

## МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ДІАГНОСТУВАННЯ РОБОТИ ДВИГУНА АВТОМОБІЛЯ ЗА ОЦІНКОЮ ЙОГО ВІБРОАКУСТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК

© Наконечний А. Й., Гетьман О. Л., 2018

**Розглянуто сутність і потребу в діагностуванні двигунів автомобіля за допомогою аналізу його віброакустичних характеристик. Для покращення аналізу запропоновано використання вейвлет-перетворення сигналів.**

**Ключові слова: віброакустичний сигнал, двигун внутрішнього згоряння, технічна діагностика двигунів, вейвлет-перетворення.**

**The paper presents the essence and necessity of diagnostics of the vehicle's engine using vibroacoustic characteristics. To improve the analysis, we suggest using wavelet transforming signals.**

**Key words: vibroacoustic signal, internal combustion engine, technical diagnostics of engines, wavelet transform.**

### Вступ

Сьогодні автомобіль став практично невід'ємним атрибутом повсякденного життя. Експлуатація автомобіля безпосередньо пов'язана з контролем його технічного стану. Якісні характеристики автомобіля зумовлені його динамічністю, паливною економічністю, керованістю, пристосованістю до технічного обслуговування та ремонту. Проте під час експлуатації початкові характеристики автомобіля змінюються і в багатьох випадках можуть виникати технічні неполадки, що може призводити до виходу з ладу певних агрегатів. З огляду на це виникає потреба у підвищенні експлуатаційної надійності та продовженні ресурсу автомобіля, що залежить від своєчасного та правильного проведення технічного діагностування на всіх етапах життєвого циклу автомобіля.

Відомо, що одним з найважливіших вузлів автомобіля є двигун. Від ефективності його роботи залежать багато якісних характеристик. Двигун автомобіля складається із сотні механізмів, деякі з них мають обертові частини чи просто здійснюють рух, що створює механічні коливання (вібрації), які є причиною утворення багатьох дефектів і завчасного зношення механізмів та вузлів. Інформація, яку за допомогою обладнання можна отримати, практично повністю характеризує технічний стан агрегату, що працює, дає змогу прогнозувати виникнення несправностей та виявляти їх на ранніх стадіях експлуатації. Внаслідок цього аналіз вібрацій та шумів став основою для нового напрямку технічного діагностування – віброакустичного діагностування [1].

Сьогодні такий тип діагностування на стадії розвитку і поки не набув масового застосування у діагностиці. Проте у такого підходу великий потенціал, оскільки за його допомогою можна з високою точністю визначати несправності у тих випадках, коли інші підходи малоефективні. Зокрема, основні переваги віброакустичного діагностування такі [2]:

- можливість діагностування несправностей;
- виявлення розвитку дефектів на ранніх стадіях;
- прогнозування подальшої експлуатації вузлів двигуна;
- планування обсягів роботи стосовно технічного обслуговування та ремонтів;
- оперативність збирання інформації про технічний стан автомобіля, якісний аналіз і достовірність оцінки, а також мобільність віброакустичного обладнання.

До основних недоліків належать високі вимоги до кваліфікації оператора та необхідність точного закріплення сенсорів вібрації.

### Мета дослідження

Дотепер віброакустичні сигнали аналізували за допомогою швидкого перетворення Фур'є, фазо-циклічного аналізу або аналізу спектрів низькочастотних сигналів [1–3]. Однак, як показують теоретичні та практичні дослідження, використання зазначених методів для аналізу віброакустичних сигналів не завжди задовольняє споживача, оскільки такі сигнали, в переважній більшості, є нестационарними та складаються з багатьох компонентів [1]. З огляду на це *метою дослідження* є розроблення нових алгоритмів та схем для проведення оцінки технічного стану вузлів двигуна на основі сучасних технологій та методів оброблення сигналів.

### Діагностування роботи двигуна автомобіля

Для попереднього оцінювання стану вузлів та механізмів двигуна автомобіля використовують серійні віброперетворювачі (здійснюють перетворення механічних коливань на електричні сигнали), індуктивні сенсори частоти обертання, звукові карти комп'ютера та професійні програми, призначені для записування та оброблення звуків. Для оцінювання стану вузлів та механізмів двигуна автомобіля використовують віброперетворювачі, сенсори яких встановлюють у певних місцях двигуна (рис. 1).

Для дослідження вибирають необхідні режими роботи двигуна, знімають і записують відповідні сигнали, які надалі обробляють і аналізують комп'ютери. Одночасно з цим за допомогою індуктивного сенсора визначають положення поршня першого циліндра відносно мертвої точки [2].

Зрозуміло, що робота усіх функціональних вузлів будь-якого двигуна взаємопов'язана. З огляду на це один із важливих вузлів вибирають за базовий і уся подальша робота розглядається щодо нього. В цьому випадку базовим вузлом вибраний колінчастий вал. З метою забезпечення високої інформативності та виділення аналізованих сигналів у роботі використовують подальше вейвлет-перетворення сигналів. Таке подання дає змогу перейти до часо-частотної області подання сигналів, що дає можливість не лише якісно їх фільтрувати, а і аналізувати та виділяти важливі інформативні складові нестационарних сигналів. Наступним етапом є взаємне вейвлет-перетворення, яке здійснюється відносно базового вузла (колінчастого вала) та вузла двигуна, який потребує діагностування (рис. 1). Наприклад, взаємне перетворення колінчастого вала та підшипника, вала та втулки тощо. Порівняння результатів взаємних вейвлет-перетворень опорних та досліджуваних сигналів дає змогу знаходити й ідентифікувати певні несправності двигунів.

Важливою складовою діагностування автомобільних двигунів є формування опорних (базових) баз даних, які записані з нових двигунів конкретних марок і модифікацій автомобілів. Формування зразкових характеристик аналогічне до вищезгаданого. Загалом функціональну схему віброакустичного діагностування зображено на рис. 2.

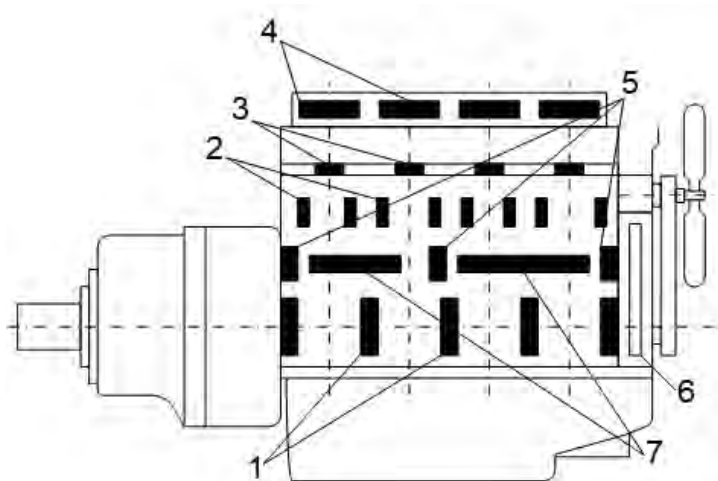


Рис. 1. Місця розташування сенсорів на корпусі двигуна:  
1 – колінчастий вал; 2 – штовхач-втулка; 3 – клапан – днище поршня; 4 – бойок коромисла-стрижень клапана;  
5 – розподільний вал-підшипник; 6 – розподільні шестерні;  
7 – кулачок розподільного вала – штовхач

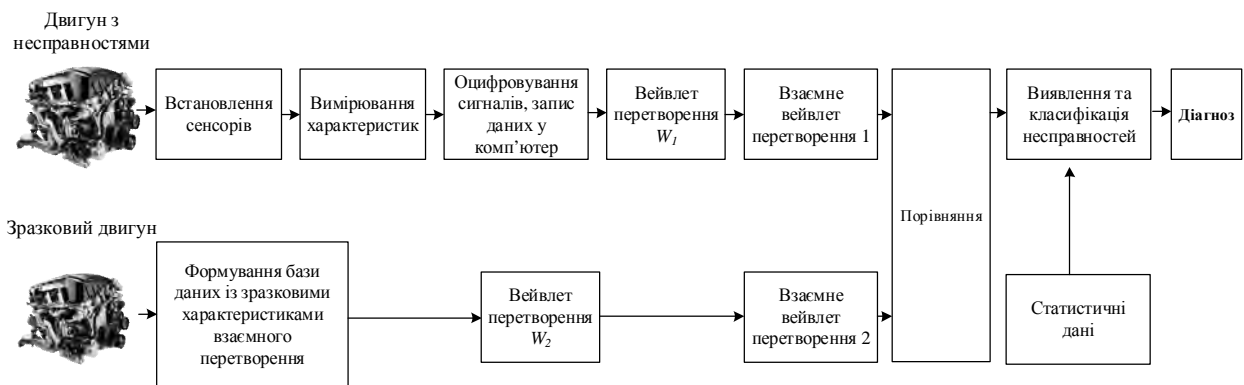


Рис. 2. Функціональна схема віброакустичного діагностування

Важливим моментом є вибір правильного способу закріплення сенсорів для здійснення вимірювань. Є щонайменше три основні способи [3]:

- жорстке кріплення за допомогою клею, гвинтів, шпильок;
- швидкознімне кріплення, за допомогою магнітів, воску, липких стрічок тощо;
- за допомогою щупа.

Утворення різьбових отворів або клейових з'єднань, крім їхньої нетехнологічності, призводить до збільшення витрат часу на підготовку механізмів до діагностування. Такий підхід актуальний, коли до двигуна підключають не один–два сенсори, а десятки і сотні. Тому пропонують використовувати віброперетворювачі з уніфікованими кріпленнями під назвою Vibro-scalar® [4].

### Обчислення широкосмугової взаємної вейвлет-функції

Необхідно наголосити, що сигнали діагностики двигуна автомобіля відзначаються певною нестационарністю. Використання кореляційної обробки таких сигналів протягом інтервалів спостереження істотно покращує коефіцієнт передачі всієї системи оброблення сигналів. Проте тривалі інтервали спостереження, з іншого боку, призводять також до нестационарності або часозмінного спектра в сигналах, що спостерігаються. Застосування вейвлет-теорії для аналізу сигналів для вищезгаданих областей в багатьох випадках дуже ефективно. Зазначимо, що вейвлет-теорія може поширюватися не лише на представлення областей перетворення сигналів, а й на функції їх обробки. З огляду на це подання обох сигналів у вейвлет-області дає змогу істотно збільшити інформацію про аналізовані сигнали, а обчислення їх взаємних залежностей дає додаткову інформацію, корисну для виявлення дефектів та несправностей. Отже, обчислення широкосмугової взаємної вейвлет-функції двох змінних (ШВВФ) корисне і доцільне. ШВВФ можна розглядати як одну із форм подання функцій двох змінних, яка представляє кореляцію між одним сигналом і масштабованою та зміщеною версією іншого сигналу. Подання двох сигналів у вейвлет-області відносно базової вейвлет-функції  $g$  створює дві групи коефіцієнтів вейвлет-перетворення  $W_g r_i(a, b)$ , які представляють вхідні сигнали  $r_i(t)$  для  $i = 1, 2$  [5].

$$(W_g r_i)(a, b) = \langle r_i, g_{a,b} \rangle = |a|^{-1/2} \int r_i(t) g^*((t-b)/a) dt \quad (1)$$

Отже, тепер обидва прийняті сигнали зображені у вейвлет-області. Обчислення виконується так

$$\begin{aligned} ШВВФ &= \langle r_1(t), r_2(t) \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{da}{a^2} \int_{-\infty}^{\infty} \langle r_1, g_{a,b} \rangle \langle g_{a,b}, r_2 \rangle db = \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \frac{da}{a^2} \int_{-\infty}^{\infty} [W_g r_1(a, b)] [W_g r_2(a, b)]^* db. \end{aligned} \quad (2)$$

Якщо обидва сигнали однакові, то їх вейвлет-перетворення будуть суміщені. У цьому випадку отримана оцінка ШВВФ міститься у початковому плані масштаб – зміщення.

Якщо узагальнено трактувати ШВВФ (замість її оцінки лише в одній точці  $S = 1, t = 0$ , де параметр “ $s$ ” є часовим масштабом, а параметр “ $t$ ” часовим зміщенням) у вейвлет-області, то необхідно для розширення трактування розглядати  $r_2(t)$  як функцію  $S$  і  $t$ . З огляду на це одержимо заміну представленню ШВВФ через функції вейвлет-перетворень двох отриманих сигналів:

$$\text{ШВВФ}(S, t) = W_{r_2} r_1 \left( \frac{1}{S}, \frac{t}{S} \right) = \frac{1}{c_g} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{da}{a^2} \int_{-\infty}^{\infty} [W_g r_1(a, b)]_n \cdot [W_g^* r_2(Sa, Sb - t)]_m db. \quad (3)$$

Отже, ШВВФ двох невідомих сигналів можна обчислити у вейвлет-області. Якщо  $r_2$  задовольняє вимоги, встановлені для базових функцій, то ШВВФ представлятиме вейвлет-перетворення відносно нової базової вейвлет-функції  $r_2$  і одночасно виражатиметься як дія деякого інтегрального оператора на два сигнали вейвлет-перетворень.

Структурна схема формування ШВВФ, наведена на рис. 3, повністю відображає її відтворення у вейвлет-області. В наведеній структурі обидва сигнали, подані в часовій області  $r_1(t)$  і  $r_2(t)$ , зазнають вейвлет-перетворення відносно вищезгаданої базової вейвлет-функції,  $g(t)$ . Далі здійснюється масштабування  $S$  і зміщення  $t$  одного з перетворень, що розглядається як базове (аналогічно масштабуванню і зміщенню базової функції під час звичайного вейвлет-перетворення) у вейвлет-області. Завершуються перетворення перемноженнями і підсумовуваннями у двовимірному просторі.

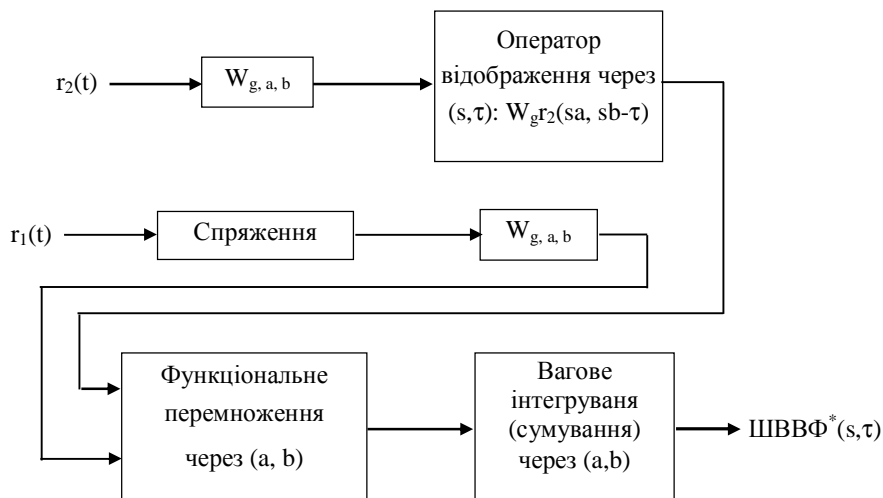


Рис. 3. Формування ШВВФ у вейвлет-області

Отже, часові й просторові виміри невіддільні в цій структурі й при цьому будується багатовимірне просторово-часове вейвлет-перетворення, що може характеризувати як короткотривалі (перехідні) нестационарності сигналу (дві функції в  $(a, b)$  плані), так і просторову структуру (ШВВФ в  $(S$  і  $t)$  плані). Ключовим для нового багатовимірного вейвлет-перетворення у рівнянні (3) є те, що воно представляє дві двовимірні функції в одну двовимірну функцію так, що розмірність при цьому не збільшується.

Розроблену структуру на основі сформульованого вейвлет-простору ШВВФ широко застосовують. Два вейвлет-перетворення разом (взаємно) обробляються для формування нової функції двох змінних або вейвлет-перетворення. Коли згадані два вейвлет-перетворення виконуються відносно тієї самої базової вейвлет-функції, тоді взаємне вейвлет-перетворення вказує

рівень спорідненості між двома оригінальними вейвлет-перетвореннями або сигналами. Спорідненість може існувати з різних причин і кожне застосування може приводити до різних пояснень цієї спільності. Прикладом спорідненості між двома вейвлет-перетвореннями або сигналами є випадок, коли два приймачі спостерігають спільне джерело сигналу. Величина взаємного вейвлет-перетворення може мати пік, який вказуватиме на цю спорідненість [5]. Можуть спостерігатися багатократні спорідненості сигналів, які формуватимуть піки у разі взаємного вейвлет-перетворення (рис. 4).

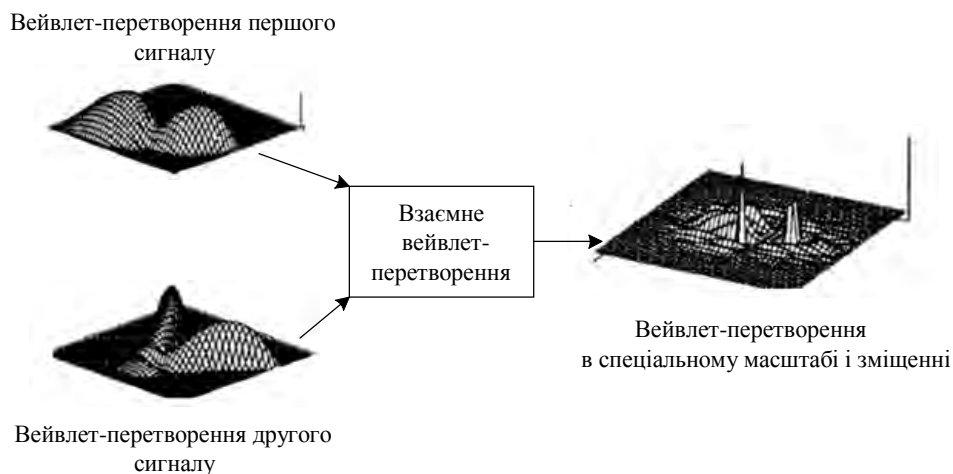


Рис. 4. Взаємне вейвлет-перетворення

Отже, розглянуте представлення ШВВФ у вейвлет-області, порівняно з традиційним зображенням ШВВФ в часовій області, набуває позитивних властивостей [5]:

- коли два вейвлет-перетворення, що обробляються, взяті відносно однієї базової вейвлет функції, то взаємне вейвлет-перетворення визначає ступінь кореляції між двома оригінальними вейвлет-перетвореннями або сигналами, або ж локалізує джерела цих кореляцій;
- взаємне вейвлет-перетворення відображає два прийняті сигнали в просторове вейвлет-перетворення або ШВВФ; перші два перетворення здійснюються у масштабованому і зміщеному просторі відносно параметра часу; масштаб і зміщення такого взаємного вейвлет-перетворення представляють просторові параметри (кут і діапазон або діапазон і швидкість); важливою особливістю є те, що просторові характеристики ШВВФ дають можливість оцінювати нестационарні перехідні (швидкоплинні) сигнали;
- у поданий в такий спосіб ШВВФ істотно покращуються роздільна здатність і коефіцієнт передачі в просторовій області вейвлет-перетворення з одночасним забезпеченням ефективної реалізації структури такого формування; взаємне вейвлет-перетворення забезпечує часомасштабне представлення як проміжне зображення, яке може бути дуже корисним для оброблення деяких змішаних даних або алгоритмів оброблення в нейронних мережах;
- нове формування ШВВФ інтерпретується як взаємний вейвлет-спектр.

Згадані вище властивості використовують для ефективного ідентифікування несправностей вузлів автомобіля.

#### Результати досліджень

У роботі виконано моделювання процесу оцінки взаємного вейвлет-перетворення сигналу в середовищі Matlab R2018b. Використовуючи функції пакетів “Signal Processing Toolbox™” та “Identification Toolbox™”, проведено моделювання вібраційних сигналів зразкових деталей та сигналів відповідних їм деталей з дефектами за допомогою оцінки і порівняння взаємних вейвлет-перетворень між сигналами колінчатого вала і досліджуваного вузла. Дослідження проводились за швидкості обертання 900 об/хв.

У результаті досліджень здійснено пошук та оцінку максимальних значень (піків) відхилень взаємних вейвлет-перетворень зразкових деталей і досліджуваних, а також ідентифікацію несправностей окремих вузлів двигуна. Результати діагностування підтверджувалися 94 % після розбирання самого двигуна.

### Висновки

У статті запропоновано метод аналізу віброакустичних сигналів, який ґрунтується на оцінці взаємного вейвлет-спектра, що визначається на основі даних, отриманих від несправного двигуна та зразкового. Використання вейвлет-області для перетворення вхідних сигналів забезпечує високу ефективність фільтрування та ідентифікації сигналів, істотно покращує роздільну здатність і коефіцієнт передачі в просторовій області вейвлет-перетворення, що дає змогу з доволі високою ймовірністю діагностувати несправності двигуна.

1. Zheng G. T. *Internal Combustion Engine Noise Analysis With Time-Frequency Distribution* / A. Y. T. Leung // *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*. 2002. № 12. С. 645–649.
2. Баралевич В. Г., Еримичой И. Н., Панов Л. И. *Виброакустическая диагностика автомобильных двигателей внутреннего сгорания [Электронный ресурс]* // *Труды XVI Международной научно-практической конференции "СИЭТ"*. Одесса, 2015. С. 133–134. Режим доступа: <http://www.tkea.com.ua/siet/archive/2015/133.pdf> (дата звернення: 20.05.2018). – Назва з екрана.
3. Костюков В. Н. *Мониторинг состояния оборудования в реальном времени* / В. Н. Костюков, Ал. В. Костюков // *Контроль. Диагностика*. 2010. № 3. С. 43–50.
4. *Центробежные насосные и компрессорные агрегаты опасных производств. Эксплуатационные нормы вибрации [Текст]: СА 03-0010-05; стандарт ассоциации РОСТЕХЭКСПЕРТИЗА* / колл. авт. М.: Компрессорная и химическая техника, 2005. 24 с.
5. Наконечний А. Й. *Цифрова обробка сигналів: навч. посіб.* / Наконечний А. Й., Наконечний Р. А., Павлиш В. А. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2010. 368 с.