

Д. В. ЧЕРКАШИН, О. Ф. САЄНКО, С. О. ГУБСЬКИЙ

ВИКОРИСТАННЯ ВІБРОДІАГНОСТИКИ ДЛЯ МОНІТОРИНГУ ТА КОНТРОЛЮ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ АВТОМОБІЛЬНИХ КОМПОНЕНТІВ

В роботі запропонований аналіз вібрацій, що виникають при експлуатації автомобільних компонентів, що є ефективним інструментом для діагностики та моніторингу технічного стану автомобільних компонентів. Він дозволяє своєчасно виявляти механічні несправності, такі як дисбаланс, знос підшипників та пошкодження елементів двигуна. Застосування швидкого перетворення Фур'є і спектрограми підвищує точність аналізу, особливо в умовах змінних частот вібрацій, забезпечуючи безперервний контроль і підтримку автомобільних систем.

Ключові слова: вібраційний аналіз, швидке перетворення Фур'є, спектрограма, діагностика автомобіля, вібрація двигуна, несправність механізмів, моніторинг стану, система контролю.

D. CHERKASHYN, O. SAIENKO, S. HUBSKYI

USE OF VIBRATION DIAGNOSTICS TO MONITOR AND CONTROL THE TECHNICAL CONDITION OF AUTOMOTIVE COMPONENTS

The paper provides an analysis of vibrations arising during the operation of automotive components, which is an effective tool for diagnosing and monitoring the technical condition of automotive components. It allows timely detection of mechanical faults, such as imbalance, bearing wear, and damage to engine components. The use of the Fast Fourier Transform and spectrogram increases the accuracy of the analysis, especially in conditions of variable vibration frequencies, providing continuous monitoring and support of automotive systems.

Keywords: vibration analysis, fast Fourier transform, spectrogram, vehicle diagnostics, engine vibration, mechanism malfunction, condition monitoring, control system.

Вступ. Аналіз вібрації в автомобілях сьогодні є ключовим інструментом діагностики, що дозволяє вчасно виявляти та усувати потенційні несправності. Особливе значення мають методи швидкого перетворення Фур'є (ШПФ) та спектральної щільності потужності (СЩП), які дозволяють детально аналізувати частотні характеристики вібрацій. ШПФ допомагає розкласти сигнал на частоти та виявити аномалії в роботі автомобільних систем, таких як двигун чи трансмісія, а СЩП дозволяє оцінити енергію вібрацій на кожній з цих частот [1]. Це забезпечує точний контроль за станом автомобіля та дає змогу запобігти серйозним поломкам.

Мета та постановка задачі. Метою даної роботи є порівняння двох методів аналізу вібраційних даних автомобільного двигуна: спектрограми та швидкого перетворення Фур'є. Це дозволить визначити, який метод є більш інформативним для виявлення та діагностики вібраційних проблем, що можуть виникати під час роботи автомобільного двигуна.

Аналіз вібрацій двигуна має велике значення для діагностики технічного стану, а також для оптимізації його роботи. Одним із найбільш поширених методів виявлення проблем у двигуні є спектральний аналіз, який дозволяє виділити частотні компоненти вібраційного сигналу. Для збору вібраційних даних використовується реєстратор Slam Stick, який записує вібрації в трьох вимірах. Отримані дані аналізуються за допомогою двох підходів: ШПФ, що надає загальну картину частотних компонентів вібрації, та спектрограми, яка дозволяє побачити, як ці частоти змінюються з часом.

Задачею є вивчення профілю вібрацій автомобільного двигуна, що працює на холостому ходу та при зміні обертів, а також порівняння можливостей ШПФ і спектрограми для виявлення домінуючих частот, механічних проблем і змін вібраційних характеристик під час роботи двигуна.

Аналіз вібрації як інструмент діагностики та моніторингу стану обладнання. Аналіз вібрації (або моніторинг вібрації) є потужним діагностичним інструментом для виявлення, спостереження та запобігання механічним несправностям обертових і поршневіх машин [2].

Це важливий компонент програм прогнозного технічного обслуговування, що дозволяє технікам виявляти проблеми в обладнанні до того, як вони призведуть до дорогих незапланованих простоїв або катастрофічних збоїв.

Аналіз вібрації, як частина систем моніторингу стану, використовує датчики для вимірювання частот в активі та виявлення аномалій, які можуть свідчити про проблему. По суті, аналіз вібрації – це дослідження коливальних рухів машин і їх компонентів навколо точки рівноваги. Ці коливання можуть бути спричинені різними проблемами, включаючи дисбаланс, зміщення, ослаблення, зігнуті вали та дефекти підшипників [3].

Вимірюючи та аналізуючи вібрацію машини, технічні спеціалісти можуть точніше оцінити стан і ефективність обладнання, що дозволяє їм своєчасно виявляти проблеми та вживати коригувальних заходів. Оскільки обертові та зворотно-поступальні компоненти (наприклад, двигуни, компресори, насоси) вібрують сильніше та гучніше зі старінням, аналіз змін у вібрації допомагає обслуговувати та контролювати стан обладнання в режимі реального часу, а також завчасно виявляти знос і пошкодження деталей.

Основні параметри та типи вібрацій у технічній діагностиці.

Вібрації є багатовимірними, тому вібраційні випробування потребують розуміння різних параметрів. Основними параметрами є амплітуда, частота і фаза:

- **Амплітуда** означає величину вібрації, яка зазвичай вимірюється в таких одиницях, як переміщення (мілі або мікрометри), швидкість (дюйми на секунду або міліметри на секунду) або прискорення (g);

- **Частота** вимірює кількість коливань за одиницю часу, зазвичай виражається в Герцах (Гц);

- **Фаза** відноситься до відносного часу форми хвилі вібрації, зазвичай вимірюється в градусах.

Аналізатори вібрації можуть використовувати ці фактори разом з іншими, такими як форма хвилі та вміст гармонік, щоб визначити конкретні несправності машини та їх серйозність.

- **Вимушена вібрація** виникає, коли до системи прикладається зовнішня сила, яка змушує її вібрувати. Приклади включають вібрації, створені працюючим двигуном або насосом;

- **Власна вібрація**, також відома як резонанс, виникає, коли система вібрує на власній частоті. Цей тип вібрації може бути проблематичним, якщо власна частота машини збігається з робочою частотою, оскільки це може призвести до надмірних вібрацій.

Аналіз вібрації через швидке перетворення Фур'є.

Інженери часто аналізують вібрацію як функцію частоти. ШПФ – це обчислювальний інструмент, який перетворює дані часової області в частотну область шляхом деконструювання сигналу на його окремі частини: синусоїдні та косинусові хвилі. Це обчислення дозволяє інженерам спостерігати частотні компоненти сигналу, а не суму цих компонентів.

ШПФ допомагає інженерам визначати частоти збудження в складному сигналі та їх амплітуду. Він також висвітлює зміни частоти, амплітуди та збудження гармоній у вибраному діапазоні частот [4].

Застосування ШПФ до чотирьох вхідних каналів дозволяє отримати їхні спектри, відображаючи наявність та інтенсивність різних частот у кожному сигналі (рис. 1). Це корисно для аналізу сигналів з різних джерел або порівняння їхнього частотного складу [5].

ШПФ використовується для аналізу часових сигналів у частотному домені. У нас є чотири різних вхідних сигнали для аналізу, ми можемо застосувати ШПФ до кожного з них. Це допоможе отримати спектри кожного сигналу, які відобразатимуть частоти, що присутні у кожному сигналі та їхню інтенсивність. Такий аналіз може бути корисним для порівняння сигналів з різних джерел за їхнім частотним складом.

Аналіз Фур'є працює за принципом, згідно з яким періодичний сигнал можна представити як суму ряду синусоїдальних і косинусних хвиль. У ньому зазначено, що сигнал можна розділити (проаналізувати) на спектр дискретних частот, отриманих із цієї серії.

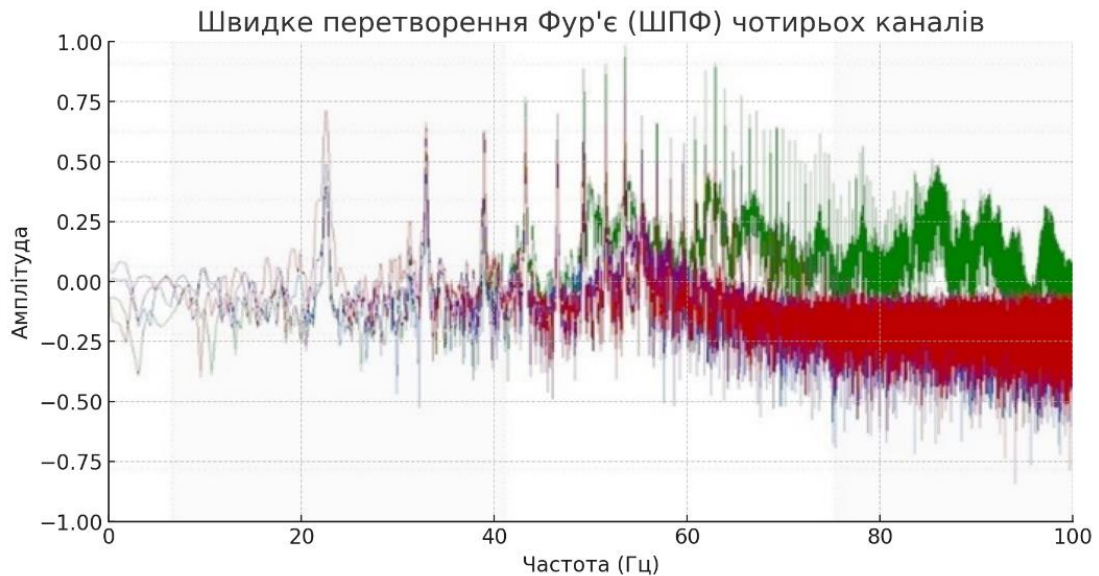


Рис. 1 – ШПФ чотирьох каналів (входів)

Аналіз Фур'є працює за принципом, згідно з яким періодичний сигнал можна представити як суму ряду синусоїдальних і косинусних хвиль. У ньому зазначено, що сигнал можна розділити (проаналізувати) на спектр дискретних частот, отриманих із цієї серії (див. рис. 2).

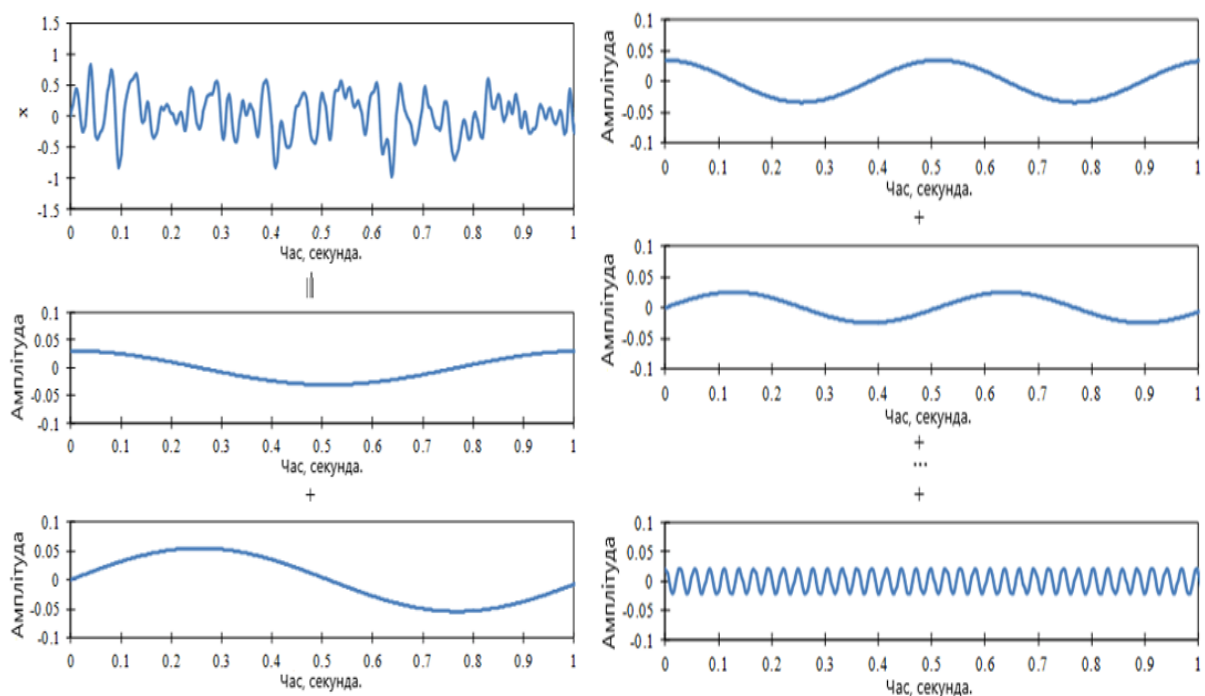


Рис. 2. – Побудова ряду Фур'є сигналу часу

Перетворення Фур'є розбирає дані часової області за допомогою проєкцій. Він оцифровує сигнал x у послідовність із N чисел (x_n , $n =$ від 1 до N). Кожна вибірка є точкою з інтервалом часу Δt між ними (див. рис. 3).

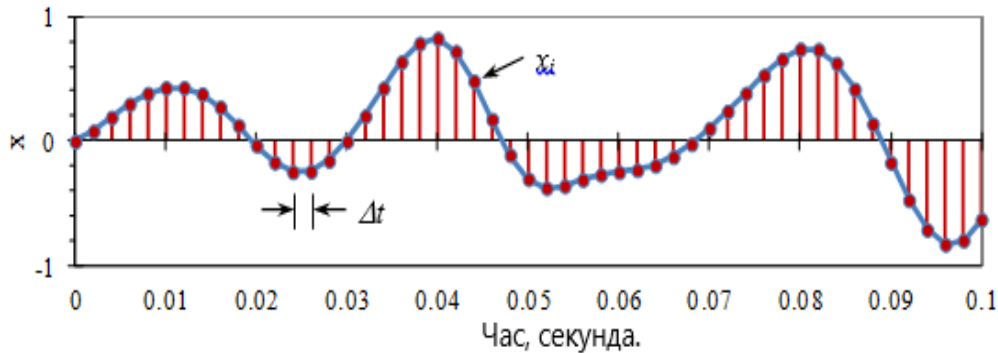


Рис. 3 – Оцифровка сигналу часу

Обчислення розраховує частотні спектри для кожного зразка, включаючи коефіцієнти (амплітуду та фазу), які наближають вихідний сигнал у поєднанні. Потім він об'єднує спектри. Отриманий набір компонентів є перетворенням Фур'є $x(t)$.

Частотний аналіз вібраційного сигналу. Частотний аналіз вібраційного сигналу – це метод дослідження коливальних процесів у механічних системах, який дозволяє розкласти складні вібраційні сигнали на їхні складові частоти для подальшого аналізу. Він відіграє ключову роль у діагностиці та моніторингу технічного стану різних механізмів, включаючи двигуни, шляхом виявлення прихованих дефектів або відхилень у роботі системи.

Наприклад, при аналізі двигуна можна виділити частоти, що відповідають обертам колінчастого вала, або виявити специфічні вібрації, які свідчать про дисбаланс чи нерівномірність роботи циліндрів.

Найпопулярнішим методом оцінки вібраційного сигналу є частотний аналіз. ШПФ допомагає перетворити сигнал із часової області в частотну, і цей метод широко використовується більшістю дослідників. Спектр потужності, що є результатом цього перетворення, відображає енергію, присутню на певних частотах сигналу, і дуже корисний для аналізу стаціонарних сигналів із постійними частотними компонентами.

Висновки частотного аналізу, такі як спектр потужності або повне гармонійне викривлення, надають інформацію лише про частотні характеристики сигналу. Це має кілька недоліків, попри його широке використання. Основний недолік полягає в тому, що частотний аналіз не враховує часову складову, тому він непридатний для сигналів, частоти яких змінюються з часом. Важливо зазначити, що нескінченна кількість сигналів може мати однаковий спектр потужності. Наприклад, два сигнали можуть мати частоти, що змінюються з часом у протилежних напрямках, але енергія на кожній конкретній частоті залишається однаковою. Отже, їхні частотні спектри, оцінені за допомогою ШПФ, будуть однаковими, незважаючи на відмінності в частотній поведінці [6].

Нездатність ШПФ розпізнавати перехідні процеси або короткі стрибки сигналу є його другим недоліком. Такі процеси зазвичай мають низьку енергію та широкий діапазон частот. При перетворенні в частотну область, енергія перехідних процесів розсіюється по широкому діапазону частот, через що їх важко виявити в частотній області.

Дані вібрації рис. 4 та рис. 5 для справної та несправної системи відповідно, отримані з чотирьох датчиків, встановлених у вертикальну карусельну систему зберігання та вилучення. Датчики були позначені цифрами від 0 до 3, де 0 представляє перший датчик, 1 – другий датчик, 2 – третій датчик, а 3 – четвертий датчик. На кожному графіку зображено вібраційні сигнали в часовій та частотних областях [7].

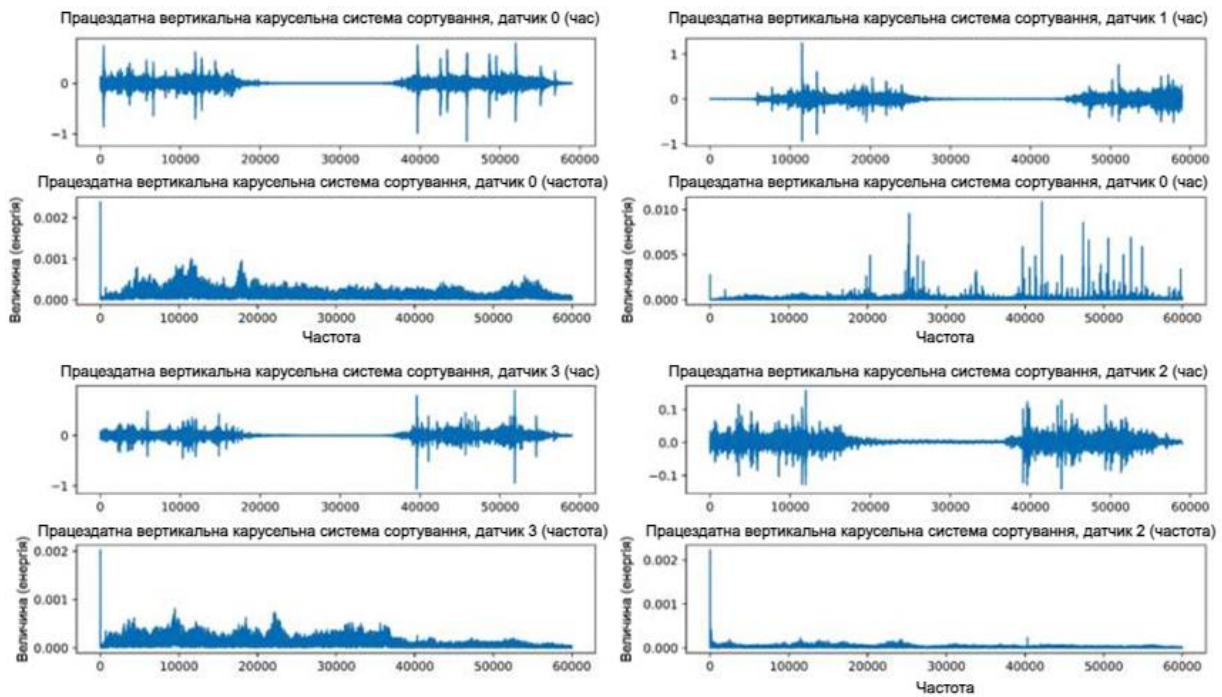


Рис. 4 – Правильний часовий і частотний аналіз даних про вібрацію вертикальної карусельної системи зберігання та пошуку даних.

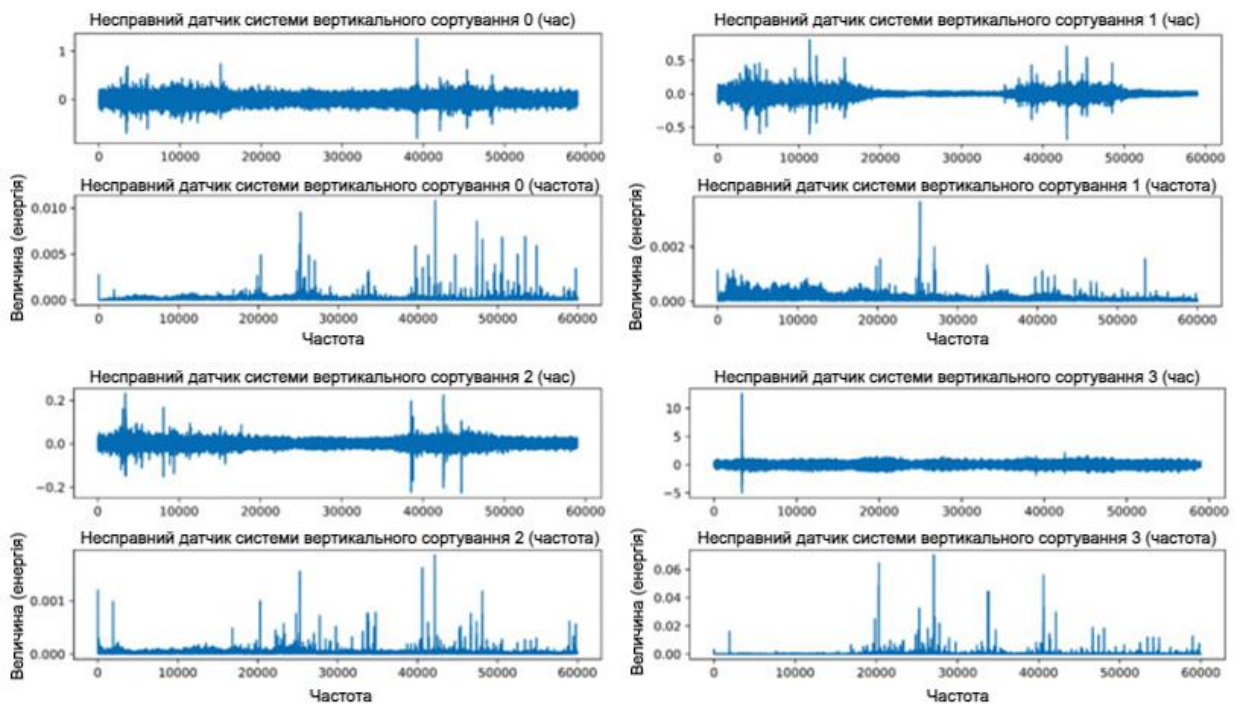


Рис. 5 – Аналіз часових і частотних помилок для даних про вібрацію вертикальної карусельної системи зберігання та пошуку даних.

Для нормального набору даних вібрації були помітні перехідні процеси в датчику 1 у порівнянні з іншими трьома датчиками. В неправильному наборі даних значні перехідні процеси та стрибки спостерігалися у всіх датчиках.

На рис. 6 показано порівняння результатів ШПФ для справних та несправних наборів даних вібрації. Здоровий набір даних позначено чорним кольором, а помилковий – червоним на всіх чотирьох графіках. Датчик 0 демонструє значні перехідні процеси для помилкових даних у порівнянні зі справними даними. Датчик 1 мав невеликі перехідні процеси для здорових даних, але значні перехідні процеси та сплески на 30 000 Гц для помилкових даних,

тоді як датчик 0 виявляв перехідну поведінку в кінці частотного графіка. Датчики 2 і 3 показали рівномірно розташовані сплески для помилкових даних, тоді як справні дані мали низьку енергію для обох датчиків.

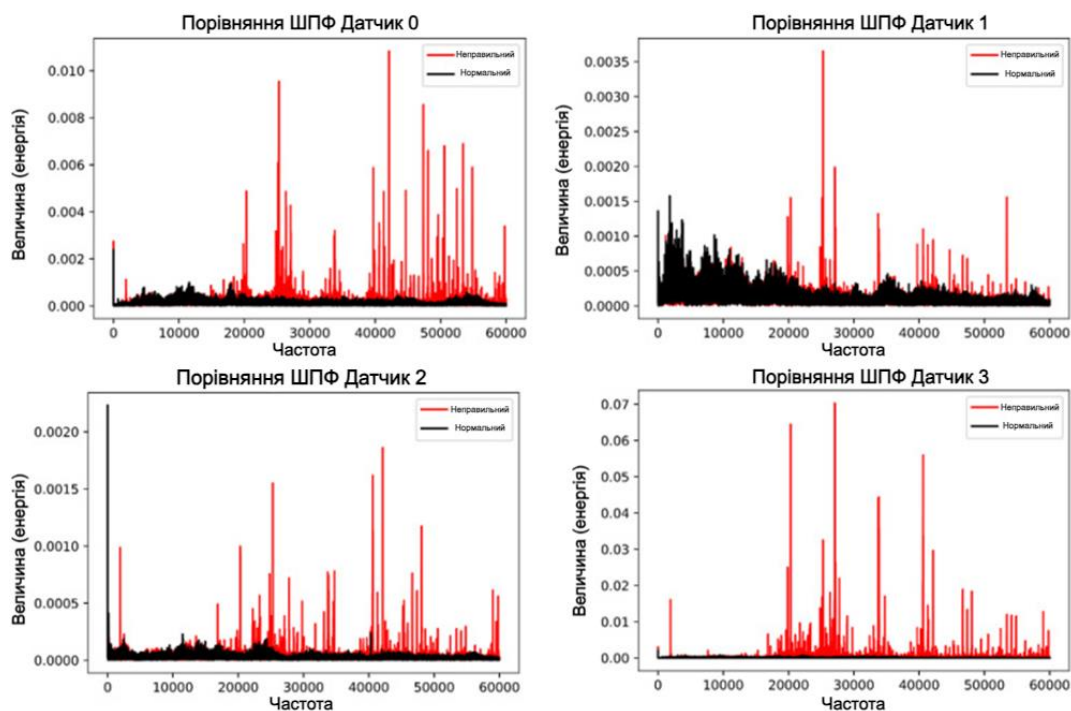


Рис.6 – Порівняння справних і несправних зразків за допомогою швидкого перетворення Фур'є.

Через обмеження ШПФ було застосовано СЩП для аналізу даних вібрації для всіх чотирьох датчиків. Рис. 7 показує графіки СЩП, які чітко демонструють відмінності між справними та несправними наборами даних. Використання тільки ШПФ не дозволило порівняти та кількісно оцінити дані про вібрацію належним чином, тоді як аналіз спектральної щільності потужності надав більш точну оцінку [8].

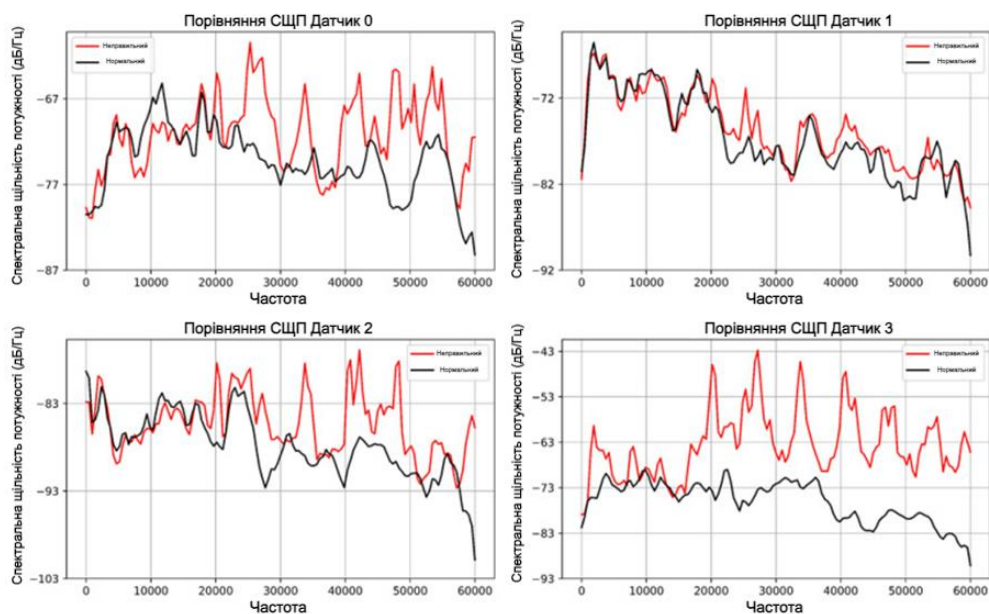


Рис.7 – Діаграма спектральної щільності потужності з чотирьох наборів даних вібрації датчика

Порівняння спектрограми та ШПФ для аналізу автомобільного двигуна. У реальних умовах під час застосування зазвичай присутні різноманітні частотні компоненти вібраційного профілю, а також механічні та електричні шуми [9, 10]. Розглянемо приклади даних, отриманих з двигуна легкового автомобіля під час його роботи на холостому ході, і проаналізуємо вібрацію. Ці дані були зібрані за допомогою реєстратора вібрацій Slam Stick X.

Slam Stick X – це портативний пристрій для реєстрації вібрацій, ударів і прискорень (див. рис. 8), який використовується для збору даних про динамічні характеристики об'єктів, таких як машини, двигуни та інші механізми. Він здатний записувати параметри вібрації в трьох вимірах, що дозволяє проводити аналіз вібраційних процесів, виявляти можливі несправності та оцінювати загальний стан обладнання. Пристрій часто застосовується в науково-дослідних і діагностичних цілях, а також у промислових середовищах для моніторингу стану техніки. Аналогічні пристрої на основі MEMS-акселерометрів використовуються для тих самих завдань, оскільки мають схожий принцип дії, що дозволяє також реєструвати вібрації, удари та прискорення в трьох вимірах і аналізувати динамічні характеристики об'єктів та їх робочий стан [11].

Для автомобіля Slam Stick X корисний тим, що дає змогу зібрати точні дані про вібрації, які виникають у різних компонентах під час роботи. Це може бути особливо важливо для діагностики технічного стану автомобіля, виявлення несправностей і проведення превентивного технічного обслуговування. Наприклад, за допомогою Slam Stick X можна вимірювати вібрації двигуна, підвіски, трансмісії та інших критичних компонентів, щоб виявити ранні ознаки зносу або пошкоджень, які можуть призвести до серйозніших поломок.

Під час аналізу роботи автомобіля, особливо на холостому ході, Slam Stick X допомагає визначити, чи є в системі надмірні вібрації, що можуть бути наслідком механічних проблем, таких як розбалансування двигуна або пошкодження опорних елементів. Окрім цього, зібрані дані можна використовувати для оптимізації роботи автомобіля, зменшення вібрацій і підвищення ефективності експлуатації [12]. Це позитивно впливає на загальний термін служби авто та комфорт водія і пасажирів.



Рис.8 – Загальний вид датчика Slam Stick X

Використання Slam Stick X у автомобільній промисловості також відкриває нові можливості для розробників та інженерів. Дані, отримані з пристрою, можуть бути використані для проведення комплексних досліджень у галузі механіки, що дозволяє вдосконалити конструкції автомобілів і підвищити їх надійність. Аналіз вібрацій допомагає виявити недостатні місця в дизайні, що може призвести до вдосконалення технологій виробництва. Таким чином, Slam Stick X не тільки сприяє підтримці автомобілів у належному стані, але й відіграє важливу роль у розвитку нових стандартів безпеки та ефективності в автомобільній промисловості.

Спектральний аналіз вібраційного профілю дозволяє визначити швидкість обертання колінчастого вала двигуна. Це 4 - циліндровий 4 - тактний двигун, у якому дві пари поршнів рухаються у протифазі, а два згоряння поршнів відбуваються за один оберт вала. Через це основна частота вібрації двигуна вдвічі перевищує швидкість обертання колінчастого вала. На спектрі ШПФ чітко видно домінуючу частоту 30 Гц (1800 об/хв), що вказує на те, що на холостому ході колінчастий вал обертається зі швидкістю 900 об/хв (15 Гц), про що також свідчить пік на ШПФ [13]. Аналіз ШПФ допоміг з'ясувати причини вимірної вібрації (див. рис. 9).

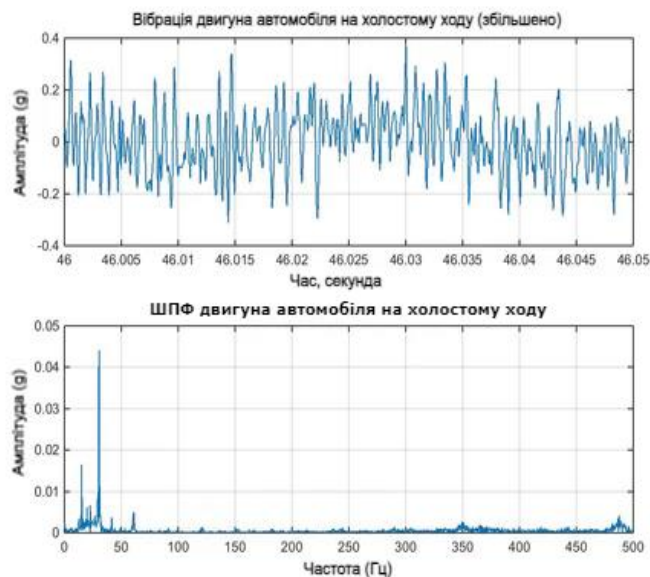


Рис.9 – Автомобільний двигун на холостому ходу чітко показує домінуючу частоту 30 Гц, що відповідає подвоєній частоті обертання колінчастого вала 15 Гц (900 об/хв), при цьому також спостерігається відповідний пік.

У багатьох програмах частота вібрації змінюється з часом, тому можемо зіткнутися з проблемою, якщо аналізувати сигнал лише за допомогою ШПФ. Давайте звизимо аналіз до області, де двигун автомобіля працює з відносно постійною швидкістю, і обчислимо ШПФ для всього сигналу. У цьому тесті двигун на певний час зупинився, потім працював на холостих обертах, після чого знову запустився, працював і, нарешті, був вимкнений. Частота вібрації досить різко змінювалася протягом тесту, але ШПФ цього не відображає. З попереднього графіка ми знаємо, що на холостому ходу домінувала частота вібрації близько 30 Гц; однак цей пік приглушується, коли ми намагаємося аналізувати ШПФ у змінних умовах вібрації (див. рис. 10).

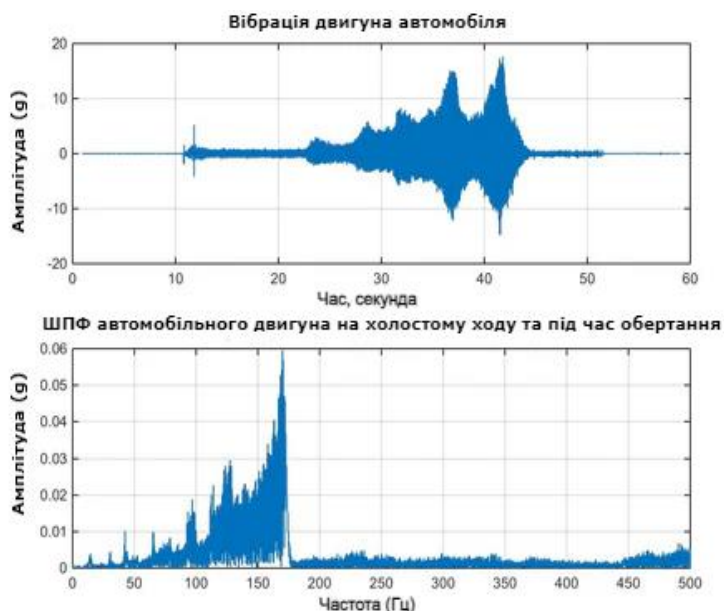


Рис.10 – Часова історія та ШПФ показані з датчика Slam Stick, прикріпленого до блоку двигуна під час його обертання, щоб змінити домінуючі частоти.

У ситуаціях, коли частота вібрації змінюється з часом, для більш точного аналізу необхідна спектрограма. Вона створюється шляхом поділу даних часової області на окремі сегменти та розрахунку ШПФ для кожного з них. Потім ці серії ШПФ накладаються одна на одну, дозволяючи візуалізувати, як змінюються амплітуда та частота вібраційного сигналу з часом.

Уявіть собі тривимірний графік ШПФ, повернутий на бік і доповнений кольоровою шкалою, яка відображає амплітуду (часто в логарифмічній шкалі для більшої точності) – це і є спектрограма (див. рис. 11).

Розгляньмо приклад з автомобільним двигуном, який працював на холостих обертах, а потім трохи розкручувався. Спектрограма, наведена нижче, демонструє, як домінуючі частоти змінюються з часом у періоди, коли двигун працював на холостому ході і коли збільшувалися оберти. Завдяки спектрограмі, аналітик отримує набагато глибше розуміння профілю вібрації та його змін з часом [14].

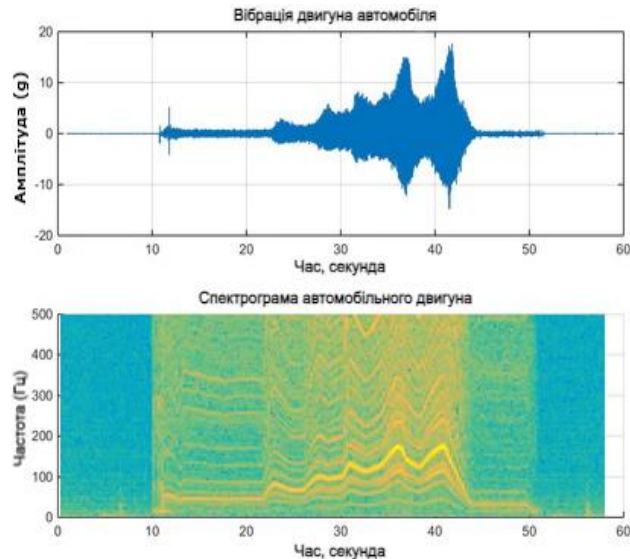


Рис.11 – Спектрограма автомобільного двигуна показує, як зміна частоти обертання колінчастого вала (при обертанні двигуна) впливає на частоти вібрацій, які стають помітними на спектрограмі

Висновки: 1. Вібраційний аналіз є ефективним інструментом для діагностики автомобільних компонентів. Він дозволяє своєчасно виявляти механічні несправності, такі як знос підшипників, дисбаланс або пошкодження елементів двигуна. Застосування цього методу є незамінним для зниження ризику серйозних поломок та підвищення надійності автомобіля.

2. Порівняння методів аналізу ШПФ та спектрограми показує, що ШПФ та спектрограма пропонують різні підходи до виявлення частотних компонентів вібраційного сигналу. ШПФ забезпечує точне розкладання сигналу на частотні компоненти, що є особливо корисним для аналізу стаціонарних вібрацій. З іншого боку, спектрограма дозволяє візуалізувати зміни частот з часом, що робить її кращим вибором для сигналів зі змінними характеристиками.

3. Частотний аналіз за допомогою ШПФ має багато переваг. Це один із найбільш поширених методів для аналізу вібрацій, що надає можливість точно виявляти домінуючі частоти та ідентифікувати механічні проблеми. ШПФ особливо корисний у діагностиці автомобільних двигунів, зокрема під час роботи на холостому ході, де чітко визначаються частоти, пов'язані з обертанням колінчастого вала.

4. ШПФ має обмеження для аналізу перехідних процесів або сигналів зі змінними частотами, але ефективний для стаціонарних сигналів. Спектрограма краще підходить для динамічних сигналів, що робить її важливим інструментом для діагностики змінних частот.

5. В автомобільній промисловості використовують пристрої, як-от Slam Stick, для збору вібраційних даних і діагностики стану систем у реальному часі. Аналіз вібрацій допомагає виявляти несправності й оптимізувати конструкції.

6. Інноваційні рішення для майбутнього передбачають поєднання частотного аналізу за допомогою ШПФ і спектрограми, що забезпечує комплексний підхід до діагностики автомобільних двигунів. Це відкриває нові можливості для розвитку більш ефективних систем моніторингу стану автомобільних компонентів. У майбутньому впровадження таких методів

дозволить підвищити точність і надійність діагностики, що, своєю чергою, сприятиме покращенню стандартів безпеки та зниженню експлуатаційних витрат.

7. Заключні висновки показують, що поєднання ШПФ і спектрограми у вібраційному аналізі значно підвищує ефективність моніторингу стану автомобільних систем. ШПФ дає можливість отримати загальну картину частотного складу, тоді як спектрограма виявляє зміни у часі. Разом ці методи забезпечують комплексний і точний інструмент для виявлення несправностей на ранніх стадіях, що сприяє підвищенню надійності та безпеки автомобіля.

Список літератури:

1. Das S., Saha A., Sujith Kumar C. Calibrated non-contact vibrational harmonics measurement based on self-vibration compensated 2D-PSD with MEMS accelerometer using FFT analysis. IET Science, Measurement & Technology. 2020. <https://doi.org/10.1049/iet-smt.2019.0229>.
2. Черкашин Д.В., Губський С.Л., Чухліб В.Л. Телеметричні системи моніторингу динамічних навантажень на валах трансмісійних систем. Вісник Національного технічного університету «ХПІ», серія: Автомобіле- та тракторобудування. Харків: НТУ «ХПІ». 2022. № 2. С. 73–84. <https://doi.org/10.20998/2078-6840.2022.2.08>.
3. Hsiung-Cheng L., Ye Y.-C. Reviews of bearing vibration measurement using fast Fourier transform and enhanced fast Fourier transform algorithms. Advances in Mechanical Engineering. 2019. Vol. 11, Issue 1. <https://doi.org/10.1177/1687814018816751>.
4. Brito N.S.D., de Souza B.A., dos Santos W.C., de Andrade Fortunato L.M. Analysis of the influence of the window used in the Short-Time Fourier Transform for High Impedance Fault detection. 17th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP). IEEE, 2016. pp. 350–355.
5. Vibration Research. Introduction to Fast Fourier Transform (FFT) Analysis. URL: <https://vibrationresearch.com/blog/fast-fourier-transform-fft-analysis/> (date of application 30.07.2024).
6. Калкаманов С. А. Конспект лекцій з дисциплін «Технічна діагностика електромеханічних систем», «Діагностування рухомого складу електричного транспорту» (для студентів усіх форм навчання за напрямом підготовки 6.050702 «Електромеханіка» спеціальності "Електричний транспорт") / С. А. Калкаманов, А. В. Коваленко, В. М. Шавкун; Харк. нац. ун-т міськ. госпва ім. О. М. Бекетова – Х.: ХНУМГ, 2014. – 152 с.
7. Jae Seok Do, Akeem Bayo Kareem, Jang-Wook Hur. LSTM-Autoencoder for Vibration Anomaly Detection in Vertical Carousel Storage and Retrieval System (VCSRS). Sensors. 2023. № 23(2). С. 1009. <https://doi.org/10.3390/s23021009>.
8. R. de Jesus Romero-Troncoso. Multirate Signal Processing to Improve FFT-Based Analysis for Detecting Faults in Induction Motors. IEEE Transactions on Industrial Informatics. 2017. Т. 13, № 3. С. 1291–1300. <https://doi.org/10.1109/TII.2016.2603968>.
9. Muhlisin, Iip, Rusyadi, Rusman. Vibration Analysis on Rotating Machines using Fast Fourier Transform (FFT). ACMIT Proceedings. 2019. Т. 3. С. 67–75. <https://doi.org/10.33555/acmit.v3i1.28>.
10. Shin G.-H., Hur J.-W. Correlation Coefficient Based Optimal Vibration Sensor Placement and Number. Sensors. Mechanical Engineering (Department of Aeronautics, Mechanical and Electronic Convergence Engineering), Kumoh National Institute of Technology, Gumi 39177, Korea. 2022. Vol. 22, No. 3, p. 1207. <https://doi.org/10.3390/s22031207>.
11. Šehović, J. (2022). Application of MEMS Accelerometers in Measuring Vertical Oscillations in Motor Vehicles. In: Ademović, N., Mujčić, E., Akšamija, Z., Kevrić, J., Avdaković, S., Volić, I. (eds) Advanced Technologies, Systems, and Applications VI. IAT 2021. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 316. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-90055-7_24.
12. Ghazaly, Nouby M., Ahmad O. Moaaz, and Mostafa M. Makrahy. Investigation of vibration signal processing using Short Time Fourier Transform for internal combustion engine. International Journal of Vehicle Structures & Systems, 2022, 14(5). <https://doi.org/10.4273/ijvss.14.5.05>.
13. Hanly S. Analysis Shock & Vibration Overview. Midé Technology. URL: <https://endaq.com/pages/analysis> (date of application: 30.08.2024).
14. Kit Wing Cheng, Hok Man Chow, Sin Yi Li, Tsun Wai Tsang, Hin Long Brian Ng, Chi Ho Hui, Yau Hang Lee, Kin Wui Cheng, Sau Cheong Cheung, Chee Kwan Lee, Sai Wing Tsang. Spectrogram-based classification on vehicles with modified loud exhausts via convolutional neural networks. Applied Acoustics, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2023.109254>.

References (transliterated):

1. Das S., Saha A., Sujith Kumar C. Calibrated non-contact vibrational harmonics measurement based on self-vibration compensated 2D-PSD with MEMS accelerometer using FFT analysis. IET Science, Measurement & Technology. 2020. <https://doi.org/10.1049/iet-smt.2019.0229>.

2. Cherkashyn D.V., Hubskeyi S.L., Chukhlib V.L. Telemetrychni systemy monitorynhu dynamichnykh navantazhen na valakh transmisiinykh system. Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI», seria: Avtomobile- ta traktorobuduvannya. Kharkiv: NTU "KhPI". 2022. № 2. S. 73–84. <https://doi.org/10.20998/2078-6840.2022.2.08>.
3. Hsiung-Cheng L., Ye Y.-C. Reviews of bearing vibration measurement using fast Fourier transform and enhanced fast Fourier transform algorithms. *Advances in Mechanical Engineering*. 2019. Vol. 11, Issue 1. <https://doi.org/10.1177/1687814018816751>.
4. Brito N.S.D., de Souza B.A., dos Santos W.C., de Andrade Fortunato L.M. Analysis of the influence of the window used in the Short-Time Fourier Transform for High Impedance Fault detection. 17th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP). IEEE, 2016. pp. 350–355.
5. Vibration Research. Introduction to Fast Fourier Transform (FFT) Analysis. URL: <https://vibrationresearch.com/blog/fast-fourier-transform-fft-analysis/> (date of application 30.07.2024).
6. Kalkamanov S. A. Konspekt lektzii z dystyplin «Tekhnichna diahnostyka elektromekhanichnykh system», «Diahnostuvannya rukhomoho skladu elektrychnoho transportu» (dlia studentiv usikh form navchannia za napriamom pidhotovky 6.050702 «Elektromekhanika» spetsialnosti "Elektrychnyi transport") / S. A. Kalkamanov, A. V. Kovalenko, V. M. Shavkun; Khark. nats. un-t misk. hospva im. O. M. Beketova – Kh.: KhNUMH, 2014. – 152 s.
7. Jae Seok Do, Akeem Bayo Kareem, Jang-Wook Hur. LSTM-Autoencoder for Vibration Anomaly Detection in Vertical Carousel Storage and Retrieval System (VCSRS). *Sensors*. 2023. № 23(2). C. 1009. <https://doi.org/10.3390/s23021009>.
8. R. de Jesus Romero-Troncoso. Multirate Signal Processing to Improve FFT-Based Analysis for Detecting Faults in Induction Motors. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2017. T. 13, № 3. C. 1291–1300. <https://doi.org/10.1109/TII.2016.2603968>.
9. Muhlisin, Iip, Rusyadi, Rusman. Vibration Analysis on Rotating Machines using Fast Fourier Transform (FFT). *ACMIT Proceedings*. 2019. T. 3. C. 67–75. DOI: 10.33555/acmit.v3i1.28.
10. Shin G.-H., Hur J.-W. Correlation Coefficient Based Optimal Vibration Sensor Placement and Number. *Sensors. Mechanical Engineering (Department of Aeronautics, Mechanical and Electronic Convergence Engineering), Kumoh National Institute of Technology, Gumi 39177, Korea*. 2022. Vol. 22, No. 3, p. 1207. <https://doi.org/10.3390/s22031207>.
11. Šehović, J. (2022). Application of MEMS Accelerometers in Measuring Vertical Oscillations in Motor Vehicles. In: Ademović, N., Mujčić, E., Akšamija, Z., Kevrić, J., Avdaković, S., Volić, I. (eds) *Advanced Technologies, Systems, and Applications VI. IAT 2021. Lecture Notes in Networks and Systems*, vol 316. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-90055-7_24.
12. Ghazaly, Nouby M., Ahmad O. Moaaz, and Mostafa M. Makrahy. Investigation of vibration signal processing using Short Time Fourier Transform for internal combustion engine. *International Journal of Vehicle Structures & Systems*, 2022, 14(5). DOI: <https://doi.org/10.4273/ijvss.14.5.05>.
13. Hanly S. Analysis Shock & Vibration Overview. Midé Technology. URL: <https://endaq.com/pages/analysis> (date of application: 30.08.2024).
14. Kit Wing Cheng, Hok Man Chow, Sin Yi Li, Tsun Wai Tsang, Hin Long Brian Ng, Chi Ho Hui, Yau Hang Lee, Kin Wui Cheng, Sau Cheong Cheung, Chee Kwan Lee, Sai Wing Tsang. Spectrogram-based classification on vehicles with modified loud exhausts via convolutional neural networks. *Applied Acoustics*, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2023.109254>.

Надійшла (received) 25.09.2024

Відомості про авторів / About the Authors

Черкашин Дмитро Володимирович (Cherkashyn Dmytro) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», студент кафедри комп'ютерного моделювання та інтегрованих технологій обробки тиском; м. Харків, Україна; e-mail: sneyk74@gmail.com.

Саєнко Олексій Федорович (Saienko Oleksii) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», студент кафедри комп'ютерного моделювання та інтегрованих технологій обробки тиском; м. Харків, Україна; e-mail: oleksii.f.saienko@gmail.com.

Губський Сергій Олександрович (Hubskeyi Serhii) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри комп'ютерного моделювання та інтегрованих технологій обробки тиском; м. Харків, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7797-9139>; e-mail: gubskiyso@gmail.com.