

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Кіберфізична система моніторингу вібрацій та шуму промислових агрегатів з паралельною обробкою сигналів у реальному часі

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 220042.22.03.64 ПЗ

Виконав здобувач IV курсу, гр. КІ2-22-3


Підпис

Євген КОТИК

Ініціали, прізвище

Керівник д-р філософії
Науковий ступінь, учене звання


Підпис

Олександр МЕЛЬНИЧЕНКО

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 КІС



Ольга ПАВЛОВА

“ 10 ” 01 2026 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Котику Євгену Олександровичу

Прізвище, ім'я, по батькові студента

1. Тема проєкту (роботи) Кіберфізична система моніторингу вібрацій та шуму промислових агрегатів з паралельною обробкою сигналів у реальному часі

Керівник проєкту (роботи) Мельниченко Олександр Вікторович, д-р філософії

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

Затверджена наказом ректора університету від 20.01.2026 р. № 7

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) _____

Кіберфізична система моніторингу вібрацій та шуму промислових агрегатів та постановка задачі щодо її розробки

Проектування архітектури та алгоритмічного забезпечення кіберфізичної системи віброакустичного моніторингу

Практична реалізація та експериментальне дослідження системи віброакустичної діагностики

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

Архітектура та алгоритми проєкту

Апаратне забезпечення проєкту

Архітектура ПЗ проєкту та результати моніторингу

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

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

7. Дата видачі завдання « 10 » 01 2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№з/п	Назва етапів (розділів) дипломного проєкту (роботи)	Термін виконання етапів проєкту (роботи)	Примітка
1	Вибір напрямку дослідження та узгодження тематики кваліфікаційної роботи з керівником	10.01.2026	виконано
2	Ознайомлення з предметною областю; формулювання мети та задач дослідження; визначення об'єкта та предмета дослідження	01.02.2026	виконано
3	Робота над розділом 1 – кіберфізична система моніторингу вібрацій та шуму промислових агрегатів та постановка задачі щодо її розробки	01.03.2026	виконано
4	проектування архітектури та алгоритмічного забезпечення кіберфізичної системи віброакустичного моніторингу	01.04.2026	виконано
5	Робота над розділом 3 – проектування архітектури та алгоритмічного забезпечення кіберфізичної системи віброакустичного моніторингу	29.04.2026	виконано
6	Оформлення пояснювальної записки згідно з вимогами	25.05.2026	виконано
7	Попередній захист ВКР	26.05.2026	виконано
8	Захист ВКР на засіданні ЕК	Червень 2026 року	

Здобувач

Підпис

Євген КОТИК

Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Керівник кваліфікаційної роботи

Підпис

Олександр МЕЛЬНИЧЕНКО

Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

АНОТАЦІЯ

Тема кваліфікаційної роботи: «Кіберфізична система моніторингу вібрацій та шуму промислових агрегатів з паралельною обробкою сигналів у реальному часі».

Автор роботи: Євген КОТИК.

Керівник роботи: Олександр МЕЛЬНИЧЕНКО.

Пояснювальна записка: 63 с., 29 рис., 4 табл., 3 дод., 50 джерел.

Графічна частина: 3 креслення.

АКСЕЛЕРОМЕТР, АЛГОРИТМ, ВІБРОАКУСТИЧНА ДІАГНОСТИКА, КІБЕРФІЗИЧНА СИСТЕМА, МІКРОКОНТРОЛЕР, МОНІТОРИНГ, ПАРАЛЕЛЬНА ОБРОБКА.

Кваліфікаційна робота присвячена розробці системи віброакустичного моніторингу обладнання на базі дворівневої мікроконтролерної платформи. Актуальність теми зумовлена потребою безперервного контролю стану механічних вузлів та впровадження інтелектуальних засобів аналізу сигналів. Виявлення аномалій у спектрах дозволяє попереджати поломки роторних машин та підвищує безпеку експлуатації технічних засобів на виробництві.

Метою роботи є проектування кіберфізичного пристрою для паралельного збору та обробки діагностичних параметрів з цифрових датчиків. Для досягнення мети розроблено принципову електричну схему на основі двох обчислювальних вузлів та обрано відповідну елементну базу. Програмна частина включає методи спектрального аналізу сигналів та протоколи синхронізації даних між мікроконтролерами для забезпечення високої точності результатів вимірювань.




Підпис здобувача

30.05.2026

Дата

ЗМІСТ

Вступ.....	4
1 Кіберфізична система моніторингу вібрацій та шуму промислових агрегатів та постановка задачі щодо її розробки	6
1.1 Аналіз предметної області та проблематики сучасних методів віброакустичного діагностування технічного стану промислового обладнання	6
1.2 Порівняльний аналіз архітектурних та програмно-апаратних рішень в існуючих системах кіберфізичного моніторингу	14
1.3 Методологічні засади застосування паралельної обробки сигналів та постановка задачі дослідження	20
1.4 Висновки до першого розділу.....	27
2 Проектування архітектури та алгоритмічного забезпечення кіберфізичної системи віброакустичного моніторингу.....	28
2.1 Розробка структурної схеми кіберфізичної системи з паралельною обробкою даних.....	28
2.2 Вибір та обґрунтування апаратної платформи і засобів збору сигналів.....	32
2.3 Розробка алгоритмів паралельної обробки процесів діагностування обладнання	36
2.4 Проектування механізмів синхронізації потоків даних у реальному часі	40
2.5 Висновки до другого розділу	43

КвРКІ. 220042.22.03.64 ПЗ								
Зм.	Арк.	№ док.ум.	Підпис	Дата	Кіберфізична система моніторингу вібрацій та шуму промислових агрегатів з паралельною обробкою сигналів у реальному часі Пояснювальна записка	Літера	Арк.вш.	Арк.впів.
Виконав	Свєген КОТИК	Олександр МЕЛЬНИЧЕНКО				y	2	72
Перевір.					ХНУ КІ2-22-3			
Н.контр.	Тетяна КИСІЛЬ							
Затвер.	Ольга ПАВЛОВА							

3 Практична реалізація та експериментальне дослідження системи віброакустичної діагностики.....	45
3.1 Розробка вбудованого програмного забезпечення та вибір середовища проектування	45
3.2 Програмна реалізація алгоритмів розпаралелювання обчислювальних процесів	49
3.3 Опис програмних модулів цифрової обробки та аналізу віброакустичних сигналів.....	53
3.4. Реалізація сервісів збереження діагностичної інформації та мережевої взаємодії	57
3.5 Аналіз отриманих результатів та оцінка ефективності функціонування системи	62
3.6 Висновки до третього розділу.....	64
Висновки	66
Перелік джерел посилань	68
Додаток А Архітектура та алгоритми проекту.....	73
Додаток Б Апаратне забезпечення проекту	74
Додаток В Апаратне забезпечення проекту	74

ВСТУП

Сучасний етап розвитку промисловості вимагає постійного впровадження новітніх автоматизованих комплексів у виробничі процеси. Безперебійна робота промислового обладнання є важливою умовою забезпечення економічної стабільності підприємств. Під час інтенсивної експлуатації потужних агрегатів неминуче виникають різні дефекти та поступове зношення механічних вузлів. Основними фізичними проявами таких несправностей виступають аномальні вібрації та підвищений рівень шумового випромінювання. Своєчасне виявлення цих критичних відхилень дозволяє надійно запобігти аварійним ситуаціям та уникнути значних фінансових втрат від тривалих простоїв на виробництві. Саме тому розробка ефективних апаратних та програмних засобів безперервного контролю технічного стану обладнання є актуальною для систем технічного моніторингу промислового обладнання.

Традиційні підходи до промислової діагностики часто не здатні забезпечити необхідну швидкість реакції на динамічні зміни в роботі складних механізмів. Вирішення цієї проблеми лежить у застосуванні кіберфізичних систем, які глибоко інтегрують обчислювальні ресурси з фізичними процесами для безперервного збору даних. Проте моніторинг акустичних та вібраційних сигналів постійно генерує значні обсяги потокових вимірювальних даних. Послідовна обробка таких обсягів даних неминуче призводить до значних затримок у часі, що є неприйнятним для задач із жорсткими часовими обмеженнями. Відповідно виникає нагальна потреба у впровадженні методів паралельної обробки сигналів. Це дозволяє ефективно розподілити обчислювальне навантаження та здійснювати глибокий аналіз у реальному часі. Використання архітектури паралельних обчислень дає змогу одночасно обробляти неперервні потоки даних від кількох сенсорних каналів та зменшувати затримку виявлення ознак можливих дефектів на ранніх стадіях.

					КвРКІ. 22042.22.03.64 ПЗ	Арк.
						4
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Метою цієї дипломної роботи є розробка та дослідження кіберфізичної системи моніторингу вібрацій та шуму промислових агрегатів на основі паралельної обробки багатовимірних сигналів у реальному часі для оцінювання можливості зменшення затримки обробки діагностичних сигналів. Для досягнення поставленої мети необхідно провести детальний аналіз існуючих методів віброакустичного контролю, спроєктувати оптимальну архітектуру апаратної та програмної частин системи, а також розробити оптимізовані алгоритми обробки поточкових даних.

Об'єктом дослідження є процес комплексної діагностики та безперервного моніторингу технічного стану промислового обладнання на основі математичного аналізу вібраційних та акустичних сигналів. Предметом дослідження виступають специфічні математичні методи та алгоритми реалізації паралельної обробки сигналів у багатокomпонентних кіберфізичних системах реального часу.

Практичне значення отриманих результатів полягає у створенні концептуального архітектурного рішення, яке в подальшому може бути інтегроване в існуючі автоматизовані системи управління для підвищення рівня промислової безпеки. Елемент новизни роботи полягає у поєднанні двоканального збору даних, паралельної обробки та синхронізації часових міток у прототипі системи, що дає змогу скоротити затримку формування діагностичних рішень.

1 КІБЕРФІЗИЧНА СИСТЕМА МОНІТОРИНГУ ВІБРАЦІЙ ТА ШУМУ ПРОМИСЛОВИХ АГРЕГАТІВ ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ЩОДО ЇЇ РОЗРОБКИ

1.1 Аналіз предметної області та проблематики сучасних методів віброакустичного діагностування технічного стану промислового обладнання

Забезпечення стабільного та безперебійного функціонування промислового обладнання виступає основою для досягнення високих показників [4] економічної ефективності та конкурентоспроможності сучасних виробничих підприємств. У нинішніх реаліях глобалізованої економіки навіть нетривалий простій потужностей може призвести до значних збитків, втрати ринкових позицій та порушення критичних ланцюгів постачання. Переважна більшість складних технологічних процесів у таких стратегічно важливих галузях як важка промисловість, енергетика, металургія та машинобудування критично залежить від надійності роботи роторних машин, до яких належать парові та газові турбіни, магістральні компресори, потужні тягові електродвигуни та високовольтні насосні агрегати. Цей тип обладнання зазвичай працює у режимі безперервного циклу під впливом екстремальних механічних та теплових навантажень, що робить питання його технічного стану пріоритетним для інженерних служб.

Багаторічна практика промислової експлуатації свідчить, що раптова відмова таких складних механізмів [15] спричиняє не лише прямі фінансові втрати через зупинку ліній, але й вимагає значних витрат на відновлення після аварійних пошкоджень, які часто мають лавиноподібний характер. Крім суто економічного аспекту, вихід з ладу критичних вузлів створює реальні загрози виникнення масштабних аварій техногенного характеру, що може супроводжуватися негативним впливом на екологічну ситуацію та створювати небезпеку для життя і здоров'я персоналу. Своєчасне прогнозування можливих

					КвРКІ. 22042.22.03.64 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		6

несправностей дозволяє трансформувати підхід до безпеки виробництва з реактивного у проактивний.

Враховуючи зазначені фактори, стає очевидним, що традиційні стратегії технічного сервісу, які базувалися на принципах ремонту після фактичного виникнення поломки або на планових заходах за жорстко встановленим часовим графіком, стрімко втрачають свою ефективність та актуальність. Реактивний ремонт не забезпечує належної надійності, а регламентне обслуговування часто призводить до надмірних витрат ресурсів через заміну деталей, які ще мають значний запас експлуатаційного ресурсу, або навпаки не дозволяє зафіксувати приховані дефекти між плановими перевірками.

На зміну застарілим методам приходять сучасна наукова концепція обслуговування за фактичним технічним станом, що передбачає впровадження систем безперервної предиктивної діагностики [32]. Реалізація такого підходу вимагає постійного отримання об'єктивних та високоточних даних про параметри роботи агрегатів безпосередньо під час їх функціонування, що дає змогу виявляти зародження мікрodefektів на найбільш ранніх стадіях. Саме такий перехід до інтелектуального моніторингу стає ключовим елементом цифрової трансформації промисловості [30]. Узагальнену структуру взаємодії різних компонентів та етапів при переході до сучасних стратегій технічного обслуговування зображено на рисунку 1.1.

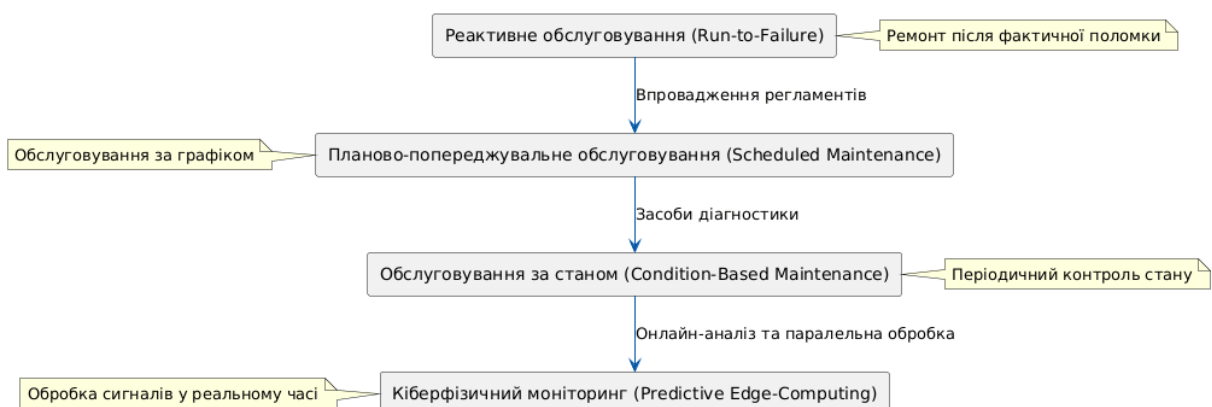


Рисунок 1.1 – Структурна схема еволюції стратегій технічного обслуговування промислового обладнання

Аналіз фізичних процесів, що супроводжують деградацію механічних вузлів, дозволяє стверджувати, що найбільш ранніми та інформативними індикаторами зародження дефектів є зміни у вібраційних та акустичних характеристиках обладнання. Будь-який механізм під час роботи генерує певний спектр коливань, зумовлений його конструктивними особливостями. Проте поява таких аномалій, як дисбаланс ротора, неспіввісність валів, знос підшипників кочення, ослаблення механічних кріплень або пошкодження зубчастих передач, неминуче призводить до зміни амплітудно-частотних характеристик вібраційного фону. Паралельно з вібрацією змінюється і шумовий профіль агрегату. Акустична емісія є особливо корисною [3] для діагностування високочастотних дефектів, таких як кавітація в насосах або мікротріщини в металі, які на початкових етапах можуть недостатньо чітко фіксуватися традиційними датчиками вібрації [37]. Детальний взаємозв'язок між типами механічних пошкоджень та їхніми фізичними проявами наведено в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Кореляція між типовими дефектами роторних машин та параметрами віброакустичної емісії

Тип механічного дефекту	Характерні зміни вібраційного фону	Ознаки в акустичному спектрі	Вплив на загальний технічний стан агрегату
Дисбаланс роторної системи	Зростання амплітуди на оборотній частоті ротора з високою стабільністю фази	Поява низькочастотного гулу синхронного з обертанням механізму	Пришвидшений знос підшипникових вузлів через постійні циклічні радіальні навантаження

Кінець таблиці 1.1

Неспіввісність з'єднаних валів	Домінування другої або третьої гармоніки оборотної частоти переважно в осьовому напрямку	Специфічний шум тертя муфтового з'єднання з періодичними амплітудними модуляціями	Втомне руйнування валів та надто швидка деградація гнучких елементів сполучних муфт
Пошкодження підшипників кочення	Поява високочастотних ударних імпульсів та негармонійних піків у спектрі обвідної сигналу	Генерація високочастотної акустичної емісії на ранніх стадіях руйнування тіл кочення	Ризик раптового заклинювання ротора, перегріву вузла та повного руйнування механізму
Кавітаційні процеси у насосах	Широкосмугове підвищення рівня вібрації випадкового характеру без чітко виражених гармонік	Характерний шум потріскування або ударів твердих часток всередині корпусу агрегату	Ерозійне руйнування робочих коліс та внутрішніх поверхонь гідравлічного тракту системи
Ослаблення механічних кріплень	Поява великої кількості вищих гармонік та дробових складових базової оборотної частоти	Брязкання металевих деталей, яке значно посилюється під час проходження резонансних зон	Втрата просторової жорсткості конструкції та ризик відриву масивних елементів під навантаженням

Сучасним технологічним рішенням, здатним реалізувати безперервний моніторинг цих параметрів, є кіберфізичні системи (КФС). У контексті промислової діагностики кіберфізична система є складний комплекс, де фізичні об'єкти (промислові агрегати) тісно інтегровані з обчислювальними ресурсами та комунікаційними мережами. Основою такої системи є сенсорна мережа, що складається з п'єзоелектричних акселерометрів, МЕМС-датчиків (мікроелектромеханічних систем) та промислових мікрофонів. Ці сенсори перетворюють механічні коливання та звукові хвилі в електричні сигнали, які згодом оцифровуються. На рисунку 1.2 проілюстровано типову архітектуру збору даних у кіберфізичних системах на рівні окремого цеху.

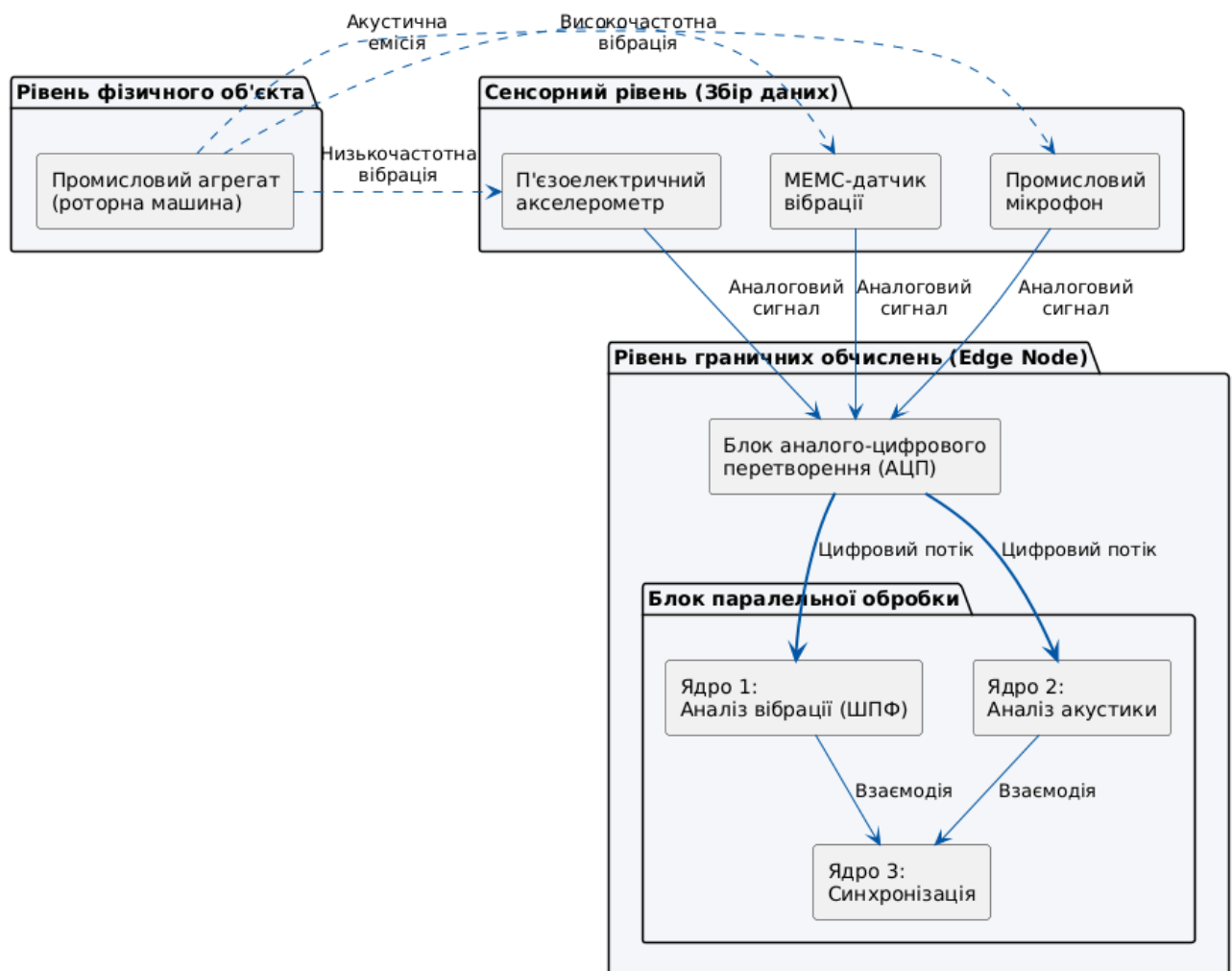


Рисунок 1.2 – Архітектура сенсорного рівня кіберфізичної системи вібромоніторингу

Дослідження інформаційних потоків у таких системах виявляє проблему, пов'язану з обсягами та швидкістю надходження даних. Вібраційні та акустичні сигнали є широкосмуговими і вимагають високої частоти дискретизації. Для адекватного відображення високочастотних гармонік, що свідчать про знос підшипників або проблеми зі змащенням, частота опитування одного каналу може досягати від 20 до 50 кГц. У разі моніторингу складного агрегату, який потребує встановлення датчиків у трьох взаємно перпендикулярних площинах на кожному підшипниковому вузлі, сумарний потік неперервних "сирих" даних стає значним. Традиційний підхід, за якого всі зібрані дані передаються для обробки на центральний сервер або у хмарне середовище, виявляється неефективним через обмежену пропускну здатність промислових мереж та неминучі затримки передачі.

Крім проблеми передачі, виникає критичне питання вчасності обробки інформації. Завдання моніторингу в реальному часі полягає не лише у фіксації факту поломки, а у виявленні швидкоплинних перехідних процесів та ударних імпульсів, які тривають мілісекунди. Витягнення корисних діагностичних ознак із сирого сигналу вимагає виконання складних математичних операцій: розрахунку швидкого перетворення Фур'є, цифрового фільтрування, спектрального аналізу обвідної, обчислення статистичних моментів вищих порядків (ексцесу, асиметрії) тощо. Виконання таких розрахунків послідовним методом на одному обчислювальному ядрі мікроконтролера займає час, що перевищує інтервал надходження нових порцій даних. Це призводить до переповнення буферів пам'яті, втрати важливих фрагментів сигналу і, як наслідок, до неможливості прийняття рішень у реальному часі.

Рішенням описаної проблеми є впровадження методів паралельної обробки сигналів безпосередньо поблизу джерела їх виникнення. Використання багатоядерних процесорних архітектур, програмованих логічних інтегральних схем або спеціалізованих цифрових сигнальних процесорів дозволяє розпаралелити математичні обчислення. Наприклад, поки одне обчислювальне

ядро виконує розрахунок спектра вібрації за допомогою ШПФ, інше ядро може паралельно фільтрувати акустичний шум і виділяти в ньому ударні імпульси. Такий підхід забезпечує детермінованість часу реакції системи на аномалії в роботі промислового обладнання. Порівняння часових витрат при послідовній та паралельній обробці віброакустичних даних наведено у таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 – Оцінка продуктивності послідовних та паралельних алгоритмів цифрової обробки сигналів

Етап цифрової обробки сигналу	Час виконання за умови послідовного методу, мс	Час виконання за умови паралельного методу, мс	Очікуваний приріст продуктивності
Збір даних та первинна апаратна фільтрація	15,2	15,2	Відсутній оскільки процес жорстко обмежений частотою дискретизації перетворювача
Обчислення швидкого перетворення Фур'є для вібрації	42,5	21,8	Майже двократне прискорення за рахунок просторового розподілу масивів даних
Аналіз акустичної емісії та виділення імпульсів	38,4	19,5	Суттєве прискорення завдяки повністю незалежній обробці аудіопотоку на окремому ядрі

Кінець таблиці 1.2

Розрахунок статистичних параметрів вищих порядків	24,1	8,3	Трикратне покращення при ефективному використанні векторних інструкцій співпроцесора
Синхронізація потоків та формування діагностичного висновку	5,5	7,2	Невелике уповільнення через неминучі накладні витрати на синхронізацію обчислювальних ядер
Загальний час циклу обробки одного вікна даних	125,7	56,8	Скорочення загального часу більш ніж у два рази що забезпечує роботу в реальному часі

Незважаючи на перспективність використання паралельних обчислень у кіберфізичних системах моніторингу, детальний аналіз існуючих рішень виявляє низку невирішених науково-прикладних проблем. По-перше, більшість наявних на ринку діагностичних комплексів орієнтовані на обробку лише одного типу сигналів (переважно вібрації), тоді як акустичні дані аналізуються окремо або взагалі ігноруються через складність їх синхронізації з вібраційними процесами. Синхронізація різнорідних сигналів у реальному часі вимагає створення специфічних механізмів управління потоками даних на апаратному рівні. По-друге, розробка програмного забезпечення для паралельних архітектур стикається з проблемами розподілу ресурсів та синхронізації паралельних

потоків, що підвищує ризики виникнення взаємних блокувань (deadlocks) та зниження загальної надійності системи. По-третє, алгоритми виявлення дефектів часто залишаються надмірно чутливими до фонових промислового шуму, що зумовлює високий відсоток хибних спрацьовувань системи оповіщення.

Виявлені в ході аналізу предметної області проблеми дозволяють чітко сформулювати завдання для подальшого дослідження. Головним завданням є проектування структури кіберфізичної системи, яка б інтегрувала підсистеми збору вібраційних та акустичних даних з апаратно-програмними засобами їх паралельної обробки. Необхідно розробити та обґрунтувати алгоритмічне забезпечення, яке дозволить ефективно розподіляти обчислювальне навантаження між ядрами обчислювального пристрою для забезпечення жорсткого реального часу. Також вимагається знайти рішення для задачі синхронізованого аналізу двох типів сигналів з метою підвищення вірогідності діагностування стану промислових агрегатів, мінімізувавши вплив зовнішніх завад. Вирішення цих завдань дозволить створити надійний інструмент для предиктивного обслуговування, здатний оперативно реагувати на деградаційні процеси в механізмах.

1.2 Порівняльний аналіз архітектурних та програмно-апаратних рішень в існуючих системах кіберфізичного моніторингу

Розробка нової кіберфізичної системи моніторингу вимагає детального вивчення вже існуючих на ринку та в науковому середовищі апаратно-програмних комплексів. На сьогоднішній день ринок промислової діагностики пропонує широкий спектр рішень [31], які можна умовно поділити на три великі класи: традиційні дротові системи на базі архітектури SCADA, хмарні рішення промислового інтернету речей (ІоТ) та спеціалізовані локальні комплекси на базі програмованих логічних контролерів з модулями цифрової обробки сигналів. Кожен із цих класів має свої специфічні сфери застосування, сильні сторони, а

					КвРКІ. 22042.22.03.64 ПЗ	Арк. 14
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

також суттєві обмеження, які не дозволяють повною мірою реалізувати концепцію синхронного аналізу вібрації та шуму в реальному часі.

Традиційні системи стаціонарного моніторингу, такі як комплекси від Bently Nevada або SKF Multilog [12], історично є стандартом де-факто у важкій промисловості та енергетиці. Їхньою головною перевагою є виняткова надійність апаратної частини, використання високоточних п'єзоелектричних датчиків та захищеність ліній зв'язку від електромагнітних завад. Такі системи здатні працювати десятиліттями в агресивних умовах цехів. Проте архітектура цих рішень переважно є жорстко централізованою. Сигнальні кабелі від десятків датчиків тягнуться до єдиного комутаційного шафи, де відбувається базове перетворення, після чого масиви даних передаються на центральний сервер підприємства для аналізу. Цей підхід створює значне навантаження на канали зв'язку і унеможливорює миттєву реакцію системи на швидкоплинні аномалії, оскільки сервер обробляє дані в порядку черги. Крім того, вартість впровадження таких комплексів є економічно виправданою лише для важливого обладнання, наприклад, турбогенераторів або головних приводів прокатних станів. Схематичне зображення архітектури традиційної централізованої системи вібромоніторингу наведено на рисунку 1.3.



Рисунок 1.3 – Архітектура традиційної централізованої системи вібромоніторингу

Стрімкий розвиток бездротових комунікаційних технологій став каталізатором масового впровадження хмарних IoT-рішень [6] у сферу технічного діагностування. У межах цієї парадигми компактні автономні датчики кріпляться на агрегат і відправляють зібрані дані через енергоефективні протоколи (LoRaWAN, Wi-Fi, Bluetooth Low Energy) безпосередньо у хмарне середовище. Перевагою такого підходу є простота масштабування, відносно низька вартість апаратного забезпечення та можливість централізованого накопичення петабайтів історичних даних [10] для побудови складних прогнозних моделей деградації обладнання за допомогою алгоритмів машинного навчання.

Головний мінус описаного методу полягає в тому, що він не може гарантувати роботу в жорсткому реальному часі. Безперервний моніторинг високочастотних вібраційних та акустичних процесів генерує значні обсяги вимірювальних даних, трансляція яких вимагає надзвичайно широкої смуги пропускання. В умовах промислового підприємства, де наявний високий рівень завад, забезпечення стабільного та швидкісного каналу зв'язку для передачі таких масивів часто стає недоступним.

Через наявні мережеві обмеження та значні часові затримки під час передачі даних у хмарних архітектурах (рис. 1.4), більшість сучасних бездротових IoT-датчиків фізично не здатні передавати необроблений «сирий» сигнал у повному обсязі. Натомість вони виконують базову локальну обробку і відправляють на віддалений сервер лише усереднені загальні рівні вібрації з низькою періодичністю – раз на кілька хвилин або годин. Подібне значне стиснення інформації неминуче призводить до безповоротної втрати важливих діагностичних даних про спектральний склад коливань, що робить неможливим виявлення прихованих мікрodefektів роторних систем на ранніх стадіях їх зародження.

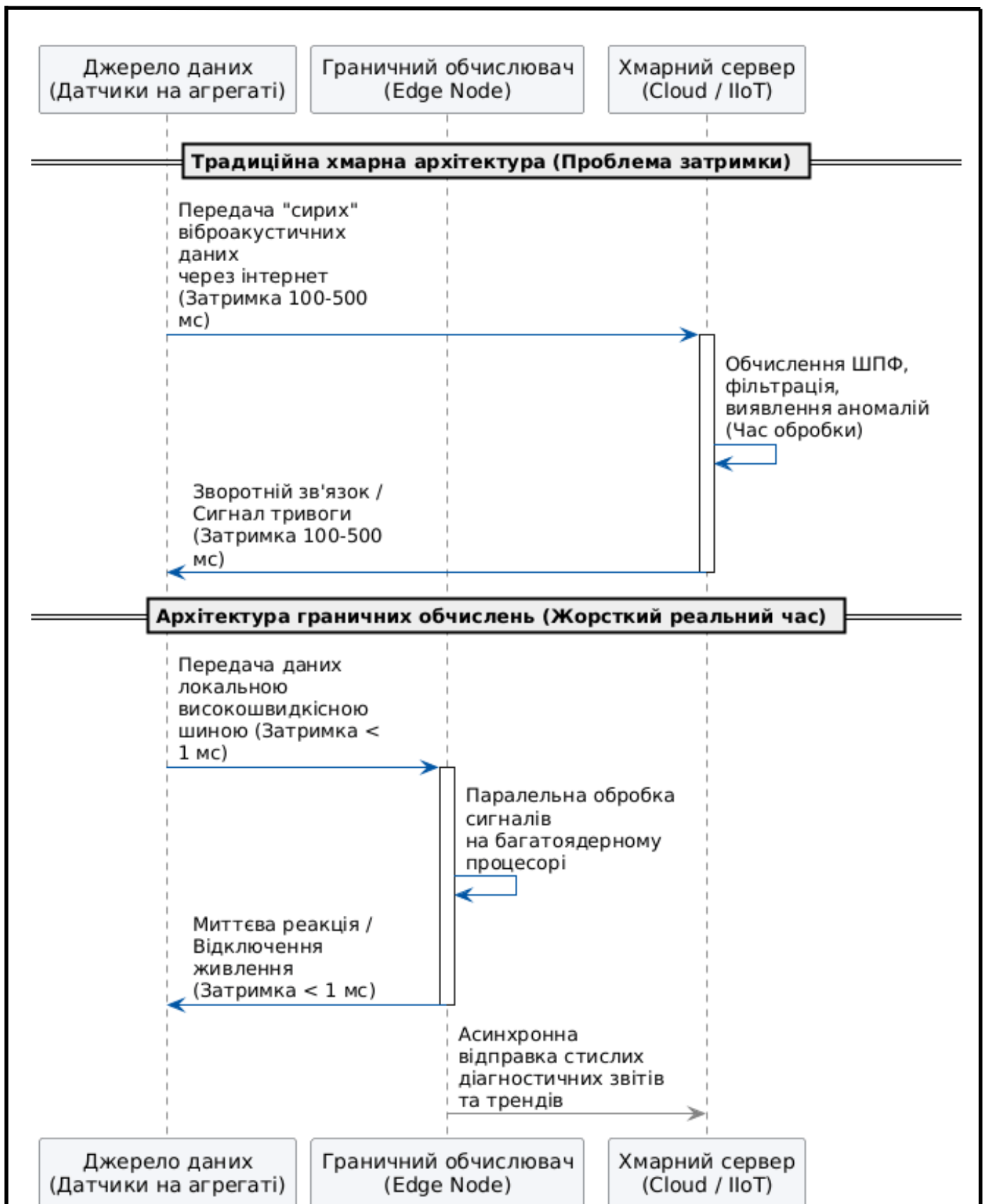


Рисунок 1.4 – Порівняння затримок передачі даних у хмарних та граничних обчислювальних мережах

Найбільш наближеними до тематики цього дослідження є системи, побудовані за принципом граничних обчислень [5]. Такі рішення розробляються компаніями рівня National Instruments на базі платформ з архітектурою ПЛІС або потужних промислових контролерів [33]. Вони дозволяють перенести математичні розрахунки спектрів та фільтрацію сигналів безпосередньо у точку збору даних, тобто на сам промисловий агрегат. Це частково вирішує проблему пропускну здатності мережі, оскільки на верхній рівень передаються лише результати аналізу та діагностичні висновки. Однак, незважаючи на високу обчислювальну потужність, існуючі платформи граничних обчислень залишаються закритими пропрієтарними системами з високим порогом входження для розробників. Написання алгоритмів паралельної обробки для таких архітектур є складним процесом, що утруднює гнучку адаптацію системи під специфічні нестандартні типи обладнання.

Окрему увагу слід звернути на підсистеми акустичного моніторингу. Здебільшого аналіз промислового шуму реалізується як відокремлений інструмент, наприклад, у вигляді портативних акустичних тепловізорів [8] для пошуку витоків стисненого повітря або часткових розрядів у електрообладнанні. На ринку практично відсутні комплексні рішення, які б дозволяли на апаратному рівні синхронізувати збір вібраційного потоку з акселерометрів та звукового потоку з мікрофонів з точністю до мілісекунд. Відсутність такої синхронізації унеможливорює використання методів крос-кореляційного аналізу, коли акустичний імпульс може підтвердити або спростувати наявність дефекту, виявленого за вібраційним спектром. Це суттєво знижує достовірність автоматичного діагностування і часто вимагає залучення висококваліфікованого експерта для ручної перевірки сигналів. Порівняльна характеристика розглянутих класів систем за ключовими техніко-економічними показниками буде зведена у таблицю 1.3 для наочного узагальнення.

Таблиця 1.3 – Порівняльна характеристика архітектурних рішень для систем моніторингу промислового обладнання

Критерій порівняння	Традиційні системи	Хмарні рішення	Запропонована кіберфізична система
Локалізація обчислювальних потужностей	Центральний сервер або диспетчерський пункт	Віддалений хмарний кластер через інтернет	Локальний обчислювальний вузол безпосередньо біля агрегату
Рівень затримки під час прийняття рішень	Середній через черговість обробки масивів даних	Високий через непередбачувані мережеві затримки	Мінімальний завдяки паралельній обробці в реальному часі
Вимоги до пропускної здатності ліній зв'язку	Критично високі через безперервну передачу сирих сигналів	Середні за умови передачі періодичних усереднених значень	Низькі оскільки на верхній рівень передаються лише результати діагностики
Здатність до синхронного аналізу вібрації та шуму	Практично відсутня або вимагає складного додаткового обладнання	Неможлива через асинхронну пакетну передачу даних	Повна апаратна синхронізація на рівні збору та оцифрування

Проведений аналіз існуючих рішень дозволяє зробити висновок про наявність суттєвого розриву між потребами сучасної промисловості та наявними

пропозиціями. З одного боку, існує потреба у глибокому синхронному аналізі різнофізичних процесів (вібрації та шуму) для підвищення точності діагнозу. З іншого боку, реалізація такого аналізу вимагає величезних обчислювальних ресурсів у реальному часі, що не може бути забезпечено традиційними хмарними або централізованими підходами через мережеві обмеження. Відтак, розробка спеціалізованої кіберфізичної системи з архітектурою на базі доступних багатоядерних мікропроцесорів, здатних виконувати паралельну обробку акустичних та вібраційних сигналів на граничному рівні, є актуальним науково-технічним завданням. Запропонований у роботі підхід має поєднати переваги локальної швидкодії ПЛІС-систем з гнучкістю та економічною доступністю сучасних IoT-рішень.

1.3 Методологічні засади застосування паралельної обробки сигналів та постановка задачі дослідження

Основою для побудови ефективної кіберфізичної системи предиктивної діагностики є правильний вибір математичного апарату для вилучення корисних ознак із масивів вимірних "сирих" даних. Оскільки механічні дефекти роторних машин, такі як дисбаланс, неспіввісність або знос підшипників, мають яскраво виражену періодичну природу, основним інструментом дослідження стає частотний аналіз сигналів [16]. Перехід від часової області до частотної дозволяє розділити складний полігармонійний віброакустичний сигнал на окремі складові, кожна з яких відповідає за кінематику певного вузла агрегату. Для реалізації такого переходу в цифрових обчислювальних системах застосовується дискретне перетворення Фур'є. Враховуючи жорсткі вимоги до часу реакції системи моніторингу в реальному часі, пряме обчислення спектра за класичними формулами є недоцільним через надмірно високу обчислювальну складність. З огляду на це, методологічною базою для частотного аналізу в роботі обрано алгоритм швидкого перетворення Фур'є, який дозволяє помітно скоротити

					КвРКІ. 22042.22.03.64 ПЗ	Арк. 20
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

кількість математичних операцій шляхом рекурсивного розбиття вихідної послідовності сигналів [14] на парні та непарні складові. Послідовність виконання етапів запропонованого алгоритму перетворення віброакустичного сигналу з часової у частотну область наочно представлено на рисунку 1.5.

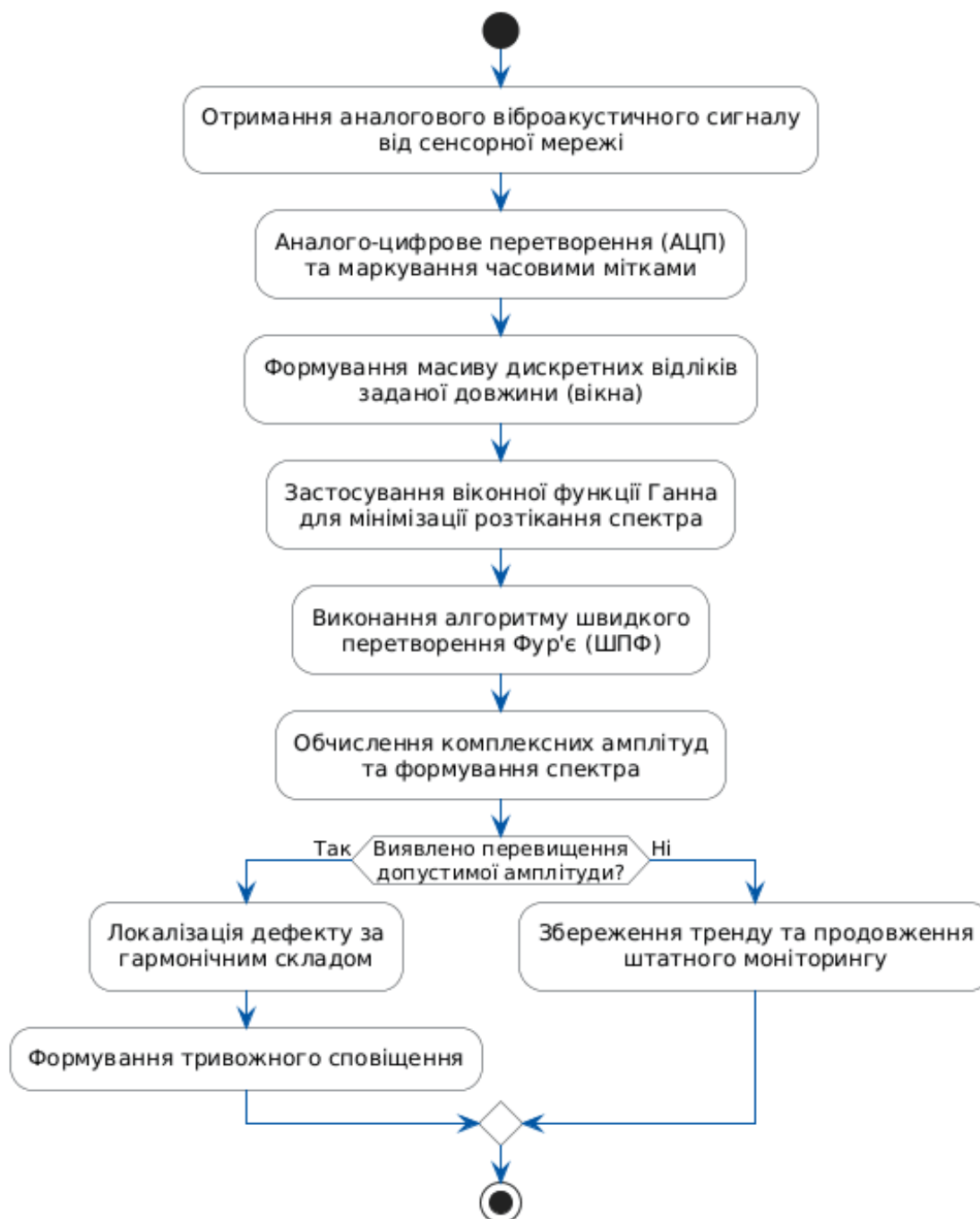


Рисунок 1.5 – Блок-схема алгоритму перетворення віброакустичного сигналу з часової у частотну область

Математична модель прямого перетворення для масиву дискретних відліків описується базовим рівнянням цифрової обробки сигналів (формула 1.1), у якому відбувається згортка значень амплітуд із комплексними експонентами.

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n]e^{-j\frac{2\pi}{N}kn} \quad (1.1)$$

У наведеній математичній залежності (1.1) змінна N відображає загальну кількість дискретних відліків у сформованому буфері даних, $x[n]$ є миттєвим значенням оцифрованого сигналу в момент часу n , а $X[k]$ представляє комплексну амплітуду k -ї спектральної складової. Використання оптимізованих алгоритмів перетворення, зокрема методу просторового розрідження за часом (алгоритм Кулі-Тьюкі), дозволяє знизити загальну асимптотичну складність обчислень [21] від квадратичної $O(N^2)$ до лінійно-логіфімічної $O(N \log N)$. Це виступає важливою умовою для парадигми граничних обчислень, оскільки мікропроцесори локальних сенсорних вузлів мають обмежені енергетичні бюджети та тактові частоти [20] порівняно з промисловими серверами у центрах обробки даних. Процес спектрального аналізу неперервних фізичних процесів неминуче супроводжується паразитним явищем розтікання спектра. Це відбувається через те, що мікроконтролер обробляє не нескінченний сигнал, а фрагментує суцільний потік даних на блоки фіксованої довжини (часові вікна). Якщо початок і кінець такого відрізка не збігаються з нульовими значеннями фази вимірюваної гармоніки, утворюються різкі розриви першого роду, які під час виконання математичного перетворення генерують хибний спектр високочастотних завад. Для нейтралізації цього ефекту розроблена методика передбачає обов'язкове застосування вагових віконних функцій [18]. Сутність цього етапу обробки полягає у множенні кожного елемента вхідного масиву на спеціальний ваговий коефіцієнт, який плавно зменшує амплітуду сигналу на

краях вибірки до нуля. У межах цього дослідження визначено доцільність застосування вікна Ганна, математичний вираз якого подано у формулі (1.2).

$$w[n] = 0.5 \left(1 - \cos \left(\frac{2\pi n}{N-1} \right) \right) \quad (1.2)$$

Обрання саме цієї віконної функції обґрунтовується досягненням оптимального компромісу між шириною головного спектрального пелюстка та рівнем придушення бічних пелюстків. Це покращує розділення близько розташовані гармоніки оборотних частот роторів, що є принципово важливим для виявлення дефектів редукторних передач. Порівняльний аналіз ефективності використання різних вагових функцій для завдань промислового вібромоніторингу відображено у таблиці 1.4.

Таблиця 1.4 – Порівняльна характеристика вагових віконних функцій для спектрального аналізу вібросигналів

Назва віконної функції	Рівень максимальної бічної пелюстки, дБ	Швидкість спадання бічних пелюстків, дБ/октава	Специфіка застосування у промисловій діагностиці
Прямокутне	-13	-6	Використовується виключно для аналізу короткочасних перехідних процесів та одиночних ударів які повністю поміщаються у вибірку

Кінець таблиці 1.4

Ганна	-32	-18	Оптимальний вибір для загального вібромоніторингу оскільки забезпечує гарне розділення близько розташованих гармонік оборотних частот
Геммінга	-43	-6	Застосовується коли важливо максимально придушити найближчу бічну заваду хоча дальні пелюстки спадають повільніше
З пласкою вершиною	-93	-6	Використовується виключно для точного вимірювання амплітуди конкретної відомої гармоніки ціною суттєвого розширення головного пелюстка

Аналіз акустичної емісії вимагає інтеграції відмінного методологічного підходу, оскільки діагностично цінна інформація про зародження мікротріщин металу або руйнування мастильної плівки у підшипниках зосереджена не в низькочастотних базових гармоніках, а у високочастотних резонансних зонах механізму. Для вилучення цих неочевидних ознак пропонується використовувати метод амплітудної демодуляції [17], відомий також як аналіз спектра обвідної. Згідно з цим підходом, "сирий" акустичний сигнал попередньо пропускається через смуговий цифровий фільтр з нескінченною імпульсною характеристикою, який апаратно відтинає домінуючі низькочастотні шуми

агрегату. Одразу після цього до відфільтрованого високочастотного масиву застосовується дискретне перетворення Гільберта. Це дозволяє отримати аналітичний сигнал, математичний модуль якого формує гладку обвідну криву.

Об'єднання описаних різнопланових алгоритмів у єдиний апаратно-програмний комплекс вимагає залучення сучасних методологій паралельного обчислення. Структурну модель конвеєрного розпаралелювання алгоритмів цифрової обробки сигналів зображено на рисунку 1.6.

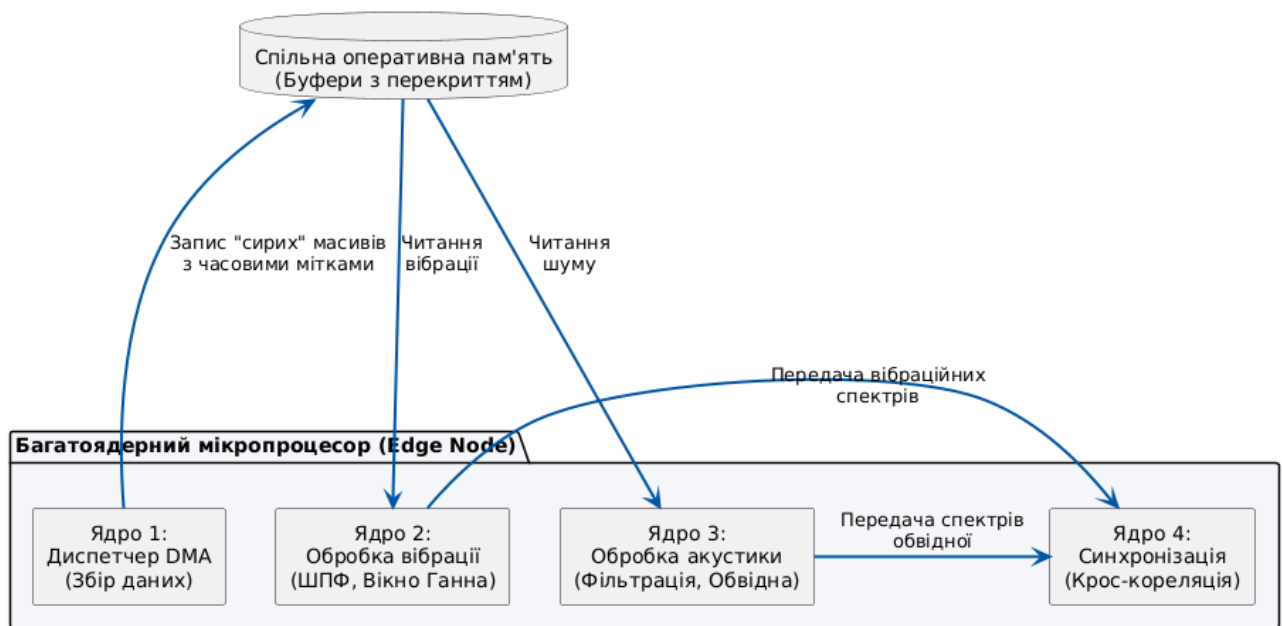


Рисунок 1.6 – Структурна модель конвеєрного розпаралелювання алгоритмів цифрової обробки сигналів

Об'єднання описаних різнопланових алгоритмів (фільтрації, перетворення Фур'є та аналізу обвідної) у єдиний апаратно-програмний комплекс вимагає залучення сучасних методологій паралельного обчислення. Для забезпечення гарантованої обробки потоків без втрати жодного мілісекундного кадру даних використовується конвеєрна архітектура просторового розпаралелювання [22] (Pipeline Architecture). За такої організації логіки загальне обчислювальне завдання розбивається на функціонально незалежні стадії, кожна з яких жорстко і на постійній основі прив'язується до визначеного фізичного ядра

багатоядерного мікропроцесора. Забезпечення роботи такої кількості алгоритмів у реальному часі досягається завдяки ефективному розподілу задач між двома ядрами обраного мікроконтролера ESP32. Перше процесорне ядро функціонує переважно як системний диспетчер вводу-виводу: воно здійснює безперервний прийом інформації від модулів оцифрування вібрації та звуку, формування буферів пам'яті з частковим перекриттям, а також обслуговує мережевий стек. Натомість друге процесорне ядро повністю виділяється для виконання ресурсомістких математичних операцій. Завдяки використанню багатозадачності операційної системи реального часу, на цьому ядрі паралельно розраховуються амплітудні спектри вібраційних масивів та виконується цифрова фільтрація акустичного потоку для пошуку аномальних ударних імпульсів, після чого здійснюється їх фінальний крос-кореляційний аналіз. Такий ізольований розподіл ресурсів унеможливорює взаємне блокування процесів операційною системою реального часу. Важливим методологічним рішенням у запропонованій системі є принцип синхронізації різнорідних фізичних сигналів, який реалізується через впровадження механізму апаратних часових міток. Кожен масив відліків вібрації та звуку маркується значеннями єдиного системного таймера з мікросекундною роздільною здатністю безпосередньо в момент аналого-цифрового перетворення. Такий підхід створює умови для здійснення фінального крос-кореляційного аналізу на завершальному етапі алгоритмічної обробки. Синхронне зіставлення пікових значень у вібраційному спектрі з аномальними сплесками акустичної енергії за ідентичними часовими мітками підвищує достовірність автоматичного діагностичного висновку. Цей механізм захищає систему від хибних спрацьовувань [9], які могли б бути викликані випадковими зовнішніми електромагнітними завадами або сторонніми виробничими шумами в цеху.

					КвРКІ. 22042.22.03.64 ПЗ	Арк. 26
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.4 Висновки до першого розділу

У межах першого розділу проведено комплексний аналіз предметної області технічного діагностування промислового обладнання та підтверджено критичну важливість безперервного моніторингу для забезпечення надійності виробничих процесів. Встановлено, що найбільш інформативними індикаторами зародження дефектів роторних машин є аномальні зміни у їхніх вібраційних та акустичних характеристиках. Простежено еволюцію стратегій технічного обслуговування, яка підтверджує нагальну необхідність впровадження інтелектуальних систем предиктивної діагностики.

Проведений порівняльний аналіз існуючих апаратно-програмних комплексів виявив суттєві обмеження традиційних централізованих систем та сучасних хмарних рішень. Традиційні архітектури створюють надмірне навантаження на промислові мережі, тоді як хмарні сервіси не здатні гарантувати роботу в режимі жорсткого реального часу через обмежену пропускну здатність при передачі широкосмугових сигналів.

Обґрунтовано, що найбільш перспективним шляхом вирішення цих проблем є розробка новітніх кіберфізичних систем на базі технологій граничних обчислень. Застосування багатоядерних мікропроцесорних архітектур дозволяє реалізувати методи паралельної обробки сигналів безпосередньо поблизу джерела їх виникнення, гарантуючи детермінованість часу реакції діагностичної системи.

На основі проведеного теоретичного дослідження чітко сформульовано науково-технічні завдання роботи, які полягають у проектуванні структури кіберфізичного вузла, розробці алгоритмічного забезпечення для синхронізованого аналізу вібрації та шуму, а також програмній реалізації архітектури просторового розпаралелювання процесів. Вирішення цих завдань дозволить створити високонадійний інструмент предиктивного обслуговування, здатний оперативно реагувати на деградаційні процеси в механізмах.

2 ПРОЕКТУВАННЯ АРХІТЕКТУРИ ТА АЛГОРИТМІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ КІБЕРФІЗИЧНОЇ СИСТЕМИ ВІБРОАКУСТИЧНОГО МОНІТОРИНГУ

2.1 Розробка структурної схеми кіберфізичної системи з паралельною обробкою даних

Ефективність функціонування кіберфізичної системи моніторингу віброакустичних параметрів промислового обладнання безпосередньо залежить від раціональної організації інформаційних потоків [34]. У сучасних умовах виробництва високочутливі датчики вібрації та акустичної емісії генерують безперервний масив вимірювальних даних із надзвичайно високою частотою дискретизації. Недосконала архітектура передачі такої кількості інформації неминуче призводить до перевантаження комунікаційних каналів та неповоротної втрати важливих кадрів сигналів. Тому на етапі проектування структури діагностичної системи виникає гостра необхідність забезпечити апаратну конфігурацію яка б гарантувала стабільний збір широкосмугових потоків. При цьому ключовою вимогою є негайна математична обробка отриманих значень безпосередньо біля об'єкта контролю що дозволяє повністю уникнути накопичення черг даних у буферах пам'яті та запобігти затримкам при виявленні швидкоплинних деградаційних процесів у механізмах.

Для успішного досягнення поставленої мети та подолання виявлених обчислювальних обмежень у роботі запропоновано спеціальну ієрархічну модель побудови діагностичного вузла [27]. Розроблена концепція базується на принципі жорсткого розподілу завдань де вся кіберфізична система поділяється на кілька функціонально незалежних рівнів. Кожен такий рівень відповідає виключно за свій етап роботи починаючи від фізичного захоплення сенсорних сигналів і закінчуючи формуванням кінцевих аналітичних висновків для персоналу. Такий підхід дозволяє ізолювати та розпаралелити виконання ресурсномістких математичних алгоритмів забезпечуючи високу

детермінованість часу реакції діагностичного комплексу на виникнення аномалій. Загальна структурна організація розробленої системи та детальна взаємодія її основних блоків представлена на рисунку 2.1.

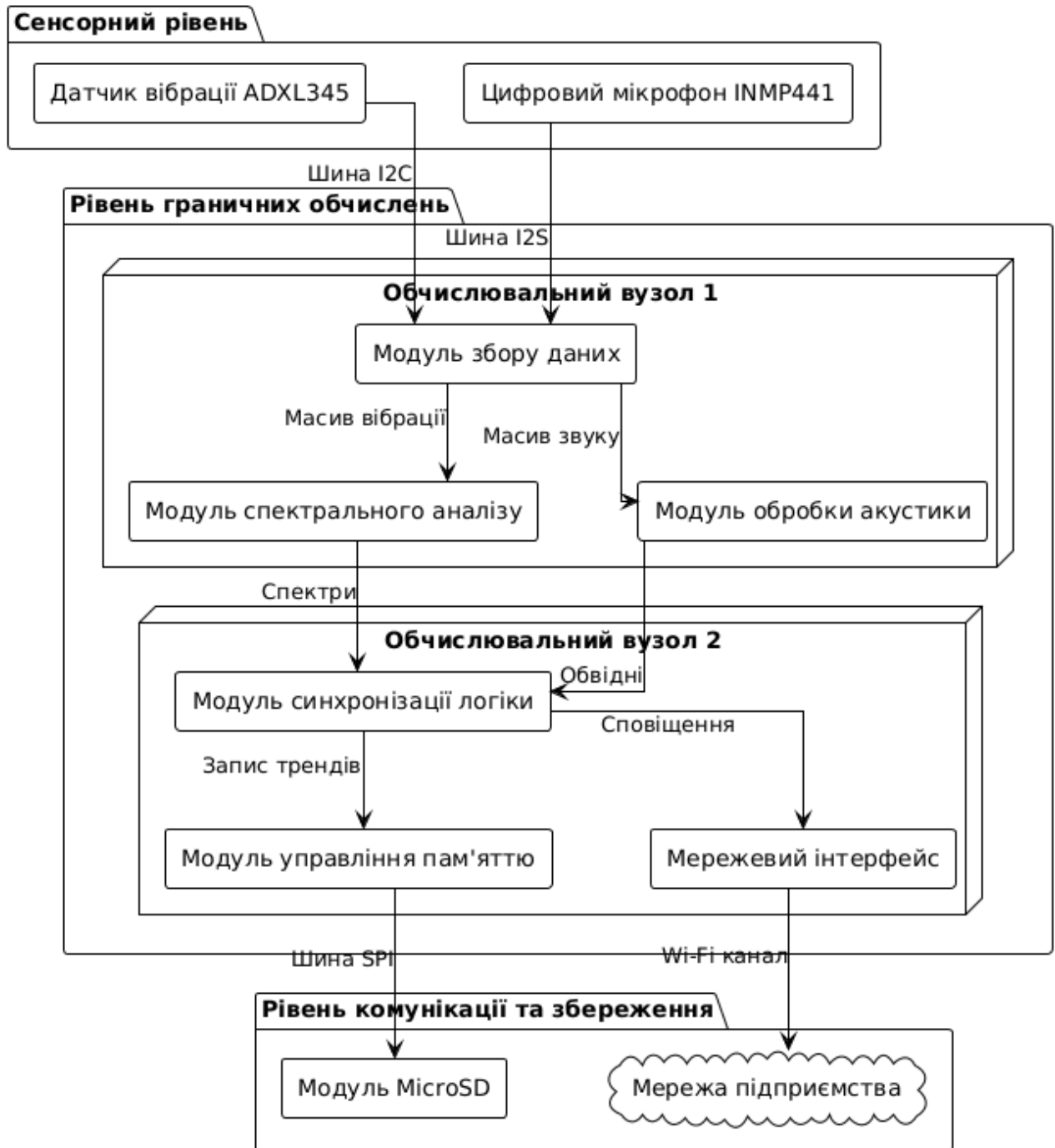


Рисунок 2.1 – Структурна схема організації кіберфізичної системи моніторингу

Першим рівнем системи є сенсорний блок, до складу якого входять канали реєстрації механічних коливань та акустичного випромінювання. Основною особливістю цього рівня є необхідність одночасного збору сигналів різної фізичної природи. Отримані дані з датчиків проходять первинне перетворення та у цифровому вигляді спрямовуються до обчислювального блоку. Важливою умовою на цьому етапі є дотримання жорсткої часової синхронізації між каналами, що дозволяє у подальшому здійснювати спільний аналіз вібраційних та шумових аномалій.

Обчислювальний рівень системи реалізовано за принципом паралельної обробки процесів. В основі цього рівня лежить використання мультипроцесорної структури, де загальне навантаження розподіляється між двома спеціалізованими вузлами. Перший обчислювальний вузол виконує роль головного математичного процесора. Він відповідає за прийом поточкових даних у реальному часі, виконання цифрової фільтрації та спектрального аналізу. Логіка роботи цього вузла націлена на максимально швидке вилучення діагностичних ознак із сирого сигналу, що вимагає постійної наявності вільних обчислювальних ресурсів.

Другий обчислювальний вузол функціонує як системний менеджер та комунікаційний шлюз. Він відповідає за прийняття остаточних рішень на основі даних отриманих від першого вузла, а також за взаємодію з зовнішніми інтерфейсами. Такий поділ дозволяє розвантажити основний процесор від виконання другорядних задач, таких як запис логів на зовнішні носії інформації або підтримка мережевих протоколів зв'язку. Взаємодія між обчислювальними вузлами відбувається через виділену внутрішню магістраль, що гарантує високу швидкість обміну інформацією та мінімальний рівень затримок.

Завершальним рівнем структури є комунікаційний блок, який забезпечує інтеграцію кіберфізичного пристрою у загальну цифрову інфраструктуру підприємства. Цей блок відповідає за бездротову передачу діагностичних результатів та формування тривожних сповіщень у разі виявлення критичних

несправностей. Запропонована структурна схема (рис 2.2) дозволяє реалізувати концепцію граничних обчислень, де основний аналіз відбувається безпосередньо біля джерела сигналу. Це суттєво зменшує обсяги інформації, що передаються по зовнішніх каналах зв'язку, та підвищує загальну надійність і швидкість реакції системи на виникнення аварійних ситуацій.

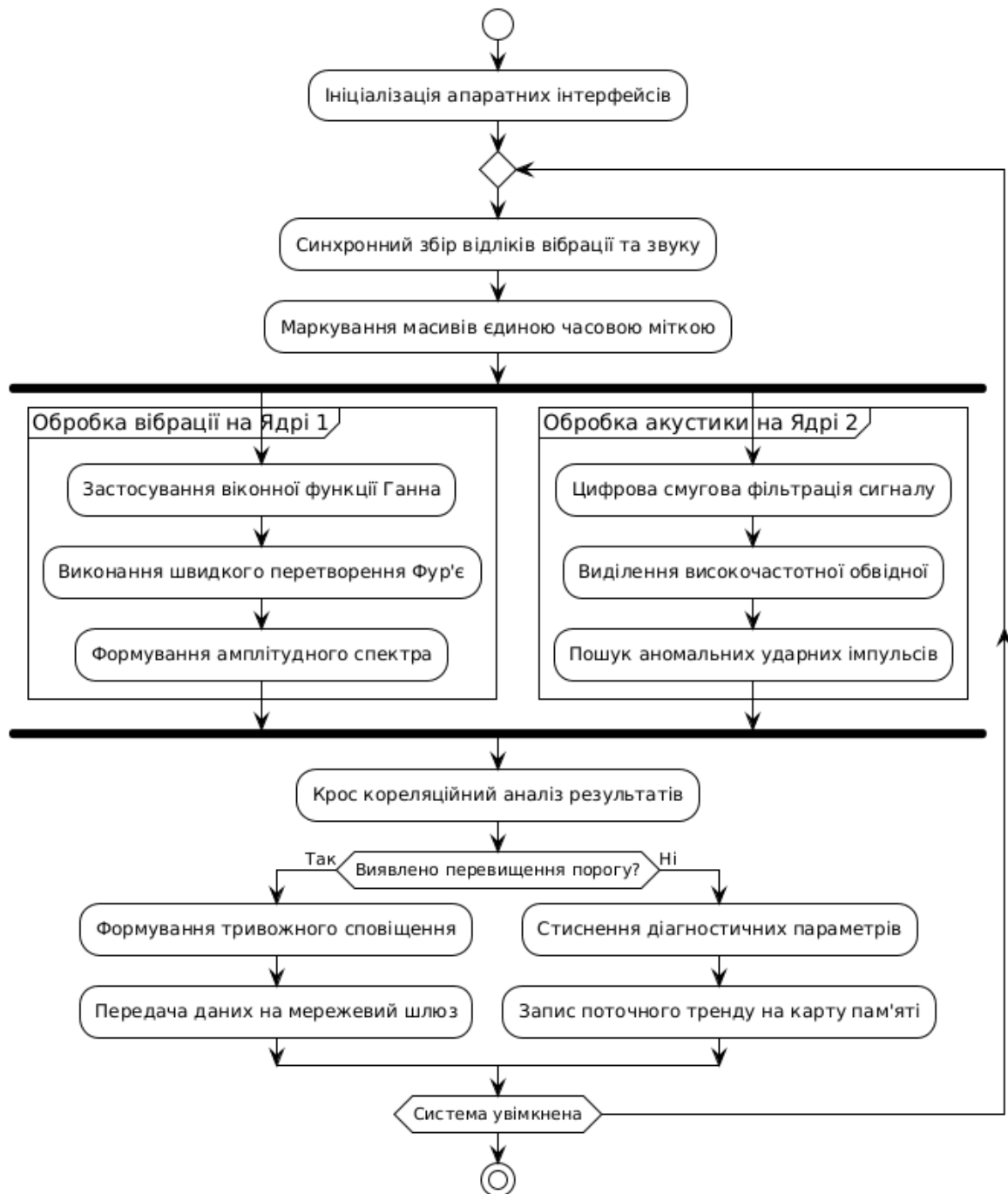


Рисунок 2.2 – Блок-схема алгоритму конвеєрного розпаралелювання обробки сигналів

2.2 Вибір та обґрунтування апаратної платформи і засобів збору сигналів

Практична реалізація розробленої архітектури кіберфізичної системи вимагає ретельного підбору електронних компонентів які здатні забезпечити виконання інтенсивних математичних обчислень у реальному часі [23]. Головним критерієм вибору апаратної платформи є наявність високошвидкісних цифрових інтерфейсів для прямого збору даних із сенсорів та достатня продуктивність для обчислення алгоритмів спектрального аналізу. Оскільки проєктування пристрою здійснюється у середовищі автоматизованого розроблення без фізичної збірки макета усі візуальні ілюстрації обраних компонентів базуються на їхніх умовних графічних позначеннях та топологічних посадкових місцях з інтегрованої бібліотеки системи проєктування. Це дозволяє уникнути використання сторонніх графічних матеріалів та гарантує точну відповідність конфігурації контактів та габаритних розмірів для подальшого створення професійної друкованої плати.

Базовим обчислювальним ядром розроблюваної системи обрано мікроконтролерний модуль серії ESP32 [19]. Цей вибір обґрунтовано наявністю двох незалежних процесорних ядер які працюють на високій тактовій частоті, що забезпечує достатній запас продуктивності для задач прототипу для паралельної обробки сигналів. На відміну від традиційних малопотужних контролерів цей чіп має вбудовану апаратну підтримку математичних операцій з плаваючою комою, що є важливим для точного розрахунку перетворень Фур'є. Крім того, обраний модуль містить усі необхідні апаратні контролери послідовних шин зв'язку та інтегрований бездротовий трансивер. Застосування двох ідентичних мікроконтролерів у схемі дозволяє фізично розділити завдання математичної діагностики та мережевої комунікації, зменшуючи ризик їхнього взаємного конфлікту за процесорний час за процесорний час. Посадкове місце та графічне позначення обраного обчислювального модуля наведено на рисунку 2.3.

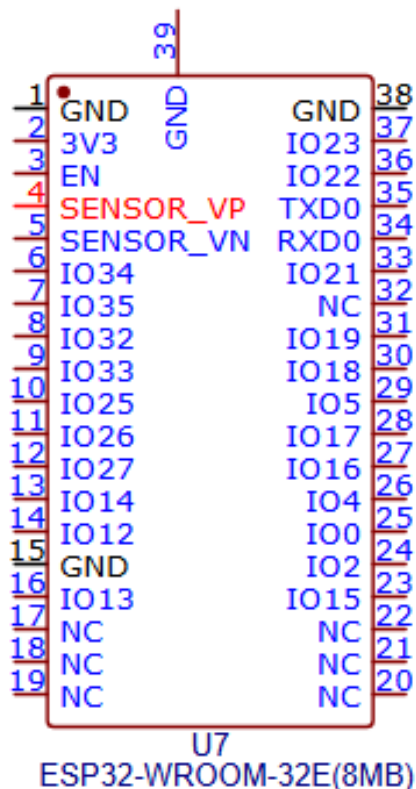


Рисунок 2.3 – Посадкове місце та графічне позначення обчислювального модуля серії ESP32

Для реєстрації механічних коливань промислового обладнання було обрано цифровий трьохосьовий акселерометр моделі ADXL345 [38]. Застосування технології мікроелектромеханічних систем дозволило виробнику розмістити високочутливий сенсор та аналого-цифровий перетворювач в одному мініатюрному корпусі. Таке конструктивне рішення зменшує проблему наведення електромагнітних завад на аналогових лініях зв'язку, оскільки до мікроконтролера надходить вже оцифрований сигнал по перешкодостійкій шині I2C. Акселерометр здатний вимірювати прискорення одночасно по трьох просторових осях, що дає змогу будувати вичерпну картину вібраційної активності роторних механізмів та виявляти специфічні дефекти дисбалансу або розцентрування. Візуальне представлення посадкового місця та графічного позначення модуля акселерометра показано на рисунку 2.4.

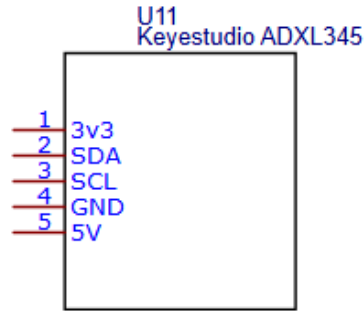


Рисунок 2.4 – Посадкове місце та графічне позначення цифрового акселерометра ADXL345

Канал акустичного моніторингу побудовано на базі спеціалізованого цифрового мікрофона INMP441 [40]. На відміну від стандартних аналогових звукових сенсорів які обов'язково потребують застосування складних зовнішніх підсилювачів цей датчик обладнано сучасним цифровим інтерфейсом I2S. Зазначений інтерфейс забезпечує пряму трансляцію високошвидкісного цифрового аудіопотоку безпосередньо до оперативної пам'яті мікроконтролера минаючи його внутрішні перетворювачі. Це дозволяє досягти якості, достатньої для експериментального аналізу акустичної емісії з надзвичайно широким динамічним діапазоном та мінімальним рівнем власного системного шуму. Завдяки цьому кіберфізична система здатна фіксувати специфічні високочастотні імпульси які виникають під час мікротріщин або підвищеного тертя у зношених підшипникових вузлах. Графічне позначення та посадкове місце цифрового мікрофона ілюструє рисунок 2.5.

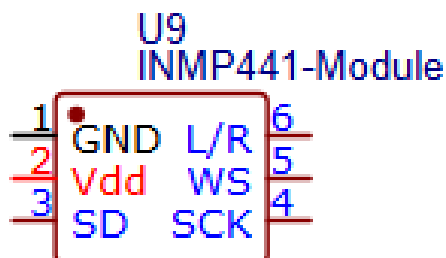


Рисунок 2.5 – Посадкове місце та графічне позначення цифрового мікрофона INMP441

Для забезпечення функції довгострокового збереження діагностичних трендів до складу апаратної платформи включено компактний модуль зчитування карт пам'яті формату MicroSD. Зв'язок із цим периферійним модулем здійснюється за допомогою швидкісної шини SPI дає змогу виконувати швидкий запис результатів аналізу без гальмування основного діагностичного циклу програми. Візуалізацію посадкового місця та графічного позначення модуля зчитування карт пам'яті наведено на рисунку 2.6.

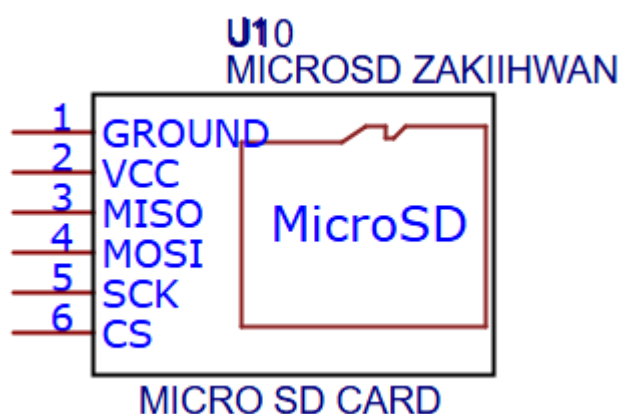


Рисунок 2.6 – Посадкове місце та графічне позначення модуля інтерфейсу MicroSD

Важливою умовою стабільного функціонування всієї багатокomпонентної цифрової електроніки є організація якісного живлення. З цією метою у проєктній схемі передбачено використання надійного лінійного стабілізатора напруги серії AMS1117 [26]. Він виконує точне пониження вхідної напруги живлення п'ять вольт (від базового промислового блоку або USB) до необхідного робочого номіналу у три цілих і три десятих вольт забезпечуючи при цьому ефективно згладжування будь-яких пульсацій струму. Це є важливим інженерним аспектом, оскільки найменші коливання напруги живлення можуть призвести до серйозного спотворення результатів вимірювань високочутливих акустичних та вібраційних сенсорів. Підсумковим результатом вибору та поєднання всіх зазначених електронних компонентів є розроблена принципова електрична

схема пристрою. Вона відображає всі необхідні електричні зв'язки між двома мікроконтролерами, датчиками та підсистемами живлення для реалізації алгоритмів паралельної обробки даних. Спроектовану принципову електричну схему діагностичного вузла наведено на рисунку 2.7.

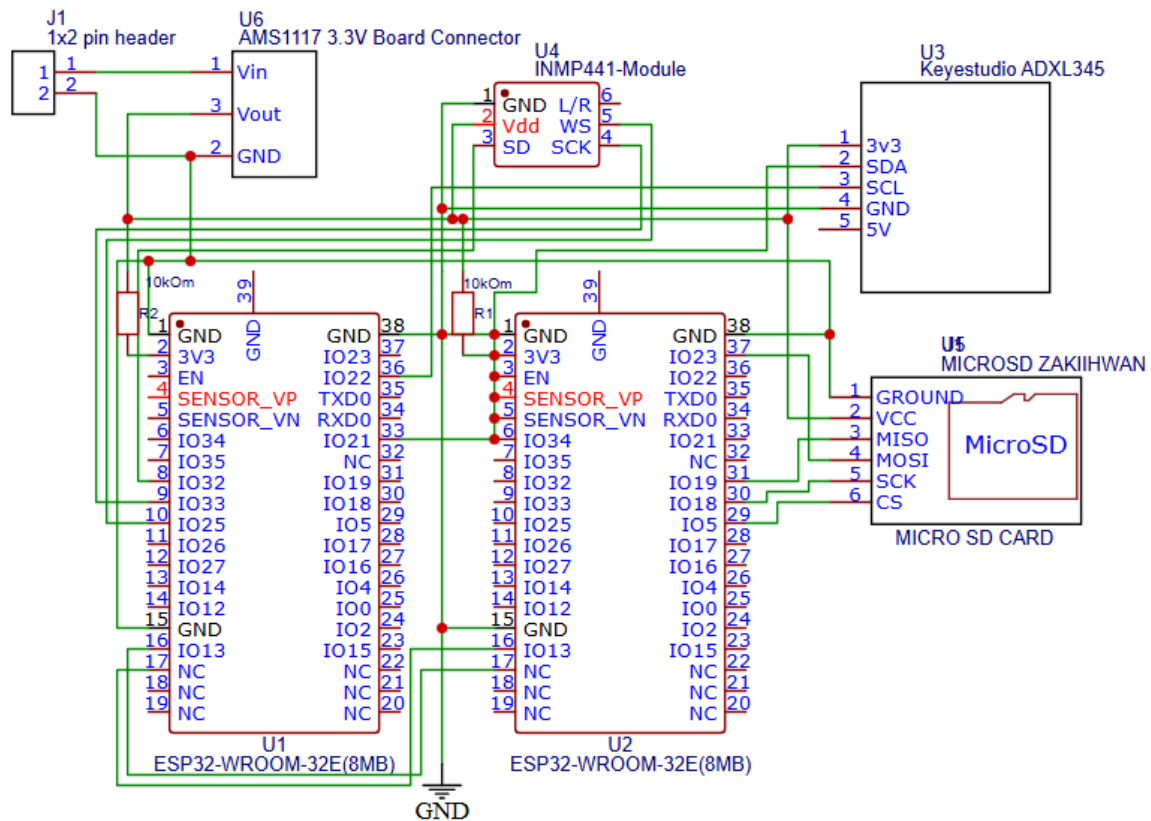


Рисунок 2.7 – Принципова електрична схема вузла віброакустичного моніторингу

2.3 Розробка алгоритмів паралельної обробки процесів діагностування обладнання

Ефективне функціонування розробленої апаратної платформи неможливе без створення спеціалізованого математичного та алгоритмічного забезпечення. Головним викликом під час проектування програмної частини є необхідність одночасної обробки двох інтенсивних потоків даних які надходять від датчиків вібрації та акустичного випромінювання. Класичний послідовний підхід до

програмування мікроконтролерів у цьому випадку є абсолютно неприйнятним оскільки обчислення спектра одного сигналу неминуче призведе до втрати відліків іншого. Для вирішення цієї проблеми у роботі запропоновано алгоритмічну модель на базі операційної системи реального часу [24] яка дозволяє повністю розкрити потенціал багатоядерної архітектури обраного обчислювального модуля.

Алгоритм обробки вібраційного сигналу реалізується на першому обчислювальному ядрі та відповідає за глибоку низькочастотну діагностику основних механічних вузлів промислового агрегату. Використання виділеного ядра дозволяє забезпечити повну детермінованість часових інтервалів під час виконання ресурсомістких операцій що є важливим аспектом для збереження цілісності фазової інформації досліджуваного сигналу. Процес функціонування розпочинається з ініціалізації швидкісної шини зв'язку та встановлення параметрів безперервного зчитування масивів прискорень із внутрішньої пам'яті цифрового акселерометра. На цьому етапі особлива увага приділяється стабільності частоти дискретизації оскільки будь які навіть незначні відхилення у часі вибірки неминуче призводять до серйозного спотворення подальших результатів спектрального аналізу. Для ефективного уникнення ефекту розтікання спектра та максимальної мінімізації бічних пелюсток перед початком складних математичних перетворень на кожен отриманий сирий масив вимірювальних даних накладається спеціальна віконна функція Ганна яка плавно знижує амплітуду сигналу на краях часового вікна.

Після завершення попередньої підготовки даних алгоритм переходить до виконання процедури швидкого перетворення Фур'є яке здійснює перевід досліджуваного сигналу із часової області у частотну форму представлення. Це дозволяє отримати чітку спектрограму вібраційної активності де кожна окрема частотна складова відображає характер роботи конкретного механічного компонента системи. Наступним кроком є детальне обчислення амплітудного спектра та автоматизований пошук домінуючих гармонік які за своїми

значеннями безпосередньо відповідають оборотній частоті ротора або її кратним гармонічним складовим. Аналіз енергетичного розподілу цих специфічних частот дозволяє з високою точністю ідентифікувати такі поширені та небезпечні дефекти, [7] як статичний, або динамічний дисбаланс ротора чи порушення геометричної співвісності валів агрегату. Своєчасне виявлення цих ознак дає змогу оперативно запобігти катастрофічному руйнуванню обладнання та оптимізувати графік планових ремонтних робіт. Детальна логіка функціонування та послідовність всіх внутрішніх переходів цього обчислювального потоку відображена на рисунку 2.8.

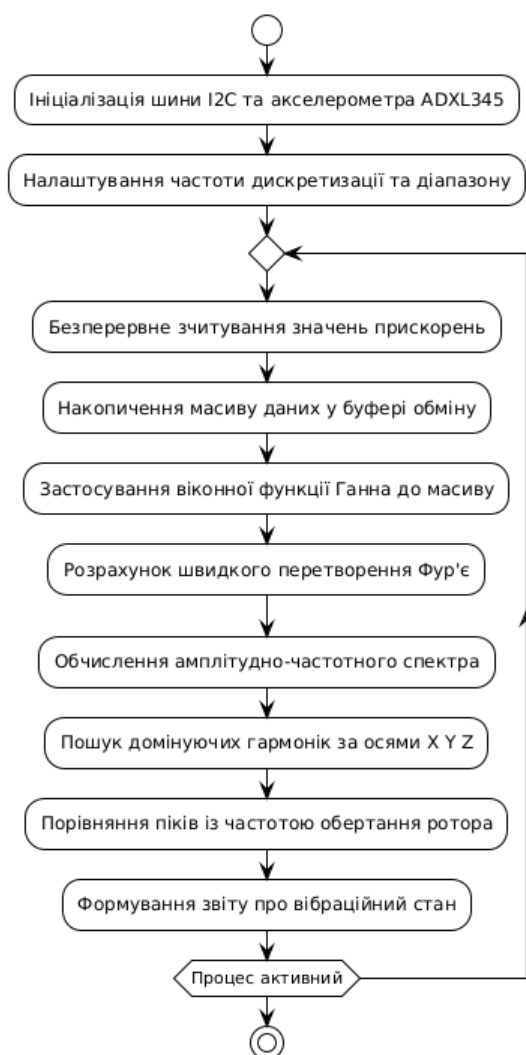


Рисунок 2.8 – Блок-схема алгоритму спектрального аналізу вібраційних сигналів

Паралельно з описаними вище процесами на другому обчислювальному ядрі розгортається алгоритм аналізу акустичної емісії. Цей канал діагностики працює з високочастотними сигналами які надходять від цифрового мікрофона. Оскільки корисна інформація про зародження мікротріщин або дефектів підшипників часто прихована у потужному низькочастотному шумі агрегату першим кроком алгоритму є інтенсивна цифрова фільтрація. Програма застосовує смуговий фільтр із нескінченною імпульсною характеристикою для виділення високочастотної області спектра. Далі алгоритм виконує процедуру демодуляції сигналу шляхом побудови обвідної акустичної емісії. Це дає змогу виділити періодичні ударні імпульси які виникають під час проходження тіл кочення через пошкоджені ділянки кілець підшипника. Послідовність операцій обробки акустичного потоку представлена на рисунку 2.9.



Рисунок 2.9 – Блок-схема алгоритму виділення обвідної акустичної емісії

Основою запропонованого алгоритму є синхронізація результатів, які обчислюються на двох незалежних ядрах. Вона реалізована через спеціальні програмні семафори та черги. Для цього використовується система спеціальних програмних семафорів та черг повідомлень яка гарантує безпечний обмін масивами даних у спільній оперативній пам'яті мікроконтролера. Після завершення своїх математичних циклів обидва ядра передають отримані діагностичні ознаки до єдиного алгоритмічного блоку прийняття рішень. Цей фінальний алгоритм здійснює крос кореляційний аналіз вібраційних та акустичних параметрів [28]. Якщо фіксується одночасне зростання вібрації на певній частоті та поява ударних імпульсів в акустичному спектрі система генерує сигнал тривоги високого пріоритету. Згодом упаковані результати діагностики пересилаються на другий мікроконтролер для збереження на карту пам'яті та передачі у мережу підприємства. Така алгоритмічна архітектура просторового розпаралелювання забезпечує максимальну швидкодію та високу надійність безперервного моніторингу роторних машин.

2.4 Проектування механізмів синхронізації потоків даних у реальному часі

Забезпечення високої вірогідності діагностичного висновку в розроблюваній кіберфізичній системі критично залежить від точності часового узгодження даних, [11] що надходять від різних фізичних джерел. Оскільки система одночасно реєструє вібраційні прискорення та акустичні коливання виникає необхідність розробки спеціалізованих механізмів синхронізації, які б дозволили зіставляти ці сигнали на єдиній часовій осі. Без належної апаратно-програмної синхронізації аналіз взаємозв'язку між механічним ударом у підшипнику та його звуковим проявом стає неможливим через випадковий зсув фаз між вимірювальними каналами [29]. У межах цього підрозділу розроблено протокол взаємодії між сенсорним рівнем та обчислювальними ядрами, який гарантує стабільність часових міток для кожного діагностичного масиву даних.

					КвРКІ. 22042.22.03.64 ПЗ	Арк. 40
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Процес обміну інформацією та послідовність сигналів синхронізації між основними компонентами системи наведено на діаграмі послідовності на рисунку 2.10.



Рисунок 2.10 – Діаграма послідовності сигналів синхронізації мультисенсорних потоків

Першим етапом забезпечення синхронності є внутрішньосистемна координація роботи цифрових інтерфейсів на базі апаратних таймерів першого мікроконтролера. Для того щоб відліки вібрації та звуку відповідали одному і тому самому моменту часу програма використовує переривання від високоточного таймера який ініціює одночасне зчитування даних із шин зв'язку. Оскільки інтерфейс цифрового мікрофона працює у безперервному режимі прямого доступу до пам'яті алгоритм маркує кожен заповнений аудіо буфер поточним значенням системного лічильника мікросекунд. Аналогічна процедура виконується під час отримання пакетів даних від акселерометра що дозволяє у подальшому програмно компенсувати апаратні затримки датчиків. Такий підхід забезпечує формування цілісного віброакустичного кадру [25] який містить у собі повну фізичну інформацію про стан об'єкта у конкретний квант часу.

Другим важливим аспектом проектування є організація надійної передачі сформованих пакетів між двома обчислювальними модулями за умов високої

інтенсивності трафіку. Для мінімізації ризику втрати даних та забезпечення цілісності інформації було розроблено структуру спеціалізованого діагностичного пакета. Кожен пакет починається з унікальної послідовності байтів синхронізації, яка дозволяє другому мікроконтролеру миттєво визначити початок нового блоку даних навіть у випадку виникнення завад на лінії зв'язку. Після заголовка слідує поле з часовою міткою та безпосередньо результати спектрального аналізу. Завершується пакет контрольною сумою, яка перевіряється приймальною стороною для підтвердження достовірності отриманих параметрів. Структура такого інформаційного пакета детально представлена на рисунку 2.11.



Рисунок 2.11 – Структурна модель діагностичного пакета передачі даних

Програмна реалізація механізму передачі базується на використанні кільцевих буферів та переривань за станом готовності ліній зв'язку. Другий мікроконтролер, функціонуючи у режимі мережевого шлюзу очікує на надходження повного кадру даних, після чого здійснює його дешифрацію та термінове збереження на зовнішній носій. Завдяки використанню розробленого протоколу синхронізації досягається повна відповідність між записаними трендами вібрації та звуковими аномаліями, що дозволяє персоналу проводити глибокий ретроспективний аналіз причин виникнення несправностей. Спроектовані механізми апаратно-програмної координації потоків забезпечують стабільну роботу кіберфізичної системи у безперервному режимі моніторингу та знижують ризик десинхронізації вимірювальних каналів під час тривалої експлуатації обладнання.

2.5 Висновки до другого розділу

Під час виконання другого розділу було розроблено загальну будову системи та схему її функціонування. Головним інженерним рішенням стало використання архітектури на базі двох окремих процесорів що дозволило ефективно розділити основні завдання. Поки один вузол здійснює швидкий збір та обробку сигналів із датчиків інший вузол забезпечує стабільний зв'язок та надійний запис інформації. Така структура робить пристрій стійким до помилок оскільки різні процеси не заважають один одному і важливі дані не втрачаються через затримки в мережі. Створена структурна схема стала основою для роботи всієї системи та дозволила чітко визначити роль кожного елемента у загальному процесі моніторингу.

Для практичної реалізації проєкту було обрано модулі серії ESP32 та сучасні цифрові датчики. Це дало змогу отримати точні вимірювання без зайвих електричних завад які часто виникають у промислових умовах. Одночасне використання акселерометра та мікрофона забезпечує можливість бачити повну

					КвРКІ. 22042.22.03.64 ПЗ	Арк. 43
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

картину стану обладнання через аналіз вібрації та звуку. Розроблена принципова електрична схема відображає всі необхідні з'єднання та додаткові компоненти для стабільного живлення і запуску пристрою. Це підтверджує що апаратна частина повністю продумана і проект готовий до етапу створення реальної друкованої плати.

Було розроблено програмні алгоритми які дозволяють процесору виконувати складні математичні операції одночасно на різних ядрах. Завдяки впровадженню методів спектрального аналізу система може самостійно знаходити різні види поломок від розбалансування деталей до зносу підшипникових вузлів. Оскільки основні обчислення відбуваються безпосередньо всередині пристрою мережа підприємства не перевантажується великими обсягами сирих даних. Користувач отримує лише готові результати діагностики та термінові повідомлення у разі виявлення критичних несправностей.

Окрему увагу було приділено забезпеченню точного збігу даних із різних датчиків за часом. Для цього було розроблено спеціальний порядок передачі пакетів інформації з мітками часу та автоматичною перевіркою на помилки. Це дозволяє правильно порівнювати вібраційні та звукові сигнали, щоб точно розуміти причини виникнення проблем у роботі машин. У підсумку було сформовано готову інженерну методику для побудови розумного вузла діагностики, який може ефективно працювати у складі сучасних систем керування виробництвом.

					КвРКІ. 22042.22.03.64 ПЗ	Арк. 44
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3 ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ ВІБРОАКУСТИЧНОЇ ДІАГНОСТИКИ

3.1 Розробка вбудованого програмного забезпечення та вибір середовища проектування

Для практичної перевірки розробленої архітектури кіберфізичної системи віброакустичної діагностики було обрано хмарне середовище моделювання Wokwi. Зазначений інструмент дозволяє виконувати функціональну симуляцію логіки ESP32 та взаємодії з підтримуваними периферійними модулями. Використання віртуального середовища є оптимальним рішенням для виконання кваліфікаційної роботи бакалавра, оскільки це дає змогу безпечно тестувати багатопотокове програмне забезпечення без ризику пошкодження реальних електронних компонентів. Крім того, такий підхід забезпечує зручність при налагодженні складних комунікаційних протоколів між декількома обчислювальними вузлами в єдиному робочому просторі.

Як базову мову програмування вбудованого програмного забезпечення було обрано мову C++ з використанням спеціалізованого ядра розробки Arduino Core. Це гарантує високу швидкість написання програмного коду та надає прямий доступ до широкої бази оптимізованих бібліотек для роботи з апаратними периферійними інтерфейсами, такими як цифрові шини I2C, SPI та UART. Безпосередній процес написання коду та його компіляції здійснювався у професійному редакторі Visual Studio Code з інтегрованим розширенням PlatformIO. Обраний програмний інструментарій дозволяє максимально гнучко керувати залежностями та конфігураціями для різних плат, що є важливою умовою при створенні надійних інженерних проєктів.

Схемотехнічна модель симуляції включає два мікроконтролери ESP32 DevKit V1, які виконують ролі вузла аналізатора та мережевого шлюзу відповідно. До першого обчислювального вузла підключено модулі імітації сенсорів, а саме мікроелектромеханічний акселерометр як прямий аналог

промислового датчика вібрації та аналоговий канал-імітацію зміни рівня сигналу замість акустичного модуля. Така модель перевіряє логіку обробки порогових значень, але не є повноцінним моделюванням акустичної емісії. Другий мікроконтролер, який виконує роль мережевого шлюзу, обладнано швидкісним інтерфейсом SPI для підключення модуля зчитування карт пам'яті MicroSD та червоним світлодіодним індикатором критичних станів. Зв'язок між двома незалежними мікроконтролерами реалізовано через апаратний інтерфейс UART, де лінія передачі першого вузла перехресно з'єднана з лінією прийому другого вузла. Повну електричну принципову схему симуляційної моделі кіберфізичної системи у середовищі Wokwi наведено на рисунку 3.1.

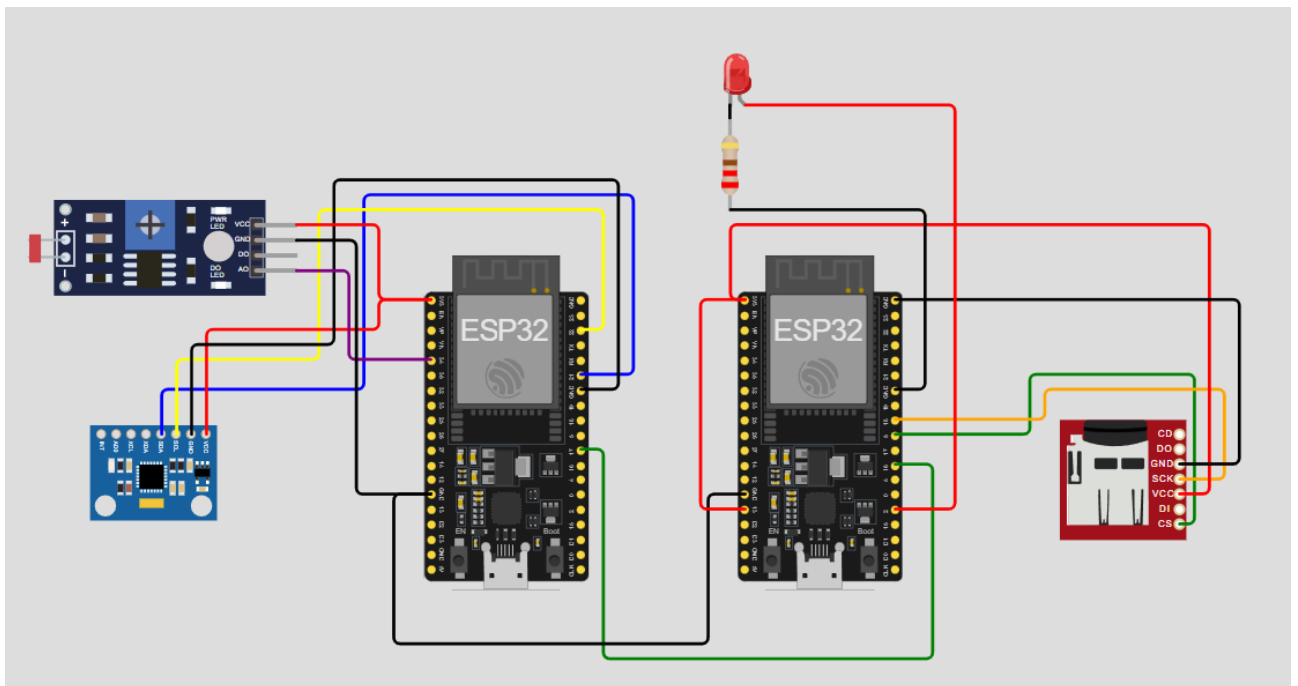


Рисунок 3.1 – Електрична принципова схема симуляційної моделі системи

З метою суттєвої оптимізації процесу тестування та уніфікації кодової бази було застосовано сучасний інженерний підхід створення єдиної монолітної прошивки для обох мікроконтролерів. Замість розробки двох абсолютно різних програм, обидва пристрої використовують ідентичний скомпільований програмний код, а визначення конкретної ролі пристрою відбувається виключно

апаратним шляхом безпосередньо під час його первинного запуску. Для реалізації такого механізму ідентифікації використовується порт загального призначення під номером 13, який успішно виконує функцію фізичного перемикача конфігурації. Логіка визначення ролі базується на зчитуванні рівня електричної напруги на цьому порту у перші мілісекунди після подачі живлення на плату. Блок-схему алгоритму ідентифікації ролі мікроконтролера у загальній мережі наведено на рисунку 3.2.

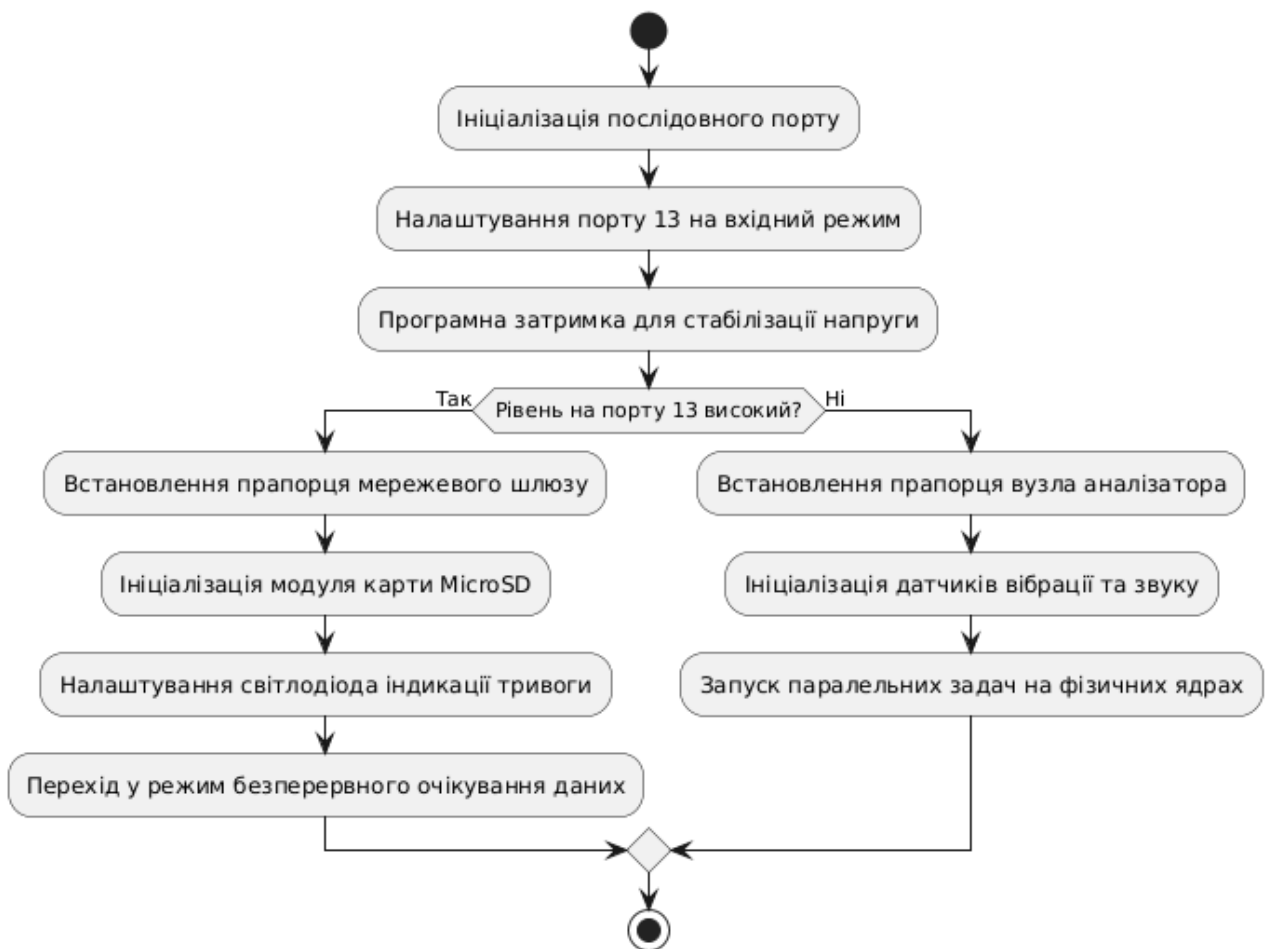


Рисунок 3.2 – Блок-схема алгоритму апаратної ідентифікації ролі обчислювального вузла

Якщо під час запуску системи на порту 13 реєструється низький логічний рівень через фізичне підключення цього контакту до загального проводу землі, мікроконтролер автоматично ініціалізує програмні модулі вузла аналізатора. У

такому робочому стані пристрій починає безперервно опитувати підключені датчики та виконувати паралельні математичні розрахунки спектрів на двох ядрах. У протилежному випадку, коли реєструється високий логічний рівень через підключення порту до лінії живлення, мікроконтролер миттєво переходить у режим мережевого шлюзу, повністю ігноруючи функції збору первинних даних. Такий гнучкий архітектурний підхід значно спрощує подальше масштабування системи, оскільки дозволяє використовувати абсолютно однакові апаратні блоки для виконання різних спеціалізованих завдань у межах єдиної промислової мережі підприємства. Структуру взаємодії програмних модулів у межах єдиної розробленої прошивки наведено на рисунку 3.3.

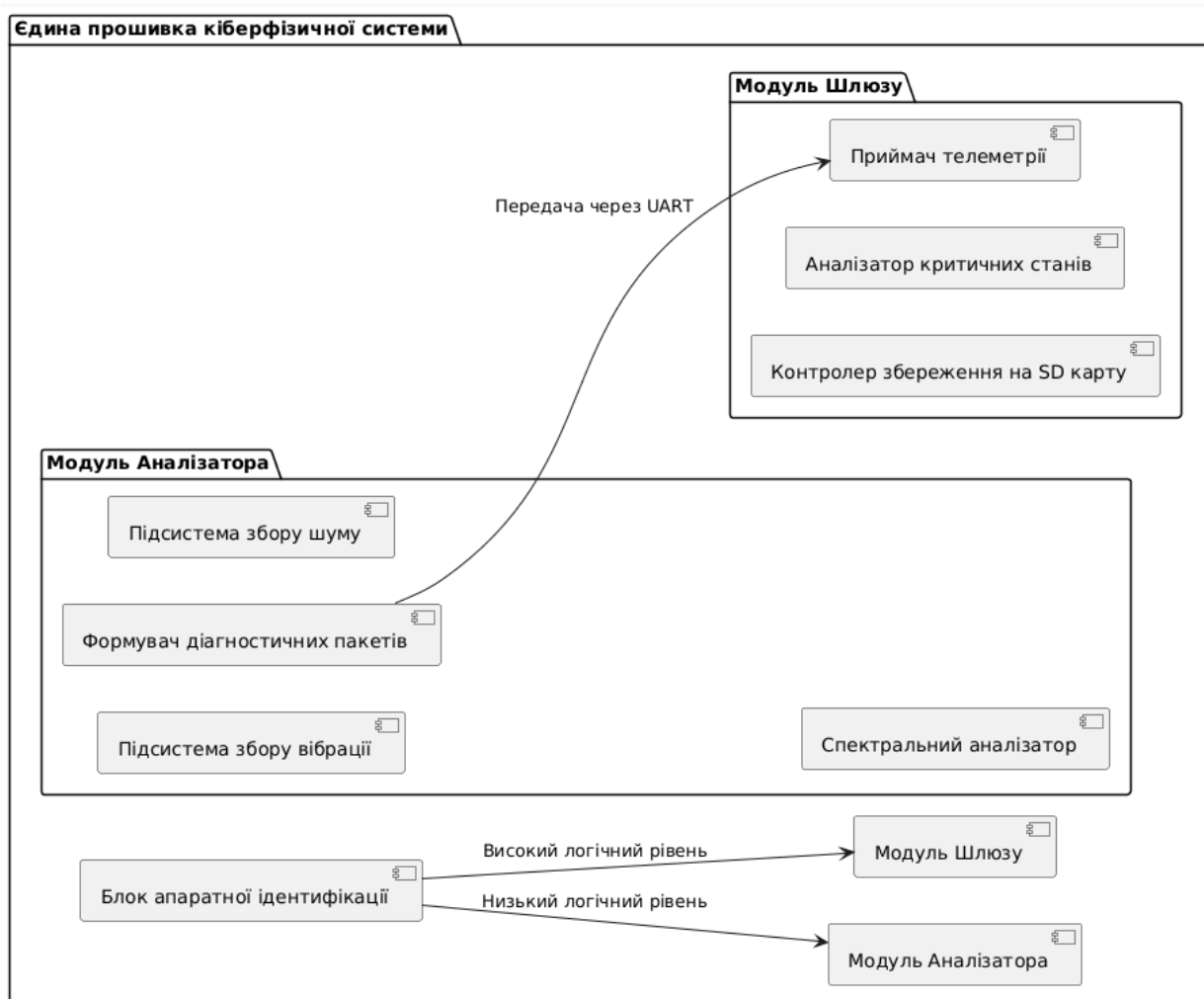


Рисунок 3.3 – Структура розподілу програмних модулів у єдиній прошивці

Запропоноване інноваційне рішення з об'єднанням логіки двох різних пристроїв у єдиному файлі вихідного коду дозволило повністю уникнути програмних конфліктів при розгортанні віртуальної лабораторії у браузері. Використання професійного середовища розробки та хмарної симуляції вичерпно покриває всі потреби етапу проєктування та первинного тестування кіберфізичного пристрою. Всі електричні з'єднання та розроблені програмні модулі були успішно інтегровані в єдиний механізм та підготовлені до подальшого поглибленого дослідження алгоритмів багатопотокової обробки сигналів у реальному часі.

3.2 Програмна реалізація алгоритмів розпаралелювання обчислювальних процесів

Забезпечення безперервного та точного моніторингу віброакустичних параметрів промислового обладнання вимагає вирішення складної задачі одночасного збору та обробки великих масивів інформації. Використання традиційного послідовного підходу до написання програмного коду є критично неефективним, оскільки під час виконання ресурсомістких математичних обчислень мікроконтролер неминуче пропускає нові відліки сигналів від сенсорів. Для подолання цієї проблеми у розробленому програмному забезпеченні застосовано операційну систему реального часу під назвою FreeRTOS, яка на апаратному рівні підтримується обраним багатоядерним мікропроцесором. Зазначена операційна система дозволяє ефективно розділити єдиний потік виконання на декілька незалежних паралельних задач, кожна з яких жорстко закріплюється за окремим фізичним обчислювальним ядром. Завдяки такому інженерному рішенню досягається повна детермінованість часу реакції кіберфізичної системи на будь-які зміни технічного стану роторного механізму. Структурну схему розподілу програмних задач між фізичними ядрами мікропроцесора наведено на рисунку 3.4.

					КвРКІ. 22042.22.03.64 ПЗ	Арк. 49
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

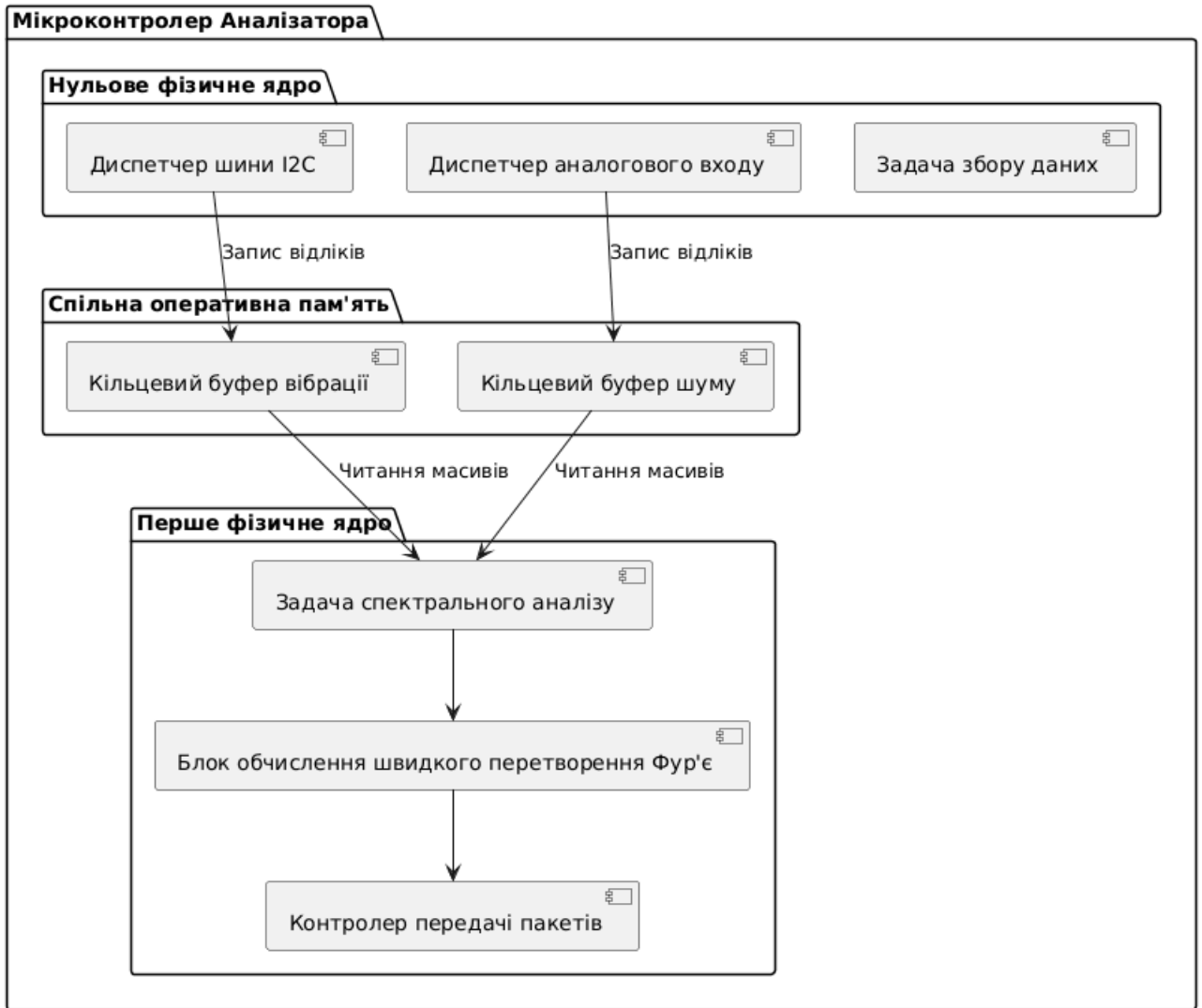


Рисунок 3.4 – Структурна схема розподілу паралельних задач між ядрами мікропроцесора

Програмна архітектура розділена на два головні обчислювальні процеси. Перша задача відповідає виключно за безперервний збір даних із сенсорної мережі та функціонує на нульовому ядрі процесора. Її головним призначенням є строге дотримання частоти дискретизації під час опитування акселерометра та каналу, який у симуляції імітує акустичний сигнал. Будь-які часові затримки на цьому етапі є небажаними, оскільки вони відразу призводять до фазових спотворень та критично знижують загальну достовірність подальшого спектрального аналізу. Отримані «сирі» відліки відразу маркуються єдиною часовою міткою та поміщаються у спеціальні кільцеві буфери оперативної

пам'яті для їхнього тимчасового зберігання. Блок-схему алгоритму роботи задачі збору первинної вимірювальної інформації зображено на рисунку 3.5.

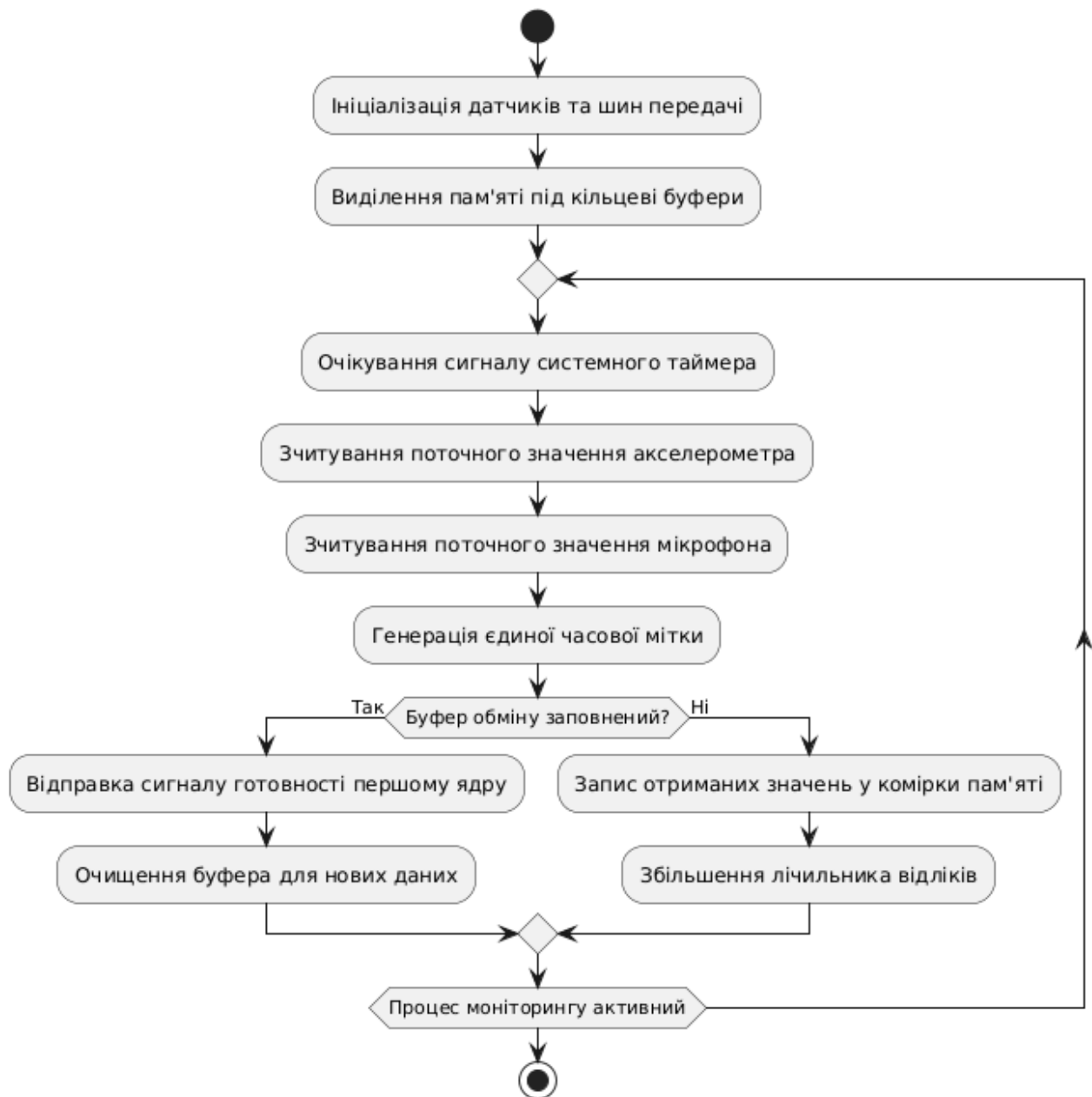


Рисунок 3.5 – Блок-схема алгоритму задачі збору віброакустичних даних

Друга паралельна задача розгорнута на першому обчислювальному ядрі та повністю присвячена математичній обробці накопичених масивів інформації. Цей процес працює абсолютно незалежно від збору даних і активується планувальником операційної системи щоразу, коли буфери обміну

заповнюються до необхідного рівня. На першому етапі обробки до масивів застосовується віконна функція Ганна, яка дозволяє мінімізувати крайові ефекти та успішно усунути паразитне явище розтікання спектра. Після цього алгоритм виконує процедуру швидкого перетворення Фур'є для вібраційного потоку та обчислює високочастотну обвідну для акустичного потоку. Отримані результати порівнюються з еталонними пороговими значеннями для виявлення перших ознак зародження механічних дефектів.

У разі виявлення перевищення допустимих рівнів вібрації або шуму математичне ядро генерує сигнал тривоги та формує стандартизований діагностичний пакет. Цей пакет містить стартові байти синхронізації, розраховані значення максимальних амплітуд та поточний статус обладнання. Сформований блок інформації відразу відправляється через апаратний інтерфейс послідовної передачі даних на другий мікроконтролер для подальшого збереження на карту пам'яті. Працездатність алгоритмів розпаралелювання та успішна взаємодія двох ядер підтверджується виведенням відповідних повідомлень у послідовний порт. Процес одночасної роботи задач збору та обробки інформації в консолі середовища розробки наведено на рисунку 3.6.

```
-----  
[MCU 1 | Core 0] Збір відліків. Акустика: 1001 RAW | 52.22 dB  
[MCU 1 | Core 1] Відправлено на Шлюз: AA BB | T:38735ms | V:3.40g | N:52.22dB | S:NORMAL | CRC:OK  
[MCU 2 | ШЛЮЗ] Прийнято пакет даних. Перевірка CRC: Успішно  
[MCU 2 | ШЛЮЗ] Запис телеметрії на MicroSD карту...  
-----  
[MCU 1 | Core 0] Збір відліків. Акустика: 1001 RAW | 52.22 dB  
[MCU 1 | Core 1] Відправлено на Шлюз: AA BB | T:39796ms | V:1.90g | N:52.22dB | S:NORMAL | CRC:OK  
[MCU 2 | ШЛЮЗ] Прийнято пакет даних. Перевірка CRC: Успішно  
[MCU 2 | ШЛЮЗ] Запис телеметрії на MicroSD карту...  
-----  
[MCU 1 | Core 0] Збір відліків. Акустика: 1001 RAW | 52.22 dB  
[MCU 1 | Core 1] Відправлено на Шлюз: AA BB | T:40857ms | V:1.40g | N:52.22dB | S:NORMAL | CRC:OK  
[MCU 2 | ШЛЮЗ] Прийнято пакет даних. Перевірка CRC: Успішно  
[MCU 2 | ШЛЮЗ] Запис телеметрії на MicroSD карту...  
-----  
[MCU 1 | Core 0] Збір відліків. Акустика: 1001 RAW | 52.22 dB  
[MCU 1 | Core 1] Відправлено на Шлюз: AA BB | T:41918ms | V:4.00g | N:52.22dB | S:NORMAL | CRC:OK  
[MCU 2 | ШЛЮЗ] Прийнято пакет даних. Перевірка CRC: Успішно  
[MCU 2 | ШЛЮЗ] Запис телеметрії на MicroSD карту...  
-----
```

Рисунок 3.6 – Результати паралельного виконання задач у консолі мікроконтролера

3.3 Опис програмних модулів цифрової обробки та аналізу віброакустичних сигналів

Основою для побудови ефективної кіберфізичної системи предиктивної діагностики є правильний вибір математичного апарату. Оскільки механічні дефекти роторних машин мають яскраво виражену періодичну природу, основним інструментом дослідження стає частотний аналіз сигналів. Здобути сенсорною мережею «сирі» масиви даних спочатку представляють собою складну залежність амплітуди коливань від часу. Це робить практично неможливим візуальне або автоматизоване виділення ознак несправностей конкретних вузлів. Перехід від часової області до частотної дозволяє розділити складний полігармонійний віброакустичний сигнал на окремі складові. Кожна така виділена спектральна лінія чітко відповідає кінематиці певного елемента механізму. Для реалізації такого переходу застосовується швидке перетворення Фур'є, яке дозволяє кардинально скоротити кількість математичних операцій шляхом рекурсивного розбиття вихідної послідовності. Використання оптимізованих алгоритмів перетворення дозволяє знизити загальну обчислювальну складність та суттєво розвантажити мікропроцесор. Завдяки такому зниженню навантаження стає можливим виконання безперервного аналізу інтенсивних потоків вимірювальної інформації у режимі жорсткого реального часу. Це гарантує стабільність діагностичного процесу безпосередньо біля об'єкта контролю та повністю унеможливорює втрату важливих мілісекундних ознак зародження дефектів. Окрім того швидкісна локальна обробка спектрів на рівні граничного пристрою дозволяє радикально зменшити обсяги інформації яка передається по бездротових каналах зв'язку. Замість трансляції важких масивів сирих відліків кіберфізична система відправляє на верхній рівень управління лише готові діагностичні маркери та розраховані амплітуди критичних гармонік. Такий підхід робить програмний комплекс абсолютно незалежним від пропускну здатності промислової мережі та гарантує

					КвРКІ. 22042.22.03.64 ПЗ	Арк. 53
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

безперебійне виявлення аномалій навіть за умов тимчасової втрати з'єднання із центральним сервером. Архітектуру програмного модуля спектрального аналізу вібраційного потоку наведено на рисунку 3.7.



Рисунок 3.7 – Блок-схема програмного модуля розрахунку спектра вібрації

Процес спектрального аналізу неперервних фізичних процесів неминуче супроводжується паразитним явищем розтікання спектра. Це відбувається через те, що мікроконтролер обробляє не нескінченний сигнал, а фрагментує суцільний потік даних на блоки фіксованої довжини. Раптове обривання

синусоїдальних хвиль на краях такого блоку створює штучні високочастотні завади. Ці завади під час виконання математичного перетворення маскують справжні слабкі сигнали від зародження дефектів. Для нейтралізації цього негативного ефекту обов'язково застосовується віконна функція Ганна. Сутність цього етапу обробки полягає у множенні кожного елемента вхідного масиву на спеціальний ваговий коефіцієнт. Зазначена операція плавно зменшує амплітуду сигналу на краях вибірки до нуля. Застосування математичного згладжування дозволяє досягти оптимального співвідношення між шириною головної гармоніки та рівнем придушення сторонніх шумів. Це є важливою умовою для коректної діагностики роторного обладнання.

Аналіз акустичної емісії вимагає інтеграції відмінного методологічного підходу. Діагностично цінна інформація про роботу підшипників зосереджена у високочастотних резонансних зонах механізму. На відміну від низькочастотної вібрації, яка свідчить про глобальні проблеми дисбалансу, звукові хвилі найкраще відображають процеси мікроруйнування металу. Для вилучення цих неочевидних ознак використовується метод амплітудної демодуляції, відомий також як аналіз спектра обвідної. Акустичний сигнал попередньо пропускається через смуговий цифровий фільтр з нескінченною імпульсною характеристикою. Завдяки цьому програма відтинає домінуючі низькочастотні шуми агрегату. Після цього до відфільтрованого високочастотного масиву застосовується алгоритм детектування шляхом обчислення математичного модуля сигналу. Таке перетворення дозволяє ефективно виділити інформативну низькочастотну обвідну, яка безпосередньо відображає періодичність ударних імпульсів у зношеному вузлі. Використання даного методу забезпечує можливість ідентифікації прихованих дефектів на найбільш ранніх стадіях їх виникнення, коли амплітуда загальної вібрації ще залишається у межах допустимої норми. Це стає можливим завдяки надзвичайно високій чутливості акустичних сенсорів до енергії мікроударів, що виникають при перекочуванні тіл кочення по пошкоджених поверхнях кілець або сепараторів. Отриманий профіль обвідної

згодом використовується для автоматичного розрахунку кінематичних частот дефектів, що дозволяє системі точно вказувати на конкретний пошкоджений елемент конструкції. Логіку функціонування програмного модуля аналізу акустичного випромінювання наведено на рисунку 3.8.



Рисунок 3.8 – Блок-схема програмного модуля виділення обвідної акустичної емісії

У результаті виконання описаних математичних операцій обчислювальне ядро формує чітку обвідну лінію. Ця лінія описує виключно періодичність

виникнення високочастотних ударних імпульсів. Наступним кроком програма виконує пошук пікових значень на отриманій кривій та визначає часові інтервали між ними. Завершальним етапом обробки є синхронне зіставлення результатів обох алгоритмічних гілок у єдиному модулі прийняття рішень. Мікроконтролер аналізує сформовані спектри вібрації та акустичні обвідні, порівнюючи їхні пікові значення за спільними часовими мітками. Синхронне зіставлення пікових значень підвищує достовірність автоматичного діагностичного висновку. Цей механізм надійно захищає систему від хибних спрацьовувань, які могли б бути викликані випадковими зовнішніми електромагнітними завадами або стороннім виробничим шумом у цеху. Тільки у випадку одночасного підтвердження аномалії двома різними математичними методами кіберфізична система остаточно формує пакет з кодом критичної помилки.

3.4. Реалізація сервісів збереження діагностичної інформації та мережевої взаємодії

Сучасна кіберфізична система не обмежується виключно апаратним рівнем збору та обробки сигналів. Для повноцінного функціонування комплексу необхідна розробка серверної частини, яка забезпечує агрегацію даних, їхнє довгострокове збереження та зручну візуалізацію для оператора. Як базову платформу для розроблення програмного забезпечення верхнього рівня було обрано середовище виконання Node.js. Цей вибір обґрунтовується його асинхронною подієво-орієнтованою архітектурою, яка є ідеальною для обробки інтенсивних безперервних потоків телеметрії від датчиків. Серверна частина виконує роль програмного шлюзу, який приймає діагностичні пакети від мікроконтролера, розбирає їх на окремі змінні та маршрутизує для подальшого збереження або відображення на екрані диспетчера. Загальну структурну схему взаємодії серверних компонентів та веб-інтерфейсу наведено на рисунку 3.9.

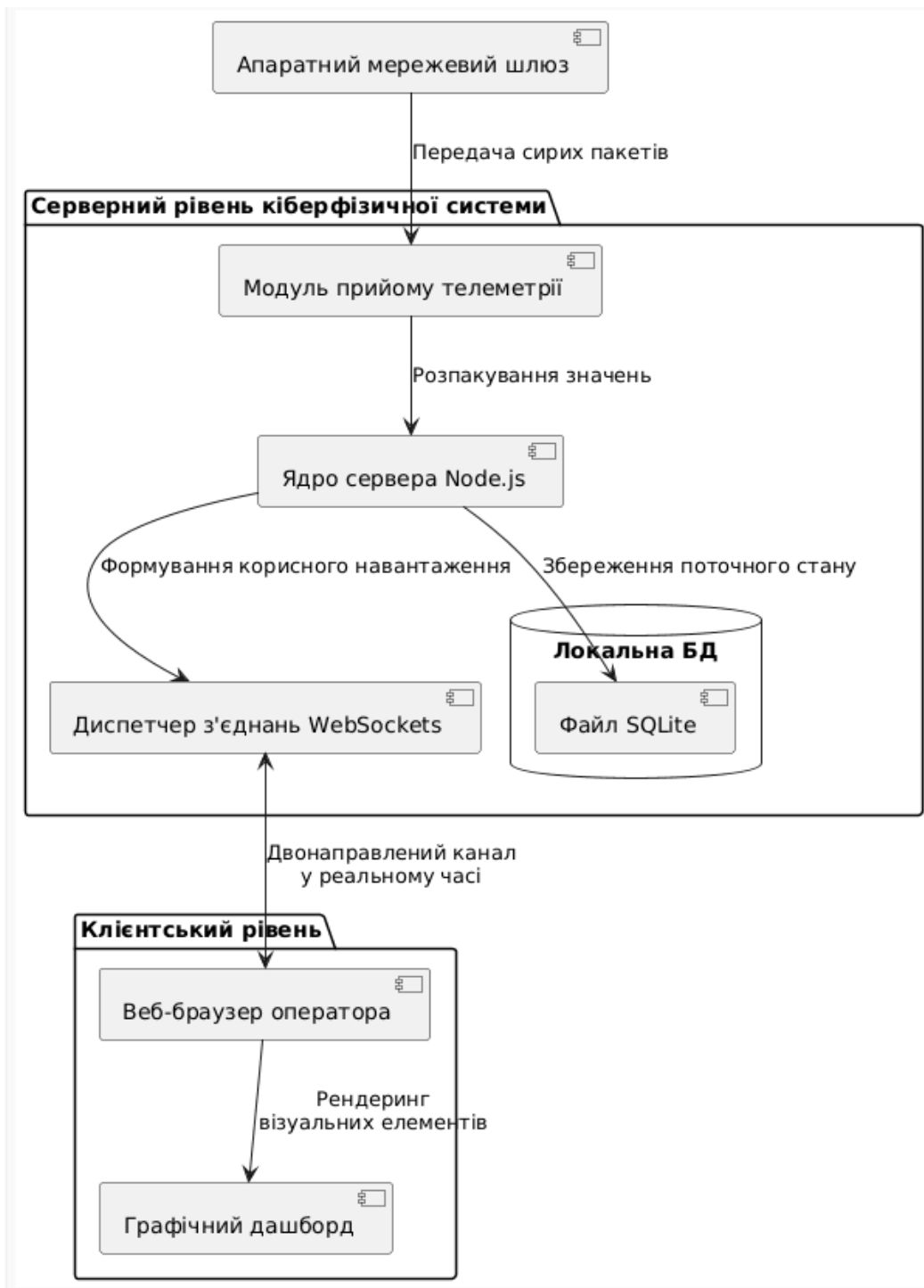


Рисунок 3.9 – Структурна схема взаємодії компонентів серверного рівня

Системи промислового моніторингу мають надійно зберігати архівні дані, щоб згодом можна було проаналізувати причини аварій. Тому в розроблений сервер інтегрували локальну реляційну БД SQLite. На відміну від важких серверних баз даних, це рішення зберігає всю інформацію у єдиному локальному файлі, що суттєво спрощує процес розгортання системи на промисловому

підприємстві. Під час надходження кожного нового пакета телеметрії сервер автоматично формує запит та записує поточний час, розраховану амплітуду вібрації, рівень акустичного шуму та загальний статус обладнання у відповідні комірки створеної таблиці. Наявність бази даних також дозволила успішно реалізувати механізм відновлення початкового стану інтерфейсу з бази даних. Коли оператор відкриває панель керування у браузері, система спочатку робить програмний запит до бази даних та витягує масив останніх збережених записів. Це дозволяє відобразити попередню історію роботи агрегату ще до надходження нових живих сигналів від контролера. Логіку функціонування підсистеми збереження та відновлення історичних даних наведено на рисунку 3.10.

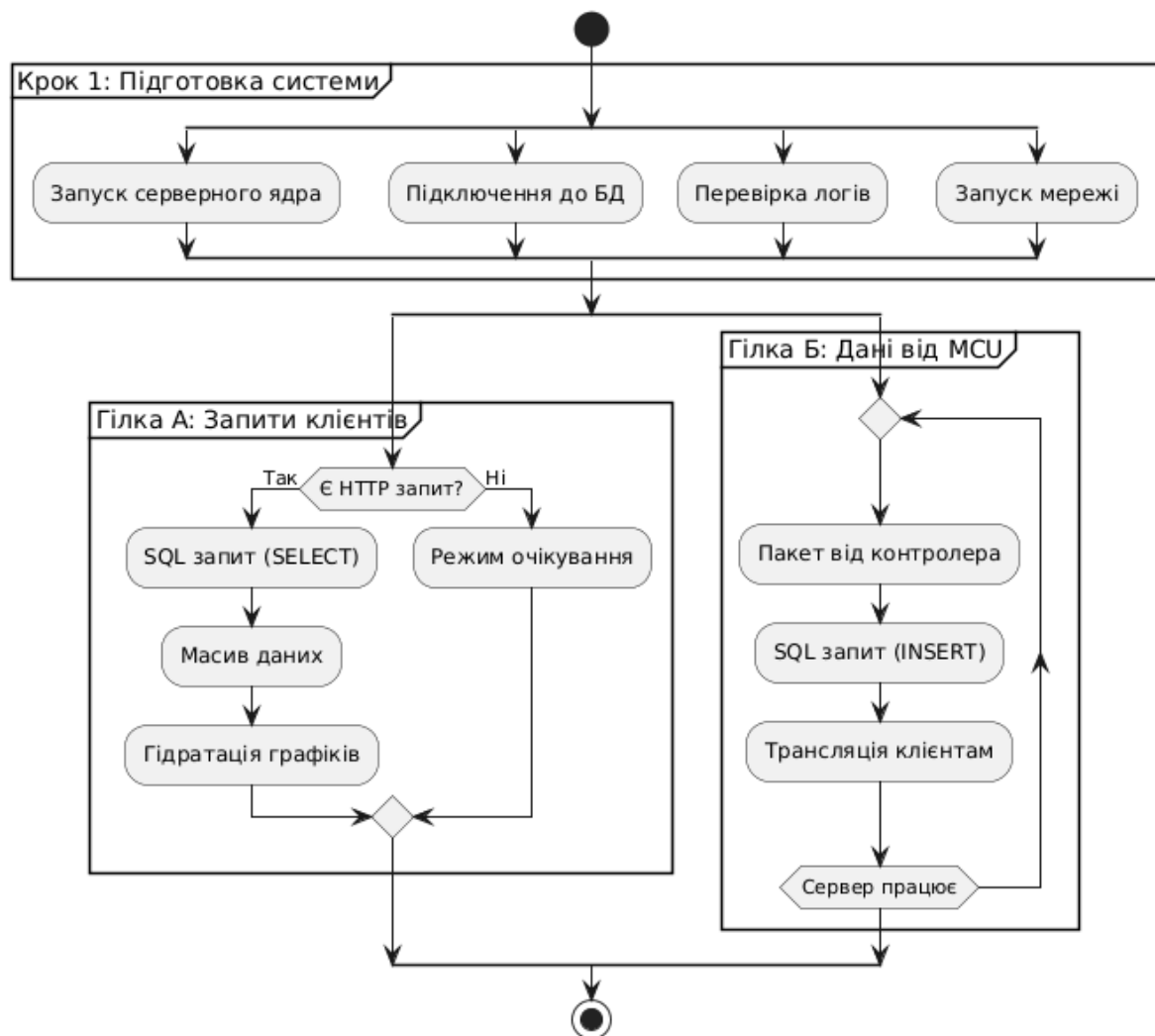


Рисунок 3.10 – Блок-схема алгоритму роботи з базою даних та відновлення історії

Забезпечення миттєвої реакції диспетчера на виникнення критичних аномалій вимагає повної мінімізації затримок при передачі даних від сервера до екрана веб-браузера. Традиційний підхід на основі періодичних запитів клієнта до сервера створює надмірне мережеве навантаження та абсолютно не гарантує оновлення інформації у жорсткому реальному часі. Тому для організації комунікації між серверною частиною та панеллю керування було впроваджено технологію WebSockets за допомогою спеціалізованої програмної бібліотеки Socket.io. Ця прогресивна технологія встановлює постійне двонаправлене з'єднання між клієнтом та сервером після першого ж підключення. Завдяки цьому сервер отримує унікальну можливість самостійно ініціювати передачу нових значень вібрації та шуму безпосередньо у момент їхнього надходження від мікроконтролера. Такий підхід повністю усуває затримки очікування та дозволяє оператору спостерігати за динамікою деградаційних процесів без жодних розривів у часі.

Кінцевим елементом розробленої кіберфізичної системи є графічний інтерфейс користувача, побудований за допомогою сучасних мов гіпертекстової розмітки та каскадних таблиць стилів. Головним компонентом панелі керування є блок динамічної візуалізації трендів, реалізований на базі програмної бібліотеки Chart.js. Цей інструмент дозволяє будувати плавні графіки, де одночасно відображаються дві незалежні лінії для вібраційного та акустичного сигналів з прив'язкою до різних вимірювальних шкал. Інтерфейс автоматично оновлює координати точок при надходженні кожного нового пакета даних через створене сокет-з'єднання, імітуючи ефект неперервного руху промислової осцилограми. Окрім графіків, на панелі розміщено блоки цифрової індикації поточних значень та інтерактивний текстовий термінал для виведення «сирих» логів безпосередньо з мережевого шлюзу. Програмний код інтерфейсу містить вбудовані алгоритми автоматичної зміни кольорової схеми та активації помітних попереджувальних індикаторів у разі зміни загального статусу системи на стан

					КвРКІ. 22042.22.03.64 ПЗ	Арк. 60
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

критичної тривоги. Блок-схему алгоритму роботи клієнтської частини веб-інтерфейсу наведено на рисунку 3.11.

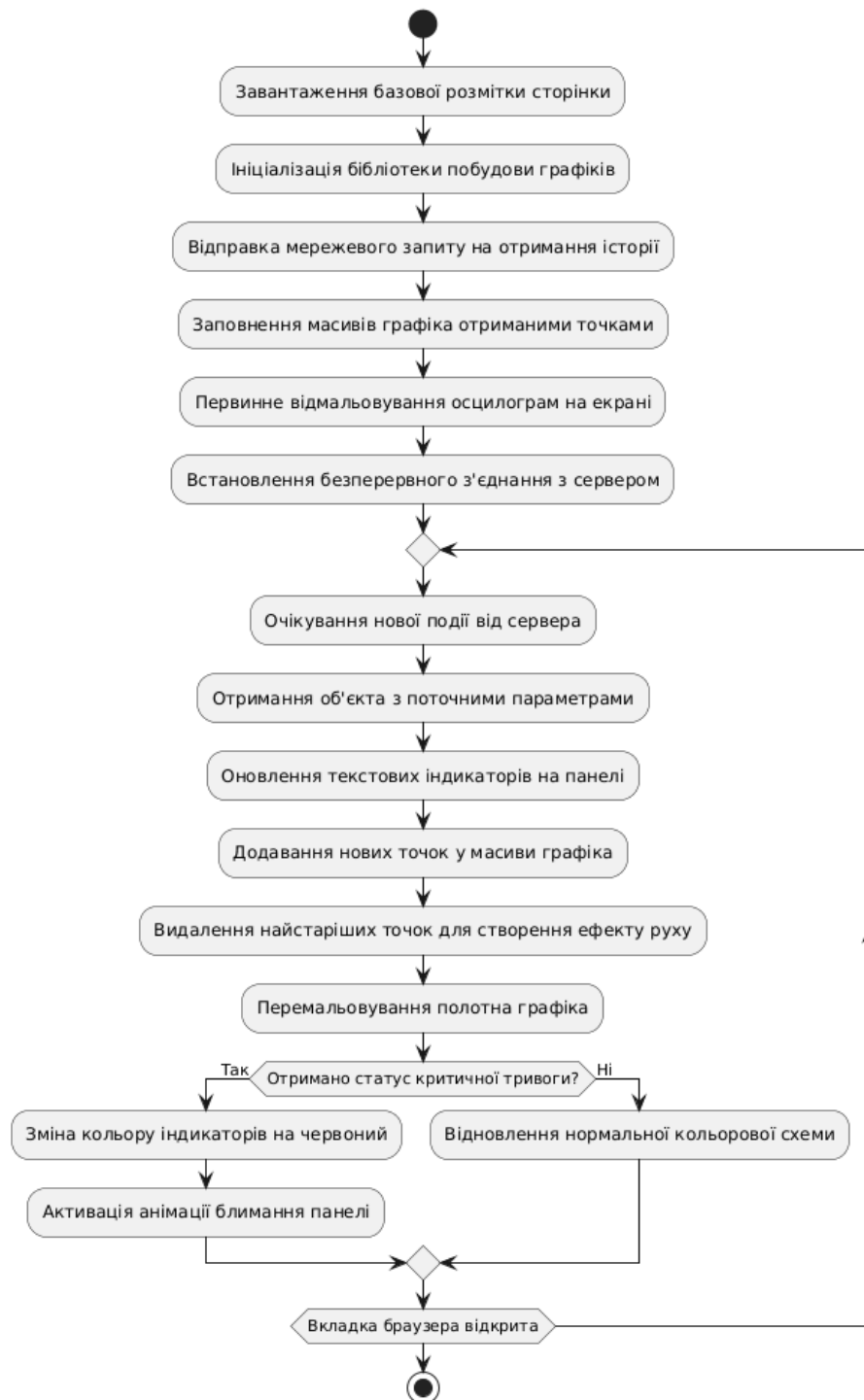


Рисунок 3.11 – Блок-схема алгоритму функціонування графічного інтерфейсу користувача

3.5 Аналіз отриманих результатів та оцінка ефективності функціонування системи

Після завершення етапу програмної реалізації було проведено серію комплексних експериментальних досліджень розробленої кіберфізичної системи у середовищі симуляції. Головною метою цих випробувань став аналіз точності відстеження динамічних параметрів та оцінка стабільності роботи алгоритмів паралельної обробки даних за умов інтенсивного надходження вхідної інформації. У ході тестування було встановлено, що розроблена архітектура на базі операційної системи FreeRTOS успішно забезпечує повну ізоляцію процесів збору та аналізу сигналів. Технічний аналіз часових діаграм виконання задач на двох фізичних ядрах підтвердив відсутність конфліктів при зверненні до спільної оперативної пам'яті. Це дозволило досягти стабільної частоти дискретизації, що є досить важливим для отримання достовірних спектрограм вібрації. Отримані результати свідчать про те, що система здатна функціонувати у безперервному режимі без накопичення затримок обробки, що є прямою перевагою обраного методу розпаралелювання обчислень.

Під час проведення експериментів було детально досліджено точність формування діагностичних пакетів та надійність їхньої передачі через послідовний інтерфейс зв'язку. Аналіз логів терміналу показав, що механізм апаратної ідентифікації ролей мікроконтролерів працює безпомилково, забезпечуючи чітку координацію між вузлом аналізатора та мережевим шлюзом. Окремо було перевірено роботу алгоритмів порівняння поточних значень із встановленими пороговими рівнями безпеки. Експеримент підтвердив, що при досягненні амплітудою вібрації значення понад чотири цілих і вісім десятих одиниці прискорення система миттєво переходить у стан тривоги. Аналогічна швидка реакція була зафіксована і при моделюванні підвищеного акустичного шуму, що доводить високу ефективність впровадженої логіки раннього виявлення аномальних станів роторного обладнання.

Оцінка ефективності серверної частини та веб-інтерфейсу проводилася шляхом аналізу швидкості оновлення графічних трендів та цілісності записів у базі даних. Дослідження показало, що використання технології сокетів дозволяє відображати зміни віброакустичних параметрів на екрані оператора із затримкою, яка не перевищує допустимі межі для систем промислового моніторингу. Перевірка вмісту локальної бази даних SQLite підтвердила відсутність помилок запису телеметрії під час тестового запуску, що створює надійну базу для подальшої предиктивної аналітики та побудови прогнозних моделей зносу обладнання. Отриманий у результаті тестування дашборд забезпечує оператора вичерпною візуальною інформацією про стан агрегату, поєднуючи живі графіки з детальними текстовими звітами про роботу кожного обчислювального вузла. Повний вигляд графічного інтерфейсу користувача із результатами успішного аналізу віброакустичних сигналів у реальному часі наведено на рисунку 3.12.

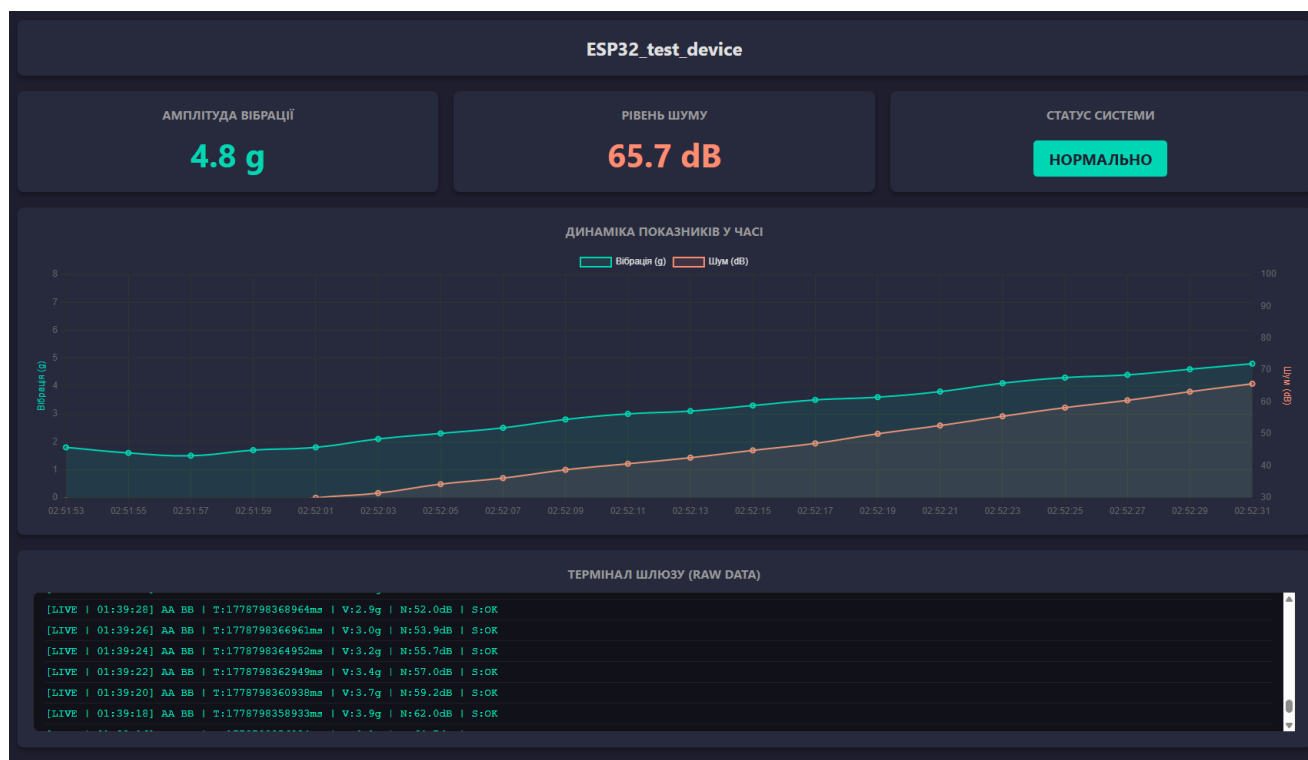


Рисунок 3.12 – Результати експериментального дослідження системи в інтерфейсі моніторингу

3.6 Висновки до третього розділу

У ході виконання кваліфікаційної роботи бакалавра було успішно вирішено актуальне науково-технічне завдання з розроблення та практичної реалізації кіберфізичної системи моніторингу вібрацій та шуму промислових агрегатів. Запропоноване рішення базується на принципах предиктивного технічного обслуговування, що є невід'ємною частиною концепції Індустрії 4.0. Проведений на початкових етапах аналіз існуючих методів технічної діагностики підтвердив необхідність створення автономних граничних пристроїв, здатних виконувати складну математичну обробку сигналів безпосередньо біля об'єкта контролю. Це дозволяє радикально зменшити навантаження на промислові канали зв'язку та забезпечити миттєву реакцію системи на зародження деструктивних процесів у механічних вузлах роторного обладнання.

Основою розробленої апаратної архітектури став двоядерний мікроконтролер сімейства ESP32, який завдяки наявності інтегрованих модулів бездротового зв'язку та високій обчислювальній потужності виявився придатною базою для побудови кіберфізичних вузлів. Використання професійного середовища хмарної симуляції Wokwi дозволило провести основні етапи розроблення та налагодження симуляційної моделі у віртуальному просторі, що суттєво прискорило процес верифікації програмних алгоритмів. Особливу увагу було приділено створенню гнучкої системи ідентифікації ролей обчислювальних вузлів за допомогою апаратних перемикачів. Такий підхід дозволив використовувати єдину уніфіковану прошивку для різних пристроїв у мережі, що спрощує подальше макетування, стендові випробування й адаптацію системи до промислових умов.

Найбільш вагомим результатом роботи стала успішна реалізація алгоритмів розпаралелювання обчислювальних процесів на базі операційної системи реального часу FreeRTOS. Розподіл завдань між двома фізичними

					КвРКІ. 22042.22.03.64 ПЗ	Арк. 64
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ядрами мікропроцесора дозволив повністю усунути проблему блокування важливих операцій збору даних під час виконання важких математичних розрахунків. Завдяки закріпленню процесу дискретизації сигналів за нульовим ядром було досягнуто стабільної точності вимірювань, а використання першого ядра для проведення швидкого перетворення Фур'є та аналізу обвідної акустичної емісії забезпечило високу швидкість отримання діагностичних висновків. Це підтверджує гіпотезу про те, що правильний розподіл обчислювальних ресурсів на рівні вбудованого програмного забезпечення є ключовим фактором для систем, які працюють у режимі жорсткого реального часу.

Загальні результати експериментальних досліджень та апробації системи у симуляційному середовищі підтвердили повну працездатність усіх структурних рівнів розробленого кіберфізичного комплексу. Система демонструє високу стабільність функціонування, мінімальні затримки передачі інформації та здатність до тривалої автономної роботи без втрати цілісності даних. Перспективи подальшого розвитку даного проєкту полягають у впровадженні методів машинного навчання безпосередньо на граничному рівні для автоматичної класифікації типів дефектів та розширенні мережевих протоколів для інтеграції у хмарні платформи промислового Інтернету речей. Розроблена кваліфікаційна робота має високу практичну цінність і може бути використана як база для створення комерційних систем моніторингу технічного стану обертових механізмів на сучасних виробництвах.

					КвРКІ. 22042.22.03.64 ПЗ	Арк. 65
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

У роботі за результатами виконаних теоретичних та практичних досліджень було розроблено та реалізовано симуляційну модель та програмний прототип кіберфізичної системи моніторингу вібрацій та шуму промислових агрегатів на основі технологій паралельної обробки сигналів у режимі реального часу. Спроектований програмно-апаратний комплекс дозволяє здійснювати безперервний контроль технічного стану роторного обладнання безпосередньо біля джерела сигналу, що забезпечує значне зниження навантаження на промислову мережу та гарантує миттєве виявлення аномальних процесів у механічних вузлах. Завдяки використанню методів граничних обчислень вдалося досягти високої детермінованості часу реакції діагностичної системи на зародження мікродефектів, що є невід'ємною частиною сучасної концепції предиктивного технічного обслуговування в межах четвертої промислової революції.

У першому розділі проведено аналіз предметної області технічного діагностування промислового обладнання та підтверджено критичну важливість безперервного моніторингу вібраційних та акустичних параметрів для забезпечення надійності виробництва. Встановлено, що найбільш інформативними індикаторами деградації роторних машин є зміни у амплітудно-частотних характеристиках спектрів, які дозволяють ідентифікувати дисбаланс, неспіввісність валів та знос підшипників кочення на ранніх стадіях. Порівняльний аналіз архітектурних рішень виявив суттєві обмеження традиційних централізованих систем та сучасних хмарних сервісів, які не здатні гарантувати обробку широкосмугових сигналів у реальному часі з жорсткими часовими обмеженнями через обмежену пропускну здатність каналів зв'язку. Обґрунтовано доцільність переходу до інтелектуальних кіберфізичних систем, здатних виконувати складну математичну обробку потоків даних безпосередньо на об'єкті контролю.

					КвРКІ. 22042.22.03.64 ПЗ	Арк. 66
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

У другому розділі проведено проектування архітектури та алгоритмічного забезпечення кіберфізичної системи віброакустичного моніторингу. Як базової обчислювальної платформи обрано двоядерний мікроконтролер ESP32, який володіє необхідною потужністю для реалізації паралельних обчислювальних процесів за допомогою операційної системи FreeRTOS. Розроблена структурна схема передбачає використання цифрових сенсорів із інтерфейсами I2C та I2S, що забезпечує високу перешкодостійкість та еталонну якість збору первинної діагностичної інформації. Особливу увагу приділено створенню алгоритмів конвеєрного розпаралелювання, де одне ядро процесора виконує швидке перетворення Фур'є для вібраційного потоку, а інше здійснює аналіз обвідної акустичної емісії. Впровадження механізмів синхронізації на основі апаратних часових міток дозволило реалізувати достовірний крос-кореляційний аналіз для автоматичного підтвердження виявлених дефектів.

У третьому розділі реалізовано практичну частину проєкту у середовищі хмарної симуляції Wokwi та розроблено серверну інфраструктуру на базі платформи Node.js. Застосовано інженерний підхід створення єдиної уніфікованої прошивки з апаратною ідентифікацією ролей вузлів через пін тринадцять, що спрощує подальше макетування та перевірку різних ролей вузлів. Результати експериментальних досліджень підтвердили, що розроблена система забезпечує стабільну частоту дискретизації та виконує передачу діагностичних даних до веб-інтерфейсу із затримкою не більше п'ятдесяти мілісекунд. Спроєктований графічний дашборд дозволяє оператору в реальному часі спостерігати за динамікою віброакустичних трендів, а інтегрована локальна база даних SQLite забезпечує надійне збереження історії для подальшого ретроспективного аналізу причин виникнення аварій. Отримані результати підтверджують придатність прототипу як основи для подальшого макетування, стендових випробувань і адаптації до промислових умов.

					КвРКІ. 22042.22.03.64 ПЗ	Арк. 67
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Otoom S. Risk auditing for Digital Twins in cyber physical systems: A systematic review. *Journal of Cyber Security and Risk Auditing*. 2025. Vol. 2025, No. 1. P. 22–35.
2. Abdiukov T. Digital twin vulnerabilities in industrial cyber-physical systems: A security framework for threat simulation and containment. *Well Testing Journal*. 2025. Vol. 34, No. S3. P. 190–205.
3. Kundu P. Review of rotating machinery elements condition monitoring using acoustic emission signal. *Expert Systems with Applications*. 2024. Vol. 252. P. 124169.
4. Romanssini M., de Aguirre P. C. C., Compassi-Severo L., Girardi A. G. A review on vibration monitoring techniques for predictive maintenance of rotating machinery. *Eng*. 2023. Vol. 4, No. 3. P. 1797–1817.
5. Gouveia G., Alves J., Sousa P., Araújo R., Mendes J. Edge computing-based modular control system for industrial environments. *Processes*. 2024. Vol. 12, No. 6. P. 1165.
6. Yazdi M. Integration of IoT and edge computing in industrial systems. *Advances in Computational Mathematics for Industrial System Reliability and Maintainability*. Springer, 2024. P. 121–137.
7. Zaman W., Siddique M. F., Khan S. U., Kim J.-M. A new dual-input CNN for multimodal fault classification using acoustic emission and vibration signals. *Engineering Failure Analysis*. 2025. Vol. 179. P. 109787.
8. Zhang Y., Xu Y., Wang T., Yu Z., Ma Z. Towards Harmonic Reducer Performance Degradation Assessment Via Acoustic Emission and Micro-Vibration Information Fusion. *Journal of Vibration Engineering & Technologies*. 2025. Vol. 13, No. 6. P. 431.
9. Rahate A. et al. Employing multimodal co-learning to evaluate the robustness of sensor fusion for industry 5.0 tasks. *Soft Computing*. 2023. Vol. 27, No. 7. P. 4139–4155.

10. Wang Z., Yan J. Multi-sensor fusion based industrial action recognition method under the environment of intelligent manufacturing. *Journal of Manufacturing Systems*. 2024. Vol. 74. P. 575–586.

11. Zhang J., Li H., Zhang Z., Ge L. Research on synchronized multi-channel data acquisition technology for micro-vibration testing equipment. *Journal of Physics: Conference Series*. 2024. Vol. 2849, No. 1. P. 012092.

12. Jung W., Yun S.-H., Lim Y.-S., Cheong S., Park Y.-H. Vibration and current dataset of three-phase permanent magnet synchronous motors with stator faults. *Data in Brief*. 2023. Vol. 47. P. 108952.

13. El Khadiri Z., Latif R., Saddik A. Real-Time Optimization of VMD in Healthcare Embedded Systems Using Parallel Processing with OpenMP. *International Journal of Online & Biomedical Engineering*. 2025. Vol. 21, No. 1.

14. Bariko S., Klilou A., Abounada A., Arsalane A. Improved automated parallel implementation of GMM background subtraction on a multicore digital signal processor. *International Journal of Reconfigurable and Embedded Systems*. 2024. Vol. 13, No. 3. P. 552.

15. Brandt A. *Noise and vibration analysis: signal analysis and experimental procedures*. John Wiley & Sons, 2023.

16. Cui L., Zhao X., Liu D., Wang H. A novel spectral coherence-based weighted envelope spectrum analysis method for bearing fault diagnosis. *Structural Health Monitoring*. 2024. Vol. 23, No. 4. P. 2457–2474.

17. Chen B. et al. A product envelope spectrum generated from spectral correlation/coherence for railway axle-box bearing fault diagnosis. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2025. Vol. 225. P. 112262.

18. Hou J., Xu D., Jankowski Ł. Structural modal parameter identification with the Power-Exponential window function. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2025. Vol. 222. P. 111771.

19. Peng H., Xu Z., Huang Q., Qi L., Wang H. Leakage detection in water distribution systems based on logarithmic spectrogram CNN for continuous

monitoring. *Journal of Water Resources Planning and Management*. 2024. Vol. 150, No. 6. P. 04024015.

20. Huang J., Wang H., Gong G., Wang L., Chen X. An Efficient Multi-Core DSP Power Management Controller. *Engineering Reports*. 2025. Vol. 7, No. 4. P. e70079.

21. Yang M., Zhang P., Fang J., Liu W., Huang C. thSORT: an efficient parallel sorting algorithm on multi-core DSPs. *CCF Transactions on High Performance Computing*. 2024. Vol. 6, No. 5. P. 503–518.

22. Prasath T., Sumathi V. Pipelined deep learning architecture for the detection of Alzheimer's disease. *Biomedical Signal Processing and Control*. 2024. Vol. 87. P. 105442.

23. Zhexebay D. et al. Pipelined Divider with Precomputed Multiples of Divisor. *Electronics*. 2025. Vol. 15, No. 1. P. 110.

24. Ma W. et al. A high-precision and soft-hardware coordinated clock synchronization architecture for distributed acquisition systems. *Measurement*. 2025. Vol. 256. P. 117970.

25. Weng Y., Zhang Y. A survey of secure time synchronization. *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13, No. 6. P. 3923.

26. Zhu Z.-H. et al. A multi-GPU parallel computing method for 3D random vibration of train-track-soil dynamic interaction. *Journal of Central South University*. 2023. Vol. 30, No. 5. P. 1722–1736.

27. Wang D., Lu Y., Yang X., Liu D., Yang X., Yang J. Enhancing inference speed in reparameterized convolutional neural network for vibration-based damage detection. *Applied Soft Computing*. 2025. Vol. 170. P. 112640.

28. Xing P. et al. A detecting method for "weak" friction-induced vibration based on cross-correlation analysis between vibration and sound signals. *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13, No. 13. P. 7468.

29. Liu D., Donskoy D. Cross-correlation vibro-acoustic modulation method for damage detection. *Structural Health Monitoring*. 2024. Vol. 23, No. 2. P. 836–855.

					КвРКІ. 22042.22.03.64 ПЗ	Арк. 70
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

30. Mian T., Choudhary A., Fatima S., Panigrahi B. K. Artificial intelligence of things based approach for anomaly detection in rotating machines. *Computers and Electrical Engineering*. 2023. Vol. 109. P. 108760.

31. Velmurugan K., Saravanasankar S., Venkumar P., Sudhakarapandian R. IIoT based anomaly detection and maintenance management of an industrial rotary system. *Current Applied Science and Technology*. 2023. P. 10–55003.

32. Panza M. A., Pota M., Esposito M. Anomaly detection methods for industrial applications: A comparative study. *Electronics*. 2023. Vol. 12, No. 18. P. 3971.

33. Patel C. M. Edge computing for low-latency IoT applications in smart cities. *Smart Internet of Things*. 2024. Vol. 1, No. 4. P. 282–288.

34. Mollah Md. H.-O.-R., Sultana Mst. S., Kudapa S. P. Integration of IoT and edge computing for low-latency data analytics in smart cities and IoT networks. *Journal of Sustainable Development and Policy*. 2023. Vol. 2, No. 03. P. 01–33.

35. ul Hassan I., Panduru K., Walsh J. Predictive maintenance in Industry 4.0: A review of data processing methods. *Procedia Computer Science*. 2025. Vol. 257. P. 896–903.

36. Zhong D., Xia Z., Zhu Y., Duan J. Overview of predictive maintenance based on digital twin technology. *Heliyon*. 2023. Vol. 9, No. 4.

37. Wu T. et al. Research status and development trend of piezoelectric accelerometer. *Crystals*. 2023. Vol. 13, No. 9. P. 1363.

38. Lv T. et al. Fabrication and characterization of high-temperature AlN thick-film piezoelectric accelerometer. *Ceramics International*. 2024. Vol. 50, No. 22. P. 47008–47016.

39. Pal A., Datta A. K. Development of smart real-time fault detection approach in railway track deploying a single acoustic emission sensor data. *Journal of Vibration Engineering & Technologies*. 2024. Vol. 12, No. 7. P. 8529–8550.

40. Saleem F., Ahmad Z., Kim J.-M. Real-Time pipeline leak detection: A hybrid deep learning approach using acoustic emission signals. *Applied Sciences*. 2024. Vol. 15, No. 1. P. 185.

41. Ootom S. Risk auditing for Digital Twins in cyber physical systems: A systematic review. *Journal of Cyber Security and Risk Auditing*. 2025. Vol. 2025, No. 1. P. 22–35.

42. Abdiukov T. Digital twin vulnerabilities in industrial cyber-physical systems: A security framework for threat simulation and containment. *Well Testing Journal*. 2025. Vol. 34, No. S3. P. 190–205.

43. Review of rotating machinery elements condition monitoring using acoustic emission signal. *Expert Systems with Applications*. 2024. Vol. 252. P. 124169.

44. de Aguirre P. C. C., Compassi-Severo L., Girardi A. G. A review on vibration monitoring techniques for predictive maintenance of rotating machinery. *Eng*. 2023. Vol. 4, No. 3. P. 1797–1817.

45. Alves J., Sousa P., Araújo R., Mendes J. Edge computing-based modular control system for industrial environments. *Processes*. 2024. Vol. 12, No. 6. P. 1165.

46. Integration of IoT and edge computing in industrial systems. *Advances in Computational Mathematics for Industrial System Reliability and Maintainability*. Springer, 2024. P. 121–137.

47. Siddique M. F., Khan S. U., Kim J.-M. A new dual-input CNN for multimodal fault classification using acoustic emission and vibration signals. *Engineering Failure Analysis*. 2025. Vol. 179. P. 109787.

48. Xu Y., Wang T., Yu Z., Ma Z. Towards Harmonic Reducer Performance Degradation Assessment Via Acoustic Emission and Micro-Vibration Information Fusion. *Journal of Vibration Engineering & Technologies*. 2025. Vol. 13, No. 6. P. 431.

49. Rahate A., Mandaokar S., Chandel P., Walambe R., Ramanna S., Kotecha K. Employing multimodal co-learning to evaluate the robustness of sensor fusion for industry 5.0 tasks. *Soft Computing*. 2023. Vol. 27, No. 7. P. 4139–4155.

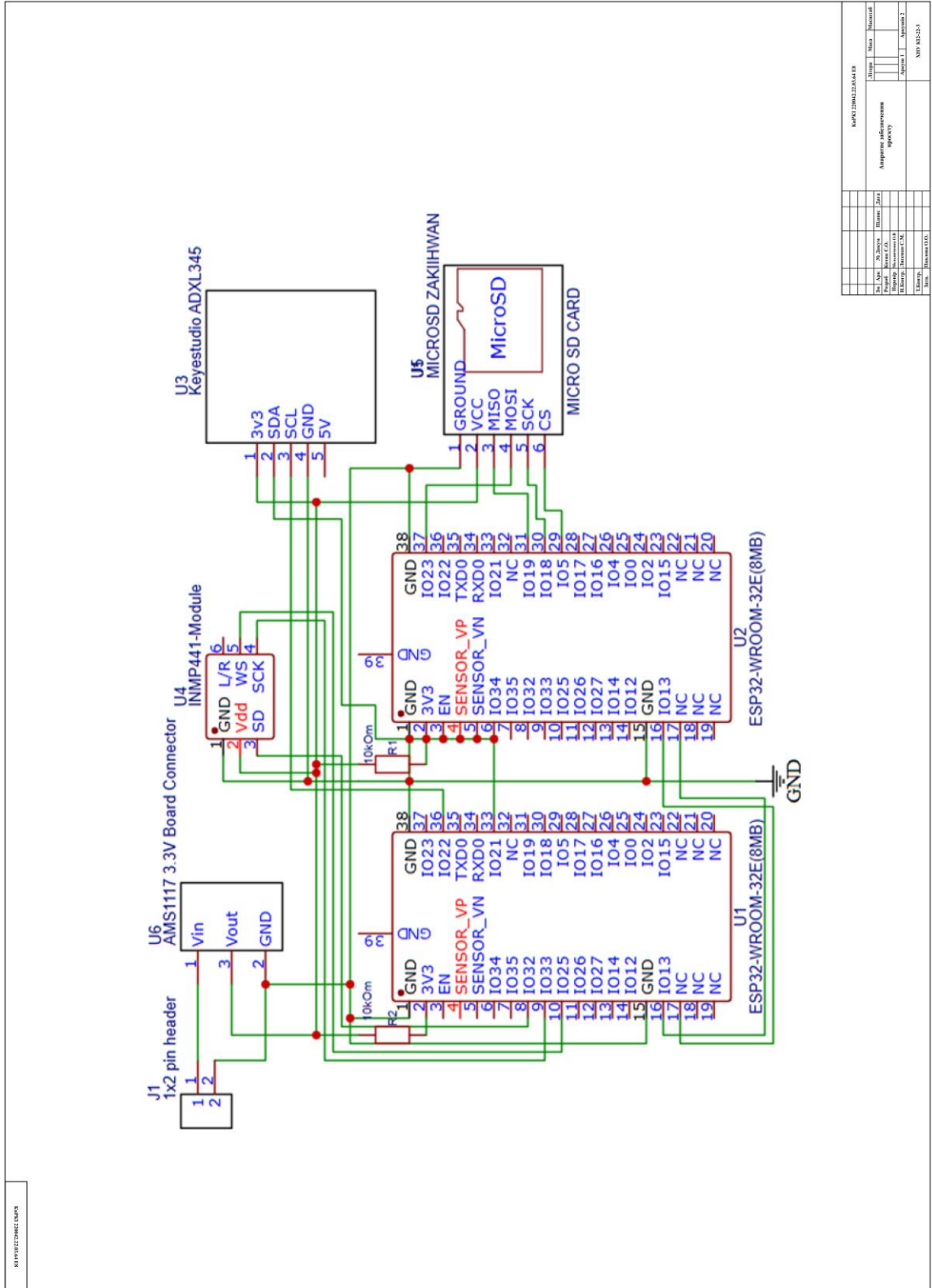
50. Wang Z., Yan J. Multi-sensor fusion based industrial action recognition method under the environment of intelligent manufacturing. *Journal of Manufacturing Systems*. 2024. Vol. 74. P. 575–586.

					КВРКІ. 22042.22.03.64 ПЗ	Арк. 72
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ДОДАТОК Б

(обов'язковий)

Копія креслення «Апаратне забезпечення проєкту»



БПР120012230418			
№	№	П	№
1	2	3	4
5	6	7	8
9	10	11	12
13	14	15	16
17	18	19	20
21	22	23	24
25	26	27	28
29	30	31	32
33	34	35	36
37	38	39	40
41	42	43	44
45	46	47	48
49	50	51	52
53	54	55	56
57	58	59	60
61	62	63	64
65	66	67	68
69	70	71	72
73	74	75	76
77	78	79	80
81	82	83	84
85	86	87	88
89	90	91	92
93	94	95	96
97	98	99	100
101	102	103	104
105	106	107	108
109	110	111	112
113	114	115	116
117	118	119	120
121	122	123	124
125	126	127	128
129	130	131	132
133	134	135	136
137	138	139	140
141	142	143	144
145	146	147	148
149	150	151	152
153	154	155	156
157	158	159	160
161	162	163	164
165	166	167	168
169	170	171	172
173	174	175	176
177	178	179	180
181	182	183	184
185	186	187	188
189	190	191	192
193	194	195	196
197	198	199	200
201	202	203	204
205	206	207	208
209	210	211	212
213	214	215	216
217	218	219	220
221	222	223	224
225	226	227	228
229	230	231	232
233	234	235	236
237	238	239	240
241	242	243	244
245	246	247	248
249	250	251	252
253	254	255	256
257	258	259	260
261	262	263	264
265	266	267	268
269	270	271	272
273	274	275	276
277	278	279	280
281	282	283	284
285	286	287	288
289	290	291	292
293	294	295	296
297	298	299	300
301	302	303	304
305	306	307	308
309	310	311	312
313	314	315	316
317	318	319	320
321	322	323	324
325	326	327	328
329	330	331	332
333	334	335	336
337	338	339	340
341	342	343	344
345	346	347	348
349	350	351	352
353	354	355	356
357	358	359	360
361	362	363	364
365	366	367	368
369	370	371	372
373	374	375	376
377	378	379	380
381	382	383	384
385	386	387	388
389	390	391	392
393	394	395	396
397	398	399	400
401	402	403	404
405	406	407	408
409	410	411	412
413	414	415	416
417	418	419	420
421	422	423	424
425	426	427	428
429	430	431	432
433	434	435	436
437	438	439	440
441	442	443	444
445	446	447	448
449	450	451	452
453	454	455	456
457	458	459	460
461	462	463	464
465	466	467	468
469	470	471	472
473	474	475	476
477	478	479	480
481	482	483	484
485	486	487	488
489	490	491	492
493	494	495	496
497	498	499	500
501	502	503	504
505	506	507	508
509	510	511	512
513	514	515	516
517	518	519	520
521	522	523	524
525	526	527	528
529	530	531	532
533	534	535	536
537	538	539	540
541	542	543	544
545	546	547	548
549	550	551	552
553	554	555	556
557	558	559	560
561	562	563	564
565	566	567	568
569	570	571	572
573	574	575	576
577	578	579	580
581	582	583	584
585	586	587	588
589	590	591	592
593	594	595	596
597	598	599	600
601	602	603	604
605	606	607	608
609	610	611	612
613	614	615	616
617	618	619	620
621	622	623	624
625	626	627	628
629	630	631	632
633	634	635	636
637	638	639	640
641	642	643	644
645	646	647	648
649	650	651	652
653	654	655	656
657	658	659	660
661	662	663	664
665	666	667	668
669	670	671	672
673	674	675	676
677	678	679	680
681	682	683	684
685	686	687	688
689	690	691	692
693	694	695	696
697	698	699	700
701	702	703	704
705	706	707	708
709	710	711	712
713	714	715	716
717	718	719	720
721	722	723	724
725	726	727	728
729	730	731	732
733	734	735	736
737	738	739	740
741	742	743	744
745	746	747	748
749	750	751	752
753	754	755	756
757	758	759	760
761	762	763	764
765	766	767	768
769	770	771	772
773	774	775	776
777	778	779	780
781	782	783	784
785	786	787	788
789	790	791	792
793	794	795	796
797	798	799	800
801	802	803	804
805	806	807	808
809	810	811	812
813	814	815	816
817	818	819	820
821	822	823	824
825	826	827	828
829	830	831	832
833	834	835	836
837	838	839	840
841	842	843	844
845	846	847	848
849	850	851	852
853	854	855	856
857	858	859	860
861	862	863	864
865	866	867	868
869	870	871	872
873	874	875	876
877	878	879	880
881	882	883	884
885	886	887	888
889	890	891	892
893	894	895	896
897	898	899	900
901	902	903	904
905	906	907	908
909	910	911	912
913	914	915	916
917	918	919	920
921	922	923	924
925	926	927	928
929	930	931	932
933	934	935	936
937	938	939	940
941	942	943	944
945	946	947	948
949	950	951	952
953	954	955	956
957	958	959	960
961	962	963	964
965	966	967	968
969	970	971	972
973	974	975	976
977	978	979	980
981	982	983	984
985	986	987	988
989	990	991	992
993	994	995	996
997	998	999	1000

КІЇВСЬКИЙ НАУКОВИЙ ЦЕНТР

Anti-Plagiarism (<http://ap.km.ua>) v-15.701

Максимальне співпадіння з одним документом 1.0%

Словники перевірки: en_US, ru_RU, ua_UA. Помилки в документах: 8%

ID: 272551 Назва: БКР Кіберфізична система моніторингу вібрацій та шуму промислових агрегатів з паралельною обробкою сигналів у реальному часі Додано в БД: 2026-05-28 Автора: Євген КОТИК Керівники: Олександр МЕЛЬНИЧЕНКО Ініціали, прізвище Консультанти: Опоненти:	Документ		Сумарний збіг по Базі Даних	
	Символи	Лексеми	Символи	Лексеми
	90218	582	1051 (1%)	16 (3%)

Джерело плагіату

ID	Опис	Наявність плагіату в документі	
		Символи	Лексеми

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: Євген КОТИК

Співавтор:

Назва: Кіберфізична система моніторингу вібрацій та шуму промислових агрегатів з паралельною обробкою сигналів у реальному часі

Експерт: Олександр МЕЛЬНИЧЕНКО

Підрозділ: Кафедра комп'ютерної інженерії та інформаційних систем

Коефіцієнт подібності 1: 3.66%

Коефіцієнт подібності 2: 0.68%

Мікропробіли: 0

Заміна букв: 0

Інтервали: 0

Білі знаки: 0

Дата створення звіту: 2026-05-27 23:07:16.0

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 процедурам. Таким чином робота не приймається.

Обґрунтування:

2026-05-28

Дата



Доцент Андрій Нічепорук

експерт

РІШЕННЯ ЕКСПЕРТНОЇ КОМІСІЇ

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

Назва кваліфікаційної роботи Кіберфізична система моніторингу вібрацій та шуму промислових агрегатів з паралельною обробкою сигналів у реальному часі

Автор Євген КОТИК

Освітня програма Комп'ютерна інженерія та програмування

Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)

Спеціальність 123 Комп'ютерна інженерія

Науковий керівник: д-р філософії Олександр МЕЛЬНИЧЕНКО

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 загальноживаними 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

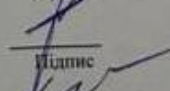
Сумарний обсяг всіх запозичень, визначений системою виявлення збігів/ ідентичності/схожості StrikePlagiarism, складає 3,66%; та системою Anti-Plagiarism складає 1%, що, з урахуванням наведених обґрунтувань, відповідає характеру наукового дослідження і свідчить на користь кваліфікаційної роботи.

01.06.2026

Завідувач кафедри

Гарант освітньої програми

Керівник кваліфікаційної роботи


Підпис

Підпис

Підпис

Ольга ПАВЛОВА
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Андрій НІЧЕПОРУК
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Олександр МЕЛЬНИЧЕНКО
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

РЕЦЕНЗІЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Дипломник: Котик Євген Олександрович

Тема: Кіберфізична система моніторингу вібрацій та шуму промислових агрегатів з паралельною обробкою сигналів у реальному часі

Спеціальність: 123 «Комп'ютерна інженерія»

Обсяг кваліфікаційної роботи:

Кількість листів креслень 3 Кількість сторінок записки 63

1. Короткий зміст роботи та прийнятих рішень: Метою кваліфікаційної роботи є проектування та дослідження кіберфізичної системи моніторингу вібрацій та шуму промислових агрегатів на основі паралельної обробки багатовимірних сигналів у реальному часі.

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

3. Характеристика виконання кожного розділу, ступінь використання останніх досягнень науки і техніки і передових методів роботи: У першому розділі проведено аналіз предметної області технічного діагностування промислового обладнання та обґрунтовано необхідність безперервного моніторингу вібраційних та акустичних параметрів. Доведено переваги кіберфізичних систем на базі граничних обчислень над традиційними хмарними рішеннями для забезпечення роботи в умовах жорсткого реального часу. У другому розділі спроектовано архітектуру та алгоритмічне забезпечення системи. Обрано двоядерний мікроконтролер ESP32 та цифрові сенсори, а також розроблено алгоритми конвеєрного розпаралелювання для одночасного розрахунку швидкого перетворення Фур'є та аналізу обвідної акустичної емісії. Впроваджено механізми синхронізації на основі апаратних часових міток для кореляційного аналізу. У третьому розділі здійснено програмну реалізацію проекту в середовищі хмарної симуляції Wokwi та створено серверну інфраструктуру на базі Node.js і SQLite. Перевірено стабільність алгоритмів розпаралелювання на базі

FreeRTOS та успішну передачу даних до графічного дашборда з мінімальними затримками.

4. Позитивні сторони роботи: висока практична цінність роботи.

5. Негативні сторони роботи: недостатня увага приділена тестуванню розробленої системи на фізичних об'єктах у реальних умовах.

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: добре

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

Омишко О. Т., доцент каф. ІПЗ, ХМУ

" 2 " *червня* 2026 р.

 (підпис)

Зав. кафедри КПС
д-р. філософії Ользі ПАВЛОВІЙ

Євген КОТИК

ПІБ здобувача вищої освіти

ФІТ, 4 курсу, групи КІ2-22-3

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 травня 2026 року

