Механіка, машинознавство та електропостачання

УДК 629.083

DOI: 10.30748/zhups.2021.67.18

В.А. Войтов¹, Ю.В. Чепурний², М.М. Шелудько²

¹Харківський національний технічний університет сільського господарства
ім. П. Василенка, Харків

²Харківський національний університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСНИХ ЧАСТОТ КОЛИВАНЬ КЛАПАННОГО МЕХАНІЗМУ ДВИГУНА ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРАННЯ

Проведеними експериментальними дослідженнями було встановлено, що вібрація має акустичну природу. Доведено, що у якості чутливого елементу системи діагностування можливо використати спрямований мікрофон ЕМ-8800 та регістратор акустичного шуму шумоміра 1 класу Robotron 00023. Завдяки цьому стало можливим отримати амплітудно-частотну характеристику на усьому чутному звуковому діапазоні від 100 Гц до 20 кГц. Експериментальними дослідженнями підтверджено, що спрямований мікрофон ЕМ-8800 має широкий динамічний діапазон вимірюваного сигналу в 70 дБ і високий граничний рівень звукового тиску в 150 дБ. Це приводить до того, що при діагностуванні клапанного механізму двигунів внутрішнього згорання (ДВЗ), який генерує сигнали вібрації з широкосмуговим спектром і що має значну спектральну щільність, потрібні значення частоти дискретизації 32 кГц і більше. Завдяки цьому стало можливим отримати частоту власних коливань випускного клапану – 4630,12 Гц. Зокрема встановлено, що високі значення частоти дискретизації забезпечують точнішу передачу форми сигналу. Це дозволяє стверджувати про практичну привабливість запропонованих технологічних рішень.

Ключові слова: вібраційна діагностика ДВС, акустична вібрація, моніторинг, направлений мікрофон, спектральний аналіз.

Вступ

Постановка проблеми. Експлуатаційна надійність, економічність, активна безпека та екологічність якості автомобіля значною мірою визначаються роботою його двигуна. Тому підтримка працездатності двигуна і своєчасне виявлення несправностей є важливим завданням.

Сучасний двигун внутрішнього згорання (ДВЗ) є складним по конструкції, багатофункціональним об'єктом, діагностика якого досить складна. У багатьох випадках вона вимагає застосування досить складного і дорогого діагностичного обладнання, а у ряді випадків – часткового розбору двигуна для діагностування дефектів внутрішніх деталей. При цьому якість діагностики багато в чому визначається досвідом і знанням майстра-діагноста та іноді має суб'єктивний характер.

Тому пошук і дослідження нових методів діагностування, що дозволяють швидко, максимально просто і вірогідно виявляти несправності є актуальним завданням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Те-

орія питання діагностики машин по вібрації представлена в працях І.І. Артоболевського [2], В.В. Болотіна, А.Я. Балицького [3], А.В. Баркова [5] та інших вітчизняних і закордонних дослідників.

Проблемна область досліджень така:

- основні джерела вібрації машин і обладнання;
- вплив дефектів на вібрацію машин і обладнання;
- балансування роторів у процесі експлуатації машин;
- математичне і програмне забезпечення для експертної та автоматичної віброакустичної діагностики;
- системи віброакустичного моніторингу та діагностики машин і обладнання.

Побудови математичних моделей під час вирішення задач діагностування зубчастих передач висвітлені в роботах Ф.Я. Балицького, А.Г. Соколовой, О.І. Косарева, Ю.Г. Барінова та ін. Дослідженнями в області діагностики підшипників кочення займалися В.А. Авакян, Р.А. Коллот, Б.Г. Марченко, М.Б. Мислович, а також ряд закордонних вчених.

В останнє десятиліття з'явилося нове покоління

систем автоматичної діагностики машин по вібрації, що об'єднало кращі властивості як систем моніторингу, так і систем діагностики [6–9]. Створені та серійно випускаються спеціалізовані та універсальні віброакустичні діагностичні комплекси, що побудовані на базі ПК або КПК по ідеології віртуальних вимірювальних приладів [8–13]. Однак всі вони, фактично, дозволяють здійснювати лише первинну обробку віброакустичних сигналів.

Мета статті полягає в розробленні методики отримання власних частот коливань клапанного механізму двигуна внутрішнього згорання.

Виклад основного матеріалу

Знання частоти власних коливань клапанного механізму ДВЗ дозволяє намітити ймовірні резонансні збудження конструкції або визначити його характер. Особливе значення відомості про частоти власних коливань набувають в тому випадку, якщо відомий спектр збудливого зусилля.

У разі збігу частот власних коливань з максимумами спектру сил завжди слід очікувати підвищеної вібрації та випромінювання звукової енергії на даних частотах при інших рівних умовах.

Якщо деталь навантажується силою, спектр якої падає в високочастотній області, то виявляється достатнім знайти одну власну частоту, на якій відгук системи максимальний. При цьому 80% енергії коливального процесу, що збуджується ударом, доводиться на коливання з цією частотою.

В результаті ударних впливів клапанів на гнізда збуджуються коливання з власними частотами ділянок конструкції, прилеглих до місця збудження. Ці коливання, поширюючись потрапляють на зовнішні поверхні двигуна і випромінюються.

У чинному газорозподільному механізмі розвиваються значні зусилля, які змушують здійснювати коливальні рухи деталі механізму.

Розміри деталей незначні, тому деталь яка коливається (пружина, коромисло, штанга) не може бути хорошим випромінювачем, і таким чином, джерелом шуму.

Проте ударна посадка клапанів в гнізді, удари, що виникають при вибірці зазорів в штовхачах і інших сполученнях механізму, викликають появу вібраційних імпульсів в блоці та голівці, які випромінюються зовнішніми поверхнями двигуна. Це призводить до появи шуму від механізму газорозподілу, досить значного за рівнем і з несприятливим спектром.

У зв'язку з тим, що вібрація, по якій можна діагностувати дефекти, має акустичну природу, в якості чутливого елементу системи діагностування пропонується використати спрямований мікрофон промислового виконання, що має відповідну міру захисту для роботи в складних атмосферних умовах.

Такий мікрофон може бути встановлений на деякому видаленні від вузла, що діагностується, і спрямований на нього.

У силу великої вартості промислового спрямованого мікрофону був проведений експеримент по отриманню спектру вібрації за допомогою звичайного спрямованого мікрофону ЕМ-8800 та шумоміра 1 класу Robotron 00023 (рис. 1).

Рис. 1. Шумомір 1 класу Robotron 00023 з вимірювальним мікрофоном Robotron МК 211
Джерело: фото авторів.

Спрямований мікрофон ЕМ-8800 призначений для виміру рівня акустичного шуму, рівня звукового тиску та отримання амплітудно-частотної характеристики на усьому чутному звуковому діапазоні від 100 Гц до 20 кГц, вимірювального мікрофона Robotron МК 211 звуковим діапазоном від 1 Гц до 20 кГц. Частоти більшості дефектів автотранспортного ДВЗ у діапазоні частоти до 4 кГц.

Спрямований мікрофон ЕМ-8800 має широкий динамічний діапазон вимірюваного сигналу в 70 дБ і високий граничний рівень звукового тиску в 150 дБ. Вимірюваний сигнал зашифровується всередині мікрофону і передається через звукову карту на персональний комп'ютер або планшет у цифровому виді.

Для виконання вимірів, із використанням портативного аналізатора вібрації (рис. 2), необхідно направити мікрофон на те місце на двигуні, де розміщені клапани клапанного механізму.

Рис. 2. Узагальнена структурна схема портативного аналізатора вібрації
Джерело: розроблено авторами.

Сигнал, що вимірюваний за допомогою вузько-спрямованого мікрофона 4, подається на вхід попереднього підсилювача 5. Після посилення сигнал фільтрується за допомогою фільтру нижніх частот 6. Цей фільтр потрібний для виключення попадання в тракт аналізу приладу складових сигналу вібрації з частотами вище за половину частоти дискретизації, що призводить до появи неправдивих складових у низькочастотній частині спектру сигналу вібрації.

Після регульованого підсилювача здійснюється перетворення сигналу з аналогового в цифровий вид за допомогою аналого-цифрового перетворювача 7. Як вже згадувалося вище, для діагностування автотранспортних ДВЗ та їх вузлів, що генерують сигнали вібрації з широкосмуговим спектром і що має значну спектральну щільність у низькочастотній області потрібні значення частоти дискретизації 32 кГц і більше. Високі значення частоти дискретизації забезпечують точнішу передачу форми сигналу, але при цьому сильно зростає об'єм необхідної пам'яті приладу і підвищуються вимоги до швидкої дії процесора 8.

Мікрофон 4, який підключений за допомогою мікрофонного кабелю до комп'ютера або ноутбука, на якому запущене прикладне програмне забезпечення Sonic Visualiser вер.3.3. для читання даних з мікрофона EM-8800 і виконання подальших обчислень, таких як виявлення з сигналу його спектру (рис. 3). Програма Sonic Visualiser вер.3.3. автоматично обчислює прямий спектр тимчасового сигналу акустичної вібрації, яка виміряна мікрофоном, в усьому діапазоні частот від 1 Гц до 20 кГц. На екрані (рис. 3, рис. 4) для відображення спектру задано діапазон від 10 Гц до 7 кГц.

Рис. 3. Результат вимірів на стенді амплітудно-частотних характеристик *випускного* клапана 4 циліндри (Ч кл) в логарифмічному масштабі

Джерело: отримано авторами.

Рис. 4. Результат вимірів на стенді амплітудно-частотних характеристик *впускного* клапана 4 циліндри (Ч кл) в логарифмічному масштабі

Джерело: отримано авторами.

Дослідницька частина експерименту виконується на натурному 8 клапанному двигуні 1.3 фірми Ford та програмного забезпечення SpectraLAB, створеного на базі ПК з використанням портативного аналізатора вібрації. SpectraLAB – це потужний двоканальний аналізатор спектру, програмно сумісний з будь-якою звуковою картою, підтримуваною Windows. Він забезпечує проведення спектрального аналізу в реальному масштабі часу, запис і відтворення сигналів, моделювання сигналів різної складності. За допомогою натурного експерименту були записані вібраційні процеси та поміщені в пам'ять ПК (рис. 5, рис. 6)

Рис. 5. Осцилограма вібраційного імпульсу, що виникає при посадці впускного і випускного клапанів

Джерело: отримано авторами [13, С. 50].

Рис. 6. Спектр однокомпонентної вібрації клапанів в діапазоні 4,2 кГц до 20 кГц.

Джерело: отримано авторами [13, С. 50].

Висновки

У статті представлена методика на основі портативного акустичного аналізатора вібрації, яку доцільно використовувати для отримання та обробки власних частот коливань клапанного механізму двигуна внутрішнього згорання.

Рішення щодо отримання діагностичної інформації за допомогою направленої мікрофона є принципово новим, і дозволить визначити технічний стан клапанного механізму ДВЗ в реальному часі, тобто проводити моніторинг технічного стану. Проведеними дослідженнями отримали частоту власних коливань випускного клапана – 4630,12 Гц.

Існуючі методи вібраційної діагностики клапанного механізму ДВЗ дозволяють здійснювати лише первинну обробку віброакустичних сигналів.

Застосування розробленої методики, в основу якої покладене отримання та обробка діагностичної інформації за допомогою портативного акустичного аналізатора вібрації, дозволить за результатами фізичного діагностування заздалегідь визначити технічний стан клапанів, характеристики яких наближуються до критичних. Це призведе до значного покращення показників надійності клапанного ме-

ханізму ДВЗ та дозволить уникнути її раптових відмов і багатьох негативних наслідків, пов'язаних з ними. Визначення ресурсу клапанного механізму ДВЗ на основі значень діагностичних параметрів дасть можливість з визначеною вірогідністю прогнозувати технічний стан автотракторної техніки, що є однією з функцій технічної діагностики.

Список літератури

1. Артоболевский И.И. Введение в техническую диагностику машин / И.И. Артоболевский, Ю.И. Балицкий, М.Д. Генкин. – М.: Машиностроение, 1984. – 296 с.
2. Болотин В.В. Прогнозирование ресурса машин и конструкции / В.В. Болотин. – М.: Машиностроение, 1984. – 312 с.
3. Балицкий Ф.Я. Виброакустическая диагностика зарождающихся дефекта / Ф.Я. Балицкий, М.А. Иванов, А.Г. Соколова. – М.: Наука, 1984. – 120 с.
4. Барков А.В. Диагностирование и прогнозирование состояния подшипников качения по сигналу вибрации / А.В. Барков. – М.: Судостроение, 1985. – С. 21-23.
5. Барков А.В. Возможности нового поколения систем мониторинга и диагностики / А.В. Барков // *Металлург*. – 1998. – № 11. – С. 37-38.
6. Суворов В.Н. Многоканальный виброизмерительный комплекс К-5101 / В.Н. Суворов // *Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика*. – 2000. – № 1. – С. 18-20.
7. Суворов В.Н. Виртуальные приборы. Применение карманных ПК / В.Н. Суворов // *Приборы системы. Управление, контроль, диагностика*. – 2006. – № 2. – С. 39-42.
8. Рыжов С.Н. Средства вибродиагностики технологического оборудования / С.Н. Рыжов // *Датчики и системы*. – 2006. – № 10. – С. 28-30.
9. Двухканальная система регистрации и обработки виброакустических и ударных сигналов ДАРС / А.В. Карелин, А.В. Леньков, С.М. Молин, Д.В. Чекунов // *Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика*. – 2008. – № 1. – С. 37-40.
10. Гетманов В.Г. Применение технологии обобщенного Фурье-анализа для цифровой обработки структурно-сложных нестационарных колебательных сигналов / В.Г. Гетман, В.Н. Гридин, Е.Б. Царева // *Информационные технологии*. – 2005. – № 5. – С. 18-20.
11. Cherpurnyi Y.V. The Method of Controlling the Valve Mechanism of the Engine for Exhaust Pulsation Study / Y.V. Cherpurnyi, O.M. Leonenko // *International Journal on Emerging Technologies*. – 2020. – № 11(3). – P. 91- 95.
12. Чепурний Ю.В. Експериментальне дослідження віброакустичним методом клапанного механізму двигуна внутрішнього згорання / Ю.В. Чепурний, К.Г. Яценко, М.О. Блещенко, Г.Л. Коростильов // *Системи озброєння і військова техніка*. – 2020. – № 1(61). – С. 177-182. <https://doi.org/10.30748/soivt.2020.61.21>.
13. Войтов В.В. Безконтактна діагностика технічного стану клапанного механізму двигуна внутрішнього згорання / В.В. Войтов, Ю.В. Чепурний, А.В. Статигін // *Системи озброєння і військова техніка*. – 2020. – № 4(64). – С. 49-53. <https://doi.org/10.30748/soivt.2020.64.06>.

Надійшла до редколегії 28.10.2020

Схвалена до друку 15.12.2020

Відомості про авторів:

Войтов Віктор Анатолійович

доктор технічних наук професор
завідувач кафедри
Харківського національного технічного університету
сільського господарства ім. П. Василенка,
Харків, Україна
<https://orcid.org/0000-0003-4661-115X>

Чепурний Юрій Васильович

начальник навчальної лабораторії
кафедри Харківського національного університету
Повітряних Сил ім. І. Кожедуба,
Харків, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-2615-1312>

Information about the authors:

Viktor Voytov

Doctor of Technical Sciences Professor
Head of the Department
of Petro Vasilenko National
Technical University of Agriculture,
Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-4661-115X>

Yurii Cherpurnyi

Chief of Research Laboratory
of Ivan Kozhedub Kharkiv
National Air Force University,
Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-2615-1312>

Шелудько Максим Миколайович
начальник групи навчальної лабораторії
кафедри Харківського національного університету
Повітряних Сил ім. І. Кожедуба,
Харків, Україна
<https://orcid.org/0000-0003-4656-1332>

Maksim Sheludko
Chief Group of Research Laboratory
of Ivan Kozhedub Kharkiv
National Air Force University,
Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-4656-1332>

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ СОБСТВЕННЫХ ЧАСТОТ КОЛЕБАНИЯ КЛАПАННОГО МЕХАНИЗМА ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

В.А. Войтов, Ю.В. Чепурной, М.Н. Шелудько

Проведенными экспериментальными исследованиями было установлено, что вибрация имеет акустическую природу. Доказано, что в качестве чувствительного элемента системы диагностирования возможно использовать направленный микрофон ЭМ-8800 и регистратор акустического шума шумомера 1 класса Robotron 00023. Благодаря этому стало возможным получить амплитудно-частотную характеристику на всем слышимом звуковом диапазоне от 100 Гц до 20 кГц. Экспериментальными исследованиями подтверждено, направленный микрофон ЭМ-8800 имеет широкий динамический диапазон измеряемого сигнала в 70 дБ и высокий предельный уровень звукового давления в 150 дБ. Это приводит к тому, что при диагностировании автотранспортных двигателей внутреннего сгорания (ДВС), которые генерируют сигналы вибрации с широкополосным спектром и имеют значительную спектральную плотность в низкочастотной области, необходимы значения частоты дискретизации 32 кГц и более. С помощью этого стало возможным получить частоту собственных колебаний выпускного клапана – 4630,12 Гц. В частности установлено, что высокие значения частоты дискретизации обеспечивают точную передачу формы сигнала. Это позволяет утверждать про практическую привлекательность предлагаемых технологических решений.

Ключевые слова: вибрационная диагностика ДВС, акустическая вибрация, мониторинг, направленный микрофон, спектральный анализ.

PROCEDURE FOR STUDYING THE NATURAL FREQUENCIES OF THE VALVE MECHANISM OF THE INTERNAL COMBUSTION ENGINE

V. Voytov, Yu. Chepurnyi, M. Sheludko

Operational reliability, efficiency, active safety, and environmental qualities of a car are largely determined by the operation of its engine. Therefore, the search and study of new diagnostic methods that allow quickly, as simple as possible, and reliably identifying faults is an urgent task. The justification for this statement can be carried out experimental studies of vibration of an internal combustion engine (ICE). As a result of these studies, ICE vibration was found to be acoustic in nature. It is proved that it is possible to use the directional microphone EM-8800 and the acoustic noise recorder of the 1st class Robotron 00023 as a sensitive element of the ICE valve mechanism diagnostics system. The exploratory partial survey runs on a full-scale Ford V1.3 8-valve engine and SpectraLAB software built on a base PC using a handheld vibration analyzer. Due to this, it became possible to obtain the amplitude-frequency response over the entire audible sound range from 100 Hz to 20 kHz. Experimental studies have confirmed that the EM-8800 directional microphone has a wide dynamic range of the measured signal of 70dB and a high ultimate sound pressure level of 150 dB. It was also found that the natural frequencies of the intake and exhaust valves of the car ICE are in the frequency range of 4-5 kHz. This leads to the fact that when diagnosing vehicle engines that generate vibration signals with a broadband spectrum and have a significant spectral density in the high-frequency region, sampling rates of 32 kHz or more are required. In particular, high sampling rates have been found to provide accurate waveform reproduction. All this makes it possible to assert about the practical attractiveness of the proposed technological solutions.

Keywords: vibration diagnostics ICE, acoustic vibration, monitoring, directional microphone, spectral analysis.