

УДК 629.33 + 681.3.01

ДІАГНОСТУВАННЯ ДВИГУНІВ АВТОМОБІЛІВ НА ОСНОВІ ОЦІНКИ ВЗАЄМНОЇ ВЕЙВЛЕТ ЗАЛЕЖНОСТІ

Дмитро Горошко, Ростислав Наконечний
Національний університет «Львівська політехніка»,
вул. С. Бандери, 12, Львів 79013, Україна

У даній статті запропонована технологія діагностування двигунів автомобілів на основі використання взаємної вейвлет залежності віброакустичних сигналів їх окремих вузлів. Розглянуто основні етапи та методи технічного діагностування автомобілів, наведено переваги діагностування за допомогою віброакустичних сигналів. Розроблено алгоритм діагностування на основі обчислення широкосмугової взаємної вейвлет функції (ШВВФ) у вейвлет області. Для даного алгоритму виконано моделювання у середовищі Matlab R2018b, створено NoSQL базу даних для зберігання характеристик двигунів та користувацький web-застосунок для її редагування. Запропонована технологія забезпечує збільшення ефективності діагностування силових систем автомобілів за рахунок зменшення часу його виконання та підвищення точності виявлення несправностей вузлів двигунів, а також має перспективи використання такої технології для діагностування інших типів двигунів та механізмів.

Ключові слова: *вейвлет, широкосмугова взаємна вейвлет функція, ШВВФ, діагностування двигунів, віброакустичні коливання, аналіз сигналів, обробка сигналів, Matlab, NoSQL.*

Актуальність теми. Відомо, що експлуатація автомобіля безпосередньо пов'язана з контролем його технічного стану, а його якісні характеристики зумовлені динамічністю, паливною економічністю, керованістю та технічним станом. Однак у процесі експлуатації початкові характеристики автомобіля змінюються і в багатьох випадках можуть виникати технічні неполадки, що може приводити до виходу з ладу певних агрегатів. З огляду на це виникає необхідність проведення технічного діагностування на всіх етапах життєвого циклу автомобіля.

Оскільки одним з найважливіших вузлів автомобіля є двигун, то від ефективності його роботи залежить багато якісних характеристик. Двигун складається з великого числа механізмів, які мають обертові та поступальні рухомі частини, що в свою чергу створюють механічні коливання (вібрації). Останні є причиною утворення багатьох дефектів і завчасного зносу механізмів та вузлів. Інформація, яку за допомогою обладнання можна отримати, дозволяє характеризувати технічний стан, працюючого агрегату і прогнозувати виникнення несправностей та виявляти їх на ранніх стадіях експлуатації. Внаслідок цього аналіз вібрацій та шумів є основою для нового напрямку технічного діагностування - віброакустичного діагностування [1].

Такий вид діагностування сьогодні знаходиться на стадії розвитку і набуває широкого застосування у діагностиці, оскільки з його допомогою можна з високою ймовірністю і точністю визначати несправності у тих випадках, коли інші підходи є малоефективними.

Мета дослідження. Мета дослідження полягає в розробленні нових підходів, алгоритмів та схем проведення оцінки технічного стану вузлів двигунів, які базуються на використанні сучасних технологій та методів обробки сигналів, для виявлення та усунення дефектів, несправностей конструкцій і механізмів та підтримання надійної роботи автомобілів.

Проблема діагностування полягає в отриманні достовірної інформації про процеси, які відбуваються в двигуні автомобіля, її передачі, прийомі та опрацюванні отриманих даних. Чим більше отримано інформації, тим більше з'являється можливостей визначення поточного стану автомобіля, визначення несправностей та пошуку запасних частин, а також оптимізації процесів, режимів роботи.

Технічне діагностування є найвищим рівнем технічного контролю і дає відповідь на найважливіші питання: коли потрібно припинити експлуатацію автомобіля або що необхідно для того, аби продовжити термін його експлуатації (рис. 1). Отримана інформація про процеси і технічний стан автомобіля дає змогу в реальному часі визначити проведення ефективної стратегії технічного обслуговування (ТО), забезпечити технічну безпеку автомобіля. Лише комплексний і системний підхід діагностування дозволяє отримати максимальну ефективність процесів при експлуатації автомобілів [1].



Рис. 1. Застосування систем технічного діагностування

Технічне діагностування автомобіля полягає у визначенні: дефектів проектування; виробництва та експлуатаційних несправностей; методів діагносту-

вання; засобів діагностування; визначенні вихідних, допустимих, та граничних значень діагностованих характеристик; методів прогнозування залишкового ресурсу; методів, правил, алгоритмів проведення діагностування; режимів діагностування та кодів несправностей.

У процесі технічного діагностування кожний елемент автомобіля розглядається як потенційне джерело дефектів та несправностей, які повинні бути виявлені та усунені на всіх стадіях життєвого циклу автомобіля.

Основні етапи технічного діагностування автомобілів. Загальною задачею діагностування є встановлення ступеня відповідності технічних характеристик об'єкту до встановлених норм. Етапами технічного діагностування є:

- контроль технічного стану;
- пошук місця, визначення причини несправності;
- прогнозування технічного стану.

На практиці найчастіше зустрічається одночасне проходження вказаних етапів. Проведення окремого етапу зустрічається вкрай рідко. Проведення будь-якого етапу можливе лише з використанням відповідних технічних засобів діагностування: апаратури та програми, за допомогою яких здійснюється процедура діагностування, а також наявність діагностованої моделі - формалізованого опису об'єкта. Розрізняють три типи діагностичних етапів (рис. 2), у залежності від часу проведення діагностування [1]:



Рис.2. Три етапи технічного діагностування

Перший етап - визначення технічного стану, в якому об'єкт був певний момент часу, в минулому - етап генезису. Такий етап має місце при вивченні автомобільних пригод.

Другий етап - визначення технічного стану об'єкту в даний момент часу. Цей етап важливий при виконанні технічного діагностування та прийнятті рішень про подальшу експлуатацію.

Третій етап - передбачення технічного стану, в якому може опинитись об'єкт в майбутньому - етап прогнозування. Даний етап важливий для прогнозування залишкового ресурсу.

Загалом технічні служби діагностування на всіх етапах експлуатації автомобілів повинні вирішувати великий комплекс задач (рис. 3).

Наведені на рис. 3 задачі проводяться на усіх етапах експлуатації автомобільної техніки. Задачі діагностування на заключному етапі безпосередньо пов'язані з задачами класифікації технічного стану, оскільки на основі отриманої інформації необхідно встановити, до якого класу технічного стану потрібно

віднести об'єкт діагностування. Для проведення класифікації необхідно знати класи, які встановлюються до початку діагностування на основі аналізу самого об'єкту його функцій та відмов, які виникають в ньому. В теорії надійності розглядають чотири види технічного стану: працездатний; непрацездатний; справний; несправний.

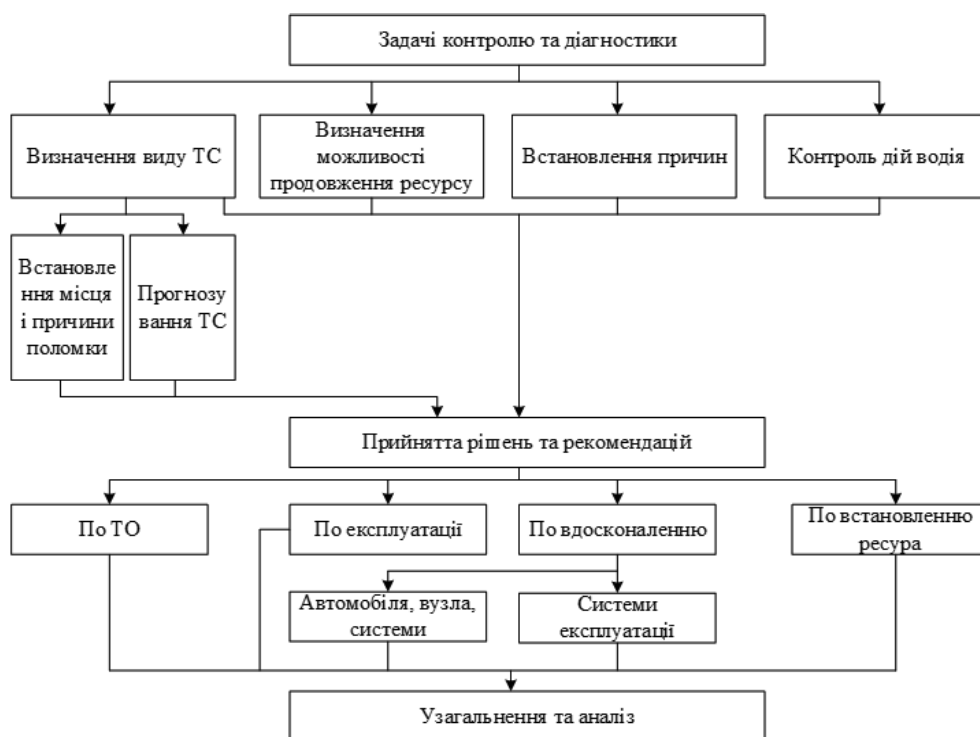


Рис. 3. Експлуатаційні задачі технічного діагностування

Технічна діагностика функціонування автомобіля поділяє технічний стан на:

- стан правильного функціонування;
- стан неправильного функціонування.

У першому випадку такий технічний стан означає, що об'єкт у даний момент часу виконує призначений йому алгоритм функціонування. Стан неправильного функціонування означає протилежне.

При прогнозуванні залишкового ресурсу автомобіля використовують такі параметри технічного стану:

- вихідні значення діагностичного параметра;
- граничні значення зміни діагностичних параметрів при експлуатації.

Допустимі зміни діагностичного параметра від вихідного до граничного можна поділити на декілька класів технічного стану:

- відмінний стан;
- допустимий стан;

- вимагає вжиття заходів;
- критичний стан (недопустимий).

Основні методи діагностування автомобілів. На сьогоднішній день для діагностування автомобілів та механізмів використовують чотири методи [2]: діагностування за керуючими сигналами; за допомогою віброакустичних (ВА) сигналів; за результатами аналізу випускних газів; за аналізом наявності продуктів зносу в мастильних матеріалах.

Діагностування за керуючими сигналами. Виникнення несправностей в електричних схемах призводить до відхилень під час роботи пристрою. Причинами їх появи може бути порушення теплового режиму окремих елементів під час експлуатації пристрою при нормованих умовах, неправильне виконання керуючих команд або повна їх відмова.

Діагностування за результатами аналізу випускних газів. Сьогодні багато країн на законодавчому рівні встановлюють нормативи викидів шкідливих речовин двигунів автомобілів у атмосферу. Зрозуміло, що дослідження процесу горіння вимагає застосування спеціального лабораторного обладнання. За допомогою аналізу відпрацьованих газів і відхилень реальних результатів горіння від бажаних можуть вирішуватися різні задачі. У більшості випадків достатнім є дослідження забарвлення, запаху відпрацьованих газів та витрат палива [1]. При горінні багатьох сумішей у відпрацьованих газах збільшується число CO і H_2 в порівнянні зі зразковою сумішшю.

Для аналізу вихлопних газів автомобіля зазвичай використовують так звані λ -зонди, робота якого базується на тому, що для досягнення значення $\lambda = 1$, при якому досягається стехіометричне співвідношення палива і повітря, спостерігається великий стрибок парціального тиску кисню. Таку зміну можна використовувати для управління співвідношенням між паливом і повітрям [2].

Діагностування за аналізом наявності продуктів зносу в мастильних матеріалах. Методи визначення продуктів зносу в мастильних матеріалах класифікують наступним чином [1]: за поділом частинок; за оптичною щільністю; за спектральним аналізом.

Діагностування за допомогою віброакустичних сигналів. Відомо, що віброакустичні сигнали породжуються змінами фізичних величин, які характеризують механічні коливання (вібраційні, акустичні) і супроводжують функціонування об'єкта. Діагностування з допомогою таких сигналів є найбільш комплексним і перспективним оскільки з його допомогою можна з високою точністю визначати несправності у тих випадках, коли інші підходи є малоефективними. Зокрема основними перевагами віброакустичного діагностування є [4]:

- можливість діагностування несправностей;
- виявлення розвитку дефектів на ранніх стадіях;
- прогнозування подальшої експлуатації вузлів двигуна;
- планування обсягів роботи стосовно технічного обслуговування та ремонтів;

- оперативність збору інформації про технічний стан автомобіля, якісний аналіз і достовірність оцінки, а також мобільність віброакустичного обладнання.

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

Як показує практика, **віброакустичне** діагностування потрібне на усіх етапах життєвого циклу механізму: від проектування, виготовлення до зняття з експлуатації, під час ремонту. Однак методи та засоби, які використовуються на цих етапах, суттєво відрізняються між собою (рис. 4). Високий економічний ефект від використання віброакустичного діагностування досягається за рахунок усунення непотрібних втручань у механізми та необґрунтованого простою обладнання, скорочення термінів та об'єму робіт, економії запчастин, підвищення технологічного циклу, а значить, і якості продукції.



Рис. 4. Сфери застосування віброакустичного діагностування на усіх етапах життєвого циклу механізму

В умовах автосервісу застосування віброакустичної діагностики дозволяє достовірно оцінити ступінь пошкодження вузлів механізму, оцінити обсяг ремонтних робіт та залишковий ресурс непошкоджених вузлів і перевірити якість ремонтних робіт.

Величезна інформаційна складова коливальних процесів, чутливих до зміни технічного стану вузлів та механізмів, дозволяє не лише діагностувати існуючі несправності, а й запобігати катастрофічним руйнуванням вузлів і

деталей механізмів та виявляти дефекти на дуже ранній стадії. Саме завдяки величезній інформаційній складові цей метод є найбільш ефективним і широко використовується для оцінки технічного стану механічного обладнання без фізичного втручання у механізми.

Модель віброакустичного сигналу. З точки зору математики сигнал представляє функцію часу $s(t)$ на інтервалі $[0, T]$. Здатність сигналу надавати інформацію про стан об'єкта обумовлена тим, що певні його властивості можуть змінюватися в залежності від зміни стану. При діагностуванні необхідно, щоби для різних станів об'єкта відповідали різні сигнали, причому ця відповідність повинна бути взаємно однозначною. Також необхідно визначити, як будуть відрізнятися сигнали і як кількісно оцінити їхню відмінність. Таким чином, розв'язок зводиться до з'ясування відмінностей між функціями цих сигналів.

З визначенням функції $y = f(x)$ зазвичай пов'язують три елементи: незалежну змінну x ; залежну змінну y ; і функціональну залежність f , яка встановлює залежність між величинами y та x .

При аналізі вагомим фактором є функціональна залежність, яка є визначальною, а характер і рівень зміни величин x і y відходять на другий план. Для формування діагностичних ознак дефектів і несправностей необхідно першочергово встановити відмінність функцій [1].

Клас діагностичних сигналів переважно задається двома параметрами: тривалістю сигналу T ; шириною спектру $f_c = [f_n, f_g]$. Значення цих параметрів встановлюється для конкретного класу об'єктів. При аналого-цифровому перетворенні сигналу оптимальна його тривалість визначається похибкою отримання оцифрованого сигналу і роздільною здатністю за частотою.

Спосіб задання функції полягає в тому, щоб знайти таку функцію $F(t)$, яка була б близька до заданої функції $s(t)$ і могла б замінити останню. Функція $s(t)$ може бути отримана експериментальним чином, тобто знята з нового автомобіля і буде вважатися як зразкова або ж синтезована шляхом наближення функції у вигляді многочлена виду:

$$F(t) = \sum_{i=0}^n a_i \cdot \varphi_i(t), \quad (1)$$

де a_i - сталі коефіцієнти; $\varphi_i(t)$ - деякі відомі функції.

Для вибору функції $\varphi_i(t)$ доцільно використовувати такі функції, які описуються відносно простими математичними залежностями. Наприклад при діагностуванні двигунів можуть бути використані періодичні функції, які описуються рядами Фур'є.

Задача апроксимації в цьому випадку зводиться до пошуку многочлена, який був би близький до заданої функції $s(t)$. Для розв'язку встановлюється кількісний критерій, який дозволяє оцінити схожість і відмінність між функ-

ціями. До таких критеріїв можна віднести: критерій рівномірного наближення; визначення середнього відхилення як критерію спорідненості функцій; визначення середньоквадратичного відхилення як критерію спорідненості функцій [1].

Оскільки віброакустичний сигнал має складну структуру, тому його потрібно розкласти на окремі прості складові. Відомо, що будь-який сигнал має корисну складову і завади. До завад належать ті частини сигналу $s(t)$, які є неінформативними і вносять похибку при його оцінці. Таким чином, присутність завад у діагностичному сигналі приводить до похибки діагностичного рішення. Отриманий сигнал можна подати у наступному вигляді:

$$s(t) = k(t)s_1(t) + m(t), \quad (2)$$

де $s_1(t)$ – корисна складова сигналу;
 $k(t)$ і $m(t)$ - завади.

Перша складова похибки належить до мультиплікативної, а друга – до адитивної. Адитивна складова є постійною і присутня на виході каналу навіть за відсутності сигналу; мультиплікативна складова лінійно залежить від рівня інформативного сигналу [1].

У процесі діагностування віброакустичний сигнал проходить численними колами як у самому механізмі, до прийому його сенсором, так і в апаратурі, причому форма сигналу при проходженні його в зазначених колах зазвичай змінюється. Такі спотворення сигналів, зумовлені властивостями каналів, вимагають додаткової обробки. Таким чином, перед розробником системи діагностування виникає задача вибору параметрів сигналу, які менше піддаються впливу завад, а також вибору ефективного способу обробки сигналу, при якому вплив завад на нього мінімізується.

Характеристики віброакустичних коливань

Випадкові абсолютні характеристики. При аналізі детермінованих коливань використовують поняття пікового значення як абсолютне значення максимуму або мінімуму коливного параметра в розглянутому проміжку часу, а також аналізується розмах коливань як різниця між максимумом і мінімумом коливного параметра в цьому проміжку. Для моногармонічного процесу пікове значення дорівнює його амплітуді, а розмах - подвійній амплітуді.

Для випадкових коливальних процесів пікове значення і розмах характеризує лише квазімаксимальний рівень, перевищення якого можливе при певній ймовірності. З огляду на це при використанні пікових значень і розмахів необхідно спеціально вказувати прийнятну величину ймовірності отримання оцінок граничних відхилень сигналу [4].

Невипадкові абсолютні показники. До таких показників відносяться такі невідповідні розмірні характеристики рівня, які отримуються в результаті усереднення значень коливального процесу в часі. Одним з основних таких квадратичних показників є дисперсія процесу [4]:

$$S_X^2 = \frac{1}{T} \int_0^T [x(t) - \bar{x}]^2 dt, \quad (3)$$

де \bar{x} - середнє значення функціональної залежності $x(t)$.

Для дискретних значень – оцінка або вибіркова дисперсія:

$$S^2 = y_X^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2. \quad (4)$$

Така оцінка є ефективною і вагомою, однак зміщеною. Для отримання незміщеної оцінки потрібно взяти дещо видозмінену вибіркoву дисперсію або стандартне відхилення S :

$$S^2 = y_X^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2. \quad (5)$$

У випадку ергодичного процесу істинна дисперсія отримується в результаті переходу до межі при наближенні $T \rightarrow \infty$. При $x = 0$ величина $S_X^2 = \bar{x}^2$.

Дисперсія є енергетичною оцінкою процесу, має розмірність квадрата розмірності вимірюваного параметра і чисельно дорівнює середній потужності коливного процесу. Якщо відома спектральна щільність коливання $G(\omega)$ в діапазоні частот від ω_1 до ω_2 , то дисперсія даного коливання визначається відповідно до рівняння Парсеваля [5]

$$\sigma^2 = \frac{1}{2\pi} \int_{\omega_1}^{\omega_2} G(\omega) d\omega. \quad (6)$$

В процесі розв'язку практичних завдань замість квадратичних доцільно використовувати лінійні оцінки рівня коливальних процесів такі, як математичне очікування, середньоквадратичне значення, середнє абсолютне значення, середнє значення, оцінки обвідної, оцінки викидів. У більшості випадків коливання відбуваються відносно деякого положення рівноваги, і, як наслідок, математичне очікування процесу як найпростіша лінійна оцінка майже завжди незалежно від рівня коливального процесу дорівнює нулю.

Розмах випадкового нормального процесу, виражений в частках середньоквадратичного значення, зазвичай обмежують величиною $\pm 3\sigma_x$. При цьому 99,73% значень коливального процесу потрапляють в область встановлених меж, а 0,27% виходять за ці межі.

Для оцінки рівня детермінованих коливаний використовують амплітуду. Однак у більшості випадків коливання, які спостерігаються при експлуатації машин, мають випадковий характер. Амплітуда випадкових коливальних процесів також є випадковою функцією часу.

Для випадкових стаціонарних коливальних процесів встановлений [1,5] функціональний зв'язок між густиною розподілу значень процесу $p(x)$ і густиною розподілу значень його обвідної $p(A)$ може бути представлений як

$$p(x) = \pi^{-1} \int_{x_1}^{\infty} \frac{p(A)dA}{\sqrt{A^2 - x^2}}. \quad (7)$$

На практиці досить поширеним є коливальний процес, який може бути представлений як сума моногармонічного і випадкового нормального процесів у вигляді модульованого процесу

$$x(t) = A(t)\cos\psi(t), \quad (8)$$

де огибаюча $A(t)$ і фаза $\psi(t)$ сумарного процесу.

Таким чином, такі оцінки, як середньоквадратичне значення σ_x , середнє абсолютне значення $|x|$ і математичне очікування огибаючої \bar{A}^2 , дають об'єктивну кількісну оцінку рівня коливального процесу незалежно від детермінованого або випадкового характеру коливання. Зрозуміло, якщо визначати середній рівень процесу, виходячи з візуального сприйняття, то можливі помилки, викликані некоректним порівнянням розмаху випадкового процесу і подвійною амплітудою моногармонічного процесу, які при фіксованому значенню σ_x значно відрізняються. Можливо проводити порівняння пікових значень і розмаху детермінованого і випадкового процесів, однак лише при однаковій ймовірності попадання значень коливного параметра всередину розмаху, який дає рівні оцінки пікових значень.

Таким чином, на основі проведеного аналізу встановлено модель віброакустичного сигналу, в якій крім корисної складової присутні завади, що створюють похибку діагностичного рішення.

Алгоритм віброакустичного діагностування двигуна автомобіля. Для проведення попередньої оцінки стану вузлів та механізмів двигунів автомобілів використовують серійні віброперетворювачі (здійснюється перетворення механічних коливань в електричні сигнали), сенсори частоти обертання та професійні програми, які призначені для записування та обробки сигналів. Для оцінки стану вузлів та механізмів двигунів автомобілів використовуються віброперетворювачі та сенсори, які встановлюються в певних місцях двигунів.

Вибір місця встановлення сенсорів безпосередньо пов'язаний з метою діагностування. Сенсори закріплюються таким чином, щоби вимірювання проводилось у напрямку осі вектора сумарних максимальних сил вібрації, спричинених дефектом (рис. 5). Для отримання максимальної корисної інформації від сенсорів місце вибирається так, щоб відстань між осередком вібрації та сенсором була мінімальна. Необхідно відзначити, що між сенсором та місцем прослуховування повинна забезпечуватися тверда поверхня, а пружні тіла (прокладки, пружини) необхідно по можливості усувати. Також сенсори недоцільно розташовувати у місцях, які співпадають з вузловими точками [4]. Можливі місця розташування сенсорів наведені на рис. 6.

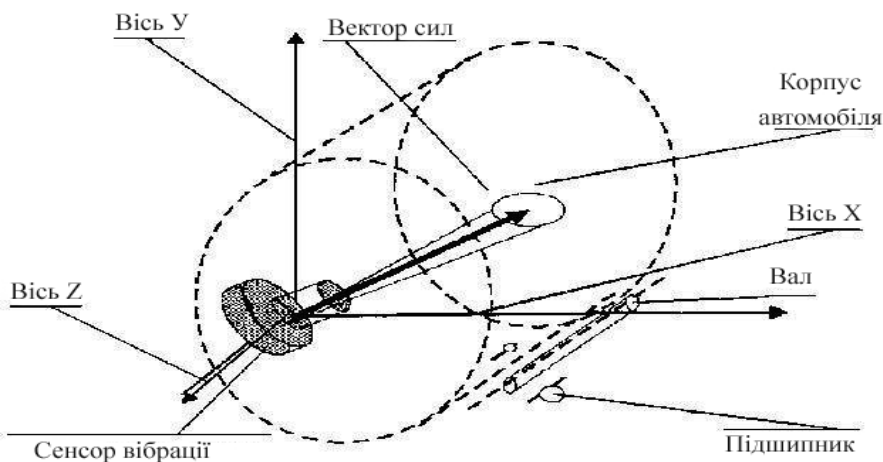


Рис. 5. Напрямок вимірювання вібрації

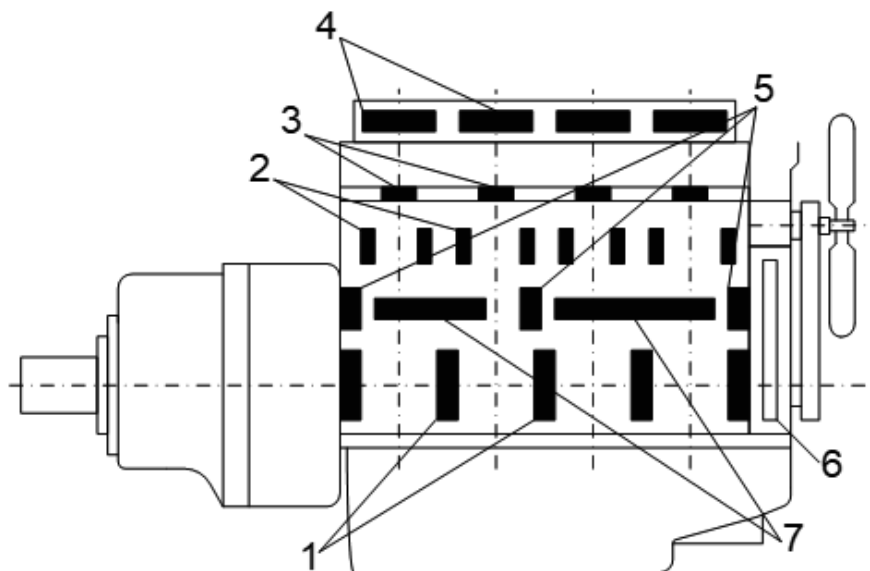


Рис. 6. – Місця розташування сенсорів на корпусі двигуна:

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 валу – штовхач

В процесі дослідження вибираються необхідні режими роботи двигуна, знімаються і записуються відповідні сигнали, які в подальшому обробляються і аналізуються комп'ютером. Разом з тим одночасно за допомогою тахометра визначається частота обертання колінчастого валу [4].

Зрозуміло, що робота усіх функціональних вузлів будь якого двигуна є пов'язана між собою. З огляду на це один із важливих вузлів вибирається за

базовий і уся подальша робота розглядається відносно нього. У даному випадку базовим вузлом вибраний колінчастий вал. З метою забезпечення високої інформативності та виділення аналізованих сигналів в роботі використовується подальше вейвлет перетворення сигналів. Таке подання дозволяє перейти до часо-частотної області представлення сигналів, що дозволяє не лише якісно їх фільтрувати, а і аналізувати та виділяти важливі інформативні складові нестационарних сигналів. Наступний етап передбачає оцінку взаємного вейвлет перетворення, яке здійснюється відносно базового вузла (колінчастого валу) та вузла двигуна, який потребує діагностування (рис.7). Наприклад, взаємне перетворення сигналів колінчастого валу та підшипника, валу та втулки і т.д.. Порівняння результатів взаємних вейвлет перетворень опорних та досліджуваних сигналів дозволяє знаходити і 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. Процес формування зразкових характеристик аналогічний до вищезгаданого. Загальна функціональна схема віброакустичного діагностування зображена на рис. 7.

Можливі діагностичні ознаки несправностей механізмів. Віброакустичні процеси за своєю природою є складними. Вони пов'язані з різноманітністю фізичних моделей та математичних методів, які описують їх на різних проміжках частотного діапазону. З огляду на це важливим моментом є процес поділу усього частотного діапазону на піддіапазони [1]:

- низькочастотний піддіапазон (від 0 до 300 Гц);
- піддіапазон середніх частот (від 300 Гц до 2 кГц);
- високочастотний піддіапазон (від 2 кГц до 10-20 кГц);
- надвисокочастотний піддіапазон (від 20 кГц до 200 кГц).

Такий поділ необхідний, оскільки кожен піддіапазон має свої сили збурення, свою модель діагностування та індивідуальну фізичну модель, яка представлена як пружна коливальна система.

Кожен з піддіапазонів володіє окремою унікальною інформацією про причини коливань. Так, наприклад, коливання, які знаходяться у межах низькочастотної області можуть судити про наступні причини їх виникнення:

- порушення геометрії вузла чи механізму;
- відхилення валу від центру рівноваги;
- дисбаланс деталей.

У випадку наявності середніх частот причинами виникнення коливань можуть бути:

- присутність у системі ротора нелінійних елементів;
- відхилення геометрії кінематичних пар;
- динамічна взаємодія автомобільних деталей з навколишнім середовищем, викликана робочими процесами, які відбуваються всередині автомобіля;

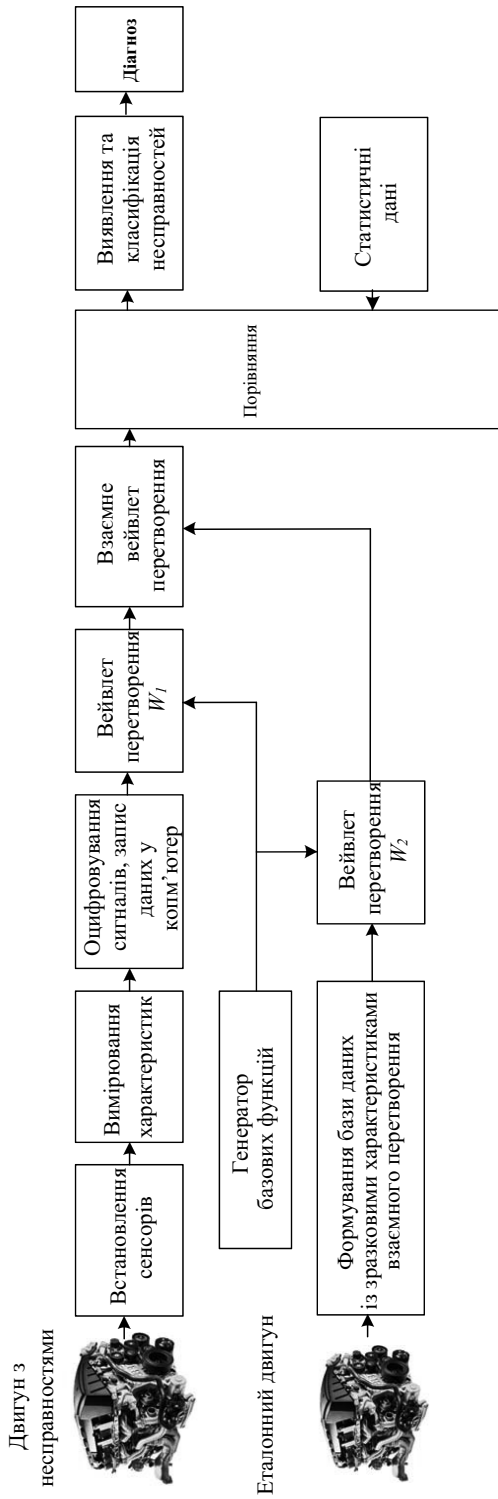


Рис. 7. Функціональна схема віброакустичного діагностування

- вплив сил збурення, які є причиною впливу кінематичних, технологічних, регулювальних та інших випадкових факторів.

У високочастотному піддіапазоні pojawiaються коливання під впливом збурень, які виникають через вплив сил пружності. Характерним для коливань у цьому піддіапазоні є те, що вони несуть незначну частину енергії коливань та під час поширення демпфуються.

Обчислення широкосмугової взаємної вейвлет функції. Необхідно відзначити, що сигнали діагностики двигуна автомобіля відзначаються певною нестационарністю. Застосування кореляційної обробки таких сигналів на інтервалі спостереження значно покращує ефективність обробки. Тривалі інтервали спостереження, приводять до нестационарності або часозмінного спектра в сигналах, що спостерігаються. Застосування вейвлет теорії для аналізу таких сигналів у багатьох випадках є дуже ефективним [3,5]. Відзначимо, 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 дозволяє суттєво збільшити інформацію про аналізовані сигнали, а обчислення їх взаємних залежностей дає додаткову інформацію, яка є корисною при виявленні дефектів та несправностей. Таким чином, обчислення широкосмугової взаємної вейвлет функції (ШВВФ) двох змінних є корисним і доцільним. При цьому ШВВФ можна розглядати як одну із форм подання функцій двох змінних, яка представляє кореляцію між одним сигналом і масштабованою та зміщеною версією іншого сигналу. Представлення двох сигналів в 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 $i = 1, 2$.

$$(W_g r_i)(a,b) = \langle r_i, g_{a,b} \rangle = |a|^{-1/2} \int r_i(t) g^*((t-b)/a) dt. \quad (9)$$

Таким чином, тепер обидва прийнятих сигнали зображені у вейвлет області. Обчислення проводяться наступним чином:

$$\begin{aligned} ШВВФФ &= \langle r_1(t), r_2(t) \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{da}{a^2} \int_{-\infty}^{\infty} \langle r_1, g_{a,b} \rangle \langle g_{a,b}, r_2 \rangle db = \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \frac{da}{a^2} \int_{-\infty}^{\infty} [W_g r_1(a,b)] [W_g r_2(a,b)]^* db. \end{aligned} \quad (10)$$

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

Якщо узагальнено трактувати ШВВФ (замість її оцінки лише в одній точці $S = 1, \tau = 0$, де параметр "s" є часовим масштабом, а параметр "τ" є часовим зміщенням) у вейвлет області, то необхідно для розширення трактування розглядати $r_2(t)$ як функцією S і τ . З огляду на це отримується заміна представлення ШВВФ через функції вейвлет перетворень двох отриманих сигналів:

$$\text{ШВФ}\Phi(S, \tau) = W_{r_2} r_1 \left(\frac{1}{S}, \frac{\tau}{S} \right) = \frac{1}{c_g} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{da}{a^2} \int_{-\infty}^{\infty} [W_g r_1(a, b)]_n \cdot [W_g^* r_2(Sa, Sb - \tau)]_m db. \quad (11)$$

Таким чином, ШВВФ двох невідомих сигналів може бути обчислена у вейвлет області. Якщо r_2 задовольняє умови, які властиві базовим функціям, то ШВВФ представлятиме вейвлет перетворення відносно нової базової вейвлет функції r_2 і водночас виражатиметься як дія деякого інтегрального оператора на два сигнали вейвлет перетворень.

Алгоритм формування ШВВФ повністю відображає її відтворення у вейвлет області. Згідно цього алгоритму обидва сигнали, які подані в часовій області $r_1(t)$ і $r_2(t)$, зазнають вейвлет перетворення відносно вищезгаданої базової вейвлет функції, $g(t)$. Наступний крок полягає у масштабуванні S і зміщенні τ одного з перетворень, яке розглядається як базове у вейвлет області. На останньому етапі відбувається перемноження і підсумовування у двовимірному просторі.

Таким чином, часові і просторові виміри невіддільні в даному алгоритмі і при цьому будується багатовимірне просторово-часове вейвлет перетворення, яке може характеризувати як короткотривалі (перехідні) нестационарності сигналу (дві функції в (a, b) плані), так і просторову структуру (ШВВФ в $(S$ і $\tau)$ плані). Ключовим для нового багатовимірного вейвлет перетворення в рівнянні (11) є те, що воно представляє дві двовимірні функції в одну двовимірну функцію так, що розмірність при цьому не збільшується.

Розроблена структура (рис. 7) на основі сформульованого вейвлет простору ШВВФ має широке застосування. При цьому 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, при якому два приймачі спостерігають спільне джерело сигналу. Величина взаємного вейвлет перетворення може мати пік, який буде вказувати на цю спорідненість або навпаки, коли спорідненість суттєво відхиляється.

Таким чином, розглянуте представлення ШВВФ у вейвлет області порівняно з традиційним зображенням ШВВФ в часовій області отримує ряд позитивних властивостей:

- коли два вейвлет перетворення, що обробляються, взяті відносно однієї базової вейвлет функції, то взаємне вейвлет перетворення визначає ступінь кореляції або її відхилення між двома оригінальними вейвлет перетвореннями або сигналами;
- взаємне вейвлет перетворення відображає два прийняті сигнали в просторове вейвлет перетворення або ШВВФ, при цьому перші два перетворення здійснюються в 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;

- в представленій таким чином ШВВФ суттєво 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 обробки деяких змішаних даних або алгоритмів обробки в нейронних мережах [5];
- нове формування ШВВФ інтерпретується як взаємний вейвлет спектр.

Згадані вище властивості використовуються для ефективного ідентифікування несправностей вузлів автомобілів.

Проведений аналіз вказує на те, що подання обох сигналів у вейвлет області дозволяє суттєво збільшити інформацію про аналізовані сигнали, а обчислення їх взаємних залежностей дає додаткову інформацію, яка є корисною при виявленні дефектів та несправностей.

Формування бази даних характеристик зразкових двигунів. Важливим етапом діагностування автомобільних двигунів є формування зразкових, опорних даних, які записані з нових двигунів конкретних марок і модифікацій автомобілів. З огляду на це існує потреба у створенні структурованої системи даних, де в одному місці будуть зібрані усі зразкові характеристики конкретних марок двигунів.

Сьогодні існують різні типи баз даних, які використовуються у різних галузях з різною метою. В останні роки все більше стають популярними, так звані, «нереляційні бази даних» або як їх ще називають – «NoSQL бази даних». Бази-даних NoSQL створені у відповідь на обмеження традиційної технології реляційних баз даних. Якщо порівнювати з реляційними базами даних, то такий тип баз забезпечує більшу масштабність, а також чудову продуктивність. Така модель даних є простішою, ніж у реляційних моделях. Переваги NoSQL баз даних включають можливість опрацювання [6]:

- великих за обсягом структурованих, напівструктурованих та неструктурованих даних;
- використання об'єктно-орієнтованого програмування, яке є простим у використанні та гнучким, а також забезпечують:
- ефективну, масштабну архітектуру;
- невисокі затрати на розробку, впровадження та використання програмного забезпечення.

Не менш важливим є розроблення зручного інтерфейсу для управління даними. Перш за все, виникає необхідність створення користувацького інтерфейсу. Для реалізації цього завдання використовується фреймворк (інфраструктура програмних рішень, що полегшує розробку складних систем) Vue.

js. Важливою відмінністю від фреймворків-монолітів є те, що Vue адаптований для поступового впровадження. Ядро фреймворка першочергово вирішує задачі рівня представлення (view-рівень), що спрощує можливість інтеграції з бібліотеками чи існуючими проектами. Крім того, Vue є ефективним при розробці складних односторінкових застосувань (Single-Page Applications) у поєднанні з додатковими бібліотеками та сучасними інструментами [7]. Структура файлів проекту зображена на рис.8.

Додатково використовується бібліотека Vuetify – яка дає можливість розробити користувацький інтерфейс з використанням принципів Google Material Design. Бібліотека містить більше 80 компонентів, які придатні для повторного використання і спроектовані зі застосуванням семантичних принципів, заснованих на простих і чітких іменних властивостях, які легко запам'ятовуються і не складні у використанні [7].

Для зберігання усіх даних використовується платформа Firebase, зокрема служба Realtime Database, яка в режимі реального часу надає базу даних та бекенд як службу. Така особливість дозволяє розробнику API (Application Programming Interface) синхронізувати дані між користувачем та додатком, а також зберігати їх у хмарному сховищі Firebase.

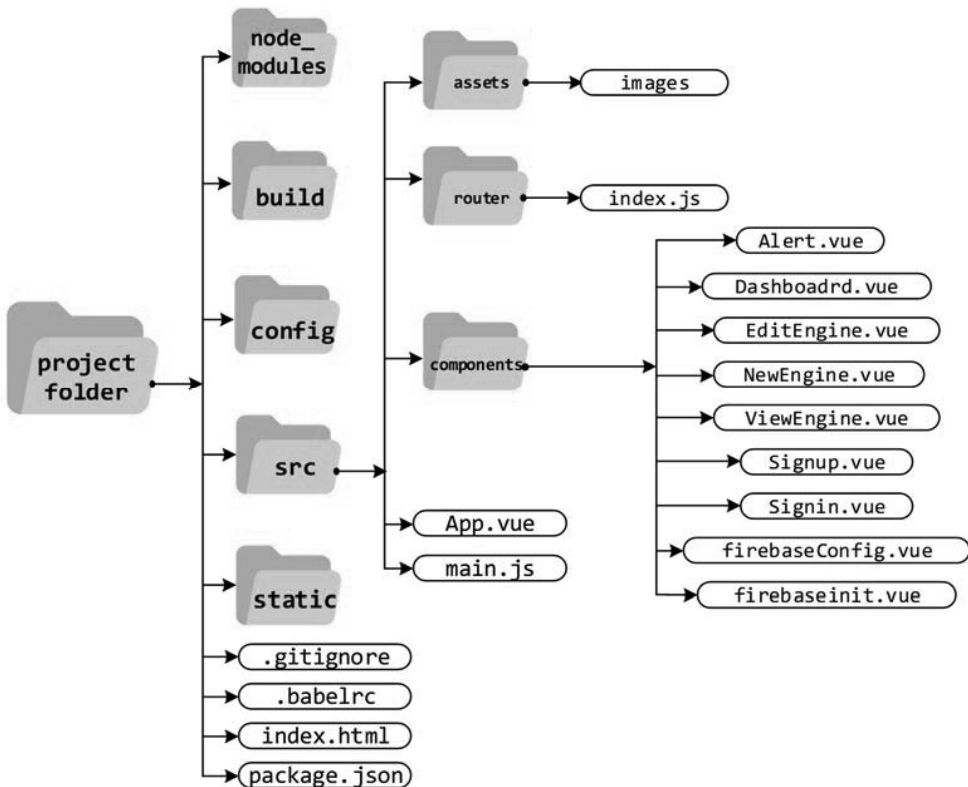


Рис.8. Структура файлів проекту

До бази даних також може бути отриманий доступ через REST API або шляхом написання JavaScript-коду відповідно до офіційної документації. Для отримання push-повідомлень від сервера REST API використовується протокол подій із сервером, який є інтерфейсом для створення HTTP-з'єднань. Необхідно відзначити, що Firebase NoSQL це база-даних, а значить структурно база буде як один великий JSON-об'єкт(JavaScript Object Notation). Приклад структури бази-даних наведений на рис.9.

Розроблені веб-застосування дають можливість користувачу додавати нові двигуни з характеристиками та графіками, редагувати/видаляти існуючі дані та переглядати інформацію про наявні в базі двигуни.

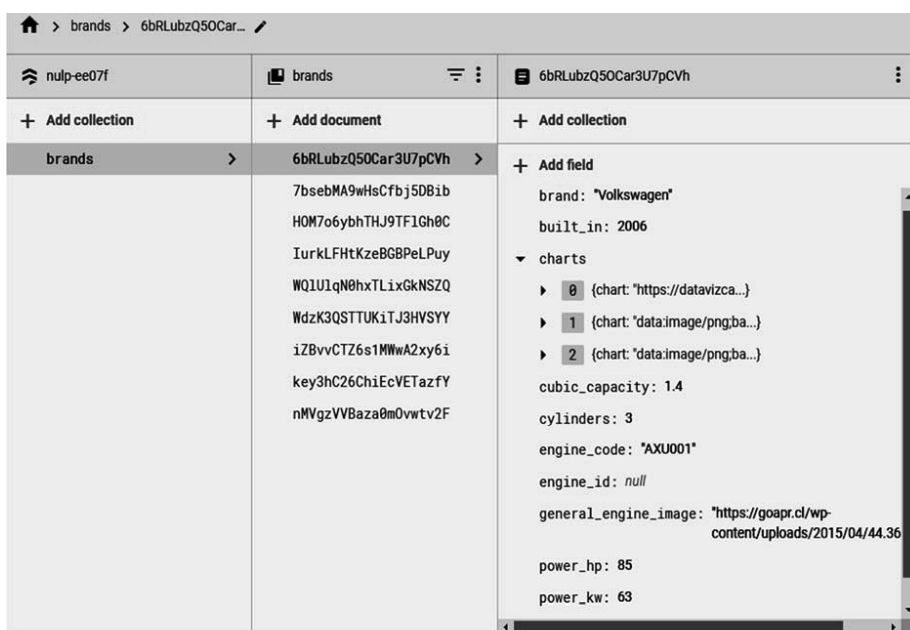


Рис.9. Структура бази даних

Для зручності пошуку даних системою передбачена можливість фільтрування даних стосовно марки автомобіля та його моделі. У системі реалізована можливість логування існуючих користувачів та реєстрації нових. Інтерфейс веб-застосування наведений на рис.10.

Моделювання у середовищі Matlab R2018b. В процесі досліджень проводилось моделювання процесу оцінки взаємного вейвлет перетворення сигналу у середовищі Matlab R2018b. Для цього використано функції пакетів «Signal Processing Toolbox™» та «Identification Toolbox™». Додаткові пакети представляють собою набір інструментів необхідних для здійснення різного роду задач обробки сигналів, починаючи від генерації сигналів, закінчуючи реалізацією фільтрів, параметричного моделювання та спектрального аналізу. Пакети «Signal Processing Toolbox™» містять алгоритми, які збереженні в .m-файлах [8].



Рис.10. Елементи інтерфейсу веб-аплікації

З використанням функцій пакетів проведено моделювання вібраційних сигналів зразкових деталей та сигналів відповідних їм деталей з дефектами, шляхом оцінки і порівняння взаємних вейвлет перетворень між сигналами колінчатого валу і розподільного валу автомобільного двигуна (рис. 11). З'єднанні між собою зубчастим ременем шестерні колінчатого та розподільного валів складаються з двадцяти двох та тридцяти восьми зубів відповідно. Дослідження проводились при швидкості обертання 900 об/хв, тобто в режимі холостого ходу.

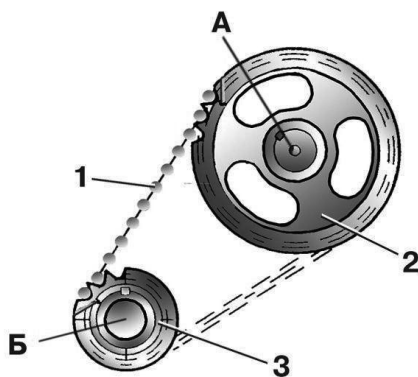


Рис.11. Зовнішній вигляд досліджуваних елементів:

1 – ремень приводу розподільного валу; 2 – шестерня розподільного валу; 3 – шестерня колінчатого валу; А і Б – місця встановлення сенсорові вібрації

Моделюванням дефектом представлено пошкодження одного зі зубів шестерні, який приводив до виникнення високочастотного удару і проявлявся один раз за один оберт шестерні. Після встановлення початкових умов в середовищі Matlab, отримані сигнали вібрації для зразкової шестерні (рис.12) та шестерні з дефектом (рис.13).

Оскільки несправність знаходилась на шестерні, то передбачалося, що бічні смуги мають з'явитися на певній відстані одна від одної в межах спектру. З огляду на це наступним кроком є побудова спектру сигналу, який має показати очікувані піки для шестерні, однак присутність завад у вигляді шуму в сигналі робить піки бічних смуг слабозбірними (рис. 14).

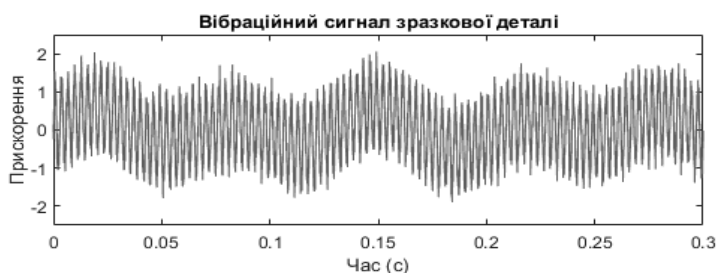


Рис.12. Згенерований сигнал вібрації зразкової деталі

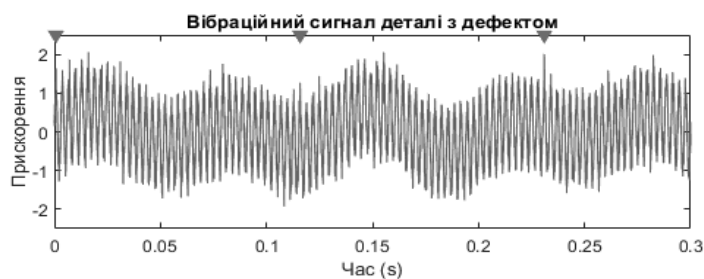


Рис.13. Згенерований сигнал вібрації деталі з дефектом

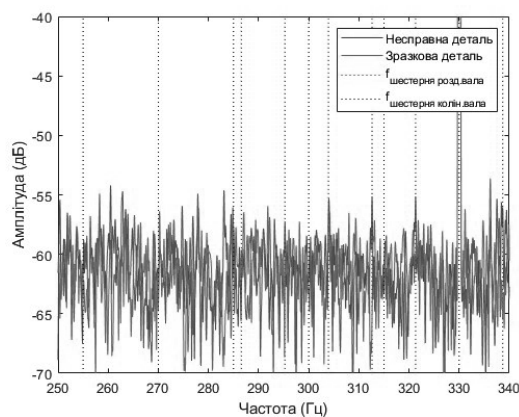


Рис.14. Спектр сигналу вібрації від сенсорів

З метою виділення та подальшого встановлення несправностей елементів двигуна автомобіля проводиться додаткова обробка сигналів у вейвлет області. Зокрема проводиться представлення двох сигналів у вейвлет області відносно

одної базової вейвлет функції. Наступний етап обробки полягає в обчисленні взаємного вейвлет перетворення, на основі якого визначається дефект певної частини двигуна автомобіля.

Висновки. Впровадження нових технологій діагностування двигунів автомобілів відкриває широкі можливості для створення вдосконалених систем контролю та діагностики в процесі експлуатації транспортних засобів. Запропонована технологія діагностування на основі використання нових підходів до обробки сигналів, а саме з використанням аналізу широкосмугових взаємних вейвлет функцій, забезпечує можливість підвищення точності ідентифікації несправностей окремих вузлів двигунів та зменшити час здійснення діагностування і, таким чином, забезпечити більш ефективне діагностування силових систем автомобілів. Крім того, використання вейвлет області для перетворення вхідних сигналів забезпечує високу ефективність фільтрування та ідентифікацію сигналів, суттєво покращує роздільну здатність і коефіцієнт передачі в просторовій області, що дозволяє з досить високою ймовірністю діагностувати несправності двигунів. Важливою особливістю такого діагностування є те, що даний підхід може бути широко використаним для інших різних типів двигунів, зокрема, в залізничній та авіабудівних галузях.

Список використаних джерел

1. Мигаль В.Д. Техническая диагностика автомобилей. Теоретические основы: учеб. пособ. / В. Д. Мигаль. – Х. : Изд-во «Майдан», 2014 - 516 с.
2. Оксень, Е. И. Метод вибрационной диагностики системы зажигания двигателей внутреннего сгорания / Е. И. Оксень, Д. Е. Оксень // Двигатели внутреннего сгорания. – 2006. – № 1. – С. 136–140.
3. G. T. Zheng 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.
4. 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 до ресурсу: <http://www.tkea.com.ua/siet/archive/2015/133.pdf> (дата звернення: 20.05.2018). – Назва з екрана.
5. Наконечний А.Й., Лагун І.І., Верес З.С., Наконечний Р.А., Федак В.І. Теорія і практика обробки сигналів у малохвильовій (wavelet) області, під редакцією А.Й. Наконечного: Монографія. – Львів: Вид-во Растер -7, 2020 – 470 с.
6. Advantages And Disadvantages - Web Apps – Режим доступу до ресурсу: <https://www.objectiveit.com/blog/the-advantages-and-disadvantages-of-web-apps> .
7. Vue.js [Електронний ресурс] : [Веб-сайт] – Режим доступу: <https://vuejs.org/>.
8. Signal Processing Toolbox™ [Електронний ресурс] : [Веб-сайт] – Режим доступу: https://www.mathworks.com/help/pdf_doc/signal/signal_ref.pdf

REFERENCES

1. Migal` V.D. (2014). Tekhnicheskaya diagnostika avtomobilej. Teoreticheskie osnovy: ucheb. posob. / V. D. Migal`. – Kh.: Izd-vo «Majdan» - 516 p. (in Russian)

2. Oksen', E. I. (2006). Metod vibraczionnoj diagnostiki sistemy zazhiganiya dvigatelej vnutrennego sgoraniya / E. I. Oksen', D. E. Oksen' // Dvigateli vnutrennego sgoraniya –№ 1.– P. 136–140. (in Russian)
3. G. T. Zheng (2002). Internal Combustion Engine Noise Analysis With Time-Frequency Distribution / A. Y. T. Leung // Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. - №12. - P. 645-649. (in English)
4. Baralevich V.G., Erimichoj I.N., Panov L.I. (2015). Vibroakusticheskaya diagnostika avtomobilnykh dvigatelej vnutrennego sgoraniya [Elektronnij resurs] // Trudy` XVI Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferenczii «SIE`T» - Odessa - P. 133-134. (in Russian)
5. Nakonechnyi A.Y. Lahun I.I. Veres Z.Ye. Nakonechnyi R.A. Fedak V.I. (2020). Teoriia I Praktyka Obrobky Syhnaliv U Malokhvylovii (Wavelet) Oblasti Pid Redaktsiieiu A.Y. Nakonechnoho Monohrafiia. – Lviv Vyd-Vo Raster -7 – 470 p. (in Ukrainian)
6. Advantages And Disadvantages - Web Apps – Regym dostupu: <https://www.objectiveit.com/blog/the-advantages-and-disadvantages-of-web-apps> . (in English)
7. Vue.js [Elektronnij resurs] : [Website] – Regym dostupu: <https://vuejs.org/>. (in English)
8. Signal Processing Toolbox™ [Elektronnij resurs] : [Website] – Regym dostupu: https://www.mathworks.com/help/pdf_doc/signal/signal_ref.pdf (in English)

DOI 10.32403/2411-9210-2021-1-45-68-89

CAR ENGINES DIAGNOSING BASED ON EVALUATION OF THE MUTUAL WAVELET DEPENDENCY

Dmytro Horoshko, Rostyslav Nakonechnyi

*Lviv Polytechnic National University
12, S.Bandera St., Lviv, 79013, Ukraine
Rostyslav.A.Nakonechnyi@lpnu.ua*

This article proposes a technology of car engine diagnosing based on the usage of the mutual wavelet dependency between vibroacoustic signals of their individual components. In this article, the main stages and methods of car diagnosing are analyzed and the advantages of diagnosing based on vibroacoustic signals are given. The engine diagnosing algorithm is developed on the calculation of broadband mutual wavelet function (BMWF) in the wavelet domain. The usability of the algorithm is confirmed by simulation in Matlab R2018b environment. Additionally, NoSQL database to store engine characteristics and web application for database access and editing are provided. The proposed technology increases the efficiency of car powertrain diagnosing due to less time consumption and higher precision of engine components malfunction detection, and, what is more, has a possibility of implementation for other engine types.

Keywords: *wavelet, broadband mutual wavelet function, BMWF, engine diagnosing, vibroacoustic diagnosing, signal analysis, signal processing, Matlab, NoSQL.*

Стаття надійшла до редакції 12.11.2020

Received 12.11.2020