

Біліченко В.В., Матвійчук Д.М.
*Вінницький національний технічний університет***ОГЛЯД СУЧАСНИХ ВІБРОАКУСТИЧНИХ МЕТОДІВ КОНТРОЛЮ ШУМУ ДИЗЕЛЬНИХ ДВИГУНІВ З МЕТОЮ ЇХ ПОДАЛЬШОГО ВИКОРИСТАННЯ В СИМУЛЯЦІЇ РОБОЧОГО ПРОЦЕСУ ДВИГУНА**

Ця стаття розглядає можливості використання різних віброакустичних сигналів, для визначення несправностей, при проведенні параметричної діагностики двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ). Аналіз праць дослідників показав, що роботи зосереджені на кінцевому визначенні типу несправності та не визначають першопричину виникнення несправності, а також не дають повного опису фізичної складової механізму утворення шуму та вібрацій при виконанні процесу діагностики. В даній статті наведено короткий опис механізму генерації звуку і вібрацій, які виникають безпосередньо при робочому процесі двигуна, що в свою чергу може бути використано як основний параметр при виконанні діагностики та визначенню технічного стану механізму зокрема та двигуна в цілому. Наведено огляд сучасних методів визначення несправностей та діагностики, що базуються на віброакустичному методі та досліджують такі параметри як шум, вібрації, що є одними з ключових для даного методу, та дають найбільш точний та об'єктивний результат у порівнянні з іншими загальноприйнятими методами діагностики технічного стану. В статті описані різні типи несправностей, які можуть бути виявлені віброакустичним методом та безпосередній характер їх впливу на роботу ДВЗ. Виходячи із потреб швидкого визначення характеру і типу несправності, наведені дані в статті можуть використовуватись як алгоритм для побудови моделі, встановленню необхідних вхідних параметрів та подальшої симуляції робочого процесу двигуна в САЕ середовищі Ansys. Наведені методики математичного аналізу дають опис ключових параметрів, які впливають на точність аналізу та в подальшому на ефективність діагностування та виявлення дефектів не залежно від типу ДВЗ, виду палива, наявних електричних компонентів базової системи керування ДВЗ, що в свою чергу є універсальним та ефективним інструментом вирішення поставлених задач. Беручи до уваги широкий спектр та різновид систем керування та ступеню електричного оснащення ДВЗ, універсальність методики спрощує та вирішує значний ряд проблем. Проведений в статті аналіз шуму та вібрацій відіграє важливу роль у визначенні першопричини різного роду несправностей. Компоненти ДВЗ через наявність технологічних зазорів у спряженнях, циклічної зміни навантаження за напрямком та точкою прикладання, незбалансованості та відсутності урівноваження окремих компонентів механізму, створюють шум і вібрації. Тому дуже важливо визначити джерела вібрацій, щоб уникнути відмов у роботі окремих складових механізму та системи зокрема.

Ключові слова: дизельний двигун, модальний аналіз, акустика двигуна, обробка сигналів, діагностування, симуляція, довговічність, САЕ системи.

ВСТУП

Вимірюванням тиску в циліндрі, шуму, вібрації та акустичних сигналів користуються для визначення технічного стану дизельного двигуна [1]. Однак існує складність виокремити з широкого спектру акустичного сигналу необхідний діапазон частот що відповідає за бажаний параметр робочого процесу двигуна. Це пов'язано з конструктивними особливостями двигунів, великою кількістю рухомих механізмів, спектр сигналу яких накладається один на одного або взагалі вступає в резонанс. Отримання сигналів, їх обробка та виділення їх ознак є основними етапами діагностики несправностей ДВЗ [2]. Проведення параметричної діагностики дозволяє ефективно контролювати робочий процес двигуна а також виявити несправності до того, коли ступінь зносу компонентів вийде за допустимі норми встановлені виробником, що завдасть значної шкоди ДВЗ. Раннє виявлення несправностей має переваги, як з точки зору вартості ремонту так і скорочення часу на проведення ремонту механізму, а у випадку комерційного транспорту це є дуже важливим, оскільки зменшує ймовірність незапланованого простою транспортного засобу.

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ І ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Визначення вібрації є ефективним методом у діагностиці, але об'єктивність вимірювальних значень значною мірою залежить від розташування акустичних датчиків у зв'язку з чим виникають проблеми у їх оптимальному місці розташуванні на досліджуваному об'єкті. Сигнал вібрації можна аналізувати за частотним спектром, піковими або середньоквадратичними значеннями сигналу. Дані значення можуть бути використані для визначення величини дисбалансу, зазорів у спряженнях, технічного стану опор кочення, не співвісності валів та багато іншого [1].

В свою чергу моніторинг тиску в циліндрах двигуна надає розуміння про стан циліндрів та поршневої групи в цілому (ЦПГ), наявність та відсутність проблем з клапанами головки блоку циліндрів (ГБЦ), аналіз моменту впорскування палива що дає розуміння про ефективність згоряння палива в двигуні, однак високі температурні умови зумовлюють використання специфічних датчиків

тиску, що в свою чергу є дорогими та мають короткий термін служби [2].

Викиди шуму при робочому процесі двигуна сприймаються людиною в результаті коливання повітряного тиску що безпосередньо впливає на вушні барабани людського організму. Різні звукові характеристики можуть бути проаналізовані за допомогою рівнів звукового тиску (SPL) і частоти з рівними контурами гучності. Для того щоб отримати рівні, які можуть бути проаналізовані людськими органами чуття їх розділяють на три частотні діапазони А, В, С згідно [3]. При чому частотний діапазон А найбільш точно відповідає людському вуху.

Через вищий ступінь стиснення дизельні двигуни генерують більше шуму порівняно з бензиновими двигунами [4,5]. Вищий ступінь стиснення збільшує навантаження на ЦПГ що зумовлює конструктивні особливості деталей у порівнянні з бензиновими двигунами, збільшення запасу міцності та відповідно і маси рухомих деталей. Це приводить до загального збільшення вібрацій в системі та відповідно і збільшення шуму при робочому процесі. Також слід зазначити що через велику кількість зовнішніх впливів, забруднення деталей та складних умов роботи дизельних двигунів чутливість вібро акустичних датчиків знижується, в результаті чого аналіз шуму ускладнюється, тому методи обробки сигналів аналізують інформацію про події у фіксований проміжок часу в залежності від положення кривошипно-шатунного механізму.

Методики визначення розділяють на короточасні перетворення Фур'є (Short Time Fourier Transformations STFT), вейвлет перетворення (Wavelet Transformation WT), білінійний часово частотний розподіл (Bilinear Time Frequency Distribution BTFD) [6], розподіл Вінгера – Вілле (Wigner – Ville WVD), розподіл Чоя – Вільямса (CWD). Якщо дані методи використовувати до перехідних сигналів спектр частот яких огинає різного роду перешкоди, утворюються пульсації, які можуть призвести до втрати інформації [8]. Однак дані методи мають кращу частотну та часову роздільну здатність порівняно зі звичайними перетвореннями Фур'є.

ЦІЛІ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕНЬ

Метою цієї роботи є аналіз найпоширеніших методів обробки сигналів з ціллю використання обраної методики для симуляції віброакустичного аналізу робочого процесу двигуна в САЕ системах. Авторами були представлені різні важливі властивості цих методів, їх ефективність була оцінена шляхом застосування даних отриманих від двигуна, що працює в різних умовах випробувань. Ця стаття представляє комплексне дослідження цих методів та може бути джерелом інформації для розуміння фізичної складової робочих процесів двигуна, яка може бути використана для подальшого моделювання та симуляції з ціллю створення технічних засобів необхідних для проведення параметричної діагностики стану дизельного двигуна.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Аналізуючи проведені дослідження можна виділити що Hambric та інші [3] досліджували способи оптимізації конструкцій для зменшення вібрацій. Nuawi та інші [4] запропонували статистичний підхід для характеристики втомної міцності металу. Ji та інші [5] розглянули моделювання екструдованих алюмінієвих конструкцій для прогнозування віброакустичних реакцій. Duffor відстежував модуляцію ультразвукових коливань через зразок з тріщинами [6]. Aumerich та інші [8] досліджували пошкодження внаслідок ударів у композитних ламінатах. Trochidis та інші [9] досліджували нелінійні особливості розподілу (ZAM) було визначено більш чутливий новий індекс, який корелював з розмірами тріщин. Urban та інші [10] провели аналіз віброакустичних методів у біомедицині. Jia та інші розробили індекс нечутливий до навантаження пошкоджень (Lidi) для відстеження росту тріщин. Anwar вимірював вібрації на коробці передач у місці з'єднання з двигуном [12]. Wang et та інші [13] запропонували дослідження акустичних параметрів зв'язаних систем на основі нечітких параметрів. Gorski та інші [14] використовували акустичні методи та обробку сигналів для аналізу зносу інструментів. Hipol вивчав скінченно-елементний аналіз для аналізу аерокосмічних конструкцій [15]. Mohanty та інші [16] визначали та прогнозували поведінку опорних підшипників двигуна за допомогою адаптивних алгоритмів шуму. Cheng та інші [17] прогнозували початок згоряння в дизельних двигунах, використовуючи швидкість вібрацій головки блоку циліндрів. Dukas та інші [18] використовували методи акустичного емісійного зондування для діагностики несправностей. Flett та інші [19] використовували метод Наїва-Байєса для діагностики та виявлення несправностей клапанного механізму.

Найбільш цікавим є вивчення збудження та вібрацій у процесах згоряння палива та руху поршня оскільки їхній спектр шумової емісії впливає значною мірою на емісію двигуна в цілому. Найбільш значущі роботи за попередньо наведеним параметром відображені в таблиці 1.

Таблиця 1 - Огляд наукових робіт

Автори	Тип двигуна	Метод	Мета
Jung I., Jin, J., So H., Nam C. et al.[19]	Чотирьох циліндровий дизель	Зміна впорскування палива	Класифікація індексів пов'язаних з шумом
Ingemar Andersson, Tomas McKelvey, Martin Larsson[20]	Шести циліндровий дизель	Енергія вібрацій	Оцінка параметрів фазового горіння
Zhen Peng ,Weisong Xie, Guichang Zhang , Zhenyu Hong, Junhong Zhang[21]	Чотирьох циліндровий дизель	Імітація поперечного руху юбки поршня	Спостереження за впливом геометричних параметрів юбки поршня на його бічні переміщення
N.Dolatabadi, B.Littlefair, M.Dela Cruz,S. Theodossiades, S.J.Rothberg, H. Rahnejat[22]	Одноциліндровий дизель	Аналіз прискорень блоку двигуна	Визначення найбільш чутливих місця на блоці двигуна
Yeow-Chong Tan, Zaidi Mohd Ripin[23]	Чотирьох циліндровий дизель	Визначення неврівноважених мас	Моделювання результуючих коливань блоку двигуна

Аналізуючи основні інструментами обробки сигналів можна виділити декілька найбільш важливих. Функція спектральної щільності потужності (Ψ^2) яка позначає випадковий процес, який забезпечує частотний склад даних з точки зору їх середнього квадратичного значення [9]. Середнє квадратичне значення часового проміжку в діапазоні частот $[\omega, \omega + \Delta \omega]$ можна отримати, пропустивши зразок через фільтр з різними частотними характеристиками зрізу, а потім обчисливши середнє квадратичне значення вихідного сигналу. Середнє квадратичне значення $T \rightarrow \infty$, тобто при збільшенні T до нескінченності середнє значення квадрата наближається до середнього квадратичного значення.

$$\psi^2(\omega, \Delta\omega) = \lim_{\Delta\omega \rightarrow \infty} \frac{\int_0^T x^2(t) dt}{T} \quad (1)$$

Частотний аналіз в часі, або по іншому перетворення Фур'є математично можна уявити у вигляді:

$$f(\omega) = \int_0^T f(t) e^{-j\omega t} dt \quad (2)$$

Наведений аналіз використовують коли частотний склад сигналі не змінюється з часом. В іншому випадку використовують часово – частотний аналіз або вейвлет аналіз який є більш підходящим [10]. Часово – частотний аналіз підходить для обробки сигналів з повільною зміною частоти, наприклад тих що генеруються під час зменшення обертів двигуна тоді як вейвлет – аналіз більше підходить для швидких змін частот [11]. При часово – частотному аналізі сигнал розбивається на невеликі інтервали, а потім для кожного інтервалу використовуються перетворення Фур'є [12]. Обсяг вибірки може бути використаний для зміни роздільної здатності вихідного сигналу. Коротша за об'ємом вибірка має вищу роздільну здатність у частотній області і навпаки. Вища роздільна здатність у часі на вищих частотах дає змогу розрізняти короткі послідовності події за допомогою вейвлет – перетворення. Короткочасний частотний аналіз передбачає розкладання сигналу на набір частотних гаусових функцій і може бути представлений як показано нижче, де $x(t)$ – вхідний сигнал, а $h(t-T)$ – вибіркова функція.

$$STFT(\tau, f) = \int_0^T x(t) h^*(t-T) e^{-j\omega t} dt \quad (3)$$

Функція Вінера-Віллі має наступний квадратичний часово - частотний розподіл та може бути представлена у вигляді [9]:

$$STFT(t, f) = \int_0^T x\left(t - \frac{T}{2}\right) x^*\left(t + \frac{T}{2}\right) e^{-j\omega t} dt \quad (4)$$

Розглядаючи вейвлет аналіз потрібно виділити, що він проектує сигнал на спільну площину час-частота та є чутливим до перехідних процесів у сигналах. Одним із головних недоліків різних методів обробки в часовій частотній області є утворення бриж (ripples), що ускладнює вилучення корисної інформації [13]. Під час вейвлет аналізу частотна роздільна здатність є вищою на низьких частотах, тоді як часова роздільна здатність є кращою для високих частот. Таким чином, результати вейвлет-аналізу є точнішими порівняно з іншими методами [14]. Метод вейвлет перетворення дозволяє представити сигнал у вигляді сімейства функцій із нульовим середнім значенням, які називаються вейвлетами. Вони забезпечують високу часову роздільну здатність і не спричиняють перехресних перешкод. Функція спектральної щільності потужності (PSD) є подібною до короточасного частотного аналізу, тоді як вейвлет перетворення представляє собою лінійне перетворення. Квадрат модуля вейвлет перетворення називається скалограмою. Одна скалограма може охоплювати весь чутний діапазон частот із часовою роздільною здатністю приблизно 0,1 мс для високочастотних компонентів [11]. Це робить скалограму особливо придатною для аналізу таких сигналів, як шум тертя та скрипіння, які потребують широкосмугового частотного аналізу. Математично для функції $f(t)$ комплексне вейвлет перетворення визначається [15]:

$$CWT(a, b) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \frac{1}{\sqrt{a}} \frac{\Psi(t-b)}{a} dx \quad (5)$$

де $\Psi(t)$ – материнський вейвлет; $f(t)$ – аналізований сигнал; a – масштабний коефіцієнт; b – коефіцієнт зсуву; $CWT(a, b)$ вейвлет – коефіцієнти.

Функція материнського вейвлета $\Psi(t)$ повинна мати нульове середнє значення та експоненціально спадати до нуля, математично можна зобразити так :

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \psi(t) dt = 0 \quad (6)$$

Функція та її перетворення Фур'є повинні задовольняти умову допустимості, тобто:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\Psi(t)^2}{|f|} dt \leq 0 \quad (7)$$

Параметри дилатації (масштабування), що визначає наскільки розтягується або стискається вейвлет та параметри трансляції (зсуву), який визначає де саме на часовій осі застосовується вейвлет, у неперервному вейвлет-перетворенні (CWT) зазнають варіацій, що ускладнює його використання. Дискретизація сигналів може певною мірою допомогти зменшити цю проблему оскільки параметри перестають змінюватись безперервно. Неперервне вейвлет-перетворення CWT для дискретного сигналу X_m визначається через його вибіркові точки даних m, n (точки дискретизації) і часовий крок дискретизації Δt , математично це можна зобразити як :

$$CWT = \sum_{m=0}^{N-1} X_m \Psi^* \left[\frac{(m-n)\Delta t}{X_j} \right] \quad (8)$$

де $t = m\Delta t; b = n\Delta t$, m та n змінні $0, 1, 2, \dots, N-1, N_{y0}$

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

Основні джерела шуму та вібрацій у двигуні використовуються для оцінювання продуктивності автомобільних двигунів, що є необхідним для проектування та планування систем. Це включає тестування різних двигунів із різними конфігураціями за змінних умов впорскування палива [1, 2, 3]. Основними джерелами шуму є структурний шум та повітряний шум. Повітряний шум

(airborne noise) це шум що поширюється через повітря. Структурний шум (structure – borne noise) це низькочастотний звук, що передається через конструкційні елементи.

Проведені експериментальні та аналітичні дослідження можна охарактеризувати та класифікувати наступним чином. Загальні вимірювання рівня звукового тиску. Ранжування та ідентифікація джерел. Дослідження шляхів передачі шуму. Суб'єктивна та об'єктивна оцінка, що розглядає особливості різних джерел шуму, які виникають в двигуні. Шум спричинений згорянням, оскільки процес згоряння є ключовим для проектування та налаштування продуктивності автомобільної системи. Шум і вібрації, спричинені згорянням, передаються через стінки гільзи циліндра, стінки циліндра та шатун у навколишнє середовище.

Структурне затушення також впливає на шум, що випромінюється двигуном. Більша жорсткість блоку циліндрів призводить до підвищення резонансних частот. Скорочення періоду затримки згоряння веде до зменшення шуму від згоряння. Також на рівень шуму впливають ступінь стиснення, тиск повітря на впуску, рециркуляція випускних газів, структурне затушення різних деталей [20].

Основними джерелами шуму у поршневому механізмі є удари від пальця (pin tickling), вторинний рух поршня, стукіт (rattling). Шум від бічного руху поршня є найбільш значущим у поршневому вузлу, особливо при холодному запуску на холостому ходу [21].

Якщо розглядати підсистему газорозподільного механізму клапанів то можна виділити три основних джерела шуму. Прискорення кулачка (CAM), відкриття та закриття клапанів викликає високочастотні вібрації. При ударах клапанів спостерігаються імпульсні стрибкоподібні рухи, коли відбувається контакт між кулачком, штовхачем і сідлом клапана на високих швидкостях. Третім джерелом шуму є фрикційні вібрації, що є низько – швидкісними вібраціями, що виникають через мікро контакт нерівностей між кулачком і штовхачем.

Шум зубчастого приводу (rattle noise) спричинений нерівномірним крутним моментом від кривошипно – шатунного механізму до приводу, спостерігається під час передачі моменту та є однією з основних проблем [22]. Зазори між зубцями зачеплення викликають вібраційні удари зубчастих коліс на низьких обертах двигуна. Косозубе зачеплення є основним джерелом виючого шуму (whining noise). Рівень цього шуму залежить від кількості та розміру зубців у зачепленні, крутильних навантажень, розташування зубчастого приводу [23].

Шум потоку паливної суміші. Низькочастотний шум на впуску спричинюється турбулентністю у впускних каналах, залежить від площі клапана та швидкості потоку [24]. Процеси наповнення та випуску у вихлопному каналі викликають вихлопний шум [25]. Турбонаддув також є важливим джерелом аеродинамічного шуму.

Шум у підшипникових вузлах. Опорні підшипники кочення колінчастого валу та шатунні підшипники кочення мають зазори, які спричиняють шум [26]. Крутильні моменти призводять до виникнення шуму (rumbling noise) [27]. Для зниження цього типу шуму використовуються методи оптимізації зазорів, застосування демпферів колінчастого валу, внесення конструктивних змін в кількість опор для більш рівномірного навантаження на опори.

Також слід виділити шум в приводних ремнях та ланцюгах де відбуваються удари при зачепленні та полігональний ефект, що залежить від натягу, швидкості та кількості зубців у зачепленні. Загальний рівень шуму позн.8, робочого процесу двигуна можна розкласти на складові позн.1 – 7, як показано на рис.1. Вимірювання здійснювались на відстані 1 м. в закритій камері для дизельного двигуна, де 1 це шум від згоряння палива, 2 шум від ударів поршня, 3 шум вентилятора, 4 шум роботи зубчастого приводу, 5 шум роботи паливного насоса, 6 шум роботи клапанів, 7 інші джерела шуму.

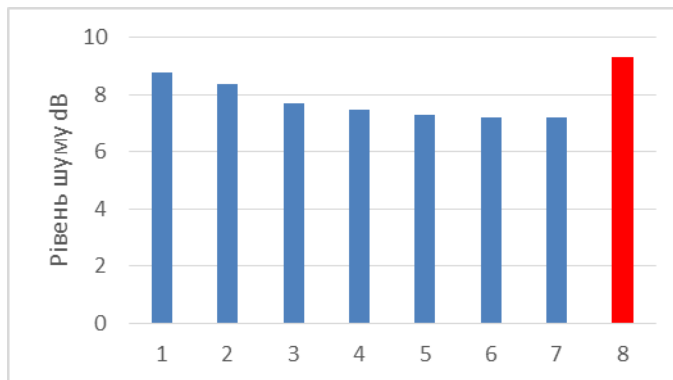


Рисунок 1 – Рівні шуму робочого процесу дизельного двигуна

Механізми утворення шуму від різних підсистем двигуна можна представити у вигляді блок-схеми, представленої на рисунку 2

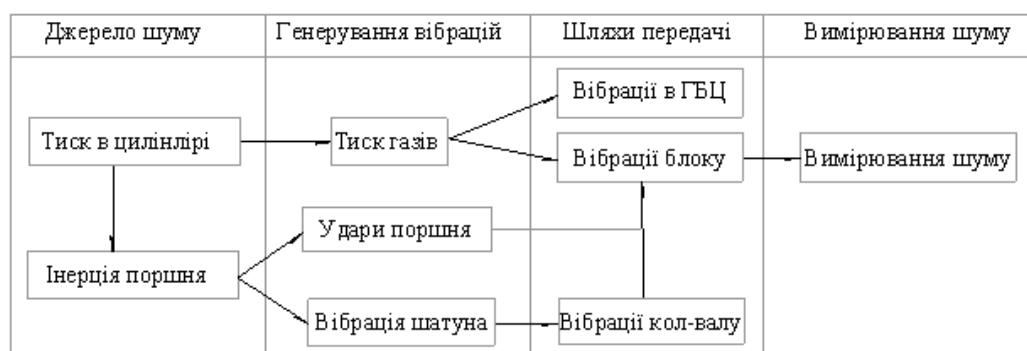


Рисунок 2 – Схематичне відображення механізмів утворення шуму

ВИСНОВКИ

На рис. 1 та 2 представлено механізм утворення шуму від різних джерел у двигуні, а також графіки рівнів шуму підсистем двигуна. Як видно з наведених рисунків, шум згоряння та шум ударів поршня складають основну частку загального шуму (близько 80%). Тому слід зосередити увагу саме на цих аспектах акустики двигуна та виконувати подальші дослідження саме для цієї підсистеми двигуна. Подальші дослідження доцільно виконувати за допомогою використання CAE програмного забезпечення ANSYS та додаткових модулів ANSYS Fluent для моделювання процесів горіння і гідродинаміки, ANSYS Mechanical для вивчення динамічних характеристик (вібрацій та акустики) з подальшим аналізом в ANSYS Acoustic для вивчення акустичних характеристик. Проведений модальний аналіз системи в ANSYS Mechanical дозволить визначити власні частоти та форми коливань компонентів двигуна. В свою чергу проведений гармонічний аналіз дозволить отримати відгук системи на динамічні навантаження. Це дозволить визначити вібраційні характеристики двигуна. Оскільки наведені результати дослідження показують що шум ЦПГ вносить найбільший вклад в спектр шуму тому в подальшому, доцільно використати додатковий модуль ANSYS Acoustic, що дозволить дослідити як зміни зазорів в ЦПГ впливають на генерацію шуму та вібрацій. Після проведення симуляції отримаємо вібраційні і акустичні діаграми, які в подальшому можуть бути використані для створення технічних засобів необхідних для виконання параметричної діагностики дизельного двигуна, а також можуть бути напряму використані для дослідження технічного стану двигуна, шляхом порівняння параметричних даних двигуна без пробігу (еталону) та досліджуваного об'єкту.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Kaisan M.U., Yusuf L.O., Ibrahim U., Narayan S.(2020). Effects of propanol and camphor blended with gasoline fuel on the performance and emissions of a spark ignition engine. ACS Omega, vol. 5, No.41 26454–26462.
2. Sheng G.(2012). Vehicle noise sound vibration and sound quality. Warrendale Pennsylvania USA, ISBN- 978-0-7680-3484-4.
3. Hambric та інші. (2016). Engineering vibroacoustic analysis, methods and applications. ISBN: 978-1-119-95344-9.
4. Nuawi та інші. (2013). Time domain analysis method of the impulse vibro-acoustic signal for fatigue strength characterization of metallic material. Procedia engineering volume 66539-548.
5. Delvecchio S., Bonfiglio P., Pompil F. (2018). Vibro-acoustic condition monitoring of internal combustion engines, a critical review of existing techniques, mechanical systems and signal processing. Volume 99-661-683.
6. Philippe D. (2006). A study of the vibro-acoustic modulation technique for the detection of cracks in metals. The Journal of the Acoustical Society of America, volume 119 1463
7. Creixell M. (2018). Computational reduction techniques for numerical vibro-acoustic analysis of hearing aids. Technical University of Denmark, department of electrical engineering.
8. Aymerich та інші. (2010). Experimental study of impact-damage detection in composite laminates using a cross-modulation vibro-acoustic technique. Volume 9, issue 6, 541-553.

9. Trochidis та інші. (2014) Analysis of vibroacoustic modulations for crack detection, a time-frequency approach based on Zhao-Atlas-Marks distribution, shock and vibration. Volume article id 102157, 8 pages, <https://doi.org/10.1155/2014/102157>.
10. Urban M.W., Alizad A., Aquino W., Greenleaf J.F., Fatemi M. (2011). A review of vibro-acoustography and its applications in medicine, current medical imaging. Volume 7, issue 4, 350-359.
11. Jun J. (2017). Analysis of load effect on nonlinear vibro-acoustic modulation used in on-line monitoring of fatigue cracks, smart materials and structures. Volume 26, number 9.
12. Ahmida, Anwar M. (2018). Condition monitoring and fault diagnosis of a multi-stage gear transmission using vibro-acoustic signals. Doctoral thesis, University of Huddersfield.
13. Yue W., Di W., Lei W., Xiaojun W. (2018). Statistical energy analysis for vibro-acoustic coupled system with fuzzy parameters. Engineering computations, volume 35, issue 2, 565-579.
14. Jarosław G. та інші. (2019). Use of cutting force and vibro-acoustic signals in tool wear monitoring based on multiple regression technique for compreg milling. Bioresources, vol.14.
15. Hipol, Philip J. (1989). Finite element prediction of vibro-acoustic environments. SAE transactions, volume 98, 1881–1889.
16. Mohanty та інші. (2015). User identification of keystroke biometric patterns with the cognitive RAM weightless neural net, advances in machine learning and signal processing. Proceedings of MALSIP, springer international.
17. Yong C., Juan T., Shaobo J., Minli H. (2012). Combustion timing determination based on vibration velocity in HCCI engines. Mechanism and machine theory, volume 58, 20-28.
18. Brian D., James H. (2017). Acoustic emission characteristics of a single cylinder diesel generator at various loads and with a failing injector. Mechanical systems and signal processing, volume 93, 397-414.
19. Jung I., Jin J., So H., Nam C. (2013). An advanced method for developing combustion noise through the analysis of diesel combustion. SAE Technical Paper 2013-01-1901.
20. Andersson I., McKelvey T., Larsson M. (2009). Combustion parameters estimation and control using vibration signal, application to the diesel HCCI engine. Proceedings of the IEEE conference on decision and control.
21. He Z., Xie W., Zhang G., Hong Z., Zhang J. (2014). Piston dynamic characteristics analyses based on FEM method part I, effected by piston skirt parameters. Advances in engineering software, vol 75, 68–85.
22. Dolatabadi та інші. (2015). On identification of piston slap events in internal combustion engines using dynamic analysis. Mechanical Systems and signal processing, vol 58-59, 308-324.
23. Mohd Ripin Z., Chong Tan Y. (2013). Analysis of piston secondary motion. Journal of sound and vibration, vol 332, 5162–5176.
24. Justin F., Gary M. (2016). Fault detection and diagnosis of diesel engine valve trains. Mechanical systems and signal processing, volume 72-73, 316-327.
25. Narayan S. (2014). A review of diesel engine acoustics. FME Transactions, vol. 42, No. 2, 150-154.
26. Narayan S. (2015). Correlation between in cylinder pressure and noise emissions from engines. Journal of kones power train and transport, vol. 22, No. 1, 243-254.
27. Mahroogi F., Narayan S., Gupta V. (2018). Acoustic transfer function in gasoline engines. International journal of vehicle noise and vibration, vol. 14, No. 3, 270-280.

REFERENCES

1. Kaisan M.U., Yusuf L.O., Ibrahim U., Narayan S. (2020). Effects of propanol and camphor blended with gasoline fuel on the performance and emissions of a spark ignition engine. ACS Omega, vol. 5, No.41 26454–26462.
2. Sheng G. (2012). Vehicle noise sound vibration and sound quality. Warrendale Pennsylvania USA, ISBN- 978-0-7680-3484-4.
3. Hambric et al. (2016). Engineering vibroacoustic analysis, methods and applications. ISBN: 978-1-119-95344-9.
4. Nuawi et al. (2013). Time domain analysis method of the impulse vibro-acoustic signal for fatigue strength characterization of metallic material. Procedia engineering volume 66 539-548.
5. Delvecchio S., Bonfiglio P., Pompol F. (2018). Vibro-acoustic condition monitoring of internal combustion engines, a critical review of existing techniques, mechanical systems and signal processing. Volume 99-661-683.

6. Philippe D. (2006). A study of the vibro-acoustic modulation technique for the detection of cracks in metals. The Journal of the Acoustical Society of America, volume 119 1463
7. Creixell M. (2018). Computational reduction techniques for numerical vibro-acoustic analysis of hearing aids. Technical University of Denmark, department of electrical engineering.
8. Aymerich et al. (2010). Experimental study of impact-damage detection in composite laminates using a cross-modulation vibro-acoustic technique. Volume 9, issue 6, 541-553.
9. Trochidis et al. (2014) Analysis of vibroacoustic modulations for crack detection, a time-frequency approach based on Zhao-Atlas-Marks distribution, shock and vibration. Volume article id 102157, 8 pages, <https://doi.org/10.1155/2014/102157>.
10. Urban M.W., Alizad A., Aquino W., Greenleaf J.F., Fatemi M. (2011). A review of vibro-acoustography and its applications in medicine, current medical imaging. Volume 7, issue 4, 350-359.
11. Jun J. (2017). Analysis of load effect on nonlinear vibro-acoustic modulation used in on-line monitoring of fatigue cracks, smart materials and structures. Volume 26, number 9.
12. Ahmaida, Anwar M. (2018). Condition monitoring and fault diagnosis of a multi-stage gear transmission using vibro-acoustic signals. Doctoral thesis, University of Huddersfield.
13. Yue W., Di W., Lei W., Xiaojun W. (2018). Statistical energy analysis for vibro-acoustic coupled system with fuzzy parameters. Engineering computations, volume 35, issue 2, 565-579.
14. Jarosław G. et al. (2019). Use of cutting force and vibro-acoustic signals in tool wear monitoring based on multiple regression techniques for compreg milling. Bioresources, vol.14.
15. Hipol, Philip J. (1989). Finite element prediction of vibro-acoustic environments. SAE transactions, volume 98, 1881–1889.
16. Mohanty et al. (2015). User identification of keystroke biometric patterns with the cognitive RAM weightless neural net, advances in machine learning and signal processing. Proceedings of MALSIP, springer international.
17. Yong C., Juan T., Shaobo J., Minli H. (2012). Combustion timing determination based on vibration velocity in HCCI engines. Mechanism and machine theory, volume 58, 20-28.
18. Brian D., James H. (2017). Acoustic emission characteristics of a single cylinder diesel generator at various loads and with a failing injector. Mechanical systems and signal processing, volume 93, 397-414.
19. Jung I., Jin J., So H., Nam C. (2013). An advanced method for developing combustion noise through the analysis of diesel combustion. SAE Technical Paper 2013-01-1901.
20. Andersson I., McKelvey T., Larsson M. (2009). Combustion parameters estimation and control using vibration signal, application to the diesel HCCI engine. Proceedings of the IEEE conference on decision and control.
21. He Z., Xie W., Zhang G., Hong Z., Zhang J. (2014). Piston dynamic characteristics analyses based on FEM method part I, affected by piston skirt parameters. Advances in engineering software, vol 75, 68–85.
22. Dolatabadi et al. (2015). On identification of piston slap events in internal combustion engines using dynamic analysis. Mechanical Systems and signal processing, vol 58-59, 308-324.
23. Mohd Ripin Z., Chong Tan Y. (2013). Analysis of piston secondary motion. Journal of sound and vibration, vol 332, 5162–5176.
24. Justin F., Gary M. (2016). Fault detection and diagnosis of diesel engine valve trains. Mechanical systems and signal processing, volume 72-73, 316-327.
25. Narayan S. (2014). A review of diesel engine acoustics. FME Transactions, vol. 42, No. 2, 150-154.
26. Narayan S. (2015). Correlation between in cylinder pressure and noise emissions from engines. Journal of kones power train and transport, vol. 22, No. 1, 243-254.
27. Mahroogi F., Narayan S., Gupta V. (2018). Acoustic transfer function in gasoline engines. International journal of vehicle noise and vibration, vol. 14, No. 3, 270-280.

***V. Bilichenko, D. Matvijchuk* Review of modern vibroacoustic noise control methods for diesel engines with the aim of their further use in engine operation simulation.**

This article examines the potential use of various vibroacoustic signals for fault detection in parametric diagnostics of internal combustion engines (ICE). A review of previous research indicates that most studies focus on identifying the type of fault but do not determine the root cause of the malfunction. Moreover, they do not provide a comprehensive description of the physical mechanisms responsible for noise and vibration generation during the diagnostic process.

This paper presents a brief description of the sound and vibration generation mechanisms that occur directly during the engine's operation. These mechanisms, in turn, can be used as key parameters for diagnostics and assessing the technical condition of both individual components and the engine as a whole. A review of modern fault detection and diagnostic methods based on the vibroacoustic approach is provided. These methods analyze parameters such as noise and vibration, which are among the key indicators for this technique and yield more accurate and objective results compared to other widely accepted diagnostic methods.

The study describes various types of faults that can be detected using the vibroacoustic method and their direct impact on ICE performance. Given the need for rapid identification of fault type and nature, the data presented in this paper can serve as a basis for developing models, establishing necessary input parameters, and further simulating engine operation in the Ansys CAE environment. The mathematical analysis methods provided in the study define key parameters influencing diagnostic accuracy and, consequently, the effectiveness of defect detection, regardless of engine type, fuel type, or the presence of electrical components in the basic engine control system. This makes the proposed approach a universal and effective tool for solving diagnostic challenges.

Considering the wide variety of control systems and degrees of electrification in ICEs, the universality of the proposed method simplifies and addresses numerous technical issues. The analysis of noise and vibration conducted in this study plays a crucial role in determining the root cause of various faults. Due to technological clearances in component couplings, cyclic load variations in direction and application point, imbalance, and the lack of compensation for certain mechanical components, ICE components inherently generate noise and vibrations. Therefore, it is essential to identify the sources of these vibrations to prevent failures of individual components and the system as a whole.

Keywords: Diesel engine, modal analysis, engine acoustics, signal processing, diagnostics, simulation, durability, CAE systems.

БІЛІЧЕНКО Віктор Вікторович, д-р техн. наук, професор кафедри автомобілів та транспортного менеджменту, Вінницький національний технічний університет e-mail: bilichenko.v@gmail.com;

МАТВІЙЧУК Дмитро Миколайович — аспірант кафедри автомобілів та транспортного менеджменту, Вінницький національний технічний університет e-mail: ndirir95@gmail.com.

Viktor BILICHENKO — Doctor of Technical Sciences , Professor of Chair of Automobiles and Transportation management, Vinnytsia National Technical University e-mail: bilichenko.v@gmail.com

Dmytro MATVIJCHUK — Postgraduate Student the Chair of Automobiles and Transportation Management , Vinnytsia National Technical University e-mail: ndirir95@gmail.com

DOI 10.36910/automash.v1i24.1718