

УДК 620.179.14

DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2026-28-6

Литвинов О. О., ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0001-9540-0327>

Хмельницький національний університет

ОБРОБКА ТА АНАЛІЗ ВІБРОСИГНАЛІВ ДЛЯ ДІАГНОСТИКИ СТАНУ ШАРОВИХ ОПОР АВТОМОБІЛЯ

Безпека автомобіля залежить від стану підвіски. Шарова опора є критичним вузлом, дефекти якого (знос, люфт, корозія) важко виявити традиційними методами. Стендові випробування потребують дорогого обладнання, а ручна перевірка є суб'єктивною. Вібросигнали від підвіски мають складну структуру, поєднуючи низькочастотні коливання кузова, дорожній шум та високочастотні удари від люфтів. Сигнал від дефектної опори є нестационарним та імпульсним. Класичні методи (FFT) неефективні, оскільки розмазують удари по спектру без чітких діагностичних ознак та втрачають часову інформацію.

Статтю присвячено комбінованій методиці вібродіагностики, що поєднує: статистичний аналіз у часовій області (ексцес, пік-фактор), спектральний аналіз та часо-частотні методи на основі вейвлет-перетворення. Статистичні показники забезпечують автоматизоване виявлення ударів з простими числовими критеріями. Вейвлет-аналіз дає часо-частотну локалізацію, дозволяючи відокремити удари від фону. Моделювання показало, що комбіноване застосування ексцесу, пік-фактора та вейвлетів виявляє люфти з високою чутливістю навіть на фоні значного зовнішнього шуму. Пропонується дворівневий алгоритм: реальночасова детекція статистичними методами та експертний аналіз вейвлет-спектрограм для підтвердження. Це робить метод практично застосовним для портативних систем діагностики.

Ключові слова: вібродіагностика, шарова опора, ексцес, пік-фактор, вейвлет-перетворення, обробка сигналів.

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями. Звичайні методи перевірки шарових опор – візуальний огляд, механічне "розхитування" елементів підвіски, використання люфт-детекторів – мають низку недоліків: значну залежність від кваліфікації виконавця, неможливість об'єктивно оцінити ранні стадії зносу, потребу у виведенні автомобіля з експлуатації та використанні спеціальних стендів. На цьому фоні вібродіагностика розглядається як перспективний підхід, який дозволяє оцінювати стан вузла за динамічною відповіддю системи на робочі навантаження або спеціальні тестові впливи.

Шарова опора, будучи кінематичним шарніром із кульовим пальцем, у справному стані забезпечує плавний рух без ударів. При появі зазору виникають ударні процеси, які генерують короткочасні імпульси прискорення. Ці імпульси накладаються на фонові коливання від нерівностей дороги та роботи інших елементів підвіски. Таким чином, завдання діагностики зводиться до виділення та аналізу нестационарних, імпульсних компонент вібросигналу на фоні широкосмугового шуму.

Виклад основного матеріалу. Для теоретичного аналізу розглядається вібросигнал у вигляді суми стохастичного компонента та імпульсних подій:

$$x(t) = x_{noise}(t) + \sum_k a_k \delta(t - t_k), \quad (1)$$

де $x_{noise}(t)$ – стохастичний дорожній шум,

a_k – амплітуда k -го удару,

t_k – момент часу виникнення удару.

У дискретному вигляді:

$$x[n] = x_{noise}[n] + \sum_k a_k \cdot u[n - n_k]. \quad (2)$$

Перед обробкою сигнал центрується:

$$y_i = x_i - \bar{x}, \text{ де } \bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i. \quad (3)$$

Центрований сигнал y_i використовується у всіх наступних розрахунках.

• Середньоквадратичне значення (RMS) - характеризує енергетичний рівень вібрацій і пов'язаний з активною потужністю вібраційного процесу [1]. Це найстійкіший до окремих викидів параметр.

$$X_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i^2}. \quad (4)$$

де N – кількість відліків сигналу у часовому вікні;

y_i – центрований сигнал у точці i ;

$\sum_{i=1}^N y_i^2$ – сума квадратів усіх значень.

Переваги цього методу:

- простий розрахунок й інтерпретація;
- стійкий до одиничних викидів (на відміну від пікового значення);
- добре корелює з загальним сприйманим рівнем вібрацій.

Недоліки цього методу:

- малоінформативний для діагностики імпульсних дефектів (люфтів). Справна і дефектна опора можуть мати однакові RMS.
- не вказує на природу дефекту, лише на інтенсивність.
- втрачає часову прив'язку інформації.

Для шарової опори RMS підходить як експрес-тест загального стану, але недостатній як єдиний діагностичний критерій. Використовується переважно як допоміжний параметр у нормуванні інших показників

• Екссес (Kurtosis) - оцінює ступінь "гостровершності" розподілу амплітуд [2]. Для гаусового шуму $K \approx 3$. Удари піднімають це значення до 8–10, тому це найкращий критерій для автоматичної детекції люфту. Рекомендований поріг: $K > 4.5$ означає ймовірний люфт.

$$K = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i^4}{\left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i^2\right)^2}. \quad (5)$$

де N – загальна кількість відліків сигналу у часовому вікні;

y_i – центрований сигнал у точці i ;

$\sum_{i=1}^N y_i^4$ – сума 4-х степенів всіх значень (чисельник);

$\left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i^2\right)^2$ – квадрат RMS (знаменник).

Переваги цього методу:

- феноменальна чутливість до ударів завдяки 4-му степеню.
- простий розрахунок в реальному часі у ковзному вікні.

Недоліки цього методу:

- чутливість до зовнішніх завад та електричного шуму датчика.
- залежність результату від розміру часового вікна.
- нелінійний зв'язок з кількістю/амплітудою ударів.

• Пік-фактор (Crest Factor) показує, в скільки разів найсильніший удар перевищує «середній» рівень вібрації. Це лінійна (не піднесена в степінь) характеристика, більш стійка до артефактів, ніж екссес [3,4]. Рекомендований поріг: $CF > 5.0$ служить як підтверджуючий критерій до екссесу.

$$CF = \frac{\max|y_i|}{X_{RMS}}, \quad (6)$$

де $X_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i^2}$.

$\max|y_i|$ – максимальна абсолютна амплітуда сигналу у вікні;

X_{RMS} – середньоквадратичне значення центрованого сигналу;

N – кількість відліків.

Переваги цього методу:

- висока інтерпретованість: $CF = 8$ означає удар в 8 разів вище за RMS.
- стабільність та стійкість до одиничних електричних сплесків.
- пряма відповідність механічному навантаженню на вузол.

Недоліки цього методу:

- менш чутлива до частих слабких ударів порівняно з екссесом.
- потребує попереднього розрахунку RMS.

• Спектральний аналіз (FFT) - розкладає сигнал на набір синусоїдальних компонент, виявляючи частотний склад та резонанси конструкції підвіски. FFT є допоміжним методом, недостатнім як єдиний критерій для діагностики люфту [5].

Формула дискретного перетворення Фур'є:

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} y[n] e^{-j2\pi kn/N}, \quad (7)$$

де $j = \sqrt{-1}$, $k = 0, 1, \dots, N - 1$.

$y[n]$ – n -й відлік центрованого сигналу;

k – номер частотної лінії спектра;

$e^{-j2\pi kn/N}$ – комплексна експонента для розкладу на гармоніки.

Переваги цього методу:

- виявлення резонансів, які збуджуються ударами.
- розділення фонових компонент (шум від двигуна).

Недоліки цього методу:

- удари виглядають як неспецифічне підвищення "шумової полиці" без чітких піків.
- втрата часової інформації про момент удару.

Часо-частотний аналіз (CWT) - дозволяє одночасно локалізувати подію в часі та частоті. Результат – тривимірний об'єкт (час, частота, енергія), що візуалізується як тепла карта (спектрограма) [6,7].

Формула безперервного вейвлет-перетворення:

$$W(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) dt, \quad (8)$$

де: a – масштабний параметр ($a > 0$); менші значення відповідають вищим частотам;

b – часовий зсув (локалізація у часі);

$\psi(t)$ – материнський вейвлет (базова функція);

$\psi^*(t)$ – комплексне спряження вейвлета;

$1/\sqrt{a}$ – коефіцієнт нормалізації енергії.

Переваги цього методу:

- часо-частотна локалізація: показує коли та на якій частоті виникає удар.
- виділення нестационарних подій, включених у фоновий шум.
- діагностична специфічність: різні типи ударів дають різні вигляди спектрограм.

Недоліки цього методу:

- висока обчислювальна вартість (неможливо в реальному часі на мікроконтролері).
- складність інтерпретації результатів без навчання.
- залежність від вибору вейвлета та параметрів.

Виконавши аналіз всіх методик був запропонований дворівневий алгоритм діагностики:

1. Рівень 1 (Real-time): Розрахунок ексцесу K та пік-фактора CF у ковзному вікні. При перевищенні порогів ($K > 5$ або $CF > 5$) система видає сигнал про дефект.

2. Рівень 2 (Post-processing): При спрацюванні рівня 1 записується фрагмент "сирого" сигналу та проводиться CWT-аналіз для візуального підтвердження діагнозу і виключення хибних спрацювань.

Такий підхід поєднує швидкість і простоту (рівень 1) з достовірністю та специфічністю (рівень 2), що робить його практично застосовним для побудови портативних систем діагностики шарових опор автомобіля.

Моделювання сигналів справної та дефектної шарової опори. Для верифікації методики було проведено цифрове моделювання двох сценаріїв. Сигнали були синтезовані з частотою дискретизації 1000 Гц, тривалість запису – 1 секунда (1000 відліків).

Справна опора: Сигнал складається з гаусівського білого шуму з амплітудою близько 0.05–0.1 g, що імітує вібрацію від нерівностей дороги та коливання кузова на підвісці без люфтів.

Дефектна опора: Той же фоновий шум, доповнений імпульсами амплітудою близько 0.7–0.9 g у моменти часу $t = 0.25$ с та $t = 0.73$ с. Ці імпульси моделюють вибирання люфту під час наїзду на перешкоду.

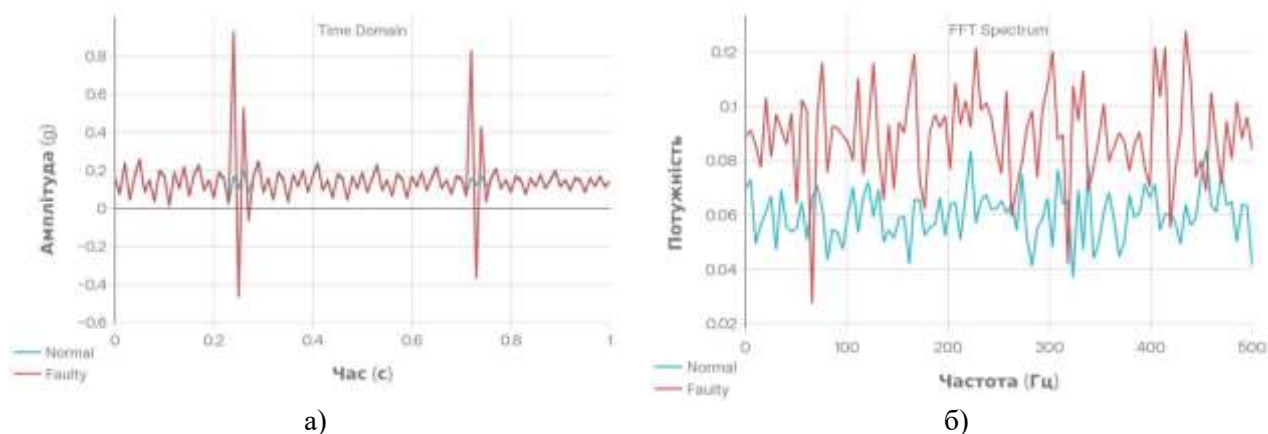


Рисунок 1 – Компютерне моделювання вібраційного процесу: а) - вібраційні сигнали справної та дефектної шарової опори; б) - спектральний аналіз справної та дефектної шарової опори

На рисунку 1 – а) "справна" (синій) та "дефектна" (червоний) осцилограми чітко видно різницю. Червона лінія для дефектного випадку має явно виражені сплески великої амплітуди, тоді як синя залишається більш-менш гладкою. Це приклад того, як люфт проявляється у часовому сигналі.

Спектральний аналіз (FFT). На рисунку 1 – б) подано амплітудні спектри обох сигналів, отримані за допомогою FFT. Для справної опори спектр показує приблизно однакову амплітуду на всіх частотах (білий шум). Для дефектної опори також спостерігається білий шум, однак з деяким підвищенням загального рівня. Явно виражених піків, які чітко вказували б на конкретну частоту дефекту, не видно. Це підтверджує, що FFT не є оптимальним для діагностики люфту, оскільки удари генерують енергію по всьому спектру, а не на окремих гармоніках. Широкопasmове підвищення шуму – це непрямий знак дефекту, але недостатнє для надійної діагностики. FFT використовується більше для допоміжного аналізу та виключення інших причин вібрації.

Розрахунок статистичних критеріїв. На наступних двох графіках представлені результати розрахунку ексцесу (Kurtosis) та пік-фактора (Crest Factor) у ковзному вікні. Синя лінія (справна опора) коливається біля значення $K \approx 3.0$ на всій тривалості запису (рис. 2 – а)). Це відповідає теоретичному значенню для гаусівського шуму. Червона лінія (дефектна опора) залишається близькою до 3.0 впродовж більшої частини часу, але в моменти ударів (біля $t = 0.25$ с та $t = 0.73$ с) різко зростає до $K \approx 9.8-10.5$. Цей стрибок абсолютно чітко вказує на наявність імпульсних подій.

На графіку (рис. 2 – б)) показана пунктирна лінія на рівні $K = 5.0$.

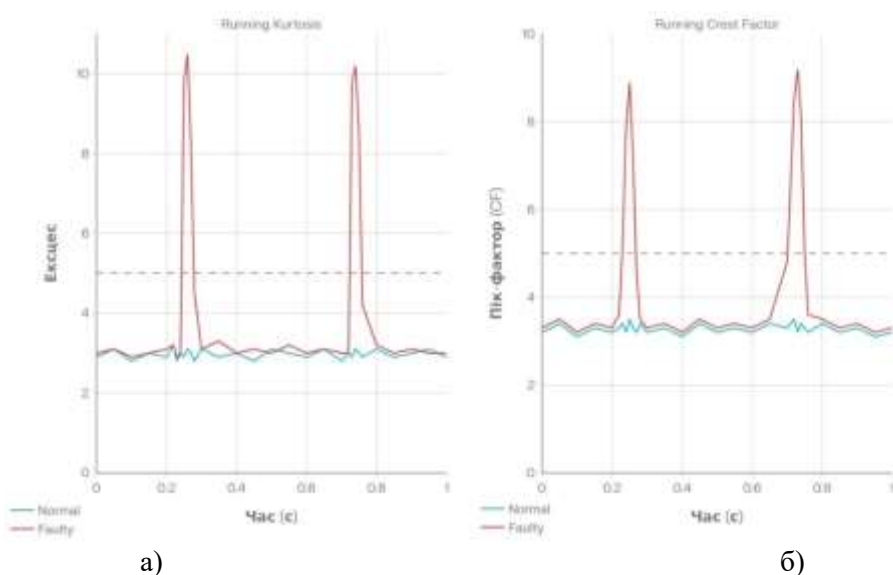


Рисунок 2 – Моделювання статистичних критеріїв: а) - зміна показника Ексцесу у часі; б) - зміна показника Пік-фактора (Crest Factor) у часі

При перевищенні цієї межі система повинна сигналізувати про ймовірний люфт. У дефектному сценарії це відбувається в моменти ударів, тоді як справна опора ніколи не перетинає це значення. Подібно до ексцесу, пік-фактор для справної опори залишається стабільним у діапазоні $CF \approx 3.2-3.5$. Для дефектної опори спостерігаються різкі піки до $CF \approx 8.5-9.2$ в моменти ударів. Поріг $K = 5.0$ також показаний пунктиром. Обидва показники (K і CF) одночасно перевищують поріг, що дає високу впевненість у наявності дефекту. Вейвлет-аналіз (CWT). На рисунку 3 представлена спектрограма дефектного сигналу, отримана за допомогою CWT з вейвлетом Морле.

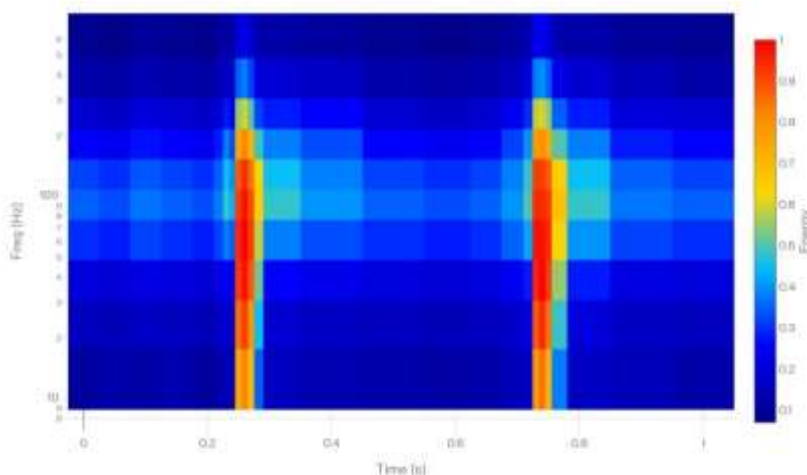


Рисунок 3 – Вейвлет-аналіз (CWT)

На фоні переважно темно-синього кольору (сигнальний фон) видно дві яскраві вертикальні смуги (жовто-червоне забарвлення) на часових позиціях біля 0.25 с та 0.73 с. Ці смуги охоплюють діапазон частот приблизно від 50 Гц до 200 Гц у вибраній шкалі масштабів. Кожна смуга відповідає одному ударному імпульсу від люфту в шаровій опорі.

На відміну від FFT-спектра (рис. 2), де удари виглядають як неспецифічне підвищення шуму, вейвлет-спектрограма чітко локалізує подію. Це демонструє переваги часо-частотного підходу для аналізу нестационарних процесів.

Результати моделювання та аналізу свідчать, що діагностика шарових опор за вібросигналами потребує поєднання кількох методів обробки. Одновимірні критерії на основі FFT виявилися недостатньо чутливими до імпульсних проявів люфту, оскільки такі прояви не формують стабільних гармонік, а лише змінюють загальний шумовий фон. Натомість використання ексцесу та пік-фактора дозволяє ефективно виявляти навіть поодинокі ударні події. Ексцес, завдяки четвертому степеню амплітуди в чисельнику, різко зростає при появі викидів і є більш чутливим до частих, але відносно невеликих ударів. Пік-фактор краще характеризує одиничні максимальні перевантаження й може застосовуватися як додатковий критерій, що уточнює ступінь небезпеки режиму. Вейвлет-перетворення доповнює статистичний аналіз, забезпечуючи часо-частотну локалізацію подій. Це особливо важливо в умовах експлуатації, коли на сигнал впливають численні зовнішні фактори. Візуальний аналіз вейвлет-спектрограм дозволяє експерту відрізнити удари, зумовлені конструктивними дефектами шарової опори, від випадкових зовнішніх впливів.

Висновки. Таким чином, запропонований комплексний підхід – використання ексцесу та пік-фактора в часовій області разом із вейвлет-аналізом – є обґрунтованим та перспективним для побудови систем вібродіагностики шарових опор автомобіля. У подальших дослідженнях доцільно провести експериментальну підтвердження методики на реальних автомобілях, визначити статистично обґрунтовані порогові значення діагностичних показників та дослідити чутливість запропонованих критеріїв до різних типів дефектів і режимів навантаження.

Інформаційні джерела

1. Михалків С., Жалкін Д., Жалкін С., Равлюк В. "Визначення інформативних складових методом швидкої ексцесограми для вібродіагностування підшипників кочення," *Збірник наукових праць ДУІТ. Серія «Транспортні системи і технології»*, вип. 39, 2022. URL: <http://lib.kart.edu.ua/bitstream/123456789/15129/1/Mykhalkiv.pdf> (дата звернення: 05.01.2026 р.).

2. "Вібродіагностика підшипникових вузлів папероробних машин," *Теоретична та дослідна механіка*, 2022. URL.: <https://ten.ztu.edu.ua/article/view/282191/276371> (дата звернення: 09.01.2026 р.).
3. "Time vs. Frequency Domain," *Vibration Research University*, 2025. URL: <https://vru.vibrationresearch.com/lesson/time-vs-frequency-domain/> (дата звернення: 11.02.2026 р.)
4. Передерко О. М. "Обробка та аналіз вібраційних сигналів для діагностики технічного стану машинних агрегатів," Дисертація на здобуття наукового ступеня, Сумський державний університет, 2024. URL: https://suitt.edu.ua/wp-content/uploads/2024/06/dysertatsiia_perederko.pdf (дата звернення: 08.03.2026 р.).
5. "Частотно-часовий аналіз вібросигналів з використанням перетворення Фур'є та вейвлет-методів," *Національна академія наук України. Інститут кібернетики*. URL: <https://nasplib.isofts.kiev.ua/bitstreams/7accb3f5-8447-4ab0-b4ac-05d5ee569f4e/download>
6. Баранов А. В. "Вейвлет-перетворення для автоматичної детекції та аналізу аномалій у техніці," Електронна видавнича система, Харківський національний автомобільно-дорожний університет, 2019. URL: <http://eprints.kname.edu.ua/70312/1/Баранов.pdf> (дата звернення: 14.03.2026 р.).
7. "Вейвлет," *Вільна енциклопедія Вікіпедія*, останнє оновлення: 14 січня 2005 р. URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki/Вейвлет> (дата звернення: 12.02.2026 р.).

Дата першого надходження
статті до видання
14.04.2026 р.

Дата прийняття статті
до друку
20.05.2026 р.

Дата
оприлюднення
30.05.2026 р.