

УДК 621.771.63  
DOI [https://doi.org/10.15589/znp2025.4\(502\).10](https://doi.org/10.15589/znp2025.4(502).10)

## ANALYSIS OF BEARING VIBRATION SIGNALS USING THE RMS METHOD

АНАЛІЗ ВІБРАЦІЙНИХ СИГНАЛІВ ПІДШИПНИКІВ  
ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ RMS-МЕТОДУ

**Dmytro V. Cherkashyn<sup>1</sup>**  
sneyk74@gmail.com  
ORCID: 0009-0009-3445-7440

**Maksym D. Yakubovskiy<sup>1</sup>**  
offmax.me@gmail.com

**Serhii O. Hubskey<sup>2</sup>**  
gubskiyso@gmail.com  
ORCID: 0000-0001-7797-9139

**Andrii V. Yavtushenko<sup>2</sup>**  
andrii.yavtushenko@gmail.com  
ORCID: 0009-0007-9829-5482

**Yurii V. Babay<sup>2</sup>**  
urababay@gmail.com  
ORCID: 0009-0002-1882-0472

**Д. В. Черкашин<sup>1</sup>,**  
учитель

**М. Д. Якубовський<sup>1</sup>,**  
учень

**С. О. Губський<sup>2</sup>,**  
канд. техн. наук, доцент

**А. В. Явтушенко<sup>2</sup>,**  
аспірант

**Ю. В. Бабай<sup>2</sup>,**  
аспірант

<sup>1</sup> *Municipal Institution “Kharkiv Lyceum № 155 of the Kharkiv City Council”, Kharkiv*

<sup>2</sup> *National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, Kharkiv*

<sup>1</sup> *Комунальний заклад «Харківський ліцей № 155 Харківської міської ради», м. Харків*

<sup>2</sup> *Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків*

**Abstract. Purpose.** The aim of this work is the development and experimental investigation of a measurement test bench for vibration diagnostics of rolling bearings based on the analysis of vibration signals using the root mean square (RMS) value. The study focuses on enabling early detection of bearing defects and improving the reliability of rotating components in industrial equipment within the framework of Industry 4.0 approaches.

**Method.** The measurement test bench is implemented using a three-axis digital accelerometer ADXL345 and an ESP32 microcontroller, which performs data acquisition, preliminary processing, and wireless transmission of vibration signals via Wi-Fi. Signal recording is carried out in the time domain, followed by the calculation of RMS as an integral indicator of the vibrational energy. Experimental investigations were conducted under identical rotational conditions for a healthy bearing and a bearing with an outer ring defect.

**Results.** The experimental results demonstrated significant differences in the shape of time-domain signals and RMS values between the healthy and defective bearings. For the bearing with a defect, an increased vibration level and the appearance of characteristic impact pulses were observed, confirming the effectiveness of the RMS method for detecting early stages of bearing faults.

**Scientific novelty.** The scientific novelty lies in the combination of an accessible hardware platform and RMS analysis to create a compact vibration diagnostic test bench suitable for further integration into intelligent monitoring systems.

**Practical importance.** The proposed test bench can be used in educational activities, laboratory work, scientific research, and the development of predictive maintenance systems for industrial equipment.

**Key words:** vibration diagnostics; rolling bearing; ADXL345 accelerometer; ESP32; RMS analysis; experimental test stand; wireless monitoring.

**Анотація. Мета.** Метою роботи є розроблення та експериментальне дослідження вимірювального стенду для вібраційної діагностики підшипників кочення на основі аналізу вібраційних сигналів із використанням середньоквадратичного значення (RMS). Дослідження спрямоване на забезпечення раннього виявлення дефектів підшипників та підвищення надійності вузлів обертання промислового обладнання в умовах впровадження підходів Промисловості 4.0.

**Методика.** Вимірювальний стенд реалізовано з використанням тривісного цифрового акселерометра ADXL345 та мікроконтролера ESP32, який виконує функції збору, попередньої обробки та бездротової передачі вібрацій-

них даних за допомогою Wi-Fi. Реєстрація сигналів здійснюється у часовій області з подальшим обчисленням RMS як інтегрального показника енергії коливального процесу. Експериментальні дослідження проведено за однакових режимів обертання для справного підшипника та підшипника з дефектом зовнішнього кільця.

**Результати.** Результати експериментів показали суттєві відмінності у формі часових сигналів і числових значеннях RMS для справного та дефектного підшипників. Для підшипника з пошкодженням зафіксовано підвищення рівня вібрацій і появу характерних ударних імпульсів, що підтверджує ефективність RMS-методу для виявлення початкових стадій несправностей.

**Наукова новизна.** Наукова новизна полягає у поєднанні доступної апаратної платформи та RMS-аналізу для створення компактного стенду вібраційної діагностики, придатного для подальшої інтеграції в інтелектуальні системи моніторингу.

**Практична значимість.** Запропонований стенд може бути використаний у навчальному процесі, лабораторних роботах, наукових дослідженнях та при розробленні систем предиктивного обслуговування промислового обладнання.

**Ключові слова:** вібраційна діагностика; підшипник кочення; акселерометр ADXL345; ESP32; RMS-аналіз; експериментальний стенд; бездротові вимірювання.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Актуальність вібраційної діагностики підшипників у сучасних машинобудівних та енергетичних системах зумовлена потребою забезпечення надійної й безперервної роботи обертового обладнання. Підшипники кочення є одними з найбільш навантажених елементів механізмів, а їх передчасний вихід з ладу призводить до аварійних зупинок і значних економічних втрат. Традиційні методи контролю, зокрема періодичний огляд або розбирання вузлів, є трудомісткими та не дозволяють виявляти дефекти на ранніх стадіях.

Натомість широкого застосування набувають методи вібраційної діагностики, що ґрунтуються на аналізі коливальних сигналів під час роботи обладнання. Використання цифрових акселерометрів і мікроконтролерних систем забезпечує безперервний моніторинг стану підшипників у реальному часі, а RMS-аналіз дозволяє кількісно оцінювати рівень вібрацій і виявляти ознаки дефектів.

У контексті розвитку Промисловості 4.0 актуальною є розробка компактного та доступного експериментального стенду для дослідження вібраційних характеристик підшипників у справному й дефектному станах, що створює основу для автоматизації діагностики та впровадження методів машинного навчання.

## АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

У сучасних дослідженнях вібраційної діагностики значна увага приділяється аналізу стану підшипників кочення, оскільки саме вони є одними з найбільш вразливих елементів обертових механізмів. Дефекти підшипників призводять до зростання рівня вібрацій, появи ударних компонент та зміни частотного складу сигналу, що може спричинити передчасний вихід обладнання з ладу [1]. Своєчасне виявлення таких змін є критично важливим для забезпечення надійності та безпеки роботи машин. Для цього широко

застосовуються методи цифрової обробки вібраційних сигналів, які дозволяють підвищити інформативність діагностики та зменшити вплив шумів.

У наукових публікаціях розглядається низка підходів до аналізу вібраційних сигналів підшипників [2, 3]:

1. Часовий аналіз передбачає оцінювання амплітудних характеристик сигналу, зокрема RMS, пікових значень та коефіцієнта кріплення. Цей підхід є простим у реалізації та ефективним для виявлення загального зростання рівня вібрацій;

2. Спектральний аналіз базується на застосуванні швидкого перетворення Фур'є (ШПФ) і дозволяє виділяти характерні частоти, пов'язані з дефектами внутрішнього та зовнішнього кільця, тіл кочення і сепаратора;

3. Часо-частотні методи, зокрема вейвлет-перетворення, застосовуються для аналізу нестационарних сигналів та виявлення короточасних ударних подій, характерних для початкових стадій розвитку дефектів;

4. Методи фільтрації та згладжування, включаючи цифрові фільтри та фільтр Кальмана, використовуються для зменшення рівня шуму та підвищення точності оцінки діагностичних параметрів.

Застосування зазначених методів у комплексі дозволяє підвищити достовірність діагностики, забезпечити раннє виявлення дефектів підшипників і створити ефективні системи моніторингу технічного стану механічного обладнання.

## ВІДОКРЕМЛЕННЯ НЕВИРІШЕНИХ РАНІШЕ ЧАСТИН ЗАГАЛЬНОЇ ПРОБЛЕМИ

Незважаючи на значну кількість наукових праць, присвячених вібраційній діагностиці підшипників кочення, більшість із них орієнтована на дорогі стаціонарні промислові системи з обмеженим застосуванням у навчальних та експериментальних умовах. Крім того, у багатьох дослідженнях увага зосереджена на окремих методах аналізу вібраційних сигналів без комплексного поєднання апаратної частини, програмної обробки та експериментальної перевірки.

Недостатньо дослідженими залишаються питання створення компактних і доступних діагностичних стендів на базі мікроконтролерів, здатних забезпечувати зчитування, фільтрацію та аналіз вібраційних сигналів у реальному часі. Обмежено також представлено практичне застосування RMS-аналізу для порівняння справного та дефектного станів підшипників у лабораторних умовах.

Вирішення цих питань потребує подальших досліджень і експериментального обґрунтування нових підходів до побудови діагностичних стендів та методів цифрової обробки сигналів.

### МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою дослідження є розробка та експериментальне дослідження діагностичного стенду для вібраційної діагностики підшипників кочення з використанням акселерометра та мікроконтролера, а також застосування RMS-аналізу для оцінювання технічного стану підшипників і виявлення дефектів на ранніх стадіях їх розвитку.

### МЕТОДИ, ОБ'ЄКТ ТА ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ

Методи дослідження базуються на аналізі та узагальненні сучасних наукових публікацій у галузі вібраційної діагностики та цифрової обробки сигналів. У роботі застосовано системний підхід до вивчення принципів реєстрації та аналізу вібраційних сигналів, а також порівняння методів оцінювання технічного стану підшипників.

Для експериментальної частини використано методи вимірювання вібрацій за допомогою акселерометра, цифрову фільтрацію сигналів та RMS-аналіз для кількісної оцінки рівня вібрацій. Обробка та візуалізація даних здійснювалися із застосуванням програмних засобів мовою програмування Python.

Об'єкт дослідження: процеси вібраційних коливань у підшипниках кочення під час їх роботи в справному та дефектному станах.

Предмет дослідження: методи реєстрації та обробки вібраційних сигналів із використанням RMS-показників для діагностики технічного стану підшипників.

### ОСНОВНА ЧАСТИНА

У сучасній промисловості зростає роль підходів концепції Промисловості 4.0, спрямованих на цифрову трансформацію виробництва, інтеграцію фізичних процесів з інформаційними технологіями та впровадження віддаленого моніторингу стану обладнання. Важливою складовою таких систем є IoT-сенсори (Internet of Things – «Інтернет речей»), які забезпечують автоматизований збір і передавання вимірювальних даних у реальному часі.

Особливе поширення отримали вібраційні IoT-датчики, оскільки параметри вібрації є одними

з найінформативніших показників технічного стану механічних вузлів. Аналіз вібрацій дозволяє своєчасно виявляти дефекти підшипників, розбалансування, порушення співвісності, несправності редукторів і зношування елементів конструкцій. Завдяки цьому вібраційна діагностика широко застосовується в машинобудуванні, автомобільній [4], авіаційній [5], верстатобудівній [6], металургійній та енергетичній галузях.

Поєднання бездротових IoT-платформ (ESP32, ESP8266) із цифровими триосьовими акселерометрами, зокрема ADXL345, створює основу для розробки компактних і доступних систем вібраційного моніторингу. Такі рішення забезпечують передавання даних через Wi-Fi, автономну роботу та оперативну діагностику обладнання, що відповідає концепції предиктивного обслуговування й сприяє зменшенню витрат і простоїв виробництва.

**Основні характеристики вібрацій та поняття RMS.** Вібрації є складним фізичним явищем, що проявляється у вигляді коливальних рухів елементів машин і механізмів. Для оцінювання технічного стану обладнання використовують основні параметри вібраційного сигналу, які відображають його амплітудні та частотно-часові властивості. До них належать: амплітуда – максимальне відхилення від положення рівноваги, що характеризує рівень вібраційного впливу [7]; частота – кількість коливань за одиницю часу, яка визначає джерело та природу вібрацій; фаза – часовий зсув між сигналами, аналіз якого дає змогу виявляти розбалансування та нерівномірність роботи механізмів.

У практиці вібраційної діагностики ці параметри аналізуються разом із часовою формою сигналу та його гармонічним складом, що дозволяє оцінити характер і ступінь розвитку дефектів обладнання [8]. За походженням вібрації поділяють на вимушені, зумовлені дією зовнішніх періодичних сил, та власні (резонансні), які виникають при збігу збуджувальної та власної частоти системи й можуть призводити до різкого зростання амплітуди коливань та небезпечних режимів роботи.

Одним із ключових кількісних показників у вібраційній діагностиці є RMS. Цей параметр характеризує енергетичний рівень коливань і дає можливість об'єктивно оцінити інтенсивність вібрацій незалежно від форми сигналу.

RMS-значення визначається як квадратний корінь із середнього значення квадратів миттєвих значень сигналу за заданий інтервал часу  $T$ :

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v^2(t) dt}, \quad (1.1)$$

де  $v(t)$  – миттєве значення вимірюваного сигналу (швидкості, прискорення або напруги);  $T$  – тривалість

інтервалу спостереження;  $\int_0^T v^2(t) dt$  – інтеграл від квадрата сигналу за період вимірювання;  $\frac{1}{T}$  –  $k$  операція усереднення.

Ілюстрація, наведена на рис. 1.1, дозволяє наочно продемонструвати спосіб кількісної оцінки рівня вібрацій і фізичний зміст показника RMS у задачах технічної діагностики [9].

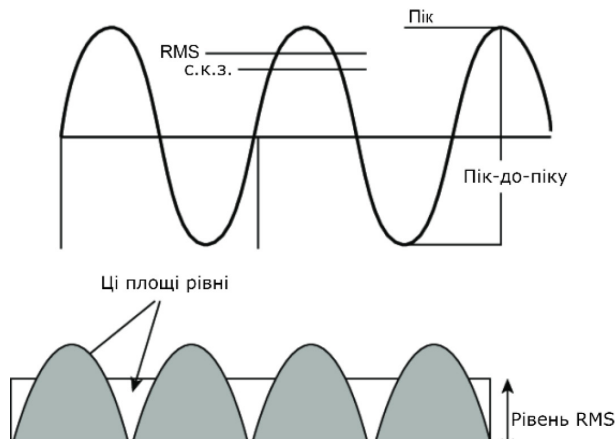


Рис. 1.1. RMS вібраційного сигналу

На зображенні подано дві частини, які в сукупності ілюструють процес формування та фізичний зміст RMS-показника.

У верхній частині рисунка зображено гармонічний синусоїдальний сигнал, що коливається відносно нульового рівня. Пікове значення відповідає максимальному миттєвому відхиленню сигналу від положення рівноваги, тоді як пікове-до-пікового значення характеризує повний розмах коливань. Лінія RMS відображає ефективний рівень амплітуди сигналу, який є меншим за пікове значення, проте точніше описує його енергетичний вміст.

Для гармонічного синусоїдального сигналу середньоквадратичне значення пов'язане з піковим співвідношенням, наведеним у формулі (1.2):

$$V_{RMS} = 0.707 \cdot V_{peak}, \quad (1.2)$$

де  $V_{RMS}$  – середньоквадратичне (ефективне) значення амплітуди вібраційного сигналу, що характеризує його енергетичну дію та відповідає еквівалентному постійному сигналу з тією ж середньою енергією;  $V_{peak}$  – пікове значення, тобто максимальна амплітуда коливань. Коефіцієнт 0,707 отримано в результаті математичного аналізу синусоїдального сигналу і він показує, що RMS-значення становить приблизно 70,7 % від пікової амплітуди (див. формулу (1.1)).

У нижній частині рисунка наведено енергетичну інтерпретацію сигналу. Від'ємні півхвилі синусоїди віддзеркалені відносно осі часу, що відповідає операції піднесення сигналу до квадрату.

Заштриховані області відображають миттєву енергію коливань. Площа цих областей дорівнює площі прямокутника з висотою, що відповідає RMS-рівню, що підтверджує енергетичну еквівалентність змінного сигналу та його RMS-представлення.

**Практичне використання RMS-показника у вібраційній діагностиці.** RMS є одним із базових параметрів у системах вібраційної діагностики машин і механізмів. Він дозволяє кількісно оцінювати загальний рівень вібрацій незалежно від форми сигналу, що забезпечує коректне порівняння стану обладнання в різні моменти часу та за різних режимів роботи. Зростання RMS відображає підвищення енергії коливань і може свідчити про появу або розвиток механічних дефектів, розбалансування чи зношування вузлів.

У практиці технічного контролю RMS використовується як інтегральний показник енергетичного стану системи, критерій оцінювання справності підшипників і електромеханічних вузлів, а також як ранній індикатор несправностей, що фіксується ще до появи явних ознак пошкодження [10]. Завдяки простоті обчислення та можливості реалізації в режимі реального часу RMS широко застосовується як у лабораторних дослідженнях, так і в промислових системах моніторингу, часто у поєднанні з частотними методами аналізу.

**Порівняння методів аналізу вібраційних сигналів.** Для обробки вібраційних сигналів застосовуються різні методи, серед яких найбільш поширеними є ШПФ, вейвлет-перетворення та RMS-аналіз. Кожен із них має власну область ефективного використання.

ШПФ забезпечує перехід від часового подання сигналу до частотного та дозволяє визначити домінуючі частотні складові. Цей метод є ефективним для аналізу стаціонарних процесів, однак не дає інформації про часову локалізацію частотних змін у нестационарних сигналах [11].

Вейвлет-перетворення поєднує часовий і частотний аналіз, що дає можливість виявляти короткочасні аномалії та локальні зміни вібрацій [12, 13]. Метод є інформативним для складних динамічних процесів, проте відрізняється підвищеною обчислювальною складністю.

RMS-аналіз використовується для узагальненої оцінки рівня вібрацій і відображає енергетичний стан системи за певний проміжок часу. Хоча цей метод не дозволяє визначити частотну структуру сигналу, він є простим у реалізації та ефективним для моніторингу технічного стану обладнання [14].

**Актуальність побудови експериментального стенду для вібраційної діагностики підшипників.** Підшипники кочення належать до найбільш відповідальних і навантажених елементів більшості машин та механізмів, зокрема електродвигунів, насосів, верстатів, редукторів і транспортних агрегатів. Від

їхнього технічного стану безпосередньо залежить надійність та безперебійність роботи всього обладнання. Своєчасне виявлення дефектів підшипників дозволяє запобігти аварійним ситуаціям, незапланованим простоям і значним витратам на ремонт. Саме тому вібраційна діагностика підшипників є одним із найбільш ефективних і поширених методів технічного моніторингу в сучасній промисловості [15].

У реальних умовах експлуатації обладнання вібраційні процеси мають складний характер і залежать від багатьох факторів, таких як швидкість обертання, навантаження, балансування ротора, стан опор, якість змащення та конструктивні особливості механізму. Для відтворення таких умов у лабораторному середовищі та проведення контрольованих експериментів необхідним є створення спеціалізованого експериментального стенду, який дозволяє імітувати роботу підшипника за різних режимів обертання, реєструвати вібраційні сигнали в реальному часі, досліджувати зміну параметрів вібрації при появі дефектів, а також тестувати методи цифрової фільтрації, аналізу та класифікації сигналів.

Побудова експериментального стенду створює контрольоване середовище для наукових досліджень, що дає змогу оцінити ефективність алгоритмів вібраційної діагностики, порівняти різні методи обробки сигналів та сформувати базу еталонних вібраційних даних, яка може бути використана для подальших досліджень і навчання інтелектуальних систем діагностики.

Слід зазначити, що більшість промислових систем вимірювання вібрацій є дорогими, громіздкими та орієнтованими переважно на стаціонарне використання. Крім того, такі системи часто використовують дротове з'єднання датчиків із вимірювальними модулями, що ускладнює їх застосування на рухомих або важкодоступних вузлах. У зв'язку з цим актуальним є створення компактного, безпроводного та доступного за вартістю експериментального стенду, який забезпечує автономний збір вібраційних даних, їх передачу на комп'ютер у реальному часі та подальшу цифрову обробку з побудовою графіків для аналізу технічного стану підшипника.

Практична цінність розробленого стенду полягає в можливості виконання комплексного аналізу вібраційних сигналів, зокрема визначення RMS, аналізу амплітудно-частотного спектра та відстеження змін параметрів у часі. Використання триосьового акселерометра ADXL345 у поєднанні з мікроконтролером ESP32 забезпечує достатню точність вимірювань, високу швидкість та безпроводну передачу даних, що відповідає сучасним вимогам до систем моніторингу технічного стану обладнання.

Крім того, застосування цифрових фільтрів, зокрема фільтра Калмана, дозволяє зменшити вплив шумів у вимірювальних сигналах і підвищити достовірність

оцінки стану підшипникового вузла. Таким чином, розроблений експериментальний стенд є ефективним інструментом для дослідження вібраційних процесів, відпрацювання методів діагностики та підвищення надійності машин і механізмів у реальних умовах експлуатації.

**Використання модуля ESP32 у стенді вібраційної діагностики.** Для реалізації системи збору та передавання вібраційних даних у складі експериментального стенду обрано мікроконтролер ESP32 (рис. 1.2), який поєднує високу обчислювальну продуктивність, енергоефективність і підтримку бездротових інтерфейсів Wi-Fi та Bluetooth. Завдяки цьому ESP32 є доцільним рішенням для створення компактних і мобільних систем моніторингу технічного стану обладнання.

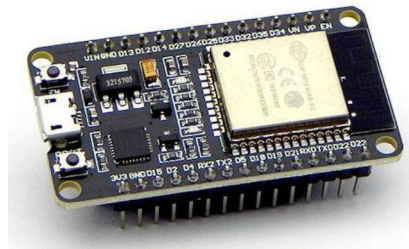


Рис. 1.2. Загальний вигляд ESP32

У даному проєкті ESP32 використовується як центральний модуль збору інформації з тривісного акселерометра ADXL345, підключеного через інтерфейс SPI [16]. Мікроконтролер здійснює опитування сенсора з фіксованою частотою дискретизації, накопичує вибірки вібраційного сигналу та передає їх бездротовим каналом Wi-Fi на комп'ютер або сервер для подальшої обробки.

Апаратна частина ESP32 базується на двоядерному 32-бітному процесорі Tensilica Xtensa LX6 з тактовою частотою до 240 МГц та внутрішньою пам'яттю обсягом 520 КБ, що є достатнім для буферизації даних і виконання первинної обробки сигналів у реальному часі. Низьке енергоспоживання, широкий діапазон робочих температур ( $-40...+85^{\circ}\text{C}$ ) і зручність програмування в середовищі Arduino IDE роблять ESP32 ефективною апаратною платформою для стенду вібраційної діагностики.

**Акселерометр ADXL345 у стенді вібраційної діагностики.** Для вимірювання вібрацій в експериментальному стенді використано тривісний цифровий акселерометр ADXL345 (рис. 1.3) [17]. Датчик забезпечує вимірювання прискорень уздовж трьох осей з роздільною здатністю до 13 біт, що дозволяє фіксувати малі коливання, характерні для початкових дефектів підшипників.

ADXL345 підтримує програмно налаштовувані діапазони вимірювання  $\pm 2\text{ g}$ ,  $\pm 4\text{ g}$ ,  $\pm 8\text{ g}$  та  $\pm 16\text{ g}$ , що дає змогу адаптувати сенсор до різних рівнів вібраційних

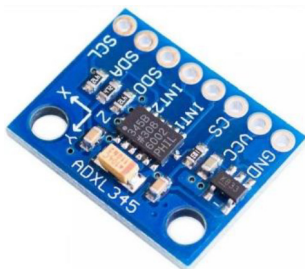


Рис. 1.3. Загальний вигляд ADXL345

навантажень. Передавання даних здійснюється через інтерфейси SPI або I2C у 16-розрядному форматі, що забезпечує сумісність із мікроконтролером ESP32.

Висока чутливість датчика (приблизно 4 мг/LSB) дозволяє виявляти незначні зміни амплітуди сигналу, які можуть свідчити про зародження дефектів, дисбаланс або зношування елементів механізму [18]. Акселерометр реєструє як статичні, так і динамічні прискорення, що робить отриманий сигнал придатним для подальшого аналізу методами ШПФ, вейвлет-перетворення та розрахунку індикаторів стану, зокрема RMS.

Завдяки низькому енергоспоживанню та компактним габаритам ADXL345 може безпосередньо встановлюватися на корпусі підшипника або двигуна, забезпечуючи ефективну та надійну реєстрацію вібраційного сигналу в складі діагностичного стенду.

**Експериментальні дослідження роботи вимірювального стенду.** Принцип роботи розробленого вимірювального стенду (рис. 1.4) базується на безперервному контролі вібраційних параметрів підшипника з подальшим аналізом отриманих сигналів для своєчасного виявлення дефектів на ранніх етапах їх розвитку [19]. Основним елементом вимірювальної системи є цифровий тривісний акселерометр ADXL345, який забезпечує точне вимірювання прискорень уздовж осей  $X$ ,  $Y$  та  $Z$ . Такий підхід дозволяє комплексно оцінювати вібраційний стан об'єкта, оскільки різні типи несправностей

підшипників проявляються у різних напрямках коливального руху.

Акселерометр ADXL345 підключений до стенду через мікроконтролер ESP32, який виконує функції збору, синхронізації та передавання вимірювальних даних. Взаємодія між сенсором і мікроконтролером реалізована за допомогою інтерфейсу I2C, що забезпечує стабільну передачу інформації та зменшує кількість необхідних електричних з'єднань.

Електричні з'єднання між компонентами стенду виконані відповідно до монтажною схемою, наведеною на рис. 1.5, а також узагальнені в табл. 1.1.

Після ініціалізації акселерометра мікроконтролер здійснює циклічне зчитування значень прискорення з заданою частотою дискретизації. Отримані дані тимчасово зберігаються у внутрішній пам'яті ESP32, де виконуються операції первинної обробки, зокрема масштабування сигналу, перетворення в фізичні одиниці та формування пакетів для подальшої передачі.

Передавання вимірювальної інформації на персональний комп'ютер здійснюється бездротовим каналом Wi-Fi, що забезпечує мобільність та зручність використання вимірювального стенду. На стороні комп'ютера дані піддаються фільтрації та аналізу з використанням програмного забезпечення, розробленого в середовищі Python. У межах програмної обробки реалізовано алгоритми цифрової обробки сигналів, зокрема фільтрацію методом Калмана, аналіз у часовій та частотній областях, обчислення RMS, спектральне перетворення та візуалізацію результатів у режимі реального часу.

**Експериментальні дослідження вібраційних характеристик справного та дефектного підшипників.**

З метою дослідження впливу реальних дефектів на вібраційні сигнали в експериментальний стенд було встановлено два підшипники типорозміру 608ZZ: справний та з дефектом зовнішнього кільця (рис. 1.6). Такий підхід дозволяє провести порівняльний аналіз

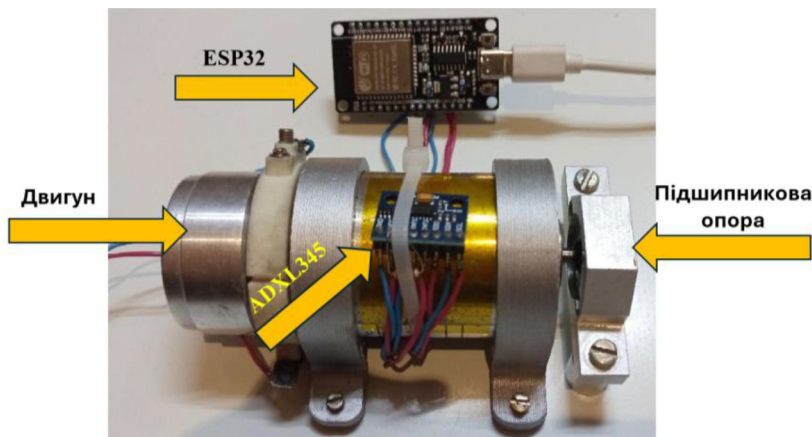


Рис. 1.4. Зібраний стенд для діагностики вібрацій підшипника

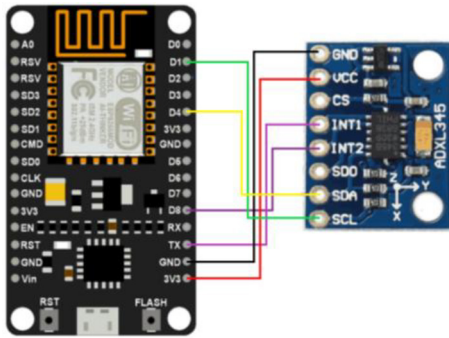


Рис. 1.5. Монтажна схема підключення акселерометра ADXL345 до мікроконтролера ESP32

Таблиця 1.1. Електричні з'єднання між ESP32 та акселерометром ADXL345

| Вивід ESP32 | Вивід ADXL345 | Призначення                                     |
|-------------|---------------|-------------------------------------------------|
| 3V3         | VCC           | Живлення акселерометра від плати ESP32          |
| GND         | GND           | Спільна точка нульового потенціалу              |
| TX          | INT1          | Канал переривань для сигналів події від ADXL345 |
| D8          | INT2          | Другий канал апаратних переривань               |
| D4          | SDA           | Лінія передачі даних інтерфейсу I2C             |
| D1          | SCL           | Лінія синхронізації інтерфейсу I2C              |

вібраційних характеристик у нормальному та пошкоджену станах.

Для перевірки працездатності стенду та формування еталонних даних спочатку проводилися вимірювання для справного підшипника. Під час експериментів вал електродвигуна обертався з постійною частотою 2000 об/хв як для справного, так і для дефектного підшипника. У результаті були отримані часові реалізації вібраційних сигналів уздовж осей  $X$ ,  $Y$  та  $Z$  акселерометра, а також обчислені відповідні значення RMS.

На рис. 1.7 наведено часові сигнали вібрацій та динаміку RMS для справного підшипника.

Аналіз сигналів показав, що для осі  $X$  коливання мають малу амплітуду та випадковий характер без виражених імпульсів, що відповідає нормальному стану доріжок кочення. Сигнал по осі  $Y$  характеризується дещо більшою амплітудою, зумовленою особливостями монтажу та передавання механічних навантажень, однак його структура залишається рівномірною

та хаотичною. Уздовж осі  $Z$  фіксується підвищений рівень вібрацій, що є очікуваним через передачу основної механічної енергії через корпус стенду, при цьому різкі викиди або аномальні імпульси відсутні.

Значення RMS для всіх осей є стабільними протягом усього інтервалу спостереження, що є характерною ознакою справного підшипникового вузла. Отримані результати відповідають типовому вібраційному профілю неушкодженого підшипника та підтверджують коректність роботи вимірювального стенду.

Для оцінки чутливості системи до дефектів у стенд було встановлено підшипник із пошкодженням зовнішнього кільця. Результати вимірювань часових сигналів і RMS наведено на рис. 1.8.

У сигналах по осі  $X$  спостерігаються періодичні ударні імпульси з вираженою циклічністю, що відповідає проходженню дефектної ділянки через зону навантаження. По осі  $Y$  амплітуда коливань зростає, а структура сигналу набуває регулярного імпульсного характеру, що свідчить про посилення механічних взаємодій у вузлі. Найбільші амплітуди зафіксовано вздовж осі  $Z$ , де спостерігаються як ударні піки, так і високочастотні флуктуації, характерні для дефектів доріжок кочення.

Графіки RMS для всіх трьох осей демонструють суттєве зростання середньоквадратичних значень та їх нестабільність у часі. Така поведінка RMS є типовою ознакою пошкодженого підшипника та різко відрізняється від стабільного рівня, характерного для справного стану.

Отримані експериментальні результати однозначно підтверджують наявність дефекту зовнішнього кільця підшипника. Сукупність періодичних імпульсів у часових сигналах, зростання амплітуд і нестабільність RMS формують характерний вібраційний портрет пошкодженого підшипникового вузла. Це підтверджує ефективність розробленого стенду для виявлення дефектів підшипників на основі аналізу вібраційних сигналів.

**Перспективи інтеграції методів штучного інтелекту.** Подальший розвиток системи вібраційної діагностики доцільно пов'язати із впровадженням методів штучного інтелекту, які здатні істотно підвищити її функціональні можливості. Штучний інтелект охоплює сукупність програмних підходів, що дозволяють обробляти великі масиви даних, виявляти приховані закономірності та формувати діагностичні висновки без безпосередньої участі оператора.



Рис. 1.6. Порівняння справного та дефектного підшипників типу 608ZZ

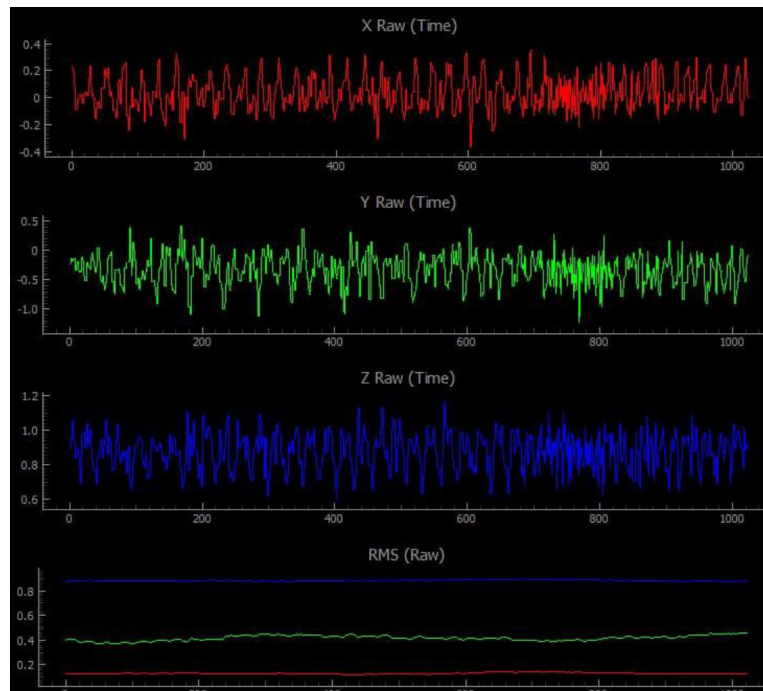


Рис. 1.7. Часові сигнали вібрацій та значення RMS для справного підшипника

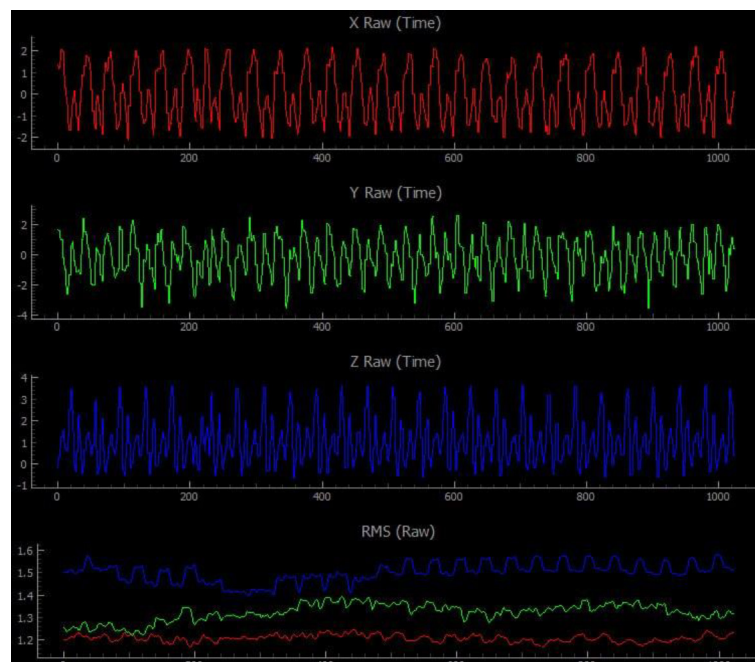


Рис. 1.8. Вібраційні сигнали та значення RMS для підшипника з дефектом зовнішнього кільця

Застосування алгоритмів машинного навчання дає змогу автоматизувати процес оцінювання технічного стану підшипників на основі накопичених вібраційних сигналів. Такі алгоритми здатні виявляти аномальні режими роботи, у тому числі слабо виражені або початкові прояви дефектів, які складно ідентифікувати традиційними методами аналізу [20].

Крім того, використання інтелектуальних моделей відкриває можливість прогнозування залишкового

ресурсу підшипників. Аналіз історичних даних експлуатації та змін вібраційних параметрів дозволяє оцінювати ймовірний момент виникнення відмови, що підвищує надійність обладнання та сприяє переходу до обслуговування за технічним станом.

Додатковою перевагою є потенціал реалізації адаптивного налаштування параметрів вимірювання, зокрема автоматичної зміни чутливості датчиків у режимі реального часу відповідно до умов роботи

обладнання. Це сприяє підвищенню точності вимірювань і зменшенню кількості хибних спрацювань.

У цілому інтеграція методів штучного інтелекту дозволяє трансформувати систему вібраційної діагностики в інтелектуальний комплекс, здатний до самостійного аналізу даних, прогнозування технічного стану та підтримки прийняття рішень.

### ВИСНОВКИ

У роботі розроблено та апробовано експериментальний стенд для вібраційної діагностики підшипникових вузлів на основі аналізу часових сигналів та RMS. Проведені експериментальні дослідження підтвердили працездатність стенду та його здатність надійно реєструвати вібраційні параметри у трьох взаємно перпендикулярних осях.

Установлено, що для справного підшипника характерними є низькоамплітудні хаотичні коливання без виражених імпульсів і стабільні значення RMS у часі. Натомість наявність дефекту зовнішнього кільця

призводить до появи періодичних ударних імпульсів у часових сигналах, зростання амплітуд коливань та нестабільності RMS, що формує типовий вібраційний портрет пошкодженого підшипникового вузла.

Порівняльний аналіз результатів для справного та дефектного підшипників показав високу чутливість запропонованої системи до зміни технічного стану об'єкта діагностики. Це підтверджує доцільність використання часових сигналів і RMS як інформативних діагностичних ознак для виявлення дефектів підшипників.

Отримані результати свідчать про ефективність розробленого стенду та можливість його практичного застосування для навчальних і дослідницьких цілей, а також для попереднього моніторингу технічного стану обертових механізмів. Подальший розвиток системи доцільно пов'язати з упровадженням методів машинного навчання для автоматизованої класифікації дефектів і прогнозування залишкового ресурсу підшипників, що дозволить підвищити точність діагностики та надійність обладнання.

### REFERENCES

- [1] Liu, W., Xu, Z., Wang, J., Tian, J., Jin, D., & Gong, Y. (2025). Efficient fine-tuned preventive monitoring models of bearing failures without prior on-site fault data [Efektyvni tonko nalahodzeni modeli zapobizhnoho monitorynhu vidmov pidshypnykiv bez poperednikh danykh pro vidmovy na ob'ekti]. *Measurement*, Vol. 242, Part D, Article № 116067. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2024.116067>
- [2] Yavtushenko, A., & Hubskeyi, S. (2025). Suchasni tekhnologii vibratsiinoi diahnostryky transportnykh zasobiv i promyslovykh mekhanizmiv [Modern technologies of vibration diagnostics of vehicles and industrial mechanisms]. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu "KhPI". Seriya: Avtomobile- ta traktorobuduvannia – Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Automobile and Tractor Engineering*, № 1, 87–96. [in Ukrainian].
- [3] Tchomeni, B. X., & Alugongo, A. (2019). Experimental diagnosis of multiple faults on a rotor-stator system by fast Fourier transform and wavelet scalogram. *Extrica*. Retrieved from: <https://www.extrica.com/article/19639>
- [4] Intertek. (n.d.). Vibration testing & vibration analysis. Retrieved from: <https://www.intertek.com/automotive/vibration-testing-mechanical-shock/>.
- [5] Fabry, S., Češkovič, M., & Češkovič Gecejová, N. (2022). Aircraft gas turbine engine vibration diagnostic method [Metod diahnostryky vibratsii hazoturbinnoho aviatsiinoho dvyhuna]. *The XVII International Scientific Conference "New Trends in Aviation Development" (NTinAD 2022), High Tatras – Nový Smokovec, Slovakia*. <https://doi.org/10.1109/NTAD57912.2022.10013635>
- [6] CNC Solutions. (n.d.). The essential guide to reducing CNC machine chatter. Retrieved from: <https://surl.li/ikssdi>
- [7] DTEC. (2024). Spivvidnoshennia mizh odyntsiamy vibration mm, mm/s, mm/s² [Relationship between vibration units mm, mm/s, mm/s²]. Retrieved from: <https://surl.li/etexnb> [in Ukrainian].
- [8] Cherkashyn, D. V., Saienko, O. F., & Hubskeyi, S. O. (2024). Vykorystannia vibrodiahnostryky dlia monitorynhu ta kontroliu tekhnichnoho stanu avtomobilnykh komponentiv [Application of vibration diagnostics for monitoring and control of the technical condition of automotive components]. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu "KhPI". Seriya: Avtomobile- ta traktorobuduvannia – Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Automobile and Tractor Engineering*, № 2, 97–107. [in Ukrainian].
- [9] Minescu, M., Stan-Marius, & Avram, L. (2015). Fault detection and analysis at pumping units by vibration interpreting encountered in extraction of oil. *Journal of the Balkan Tribological Association*, Vol. 21, № 3, 711–723. Retrieved from: <https://surl.li/dnkvhz>
- [10] UKRZAKhID. (n.d.). Vibrodiahnostryka pidshypnykiv kochennia [Rolling bearing vibration diagnostics]. Retrieved from: <https://surl.li/gxuhwr> [in Ukrainian].
- [11] Kong, Q., Siauw, T., & Bayen, A.M. (2021). Chapter 24 – Fourier transform. In: *Python programming and numerical methods* (pp. 415–443). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819549-9.00034-8>
- [12] Hanly, S. (n.d.). Vibration measurements: Vibration analysis basics. *EndaqBlog*. Retrieved from: <https://blog.endaq.com/vibration-measurements-vibration-analysis-basics>
- [13] Konstantinovskiy, T. (n.d.). Wavelet transform: A practical approach to time-frequency analysis. *Medium*. Retrieved from: <https://medium.com/pythoneers/wavelet-transform-a-practical-approach-to-time-frequency-analysis-662bdadeb08b>
- [14] Dynamox. (2023). The peak, peak to peak and RMS values in vibration analysis. Retrieved from: <https://dynamox.net/en/blog/the-peak-peak-to-peak-and-rms-values-in-vibration-analysis>

- [15] Pidshypnyk. (2022). Poshkodzhennia pidshypnykiv: prychyny vidmovy ta rozrakhunkovi resurs [Bearing damage: causes of failure and calculated service life]. Retrieved from: <https://surl.li/prmfpi> [in Ukrainian].
- [16] Arduinokit. (n.d.). ESP32 плата WiFi i Bluetooth DEVKIT ревизія V1 LunaNode32 [ESP32 WiFi and Bluetooth DEVKIT board, revision V1 LunaNode32]. Retrieved from: <https://surl.li/htnckn> [in Ukrainian].
- [17] Arduino.ua. (n.d.). 3os'ovyi akselerometr GY-291 ADXL345 [3-axis accelerometer GY-291 ADXL345]. Retrieved from: <https://surl.li/mlseyu> [in Ukrainian].
- [18] ElectronicWings. (n.d.). ADXL345 accelerometer interfacing with NodeMCU. Retrieved from: <https://www.electronicwings.com/nodemcu/adxl345-accelerometer-interfacing-with-nodemcu>
- [19] IDS Innomic. (n.d.). Vibration analysis on test stands. Retrieved from: <https://www.innomic.com/en/praxis/vibration-analysis/>
- [20] Chang, C.-W., Lee, H.-W., & Liu, C.-H. (2018). A review of artificial intelligence algorithms used for smart machine tools. *Inventions*, 3(3), 41. <https://doi.org/10.3390/inventions3030041>

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Liu, W., Xu, Z., Wang, J., Tian, J., Jin, D., & Gong, Y. (2025). Efficient fine-tuned preventive monitoring models of bearing failures without prior on-site fault data. *Measurement*, 242(Part D), Article 116067. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2024.116067>
- [2] Явтушенко, А., & Губський, С. (2025). Сучасні технології вібраційної діагностики транспортних засобів і промислових механізмів. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Автомобіле- та тракторобудування, (1), 87–96.
- [3] Tchomeni, B. X., & Alugongo, A. (2019). Experimental diagnosis of multiple faults on a rotor-stator system by fast Fourier transform and wavelet scalogram. *Extrica*. URL: <https://www.extrica.com/article/19639>
- [4] Intertek. *Vibration testing & vibration analysis*. URL: <https://www.intertek.com/automotive/vibration-testing-mechanical-shock/>
- [5] Fabry, S., Češkovič, M., & Češkovič Gecejová, N. (2022). Aircraft gas turbine engine vibration diagnostic method. In *Proceedings of the XVII International Scientific Conference "New Trends in Aviation Development" (NTinAD 2022)* (High Tatras – Nový Smokovec, Slovakia). <https://doi.org/10.1109/NTAD57912.2022.10013635>
- [6] CNC Solutions. *The essential guide to reducing CNC machine chatter*. URL: <https://surl.li/ikssdi>
- [7] DTEC. (2024). *Співвідношення між одиницями vibration: мм, мм/с, мм/с²*. URL: <https://surl.li/etexnb>
- [8] Черкашин, Д. В., Саєнко, О. Ф., & Губський, С. О. (2024). Використання вібродіагностики для моніторингу та контролю технічного стану автомобільних компонентів. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Автомобіле- та тракторобудування = *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Automobile and Tractor Construction*, (2), 97–107.
- [9] Minescu, M., Stan-Marius, & Avram, L. (2015). Fault detection and analysis at pumping units by vibration interpreting encountered in extraction of oil. *Journal of the Balkan Tribological Association*, 21(3), 711–723. URL: <https://surl.li/dnkvezh>
- [10] УКРЗАХІД. (2025). *Вібродіагностика підшипників кочення*. URL: <https://surl.li/gxuhwr>
- [11] Kong, Q., Siau, T., & Bayen, A. M. (2021). Chapter 24 – Fourier transform. In *Python programming and numerical methods* (pp. 415–443). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819549-9.00034-8>
- [12] Hanly, S. *Vibration measurements: vibration analysis basics*. Endaq Blog. URL: <https://blog.endaq.com/vibration-measurements-vibration-analysis-basics>
- [13] Konstantinovskiy, T. *Wavelet transform: a practical approach to time-frequency analysis*. Medium. URL: <https://medium.com/pythoners/wavelet-transform-a-practical-approach-to-time-frequency-analysis-662bdadeb08b>
- [14] Dynamox. (2023). *The peak, peak-to-peak and RMS values in vibration analysis*. URL: <https://dynamox.net/en/blog/the-peak-peak-to-peak-and-rms-values-in-vibration-analysis>
- [15] Pidshypnyk. (2022). *Пошкодження підшипників: причини відмови та розрахункові ресурси*. URL: <https://surl.li/prmfpi>
- [16] Arduinokit. (n.d.). *ESP32 плата Wi-Fi i Bluetooth DEVKIT ревизія V1 LunaNode32*. URL: <https://surl.li/htnckn>
- [17] Arduino.ua. *3-осьовий акселерометр GY-291 ADXL345*. URL: <https://surl.li/mlseyu>
- [18] ElectronicWings. *ADXL345 accelerometer interfacing with NodeMCU*. URL: <https://www.electronicwings.com/nodemcu/adxl345-accelerometer-interfacing-with-nodemcu>
- [19] IDS Innomic. *Vibration analysis on test stands*. URL: <https://www.innomic.com/en/praxis/vibration-analysis/>
- [20] Chang, C.-W., Lee, H.-W., & Liu, C.-H. (2018). A review of artificial intelligence algorithms used for smart machine tools. *Inventions*, 3(3), 41. <https://doi.org/10.3390/inventions3030041>

© Черкашин Д. В., Якубовський М. Д., Губський С. О., Явтушенко А. В., Бабай Ю. В.  
 Дата надходження статті до редакції: 24.11.2025  
 Дата затвердження статті до друку: 15.12.2025  
 Опубліковано: 30.12.2025

Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0