

## ПЛАТФОРМА КОМП'ЮТЕРИЗОВАНОГО ВІБРАЦІЙНОГО МОНІТОРИНГУ ДЛЯ ВБУДОВАНИХ У КОЛЕСО ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ

І. Карбовник<sup>1</sup>, І. Яворський<sup>2,3</sup>, І. Мацько<sup>2</sup>, В. Шевчик<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Львівський національний університет імені Івана Франка,  
вул. Ген. Тарнавського, 107, 79017 Львів, Україна  
[volodymyr.shevchuk@lnu.edu.ua](mailto:volodymyr.shevchuk@lnu.edu.ua), [ivan.karbovnyk@lnu.edu.ua](mailto:ivan.karbovnyk@lnu.edu.ua)

<sup>2</sup>Фізико-Механічний Інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України,  
вул. Наукова 5, Львів, 79060  
[matskoivan@gmail.com](mailto:matskoivan@gmail.com)

<sup>3</sup>Institute of Telecommunication,  
university of Science and Technology,  
Al. Pros. S. Kalinskiego, 7, 85-789, Bydgoszcz, Poland

У роботі презентується апаратно-програмна платформа для вібродіагностичного аналізу обертових механізмів вбудованих у колесо двигунів для сучасного електричного транспорту. Апаратна частина платформи керується вбудованим процесором архітектури ARM та надає можливість квазіодночасно записувати сигнал із восьми триосьових акселерометрів. Високорівневе програмне забезпечення імплементує алгоритми для аналізу вібраційних сигналів у часовій та частотній області.

*Ключові слова:* вібродіагностика, програмне забезпечення, акселерометр, електродвигун, ARM, спектр, кореляція

### Вступ

На відміну від автомобілів із двигунами внутрішнього згоряння, електромобілі є значно тихішими. Це стосується як шуму в салоні автомобіля, так і шуму, який транспортний засіб створює для оточуючих. Проте автомобілі з електродвигунами все ще генерують шум - як за рахунок контакту шин із поверхнею дороги так і через роботу усіх обертових механізмів, таких як підшипники в двигунах та підвісі автомобіля. Якщо шум контакту коліс з поверхнею дороги в основному провокується нерівністю покриття та спеціальними вирізами шин для кращого зчіплення з поверхнею, то шумовий спектр підшипників двигуна та ходової має складнішу структуру, та містить багато корисної інформації про стан самих обертових елементів [1,2].

Вірно налаштований та комп'ютеризований моніторинг вібрації дозволяє виявляти аномалії у роботі обертових елементів електродвигунів на ранніх стадіях, перед тим як вони можуть призвести до серйозних збоїв.

У цій статті представлено інноваційну інтегровану апаратно-програмну платформу вібраційного моніторингу, спроектовану для вбудованих у колесо електродвигунів, які є ключовими вузлами сучасних електротранспортних засобів. Детально розглянуто

основні складові платформи, її переваги та можливості. Платформа є результатом передових досліджень та розробок у галузі моніторингу вібрації та автоматизації та має на меті забезпечення безпеки та продуктивності у сучасному виробничому середовищі.

### Архітектура платформи

Вібродіагностична платформа iReDS - це унікальна система контролю технічного стану обертових вузлів механізмів на основі детального аналізу вібраційних сигналів. Платформа отримує інформацію із сенсорів, які встановлюються стаціонарно та дозволяє безперервно діагностувати стан вбудованих у колесо електродвигунів. iReDS дозволяє завчасно визначити погіршення їх стану і необхідність ремонту чи заміни. Узагальнена архітектура платформи показана на рис. 1.

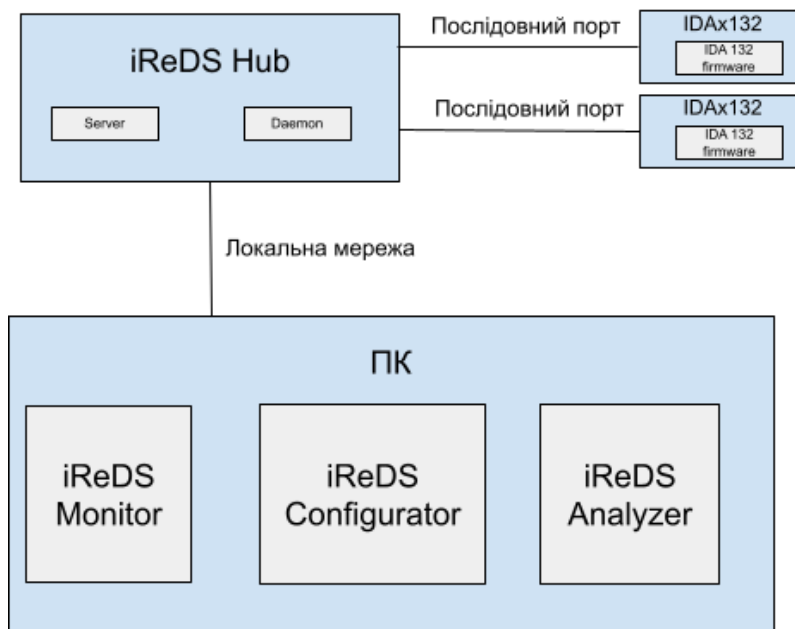


Рис. 1. Архітектура платформи iReDS.

Fig. 1. iReDS platform architecture.

Ядром платформи iReDS є iReDS Hub, основною задачею якого є запис даних із сенсорів, їх збереження та попередній аналіз за допомогою пошуку середньоквадратичного значення (надалі СКЗ). iReDS Hub реалізовано на базі Raspberry Pi 3 Model B із процесором 1.2GHz Quad-Core ARM Cortex-A53, чіпсетом Broadcom BCM2387, 1GB LPDDR2 оперативної пам'яті, micro SD картою з об'ємом 32GB [3] та з базовою периферією для мережевого з'єднання і комунікації через послідовні порти.

Для ефективного функціонування iReDS Hub (див. рис. 1, блок iReDS Hub) було розроблено два незалежні модулі програмного забезпечення - Server та Daemon. Головною задачею програми Daemon є комунікація через послідовний інтерфейс із сенсором, зчитування інформації та запис у базу даних. Також Daemon відповідає за

конфігурування цифрових сенсорів. У свою чергу, головною задачею програми Server є комунікація із клієнтськими додатками iReDS Монітор та iReDS Конфігуратор, отримання налаштувань та передача даних із бази даних для подальшого аналізу та візуалізації.

iReDS Hub комунікує з цифровими програмованими сенсорами, механічний дизайн яких спроектовано для високоточного вимірювання вібраційних параметрів у різноманітних умовах. Сенсор IDA132 базується на трьохосовому акселерометрі ADXL345 [4] і є надійним та високопродуктивним інструментом для вимірювання вібрацій та аналізу динамічних процесів. Сенсор може кріпитись до металевої поверхні за допомогою магніту, який вкручується безпосередньо в його корпус. Сенсор IDA132 складається із акселерометра та модуля Arduino Nano V3.0 AVR ATmega328 P-20AU під'єднаного через шину I2C для зчитування даних.

Високорівневе програмне забезпечення використовує з'єднання через локальну мережу для обміну інформацією з iReDS Hub. Для максимальної швидкості обчислень алгоритмів весь код програмного забезпечення написано мовами програмування C/C++ [5]. Для усіх користувацьких інтерфейсів було використано бібліотеку мови C++ Qt [6], яка також має потужний інструментарій для мережових рішень та роботи із послідовним портом. Програмне забезпечення архітектурно можна розділити на три частини.

1. iReDS Монітор - це кросплатформний код, основною задачею якого є відображення у реальному часі стану обертових механізмів відповідно до стандартів ISO 2372 та ISO 10816-1. Додатково, ReDS Monitor відповідає за запис вібраційного сигналу та автоматичний запуск і послідовною передачею цього сигналу до інших модулів для подальшого детального аналізу.
2. iReDS Конфігуратор - блок, задачею якого є налаштування платформи iReDS, а саме частоти дискретизації, періодів запису та аналізу сигналів, а також візуалізації за допомогою модуля iReDS Монітор.
3. iReDS Аналізатор - це частина коду, що отримує на вхід вібраційний сигнал та розраховує СКЗ, спектр та кореляцію по кожній з осей.
4. Vector - це окрема частина коду, яка дозволяє проводити математичні маніпуляції із вібраційними сигналами, такі як генерування чистого синуса, генерування шуму, додавання, та віднімання сигналів, 3D візуалізація та ін.

#### **Технічні характеристики**

Пристрій може експлуатуватися при температурах навколишнього середовища у діапазоні  $-10 \dots 65$  °C, при цьому акселерометри можуть функціонувати у дещо ширшому діапазоні  $-30 \dots 85$  °C.

Довжина кабелю для з'єднання iReDS Hub із сенсором може сягати 20 метрів. Маса пристрою становить 400 грам. Габаритні розміри блоку реєстрації та зберігання даних становлять 25 x 12 x 8 см, розміри акселерометра 2,5 x 4 см.

Робочий діапазон частот сенсора становить від 0,5 до 1000 Гц. Сенсор здатний вимірювати віброприскорення в діапазоні до 16g. Нерівномірність амплітудно-частотної характеристики у діапазоні від 10 Гц до 900 Гц не перевищує 5%, а в діапазоні від 0,5 Гц до 1000 Гц - 15%.

Нерівномірність на базовій частоті 160 Гц становить всього 5%.

Чутливість акселерометра залежить від діапазону вимірювань і становить: у діапазоні до 2g - 256 мВ/g, до 4g - 128 мВ/g, до 8g - 64 мВ/g та до 16g - 32 мВ/g. Чутливість акселерометра у перпендикулярних площинах не перевищує 3%.

### Комп'ютерна обробка вібросигналів

Важливою для аналізу вібраційних коливань також є форма кореляційної функції сигналів. З графіку кореляційної функції, отриманою за допомогою платформи iReDS можна оцінити потужність вібраційних коливань (значення кореляційної функції і нулі), потужність детермінованих та стохастичних коливань, присутніх у вібраційному сигналу та співвідношення сигнал / шум (рис. 2).

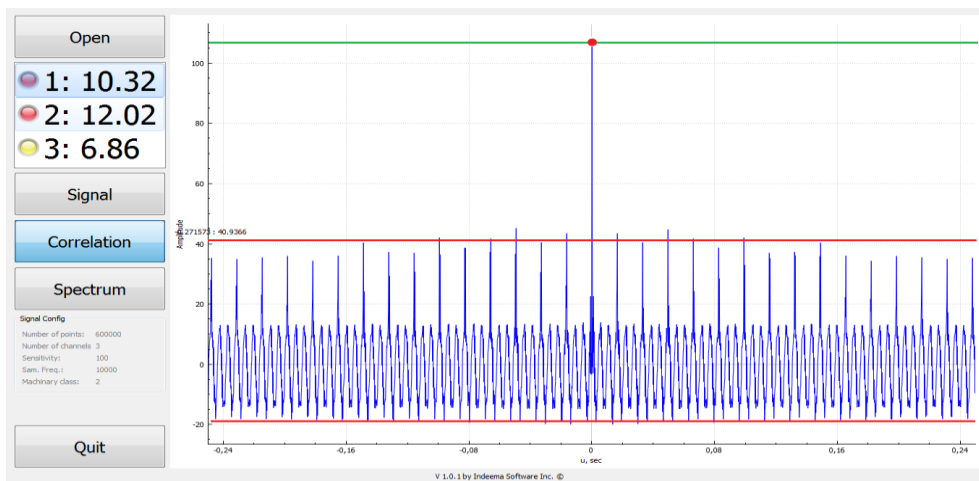


Рис. 2. Оцінювання діагностичних параметрів на платформі iReDS за кореляційною функцією.  
 Fig. 2. Using iReDS to estimate diagnostic parameters by the correlation function.

З наведеного на рис. 6 прикладу бачимо, що потужність вібраційного сигналу складає  $126 \text{ м}^2/\text{с}^4$ . Потужність детермінованих коливань визначається потужністю регулярних коливань хвоста кореляційної функції (між червоними лініями) і для цього сигналу становить  $60 \text{ м}^2/\text{с}^4$ . Потужність стохастичних коливань визначається як різниця між повною потужністю вібраційного сигналу та потужністю незатухаючого хвоста кореляційної функції (між зеленою та червоною лініями) і для даного сигналу становить  $66 \text{ м}^2/\text{с}^4$ . Таким чином співвідношення сигнал / шум для цього сигналу рівне 1,524.

Ще однією особливістю кореляційної функції є те, що її хвіст дає додаткову інформацію про стан обстежуваного вузла. Так з наведеного графіку кореляційної функції видно, що її хвіст містить потужні викиди, що вказує на те, що рухомі елементи механізму зачіпають за нерухомі або на взаємодію елементів механізму з присутнім розвинутим дефектом.

Спектр вібраційних сигналів допомагає зрозуміти структуру вібраційних коливань у частотній області. У спектрі вібраційних сигналів відображається інформація про амплітуди та частоти присутніх у вібраційному сигналі коливань (рис. 3).

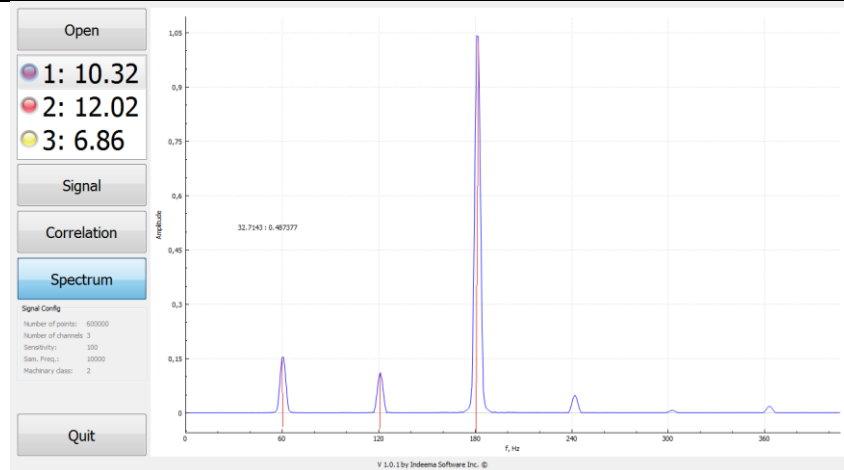


Рис. 3. Дослідження структури вібраційних сигналів за спектральною густиною потужності.  
Fig. 3. Insight into the spectral power density of vibrational signals.

Так, з рис. 3 видно, що у вібраційному сигналі присутні коливання з частотою 60 Гц, 120 Гц та 180 Гц, з амплітудами відповідно  $0,15 \text{ м}^2/\text{с}^4$ ,  $0,12 \text{ м}^2/\text{с}^4$  та  $1,0 \text{ м}^2/\text{с}^4$ . Ці коливання породжені обертанням валу механізму (3600 об/хв).

Таким чином, аналізуючи вібраційний сигнал та його характеристики можна отримати інформацію про технічний стан кожного з обстежуваних вузлів. Інформація про те як у характеристиках вібраційних сигналів проявляються ті чи інші сигнали наведена нижче.

### Практичне використання платформи iReDS

На рис. 4 показано запис вібраційного сигналу з осі Y вбудованого в колесо двигуна за відсутності розбалансовуючого вантажу та відповідний спектр.

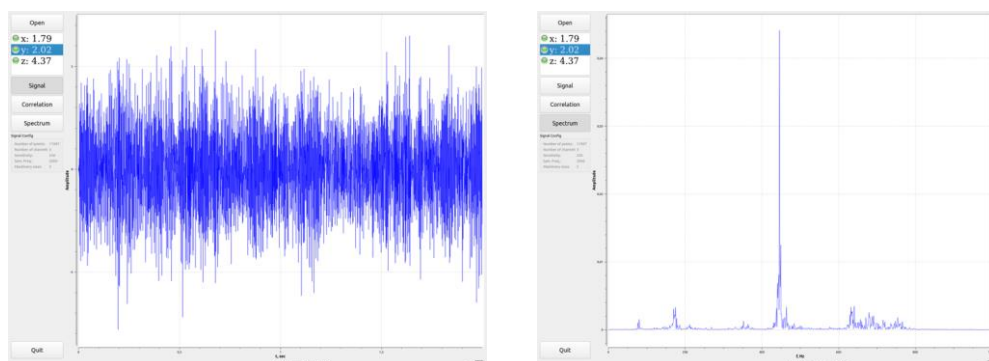


Рис. 4. Вібраційний сигнал однієї з осей вбудованого в колесо двигуна (експеримент без порушення балансування).  
Fig. 4. Single axis vibrational signal from the balanced in-wheel motor.

Аналогічні дані для вібраційного сигналу з осі Y вбудованого в колесо двигуна при наявності розбалансовуючого вантажу показано на рис. 5.

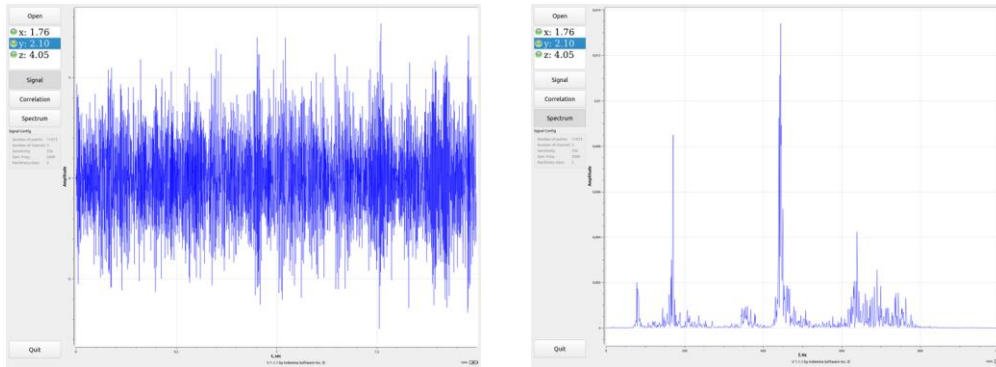


Рис. 5. Вібраційний сигнал однієї з осей вбудованого в колесо двигуна (експеримент додаванням розбалансовуючого вантажу).

Fig. 5. Single axis vibrational signal from the in-wheel motor with an artificially introduce imbalance.

Для даних швидкостей обертання чітко проявляється різниця в спектрі при додаванні розбалансу, що проявляється у суттєвому перерозподілі спектральної потужності – компонента в околі 160 Гц майже вирівнюється за амплітудою з основною компонентою, яка розташована поблизу 450 Гц.

### Висновок

У роботі презентована апаратно-програмна платформа, призначена для вібродіагностичного аналізу обертових механізмів, інтегрованих у колісні двигуни сучасних електричних транспортних засобів. Основою апаратної частини платформи служить вбудований процесор з архітектурою ARM, який забезпечує ефективне управління даними, отриманими від восьми триосьових акселерометрів, дозволяючи здійснювати квазіодносимультанний запис вібраційних сигналів.

Використання розробленої платформи дало змогу провести детальний аналіз вібраційних сигналів як у часовій, так і у частотній областях, завдяки чому можливо ідентифікувати характеристики вібрацій від обертових механізмів. Високорівневе програмне забезпечення, імплементоване в платформі, включає в себе алгоритми для розширеного аналізу отриманих даних, що сприяє глибшому розумінню вібраційних процесів у динамічних системах.

Проведені виміри на вбудованому в колесо двигуні з розбалансуванням та без виявили значну різницю у вібраційних характеристиках, що підтвердило ефективність запропонованої платформи для виявлення аномалій в роботі електричних транспортних засобів.

- [1] *Яворський І.* Математичні моделі та аналіз стохастичних коливань. – Львів: ФМІ НАНУ, 2013. – 804 с.
- [2] *Duvigneau F.* Vibration Analysis of an Electric Wheel Hub Motor at Stationary Operating Points / Duvigneau F., Koch S., Daniel C., Woschke E., Gabbert U. // Proceedings of the 10th International Conference on Rotor Dynamics – IFToMM. – Springer Switzerland, 2019. – P. 51-64.
- [3] Raspberry Pi 3 Model B datasheet [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.electronicdatasheets.com/datasheet/56f13a20e34e248d34bd2ca6.pdf>
- [4] ADXL345 Datasheet [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/adx1345.pdf>
- [5] *Stroustrup B.* The C++ Programming Language, 4th Edition. – Addison-Wesley Professional Publication, 2013. – P. 1376.
- [6] Qt 5.12 documentation [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://devdocs.io/qt~5.12/>

## COMPUTERIZED VIBRATION MONITORING PLATFORM FOR IN-WHEEL ELECTRIC MOTORS

**I. Karbovnyk<sup>1</sup>, I. Yavorsky<sup>2,3</sup>, I. Matsko<sup>2</sup>, V. Shevchyk<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Ivan Franko National University of Lviv, 107 Tarnavskoho St., UA-79017 Lviv, Ukraine  
[volodymyr.shevchyk@lnu.edu.ua](mailto:volodymyr.shevchyk@lnu.edu.ua), [ivan.karbovnyk@lnu.edu.ua](mailto:ivan.karbovnyk@lnu.edu.ua)*

<sup>2</sup>*Karpenko Physico-Mechanical Institute of National Academy of Science of Ukraine,  
Naukova Str. 5, Lviv, Ukraine  
[matskoivan@gmail.com](mailto:matskoivan@gmail.com)*

<sup>3</sup>*Institute of Telecommunication, University of Science and Technology,  
Al. Pros. S. Kalinskiego, 7, 85-789, Bydgoszcz, Poland*

The work presents a comprehensive hardware-software platform designed for vibrodiagnostic analysis of rotating mechanisms integrated into the wheel motors of modern electric vehicles. At the core of the hardware platform is an advanced embedded processor based on ARM architecture, ensuring robust and efficient data management for handling the high throughput of data from eight triaxial accelerometers. These accelerometers can be placed to capture vibrational responses from various parts of the in-wheel motor, allowing quasi-simultaneous recording of signals and ensuring minimal latency for accurate diagnostics.

The software component of the system incorporates high-level algorithms designed for extensive data analysis. These algorithms facilitate the processing of vibrational signals in both time and frequency domains, extracting meaningful patterns and characteristics indicative of the health and performance of the rotating mechanisms. This dual-domain analysis provides a comprehensive understanding of the vibrational behaviors, helping identify both periodic and non-periodic anomalies.

To validate the platform's effectiveness, measurements were conducted on an in-wheel motor under two conditions: with and without imbalance. The vibrational signals recorded in both

scenarios were subjected to detailed analysis using the platform's software. The results revealed a significant difference in vibration characteristics between the balanced and imbalanced conditions. The platform detected subtle variations in amplitude and frequency indicative of imbalance, confirming its capability to identify and diagnose faults in real-world applications.

The successful deployment of this platform opens new possibilities for predictive maintenance and real-time monitoring of state-of-the-art in-wheel motors widely used in modern electrical transportation. By identifying potential issues before they lead to significant expensive-to-repair failures, the platform helps reduce downtime and maintenance costs, enhancing the overall reliability of electric vehicles.

*Key words:* vibration diagnostics, software, accelerometer, electric motor, ARM, spectrum, correlation

*Стаття надійшла до редакції 01.04.2024.*

*Прийнята до друку 18.06.2024.*