

І. Б. ТУРКІН, А. В. ЗЕЛЕНКОВ, В. А. ЛЕЗНОВСЬКИЙ, А. А. НАБІЗАДЕ*Національний аерокосмічний університет імені М. Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна***МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ВІБРАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОМИСЛОВОГО
ОБЛАДНАННЯ В ЧАСТОТНІЙ ТА ЧАСОВІЙ ОБЛАСТЯХ**

В статті пропонується апаратно-програмні рішення та метод обробки даних для вібродіагностики промислового обладнання, який використовує дискретне перетворення Фур'є та дисперсію Аллана для підвищення точності та стабільності процесів вимірювання та обробки результатів. Об'єкт дослідження – використання методів вібраційної діагностики для реалізації концепції обслуговування промислового обладнання на основі відстеження його поточного та прогнозування майбутнього стану. Предметом дослідження є апаратно-програмні рішення системи вібраційної діагностики та методи обробки результатів вимірювань. Мета роботи – розробка нового ресурсозберігаючого IoT-орієнтованого бездротового рішення для вібраційної діагностики, де для вимірювання параметрів вібрації використовується контактний метод та MEMS-акселерометри, та перевірка ефективності нових методів та алгоритмів обробки експериментальних даних. Завдання: обґрунтувати необхідність пошуку нових апаратно-програмних рішень та методів обробки отриманих результатів для реалізації концепції обслуговування на основі відстеження вібраційних показників технічного обладнання; надати основні апаратно-програмні рішення для реалізації хмарної платформи вібродіагностики; розробити методи обробки результатів; перевірити розроблені методи та алгоритми методами математичного моделювання та в натурному експерименті; порівняти ефективності власного та конкурентних рішень; зробити висновки та сформулювати план подальших досліджень. Висновки. Доведено, що поєднання відомих методів аналізу в часовій і частотній областях з багаторівневою обробкою дає кращі результати, ніж у аналогів. Розроблені апаратно-програмні засоби та метод обробки результатів вимірювань ефективно реалізують контактний метод вимірювання вібрації, що забезпечує можливість відстеження стану технічного обладнання. Розроблене обладнання для калібрування датчиків віброприскорення дозволяє зменшити похибки акселерометра. Подальшими напрямками розвитку роботи є пошук оптимального розподілу обчислень по рівнях IoT, зменшення обчислювальної складності алгоритмів, збільшення часу безперервної автономної роботи мікроконтролера нижнього рівня, створення мікросервісів для аналізу часових рядів, дослідження залежності технічного стану обладнання від розрахованого відхилення Аллана.

Ключові слова: Інтернет речей; цифрова платформа; вібраційна діагностика; калібрування; акселерометр; промислове обладнання; дисперсія Аллана.

Введення

Сучасні інформаційні технології, особливо штучний інтелект та інтернет речей (IoT) суттєво змінили світ. Штучний інтелект (ШІ) в сучасному стані здатен підтримувати прийняття управлінських рішень, покращуючи прогнозування та моделювання складних процесів. Інтернет речей (IoT) покращує та прискорює отримання, передачу та первинну обробку інформації [1]. Збільшення темпу прийняття управлінських рішень на основі широкого використання розглянутих технологій відповідає сучасним тенденціям розвитку економічних систем [2, 3]. Як зазначають автори в [4], прогрес цифрових технологій є рушієм інновацій у багатьох сучасних компаніях. Посилення конкурентного тиску змушує компанії впроваджувати інновації за допомогою цифрових платформ. У

статті [5] підкреслюється необхідність досліджень використання цифрових платформ у галузі обслуговування обладнання та наскрізної автоматизації.

Концепція технічного обслуговування промислового обладнання на основі стану (Condition-based maintenance, CBM) [6] дозволяє покращити надійність обладнання та відповідно довіру до бізнес-процесів, що використовують це обладнання. CBM дозволяє зменшити витрати часу та ресурсів на технічне обслуговування обладнання у порівнянні з підходом до обслуговування на основі попередньо розроблених планів. Економія має місце за рахунок того, що технічне обслуговування проводиться лише тоді, коли конкретні показники вказують на несправність обладнання або зниження його продуктивності. Основною проблемою застосування CBM є необхідність витрачати значні ресурси на впровадження

засобів моніторингу стану обладнання, які зазвичай включають такі неінвазивні методи, як візуальний огляд, вимірювання шуму, вібрації, температури й споживання електроенергії.

IoT та аналітика даних дозволяють компаніям впроваджувати технічне обслуговування на основі умов (CBM), тобто технічне обслуговування, засноване на моніторингу фактичного стану обладнання у режимі реальної експлуатації. У статті [7] розглянуто інтегровану структуру реалізації CBM, яка об'єднує технологічні, організаційні та пов'язані з користувачем елементи. Особливу увагу приділено дослідженню сучасних платформ інтернету речей з точки зору розробника та відомих модульних програмних рішень, а також методів співпраці між фахівцями з апаратного та програмного забезпечення. Реалізація принципів CBM може призвести до більш своєчасного та ефективного технічного обслуговування, скорочення часу простою в роботі та довшого терміну служби обладнання.

У статті [8] обслуговування на основі відстеження стану обладнання (CBM) і на основі прогнозування (Predictive-based Maintenance, PM) розглядаються як два ефективних та доповнюючих один одного методи управління технічним обслуговуванням: CBM відстежує поточний стан, а PM використовує результати CBM для прогнозування та планування обслуговування техніки.

Вібраційна діагностика є сучасним та ефективним методом оцінки стану обладнання, яке використовується у різних галузях економіки. В роботі [9] підкреслюється доцільність використання вібродіагностики обладнання у нафтовій промисловості. У статті [10] було проаналізовано вібраційні сигнали, зібрані в часовій області за допомогою вібраційного моніторингу, та виконано діагностику несправностей вітряної турбіни.

Параметри вібрації - це носії інформації стосовно багатьох аспектів стану механічної системи, які дозволяють визначати її технічний стан під час роботи [11].

Вібраційне прискорення – це характеристика вібрації, безпосередньо пов'язана із силою, яка викликає вібрацію. Віброприскорення характеризує динаміку силової взаємодії елементів всередині блоку, що викликає цю вібрацію. Використання вібраційного прискорення є доцільним, оскільки його можна безпосередньо виміряти за допомогою акселерометра без необхідності будь-якого перетворення. Недоліком є відсутність практичних розробок щодо норм і порогових рівнів, загальноприйнятих фізичних чи спектральних трактувань особливостей прояву віброприскорення.

Вказаних недоліків віброприскорення позбав-

лена вібраційна швидкість. Віброшвидкість – це швидкість переміщення контрольованої точки апаратури під час її прецесії вздовж осі вимірювання. Стандарт ISO 20816-1:2016 встановлює загальні умови та процедури для вимірювання та оцінки вібрації, використовуючи вимірювання середньоквадратичного значення (RMS) швидкості вібрації. Фізична сутність параметра RMS віброшвидкості полягає в рівності енергетичного впливу на опори машини реального вібросигналу та фіктивної постійної, чисельно рівної за значенням RMS.

У роботі [12] запропоновано новий підхід для вимірювання стану вібрації двигуна за допомогою цифрового мікроакселерометра, де для зменшення випадкового шуму, використано фільтр Калмана (KMF).

Дослідженню економічно ефективних апаратних і програмних рішень для вібраційної діагностики з використанням мікроелектромеханічних систем (microelectromechanical systems, MEMS) присвячено роботи [13, 14], де робиться висновок, що для діагностики несправностей обладнання та прогнозування його стану доцільно використовувати універсальні цифрові платформи. Використання інтернету речей і наскрізної автоматизації для реалізації концепції CBM дозволяє зменшити витрати.

Вирішальну роль в системах CBM відіграють розумні датчики, які завжди мають надлишкову функціональність. Відповідно до стандарту IEEE 1451.0-2007 інтелектуальними називають датчики з набором функцій, що виходять за межі мінімально необхідних для вимірювань [15]. Цифрові інтерфейси й можливості самотестування спрощують інтеграцію цих датчиків з мережевим програмним забезпеченням.

Для вимірювання параметрів вібрації використовують акселерометри, калібрування яких виконує виробник після ретельного тестування, яке зазвичай охоплює вплив різних робочих умов, таких як температура навколишнього середовища та магнітні поля. У статті [16] пропонується метод компенсації впливів зміни температури на результати вимірювання ємнісних MEMS-акселерометрів за допомогою спеціального алгоритму, заснованому на використанні теплових параметрів акселерометрів. Компенсація температурних впливів досить ефективна, але недостатня для вирішення комплексної проблеми компенсації похибок акселерометра під час штатної роботи.

Для встановлення базової лінії під час вимірювання фактичного прискорення важливе значення має показник зміщення акселерометра в нерухомому стані. При цьому додаткові похибки вимірювань можуть бути зумовлені особливостями монтажу системи з акселерометром. Негативно впливати на результати вимірювання може механічна напруженість

в друкованій платі або особливості компаундів, використаних під час монтажу. Тому акселерометри зазвичай калібрують після зборки системи, щоб виключити ці помилки, як це рекомендовано в роботі [17].

Вимоги до датчиків вібрації та методів їх калібрування можна знайти в стандартах серії ISO 16063 [18]. Зазвичай калібрування акселерометра MEMS включає усереднення значень вимірювань за допомогою схеми калібрування, де система акселерометра розташована таким чином, щоб проекція сили гравітаційного поля на ось Z дорівнювала 1 g , а на осі X і $Y - 0\text{ g}$. Передбачається виконання додаткового калібрування після встановлення в певному місці шляхом порівняння результатів вимірювання з результатами еталонного акселерометра [19, 20].

Підходи, засновані на одночасному аналізі параметрів вібрації в часовій та частотній областях, відомі ще з часів стандарту [21], але сучасні публікації [22, 23] не пропонують поєднати в єдине ціле такі методи аналізу та можливості сучасних технологій IoT.

Відомі апаратно-програмні рішення для вібраційної діагностики мають наступні недоліки:

- застарілі датчики для вимірювання прискорення [24, 25];
- погана енергоефективність протоколів бездротового зв'язку між датчиком і сервером [25];
- застарілі та неефективні алгоритми обробки даних, які відповідають стандарту [21], але не є енергетично ощадливими, що скорочує тривалість автономної роботи [14].

У нашій попередній статті [26] розпочато дослідження використання платформно-орієнтованих технологій для вібродіагностики промислового обладнання, створення програмно-апаратних рішень для платформи IoT.

Метою дослідження є розробка нового ресурсозберігаючого IoT-орієнтованого бездротового рішення для вібраційної діагностики, де для вимірювання параметрів вібрації використовується контактний метод та MEMS-акселерометри відповідно стандарту [21] та перевірка ефективності запропонованих методів та алгоритмів обробки експериментальних даних.

Стаття побудована далі наступним чином:

- в підрозділах 1.1-1.3 представлено обладнання та програмні засоби, а саме хмарне рішення для реалізації цифрової платформи, модель бази даних, стендове обладнання;
- процедуру калібрування датчика та методи обробки результатів представлено в підрозділах 1.4-1.5;
- інформацію про аналоги та конкурентні рішення для подальшого порівняння надано в підрозділі 1.6;

- результати вимірювань та аналізу в частотній та часовій областях надано в розділі 2;

- обговорення отриманих результатів та їх порівняння з відомими конкурентними рішеннями сформульовано в розділі 3;

- зроблено висновки та сформульовано план подальших досліджень.

1. Засоби та методи вібраційної діагностики

1.1. Програмно-апаратна реалізація платформи IoT

Для оброблення результатів вимірювань та формування результатів діагностики використовується система з тривірневою архітектурою (рис. 1), яка забезпечує тривалу автономну роботу. Одним з основних критеріїв при розробці платформи було забезпечення високої енергоефективності, а також зниження витрат на установку та експлуатацію [6].

Архітектура системи складається з наступних рівнів:

1. Для вимірювання віброприскорення використовується автономний датчик, який базується на мікроконтролері STM32L476 і тривісному MEMS-акселерометрі IIS3DWB, оптимізованому для промислового вимірювання вібрації [27]. Ємнісний акселерометр IIS3DWB характеризується високою роздільною здатністю (16 біт) і перепрограмованим діапазоном вимірювань $\pm 2\text{ g}$, $\pm 4\text{ g}$, $\pm 8\text{ g}$ і $\pm 16\text{ g}$, разом з тим має низьке енергоспоживання. IIS3DWB має смугу пропускання від 0,05 до 6000 Гц, що дозволяє вловлювати вібрації з частотою до 1000 Гц. Акселерометр встановлюється на об'єкт моніторингу та підключається до мікроконтролера через послідовний периферійний інтерфейс (SPI). Результати вимірювання зчитуються побайтно у вигляді 16-бітних даних. Для автоматичної компенсації помилок акселерометр IIS3DWB зберігає значення калібрування у своїх регістрах OFFSET. Вміст кожного регістра OFFSET додається до значення виміряної проекції прискорення на відповідну ось, а отримані значення потім зберігаються у регістрах DATA. Датчики розраховані на період автономної роботи 6-12 місяців, реальна тривалість якого залежить від частоти вимірювань. Для передачі даних від датчиків до рівня концентратора використовується технологія цифрової бездротової передачі даних BLE (Bluetooth Low Energy), яка забезпечує низьке споживання енергії.

2. Рівень концентратора розгортається на пристрої за допомогою одноплатного мікрокомп'ютера BeagleBone® AI, який призначений для реалізації алгоритмів штучного інтелекту. На цей рівень поступа-

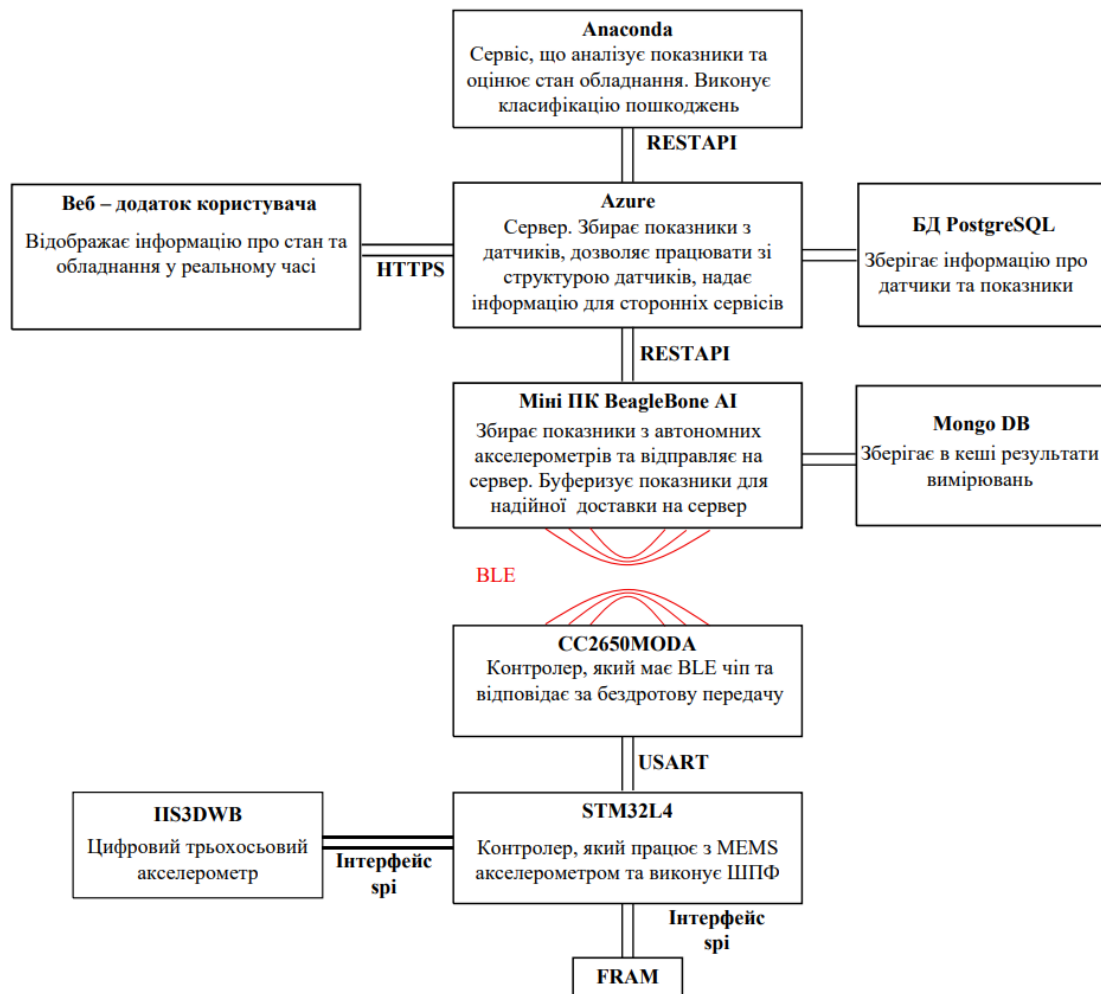


Рис. 1. Архітектура системи IoT для вібродіагностики

ють дані з рівня автономних датчиків, які згодом обробляються та передаються на рівень сервера. Попереднє оброблення результатів вимірювань на рівні концентратора значно знижує навантаження на сервер.

3. Серверний рівень дозволяє клієнтам і стороннім службам використовувати дані з датчиків. Сервер взаємодіє з рівнем концентратора та сторонніми програмами через API. Інфраструктуру для розміщення та керування програмним забезпеченням в хмарі забезпечує платформа Microsoft Azure IoT Suite [28]. Пакет Azure Internet of Things Suite – це комплексний сервіс, який використовує можливості Azure для організації з'єднань із пристроями. Він ефективно отримує та зберігає дані, виміряні пристроями та отримані через концентратор. Пакет має засоби для зберігання, оброблення, аналізу та візуалізації даних для прийняття обґрунтованих рішень на основі цих даних. Microsoft Azure IoT було обрано для впровадження, оскільки ця платформа дозволяє створити надійні та високопродуктивні рішення за прийнятних для стартапів бюджетних вимог на початковому етапі.

1.2. Модель бази даних

У цифровій платформі вібродіагностики промислового обладнання для тривалого зберігання даних на рівні серверу (третій рівень) використана СУБД PostgreSQL, яка має розширений набір функціональних можливостей, а саме багатоверсійний контроль, паралелізм, асинхронну реплікацію та вкладені транзакції. На рівні концентратора (другий рівень), який реалізовано на базі міні-ПК BeagleBone AI, використано NoSQL базу даних MongoDB для кешування даних, отриманих з рівня автономних датчиків.

ER-модель бази даних цифрової платформи (рис. 2) характеризує зв'язки між наступними сутностями: датчиками, пристроями IoT, до яких вони входять, і даними про результати вимірювань цими датчиками [6].

Сутності бази даних є основою шару бізнес-логіки та відповідно до стандарту IEEE 1451.0-2007 містять такі дані:

- AverageValue – середні значення результатів вимірювань датчиками, наприклад середня швидкість обертання;

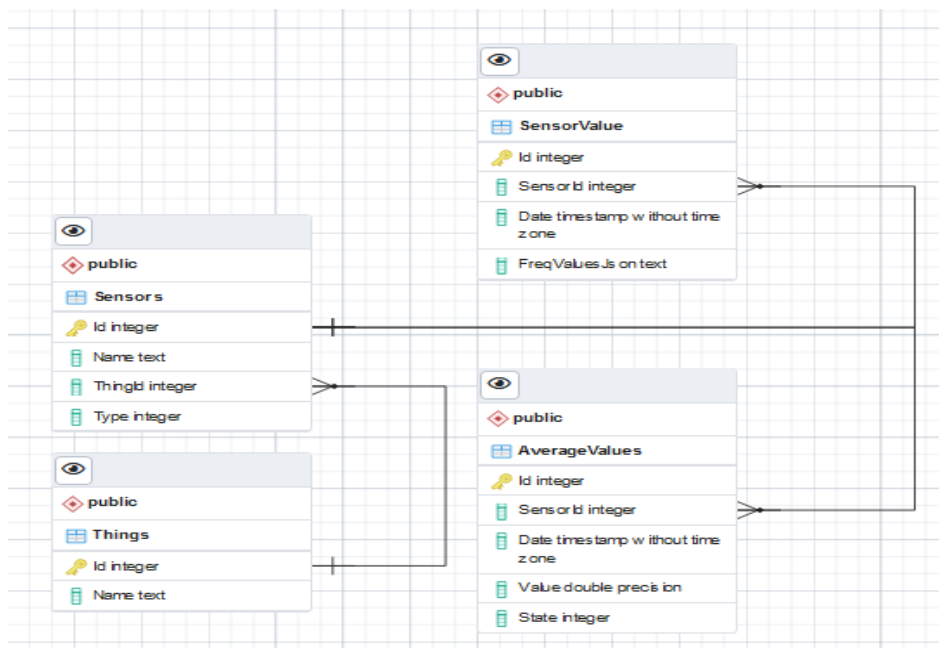


Рис. 2. ER-модель бази даних цифрової платформи

- Sensor – дані про датчики: ідентифікатор датчика, назва;
- SensorValue – дані про поточні та історичні результати вимірювань: мітка часу (Timestamp) і результат (Value);
- Things – обладнання, на якому встановлені датчики: унікальний ідентифікатор, найменування та місцезнаходження.

Визначення зв'язків між сутностями представлені таким чином:

- сутність «Thing» пов'язана з сутністю «Sensor» відношенням «1: N» – кожна окрема одиниця промислового обладнання може мати багато датчиків;
- сутність «Sensor» пов'язана з сутностями «AverageValue» та «SensorValue» співвідношенням «1:N» – кожен датчик формує багато результатів вимірюваного миттєвого прискорення та обчисленої RMS.

1.3. Стендове обладнання та алгоритм вимірювання

Дослідження роботи системи, оцінка точності і правильності роботи її компонентів проводилося за допомогою стендового обладнання, зображеного на рис. 3 і 4, яке включає електродвигун і генератор, з'єднані між собою муфтою.

Стенд моделює умови експлуатації насосної установки на підприємстві і складається з наступних елементів:

- корпус випробувального стенда;

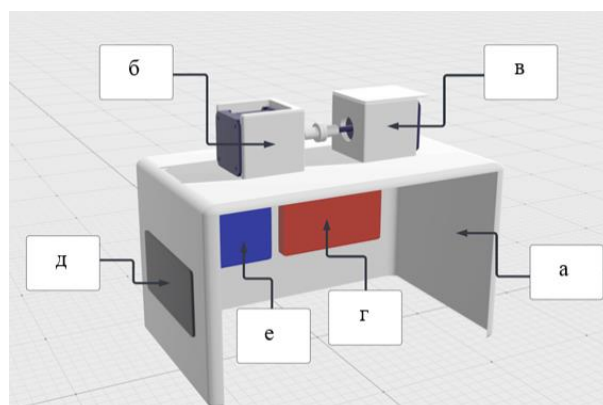


Рис.3. 3D-модель стенда: а – основа стенда, б – вузол навантаження, в – вузол з двигуном та датчиком вібрації, г – блок живлення, д – панель управління, е – блок контролера стенда

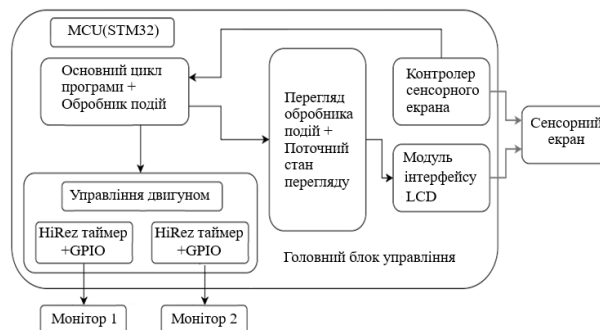


Рис. 4. Схема електроніки стенду

- генератор (навантаження), який моделює поведінку насоса;

- електродвигун з закріпленням на ньому датчиком вібрації (вузол, що тестується);
- блок живлення стенда;
- панель управління стендом з сенсорним дисплеєм для візуалізації та контролю роботи двигуна;
- блок контролера стенда, який керує двигуном, генератором та панеллю управління.

Мікросхема STM32F429 є центральним контролером. Основними приводами є крокові двигуни в поєднанні з контролерами крокових двигунів. Для генерації імпульсних послідовностей у складі мікроконтролера використовуються високоточні таймери. Використання апаратних таймерів дозволяє мінімізувати навантаження на центральне ядро контролера, оскільки після початкової ініціалізації контролера буде достатньо змінити значення регістра дільника, коли відбувається подія зміни швидкості [6].

Робота мікроконтролера заснована на механізмі реагування на події, що надходять від оператора стенду при взаємодії з сенсорним екраном. Під час реєстрації клацання на елементі інтерфейсу основний цикл оновить поточний стан GUI, а також значення змінних швидкості двигунів.

На рис. 5 показаний алгоритм вимірювальної системи.



Рис. 5. Алгоритм вимірювання

В алгоритмі вимірювання найбільш енерговитратними будуть кроки циклічно повторюваного процесу вимірювання та передачі даних через BLE.

1.4. Процедура калібрування датчика

Калібрування датчика містить два етапи:

- вимірювання споживання енергії в усіх можливих умовах роботи;
- тривале тестування датчиків в польових умовах.

Спочатку необхідно перевірити калібрування з налагодженням за допомогою інтерфейсу JTAG. Датчик має три осі, тому калібрування проводиться в умовах, коли одна вісь встановлена перпендикулярно до площини робочого столу. Якщо вісь перпендикулярна до площини робочого столу (рис. 6), то результати вимірювань у стані спокою по осі Z будуть дорівнювати 1 g, а по осях X і Y - 0 g (рис. 7).

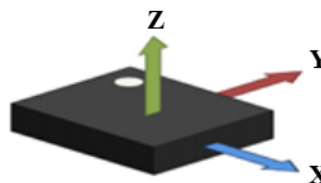


Рис. 6. Схема розташування вимірювальних осей

Конструктивною особливістю MEMS-акселерометрів є те, що дві ідентичні конструкції вздовж вимірювальних осей можна виконати перпендикулярно, щоб отримати двовісний акселерометр, але третя вісь, зазвичай вертикальна, вимагає іншої конструкції. Це призводить до погіршення продуктивності третьої осі, зниження чутливості та збільшення помилок і шуму [27].

Name	Value
X/Y/Z "id"	
X/Y/Z "X"	0.021
X/Y/Z "Y"	0.014
X/Y/Z "Z"	1.015
Add new expression	

Рис. 7. Результати вимірювань під час калібрування

1.5. Метод подвійного компенсування зміщення та розрахунку RMS

1. Первинна статистична обробка даних.

Для статистичної обробки вихідної інформації на першому етапі перевіряється відповідність даних

нормальному розподілу або розподілу щільності ймовірностей Гаусса.

Для всіх точок розраховується середнє арифметичне вимірювань в кожній позиції. Починаємо з використання середнього значення. Розкид позначається стандартним відхиленням (SD). Середнє відхилення є розкидом навколо середнього значення і показує початкову нестабільність.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_j, SD = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (x_j - \bar{x})^2}, \quad (1)$$

де n – загальна кількість вимірювань;

x_j – результат вимірювання j точки.

Для груп позицій у прогонах розраховується загальне середнє за всіма прогонами та середня мінливість між прогонами, при цьому слід виключити аномальні вимірювання. Для оцінки відповідності розподілу Гаусса використовуємо критерій Шапіро-Вілکا [29]. У цьому тесті використовується сума квадратів відхилень між характеристичними функціями, отриманими з вибірових даних, і нормальним розподілом.

2. Аналіз відхилень Аллана забезпечує диференціацію між окремими типами шуму. Будемо використовувати перетворення Аллана, щоб швидко перевірити, чи результати вимірювань узгоджуються з «білим» шумом, як запропоновано в статті [29]. Формула для розрахунку дисперсії Аллана $\sigma_A^2(\tau)$ за умови рівномірного кроку опитування Δt має такий вигляд:

$$\sigma_A^2(\tau) = \frac{\sum_{n=0}^{L-2l} \left(\sum_{i=1}^l ((x(t_{n+i}) - x(t_{n+1+i}))^2 \right)}{2\tau^2(L-2l+1)}, \quad (2)$$

де L – загальна кількість вимірювань;

l – загальна кількість вимірювань в інтервалі усереднення, $1 < l \leq L/2$;

$x(t_k)$ – результат вимірювання в момент часу $t_k = k \cdot \Delta t$.

3. Для аналізу спектральної щільності шуму:

$$f(x) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left(a_n \cos \frac{n\pi x}{L} + b_n \sin \frac{n\pi x}{L} \right), \quad (3)$$

де a_n, b_n – коефіцієнти ряду Фур'є, використано дискретне перетворення Фур'є, яке реалізує перетворення:

$$X_k = \sum_{j=0}^{n-1} x_j \left(\cos \left(\frac{2\pi}{n} kj \right) - i \cdot \sin \left(\frac{2\pi}{n} kj \right) \right), \quad (4)$$

Було використано дискретне перетворення Фур'є (ДПФ) на другому (концентраторному) рівні

системи, щоб покращити визначення частотного складу вхідних сигналів. Для розрахунку частотних вібраційних характеристик використовували зовнішню програмну бібліотеку (FFTW). Спектральна інформація, записана ДПФ, представляє сигнали вібраційного прискорення кожної осі. Для підвищення точності перетворення Фур'є використано метод адаптивної фільтрації для MEMS гіроскопа з динамічною шумовою моделлю [17].

4. Однією з основних причин систематичних помилок акселерометра є температурна залежність його характеристик [27], яка викликає достатньо повільний дрейф вимірюного віброприскорення. При інтегруванні вібраційного прискорення для розрахунку віброшвидкості ці помилки швидко накопичуються, що призводить до неприйнятно великої помилки розрахунку вібраційної швидкості. Щоб визначити середньоквадратичне значення швидкості вібрації (RMS_{VV}), як рекомендовано стандартом ISO 20816-1:2016, використовуємо інтегрування вимірюного прискорення вібрації (VA) з поправкою на ковзне середнє прискорення вібрації (MA_{AV}) і швидкість вібрації (MA_{VV}):

$$MA_{VA_k} = g \cdot \sum_{j=k-n}^{k+n} x_j / (2 \cdot n + 1),$$

$$VA_k = g \cdot x_k - MA_{VA_k},$$

$$V_k = V_{k-1} + (VA_{k-1} + 4VA_k + VA_{k+1})\Delta t / 6, \quad (5)$$

$$MA_{VV_k} = \sum_{j=k-n}^{k+n} V_j / (2 \cdot n + 1),$$

$$VV_k = V_k - MA_{VA_k},$$

де g – прискорення сили тяжіння, $g = 9,8 \text{ м/с}^2$;

$x_j, x_{k-1}, x_k, x_{k+1}$ – необроблені дані прискорення, g ;

VA_{k-1}, VA_k, VA_{k+1} – розрахункові значення віброприскорення з компенсацією зсуву прискорення, м/с^2 ;

V_k, V_j – розрахункові значення віброшвидкості без компенсації зсуву швидкості, м/с^2 ;

VV_k, VV_j – розрахункові значення віброшвидкості з компенсацією зсуву швидкості, м/с^2 ;

n – напівширина часового вікна, для якого виконується усереднення та компенсація зсуву.

Результати розрахунку залежності вібраційної швидкості від часу $VV(\tau)$ надають можливість розраховувати середньоквадратичне значення на певному інтервалі часу як:

$$\text{RMS}_{VV}(\tau) = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{\tau-T/2}^{\tau+T/2} VV^2(t) dt} \approx \sqrt{\sum_{j=k-n}^{k+n} VV_j^2 / (2n+1)}. \quad (6)$$

1.6. Порівняння з аналогами

Наступні три подібні системи, кожна з яких дозволяє підключати кілька акселерометрів до системи більш високого рівня, розглядаються далі в якості аналогів.

1. Адаптивний фільтр Калмана та метод дисперсії Аллана, що використовуються для інерційних вимірювань за допомогою пристрою MPU6050, використовує модель динамічного шуму [24].

2. Компактний і малопотужний MEMS-акселерометр і мікроконтролер з бездротовим підключенням, що має час автономної роботи близько восьми годин [25].

3. Система вимірювання вібрації, призначена для оцінки стану будівельних конструкцій [14].

2. Результати

Для оцінки потенціалу апаратної частини при використанні без обслуговування датчики було відкалібровано. Під час калібрування виходи інструментів візуалізації та налагоджувача порівнювали з інформацією, яку видає програмне забезпечення.

1. Систематичну помилку в оцінці статистичних характеристик вихідного ряду легко усунути використовуючи варіацію Аллана. Для некорельованих даних оцінка дисперсії буде незміщеною. Наявність будь-якої періодичної функції буде відображатися на графіку залежності дисперсії Аллана від часу (рис. 8).

На практиці зсув підігнаної прямої лінії та стандартна помилка відхилення від рівняння прямої лінії є надійними показниками величини вібрації (рис. 9). У результаті отримано візуальне підтвердження того, що шум вимірювання є білим шумом, оскільки нахил характеристики в логарифмічній шкалі дорівнює -1. Проблема цього рішення полягає у відсутності загальноприйнятих стандартів, що зв'язують результати вимірювання відхилення Аллана з технічним станом промислового обладнання.

2. Дослідити проблему в частотній області дозволяє аналіз спектральної щільності шуму. На рис. 10 наведено залежність результатів перетворення Фур'є за наявності адитивної суміші єдиного дійсного періодичного сигналу (50 Гц) і шуму різної інтенсивності при чисельному моделюванні.

На відміну від теоретичних модельних розрахунків, результати практичних вимірювань демонструють наявність багатьох гармонік у діапазоні частот 20...100 Гц (рис. 11). Можна зробити висновок, що ширина часового вікна 5...20 мс, визначена як n у рівнянні (5), є найбільш придатною для обчислення козвного середнього.

3. Необроблені дані містять значну помилку зміщення, незважаючи на попереднє калібрування.

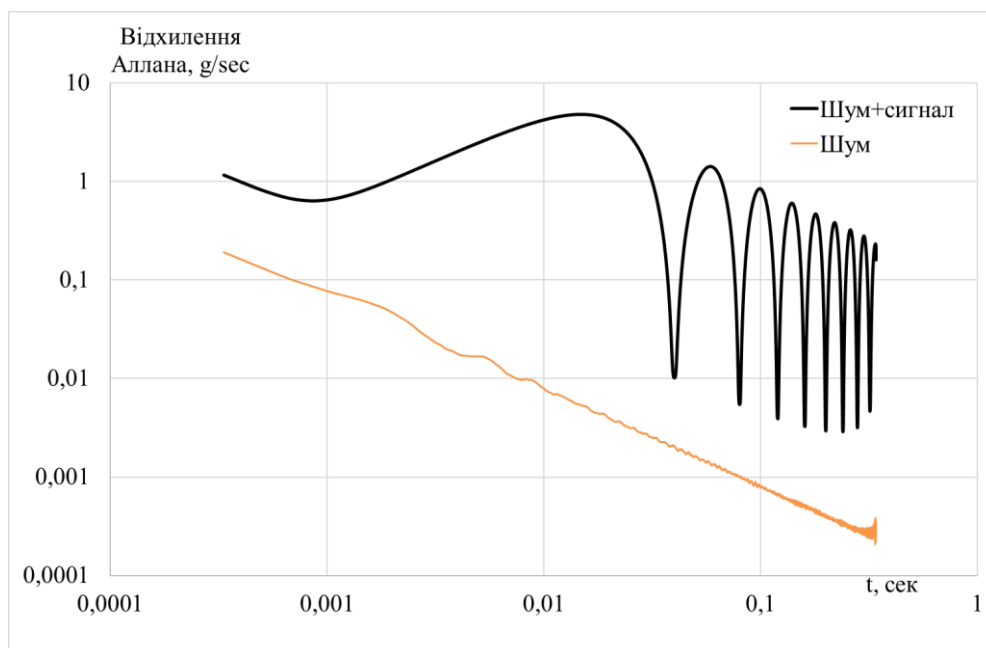


Рис. 8. Результати моделювання: відхилення Аллана для білого гаусового шуму та адитивної суміші гармонійного сигналу 25 Гц і білого гаусового шуму (відношення сигнал/шум становить 40 дБ)

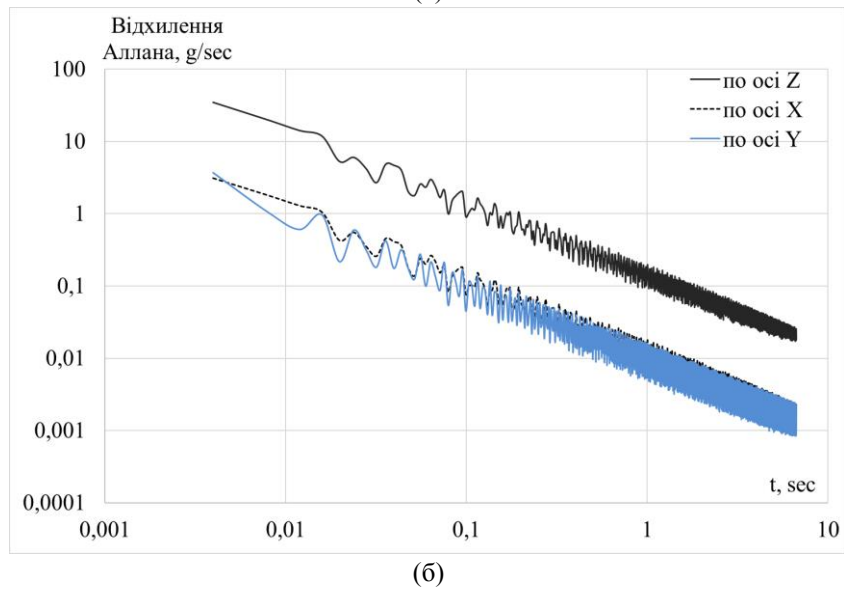
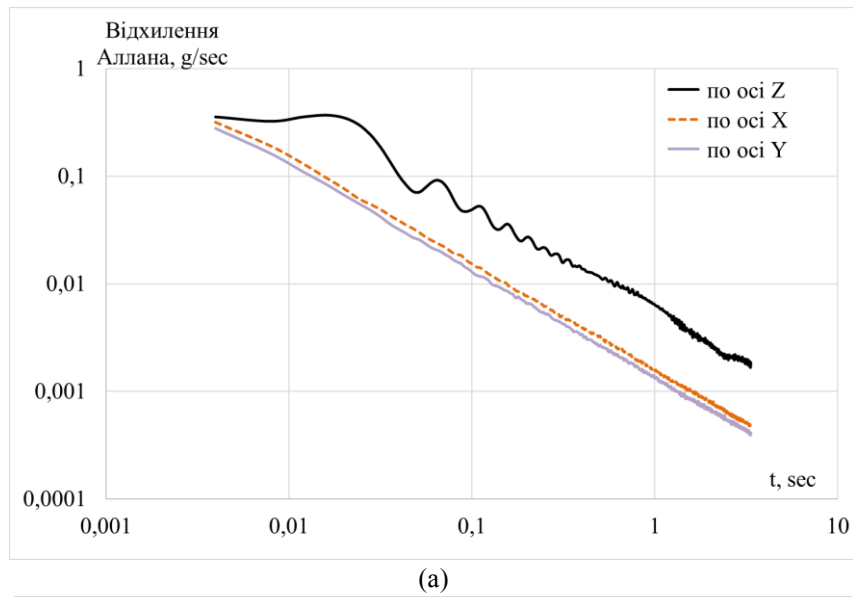


Рис. 9. Дані відхилення Аллана для прискорення:
а – в стані спокою; б – під час роботи промислового обладнання

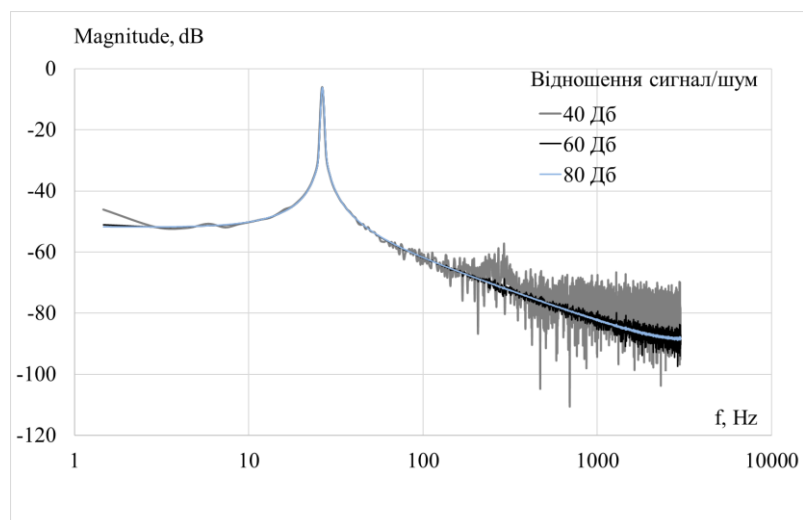
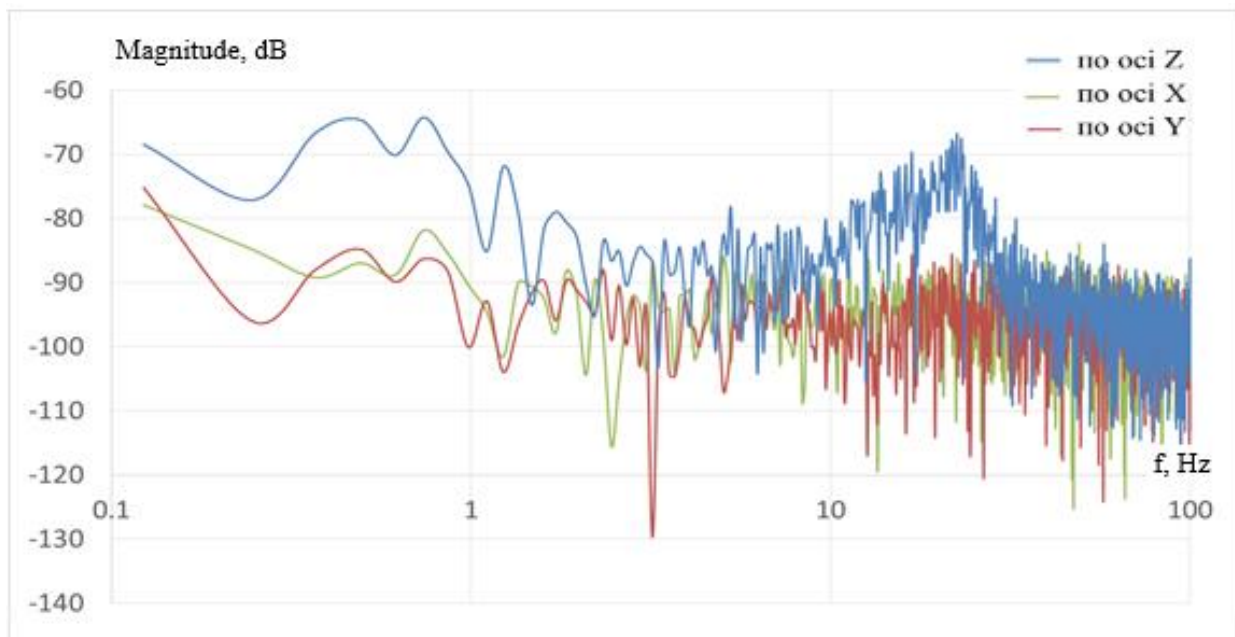
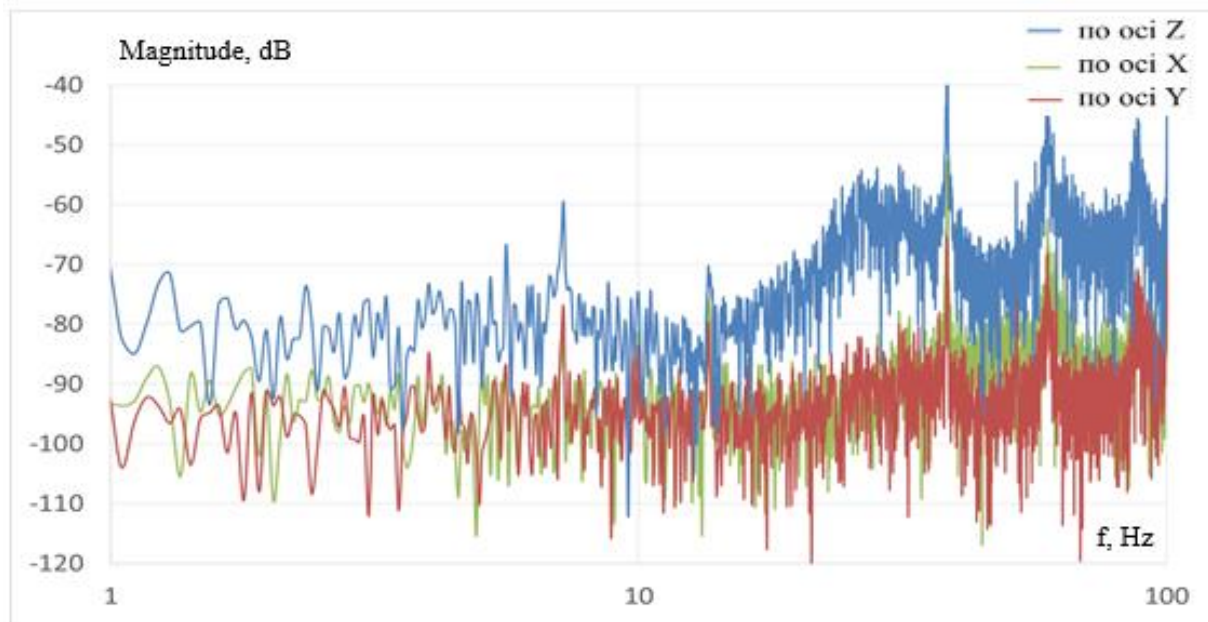


Рис. 10. Результати моделювання: частотна характеристика вертикального прискорення при зміні співвідношення шум/сигнал



(a)



(б)

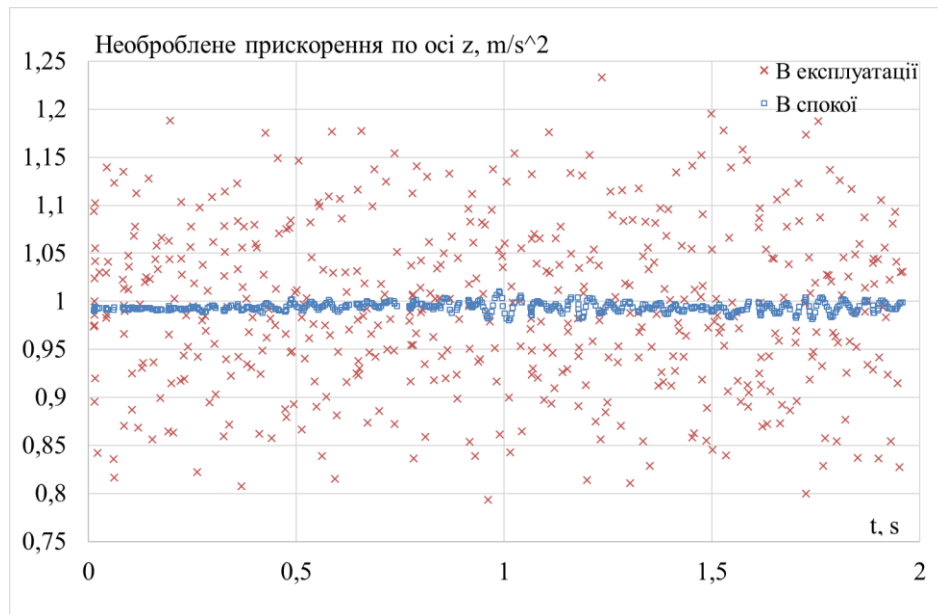
Рис. 11. АЧХ 3-осьових прискорень з різними відношеннями сигнал/шум:
а – в стані спокою; б – під час роботи обладнання

При стандартному розміщенні MEMS-акселерометра датчик уздовж осі Z, яка є найменш точною через технологічні обмеження виробництва, вимірює значення власного прискорення (рис. 12, а). Інтегрування цієї помилки без компенсації (5) призводить до недостовірних результатів. Компенсація ковзного середнього усуває це зміщення (рис. 12, б).

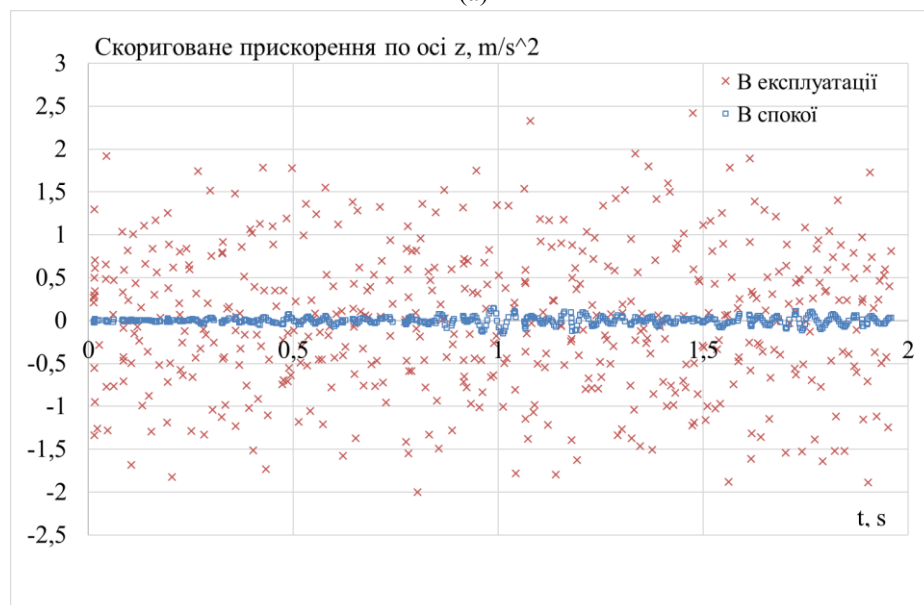
Подібно до компенсації похибки вимірювання прискорення за допомогою ковзного середнього, компенсація похибки обчислення швидкості дає змогу отримати більш точні оцінки швидкості вібрації (рис. 13).

4. Розрахунок RMS вібраційної швидкості згідно з рівнянням (6) дає наступні результати. Алгоритм, наведений у розділі 1.5, підтверджує справність контролюваного промислового обладнання. Розраховане середньоквадратичне значення віброшвидкості відповідає рекомендаціям щодо визначення меж зон вібраційного стану згідно стандарту ISO 20816-1:2016. В результаті маємо наступне:

– стандарт встановлює межу нормальної роботи для малопотужних систем як «середньоквадратичне значення швидкості вібрації не більше 0,6 мм/с»;



(а)



(б)

Рис. 12. Дані прискорення по осі Z у спокої та під час роботи промислового обладнання:

а – необроблені («сирі») результати вимірювань: x_k (5);б – розрахункові значення після компенсації зсуву прискорення: VA_k (5)

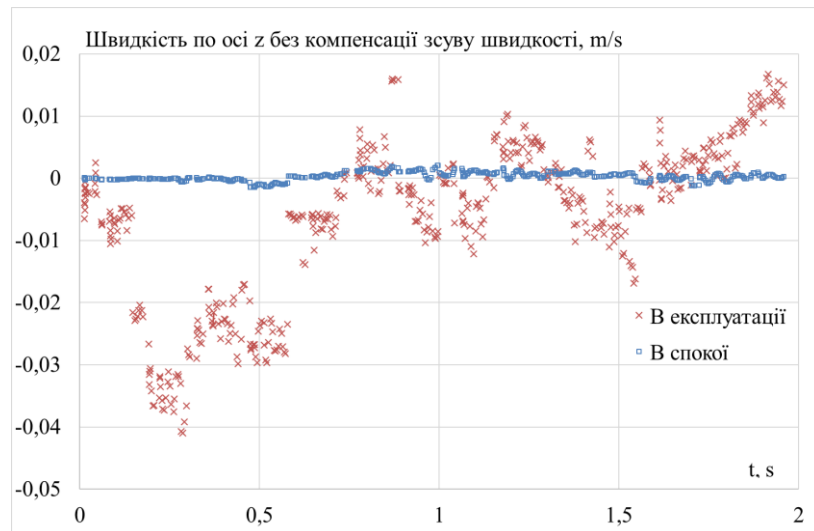
– при ширині вікна часу $T = 0,1$ с вимірювальна система фіксує швидкість не більше $0,05$ мм/с у спокої та не більше $0,35$ мм/с під час роботи (рис. 14);

– розширення ширини вікна часу T з $0,1$ с до $1,6$ с не покращує суттєво оцінки середньоквадратичного значення швидкості вібрації (табл. 1). Можна припустити, що довжина часового вікна повинна бути в межах $0,1 \dots 1$ с. Експериментальні оцінки варіації Аллана (рис. 9) і результати перетворення Фур'є (рис. 11) повністю відповідають цьому висновку.

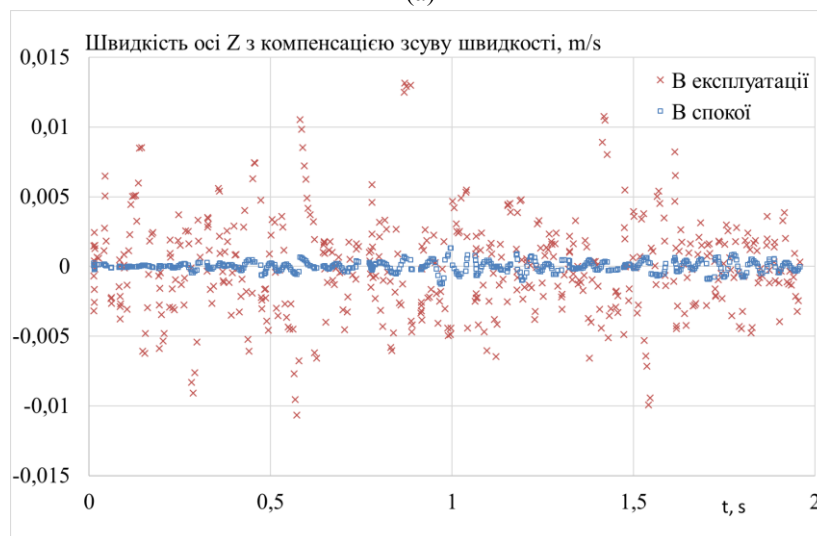
Таблиця 1

Залежність розрахункової максимальної віброшвидкості (Max(RMS) , м/с) від ширини часового вікна (T), під час роботи

T , с	Макс.(RMS), м/с
0,1	0,35
0,2	0,28
0,4	0,26
0,8	0,25
1,6	0,25



(a)



(б)

Рис. 13. Дані швидкості в спокої та під час роботи промислового обладнання:
а – без компенсації зміщення швидкості, б – з компенсацією зміщення швидкості

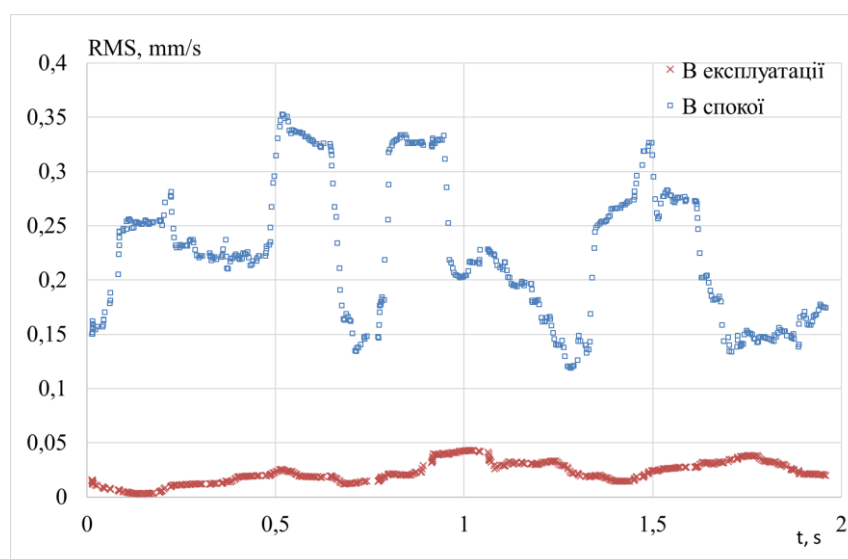


Рис. 14. RMS віброшвидкості з шириною вікна часу $T = 0,1$ с

3. Обговорення

Концепції технічного обслуговування промислового обладнання на основі стану та прогнозування вимагають комплексного використання багаторівневих цифрових технологій. Запропоновані програмно-апаратні рішення IoT для вібродіагностики разом з методикою обробки результатів вимірювань є практичним рішенням для регулярного і точного контролю технічного стану промислового обладнання.

Порівняння розробленої системи з аналогами, які розглянуто у підрозділі 1.6, виявляє такі переваги нової системи:

- на базі цифрової платформи Azure Internet of Things Suite розроблено недороге тривірневе апаратно-програмне рішення для вібраційної діагностики з можливістю інтеграції вимірювальних пристроїв в систему;

- використання спеціалізованого інтелектуального акселерометра IIS3DWB від STM, розробленого спеціально для діагностики вібрації, дозволяє розширити частотний діапазон вимірювань до 6000 Гц.

- завдяки використанню мікроконтролера STM32 та низькому енергоспоживанню BLE забезпечено тривалий термін автономної роботи (до одного року) порівняно з іншими системами, які потребують підзарядки кожні 8-12 годин.

- запропоновано метод інтегрування вимірюваного віброприскорення з поправкою на ковзне середнє віброприскорення для того, щоб перейти від безпосереднього вимірюваного віброприскорення до середньоквадратичного значення віброшвидкості, використання якого рекомендоване стандартом ISO 20816-1:2016.

Таким чином суттєво скорочуються експлуатаційні витрати зі збереженням практично такого самого рівня витрат на обладнання та монтаж, як і в інших бездротових аналогах.

Висновки

Доведено, що поєднання відомих і класичних методів аналізу в часовій і частотній областях з можливостями їх багаторівневої обробки в системі дозволяє отримати якісно кращі результати:

- розроблені апаратно-програмні засоби, запропонований метод обробки результатів вимірювань у частотній та часовій областях ефективно реалізує контактний метод вимірювання вібрації з використанням MEMS-акселерометрів відповідно до стандарту IEEE Recommended Practice for Inertial Sensor Test Equipment, Instrumentation, Data Acquisition, and Analysis;

- обране хмарне рішення Microsoft Azure IoT надає достатні можливості платформи з прийнятною для стартап-проектів ціною політикою;

- розроблена архітектура платформи цифрової вібродіагностики (див. рис. 1) і реляційної моделі бази даних (див. рис. 2) для зберігання результатів вимірювань надає додаткову можливість для вирішення завдань технічного обслуговування на основі прогнозування;

- розроблене технологічне обладнання для калібрування датчиків віброприскорення (див. рис. 3 і 4) дозволяє зменшити систематичні та випадкові похибки акселерометра.

В подальшому розвитку проекту ми плануємо зберегти обмеження низької вартості розробки та експлуатації для вирішення наступних завдань:

- оптимальний розподіл вирішуваних завдань по трьох рівнях системи IoT;

- зменшення обчислювальної складності алгоритмів з метою їх виконання на нижчому рівні;

- збільшення автономності на низькому рівні та зменшення навантаження на канали зв'язку;

- створення додаткових мікросервісів для реалізації методів аналізу часових рядів і сучасних технологій штучного інтелекту;

- дослідження залежності фактичного технічного стану обладнання від результатів розрахунку відхилення Аллана для віброприскорення методами математичного моделювання.

Внесок авторів: формулювання проблеми та завдань – **І. Б. Туркін**; аналіз інформаційних джерел – **А. В. Зеленков**; апаратна та програмна реалізація платформи вібродіагностики – **В. А. Лезновський, А. А. Набізаде**; метод обробки результатів вимірювань у частотній та часовій областях – **І. Б. Туркін**; апробація й аналіз результатів дослідження – **А. В. Зеленков**; формулювання висновків та плану подальших досліджень – **І. Б. Туркін**.

Конфлікт інтересів

Автори заявляють, що у них немає конфлікту інтересів щодо цього дослідження, фінансового, особистого, авторського чи іншого, який міг би вплинути на дослідження та його результати, представлені в цій статті.

Фінансування

Дослідження проводилося без фінансової підтримки.

Доступність даних

Рукопис не має пов'язаних даних.

Використання штучного інтелекту

Автори підтверджують, що не використовували технології штучного інтелекту при створенні представленої роботи.

Усі автори прочитали та погодилися з опублікованою версією рукопису.

Література

1. Lopez, B. S. Blockchain, Artificial Intelligence, Internet of Things to Improve Governance, Financial Management and Control of Crisis: Case Study COVID-19 [Text] / B. S. Lopez, & A. V. Alcaide // SocioEconomic Challenges. – 2020. – Vol. 4, iss.2. – P. 78-89. DOI: 10.21272/sec.4(2).78-89.2020.
2. Selection of traceability-based, automated decision-making methods in global production networks [Text] / F. Fessenmayr, M. Benfer, P. Gartner, & G. Lanza // Procedia CIRP. – 2022. – Vol. 107. – P. 1349-1354. DOI: 10.1016/j.procir.2022.05.156.
3. Future of Business Culture: An Artificial Intelligence-Driven Digital Framework for Organization Decision-Making Process [Text] / N. K. Rajagopal, N. I. Qureshi, S. Durga, E. H. Ramirez-Asis, R. M. Huerta-Soto, S. K. Gupta, S. Deepak, & M. Ahmad // Complexity. – 2022. – Article no. 7796507. DOI: 10.1155/2022/7796507.
4. Mei, J. Governance mechanisms implementation in the evolution of digital platforms: A case study of the Internet of Things platform [Text] / J. Mei, G. Zheng, & L. Zhu // R&D Manag. – 2022. – Vol. 52. – P. 498-516. DOI: 10.1111/radm.12494.
5. Impact of COVID-19 on IoT Adoption in Healthcare, Smart Homes, Smart Buildings, Smart Cities, Transportation and Industrial IoT [Text] / M. Umair, M. A. Cheema, O. Cheema, H. Li, & H. Lu // Sensors. – 2021. – Vol. 21. – Article no. 3838. DOI: 10.3390/s21113838.
6. Combining Design Thinking and Agile to Implement Condition Monitoring System: A Case Study on Paper Press Bearings. [Electronic resource] / R. V. Sánchez, J. F. Siguencia, M. Villacís, D. Cabrera, M. Cerrada, & F. Heredia // IFAC Papers OnLine. – 2022. – Vol. 55. – P. 187-192. DOI: 10.1016/j.ifacol.2022.09.205.
7. Challenges and Solutions in condition-based maintenance implementation-A multiple case study [Text] / E. Ingemarsdotter, M. L. Kambanou, E. Jamsin, T. Sakao, & R. Balkenende // J. Clean. Prod. – 2021. – Vol. 296. – Article no. 126420. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.126420.
8. Implementation of Condition-based and Predictive-based Maintenance using Vibration Analysis [Text] / C. Nata, Laurence, N. Hartono, & L. Cahyadi // 4th International Conference of Computer and Informatics Engineering (IC2IE), Depok, Indonesia, 14–15 September 2021. – IEEE: Piscataway Township, NJ, USA, 2021. – P. 90-95. DOI: 10.1109/IC2IE53219.2021.9649400.
9. A review of vibration analysis and its applications [Text] / T. Chu, T. Nguyen, H. Yoo, & J. Wang // Heliyon. – 2024. – Vol. 10, iss. 5. – Article no. E26282. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e26282.
10. Jiang, X. Research on Wind Turbine Fault Diagnosis Method Realized by Vibration Monitoring [Text] / X. Jiang // Annals of Data Science. – 2024. – Vol. 11. – P. 749-758. DOI: 10.1007/s40745-023-00497-x.
11. Chrystal, R. What is vibration analysis and how can it help optimize predictive maintenance? [Electronic resource]. – Available at: <https://www.ibm.com/blog/vibration-analysis/> (accessed 12 March 2024).
12. Chen, J. Vibration condition measure instrument of motor using MEMS accelerometer [Text] / J. Chen // The 2nd International Conference on Advances in Materials, Machinery, Electronics (AMME 2018), Xi'an City, China, 20-21 January 2018. / AIP Conf. Proc. – 2018. – Vol. 1955, iss. 1. – Article no. 030014. DOI: 10.1063/1.5033613.
13. Remote vibration monitoring and fault diagnosis system of synchronous motor based on internet of things technology [Text] / X. Yuan, Y. He, S. Wan, M. Qiu, & H. Jiang // Artif. Intell. Edge Comput. Mob. Inf. Syst. – 2021. – Vol. 2021. – Article no. 3456624. DOI: 10.1155/2021/3456624.
14. Design and Validation of a Scalable, Reconfigurable and Low-Cost Structural Health Monitoring System [Text] / J. J. Villacorta, L. del-Val, R. D. Martínez, J. A. Balmori, Á. Magdaleno, G. López, A. Izquierdo, A. Lorenzana, & L. A. Basterra // Sensors. – 2021. – Vol. 21. – Article no. 648. DOI: 10.3390/s21020648.
15. IEEE 1451.0-2007–IEEE Standard for a Smart Transducer Interface for Sensors and Actuators-Common Functions, Communication Protocols, and Transducer Electronic Data Sheet (TEDS) Formats // CFAT-Common Functionality and TEDS Working Group. – Available online: <https://standards.ieee.org/ieee/1451.0/3441/> (accessed 12 March 2024).
16. Self-Calibration Technique with Lightweight Algorithm for Thermal Drift Compensation in MEMS Accelerometers [Text] / J. Martínez, D. Asiain, & J. R. Beltrán // Micromachines. – 2022. – Vol. 13. – Article no. 584. DOI: 10.3390/mi13040584.
17. Adaptive filtering for MEMS gyroscope with dynamic noise model [Text] / Y. Bai, X. Wang, X. Jin, T. Su, J. Kong, B. Zhang // ISA Trans. – 2020. – Vol. 101. – P. 430-441. DOI: 10.1016/j.isatra.2020.01.030.
18. ISO 16063-11:1999, Methods for the Calibration of Vibration and Shock Transducers-Part 11: Primary Vibration Calibration by Laser Interferometry. – International Organization for Standardization (ISO): Geneva, Switzerland, 1999. – 27 p. – Available online: <https://www.iso.org/ru/standard/24951.html> (accessed 12 March 2024).

19. Comparison on seismometer sensitivity following ISO 16063-11 standard [Electronic resource] / F. Larsonnier, G. Rouillé, C. Bartoli, L. Klaus, & P. Begof // 19th International Congress of Metrology, Paris, France, 24–26 September 2019. – Article no. 27003. DOI: 10.1051/metrology/201927003.

20. Bilgic, E. Determination of Pulse Width and Pulse Amplitude Characteristics of Materials Used in Pendulum Type Shock Calibration Device [Text] / E. Bilgic // *Acta Phys. Pol.* – 2017. – Vol. 132. – P. 857–860. DOI:10.12693/APhysPolA.132.857.

21. IEEE Std 1554-2005, 1554-2005-IEEE Recommended Practice for Inertial Sensor Test Equipment, Instrumentation, Data Acquisition, and Analysis. – IEE: Piscataway Township, NJ, USA, 2013. DOI: 10.1109/IEEESTD.2013.6673990.

22. Hayouni, M. Wireless IoT universal approach based on Allan variance method for detection of artificial vibration signatures of a DC motor's shaft and reconstruction of the reference signal [Text] / M. Hayouni, T. H. Vuong, & F. Choubani // *IET Wirel. Sens. Syst.* – 2022. – Vol. 12. – P. 81–92. DOI: 10.1049/wss2.12038.

23. Kumari, S. A Thing Speak IoT Based Vibration Measurement and Monitoring System Using an Accelerometer sensor [Text] / S. Kumari, R. Raj, & R. Komati // *Int. J. Res. Appl. Sci. Eng. Technol.* – 2021. – Vol. 9. – P. 1249–1258. DOI: 10.22214/ijraset.2021.37599.

24. Koene, I. IoT connected device for vibration analysis and measurement [Text] / I. Koene, V. Klar, & R. Viitala // *HardwareX.* – 2020. – Vol. 7. – Article no. e00109. DOI: 10.1016/j.ohx.2020.e00109.

25. Villarroel, A. Development of a Low-Cost Vibration Measurement System for Industrial Applications [Text] / A. Villarroel, G. Zurita, & R. Velarde // *Machines.* – 2019. – Vol. 7. – Article no. 12. DOI: 10.3390/machines7010012.

26. The Use of IoT for Determination of Time and Frequency Vibration Characteristics of Industrial Equipment for Condition-Based Maintenance [Electronic resource] / I. Turkin, V. Leznovskyi, A. Zelenkov, A. Nabizade, L. Volobuieva, & V. Turkina // *Computation.* – 2023. – Vol. 11. – Article no. 177. DOI: 10.3390/computation11090177.

27. IIS3DWB–Ultra-Wide Bandwidth, Low-Noise, 3-Axis Digital Vibration Sensor. Datasheet–Production Data. [Electronic resource]. – Available at: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/iis3dwb.pdf> (accessed 12 March 2024).

28. Building the Hyperconnected Society [Electronic resource] / E. Z. Tragos, H. C. Pöhls, R. C. Staudemeyer, D. Slamanig, A. Kapovits, S. Suppan, A. Fragkiadakis, G. Baldini, R. Neisse, P. Langendörfer, et al. // In *Securing the Internet of Things/* -River Publishers: Aalborg, Denmark, 2015. – Available at: https://www.researchgate.net/publication/289253024_Building_the_Hyperconnected_Society (accessed 12 March 2024).

29. Wilk, M. B. The Shapiro Wilk And Related Tests For Normality [Electronic resource] / M. B. Wilk. – Available at: <https://math.mit.edu/~rmd/465/shapiro.pdf> (accessed 12 March 2024).

References

1. Lopez, B. S., & Alcaide, A. V. Blockchain, Artificial Intelligence, Internet of Things to Improve Governance, Financial Management and Control of Crisis: Case Study COVID-19. *SocioEconomic Challenges*, 2020, vol. 4, iss. 2, pp. 78–89. DOI: 10.21272/sec.4(2).78–89.2020.

2. Fessenmayr, F., Benfer, M., Gartner, P., & Lanza, G. Selection of traceability-based, automated decision-making methods in global production networks. *Procedia CIRP*, 2022, vol. 107, pp. 1349–1354. DOI: 10.1016/j.procir.2022.05.156.

3. Rajagopal, N. K., Qureshi, N. I., Durga, S., Ramirez-Asis, E. H., Huerta-Soto, R. M., Gupta, S. K., Deepak, S., & Ahmad, M. Future of Business Culture: An Artificial Intelligence-Driven Digital Framework for Organization Decision-Making Process. *Complexity*, 2022, article no. 7796507. DOI: 10.1155/2022/7796507.

4. Mei, J., Zheng, G., & Zhu, L. Governance mechanisms implementation in the evolution of digital platforms: A case study of the Internet of Things platform. *R&D Manag*, 2022, vol. 52, pp. 498–516. DOI: 10.1111/radm.12494.

5. Umair, M., Cheema, M.A., Cheema, O., Li, H., Lu, H. Impact of COVID-19 on IoT Adoption in Healthcare, Smart Homes, Smart Buildings, Smart Cities, Transportation and Industrial IoT. *Sensors*, 2021, vol. 21, article no. 3838. DOI: 10.3390/s21113838.

6. Sánchez, R. V., Siguencia, J. F., Villacís, M., Cabrera, D., Cerrada, M., & Heredia, F. Combining Design Thinking and Agile to Implement Condition Monitoring System: A Case Study on Paper Press Bearings. *IFAC Papers OnLine*, 2022, vol. 55, pp. 187–192. DOI: 10.1016/j.ifacol.2022.09.205.

7. Ingemarsdotter, E., Kambanou, M. L., Jamsin, E., Sakao, T., & Balkenende, R. Challenges and Solutions in condition-based maintenance implementation-A multiple case study. *J. Clean. Prod*, 2021, vol. 296, article no. 126420. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.126420.

8. Nata, C., Laurence, Hartono, N., & Cahyadi, L. Implementation of Condition-based and Predictive-based Maintenance using Vibration Analysis. In *Proceedings of the 2021 4th International Conference of Computer and Informatics Engineering (IC2IE)*, Depok, Indonesia, 14–15 September 2021, IEEE: Piscataway Township, NJ, USA, 2021, pp. 90–95. DOI: 10.1109/IC2IE53219.2021.9649400.

9. Chu, T., Nguyen, T., Yoo, H., & Wang, J. A review of vibration analysis and its applications. *Heliyon*, 2024, vol. 10, iss. 5, article no. E26282. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e26282.

10. Jiang X. Research on Wind Turbine Fault Diagnosis Method Realized by Vibration Monitoring. *Annals of Data Science*, 2024, vol. 11, pp. 749-758. DOI: 10.1007/s40745-023-00497-x.
11. Chrystal, R. *What is vibration analysis and how can it help optimize predictive maintenance?* Available online: <https://www.ibm.com/blog/vibration-analysis/> (accessed 12 March 2024).
12. Chen, J. Vibration condition measure instrument of motor using MEMS accelerometer. In *Proceedings of the 2nd International Conference on Advances in Materials, Machinery, Electronics (AMME 2018)*, Xi'an City, China, 20-21 January 2018, *AIP Conf. Proc.*, 2018, vol. 1955, iss. 1, article no. 030014. DOI: 10.1063/1.5033613.
13. Yuan, X., He, Y., Wan, S., Qiu, M., & Jiang, H. Remote vibration monitoring and fault diagnosis system of synchronous motor based on internet of things technology. *Artif. Intell. Edge Comput. Mob. Inf. Syst.*, 2021, vol. 2021, article no. 3456624. DOI: 10.1155/2021/3456624.
14. Villacorta, J. J., del-Val, L., Martínez, R. D., Balmori, J.-A., Magdaleno, Á., López, G., Izquierdo, A., Lorenzana, A., & Basterra, L.-A. Design and Validation of a Scalable, Reconfigurable and Low-Cost Structural Health Monitoring System. *Sensors*, 2021, vol. 21, article no. 648. DOI: 10.3390/s21020648.
15. *IEEE 1451.0-2007—IEEE Standard for a Smart Transducer Interface for Sensors and Actuators-Common Functions, Communication Protocols, and Transducer Electronic Data Sheet (TEDS) Formats*. CFAT-Common Functionality and TEDS Working Group. Available online: <https://standards.ieee.org/ieee/1451.0/3441/> (accessed 12 March 2024).
16. Martínez, J., Asiain, D., & Beltrán, J. R. Self-Calibration Technique with Lightweight Algorithm for Thermal Drift Compensation in MEMS Accelerometers. *Micromachines*, 2022, vol. 13, article no. 584. DOI: 10.3390/mi13040584.
17. Bai, Y., Wang, X., Jin, X., Su, T., Kong, J., & Zhang, B. Adaptive filtering for MEMS gyroscope with dynamic noise model. *ISA Trans.*, 2020, vol. 101, pp. 430-441. DOI: 10.1016/j.isatra.2020.01.030.
18. *ISO 16063-11:1999, Methods for the Calibration of Vibration and Shock Transducers-Part 11: Primary Vibration Calibration by Laser Interferometry*. International Organization for Standardization (ISO): Geneva, Switzerland, 1999. 27 p. Available online: <https://www.iso.org/ru/standard/24951.html> (accessed 12 March 2024).
19. Larssonier, F., Rouillé, G., Bartoli, C., Klaus, L., & Begoff, P. Comparison on seismometer sensitivity following ISO 16063-11 standard. In *Proceedings of the 19th International Congress of Metrology*, Paris, France, 24-26 September 2019, article no. 27003. DOI: 10.1051/metrology/201927003.
20. Bilgic, E. Determination of Pulse Width and Pulse Amplitude Characteristics of Materials Used in Pendulum Type Shock Calibration Device. *Acta Phys. Pol.*, 2017, vol. 132, pp. 857-860. DOI: 10.12693/APhysPolA.132.857.
21. *IEEE Std 1554-2005, 1554-2005—IEEE Recommended Practice for Inertial Sensor Test Equipment, Instrumentation, Data Acquisition, and Analysis*. IEEE: Piscataway Township, NJ, USA, 2013. DOI: 10.1109/IEEESTD.2013.6673990.
22. Hayouni, M., Vuong, T.-H., & Choubani, F. Wireless IoT universal approach based on Allan variance method for detection of artificial vibration signatures of a DC motor's shaft and reconstruction of the reference signal. *IET Wirel. Sens. Syst.* 2022, vol. 12, pp. 81-92. DOI: 10.1049/wss2.12038.
23. Kumari, S., Raj, R., & Komati, R. A Thing Speak IoT Based Vibration Measurement and Monitoring System Using an Accelerometer sensor. *Int. J. Res. Appl. Sci. Eng. Technol.*, 2021, vol. 9, pp. 1249-1258. DOI: 10.22214/ijraset.2021.37599.
24. Koene, I., Klar, V., & Viitala, R. IoT connected device for vibration analysis and measurement. *HardwareX*, 2020, vol. 7, article no. e00109. DOI: 10.1016/j.ohx.2020.e00109.
25. Villarroel, A., Zurita, G., & Velarde, R. Development of a Low-Cost Vibration Measurement System for Industrial Applications. *Machines*, 2019, vol. 7, article no. 12. DOI: 10.3390/machines7010012.
26. Turkin, I., Leznovskyi, V., Zelenkov, A., Nabizade, A., Volobueva, L., & Turkina, V. The Use of IoT for Determination of Time and Frequency Vibration Characteristics of Industrial Equipment for Condition-Based Maintenance. *Computation*, 2023, vol. 11, article no. 177. DOI: 10.3390/computation11090177.
27. IIS3DWB—Ultra-Wide Bandwidth, Low-Noise, 3-Axis Digital Vibration Sensor. Datasheet—Production Data. Available online: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/iis3dwb.pdf> (accessed 12 March 2024).
28. Tragos, E. Z., Pöhls, H. C., Staudemeyer, R. C., Slamanig, D., Kapovits, A., Suppan, S., Fragkiadakis, A., Baldini, G., Neisse, R., Langendörfer, P., et al. Building the Hyperconnected Society. In *Securing the Internet of Things*, River Publishers: Aalborg, Denmark, 2015. Available online: https://www.researchgate.net/publication/289253024_Building_the_Hyperconnected_Society (accessed 12 March 2024).
29. Wilk, M. B. *The Shapiro Wilk And Related Tests For Normality*. 2015. Available online: <https://math.mit.edu/~rmd/465/shapiro.pdf> (accessed 12 March 2024).

METHOD OF DETERMINING THE VIBRATION CHARACTERISTICS OF INDUSTRIAL EQUIPMENT IN THE FREQUENCY AND TIME DOMAIN

*Ihor Turkin, Andrii Zelenkov, Viacheslav Leznovsky,
Agil Nabizade*

This paper proposes hardware and software solutions and a data processing method for vibration diagnostics of industrial equipment, which uses discrete Fourier transform and Allan dispersion to increase the accuracy and stability of measurement processes and result processing. The object of this study is the use of vibration diagnostic methods to implement the concept of maintenance of industrial equipment based on monitoring its current and future condition. The subject of this research is the hardware and software solutions for vibration diagnostics systems and methods for processing measurement results. The purpose of this work is to develop a new resource-saving IoT-oriented wireless solution for vibration diagnostics, where the contact method and MEMS accelerometers are used to measure vibration parameters and to evaluate the effectiveness of new methods and algorithms for processing experimental data. The task: justify the need to find new hardware and software solutions and methods of processing the obtained results for the implementation of the service concept based on the tracking of vibration indicators of technical equipment; provide basic hardware and software solutions for the implementation of the cloud platform of vibration diagnostics; develop methods of processing results; check the developed methods and algorithms using mathematical modeling methods and in an on-site experiment; compare the effectiveness of own and competitive solutions; draw conclusions and formulate a plan for further research. Conclusions. It has been proven that the combination of known analysis methods in the time and frequency domains with multi-level processing gives better results than analogous methods. The developed hardware and software tools and the method of processing measurement results effectively implement the contact method of vibration measurement, which provides the possibility of tracking the state of technical equipment. The developed equipment for the calibration of vibration acceleration sensors can reduce accelerometer errors. Further areas of research are the search for the optimal distribution of calculations on IoT levels, reducing the computational complexity of algorithms, increasing the time of continuous autonomous operation of the lower-level microcontroller, creating micro services for time-series analysis, and researching the dependence of the technical state of the equipment on the calculated Allan deviation.

Keywords: Internet of things; digital platform; vibration diagnostics; calibration; accelerometer; industrial equipment; Allan variance.

Туркін Ігор Борисович – д-р техн. наук, проф., зав. каф. інженерії програмного забезпечення, Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Зеленков Андрій Вікторович – канд. техн. наук, доц., доц. каф. інженерії програмного забезпечення, Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Лезновський В'ячеслав Андрійович – магістр з інженерії програмного забезпечення, асп. каф. інженерії програмного забезпечення, Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Набізаде Агіль Акіф огли – магістр з інженерії програмного забезпечення, асп. каф. інженерії програмного забезпечення, Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Ihor Turkin – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Software Engineering, National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute», Kharkiv, Ukraine, e-mail: i.turkin@khai.edu, ORCID: 0000-0002-3986-4186, Scopus Author ID: 57203145725.

Andrii Zelenkov – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Software Engineering, National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute», Kharkiv, Ukraine, e-mail: a.zelenkov@khai.edu, ORCID: 0000-0002-2163-4497.

Viacheslav Leznovskyi – Master of Software Engineering, PhD Student at the Software Engineering Department, National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute», Kharkiv, Ukraine, e-mail: lieznovskiy@gmail.com, ORCID: 0000-0002-6189-7312.

Agil Nabizade – Master of Software Engineering, PhD Student at the Software Engineering Department, National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute», Kharkiv, Ukraine, e-mail: agilnabizade@gmail.com, ORCID: 0009-0004-9860-7798.