

УДК 004.942

МОДЕЛИРОВАНИЕ АКУСТИЧЕСКОГО ШУМА ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ КИНЕМАТИЧЕСКИХ УЗЛОВ

Науменко Н.А., Соловьев Н.А.

ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет», Оренбург,
e-mail: povtas@mail.osu.ru

Акустический шум – такой же индивидуальный признак технического состояния агрегата, как для человека отпечатки пальцев. В статье представлены результаты решения задачи теоретико-экспериментального обоснования методики идентификации технического состояния узлов двигателя внутреннего сгорания. Доказана необходимость и актуальность автоматизации информационных процессов неразрушающей диагностики кинематических узлов двигателя. Объектом моделирования является акустический шум двигателя внутреннего сгорания с дефектами кинематических узлов. Основным признаком оценки технического состояния – звуковые сигналы работающего двигателя. Математический аппарат моделирования – дискретное оконное преобразование Фурье. С использованием пакета прикладных программ получены спектры акустического шума исправной кинематики и дефектов двух кинематических узлов: кривошипно-шатунного механизма и газораспределительного механизма бензинового двигателя, выявление которых без полной разборки агрегата невозможно. Определены признаки спектров исправных узлов и узлов с дефектами. Задача идентификации технического состояния решалась методом кластерного анализа – «манхэттенское расстояние». Полученные результаты протестированы с использованием экспериментальных данных, и подтверждена эффективность предложенной методики неразрушающего контроля с достоверностью более 80%. Недостатком методики является необходимость производить измерения на оборотах, заданных с большой точностью, так как уровень акустического шума в большой степени зависит от скорости соударения кинематически связанных деталей двигателя, то есть от числа оборотов. Предложенная методика не дает точного ответа, какой узел или элемент двигателя внутреннего сгорания вышел из строя, она только позволяет определить отклонения от исходного состояния, но не выявляет причину данного отклонения.

Ключевые слова: двигатель внутреннего сгорания, кинематика, идентификация дефектов, акустический шум, спектральный анализ

ACOUSTIC NOISE MODELING FOR TECHNICAL CONDITION IDENTIFICATION KINEMATIC NODES

Naumenko N.A., Solovev N.A.

Orenburg State University, Orenburg, e-mail: povtas@mail.osu.ru

Acoustic noise of kinematic units is the same sign of the technical condition of the unit as human fingerprints. The article presents the results of solving the problem of theoretical and experimental substantiation of the technique for identifying the technical condition of internal combustion engine components. The necessity and relevance of automation of information processes of non-destructive diagnostics of kinematic engine units is proved. The object of simulation is the acoustic noise of an internal combustion engine with defects in kinematic units. The main sign of assessing the technical condition is the sound signals of a running engine. The mathematical apparatus of modeling is the discrete windowed Fourier transform. Using the package of applied programs, the acoustic noise spectra of serviceable kinematics and defects of two kinematic assemblies were obtained: the crank mechanism and the gas distribution mechanism of a gasoline engine, which cannot be identified without a complete disassembly of the unit. The features of the spectra of serviceable nodes and nodes with defects are determined. The task of identifying the technical condition was solved by the method of cluster analysis – “Manhattan distance”. The results obtained were tested using experimental data and the effectiveness of the proposed non-destructive testing technique was confirmed with a reliability of more than 80%. The disadvantage of the technique is the need to make measurements at revolutions specified with great accuracy, since the level of acoustic noise to a large extent depends on the speed of impact of kinematically connected engine parts, that is, on the number of revolutions. The proposed method does not give an exact answer, which unit or element of the internal combustion engine has failed, it only allows you to determine deviations from the initial state, but does not reveal the cause of this deviation.

Keywords: internal state engine, kinematics, defect identification, acoustic noise, spectral analysis

Известно [1], что задача распознавания технического состояния двигателя внутреннего сгорания (ДВС) по звуку поставлена более 40 лет назад, но до сих пор результаты исследований далеки от требуемых. Однако опытные автомеханики уже давно используют на практике акустический метод, определяя целый ряд дефектов «на слух» по характерному звуку работающего двигателя. За последние годы достоверность

автоматизированной идентификации дефектов ДВС значительно возросла, однако остаются актуальными экспериментальные исследования существующих алгоритмов и поиск новых решений в области идентификации технического состояния конкретных узлов.

Широкое распространение звука для идентификации технического состояния различных агрегатов (неразрушающая диа-

гностика) открывает большие возможности для применения данного идентификатора и подтверждает актуальность автоматизации процесса идентификации технического состояния подвижных объектов по акустическому шуму.

Исследованиям цифровой обработки сигналов для идентификации технического состояния оборудования посвящены работы российских ученых Ф.Я. Балицкого, А.В. Баркова [2], В.Э. Дрейзина [3], С.В. Жернакова [4] и др. Поскольку акустический шум ДВС не является строго периодичным и стационарным, достоверность идентификации технического состояния ДВС остается низкой [5, 6].

Цель работы – автоматизация информационных процессов идентификации технического состояния подвижных кинематических узлов ДВС по акустическому шуму.

Материалы и методы исследования

Для получения дополнительной информации об акустическом сигнале используется преобразование Фурье [6, 7]. Звуковые сигналы представляются во временной области зависимостью их амплитуды от времени. Преобразование Фурье позволяет перейти от временного представления сигнала к частотному, тем самым расширяя пространство признаков идентификации. Сущность временного и частотного из-

мерений звукового сигнала представлена на рис. 1.

Цифровая обработка звукового сигнала основывается с дискретными преобразованиями Фурье [5] вида

$$S_o(\omega) = \sum_{n=0}^{N-1} s(n) e^{\frac{-2\pi i}{N} kn}, \quad (1)$$

где $S_o(\omega)$ – спектр дискретного сигнала на частоте ω ;

k – k -й отсчет спектра дискретного сигнала;

$s(n)$ – n -й отсчет временной последовательности;

N – число ненулевых отсчетов в выборке.

Для учета особенностей акустического шума ДВС используется оконное преобразование Фурье с движущейся по сигналу оконной функцией. Временной интервал сигнала разделяется на окна (фрагменты на рис. 2), и преобразование Фурье выполняется для каждого окна последовательно в отдельности [5]. Тем самым выполняется переход к частотно-временному представлению сигналов, при этом в пределах каждого окна сигнал считается стационарным. Этот способ позволяет получать, исследовать и строить в виде спектрограмм динамические спектры и анализировать их поведение во времени. Спектрограмма строится в трех координатах — частота, время и амплитуда.

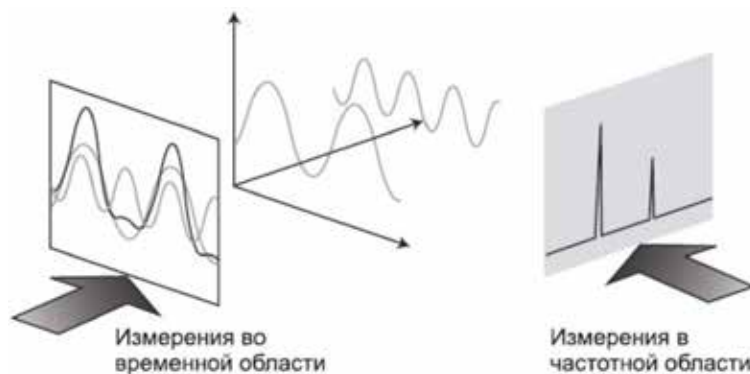


Рис. 1. Сущность преобразования Фурье

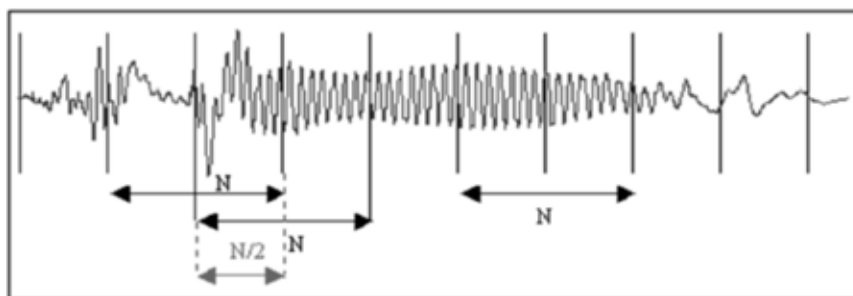


Рис. 2. Разбиение звукового сигнала на фрагменты

Для устранения разрыва на границах периодов используется умножение каждого фрагмента на оконную функцию. В качестве оконной функции чаще всего используется функция Хэмминга (по сравнению с прямоугольным окном реализует более высокое разрешение по частоте, но хуже – по амплитуде) вида

$$W(\tau - t) = 0,54 - 0,46 \cos \frac{2\pi t}{N}, \quad (2)$$

Дискретное оконное преобразование Фурье (1) акустического шума можно представить в виде [5]:

$$S(k) = \sum_{n=0}^{N-1} s(n) \cdot \exp\left(-j \cdot \frac{2\pi}{N} \cdot n \cdot k\right) = \sum_{n=0}^{N-1} s(n) \cdot W^{nk}, \quad (3)$$

где $S(k)$ – k -й отсчет выходного спектра;
 k – индекс отсчета дискретного преобразования Фурье ($k = 0, \dots, N-1$);
 $s(n)$ – n -й отсчет входной последовательности;
 n – индекс временного отсчета сигнала;
 $W^{nk} = \exp\left(-j \cdot \frac{2\pi}{N} \cdot n \cdot k\right)$ – коэффици-

енты дискретного преобразования Фурье. По коэффициентам дискретного преобразования Фурье можно говорить о свойствах анализируемых процессов акустического шума.

При экспериментальных исследованиях использовано оконное преобразование Фурье с прямоугольным весовым окном (простота реализации при относительно высоком разрешении по частоте):

$$\omega(n) = \begin{cases} 1, & n \in [0, N-1] \\ 0, & n \notin [0, N-1] \end{cases}.$$

Окно генерируется автоматически при ограничении выборки N отсчетами. Максимальный уровень боковых лепестков частотной характеристики составляет 13 дБ.

Задача идентификации технического состояния кинематических узлов ДВС решалась методом «манхэттенское расстояние», т.е. вычислением расстояния от вектора признаков пробного сигнала p (состояние, определенное после экспериментально определенного спектра и подтвержденное после полной разборки ДВС) до вектора признаков q на основе шаблона (исправное состояние) с использованием пакета STATISTICA Automated Neural Networks Code Generator (выбор инструментов определяется возможностью автогенерации программного кода) [5]:

$$d_1(p, q) = p - q_1 = \sum_{i=1}^n |p_i - q_i|, \quad (4)$$

где $p = (p_1, p_2, \dots, p_n)$, $q = (q_1, q_2, \dots, q_n)$ – векторы спектральных признаков технического состояния кинематических узлов ДВС.

Таким образом, предложенная методика моделирования акустического сигнала позволяет идентифицировать техническое состояние различных кинематических узлов.

Результаты исследования и их обсуждение

При использовании пакета прикладных программ MATLAB получены спектры акустического шума кинематических узлов ДВС в различных технических состояниях, результаты которого представлены на рис. 3–5.

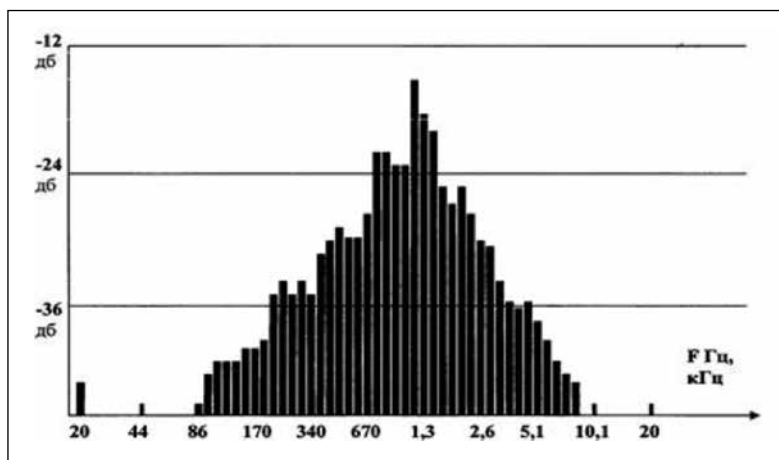


Рис. 3. Спектр акустического шума бензинового двигателя в исправном состоянии

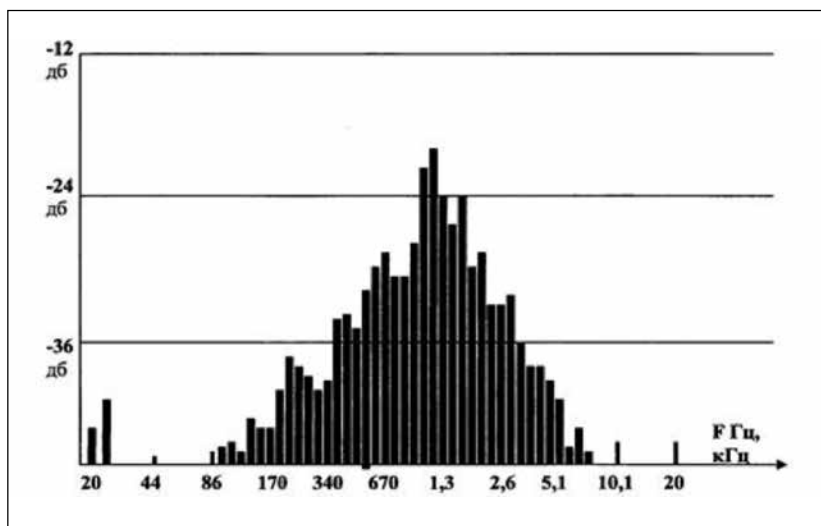


Рис. 4. Спектр акустического шума бензинового ДВС при неисправном кривошипно-шатунном механизме

Спектрограмма акустического шума бензинового двигателя в исправном состоянии (новый автомобиль) построена при работе ДВС на холостом ходу (частота вращения 1000 об/мин) на неподвижном автомобиле. Анализ спектрограммы показал, что диапазон частот спектра лежит в пределах (с учетом уровня боковых лепестков 13дБ) 100–6000 гц, с явно выраженным максимумом в 10 дБ на частоте 1,3 кГц.

Спектрограмма акустического шума бензинового двигателя при дефектах кривошипно-шатунного механизма (установлено после разборки двигателя) построена при тех же условиях эксперимента. Ана-

лиз спектрограммы показал, что диапазон частот спектра в области нижних частот увеличился до 200 Гц, в области высоких частот уменьшился в два раза (до 5,1 КГц), с теми же величинами пика спектрограммы.

Спектрограмма акустического шума бензинового двигателя при дефектах кинематики блока головки распределения (установлено после разборки двигателя) построена при тех же условиях эксперимента. Анализ спектрограммы показал, что диапазон частот спектра в области нижних частот увеличился до 200 Гц, в области высоких частот уменьшился в два раза (до 4 КГц), с теми же величинами пика спектрограммы.

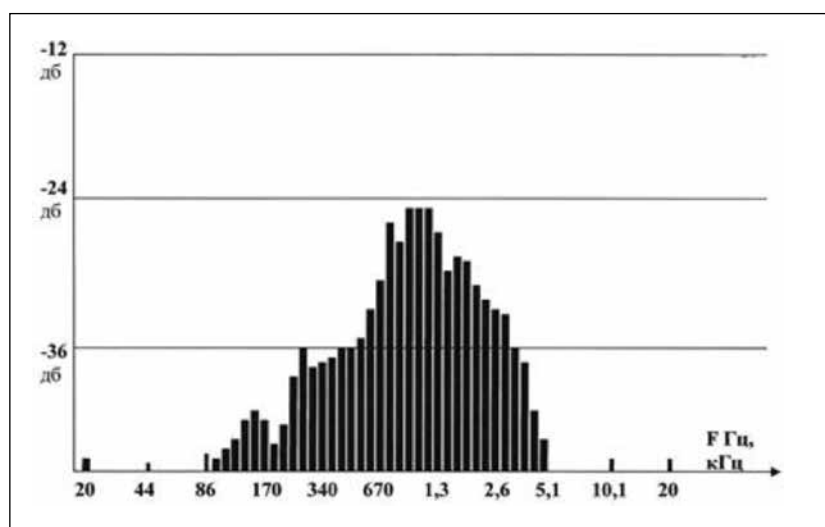


Рис. 5. Спектр акустического шума бензинового ДВС при дефектах кинематики блока головки распределения

Вероятности правильной идентификации технического состояния кинематических узлов ДВС

Количество состояний	Количество тестов	Вероятность идентификации, %
2 (исправно, неисправно)	10	88
3 (исправно, неисправно, сомнительно)	20	81
4 (исправно, неисправно, сомнительно, ремонту не подлежит)	20	72

Таким образом, каждая спектрограмма имеет свой идентификационный образ, который может быть однозначно отнесен к конкретной форме дефекта определенного узла кинематики двигателя. При повышении частоты вращения коленвала форма спектра изменяется (приводит к разрывности исходной функции, к искажению (расширению) частотного спектра).

Результаты серии экспериментов по определению вероятности распознавания акустического шума приведены в таблице.

Предложенная методика позволяет определить отклонения от исправного технического состояния узла ДВС, но не выявляет причину выявленного отклонения. Кроме того, недостатком методики является необходимость производить измерения на оборотах, заданных с большой точностью, так как уровень акустического шума в значительной степени зависит от скорости соударения кинематически связанных деталей двигателя, то есть от числа оборотов ДВС.

Для расширения области применения методики идентификации технического состояния ДВС необходимо продолжить экспериментальные исследования акустических шумов других узлов двигателя для формирования базы данных звуковых образов дефектов кинематики ДВС. При этом необходимо учесть то, что некоторые дефекты агрегатов ДВС (отказ катушки зажигания, некорректность создания топливной смеси, неисправность цилиндров) могут привести к получению спектра, близкого к спектрограмме кинематики, что потребует необходимости расширения пространства признаков оценки технического состояния ДВС.

Выводы

1. Доказана возможность идентификации технического состояния кинематических узлов по акустическому шуму без полной разборки двигателя (неразрушающий контроль агрегатов).

2. На основе эмпирического метода моделирования описана спектральная модель технического состояния кинематических агрегатов в форме оконного дискретного преобразования Фурье.

3. Недостатком методики является необходимость производить измерения на оборотах, заданных с большой точностью, так как уровень акустического шума в большой степени зависит от скорости соударения кинематически связанных деталей двигателя, то есть от числа оборотов.

4. Предложенная методика не дает точного ответа, какой узел или элемент двигателя внутреннего сгорания вышел из строя, она только позволяет определить отклонения от исходного состояния, но не выявляет причину данного отклонения.

Список литературы

1. Науменко Н.А., Соловьев Н.А. Системный анализ проблем автоматизации мониторинга технического состояния кинематических узлов по акустическому сигналу // Тенденции развития науки и образования. 2021. № 72. С. 84–87.
2. Балицкий Ф.Я., Барков А.В., Баркова Н.А. Вибродиагностика. Неразрушающий контроль. Справочник. М.: Машиностроение, 2005. 829 с.
3. Дрейзин В.Э., Касем М.М., Сабельников Д.С. Акустическая диагностика автомобильных двигателей. Анализ возможностей и теоретические и практические предпосылки // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2009. № 4. С. 48–56.
4. Пестриков В.М., Евкарпиев В.Е. Особенности диагностики современных транспортных средств // Техно-технологические проблемы сервиса. 2014. № 4 (30). С. 14-19.
5. Соловьев Н.А., Тишина Н.А., Юркевская Л.А. Цифровая обработка информации в задачах и примерах: учебное пособие. Оренбург: ОГУ, 2016. 122 с.
6. Горбачев А.А. Диагностика двигателя внутреннего сгорания автомобиля по акустическому излучению // Теория и практика современной науки. 2016. № 6–1 (12). С. 275.
7. Лянденбургский В.В., Тарасов А.И., Судьев В.В. Алгоритм поиска неисправностей дизелей // Молодой ученый. 2015. № 4. С. 214–217.
8. Касем М.М., Дрейзин В.Э. Программа для предварительной обработки записей шумов автомобильных двигателей с целью построения сигналов диагностики их состояний // Свидетельство об официальной программе для ЭВМ № 2009612173.