

**ВИБРОАКУСТИЧЕСКОЕ ДИАГНОСТИРОВАНИЕ АВТОМОБИЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ
ПО СТАТИСТИЧЕСКИМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ СИГНАЛА
НА ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМАХ РАБОТЫ**

ЗЕНЬКОВ В. А.

**(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой;
г. Новополоцк, Республика Беларусь)**

Рассмотрена безразборная оценка технического состояния автомобильного двигателя по виброакустическим сигналам, регистрируемым в диагностически информативных зонах блока цилиндров и картера. Показано, что наибольшую диагностическую ценность представляют переходные режимы, при которых изменение зазоров в цилиндропоршневой группе, шатунных и коренных подшипниках сопровождается усилением ударных составляющих и ростом нестационарности сигнала. В качестве основных признаков предложено использовать среднеквадратическое значение, пик-фактор, эксцесс, число ударных импульсов и параметры огибающей. Отмечено, что применение трехосевых акселерометров позволяет выбирать направления измерения с максимальной чувствительностью к дефекту. Предлагаемый способ ориентирован на использование в системе технического обслуживания и ремонта автомобилей и создает основу для последующего определения остаточного ресурса агрегатов.

Ключевые слова: *двигатель внутреннего сгорания, виброакустическая диагностика, переходные режимы, статистические характеристики, трехосевой акселерометр, остаточный ресурс.*

Введение. В современной системе эксплуатации автомобильного транспорта техническое диагностирование выступает средством предупреждения отказов, планирования технического обслуживания и повышения эффективности использования ресурса агрегатов [1–4]. Для двигателя внутреннего сгорания данная задача особенно актуальна, поскольку именно в нем сосредоточены наиболее нагруженные сопряжения, состояние которых определяет экономичность, экологические показатели и надежность автомобиля. При этом непосредственный контроль структурных параметров двигателя – зазоров, натягов, состояния поверхностей трения и герметичности соединений – в эксплуатационных условиях без разборки практически невозможен. Поэтому оценка состояния агрегата должна строиться по диагностическим параметрам, связанным с внутренними рабочими процессами.

Среди применяемых методов диагностирования виброакустический метод занимает особое место, так как позволяет регистрировать реакцию конструкции

на реальные процессы взаимодействия деталей в зонах контакта [2, 5, 6]. В отличие от температурных, газоаналитических и ряда параметрических методов, фиксирующих главным образом косвенные последствия дефекта, анализ вибрации дает возможность выявлять ранние изменения динамики сопряжений. Для двигателей это принципиально важно, поскольку увеличение зазора в подшипниковом узле либо ухудшение условий работы цилиндропоршневой группы приводит к изменению характера ударных воздействий, а следовательно – к изменению формы и энергетики виброакустического сигнала. Современные подходы к *condition monitoring* и *PHM* также опираются на обработку диагностических данных в стандартизированной цифровой среде [6–8].

Целью работы является обоснование возможности повышения информативности диагностирования автомобильного двигателя за счет использования статистических характеристик виброакустического сигнала, регистрируемого в диагностически информативных зонах на переходных режимах работы. В качестве объекта диагностирования рассматривается четырехтактный четырехцилиндровый двигатель, для которого наибольший практический интерес представляют дефекты цилиндропоршневой группы, шатунных и коренных подшипников коленчатого вала. В качестве характерных режимов предлагается использовать пониженные, средние и повышенные частоты вращения коленчатого вала – 800, 1500 и 3000 об/мин, а также переходы между ними.

Материалы и методы. Методический подход основывается на представлении двигателя как сложной динамической системы с направленными связями между источниками возбуждения и поверхностью корпуса. Изменение структурного параметра ΔP_c , например рабочего зазора в трибосопряжении, вызывает изменение сил взаимодействия деталей, а затем и диагностического параметра ΔP_d , измеряемого на поверхности блока цилиндров. Практически это означает, что виброускорение на корпусе является откликом не только на периодические газовые и инерционные нагрузки, но и на локальные ударные процессы, интенсивность которых возрастает по мере развития дефекта. Следовательно, при выборе признаков необходимо выделять параметры сигнала, чувствительные к появлению ударности и нестационарности, а не только к общему росту амплитуды [5, 6].

Для решения этой задачи целесообразно использовать статистические характеристики вибрационного сигнала. Среднеквадратическое значение (*RMS*) характеризует общий энергетический уровень колебаний:

$$RMS = \sqrt{(1/N) \cdot \sum x_i^2}.$$

Рост *RMS* обычно сопровождается увеличением динамической нагруженности узла, однако на ранней стадии дефекта этот показатель может быть недостаточно чувствительным. Поэтому его следует дополнять пик-фактором

$$CF = x_{peak} / RMS,$$

отражающим относительную выраженность кратковременных импульсов, и эксцессом

$$K = (1/N) \cdot \sum ((x_i - \bar{x})/s)^4,$$

характеризующим отклонение распределения сигнала от нормального закона. При увеличении зазоров и нарушении масляной пленки в сопряжениях возрастает доля высокоамплитудных выбросов, что приводит к росту пик-фактора и эксцесса. В практической диагностике целесообразно также учитывать число ударных импульсов и среднеквадратическое значение огибающей, позволяющее выделять модулированные высокочастотные составляющие [5, 8].

Особое значение имеет выбор режима испытаний. На установившихся режимах структура сигнала более повторяема, однако часть дефектов проявляется сглаженно. На переходных режимах – при разгоне, снижении частоты вращения и смене нагрузки – изменяются инерционные и газодинамические воздействия, перераспределяются нагрузки в опорах, усиливается чувствительность к зазорам и ослаблению сопряжений. Именно поэтому для двигателей внутреннего сгорания диагностическая информация на переходах часто оказывается богаче, чем на стационарных режимах. Применительно к частотам 800, 1500 и 3000 об/мин это позволяет сравнивать не только абсолютные уровни признаков, но и характер их изменения при переходе от одного режима к другому, что повышает достоверность диагностики.

Не менее существенным является выбор мест установки датчиков. С учетом путей распространения колебательной энергии диагностически информативными следует считать зоны поверхности, расположенные вблизи цилиндров, опор коленчатого вала и нижней части блока, где наиболее интенсивно передаются вибрации от цилиндропоршневой группы и подшипниковых узлов. Использование трехосевых акселерометров дает возможность регистрировать колебания по нескольким направлениям одновременно и выбирать компоненту, наиболее чувствительную к рассматриваемому дефекту. Жесткое крепление датчика на стенке корпусной детали и ориентация осей чувствительности по направлению максимальных виброускорений позволяют повысить информативность статистических характеристик и устойчивость результатов измерений.

Результаты и обсуждение. Практическая ценность предлагаемого подхода состоит в возможности перехода от разрозненной оценки отдельных симптомов к формированию совокупного диагностического решения. При наличии базовых данных по исправному двигателю для каждого режима можно нормировать значения *RMS*, пик-фактора, эксцесса, параметров огибающей и числа ударных импульсов, а затем использовать их совместно для построения интегрального индекса технического состояния. Такая схема согласуется с современными принципами *condition monitoring*, где данные измерений последовательно преобразуются в диагностическую и прогностическую информацию [6–8].

Таким образом, применение статистических характеристик виброакустического сигнала на переходных режимах работы двигателя позволяет усилить чувствительность диагностики к ранним изменениям структурных параметров. Научная новизна подхода заключается в совместном учете режима работы, пространственной ориентации измерений и комплекса статистических признаков, отражающих как общий уровень вибрации, так и ее ударную составляющую. Практически это создает основу для совершенствования безразборного диагностирования двигателей в эксплуатации, повышения обоснованности решений по техническому обслуживанию и перехода к оценке остаточного ресурса агрегатов.

Заключение. Для автомобильных двигателей наиболее перспективным направлением безразборного контроля является виброакустическое диагностирование, ориентированное на выявление связи между изменением структурных параметров сопряжений и статистическими характеристиками измеряемого сигнала. Наибольшая диагностическая информативность достигается при использовании переходных режимов работы и трехосевых акселерометров, установленных в диагностически информативных зонах блока цилиндров и картера. Комплексное использование RMS, пик-фактора, эксцесса, числа ударных импульсов и параметров огибающей позволяет повысить достоверность оценки технического состояния двигателя и сформировать предпосылки для дальнейшего определения остаточного ресурса агрегата.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Базовский И. Надежность: теория и практика. М.: Мир, 1965. 363 с.
2. Технические средства диагностирования: справочник / под ред. В.В. Ключева. М.: Машиностроение, 1989. 672 с.
3. Ждановский Н.С., Николанко А.В. Надежность и долговечность автотракторных двигателей. 2-е изд., перераб. и доп. Л.: Колос, 1981. 295 с.
4. Крагельский И.В. Трение и износ. М.: Машиностроение, 1968. 480 с.
5. Барков А.В., Баркова Н.А. Вибрационная диагностика машин и оборудования. Анализ вибрации: учебное пособие. СПб.: Изд. центр СПбГМУ, 2004. 152 с.
6. ГОСТ Р 13374-1-2011 Контроль состояния и диагностика машин. Обработка, передача и представление данных Часть.1. – Введ. 16.11.2011. – М.: Стандартинформ, 2018. – 20 с.
7. Jardine A.K.S., Lin D., Banjevic D. A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance // Mechanical Systems and Signal Processing. 2006. Vol. 20, no. 7. P. 1483–1510. – URL: https://www.academia.edu/21057199/A_review_on_machinery_diagnostics_and_prognostics_implementing_condition_based_maintenance.
8. Caesarendra W., Tjahjowidodo T. A Review of Feature Extraction Methods in Vibration-Based Condition Monitoring and Its Application for Degradation Trend Estimation of Low-Speed Slew Bearing // Machines. 2017. Vol. 5, no. 4. Art. 21. – URL: <https://scispace.com/pdf/a-review-of-feature-extraction-methods-in-vibration-based-ppn0mrde0k.pdf>.