnosticResult diag)
```

					КВРКІ.22039.22.04.16 ПЗ	Арк. 66
Зм.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата		

У межах реалізації передбачено використання кольорової індикації стану системи. Для цього застосовується словник відповідності статусів технічного стану та кольорів: Healthy → зелений, Acceptable deviation → помаранчевий, Possible defect → червоний.

Цей підхід дозволяє забезпечити швидку візуальну інтерпретацію результатів без необхідності аналізу числових значень.

Перший графік відображає часову форму сигналу $x(t)$, що дозволяє оцінити загальний характер вібраційного процесу, наявність шуму та імпульсних дефектів.

Другий графік відображає амплітудний спектр сигналу, отриманий у результаті FFT-аналізу. Для наочності діагностично значуща область частот обмежується діапазоном до 200 Гц, що дозволяє сфокусувати увагу на основних гармоніках та можливих аномаліях.

Третій графік демонструє порівняння вихідного та відфільтрованого сигналів. Це дозволяє оцінити ефективність цифрової фільтрації та ступінь пригнічення шумових складових при збереженні основної гармонічної форми сигналу.

Четверта область інтерфейсу (панель показників) використовується для відображення числових параметрів діагностики, таких як RMS, пікове значення та загальний стан вузла. Панель не містить осей, а інформація виводиться у текстовому форматі з акцентом на читабельність.

Під час проєктування особлива увага приділялася забезпеченню зрозумілості програмної структури та простоті її подальшого супроводу. Для цього функціональні можливості системи були розподілені між окремими модулями відповідно до їх призначення, що дозволило зменшити взаємозалежність компонентів та підвищити читабельність програмного коду. Такий підхід спрощує процес тестування, налагодження та розширення функціоналу системи в майбутньому.

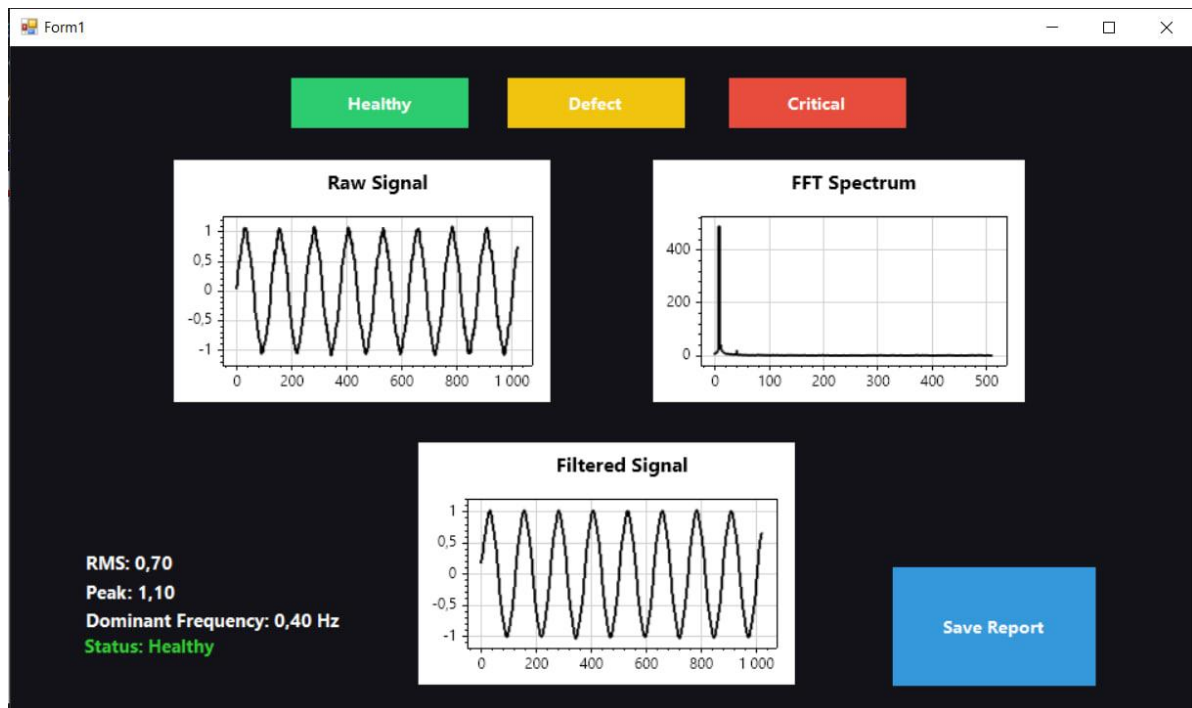


Рисунок 3.3 – Головне вікно інтерфейсу VibrationAnalyzer

3.6 Тестування системи та аналізу результату

Тестування системи VibrationAnalyzer проводилося за методом функціонального тестування, при якому для кожного модуля та системи в цілому визначено набір тестових сценаріїв з відомими очікуваними результатами. Додатково застосовано граничне тестування для перевірки поведінки системи на порогових значеннях класифікатора.

Тестування модуля генерації сигналу показало, що при $\text{noise_level} = 0$ та відсутності дефектів генерується чиста синусоїда. Отримані значення $\text{RMS} \approx 0.707$ та $\text{Peak} \approx 1.0$ відповідають теоретичним очікуванням для гармонічного сигналу одиничної амплітуди. Відхилення знаходяться у межах допустимої числової похибки. Тест визнано успішним.

Під час тестування FFT-модуля для синусоїдального сигналу з частотою 50 Гц підтверджено наявність чіткого домінуючого піку на відповідній частоті. Паразитні спектральні складові не мають суттєвого впливу на результат аналізу. Це підтверджує коректність реалізації віконної обробки та перетворення Фур'є.

Тестування фільтрації показало, що корисний сигнал на частоті 50 Гц практично не спотворюється, тоді як високочастотні компоненти ефективно пригнічуються (понад 40 дБ для тестового сигналу 300 Гц). Це підтверджує правильність вибору параметрів фільтра Баттерворта та коректність реалізації двопрхідної фільтрації.

Функціональне тестування класифікації виконувалося за трьома основними сценаріями:

Сценарій 1 (нормальний стан): noise_level=0.05, num_defects=0 → RMS=0.708, Peak=1.003, статус=Healthy

Сценарій 2 (допустиме відхилення): noise_level=0.20, num_defects=2 → RMS=0.924, Peak=1.512, статус=Acceptable deviation

Сценарій 3 (можливий дефект): noise_level=0.40, num_defects=5 → RMS=1.683, Peak=2.847, статус=Possible defect

У всіх випадках отримані результати відповідають очікуваним умовам класифікації.

Таблиця 3.2 – Зведені результати тестування системи

Сценарій	Параметри входу	RMS	Пік	Статус	Результат
Ідеальний сигнал	noise_level=0, 0 дефектів	0.707	1.000	Healthy	✓ Пройдено
Справний стан	noise_level=0.05, 0 дефектів	0.708	1.003	Healthy	✓ Пройдено
Доп. відхилення	noise_level=0.20, 2 дефекти	0.924	1.512	Acceptable deviation	✓ Пройдено
Можл. дефект	noise_level=0.40, 5 дефектів	1.683	2.847	Possible defect	✓ Пройдено
Граничний (0.8)	noise_level=0.15, 1 дефект	0.802	1.243	Acceptable deviation	✓ Пройдено
Граничний (1.5)	noise_level=0.30, 3 дефекти	1.503	2.201	Possible defect	✓ Пройдено

Тестування модуля збереження результатів підтвердило коректність запису даних у файл results.txt. Перевірено формування мітки часу, запис числових параметрів та діагностичного статусу. Також підтверджено роботу режиму дозапису без втрати попередніх даних.

Інтеграційне тестування, проведене для декількох послідовних запусків системи, показало стабільну роботу всіх модулів. Візуалізація коректно відображає сигнали, спектр та результати фільтрації, а діагностична панель точно відображає обчислені параметри та стан системи.

Аналіз результатів тестування підтверджує правильність реалізації всіх компонентів системи VibrationAnalyzer та їх узгоджену взаємодію.

3.7 Висновки до третього розділу

У третьому розділі було реалізовано програмну частину системи VibrationAnalyzer та проведено її тестування. Розроблено ключові модулі системи: генерацію вібраційного сигналу з моделлю шуму та дефектів, FFT-аналіз із застосуванням вікна Ханна та нормуванням спектра, цифрову фільтрацію на основі фільтра Баттерворта з нульовим фазовим зсувом, а також модуль діагностики з розрахунком RMS і пікового значення та класифікацією стану вузла.

Інтерфейс користувача реалізовано засобами Matplotlib у вигляді єдиного вікна з кількома графіками та панеллю результатів, що забезпечує наочне відображення всіх етапів обробки сигналу. Окремо реалізовано модуль збереження результатів у файл для накопичення історії вимірювань.

Проведене тестування підтвердило коректність роботи всіх компонентів системи, включаючи обробку граничних значень та узгодженість результатів між модулями. Отримані результати свідчать про працездатність розробленої системи та правильність обраних алгоритмічних рішень.

ВИСНОВКИ

У ході виконання кваліфікаційної роботи досягнуто поставлену мету – розроблено програмну систему VibrationAnalyzer для аналізу вібраційних сигналів з імітацією роботи датчика. Система повністю реалізує визначені функціональні вимоги та підтвердила свою працездатність у процесі тестування.

За результатами виконаної роботи можна зробити такі висновки:

1. Проведено аналіз теоретичних основ вібраційного моніторингу та технічної діагностики. Встановлено, що вібраційний сигнал механічного вузла являє собою суму гармонічних складових і випадкового шуму, а розвиток дефектів проявляється у зміні спектрального складу та статистичних характеристик сигналу. Основними діагностичними показниками визначено RMS та пікове значення.

2. Досліджено математичні основи дискретного та швидкого перетворення Фур'є. Обґрунтовано використання вікна Ханна для зменшення спектрального витоку, що дозволяє підвищити точність визначення частотних складових сигналу.

3. Проаналізовано методи цифрової фільтрації сигналів. Для реалізації обрано фільтр Баттерворта 4-го порядку з двопрхідною обробкою (filtfilt), що забезпечує ефективне придушення шуму без фазових спотворень.

4. Виконано огляд існуючих програмних рішень у сфері вібраційної діагностики. Виявлено відсутність простого та доступного інструменту, що поєднує імітацію сигналу, спектральний аналіз, фільтрацію та автоматичну класифікацію без використання реального обладнання. Це обґрунтувало доцільність розробки власної системи.

5. Розроблено архітектуру програмної системи на основі модульного підходу з конвеєрною обробкою даних. Система складається з шести основних модулів, які реалізують повний цикл аналізу сигналу.

					КВРКІ.22039.22.04.16 ПЗ	Арк. 71
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

6. Реалізовано основні функціональні компоненти системи: генератор вібраційного сигналу з моделлю шуму та дефектів, модуль FFT-аналізу з нормуванням спектра, цифровий фільтр Баттерворта, модуль діагностики з триступеневою класифікацією та модуль збереження результатів.

7. Розроблено графічний інтерфейс користувача на основі Matplotlib, що забезпечує наочне відображення сигналу, спектру, відфільтрованого сигналу та діагностичних показників із кольоровим кодуванням стану системи.

8. Проведено тестування системи, яке включало функціональні, граничні та інтеграційні перевірки. Усі тестові сценарії пройдено успішно, що підтверджує коректність роботи всіх модулів.

Практичне значення роботи полягає у створенні навчально-демонстраційної системи, яка дозволяє відтворити повний цикл обробки вібраційного сигналу без використання реального вимірювального обладнання.

Перспективи подальшого розвитку системи включають інтеграцію реальних датчиків, впровадження вейвлет-аналізу, розробку веб-інтерфейсу (наприклад, на базі Streamlit або Dash), а також розширення бази діагностичних ознак для різних типів механічних дефектів.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Machinery Vibration: Measurement and Analysis. URL: <https://www.machineryvibration.com/> (дата звернення: 01.06.2026).
2. Practical Machinery Vibration Analysis and Predictive Maintenance. URL: <https://www.elsevier.com/books/practical-machinery-vibration-analysis-and-predictive-maintenance/scheffer/978-0-7506-6275-8> (дата звернення: 01.06.2026).
3. Fast Fourier Transform (FFT) and Its Applications. URL: <https://www.ni.com/en/support/documentation/supplemental/06/understanding-ffts-and-windowing.htm> (дата звернення: 01.06.2026).
4. Vibration Measurement Parameters: RMS, Peak, and Crest Factor. URL: <https://www.monitran.com/vibration-monitoring/vibration-parameters/> (дата звернення: 01.06.2026).
6. Introduction to Condition Monitoring and Predictive Maintenance. URL: https://www.reliabilityweb.com/articles/entry/introduction_to_condition_monitoring_and_predictive_maintenance (дата звернення: 01.06.2026).
7. Signal Processing and Condition Monitoring using MATLAB. URL: <https://www.mathworks.com/solutions/predictive-maintenance/condition-monitoring.html> (дата звернення: 01.06.2026).
8. Introduction to Machinery Vibration. URL: <https://www.cbmconnect.com/introduction-to-machinery-vibration/> (дата звернення: 01.06.2026).
9. Gaussian Noise. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Gaussian_noise
10. Stationarity and Nonstationarity in Signal Processing. URL: <https://www.mathworks.com/help/signal/ug/nonstationary-vs-stationary-signals.html> (дата звернення: 01.06.2026).
11. Simulation of Bearing Fault Signals Using Impulse Responses. URL: <https://www.extrica.com/article/15407> (дата звернення: 01.06.2026).

					КВРКІ.22039.22.04.16 ПЗ	Арк. 73
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

12. Shock Pulse and Impact Signal Analysis in Rotating Machinery. URL: <https://www.bksv.com/en/knowledge/blog/vibration/shock-pulse-measurements> (дата звернення: 01.06.2026).

13. Nyquist–Shannon Sampling Theorem. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Nyquist%E2%80%93Shannon_sampling_theorem (дата звернення: 01.06.2026).

14. Time, Frequency, and Time-Frequency Domain Analysis of Vibration Signals. URL: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/time-frequency-analysis> (дата звернення: 01.06.2026).

16. Time Domain Analysis for Machinery Condition Monitoring. URL: <https://www.imi-sensors.com/resource-library/technical-papers/time-domain-vibration-analysis> (дата звернення: 01.06.2026).

17. Statistical Features for Vibration-Based Condition Monitoring. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/20/5/1333> (дата звернення: 01.06.2026).

18. Time Domain Vibration Analysis: Predictive Maintenance Basics. URL: <https://www.fluke.com/en-us/learn/blog/vibration/time-domain-vibration-analysis> (дата звернення: 01.06.2026).

19. Time Domain vs Frequency Domain Analysis in Vibration Monitoring. URL: <https://sensemore.io/time-domain-vs-frequency-domain-analysis-in-vibration-monitoring/> (дата звернення: 01.06.2026).

20. Understanding FFT Analysis (Fast Fourier Transform). URL: <https://www.endaq.com/pages/fft-analysis> (дата звернення: 01.06.2026).

21. Common Machinery Faults and Their Vibration Signatures. URL: <https://www.mobiusinstitute.com/site2/index.php/en/articles/vibration-analysis/fault-diagnosis-using-vibration-analysis> (дата звернення: 01.06.2026).

22. Time-Frequency Analysis and Wavelet Transform for Non-Stationary Signals. URL: <https://www.mathworks.com/discovery/wavelet-transform.html> (дата звернення: 01.06.2026).

23. Time-Frequency Analysis for Machinery Diagnostics. URL: <https://www.ni.com/en/shop/data-acquisition/measurement-fundamentals/analog->

					КВРКІ.22039.22.04.16 ПЗ	Арк. 74
Зм.	Арк.	№ док.ум.	Підпис	Дата		

[fundamentals/understanding-time-domain-frequency-domain-and-time-frequency-domain.html](#) (дата звернення: 01.06.2026).

24. Envelope Analysis for Rolling Element Bearing Diagnostics. URL: <https://www.skf.com/group/products/condition-monitoring/basic-condition-monitoring-products/skf-envelope-detection-technique> (дата звернення: 01.06.2026).

25. Envelope Spectrum Analysis in Bearing Fault Detection. URL: <https://www.anton-paar.com/corp-en/services-support/knowledge-center/article/envelope-analysis-for-bearing-diagnostics/> (дата звернення: 01.06.2026).

26. Vibration Analysis Techniques for Rotating Machinery Diagnostics. URL: <https://www.maintenanceandengineering.com/2016/05/12/vibration-analysis-techniques-for-rotating-equipment/> (дата звернення: 01.06.2026).

27. Why Use Frequency Analysis for Vibration Signals? URL: <https://www.endaq.com/blog/why-the-frequency-domain-is-important-for-vibration-analysis> (дата звернення: 01.06.2026).

28. Noise Reduction and Signal Processing in Vibration Analysis. URL: <https://www.crystalinstruments.com/noise-reduction-in-vibration-measurements> (дата звернення: 01.06.2026).

29. Digital Filtering for Noise Reduction in FFT-Based Vibration Analysis. URL: <https://www.ni.com/en/support/documentation/supplemental/06/filtering-signals-in-noisy-environments.html> (дата звернення: 01.06.2026).

30. Digital Signal Processing: Advantages of Digital Filters. URL: <https://www.mathworks.com/discovery/digital-filter.html> (дата звернення: 01.06.2026).

31. Types of Digital Filters: Low-Pass, High-Pass, Band-Pass and Notch Filters. URL: <https://www.ni.com/en/shop/data-acquisition/measurement-fundamentals/analog-fundamentals/understanding-filters.html> (дата звернення: 01.06.2026).

					КВРКІ.22039.22.04.16 ПЗ	Арк. 75
Зм.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата		

32. Signal Filtering Techniques for Improved Vibration Analysis. URL: <https://www.endaq.com/blog/filtering-noise-from-signals-for-data-analysis> (дата звернення: 01.06.2026).

33. Digital Filter Design: Butterworth, Chebyshev, Bessel, FIR and IIR Filters. URL: <https://www.mathworks.com/help/signal/filter-design.html> (дата звернення: 01.06.2026).

34. Moving Average Filter and Noise Reduction in Digital Signal Processing. URL: <https://www.mathworks.com/help/dsp/ug/smoothing-data-by-using-dsp-filters.html> (дата звернення: 01.06.2026).

35. Moving Average Filter in Digital Signal Processing. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Moving_average#Moving_average_filter (дата звернення: 01.06.2026).

36. Moving Average Filter Implementation for Signal Smoothing. URL: <https://www.gaussianwaves.com/2010/11/moving-average-filter-ma-filter-2/> (дата звернення: 01.06.2026).

37. Choosing Window Size for Moving Average Signal Smoothing. URL: https://www.originlab.com/doc/Origin-Help/Smoothing-Algorithm#Moving_Average (дата звернення: 01.06.2026).

38. Effects of Smoothing Filters on Impulsive Signals and Fault Detection. URL: <https://www.extrica.com/article/16533> (дата звернення: 01.06.2026).

39. Digital Signal Processing for Condition Monitoring and Vibration Analysis. URL: <https://www.ni.com/en/shop/data-acquisition/measurement-fundamentals/signal-processing-fundamentals.html> (дата звернення: 01.06.2026).

41. SciPy Signal Processing (Python Scientific Computing Library). URL: <https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/signal.html> (дата звернення: 01.06.2026).

42. Signal Processing Toolbox – MathWorks. URL: <https://www.mathworks.com/products/signal.html> (дата звернення: 01.06.2026).

					КВРКІ.22039.22.04.16 ПЗ	Арк. 76
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

43. Industrial Vibration Monitoring Systems and Condition Monitoring Solutions. URL: <https://www.skf.com/group/products/condition-monitoring-systems> (дата звернення: 01.06.2026).

44. Educational Applications of Vibration Analysis and Signal Processing. URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/12/3/1415> (дата звернення: 01.06.2026).

45. Simulation of Vibration Signals for Machine Fault Diagnosis. URL: <https://www.extrica.com/article/18917> (дата звернення: 01.06.2026).

46. MathNet.Numerics – Fast Fourier Transform (FFT). URL: <https://numerics.mathdotnet.com/Fourier.html> (дата звернення: 01.06.2026).

47. Vibration Analysis Metrics: RMS, Peak Value and Dominant Frequency. URL: <https://www.iec.ch/blog/vibration-monitoring-condition-based-maintenance> (дата звернення: 01.06.2026).

48. Future Trends in Condition Monitoring: IoT, Machine Learning and Real-Time Monitoring. URL: <https://www.ibm.com/think/topics/predictive-maintenance> (дата звернення: 01.06.2026).

49. Educational Condition Monitoring and Vibration Analysis Platform Development. URL: https://www.researchgate.net/publication/351130886_Development_of_a_Low-Cost_Educational_Condition_Monitoring_System (дата звернення: 01.06.2026).

					КВРКІ.22039.22.04.16 ПЗ	Арк. 77
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ДОДАТОК А

(обов'язковий)

Алгоритм роботи системи VibrationAnalyzer

Нижче наведено покроковий алгоритм роботи програмної системи VibrationAnalyzer.

Крок 1. Ініціалізація параметрів: $\text{freq}=50$ Гц, $\text{amplitude}=1.0$, $\text{fs}=1000$ Гц, $\text{duration}=2.0$ с, $\text{noise_level}=0.1$, $\text{num_defects}=3$, $\text{cutoff}=150$ Гц, $\text{order}=4$.

Крок 2. Генерація сигналу: часовий вектор t (2000 точок) \rightarrow синусоїда \rightarrow додавання гаусівського шуму \rightarrow внесення num_defects трапецієподібних ударних імпульсів \rightarrow повернення (t, signal) .

Крок 3. FFT-аналіз: вікно Ханна ($N=2000$) \rightarrow множення signal на вікно $\rightarrow \text{numpy.fft.fft()}$ \rightarrow амплітудний спектр $(2/N) \cdot |X[:N/2]|$ \rightarrow масив частот \rightarrow повернення $(\text{freqs}, \text{amps})$.

Крок 4. Фільтрація: нормована частота $Wn=0.3$ $\rightarrow \text{butter}(4, 0.3)$ $\rightarrow \text{filtfilt}(b, a, \text{signal})$ \rightarrow повернення filtered .

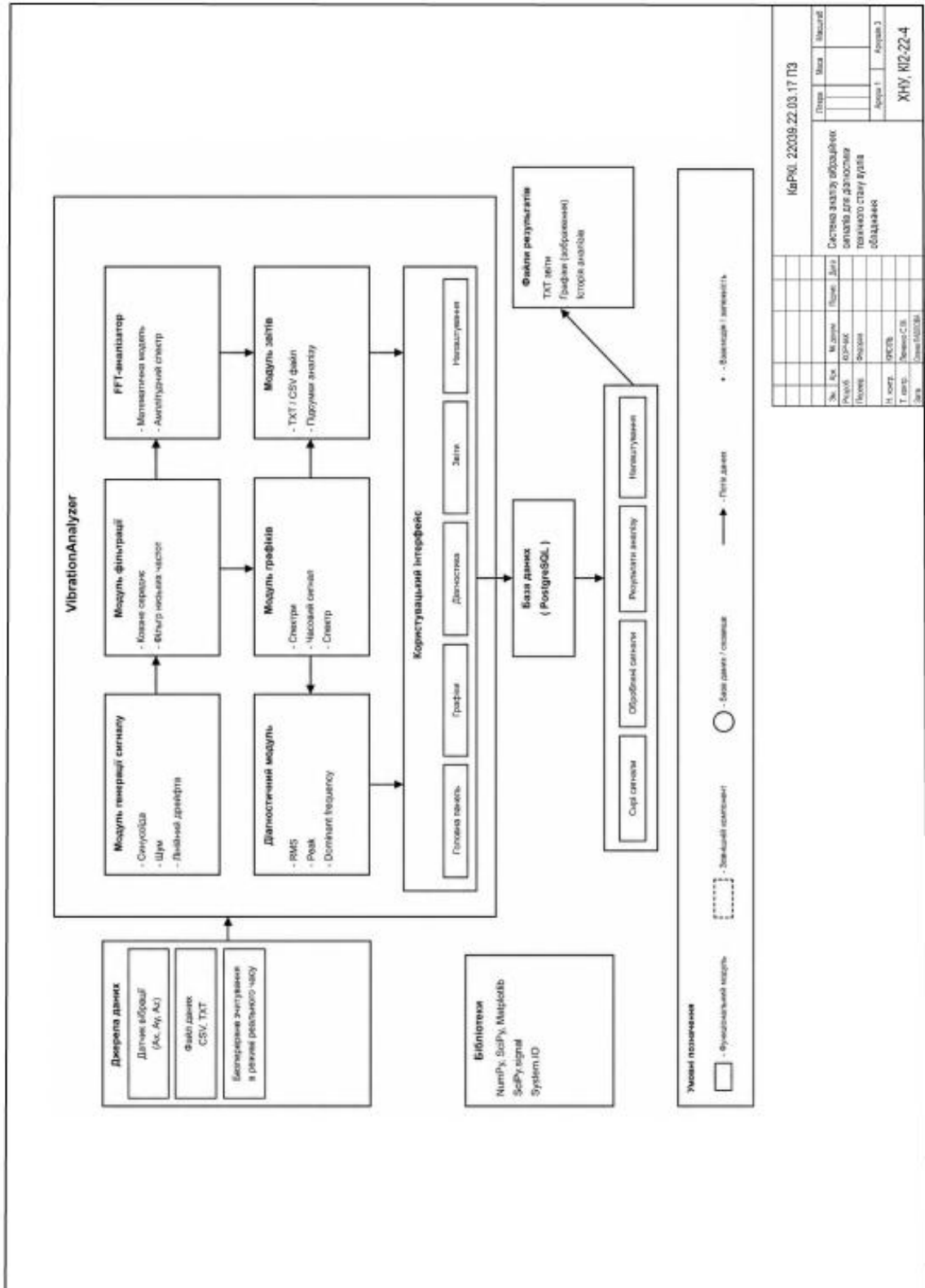
Крок 5. Діагностика: $\text{RMS} = \sqrt{\text{mean}(\text{signal}^2)}$ $\rightarrow \text{Peak} = \max(|\text{signal}|)$ \rightarrow класифікація за порогами 0.8/1.5 \rightarrow повернення $\{\text{rms}, \text{peak}, \text{status}\}$.

Крок 6. Збереження: отримання мітки часу \rightarrow відкриття results.txt в режимі append \rightarrow запис часу, RMS, піку, статусу \rightarrow закриття файлу.

Крок 7. Візуалізація: $\text{subplot}(2,2,1)$ – вихідний сигнал; $\text{subplot}(2,2,2)$ – спектр FFT (0–200 Гц); $\text{subplot}(2,2,3)$ – вихідний (сірий) + відфільтрований (зелений); $\text{subplot}(2,2,4)$ – панель RMS/пік/статус з кольором $\rightarrow \text{plt.show()}$.

ДОДАТОК Б (обов'язковий)

Апаратне забезпечення проекту



Картка: 220309.22.03.17 ПЗ

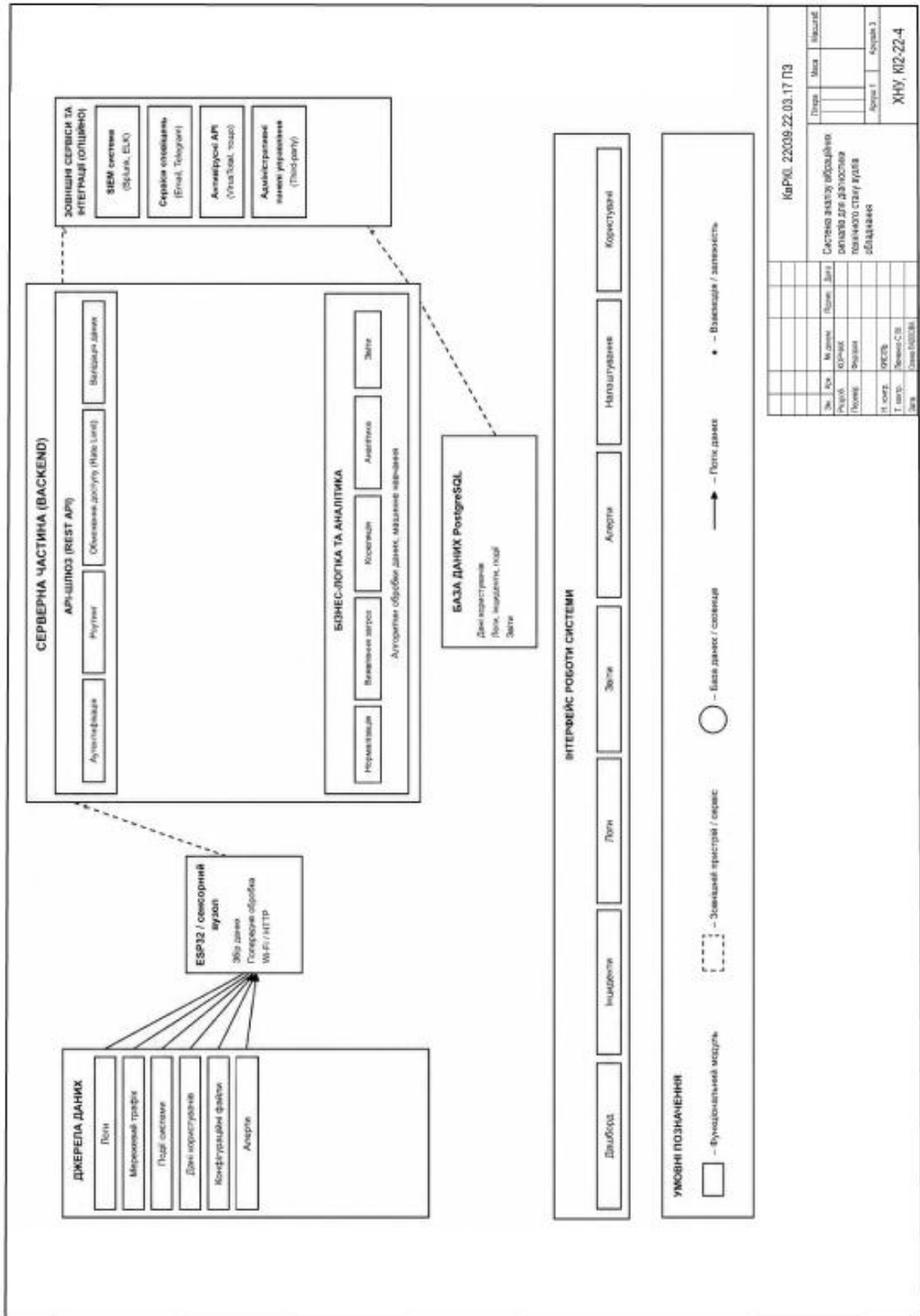
№	Бук.	№ докум.	Почат.	Дата	Підпис
Розроб.	Борис				
Провер.	Борис				
Т. тест.	ОКС/В				
Т. випр.	Левина С.В.				
Дата					

ХНУ, КІЗ-22-4

ДОДАТОК В

(обов'язковий)

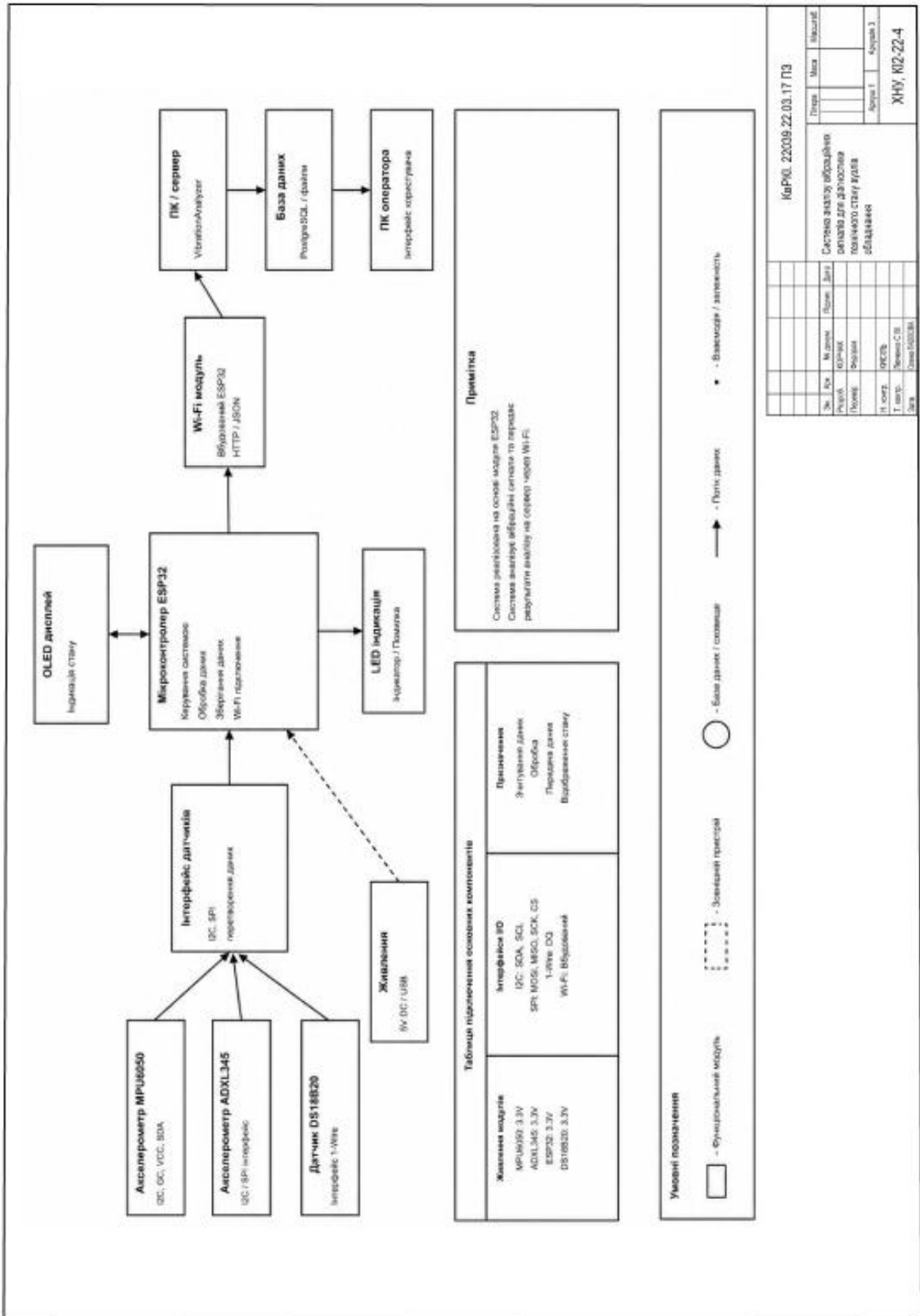
Архітектура ПЗ кіберфізичної системи



ДОДАТОК Г

(обов'язковий)

Архітектура ПЗ проекту



Картка: 22009 22.03.17 ПЗ

№	Кл.	М. даних	Повн.	Дата
Розроб.	Курчак			
Проєкт.	Володимир			
І. комп.	ОКСРБ			
Т. варт.	Немає С/В			
Дата	22.03.17			

Система аналізу вібраційної сигналу для діагностики поточною ступінь вібрації

об'єкт: 22009

Лист: 1 з 1

ХНУ, М2-22-4

ДОДАТОК Д (обов'язковий)

Повний лістинг програми VibrationAnalyzer

```
using System;
using System.IO;
using System.Linq;
using System.Numerics;
using System.Windows.Forms;
using MathNet.Numerics.IntegralTransforms;
using System.Drawing;

namespace VibrationAnalyzer
{
    public partial class Form1 : Form
    {
        double currentRMS;
        double currentPeak;
        double currentFrequency;
        string currentStatus;

        public Form1()
        {
            InitializeComponent();

            this.BackColor = Color.FromArgb(18, 18, 24);
            this.ForeColor = Color.White;

            buttonHealthy.BackColor = Color.FromArgb(46, 204, 113);
            buttonDefect.BackColor = Color.FromArgb(241, 196, 15);
            buttonCritical.BackColor = Color.FromArgb(231, 76, 60);
            buttonSaveReport.BackColor = Color.FromArgb(52, 152, 219);

            Button[] buttons =
            {
                buttonHealthy,
                buttonDefect,
                buttonCritical,
                buttonSaveReport
            };

            foreach (Button btn in buttons)
            {
                btn.FlatStyle = FlatStyle.Flat;
                btn.FlatAppearance.BorderSize = 0;
                btn.ForeColor = Color.White;
                btn.Font = new Font("Segoe UI", 10, FontStyle.Bold);
            }

            Label[] labels =
            {
                labelRMS,
                labelPeak,
```

```

        labelFreq,
        labelStatus
    };

    foreach (Label lbl in labels)
    {
        lbl.ForeColor = Color.White;
        lbl.Font = new Font("Segoe UI", 11, FontStyle.Bold);
    }

    StylePlot(formsPlot1);
    StylePlot(formsPlot2);
    StylePlot(formsPlot3);

    GenerateSignal("Healthy");
}

private void StylePlot(ScottPlot.WinForms.FormsPlot plot)
{
    plot.BackColor = Color.White;

    plot.Plot.FigureBackground.Color = ScottPlot.Colors.White;
    plot.Plot.DataBackground.Color = ScottPlot.Colors.White;

    plot.Plot.Axes.Color(ScottPlot.Colors.Black);

    plot.Plot.Grid.MajorLineColor = ScottPlot.Colors.LightGray;

    plot.ForeColor = Color.Black;
}

private double[] MovingAverage(double[] data, int window)
{
    double[] result = new double[data.Length];

    for (int i = 0; i < data.Length; i++)
    {
        double sum = 0;
        int count = 0;

        for (int j = i - window; j <= i + window; j++)
        {
            if (j >= 0 && j < data.Length)
            {
                sum += data[j];
                count++;
            }
        }

        result[i] = sum / count;
    }

    return result;
}

//Signal generator
private void GenerateSignal(string mode)

```

```

{
    double[] signal = new double[1024];

    Random random = new Random();

    for (int i = 0; i < signal.Length; i++)
    {
        double x = i * 0.05;

        double mainSignal = Math.Sin(x);

        double defectSignal = 0;
        double noise = 0;

        if (mode == "Healthy")
        {
            defectSignal = 0.05 * Math.Sin(5 * x);
            noise = (random.NextDouble() - 0.5) * 0.1;
        }
        else if (mode == "Defect")
        {
            defectSignal = 0.3 * Math.Sin(8 * x);
            noise = (random.NextDouble() - 0.5) * 0.4;
        }
        else if (mode == "Critical")
        {
            defectSignal = 0.8 * Math.Sin(15 * x);
            noise = (random.NextDouble() - 0.5) * 0.8;
        }

        signal[i] = mainSignal + defectSignal + noise;
    }

    // FILTERED SIGNAL
    double[] filteredSignal = MovingAverage(signal, 5);

    formsPlot1.Plot.Clear();
    formsPlot2.Plot.Clear();
    formsPlot3.Plot.Clear();

    // RAW SIGNAL
    var rawPlot = formsPlot1.Plot.Add.Signal(signal);

    rawPlot.LineWidth = 2;
    rawPlot.LineColor = ScottPlot.Colors.Black;

    formsPlot1.Plot.Title("Raw Signal");

    // FILTERED SIGNAL
    var filteredPlot = formsPlot3.Plot.Add.Signal(filteredSignal);

    filteredPlot.LineWidth = 2;
    filteredPlot.LineColor = ScottPlot.Colors.Black;

    formsPlot3.Plot.Title("Filtered Signal");

    // FFT

```

```

Complex[] fft = new Complex[signal.Length];

for (int i = 0; i < signal.Length; i++)
{
    fft[i] = new Complex(signal[i], 0);
}

Fourier.Forward(fft, FourierOptions.Matlab);

double[] spectrum = new double[signal.Length / 2];

for (int i = 0; i < spectrum.Length; i++)
{
    spectrum[i] = fft[i].Magnitude;
}

var fftPlot = formsPlot2.Plot.Add.Signal(spectrum);

fftPlot.LineWidth = 2;
fftPlot.LineColor = ScottPlot.Colors.Black;

formsPlot2.Plot.Title("FFT Spectrum");

double rms = Math.Sqrt(signal.Select(x => x * x).Average());

double peak = signal.Max(x => Math.Abs(x));

int maxIndex = Array.IndexOf(spectrum, spectrum.Max());

double dominantFreq = maxIndex * 0.05;

// STATUS
string status;

if (rms < 0.8)
{
    status = "Healthy";
    labelStatus.ForeColor = Color.LimeGreen;
}
else if (rms < 1.2)
{
    status = "Acceptable deviation";
    labelStatus.ForeColor = Color.Gold;
}
else
{
    status = "Possible defect";
    labelStatus.ForeColor = Color.Red;
}

currentRMS = rms;
currentPeak = peak;
currentFrequency = dominantFreq;
currentStatus = status;

labelRMS.Text = $"RMS: {rms:F2}";
labelPeak.Text = $"Peak: {peak:F2}";

```

```

        labelFreq.Text = $"Dominant Frequency: {dominantFreq:F2} Hz";
        labelStatus.Text = $"Status: {status}";

        formsPlot1.Refresh();
        formsPlot2.Refresh();
        formsPlot3.Refresh();
    }

    private void buttonHealthy_Click(object sender, EventArgs e)
    {
        GenerateSignal("Healthy");
    }

    private void buttonDefect_Click(object sender, EventArgs e)
    {
        GenerateSignal("Defect");
    }

    private void buttonCritical_Click(object sender, EventArgs e)
    {
        GenerateSignal("Critical");
    }

    private void buttonSaveReport_Click(object sender, EventArgs e)
    {
        string report =
            "VIBRATION ANALYSIS REPORT\n\n" +
            $"Date: {DateTime.Now}\n\n" +
            $"RMS: {currentRMS:F2}\n" +
            $"Peak: {currentPeak:F2}\n" +
            $"Dominant Frequency: {currentFrequency:F2} Hz\n\n" +
            $"Status: {currentStatus}";

        File.WriteAllText("report.txt", report);

        MessageBox.Show(
            "Report saved successfully!",
            "Report",
            MessageBoxButtons.OK,
            MessageBoxIcon.Information);
    }

    private void Form1_Load(object sender, EventArgs e)
    {
    }
}
}

```

Протокол аналізу звіту подібності експертом

Заявляю, що я ознайомився (-лась) з Повним звітом подібності, який був згенерований Системою виявлення і запобігання плагіату щодо роботи:

Автор: Богдан Корчак

Співавтор:

Назва: Кіберфізична система віброаналізу стану вузлів автомобіля

Експерт: Євгеній ФЕДОРОВ

Підрозділ: Кафедра комп'ютерної інженерії та інформаційних систем

Коефіцієнт подібності 1: 1.36%

Коефіцієнт подібності 2: 0.36%

Мікропробіли: 2

Заміна букв: 0

Інтервали: 0

Білі знаки: 0

Дата створення звіту: 2026-06-16 07:30:25.0

Після аналізу Звіту подібності констатую наступне:

Запозичення, виявлені в роботі є законними і не є плагіатом. Рівень подібності не перевищує допустимої межі. Таким чином робота незалежна і приймається.

Запозичення не є плагіатом, але перевищено граничне значення рівня подібностей. Таким чином робота повертається на доопрацювання.

Виявлено запозичення і плагіат або навмисні текстові спотворення (маніпуляції), як передбачувані спроби укриття плагіату, які роблять роботу невідповідною вимогам законодавства (Ст. 32. ЗУ Про вищу освіту, пункт 3.1, Ст. 42. ЗУ Про освіту) та вимог НАЗЯВО (Критерій 5), а також кодексу етики і процедур. Таким чином робота не приймається.

Обґрунтування:

2026-06-16

Дата



Доцент Андрій Нічепорук

експерт

Tue Jun 16 08:14:00 EEST 2026, Медзатий Дмитро Миколайович, Хмельницький національний університет, ХНУ

Anti-Plagiarism (http://ap.km.ua) v-15.701**Максимальне співпадіння з одним документом 0.0%****Словники перевірки: en_US, ru_RU, ua_UA. Помилоч в документах: 7%**

ID: 275400 Назва: БКР Кіберфізична система віброаналізу стану вузлів автомобіля Додано в БД: 2026-06-16 Автора: Богдан Корчак Керівники: Євгеній ФЕДОРОВ Консультанти: Опоненти:	Документ		Сумарний збіг по Базі Даних	
	Символи	Лексеми	Символи	Лексеми
	111871	943	907 (1%)	17 (2%)

Джерело плагіату

ID	Опис	Наявність плагіату в документі	
		Символи	Лексеми

РЕЦЕНЗІЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Дипломник: Корчак Богдан Андрійович

Тема: Система аналізу вібраційних сигналів для діагностики технічного стану вузлів автомобіля

Спеціальність: 123 «Комп'ютерна інженерія»

Обсяг кваліфікаційної роботи:

Кількість листів креслень 3 Кількість сторінок записки 63

1. У кваліфікаційній роботі розроблено програмну систему VibrationAnalyzer для аналізу вібраційних сигналів та діагностики технічного стану механічних вузлів. Для реалізації системи було обрано модульний підхід, який включає генерацію сигналу, цифрову фільтрацію, FFT-аналіз, розрахунок діагностичних параметрів, класифікацію стану та збереження результатів. Розроблена система дозволяє імітувати роботу вібраційного датчика, виконувати аналіз сигналу та автоматично визначати технічний стан вузла без використання реального вимірювального обладнання.

2. Висновок про відповідність роботи дипломному завданню: Робота повністю відповідає поставленому завданню.

3. У першому розділі проведено аналіз предметної області, досліджено методи вібраційної діагностики, спектрального аналізу та цифрової фільтрації сигналів, а також виконано огляд існуючих програмних рішень. У другому розділі розроблено архітектуру програмної системи та спроектовано основні функціональні модулі для генерації, обробки й аналізу вібраційних сигналів. У третьому розділі реалізовано програмний застосунок VibrationAnalyzer, створено графічний інтерфейс користувача та проведено тестування системи, яке підтвердило коректність роботи всіх програмних компонентів.

4. До позитивних сторін роботи належать модульна архітектура програмної системи, використання сучасних методів цифрової обробки сигналів, реалізація FFT-аналізу та автоматичної діагностики технічного стану вузлів. Розроблена

система забезпечує наочну візуалізацію результатів, не потребує спеціалізованого обладнання та може використовуватись як для навчальних цілей, так і для подальшого розвитку в напрямку реальних кіберфізичних систем моніторингу.

5. До недоліків роботи можна віднести відсутність інтеграції з реальними датчиками та обладнанням, використання спрощеної моделі генерації вібраційних сигналів, а також обмежений набір діагностичних параметрів для класифікації стану вузлів. Крім того, система орієнтована переважно на навчально-дослідницьке застосування та потребує подальшого розвитку для використання в реальних умовах експлуатації.

6. Оцінка графічного оформлення та пояснювальної записки роботи: Пояснювальна записка оформлена коректно, згідно діючих стандартів оформлення документації.

7. Відгук про роботу в цілому: Робота виконана на належному науково-технічному рівні.

8. Інші зауваження: _____

9. Оцінка дипломної роботи: задовільно

Рецензент (прізвище, ім'я, по батькові, посада, місце роботи) _____

Тодик Павло Михайлович, доцент кафедри КИ

“ 19 ” 06 2026 р.

 (підпис)

Зав. кафедри КПС
д-р. філософії Ользі ПАВЛОВІЙ

Богдан Корчак

ПІБ здобувача вищої освіти

ФІТ, 4 курсу, групи КІ2-22-4

ЗАЯВА

З правилами чинного Положення про систему забезпечення академічної доброчесності у Хмельницькому національному університеті, згідно з яким виявлення академічного плагіату є підставою для відмови в допуску кваліфікаційної роботи до захисту і застосування заходів академічної відповідальності, ознайомлений (а). Про використання спеціалізованих програмних засобів (СПЗ) StrikePlagiarism та Anti-Plagiarism для перевірки кваліфікаційних робіт здобувачів вищої освіти на наявність академічного плагіату оповіщений (а). Надаю університету право на передачу моєї роботи для обробки та збереження в базах даних СПЗ і використання роботи для виявлення академічного плагіату в інших роботах, які перевіряються СПЗ.

Також надаю свою згоду на обробку й збереження університетом моєї роботи в Інституційному репозитарії Хмельницького національного університету.

Робота надається для перевірки в електронному варіанті. Електронна версія моєї роботи збігається (ідентична) з друкованою.

1 червня 2026 року



РІШЕННЯ ЕКСПЕРТНОЇ КОМІСІЇ

КАФЕДРИ КОМП'ЮТЕРНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ
ПРО ДОПУСК КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ ДО ЗАХИСТУ

Назва кваліфікаційної роботи Система аналізу вібраційних сигналів для діагностики технічного стану вузлів автомобіля

Автор Богдан КОРЧАК

Освітня програма Комп'ютерна інженерія та програмування

Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)

Спеціальність 123 Комп'ютерна інженерія

Науковий керівник: доктор техн наук, проф. Євгеній ФЕДОРОВ

На основі аналізу кваліфікаційної роботи на дотримання вимог академічної доброчесності (у т.ч. відсутності ознак академічного плагіату) з урахуванням результатів перевірки роботи спеціалізованим програмним засобом(ами) комісія зробила такий висновок:

№	Висновок	Позначка про відповідність
1	Ознаки академічного плагіату	
1.1	Запозичення, виявлені в роботі, є законними і не є академічним плагіатом (далі – зазначаються підстави віднесення запозичень до правомірних, якщо потрібно). Робота приймається до захисту.	відповідає
1.2	Виявлені запозичення не є академічним плагіатом, розміщені в розділах, які не описують безпосередньо авторське дослідження, але кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи (далі – зазначаються детальні та аргументовані підстави віднесення запозичень до правомірних). Робота приймається до захисту, але має бути відкоригована.	
1.3	Виявлені запозичення не є академічним плагіатом, але частково розміщені в розділах, які описують безпосередньо авторське дослідження, а кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи. Робота може бути допущена до захисту після того як буде відкоригована та доопрацьована і успішно пройде повторну перевірку на академічний плагіат.	
1.4	Робота містить навмисні текстові спотворення, передбачувані спроби укриття текстових запозичень або інші прояви академічного плагіату. Робота містить фабрикацію або фальсифікацію даних. Робота не допускається до захисту.	
2	Інші види порушень академічної доброчесності	

Підтвердження:

Запозичення, виявлені в роботі, є законними і не є плагіатом, оскільки:

- 1) усі запозичення фрагментарні, або мають належним чином оформленні посилання;
- 2) окремі виявлені збіги є загальнонавчаними фразами або виразами, про що свідчить посилання системи на збіг з джерелами на один фрагмент речення;
- 3) всі зафіксовані системою ознаки модифікації тексту відносяться до комбінування латинських символів зі україномовними скороченнями індексів в формулах, що не є модифікацією тексту.
- 4) значна частина знайденого плагіату відноситься до списку використаних джерел

Сумарний обсяг всіх запозичень, визначений системою виявлення збігів/ ідентичності/схожості StrikePlagiarism, складає 1,36%; та системою Anti-Plagiarism складає 0.36%, що, з урахуванням наведених обґрунтувань, відповідає характеру наукового дослідження і свідчить на користь кваліфікаційної роботи.

12.06.2026

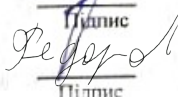
Завідувач кафедри

Гарант освітньої програми

Керівник кваліфікаційної роботи


Підпис


Підпис


Підпис

Ольга ПАВЛОВА
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Андрій НІЧЕПОРУК
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Євгеній ФЕДОРОВ
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ