

*Д. В. ЧЕРКАШИН, О. Ф САЄНКО, А. В. ЯВТУШЕНКО, Ю. В. БАБАЙ, С. О. ГУБСЬКИЙ*

## ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ВІБРАЦІЙ ЗА ДОПОМОГОЮ ШВИДКОГО ПЕРЕТВОРЕННЯ ФУР'Є ТА ВЕЙВЛЕТ-ПЕРЕТВОРЕННЯ

У статті розглянуто застосування методів обробки вібраційних сигналів для діагностики технічного стану роторних систем. Проведено порівняльний аналіз швидкого перетворення Фур'є (ШПФ), безперервного (БВП) та дискретного (ДВП) вейвлет-перетворення з метою виявлення аномалій та імпульсних збурень. ШПФ дозволяє оцінити спектральний склад сигналу, однак не дає інформації про час появи частот. На відміну від нього, БВП та ДВП забезпечують часо-частотну локалізацію та виявлення прихованих дефектів, що є ключовим для нестационарних процесів. Отримані результати з експериментального стенда RK-4 підтверджують ефективність вейвлет-аналізу при високошвидкісному обертанні ротора та моделюванні дефектів, таких як дисбаланс, тріщина чи тертя. Запропоноване поєднання методів дозволяє покращити точність діагностики та реалізувати ефективний моніторинг стану обладнання.

Ключові слова: вібраційна діагностика, швидке перетворення Фур'є, безперервне вейвлет-перетворення, дискретне вейвлет-перетворення, аналіз сигналів, роторна система, дисбаланс, нестационарний процес.

*D. CHERKASHYN, O. SAIENKO, A. YAVTUSHENKO, Y. BABAI, S. HUBSKYI*

### COMPARATIVE ANALYSIS OF VIBRATIONS USING FAST FOURIER TRANSFORM AND WAVELET TRANSFORM

The article examines the application of vibration signal processing methods for diagnosing the technical condition of rotor systems. A comparative analysis of the Fast Fourier Transform (FFT), Continuous Wavelet Transform (CWT), and Discrete Wavelet Transform (DWT) was conducted to detect anomalies and impulsive disturbances. FFT enables the evaluation of the spectral content of a signal but lacks time localization of frequency components. In contrast, CWT and DWT provide time-frequency localization and allow the identification of hidden defects, which is crucial for analyzing non-stationary processes. Experimental results obtained from the RK-4 test bench confirm the effectiveness of wavelet analysis for high-speed rotor operation and modeling of faults such as imbalance, cracks, or friction. The proposed combination of methods improves diagnostic accuracy and enables efficient condition monitoring of equipment.

**Keywords:** vibration diagnostics, fast Fourier transform, continuous wavelet transform, discrete wavelet transform, signal analysis, rotary system, imbalance, non-stationary process.

#### Вступ.

Вібраційна діагностика є одним із найефективніших методів технічного контролю стану обертового обладнання [1, 2]. Вона дозволяє виявляти дефекти ще на ранніх стадіях їх розвитку шляхом аналізу сигналів, отриманих із вібраційних сенсорів [3]. У сучасних умовах особливого значення набуває застосування математичних методів обробки сигналів, зокрема перетворення Фур'є та вейвлет-перетворень, які дають змогу точно визначити характер, локалізацію й причину аномалій у роботі машин і механізмів.

#### Мета та постановка задачі.

Метою даної роботи є порівняльний аналіз ефективності ШПФ та вейвлет-перетворень (безперервного та дискретного) для обробки вібраційних сигналів у задачах технічної діагностики. Особливу увагу приділено здатності кожного методу виявляти ознаки несправностей у нестационарних режимах роботи обладнання.

ШПФ широко використовується для спектрального аналізу сигналів і дозволяє виявляти частотні компоненти. Однак його обмеження полягає у відсутності часової локалізації, що знижує ефективність при аналізі короткочасних або імпульсних збурень. Натомість вейвлет-перетворення забезпечують часо-частотну деталізацію сигналу, що дає змогу ідентифікувати момент появи аномалій.

Задачею є дослідити та порівняти ефективність зазначених методів при аналізі вібрацій, отриманих у лабораторних умовах із роторної установки з моделюванням дефектів. У рамках роботи буде побудовано спектри Фур'є та скейлограми вейвлет-перетворень, визначено їх інформативність та надано рекомендації щодо вибору методу залежно від типу сигналу [4].

#### Аналіз та перетворення Фур'є.

**Загальна характеристика перетворення Фур'є.** Аналіз Фур'є є одним із найважливіших інструментів у сучасній вібраційній діагностиці. Його основна ідея полягає у представленні складного сигналу (наприклад, вібраційного сигналу з датчика) у вигляді суми гармонічних (синусоїдальних) коливань різних частот, амплітуд і фаз.

Цей метод дозволяє визначити, які частоти присутні у сигналі, та оцінити їхню інтенсивність [5]. Частотний спектр сигналу, отриманий за допомогою перетворення Фур'є, широко використовується для виявлення технічних несправностей [6], таких як:

- дисбаланс обертових деталей;
- розцентрування валів;
- тріщини або надломи;
- нерівномірне тертя в підшипниках тощо.

**Основне рівняння швидкого перетворення Фур'є.** ШПФ – це алгоритм, що ефективно обчислює дискретне перетворення Фур'є (ДПФ). Він дозволяє перетворити сигнал із часової області в частотну [7].

Основне рівняння ДПФ виглядає так:

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n \cdot e^{-j\frac{2\pi}{N}kn}, \quad k = 0, 1, \dots, N-1$$

де  $X_k$  – спектральна складова сигналу на частоті  $k$ ;  
 $x_n$  – вхідний сигнал у часовій області (відліки сигналу);  
 $N$  – загальна кількість відліків сигналу;  
 $j$  – уявна одиниця ( $j^2 = -1$ );  
 $e^{-j\frac{2\pi}{N}kn}$  – комплексна експонента, що описує гармоніки.

ШПФ – це ефективна реалізація ДПФ, яка має обчислювальну складність  $O(N \log N)$  замість  $O(N^2)$ , тому використовується у більшості програм та мікроконтролерів для аналізу вібрацій [8, 9].

**Побудова графіка спектру Фур'є.** Для візуального аналізу частотного спектру вібраційного сигналу було використано ШПФ, яке дозволяє перетворити сигнал із часової області в частотну. Це дає змогу виявити домінуючі частоти, що мають найбільший вклад у коливання [10, 11]. Аналіз було здійснено в середовищі Python із використанням бібліотек *matplotlib*, *numpy* та *scipy*.

На графіку спектру (рис. 1) зображено амплітудно-частотну характеристику сигналу, отриманого з вібраційного сенсора. По осі абсцис відкладено частоти (Гц), а по осі ординат – амплітуди відповідних частотних складових. Такий аналіз дає змогу визначити, які частоти присутні у сигналі та з якою інтенсивністю.

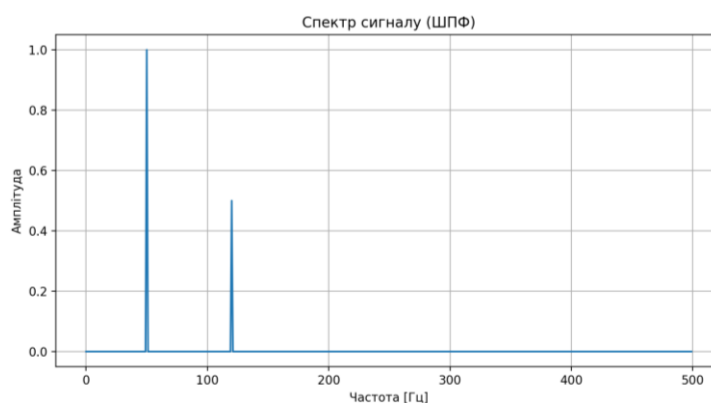


Рис. 1 – Спектр сигналу після застосування ШПФ

Незважаючи на ефективність ШПФ для аналізу стаціонарних сигналів, цей метод має обмеження: він не дозволяє визначити, коли саме у часі з'являються ті чи інші частоти. Тобто, ШПФ не підходить для аналізу нестационарних або перехідних процесів, де характеристики сигналу змінюються з часом. Для таких випадків доцільним є використання вейвлет-перетворення.

#### Вейвлет-перетворення.

Вейвлет-перетворення є сучасним методом аналізу сигналів, який дозволяє одночасно досліджувати як частотний, так і часовий спектр сигналу [12]. На відміну від класичного перетворення Фур'є, яке надає лише інформацію про частотний склад сигналу без урахування часу, вейвлет-перетворення дає змогу визначити, які саме частоти присутні у сигналі та в який момент часу вони з'являються або зникають [13, 14].

**Суть методу.** Основна ідея полягає в розкладанні сигналу на короткі хвильові функції, які називаються вейвлетами. Ці функції мають обмежену тривалість (на відміну від синусоїд, які використовуються у ШПФ) і можуть змінювати масштаб (тобто "розтягуватися" або "стискатися") та зсуву у часі. Завдяки цим властивостям вейвлети можуть бути адаптовані до локальних особливостей сигналу [15].

Переваги вейвлет-перетворення:

- **Аналіз нестационарних сигналів.** дозволяє ефективно досліджувати сигнали, частотні характеристики яких змінюються з часом;
- **Часо-частотна локалізація.** дає змогу точно визначити, коли саме у сигналі виникають певні частотні компоненти;
- **Гнучкість вибору вейвлет-функції.** можна підібрати тип вейвлета залежно від характеру сигналу – наприклад, Daubechies, Morlet, Хаг тощо;
- **Масштабована роздільна здатність.** високочастотні компоненти аналізуються з високою часовою точністю, а низькочастотні – з високою частотною роздільністю.

**Типи вейвлет-перетворення.** Існують два основні підходи:

- **Безперервне вейвлет-перетворення** – це метод, при якому сигнал аналізується за допомогою безперервного масштабування та зсуву вейвлет-функції. Результатом перетворення є двовимірна карта (скейлограма), яка відображає інтенсивність сигналу як функцію часу та частоти [16].

Математично БВП визначається так:

$$W(a, b) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \cdot \psi^* \left( \frac{t-b}{a} \right) dt$$

де  $x(t)$  – вхідний сигнал;

$\psi(t)$  – обрана материнська вейвлет-функція;

$a$  – масштаб (обернено пропорційний частоті);

$b$  – часовий зсув;

\* – комплексне спряження.

БВП дозволяє детально вивчати локальні особливості сигналу, такі як імпульси, короточасні коливання чи перехідні процеси, завдяки зміні масштабу (розтягування або стискання) та часовому зсуву вейвлета.

На рис. 2 наведено приклад скейлограмми сигналу, отриманого в результаті застосування БВП. На відміну від спектра Фур'є (див. рис. 1), скейлограмма дозволяє чітко визначити момент часу виникнення тієї чи іншої частотної компоненти, що забезпечує більш глибокий аналіз нестационарних процесів [17, 18].

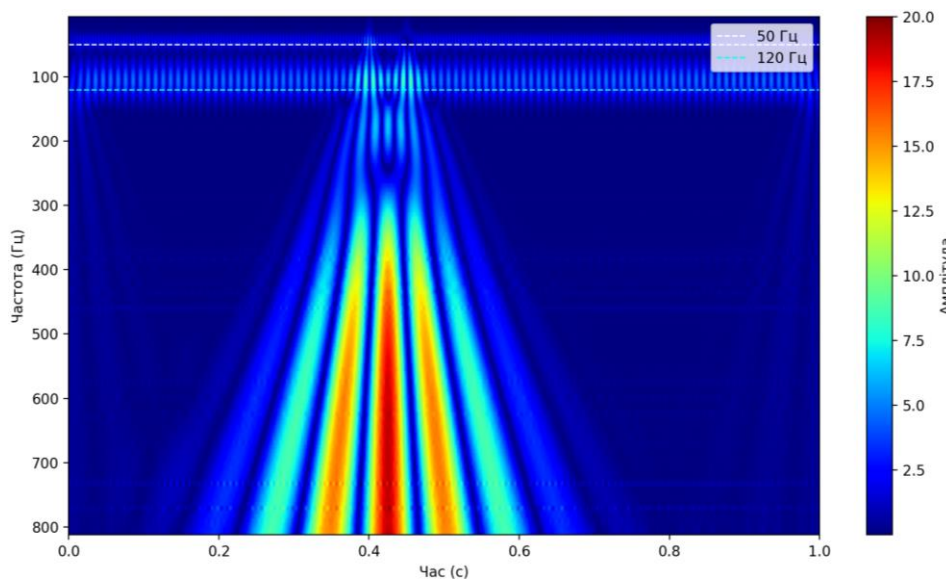


Рис. 2 – Часо-частотна карта сигналу, отримана за допомогою БВП

Зображено часо-частотну карту сигналу, отриману із застосуванням вейвлета Морле. Даний метод забезпечує високу точність локалізації частотних характеристик у часовій області, що є особливо ефективним при аналізі імпульсних або швидкоплинних збурень у системі.

Горизонтальна вісь графіка відображає час у секундах у межах від 0,0 до 1,0 с, а вертикальна – частоту в герцах у діапазоні від 0 до 800 Гц. Таким чином, забезпечується можливість детального відстеження зміни спектрального складу сигналу протягом усього часу спостереження.

Колірна шкала відображає амплітуду вейвлет-коефіцієнтів: синій колір відповідає низьким значенням, тоді як червоний позначає максимальні амплітуди, що вказують на найінтенсивніші коливання у певні часові інтервали. Завдяки цьому візуально ідентифікуються періоди підвищеної енергії сигналу.

Аналіз отриманої вейвлет-карти демонструє наявність інтенсивного збурення в часовому інтервалі приблизно 0,4 – 0,5 с. Ця ділянка характеризується підвищеною амплітудою в широкому спектрі частот, що вказує на короточасну імпульсну подію, ймовірно спричинену механічним ударом або переходом системи в нестійкий режим роботи.

На графіку додатково позначено горизонтальними пунктирними лініями частоти 50 Гц і 120 Гц. Частота 50 Гц, ймовірно, пов'язана з впливом мережевого живлення, а 120 Гц може вказувати на другу гармоніку або бути ознакою резонансного явища, спричиненого механічними дефектами чи електромагнітними збуреннями.

Отримані результати підтверджують ефективність використання БВП для виявлення аномальних імпульсів у вібраційному сигналі. Такий підхід дозволяє не лише ідентифікувати сам факт збурення, а й точно визначити час його виникнення та спектральний склад, що є ключовим аспектом у побудові систем технічної діагностики обладнання за вібраційними характеристиками.

• Дискретне вейвлет-перетворення – застосовується для обробки сигналів, компресії, фільтрації та виявлення аномалій [19]. Працює з обмеженою кількістю масштабів і забезпечує компактне представлення сигналу [20].

**Пояснення термінів.** Деталізація ( $D_n$ ) – частина сигналу, що містить інформацію про зміни на певному частотному рівні. Чим нижчий номер  $D$ , тим вищі частоти вона охоплює.

**Апроксимація ( $A_n$ )** – «гладка» частина сигналу, яка зберігає його основну форму без дрібних змін.

**Імпульс або аномалія** – проявляється у вигляді різкого піку на певному рівні деталізації; може свідчити про дефект, удар або несподівану подію.

На рис. 3 наведено приклад ДВП тестового сигналу. Для перетворення використано вейвлет Daubechies четвертого порядку (db4) з рівнем декомпозиції 4. Такий аналіз дає змогу розкласти сигнал на компоненти з різним частотним вмістом, що дозволяє виявляти як повільні тренди, так і короткочасні аномальні коливання [21].

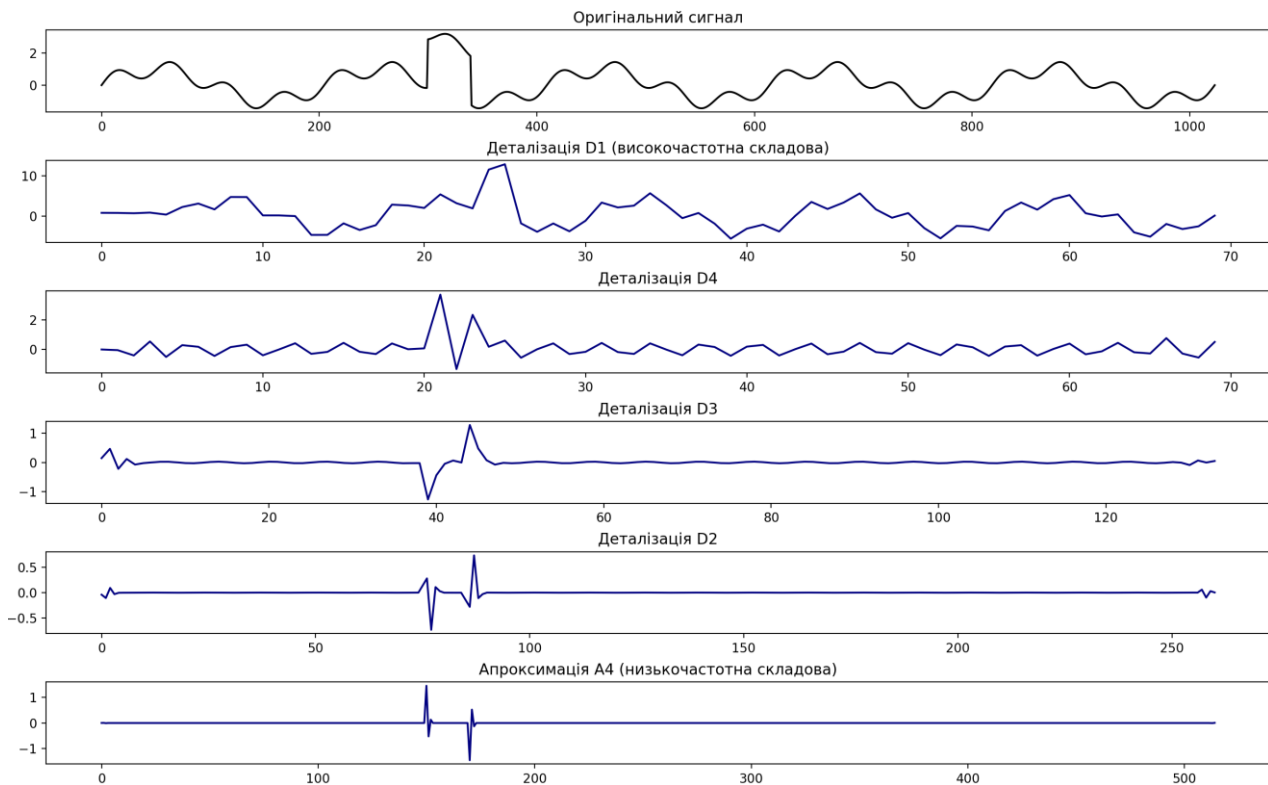


Рис 3. – Дискретне вейвлет-перетворення сигналу (db4, рівень 4): оригінальний сигнал, рівні деталізації D1–D4 та апроксимація A4.

Графік дискретного вейвлет-перетворення відображає декілька рівнів представлення сигналу [22].

Перший – це оригінальний сигнал, поданий на верхньому графіку. Він демонструє повну форму вхідного сигналу, в якій добре помітні як періодичні складові, так і короткочасний імпульс, що може свідчити про аномалію, таку як механічний удар або раптове збурення в системі.

Нижче подані рівні деталізації: D1, D2, D3 та D4. Вони характеризують високочастотні компоненти сигналу, що дозволяє проаналізувати його структуру з різною частотною роздільною здатністю.

Найнижчий із них, тобто D1, відповідає найвищим частотам і містить найдрібніші флуктуації та шум.

Рівні D2–D4 охоплюють середньочастотний діапазон, на якому зазвичай краще видно характерні імпульсні чи аномальні події. Особливої уваги заслуговує той рівень, де така подія візуалізується найчіткіше – саме там спостерігається різке зростання або зміна сигналу.

Останній рівень, апроксимація A4, відображає низькочастотну складову сигналу, яка формує загальний тренд. У цій частині добре помітні повільні зміни сигналу, усереднені відповідно до масштабів, що дає змогу оцінити його довгострокову динаміку.

Отже, метод ДВП дає змогу ефективно локалізувати аномальні ділянки сигналу як у часовій, так і в частотній площині. На відміну від класичних методів спектрального аналізу, вейвлет-декомпозиція забезпечує багаторівневе представлення сигналу, що є особливо цінним при обробці нестационарних процесів. Таке представлення є компактным і придатним для подальшої обробки – зокрема, фільтрації, стиснення або автоматичного виявлення аномалій.

**Перетворення Фур'є та вейвлет-перетворення в аналізі вібрацій.**

У процесі аналізу вібраційних сигналів для виявлення аномалій і характерних змін важливо обрати відповідний метод перетворення [23]. На рис. 1–3 наведено приклади результатів, отриманих за допомогою трьох підходів: ШПФ, БВП та ДВП.

Рис. 1 демонструє спектр сигналу, отриманий за допомогою ШПФ. Цей метод забезпечує представлення сигналу у частотній області, однак не містить інформації про час появи тих чи інших частот. Тобто, аналіз надає середньозважену характеристику спектру за весь інтервал спостереження. Такий підхід є обмеженим у випадках, коли необхідно дослідити нестационарні або імпульсні події.

Рис. 2 подає часо-частотну карту, побудовану на основі БВП з використанням вейвлета Морле. На відміну від ШПФ, цей метод дозволяє зберігати інформацію як про частоту, так і про час, забезпечуючи локалізацію змін у сигналі. Яскраві кольори вказують на високі амплітуди (енергію) коливань у певний момент часу. Такий підхід є надзвичайно ефективним для виявлення короткочасних імпульсів, що можуть свідчити про дефекти або збурення у системі.

Рис. 3 ілюструє дискретне вейвлет-перетворення сигналу, виконане з використанням вейвлета Daubechies (db4) до четвертого рівня декомпозиції. На графіку представлено оригінальний сигнал, компоненти деталізації (D1–D4) та апроксимацію A4. ДВП розкладає сигнал на частотні діапазони з різною роздільною здатністю та дозволяє виявляти аномалії на різних масштабах. Зокрема, можна визначити, на якому рівні найкраще локалізується

імпульс – це дає змогу точно ідентифікувати частотний діапазон та часову локалізацію події.

Таблиця 1 – Порівняння перетворення Фур'є та вейвлет-перетворень (БВП/ДВП) для аналізу вібраційних сигналів

Критерій	Перетворення Фур'є	Вейвлет-перетворення (БВП/ДВП)
Подання у частотній області	Так	Так
Локалізація у часі	Немає	Є
Підходить для стаціонарних сигналів	Так	Так
Підходить для нестационарних сигналів	Ні	Так
Застосування для імпульсів, збурень	Обмежене	Ефективне
Формат представлення	Глобальна спектральна характеристика	Багаторівнева (деталізація й апроксимація)

Таким чином, вибір методу залежить від конкретної задачі: для діагностики нестационарних або імпульсних явищ доцільно застосовувати вейвлет-перетворення, а для оцінки загального спектрального складу – класичне ШПФ (табл.1).

#### Експериментальна установка та збір вібраційних сигналів.

Для дослідження вібраційних сигналів та перевірки ефективності методу БВП, було проведено серію експериментів на лабораторному стенді Bently Nevada RK-4 Rotor Kit. Експерименти охоплювали як справний, так і несправний стан ротора, з моделюванням різних типів дефектів при змінних швидкостях обертання [24].

На рис. 4(а) подано загальний вигляд експериментального стенда та системи збору сигналів. Установка складається з гнучкого сталевого вала, з'єданого з електродвигуном із регульованою швидкістю обертання. Вал підтримується двома роликowymi підшипниками, які закріплені у сталевих опорах (позначених як а і б на рис. 4(б)). У середній частині вала закріплений один жорсткий диск діаметром 75 мм, товщиною 25 мм та масою 0,845 кг.

Щоб дослідити вплив дефектів на вібраційну поведінку системи, у конструкції було реалізовано декілька типів несправностей:

- Імітація дисбалансу здійснювалася шляхом додавання додаткової маси (0,018 кг) з ексцентриситетом 10 мм, закріпленої на диску.
- Тріщина у валі імітувалася за допомогою двох взаємно перпендикулярних радіальних пружин, що відтворюють динаміку так званої «дихаючої» тріщини.
- Тертя типу «rub-impact» реалізоване в точці, позначеній на рис. 4(б) цифрою 11, шляхом встановлення маленького гвинта на контрольованій відстані від поверхні ротора. При обертанні відбувалися періодичні легкі контакти ротора з гвинтом, що дозволяло моделювати локальні збурення або удари.

Усі експерименти проводились при обертанні ротора в одному напрямку, щоб уникнути зворотного впливу сил тертя. Швидкість обертання контролювалася за допомогою лазерного тахометра і змінювалася в межах від 900 до 4500 об/хв.

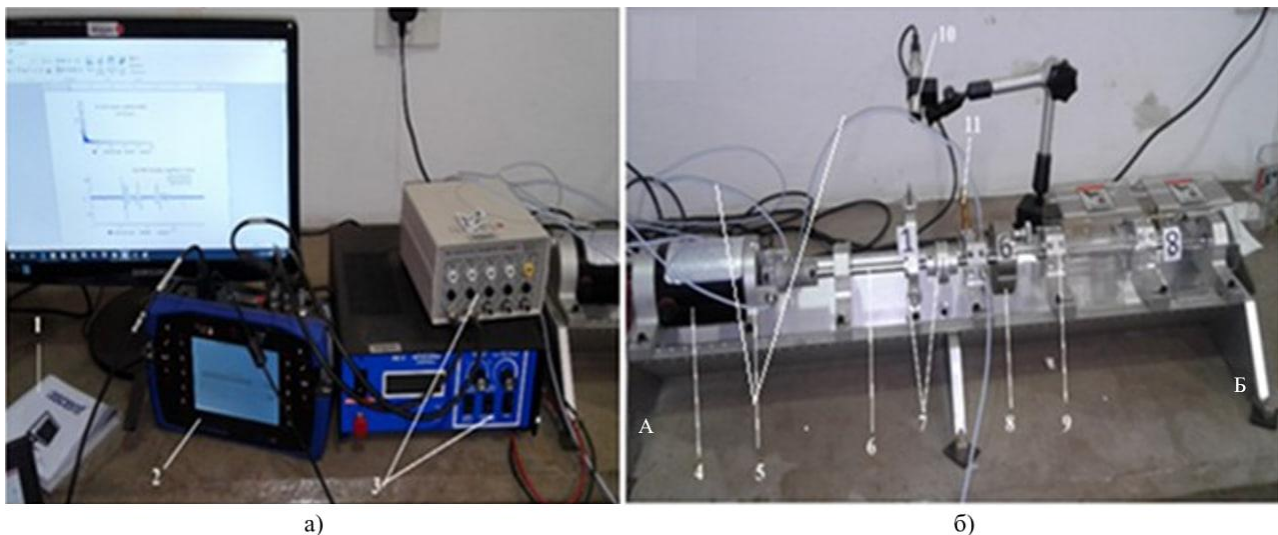


Рис. 4 – Загальний вигляд експериментальної установки RK-4: 1 – підсилювач Ascent; 2 – система аналізу Scout 100; 3 – інтерфейс збору даних; 4 – електродвигун; 5 – датчики наближення; 6 – вал; 7 – симулятор тріщини; 8 – диск; 9 – опора вала; 10 – лазерний тахометр; 11 – гвинт для імітації тертя ("rub-contact").

Збір вібраційних сигналів здійснювався за допомогою чотирьох бездотикових датчиків наближення, які були встановлені на фіксованій відстані від вала. Датчики орієнтовані у двох взаємно перпендикулярних площинах, що дозволяло фіксувати радіальні коливання ротора у вертикальному та горизонтальному напрямках. Усі вихідні сигнали підсилювалися за допомогою підсилювача Ascent та надходили до комп'ютера через інтерфейс збору даних, керований за допомогою Matlab Toolbox.

Для реєстрації даних використовувалося вимірювальне обладнання Commtest (версія 11.6.0), у поєднанні з програмним забезпеченням Ascent 2013, а також утилітами Scout 100 та Vibration Assistant, що забезпечували обробку, візуалізацію та попередній аналіз сигналів.

Отримані вібраційні сигнали аналізувалися як у частотній області за допомогою ШПФ, так і в часо-частотній області за допомогою БВП.

#### **Аналіз вібраційної реакції роторної системи при дисбалансі та осьовому зусиллі.**

У першій серії експериментів було досліджено торсійну деформацію вала шляхом зміни крутного моменту електродвигуна. Подальший спільний аналіз частотного спектра, траєкторії ротора, орбітальних діаграм та БВП дозволив ідентифікувати особливості прояву дисбалансу на основі експериментальних вібраційних сигналів. Роторна система з дисбалансом була протестована на високих обертах до 10 000 об/хв шляхом ручного регулювання швидкості електродвигуна (рис. 4).

На рис. 5 представлено реакцію системи у випадку дисбалансу за відсутності тріщини або тертя. З аналізу орбітальної діаграми (рис. 5б) видно, що проходження критичної швидкості супроводжується характерною деформацією траєкторії ротора – формується замкнене орбітальне кільце. На початковій стадії обертання амплітуда зростає до максимуму  $R_1 = 23,3$  мм (у резонансі), після чого стабілізується до регулярної кругової траєкторії. Мінімальна амплітуда орбіти становить  $R_2 = 2,3 \times 10^{-6}$  м, що відповідає першій критичній швидкості  $\omega = 1132,27$  об/хв (рис. 5а). Частотний спектр, побудований за ШПФ (рис. 5в), показує виражену гармоніку першого порядку (1X) з максимумом при 23,46 Гц, що підтверджує домінування дисбалансу у динамічній відповіді системи.

Для глибшого аналізу були проведені додаткові експерименти при низькій (1150 об/хв) та високій (2570 об/хв) швидкостях з використанням БВП. Аналіз сигналів дозволив виявити приховані особливості, які були невидимі в спектрі Фур'є. У дослідженнях було використано вейвлети Daubechies і Morlet, які виявилися ефективними для діагностики дисбалансу.

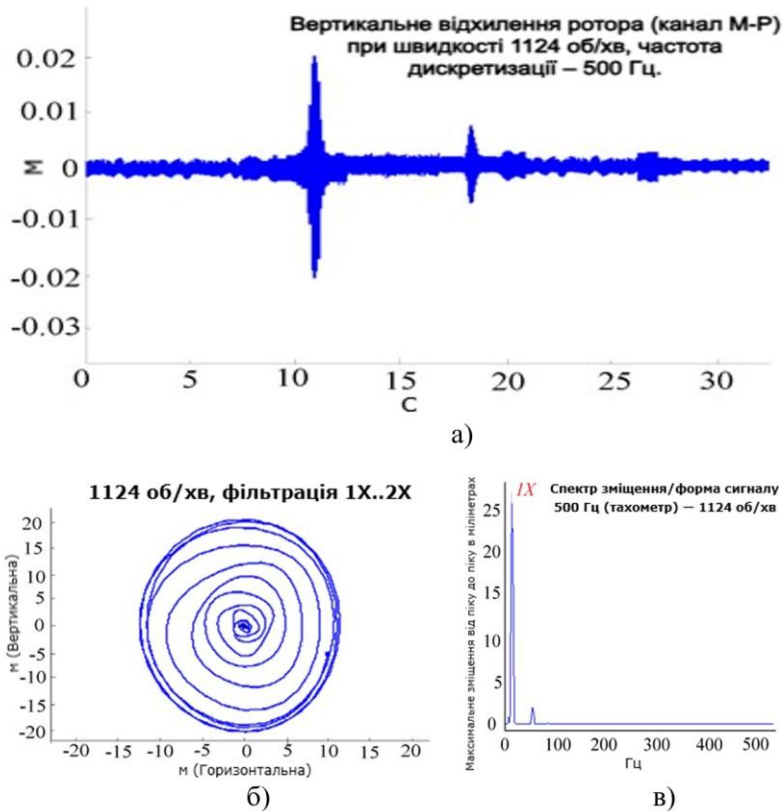


Рис. 5 – Реакція роторної системи з дисбалансом під час розгону при 1124 об/хв: а) бічне зміщення вала; б) орбітальна траєкторія ротора при дисбалансі; в) експериментальний спектр ШПФ

На рис. 6 зображено двовимірну (6а) та тривимірну (6б) скейлограми БВП для дисбалансованої системи при швидкості 1124 об/хв. Обидва графіки є переважно згладженими, за винятком окремої ділянки поблизу  $t = 3400$  с, де відбувається резонанс, спричинений ексцентричною масою. Особливо помітна зона високої енергії (червоний колір) на 3D-скейлограмі (рис. 6б), яка свідчить про збудження системи при першій резонансній частоті.

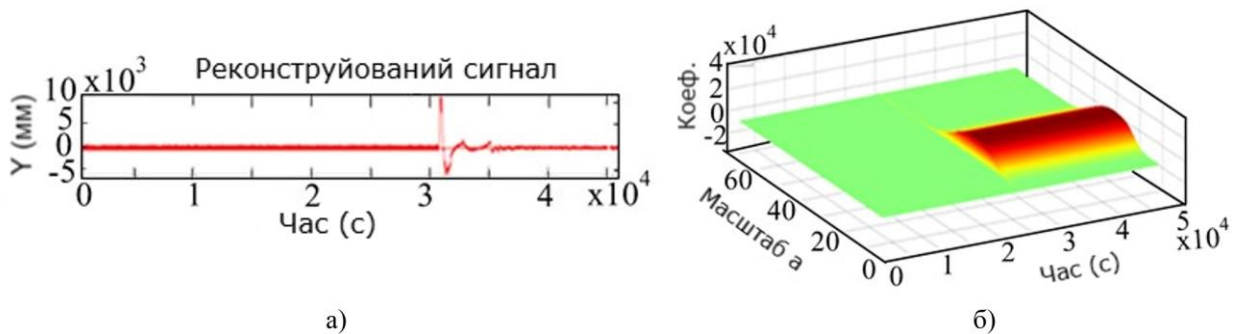


Рис. 6 – 2D та 3D скейлограми реакції незбалансованого ротора РК-4 (1124 об/хв), отримані методом безперервного вейвлет-перетворення: а) поперечне зміщення, б) тривимірна БВП -скейлограмма

На рис. 7 показано аналогічні скейлограми для більшої швидкості ротора 2570 об/хв. Порівняно з попереднім випадком, БВП -аналіз виявляє більше частотних компонент, зокрема у діапазоні 80–237 Гц, де формується щільна червона зона (рис. 7б). Ця область відповідає кільком локальним резонансним пікам, які були повністю невидимі у спектрі ШПФ (рис. 5в). Це свідчить про приховані моди коливань і нелінійні ефекти, зумовлені дисбалансом. Особливо чутливо БВП реагує на зростання швидкості обертання, фіксуючи значні енергетичні збурення в системі.

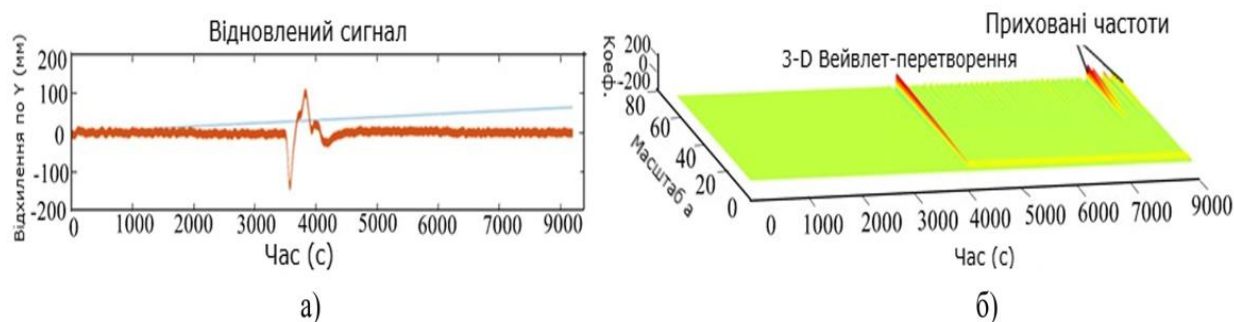


Рис. 7 – Експериментальні 2D та 3D скейлограми БВП для розбалансованої системи РК-4 на частоті обертання 2570 об/хв: а) бокове зміщення розбалансованого вала; б) 3D БВП бокового зміщення розбалансованого ротора.

Таким чином, результати підтверджують (рис. 7а та 7б), що при високій швидкості дисбаланс індукує сильні флуктуації енергії в роторній системі. Аналіз у часово-частотній площині дозволяє виявити численні локальні зміни частоти, які не фіксуються класичними методами. БВП забезпечує високу точність локалізації як у часі, так і за частотою, тому є ефективним інструментом діагностики дисбалансу та інших дефектів у високошвидкісних роторних системах.

### Висновки.

У ході дослідження було проведено порівняльний аналіз методів спектрального та часо-частотного перетворення для обробки вібраційних сигналів роторної системи. Класичне ШПФ виявилось ефективним для ідентифікації основних гармонічних складових та оцінки спектрального складу сигналу у стаціонарних режимах. Його застосування дозволило виявити домінуючі частоти, пов'язані з дисбалансом і резонансними явищами.

Однак для дослідження нестационарних процесів, таких як імпульсні збурення, перехідні режими чи локальні дефекти, ШПФ має обмеження, оскільки не дозволяє визначити момент появи частотних компонент. У цьому контексті БВП продемонструвало значну перевагу завдяки можливості детального аналізу сигналу як у частотному, так і в часовому вимірі. За допомогою БВП було виявлено резонансні зони, імпульсні події та приховані моди коливань, невидимі у спектрі Фур'є. Візуалізація скейлограм дозволила локалізувати аномалії з високою точністю.

ДВП забезпечило багаторівневе представлення сигналу, що дало змогу окремо досліджувати високочастотні та низькочастотні компоненти. Такий підхід дозволив виявити короточасні імпульси та змінити структуру сигналу на різних масштабах, що є особливо корисним для побудови систем ранньої діагностики та автоматичного виявлення дефектів.

Експериментальні результати, отримані на роторному стенді РК-4, підтверджують, що для комплексної оцінки технічного стану обладнання доцільно поєднувати ШПФ із методами вейвлет-аналізу. Зокрема, БВП є незамінним інструментом у високошвидкісних системах, де необхідно точно визначати час появи дефекту, а також його частотну природу. Таким чином, вибір методу повинен здійснюватися з урахуванням характеру сигналу, типу очікуваних збурень і вимог до точності діагностики.

### Список літератури

1. Tiboni M., Remino C., Bussola R., Amici C. A Review on Vibration-Based Condition Monitoring of Rotating Machinery. *Applied Sciences*. 2022; 12(3):972. <https://doi.org/10.3390/app12030972>.
2. Явтушенко А. В. Сучасні технології вібраційної діагностики транспортних засобів і промислових механізмів / А. В. Явтушенко, С. О. Губський // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Серія: Автомобіле- та тракторобудування = Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Automobile and Tractor Construction : зб. наук. пр. / Нац. техн. ун-т "Харків. політехн. ін-т". – Харків : НТУ "ХПІ", 2025. – № 1. – С. 87-96.
3. Sopcik P. Detecting and Diagnosing Misalignment in a System [Electronic resource] / CBM Connect. – 2020. – October 2. – Available at: <https://www.cbmconnect.com/detecting-and-diagnosing-misalignments-in-a-system/> (accessed 1 August 2025).
4. Kaur A. Comparative Analysis of Wavelet Transform and Fourier Transform. *Global Journal for Research Analysis*. 2016. Vol. 5, Issue 1. P. 106–108. ISSN 2277–8160. URL: [https://www.worldwidejournals.com/global-journal-for-research-analysis-GJRA/recent\\_issues\\_pdf/2016/January/January\\_2016\\_1452608183\\_\\_42.pdf](https://www.worldwidejournals.com/global-journal-for-research-analysis-GJRA/recent_issues_pdf/2016/January/January_2016_1452608183__42.pdf) (accessed 20 August 2025).

5. Черкашин Д. В. Використання вібродіагностики для моніторингу та контролю технічного стану автомобільних компонентів / Д. В. Черкашин, О. Ф. Саєнко, С. О. Губський // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Серія : Автомобіле- та тракторобудування = Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series : Automobile and Tractor Construction : зб. наук. пр. / Нац. техн. ун-т "Харків. політехн. ін-т". – Харків : НТУ "ХПІ", 2024. – № 2. – С. 97-107.
6. В. П. Квасніков і А. П. Стахова, «СПЕКТРАЛЬНИЙ АНАЛІЗ СИГНАЛУ ВІБРАЦІЇ З ВИКОРИСТАННЯМ ПЕРЕТВОРЕННЯ ФУР'Є», *Збірник наукових праць Одеської державної академії технічного регулювання та якості*, вип. 2(21), с. 28-33, Груд 2022.
7. Weisinger C. *The Fourier Transform for Anomaly Detection* [Electronic resource] / KNIME Blog. – 2022. – February 21. – Available at: <https://www.knime.com/blog/fourier-transform-anomaly-detection> (accessed 02 September 2025).
8. Дрозденко А. *Складність алгоритмів: простими словами про часову складність (Time Complexity)* [Електронний ресурс] / Medium. – 2025. – 15 березня. – Режим доступу: <https://surl.lu/izfaks> (accessed 08 September 2025).
9. Fiveable Content Team. *FFT Algorithms and Computational Efficiency* [Електронний ресурс] / Fiveable. – 2025. – Вересень. – Режим доступу: <https://fiveable.me/fourier-analysis-wavelets-and-signal-processing/unit-8/fft-algorithms-computational-efficiency/study-guide/PyTpHVaBhhGaMeEN> (accessed 11 September 2025).
10. *FFT Vibration Analyzer – What Is FFT Analysis & How It Works?* [Електронний ресурс] / Tomarok. – Режим доступу: <https://tomarok.com/fft-vibration-analyzer-what-is-fft-analysis-how-it-works/> (accessed 12 September 2025).
11. Lilly J. M. Element analysis: a wavelet-based method for analysing time-localized events in noisy time series. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 2017. Vol. 473. Article ID 20160776. <https://doi.org/10.1098/rspa.2016.0776>.
12. Аносов А. О., Проценко М. М., Дубинко О. Л., Павлушко М. Я. Застосування вейвлет-перетворення для аналізу цифрових сигналів / А. О. Аносов, М. М. Проценко, О. Л. Дубинко, М. Я. Павлушко // *Сучасний захист інформації*. – 2018. – № 1(33). – С. 38–44. – ISSN 2409-7292. – Режим доступу: [https://www.researchgate.net/publication/340828504\\_ZASTOSUVANNA\\_VEJVLET-PERETVORENNA\\_DLA\\_ANALIZU\\_CIFROVIH\\_SIGNALIV](https://www.researchgate.net/publication/340828504_ZASTOSUVANNA_VEJVLET-PERETVORENNA_DLA_ANALIZU_CIFROVIH_SIGNALIV).
13. Граняк В. Ф. Використання дискретного вейвлет аналізу вібро-акустичного сигналу для виявлення дебалансу ротора обертових електричних машин / В. Ф. Граняк, С. Ш. Кацев, В.В. Кухарчук // *Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія : Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка*. - 2021. - № 1. - С. 32-40. - Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Npdntu\\_inf\\_2021\\_1\\_7](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Npdntu_inf_2021_1_7).
14. Christopher Torrence and Gilbert Compo, "A Practical Guide to Wavelet Analysis", *Bulletin of the American Meteorological Society*, v.79, no.1, p.61-78. January 1998.
15. Konstantinovskiy T. *Wavelet Transform: A Practical Approach to Time-Frequency Analysis*. Medium. 2024, October 5. URL: <https://medium.com/pythoneers/wavelet-transform-a-practical-approach-to-time-frequency-analysis-662bdadeb08b> (accessed 17 September 2025).
16. *Continuous Wavelet Transform and Scale-Based Analysis* [Електронний ресурс] / MathWorks. – Режим доступу: <https://www.mathworks.com/help/wavelet/gs/continuous-wavelet-transform-and-scale-based-analysis.html> (accessed 19 September 2025).
17. *Continuous Wavelet Transform (CWT)* [Електронний ресурс] / Weisang. – Режим доступу: <https://www.weisang.com/en/support/know/flexpro-documentation/additional-topics/continuous-wavelet-transformation-cwt/> (accessed 20 September 2025).
18. Habbouche H., Benkedjough T., Amirat Y., Benbouzid M. A Wavelet Transform-Based Transfer Learning Approach for Enhanced Shaft Misalignment Diagnosis in Rotating Machinery [Електронний ресурс] // *Electronics*. – 2025. – Vol. 14, No. 2. – Article 341. – Режим доступу: <https://www.mdpi.com/2079-9292/14/2/341> (accessed 23 September 2025).
19. *Discrete Wavelet Transform (DWT)* [Електронний ресурс] / PyWavelets Documentation. – Режим доступу: <https://pywavelets.readthedocs.io/en/latest/ref/dwt-discrete-wavelet-transform.html> (accessed 26 September 2025).
20. *Discrete Wavelet Transform* [Електронний ресурс] / DataView. – Режим доступу: <https://www.st-andrews.ac.uk/~wjh/dataview/tutorials/dwt.html> (accessed 27 September 2025).
21. *Wavelet Transforms* [Електронний ресурс] / GeeksforGeeks. – Останнє оновлення: 08.05.2025. – Режим доступу: <https://www.geeksforgeeks.org/data-science/wavelet-transforms/> (accessed 2 October 2025).
22. *Introduction to Wavelet Families* [Електронний ресурс] / MathWorks. – Режим доступу: <https://www.mathworks.com/help/wavelet/gs/introduction-to-the-wavelet-families.html> (accessed 10 October 2025).
23. Wang W. J. *Wavelet Transform in Vibration Analysis for Mechanical Fault Diagnosis* [Електронний ресурс] / *Shock and Vibration*, Wiley. – 1996. – Vol. 3, No. 1. – С. 17–26. – DOI:10.1155/1996/375635. – Режим доступу: [https://www.researchgate.net/publication/273515567\\_Wavelet\\_Transform\\_in\\_Vibration\\_Analysis\\_for\\_Mechanical\\_Fault\\_Diagnosis](https://www.researchgate.net/publication/273515567_Wavelet_Transform_in_Vibration_Analysis_for_Mechanical_Fault_Diagnosis) (accessed 20 October 2025).

24. Tchomeni B. X., Alugongo A. *Experimental diagnosis of multiple faults on a rotor-stator system by fast Fourier transform and wavelet scalogram* [Электронний ресурс] / *Extrica*. – 2019. – 30 червня. – Режим доступу: <https://www.extrica.com/article/19639> (accessed 31 October 2025).

#### References (transliterated)

1. Tiboni M, Remino C, Bussola R, Amici C. A Review on Vibration-Based Condition Monitoring of Rotating Machinery. *Applied Sciences*. 2022; 12(3):972. <https://doi.org/10.3390/app12030972>.
2. Yavtushenko, A. V. Modern technologies for vibration diagnostics of vehicles and industrial mechanisms / A. V. Yavtushenko, S. O. Gubsky // Bulletin of the National Technical University “KhPI”. Series: Automobile and Tractor Construction = Bulletin of the National Technical University “KhPI”. Series: Automobile and Tractor Construction : collection of scientific works / National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”. – Kharkiv : NTU “KhPI”, 2025. – No. 1. – Pp. 87-96.
3. Sopcik P. Detecting and Diagnosing Misalignment in a System [Electronic resource] / *CBM Connect*. – 2020. – October 2. – Available at: <https://www.cbmconnect.com/detecting-and-diagnosing-misalignments-in-a-system/> (accessed 1 August 2025).
4. Kaur A. Comparative Analysis of Wavelet Transform and Fourier Transform. *Global Journal for Research Analysis*. 2016. Vol. 5, Issue 1. P. 106–108. ISSN 2277–8160. URL: [https://www.worldwidejournals.com/global-journal-for-research-analysis-GJRA/recent\\_issues\\_pdf/2016/January/January\\_2016\\_1452608183\\_\\_42.pdf](https://www.worldwidejournals.com/global-journal-for-research-analysis-GJRA/recent_issues_pdf/2016/January/January_2016_1452608183__42.pdf) (accessed 20 August 2025).
5. Cherkashyn, D. V. Use of vibration diagnostics for monitoring and controlling the technical condition of automotive components / D. V. Cherkashyn, O. F. Saienko, S. O. Gubskiy // Bulletin of the National Technical University “KhPI”. Series: Automobile and Tractor Construction = Bulletin of the National Technical University “KhPI”. Series: Automobile and Tractor Construction: collection of scientific works / National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”. – Kharkiv: NTU “KhPI”, 2024. – No. 2. – P. 97-107.
6. V. P. Kvasnikov and A. P. Stakhova, “Spectral Analysis of Vibration Signals Using Fourier Transform,” *Collection of Scientific Papers of the Odessa State Academy of Technical Regulation and Quality*, vol. 2(21), pp. 28-33, December 2022.
7. Weisinger C. *The Fourier Transform for Anomaly Detection* [Electronic resource] / *KNIME Blog*. – 2022. – February 21. – Available at: <https://www.knime.com/blog/fourier-transform-anomaly-detection> (accessed 02 September 2025).
8. Drozenko, A. *Complexity of algorithms: simple words about time complexity* [Electronic resource] / *Medium*. – 2025. – March 15. – Access mode: <https://surl.lu/izfaks> (accessed September 8, 2025).
9. Fiveable Content Team. *FFT Algorithms and Computational Efficiency* [Electronic resource] / *Fiveable*. – 2025, September. – URL: <https://fiveable.me/fourier-analysis-wavelets-and-signal-processing/unit-8/fft-algorithms-computational-efficiency/study-guide/PyTpHBaBhhGaMeEN> (accessed 11 September 2025).
10. *FFT Vibration Analyzer – What Is FFT Analysis & How It Works?* [Electronic resource] / *Tomarok*. – URL: <https://tomarok.com/fft-vibration-analyzer-what-is-fft-analysis-how-it-works/> (accessed 12 September 2025).
11. Lilly J. M. Element analysis: a wavelet-based method for analysing time-localized events in noisy time series. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 2017. Vol. 473. Article ID 20160776. <https://doi.org/10.1098/rspa.2016.0776>.
12. Anosov, A. O., Protsenko, M. M., Dubinko, O. L., Pavlunko, M. Ya. Application of wavelet transform for digital signal analysis / A. O. Anosov, M. M. Protsenko, O. L. Dubinko, M. Ya. Pavlunko // *Modern Information Protection*. – 2018. – No. 1(33). – P. 38–44. – ISSN 2409-7292. – Access mode: [https://www.researchgate.net/publication/340828504\\_ZASTOSUVANNA\\_VEJVLET-PERETVORENNA\\_DLA\\_ANALIZU\\_CIFROVIH\\_SIGNALIV](https://www.researchgate.net/publication/340828504_ZASTOSUVANNA_VEJVLET-PERETVORENNA_DLA_ANALIZU_CIFROVIH_SIGNALIV).
13. Hranyak, V. F. Use of discrete wavelet analysis of vibroacoustic signals to detect rotor imbalance in rotating electrical machines / V. F. Hranyak, S. Sh. Katsiv, V. V. Kukharchuk // *Scientific Works of Donetsk National Technical University. Series: Informatics, Cybernetics, and Computing Technology*. – 2021. – No. 1. – P. 32-40. – Access mode: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Npdntu\\_inf\\_2021\\_1\\_7](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Npdntu_inf_2021_1_7).
14. Christopher Torrence and Gilbert Compo, "A Practical Guide to Wavelet Analysis", *Bulletin of the American Meteorological Society*, v.79, no.1, p.61-78. January 1998.
15. Konstantinovskiy T. Wavelet Transform: A Practical Approach to Time-Frequency Analysis. *Medium*. 2024, October 5. URL: <https://medium.com/pythoneers/wavelet-transform-a-practical-approach-to-time-frequency-analysis-662bdadeb08b> (accessed 17 September 2025).
16. *Continuous Wavelet Transform and Scale-Based Analysis* [Electronic resource] / *MathWorks*. – URL: <https://www.mathworks.com/help/wavelet/gs/continuous-wavelet-transform-and-scale-based-analysis.html> (accessed 19 September 2025).

17. *Continuous Wavelet Transform (CWT)* [Electronic resource] / Weisang. – URL: <https://www.weisang.com/en/support/know/flexpro-documentation/additional-topics/continuous-wavelet-transformation-cwt/> (accessed 20 September 2025).
18. Habbouche H., Benkedjough T., Amirat Y., Benbouzid M. A Wavelet Transform-Based Transfer Learning Approach for Enhanced Shaft Misalignment Diagnosis in Rotating Machinery [Electronic resource] // *Electronics*. – 2025. – Vol. 14, No. 2. – Article 341. – URL: <https://www.mdpi.com/2079-9292/14/2/341> (accessed 23 September 2025).
19. *Discrete Wavelet Transform (DWT)* [Electronic resource] / PyWavelets Documentation. – URL: <https://pywavelets.readthedocs.io/en/latest/ref/dwt-discrete-wavelet-transform.html> (accessed 26 September 2025).
20. *Discrete Wavelet Transform* [Electronic resource] / DataView. – URL: <https://www.st-andrews.ac.uk/~wjh/dataview/tutorials/dwt.html> (accessed 27 September 2025).
21. *Wavelet Transforms* [Electronic resource] / GeeksforGeeks. – Last updated: 08.05.2025. – URL: <https://www.geeksforgeeks.org/data-science/wavelet-transforms/> (accessed 2 October 2025).
22. *Introduction to Wavelet Families* [Electronic resource] / MathWorks. – URL: <https://www.mathworks.com/help/wavelet/gs/introduction-to-the-wavelet-families.html> (accessed 10 October 2025).
23. Wang W. J. *Wavelet Transform in Vibration Analysis for Mechanical Fault Diagnosis* [Electronic resource] / *Shock and Vibration*, Wiley. – 1996. – Vol. 3, No. 1. – P. 17–26. – DOI:10.1155/1996/375635. – URL: [https://www.researchgate.net/publication/273515567\\_Wavelet\\_Transform\\_in\\_Vibration\\_Analysis\\_for\\_Mechanical\\_Fault\\_Diagnosis](https://www.researchgate.net/publication/273515567_Wavelet_Transform_in_Vibration_Analysis_for_Mechanical_Fault_Diagnosis) (accessed 20 October 2025).
24. Tchomeni B. X., Alugongo A. *Experimental Diagnosis of Multiple Faults on a Rotor-Stator System by Fast Fourier Transform and Wavelet Scalogram* [Electronic resource] / *Extrica*. – 2019. – June 30. – URL: <https://www.extrica.com/article/19639> (accessed 31 October 2025).

Надійшла (received) 31.10.2025

*Відомості про авторів / About the Authors*

**Черкашин Дмитро Володимирович (Cherkashyn Dmytro)** – студент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», студент кафедри «Комп’ютерне моделювання та інтегровані технології обробки тиском»; м. Харків, Україна; e-mail: [sneyk74@gmail.com](mailto:sneyk74@gmail.com).

**Саєнко Олексій Федорович (Saienko Oleksii)** – аспірант кафедри «Комп’ютерне моделювання та інтегровані технології обробки тиском» Навчально-наукового інституту механічної інженерії та транспорту Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; e-mail: [oleksii.f.saienko@gmail.com](mailto:oleksii.f.saienko@gmail.com).

**Явтушенко Андрій Володимирович (Yavtushenko Andrii)** - аспірант кафедри «Комп’ютерне моделювання та інтегровані технології обробки тиском» Навчально-наукового інституту механічної інженерії та транспорту Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0009-0007-9829-5482>; e-mail: [andrii.yavtushenko@gmail.com](mailto:andrii.yavtushenko@gmail.com).

**Бабай Юрій Володимирович (Babay Yuriy)** - аспірант кафедри «Комп’ютерне моделювання та інтегровані технології обробки тиском» Навчально-наукового інституту механічної інженерії та транспорту Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0009-0002-1882-0472>; e-mail: [urababay@gmail.com](mailto:urababay@gmail.com).

**Губський Сергій Олександрович (Hubsnyi Serhii)** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри «Комп’ютерне моделювання та інтегровані технології обробки тиском»; м. Харків, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7797-9139>; e-mail: [gubskiyso@gmail.com](mailto:gubskiyso@gmail.com).