

УДК 629.113

Е.И. ОКСЕНЬ, Д.Е. ОКСЕНЬ*Автомобильно-дорожный институт Государственного высшего учебного заведения «Донецкий национальный технический университет», Горловка, Украина***ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВИБРОАКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ
ДЛЯ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ**

Изложена методология выявления дефектов в системах и механизмах двигателей внутреннего сгорания на основе оценки степени неравномерности вибраций корпуса в процессе его работы. Предложена конструкция пьезометрических преобразователей для фиксации сигналов виброакустической эмиссии, распространяющихся в корпусных деталях ДВС. Разработаны аппаратура и программное обеспечение мобильного диагностирующего комплекса. Установлено, что выявление дефектов в системах и механизмах ДВС может быть осуществлено на основе оценки степени неравномерности колебаний корпуса по сигналам виброакустической эмиссии. В качестве критерия состояния ДВС предложено использовать коэффициент корреляции экспериментальных данных с обобщающей экспоненциальной зависимостью.

Ключевые слова: двигатель, диагностирование, виброакустическая эмиссия, пьезометрический преобразователь, диагностирующий комплекс.

Введение

Возможность выявления неисправностей на ранних стадиях их возникновения при относительно небольших затратах определяют перспективность диагностирования двигателей внутреннего сгорания (ДВС) по сигналам виброакустической эмиссии, развивающихся в корпусных деталях [1, 2]. Обеспечение заданной надёжности выводов о состоянии механизмов и систем при этом может быть достигнуто использованием статистической оценки соответствия временно-частотных фрагментов наблюдаемых сигналов виброакустической эмиссии частотам вращения коленчатого вала. Использование современных компактных измерительных модулей с низким энергопотреблением обеспечивает возможность изготовления диагностирующей аппаратуры в мобильном исполнении для установки непосредственно на транспортных средствах при проведении испытаний. Таким образом, исследования, направленные на разработку методологии диагностирования механизмов и систем, основанной на оценке сигналов виброакустической эмиссии, формирующихся в корпусе ДВС в процессе работы, как метода неразрушающего контроля являются актуальными для отрасли.

1. Формулирование проблемы

Выявление неисправностей в системах и механизмах ДВС в процессе работы по сигналам вибро-

акустической эмиссии усложнено трудностью распознавания составляющей сигнала сформированного дефектом в общем шуме достаточно высокой интенсивности работающего двигателя. В свою очередь, характер виброакустических сигналов определяется протекающими в цилиндрах рабочими процессами, состоянием кинематических пар механизмов (дефекты поверхностей контактов, наличие и качество смазки), отклонения от номинальных размеров и свойств материалов кинематических звеньев. Очевидно, что появление дефекта в одной из систем или кинематической паре будет приводить к нарушению присущей ДВС строгой периодичности формирования сигналов виброакустической эмиссии, распространяющихся в корпусных деталях.

Алгоритм распознавания сформированного дефектом сигнала должен учитывать [3]:

- степень загрузки двигателя;
- скорость движения транспортного средства;
- частоту вращения двигателя.

Применяемые преобразователи сигналов акустической эмиссии по своей чувствительности в исследуемом частотном диапазоне должны [4]:

- соответствовать спектрам исследуемых сигналов;
- обеспечивать быструю установку на корпусные детали двигателя;
- обеспечивать надёжный акустический контакт.

В настоящей работе рассмотрены вопросы разработки методологии выявления дефектов в меха-

низмах и системах ДВС на основе статистической оценки соответствия временно-частотных фрагментов наблюдаемых сигналов виброакустической эмиссии, сформированных в корпусных деталях, частотам вращения коленчатого вала при последовательном плавном увеличении и снижении скорости двигателя в режиме холостого хода.

Цель работы – снижение затрат на выявление неисправностей механизмов двигателей внутреннего сгорания на ранних стадиях их возникновения по сигналам виброакустической эмиссии, сформированных в корпусных деталях.

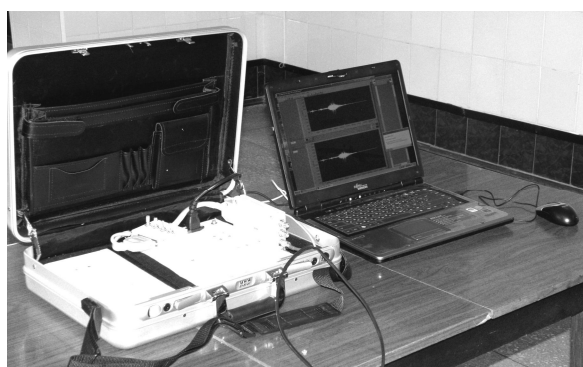
2. Исследования динамики корпуса ДВС

Экспериментальные исследования выполнены на основе разработанного двухканального прибора фиксации и анализа сигналов виброакустической эмиссии (рис. 1), состоящего из виброакустического щупа 1, пьезоэлектрического датчика деформирования топливопровода высокого давления 2, преобразователя заряда LE-41 3, нормализатора

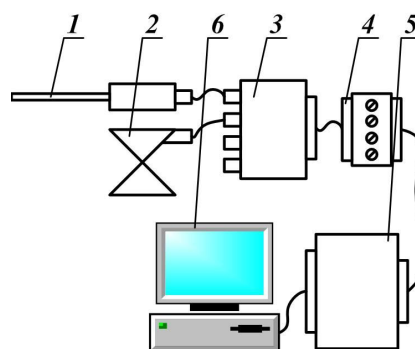
уровня сигналов 4, модуля аналого-цифрового преобразователя ADA-1406 5 и компьютера 6.

Непосредственное измерение сигналов виброакустической эмиссии, распространяющихся в корпусных деталях ДВС, выполнялось с помощью специально разработанного пьезоакустических преобразователя с одним активным элементом на основе ЦТС-керамики и конструктивно выполненного в виде щупа (рис. 2, а).

Для улучшения виброакустического контакта с поверхностями деталей ДВС щуп укомплектован сменными стержнями-волноводами со сферическим, коническим и цилиндрическим контактными элементами. Второй канал записи применён для синхронизации исследуемого сигнала с рабочим процессом ДВС по формированию импульса в системе зажигания на свече первого цилиндра для бензиновых двигателей и по моменту впрыска топлива для дизельных двигателей. На (рис. 2, б) приведен двухэлементный пьезодатчик деформирования топливопровода, установленный перед форсункой первого цилиндра.



а



б

Рис. 1. Аппаратура диагностирования ДВС:

а – аппаратура фиксации и анализа сигналов; б – размещение датчиков на корпусе ДВС



а



б

Рис. 2. Измерительные пьезоэлектрические преобразователи:

а – виброакустический щуп; б – датчик деформирования топливопровода

Программное обеспечение разработано в логике LabVIEW (лицензия № 5018512E-01) и включает инструменты:

- записи в файл;
- анализа сигналов в оконном режиме (рис. 5);
- расчёта частоты колебаний корпуса двигателя

по уровню вибраций в корпусных деталях.

Количественный и качественный анализ полученной информации выполнен с помощью Фурье- и вейвлет-анализа. При этом (рис. 3) для зафиксированного процесса (диаграмма в верхнем левом углу панели) вычисляются амплитудно-частотные (диа-

грамма в нижнем правом углу) и временные амплитудно-частотные характеристики (диаграмма в нижнем левом углу панели) оконных фрагментов сигнала. Для принятого режима фильтрации и установленной длины фрагмента программа обеспечивает определение значения гармоники, в которой сосредоточена максимальная энергия колебаний корпуса двигателя по следующему алгоритму:

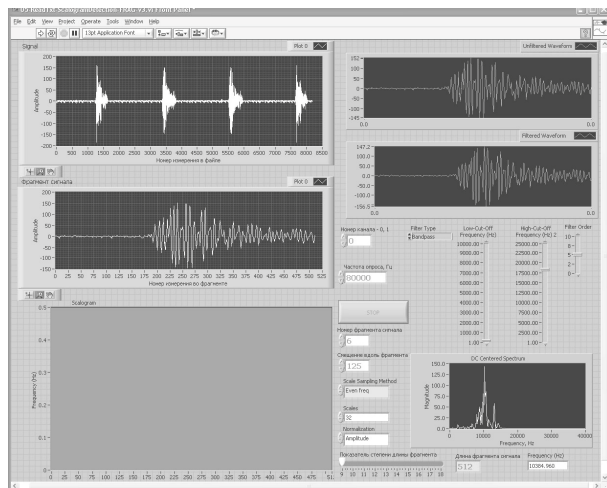


Рис. 3. Интерфейс программы предварительного анализа сигналов

1. Анализ сигнала в оконном режиме, с длиной окна m сигнала кратной 2^n .

2. Определение среднего значения сигнала для каждого из окон как

$$S'_i = S_i - \bar{S},$$

где S_i – текущее значение сигнала, \bar{S} .

3. Выравнивание сигнала относительно среднего \bar{S} .

4. Выделение наиболее существенной энергетической составляющей колебаний корпуса ДВС как $\{P_k\}_{\max}$, так что соответственно частота этих колебаний

$$v_{\max} = \frac{k_{\max}}{T \cdot N}, \text{ Гц,}$$

где k_{\max} – порядковый номер гармоники колебаний, которая отвечает максимальному значению энергии; T – период опроса канала АЦП, с; N – длина вектора сигнала в соответствии с которой рассчитывается АЧХ.

5. Расчёт частоты колебания корпуса ДВС в оборотах в минуту

$$n = \frac{30 \cdot v_{\max} \cdot N_{\text{пр}}}{\pi \cdot N_{\text{ц}}},$$

где $N_{\text{ц}}$ – количество цилиндров ДВС; $N_{\text{пр}}$ – количество тактов в рабочем процессе.

Для оценки состояния ДВС принят режим испытания на холостом ходу по нагрузению и разгрузке (рис. 3).

Согласно методике реализуется следующий порядок проведения эксперимента:

1. Включение аппаратуры для записи измеряемых параметров в файл.
2. Запуск двигателя.
3. Постепенное увеличение частоты вращения.
4. Постепенное уменьшение частоты вращения.
5. Выключение двигателя.
6. Выключение измерительной аппаратуры.

Принятый порядок позволяет оценить влияние дефектов в системах и механизмах ДВС на неравномерность колебаний корпуса путем построения обобщенной характеристики $P_{\max} = f(n_{\max})$.

В качестве базовой зависимости для корреляции характеристики P_{\max} принята экспоненциальная функция $P'_{\max}(n) = c_1 \cdot e^{c_2 \cdot n}$, коэффициенты которой определены минимизацией квадратов разницы текущих значений.

В качестве критерия равномерности вращения коленчатого вала принят коэффициент корреляции экспериментальных данных P_{\max} и функции P'_{\max} , рассчитанный как

$$C_{\text{корр}} = \frac{\frac{1}{m} \cdot \sum_{i=0}^{m-1} ((S_i - \text{mean}(S)) \cdot (S'_i - \text{mean}(S'))) }{\text{СКО}(S) \cdot \text{СКО}(S')},$$

где $\text{mean}(S)$, $\text{mean}(S')$ – среднее значение энергетической зависимости; $\text{СКО}(S)$, $\text{СКО}(S')$ – среднее квадратическое отклонение энергетической зависимости.

3. Анализ полученных результатов

Результаты применения приведенной методики для диагностирования шестицилиндрового дизельного двигателя легкового автомобиля Volvo в диагностической лаборатории АДИ ДонНТУ приведены на рис. 4. Сигнал виброакустической эмиссии в корпусных деталях I имеет выраженную периодичность с максимумами, соответствующими моментам воспламенения топлива в цилиндрах. Датчик деформирования топливопровода вследствие инерционности также воспринимает колебания корпуса двигателя, но в момент впрыска форсункой топлива в цилиндр I формирует импульсы высокой интенсивности. Очевидно, что интервалы между импульсами высокой интенсивности диаграммы 2 соответствуют времени протекания полного рабочего цикла (для дизельного двигателя – два оборота вала). Сопоставление диаграмм 1 и 2

(рис. 4) совместно с принятой для испытуемого двигателя схемой работы цилиндров 1-5-3-6-2-4 позволяет соотнести каждый из выявленных импульсов рабочим процессам в соответствующих цилиндрах. Анализ периодичности поступления импульсов и характера нарастания максимумов на синхронных диаграммах позволяет сделать предварительные выводы о состоянии двигателя.

Появление различного количества импульсов на участках повторения тактов рабочего процесса указывает на наличие дефекта. Так, для диаграммы рабочего процесса двигателя (рис. 4) на участках В, D-G число импульсов равно шести, что соответствует числу цилиндров. Наличие же семи импульсов на участках А, С и Н диаграммы указывает на неравномерность протекания рабочего процесса.

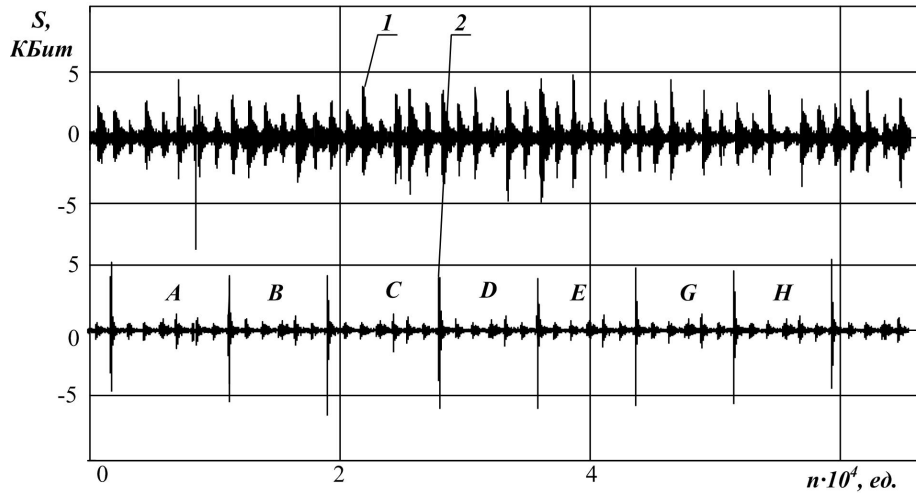


Рис. 4. Типовые синхронные диаграммы виброакустических сигналов ДВС:

1 – сигнал виброакустической эмиссии в корпусных деталях;

2 – синхронизирующий сигнал деформирования топливпровода форсунки первого цилиндра

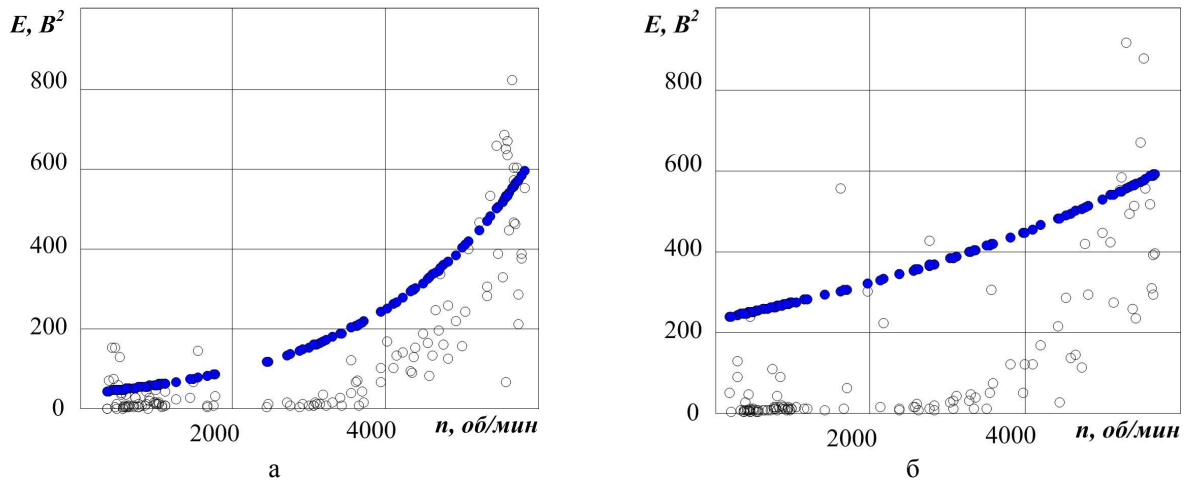


Рис. 5. Сравнение неравномерности колебаний корпуса для исправного и дефектного ДВС

Выявленные особенности формирования виброакустических сигналов в соответствии с алгоритмом, изложенном с п. 1 применены для оценки состояния ДВС. Моделирование дефекта в системе топливоподдачи реализовано отключением форсунок одного из цилиндров. Запись сигналов осуществлялась с суммарной частотой опроса 80000 Гц для двух каналов АЦП. Размер окна выборки для расчёта параметров амплитудно-частотной характери-

ки принимался равным 8192, 16384 и 32768 единиц. При этом число точек на графике обобщённой зависимости $P_{\max} = f(n_{\max})$ для цикла испытаний составляло от 100 до 500.

Типовые обобщённые частотно-энергетические зависимости для дизельного двигателя приведены на рис. 5. Полученные зависимости подтверждают предположение о том, что для исправного двигателя

увеличение частоты вращения вала сопровождается ростом эмиссии в корпусные детали виброакустической энергии, который носит экспоненциальный характер. Появление дефектов в механизмах и системах ДВС приводит к росту разброса экспериментальных значений относительно обобщающей зависимости. При этом значение коэффициента корреляции экспериментальных данных может быть использовано в качестве критерия оценки состояния ДВС. Так, если для исправного непрогретого двигателя (рис. 6, а) коэффициент корреляции составляет 0,908, то для этого же двигателя в прогретом состоянии и отключенной форсункой в третьем цилиндре его величина снижается до 0,7437.

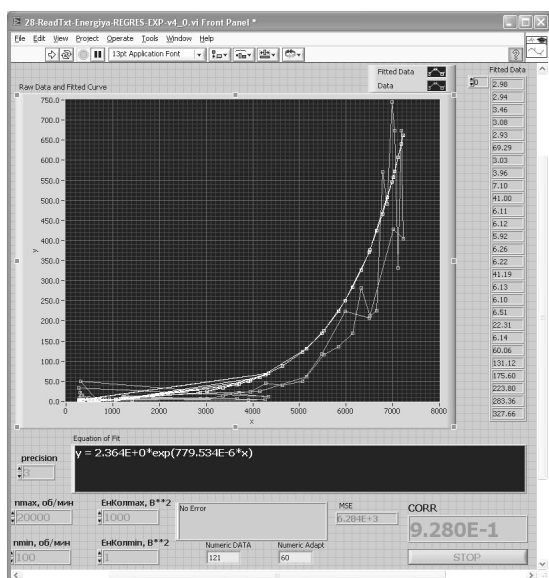


Рис. 6. Интерфейс программы диагностирования состояния ДВС

Проведенные исследования на указанном дизельном двигателе легкового автомобиля Volvo и на инжекторном пятицилиндровом двигателе легкового автомобиля Audi показали что, для ДВС в исправном состоянии обобщенная характеристика $P_{\max} = f(n_{\max})$ достаточно хорошо описывается экспоненциальной зависимостью с коэффициентом корреляции в диапазоне $0,9 \div 0,97$.

Появление дефекта в одной из систем двигателя приводит к уменьшению коэффициента корреляции до уровня 0,8 и ниже.

На основе изложенной методологии разработана программа RTE 4.0 диагностирования состояния

ДВС по сигналам виброакустической эмиссии (рис. 6). Программа RTE 4.0 ориентирована на практическое использование и позволяет в реальном времени после выполнения шагов 1 – 5 испытательного цикла (см. п. 1) построить обобщенную частотно-энергетическую зависимость, вычислить параметры коррелирующей экспоненциальной зависимости, вычислить коэффициент корреляции и сделать вывод о состоянии ДВС.

Заключение

1. Выявление дефектов в системах и механизмах двигателей внутреннего сгорания может быть осуществлено на основе оценки степени неравномерности колебаний корпуса по сигналам виброакустической эмиссии. В качестве критерия состояния ДВС может служить коэффициент корреляции экспериментальных данных с обобщающей экспоненциальной зависимостью.

2. Разработанная методология диагностирования состояния систем и механизмов двигателя по степени равномерности колебаний корпуса может быть рекомендована для практического использования при диагностировании двигателей внутреннего сгорания.

Литература

1. Оксень Е.И. Особенности акустических параметров двигателя 2103 / Е.И. Оксень, А.В. Гарачук, В.В. Быков // *Вісті Автомобільно-дорожнього інституту: зб. наук. пр.* – Горлівка: АДІ ДонНТУ, 2006. – № 1 (2). – С. 43-49.

2. Метод акустического диагностирования системы зажигания двигателей внутреннего сгорания / Е.И. Оксень, А.В. Гарачук, В.В. Быков, Д.Е. Оксень // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий.* – 2006. – № 3/2 (21). – С. 141-147.

3. Оксень Е.И. Метод вибрационного диагностирования системы зажигания двигателей внутреннего сгорания / Е.И. Оксень, Д.Е. Оксень // *Двигатели внутреннего сгорания.* – 2006. – № 1. – С. 136-140.

4. Оксень Е.И. Исследование особенностей сигналов акустической эмиссии, возникающих в кинематических парах двигателя при работе со знакопеременными нагрузками / Е.И. Оксень, В.Г. Цоккур, Д.Е. Оксень // *Двигатели внутреннего сгорания.* – 2007. – № 1. – С. 141-146.

Поступила в редакцию 12.05.2011

Рецензент: д-р техн. наук, проф., проф. кафедры «Общенаучные дисциплины» Г.В. Базаянц, Донецкий национальный технический университет, Донецк, Украина.

ВИКОРИСТАННЯ ВІБРОАКУСТИЧНИХ СИГНАЛІВ ДЛЯ ОЦІНКИ СТАНУ ДВИГУНА ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ

Є.І. Оксень, Д.Є. Оксень

Викладена методологія виявлення дефектів у системах і механізмах двигунів внутрішнього згоряння на основі оцінки ступеня нерівномірності вібрацій корпусу в процесі його роботи. Запропонована конструкція п'єзометричного перетворювачів для фіксування сигналів віброакустичної емісії, що розповсюджуються в корпусних деталях двигуна внутрішнього згоряння. Розроблено апаратура та програмне забезпечення мобільного діагностуючого комплексу. Встановлено, що виявлення дефектів у системах і механізмах ДВС може бути здійснено на основі оцінки ступеня нерівномірності коливань корпусу за сигналами віброакустичного емісії. Як критерій стану ДВС запропоновано використовувати коефіцієнт кореляції експериментальних даних з узагальнюючої експоненційної залежністю.

Ключові слова: двигун, діагностування, віброакустична емісія, п'єзометричний перетворювач, діагностичний комплекс.

USE VIBROACOUSTIC SIGNALS FOR ASSESSMENT INTERNAL COMBUSTION ENGINE

E.I. Oksen, D.E. Oksen

Provides a methodology to identify defects in systems and mechanisms for internal combustion engines based on the assessment of the irregularity of vibration in the body of his work. The design of piezometric transducers for recording signals vibroacoustic emission propagating in the base parts of internal combustion engine. Developed equipment and software for mobile probing the complex. Established that the detection of defects in systems and mechanisms for internal combustion engines can be done by assessing the degree of irregularity of oscillations in the signals corps vibroacoustic emission. As a performance criterion is proposed to use the ICE correlation coefficient of experimental data with generalizing the exponential dependence.

Keywords: engine diagnostics, vibroacoustic emission, piezometric transducer, diagnosing complex.

Оксень Евгений Иванович – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой строительно-дорожные машины и детали машин Автомобильно-дорожного института ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет», Горловка, Украина, e-mail: dalar@rambler.ru.

Оксень Дмитрий Евгеньевич – магистр факультета автомобильного транспорта Автомобильно-дорожного института ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет», Горловка, Украина.