

РАЗРЕШАЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ И ТЕХНИЧЕСКИЙ УРОВЕНЬ ВИБРОАКУСТИЧЕСКОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ АВТОМОБИЛЬНЫХ АГРЕГАТОВ

В.А. ЗЕНЬКОВ

(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)

Предложена методика оценки разрешающей способности виброакустического диагностирования автомобильных агрегатов, связывающая повторяемость диагностического параметра, локальную чувствительность калибровочной зависимости и неопределенность определения структурного параметра. В качестве объектов контроля рассмотрены цилиндропоршневая группа и коренные подшипники двигателя внутреннего сгорания (ДВС). Уточнено различие между эффективным шагом косвенного измерения и статистически подтвержденной различимостью состояний. Приведены предварительные расчетные оценки и сопоставление способов диагностирования по семи показателям. Установлены условия включения оценки зазора в процесс прогнозирования ресурса и переноса методики на другие автомобильные агрегаты.

Ключевые слова: автомобильный агрегат, виброакустическое диагностирование, зазор, разрешающая способность, неопределенность измерения, остаточный ресурс.

Введение. Переход к техническому обслуживанию автомобильных агрегатов по фактическому состоянию требует обоснования решений о продолжении их использования или ремонте. Регистрация повышенной вибрации свидетельствует об изменении динамического состояния объекта, однако сама по себе не определяет износ и остаточный ресурс. Для ресурсного диагностирования необходима последовательная связь измеряемого диагностического параметра P_d со структурным параметром (зазором) P_c в конкретном соединении и законом изменения этого зазора во времени. В обзоре [1] диагностика и прогнозирование рассматриваются как составляющие обслуживания по состоянию. Применительно к автомобильным двигателям принципиально различаются задачи обнаружения отклонения сигнала и определения физического параметра, ограничивающего ресурс. Руководство JCGM 100:2008¹ устанавливает общую основу ее выражения, а методы сравнения средних, систематизированные в справочнике NIST/SEMATECH², позволяют проверять различимость результатов повторных наблюдений. Точечная оценка и доверительный интервал для среднего регламентированы ГОСТ Р 50779.22-2005³. Недостаточно исследованным в рассматриваемой постановке остается согласование метрологических характеристик косвенной оценки зазора с технологическим процессом ресурсного диагностирования. Высокая корреляция признака с износом еще не означает, что малое приращение зазора достоверно обнаруживается при повторной установке датчика. Аналогично, высокая балльная оценка универсальности способа не характеризует ошибку прогноза.

Цель работы – разработка оценки разрешающей способности и технического уровня виброакустического диагностирования, определяющей условия контроля зазоров и последующей оценки ресурса автомобильных агрегатов.

Методы исследования. Объектом исследования выступили соединения «поршень–цилиндр» и «коренная шейка коленчатого вала–коренной подшипник» двигателя внутреннего сгорания (ДВС) ЗМЗ-402. В исследовании судового дизеля зазор между поршнем и втулкой рассматривается как фактор вибрации цилиндропоршневой группы [2]. Данные соединения представляют два типа кинематических взаимодействий: возвратно-поступательное движение в цилиндре и вращательное в подшипнике. Были выбраны структурный параметр P_c – зазор в соединении, и диагностический параметр P_d – среднеквадратическое значение (RMS) виброускорения стенки корпусной детали. Были предусмотрены девять точек: четыре в зонах цилиндров и пять в зонах коренных опор. Зоны выбирали по чувствительности и повторяемости сигнала [3]; чувствительную ось датчиков ориентировали нормально к стенке корпусной детали. Соединения шатунных подшипников в количественную оценку не включались. Диагностическая система включала модули акселерометров ADXL345, устройство считывания на базе Arduino UNO и персональный компьютер для обработки и представления. Для обеспечения воспроизводимости результатов фиксировали частоту вращения коленчатого вала работающего ДВС, периодичность регистрации значений диагностических и структурных параметров, длительность измерения диагностического параметра. Сопоставление состояний проводилось для трех режимов работы ДВС с частотами

¹ Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement: JCGM 100:2008 / Joint Committee for Guides in Metrology. – 2008. DOI: 10.59161/JCGM100-2008E

² NIST/SEMATECH e-Handbook of Statistical Methods. – 1.3.5.3. Two-Sample t-Test for Equal Means. – URL: <https://www.itl.nist.gov/div898/handbook/eda/section3/eda353.htm> (дата обращения: 09.07.2026).

³ ГОСТ Р 50779.22-2005 (ИСО 2602:1980). Статистические методы: СТАТИСТИЧЕСКОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ДАННЫХ: Точечная оценка и доверительный интервал для среднего – М.: Стандартинформ. 2005. – 11 с.

вращения коленчатого вала 800, 1500 и 3000 об/мин. Для каждого режима предусматриваются повторные измерения Π_d продолжительностью 10–12 с.

Основная часть. Применение разрабатываемого способа диагностирования автомобильных агрегатов требует ответа на вопрос: с какой разрешающей способностью по виброакустическому сигналу может быть определено изменение структурного параметра в контролируемом соединении? Для этого вводится понятие цены деления структурного параметра при диагностическом измерении.

Цена деления структурного параметра – минимально различимая длина отрезка числовой шкалы этого параметра, установленная с помощью выбранного диагностического параметра при заданном режиме работы агрегата и принятом уровне доверительной вероятности. В отличие от цены деления традиционного измерительного прибора, данная величина зависит не только от дискретности регистрации сигнала, но и от повторяемости измерений, шумов, способа крепления датчика и качества регрессионной модели.

Цена деления структурного параметра определялась путем проверки гипотезы об отнесении двух рядом расположенных центров распределений структурного параметра, относящихся к разным выборкам, с применением t -критерия [4]:

$$t = \frac{\overline{\Pi_{C1}} - \overline{\Pi_{C2}}}{\sqrt{n_1 s_1^2 + n_2 s_2^2}} \sqrt{\frac{n_1 n_2 (n_1 + n_2 - 2)}{n_1 + n_2}}, \quad (1)$$

где $\overline{\Pi_{C1}}$ и $\overline{\Pi_{C2}}$ – сравниваемые центры распределения структурного параметра (выборочные математические ожидания);

n_1 и n_2 – количество измерений в выборках;

s_1 и s_2 – дисперсии распределений случайной величины в выборках.

Рассматривались два вида трущихся соединений с поступательным и вращательным движением деталей (цилиндропоршневая группа (ЦПГ) и коренные подшипники коленчатого вала) во время использования агрегата. Различение исправного состояния, масляного голодания и износа коренного подшипника по вибрационным данным исследовано в [5]. При расчете t -критерия принимался 5%-й уровень достоверности.

Измерения структурных параметров каждого вида соединений были совмещены с началом и концом испытаний, а также с промежуточными разборками двигателя. Результаты расчетов характеристик распределений структурных параметров приведены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1. – Статистические характеристики распределений структурного параметра (зазора в ЦПГ)

Наработка, ч	Математическое ожидание, мм	Дисперсия, мм ²
0	0,025	0,00120
20	0,089	0,00280
40	0,200	0,00070
60	0,338	0,00025

Значения t -критерия при сопоставлении двух рядом расположенных центров распределения структурного параметра (зазоров между поршнем и цилиндром) составляют: первого со вторым – 17,57; второго с третьим – 3,25; третьего с четвертым – 2,44 (при табличном значении 2,78).

Таблица 2. – Статистические характеристики распределения структурного параметра (зазора в коренных подшипниках коленчатого вала)

Наработка, ч	Математическое ожидание, мм	Дисперсия, мм ²
0	0,036	0,00070
20	0,070	0,00025
40	0,130	0,00004
60	0,214	0,00590

Аналогичные расчеты t -критерия при сопоставлении двух рядом расположенных центров распределения структурного параметра (зазоров в коренных подшипниках коленчатого вала) составляют: первого со вторым – 6,95; второго с третьим – 7,10, третьего с четвертым – 2,18 (при табличном значении 2,57).

Цена деления структурного параметра Π_d принимается равной наибольшей разности его средних значений в двух независимых выборках, обусловленной разбросом повторных измерений:

$$\Pi_{dC} = \Pi_{C1} - \Pi_{C2}, \quad (2)$$

где Π_{C1} и Π_{C2} – значения структурного параметра в двух независимых выборках.

Приведенный подход исключает завышенную оценку точности, точности показаний, когда цифровое разрешение датчика оказывается существенно меньшим реального разброса регистрируемых вибросигналов.

Отличия расчетных экспериментальных и табличных значений t -критерия друг от друга косвенно характеризуют степень различия выборочных значений. Все полученные различия значимые, следовательно,

наибольшая разница значений самого структурного параметра в первых сопоставлениях (0,064 мм для ЦПГ и 0,034 для коренных подшипников коленчатого вала) превышает цену деления структурного параметра. Меньшей ценой деления структурного параметра характеризуются трущиеся соединения с вращающимися деталями (они лучше различаются), большей – соединения с поступательно движущимися деталями. Цена деления структурного параметра изменяется на протяжении наработки агрегата. С износным увеличением структурного параметра при приближении технического состояния агрегата к предельному цена деления параметра увеличивается. Наиболее важной является та область, на которой наблюдается приближение контролируемого соединения к предельному состоянию.

Уточнение цены деления структурного параметра позволяет уменьшить отрезок его размерной шкалы за счет последовательного уменьшения разницы выборочных средних, нахождения значений структурных параметров с помощью диагностических параметров и нового сопоставления их по формуле (1). Принятые уточненные цены деления параметров (структурного и диагностического) приведены в таблице 3.

Таблица 3. – Расчетная оценка эквивалентной цены деления диагностических параметров

Соединение	Параметр	$\mathcal{C}\mathcal{D}_d$	$\mathcal{C}\mathcal{D}_c$, мм	Применимость показателя
Цилиндропоршневая группа	$EnvRMS$	0,008 g	0,0016	основной
	RMS	0,015 g	0,0021	дополнительный
	Экссес K	0,12	0,0037	дополнительный
Коренной подшипник	RMS	0,008 g	0,0019	основной
	$EnvRMS$	0,010 g	0,0028	дополнительный
	Пик-фактор CF	0,10	0,0048	ограниченный

Цена деления диагностического параметра $\mathcal{C}\mathcal{D}_d$ связана с ценой деления структурного параметра через коэффициент преобразования диагностического параметра в структурный:

$$\mathcal{C}\mathcal{D}_d = k_d \mathcal{C}\mathcal{D}_c, \quad (3)$$

где k_d – коэффициент преобразования диагностического параметра в структурный (чувствительность диагностического параметра к изменению структурного параметра).

Для соединений ЦПГ наименьшую цену деления обеспечивает параметр $EnvRMS$. Для коренных подшипников коленчатого вала предпочтительным является параметр RMS . Поэтому именно эти параметры целесообразно использовать как основные при последующей оценке структурного состояния соответствующих соединений.

Таким образом, цена деления структурного параметра связывает математическую модель $P_c = f(P_d)$ с реальной разрешающей способностью измерительной системы. Достоверность оценки структурного параметра обеспечивается при одновременном выполнении трех условий: выбранный диагностический параметр имеет высокую чувствительность к изменению структурного параметра, результаты повторных измерений обладают малым разбросом, а доверительный интервал оценки структурного параметра не перекрывает границы технических состояний.

Разрешающая способность виброакустического диагностирования не уступает соответствующему параметру диагностирования других видов. В дальнейшем это позволяет использовать полученные диагностические параметры для расчета текущего значения структурного параметра и последующего прогнозирования остаточного ресурса двигателя.

Технический уровень способов диагностирования. Технический уровень рассмотрен по семи показателям (таблица 4). Для первых трех высокие баллы соответствуют большим функциональным возможностям; для остальных – меньшим затратам и требованиям. Балльные оценки 5, 4 и 3 обозначают соответственно высокий, хороший и посредственный уровень в принятой авторской шкале.

Таблица 4. – Авторская балльная оценка способов диагностирования

Способ	У	И	Р	Т	М	Э	К
Виброакустический	5	5	5	5	5	5	3
Компрессионный	3	4	–	5	5	5	5
Вакуумный	3	4	–	5	5	5	5
Газоаналитический	5	3	4	5	5	5	5
Анализ масла	5	5	4	4	3	5	4
Тепловизионный	4	4	–	5	3	5	5
Эндоскопический	4	4	3	4	5	5	3
По току стартера	3	3	–	5	5	5	5
Индикаторные диаграммы	5	5	5	3	3	5	3
По параметрам выбега	3	3	–	5	5	5	5

Обозначения: У – универсальность; И – информативность; Р – ресурсная функция; Т – трудоемкость; М – материалоемкость; Э – энергоемкость; К – требования к квалификации.

Прочерк в столбце Р таблицы 4 означает отсутствие положительной оценки ресурсной функции в данной шкале, а не принципиальную невозможность прогнозирования в комплексной системе.

Введен относительный балльный показатель Q при одинаковой значимости критериев:

$$Q = \Sigma b_j / 35. \quad (4)$$

Суммируются семь баллов b_j для расчета, а прочерку условно присвоен ноль. Такое кодирование используется только внутри данной сравнительной модели. Оно не превращает порядковую шкалу в измерение физической эффективности и не позволяет интерпретировать разность Q как процент повышения точности или надежности. На рисунке представлено ранжирование способов диагностирования на основе балльной оценки.

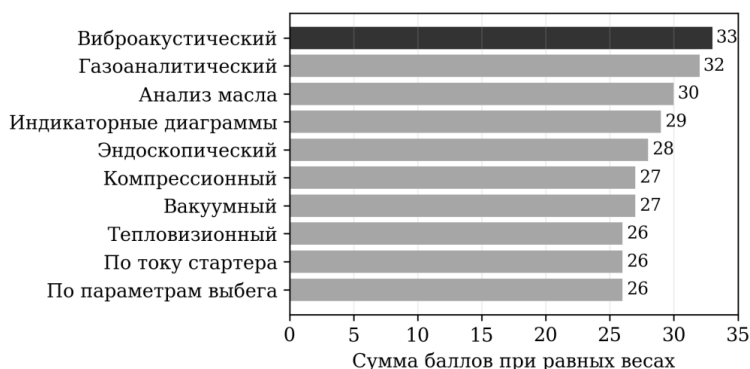


Рисунок. – Сопоставление суммарных оценок способов диагностирования

Виброакустический способ получил 33 балла, газоаналитический – 32, анализ масла – 30, анализ индикаторных диаграмм – 29. При равных весах виброакустический способ занимает первое место в принятой системе оценок. Его профиль отличается высокой принятой оценкой ресурсной функции при более высоких требованиях к подготовке диагноста. Результат зависит от весов критериев. Разность взвешенных оценок виброакустического и газоаналитического способов равна удвоенному весу информативности плюс вес ресурсной функции минус удвоенный вес требований к квалификации. При равных весах преимущество составляет один балл. Достаточное увеличение веса требований к квалификации изменяет предпочтение в пользу газоаналитического способа.

Применимость и обсуждение результатов. Для коробок передач и ведущих мостов рассматриваются зазоры зацеплений, для карданных передач – зазоры шарниров, для подшипниковых узлов – радиальные зазоры. Переносятся принципы процесса, а калибровки и границы определяются заново. Проверка должна включать повторный монтаж датчиков, размерный контроль и независимые агрегаты. Суммарный люфт кинематической цепи нельзя без дополнительной модели приписывать одному соединению.

Заключение.

1. Разработана процедура оценки разрешающей способности, связывающая эффективный шаг диагностического признака с изменением контролируемого зазора, статистической различимостью состояний и неопределенностью получаемой оценки. Разрешающую способность виброакустического диагностирования предложено оценивать через локальный коэффициент преобразования диагностического признака в зазор и эффективный шаг признака с последующей проверкой различимости состояний. Эти характеристики дополняют, но не заменяют оценку неопределенности.

2. Предварительный расчетный диапазон эквивалентной цены деления составляет 0,0016–0,0048 мм.

3. Технологический процесс ресурсного диагностирования должен включать контроль повторяемости, индивидуальную калибровку и сопоставление верхней границы оценки зазора с допустимым значением.

4. Балльное сопоставление позволяет выявлять преимущества и ограничения способов диагностирования, однако его результат зависит от весов критериев оценки. Использование процесса применительно к другим агрегатам требует отдельной калибровки и проверки достоверности ресурсных решений.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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. DOI: 10.1016/j.ymssp.2005.09.012
2. Афанасьева О.В. Метод оценки факторов, влияющих на вибрацию судового дизеля, вызванную работой цилиндропоршневой группы // *Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология*. – 2024. – № 1. – С. 84–94. DOI: 10.24143/2073-1574-2024-1-84-94

3. Зеньков В.А. Обоснование мест установки датчиков при диагностировании двигателей внутреннего сгорания виброакустическим методом // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В, Промышленность. Прикладные науки. – 2026. – № 2. – С. 34–39. DOI: 10.52928/2070-1616-2026-54-2-34-39
4. Смирнов Н.В., Дунин-Барковский И.В. Курс теории вероятностей и математической статистики для технических приложений: учеб. пособие для вузов. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Наука, 1965. – 512 с. – (Каталог ТУСУРа).
5. Comparison of Two Classifiers; K-Nearest Neighbor and Artificial Neural Network, for Fault Diagnosis on a Main Engine Journal-Bearing / A. Moosavian, H. Ahmadi, A. Tabatabaefar et al. // Shock and Vibration. – 2013. – Vol. 20, № 2. – P. 263–272. DOI: 10.3233/SAV-2012-00742

Поступила 20.07.2026

RESOLUTION AND TECHNICAL LEVEL OF VIBROACOUSTIC DIAGNOSTICS FOR AUTOMOTIVE UNITS

V. ZENKOV

(Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk)

A procedure is proposed for assessing the resolution of vibroacoustic diagnostics by combining diagnostic feature repeatability, local calibration sensitivity and clearance estimation uncertainty. Cylinder–piston pairs and crankshaft main bearings are considered. An effective measurement increment is distinguished from statistically confirmed discrimination between states. Preliminary numerical estimates and a comparison of ten diagnostic methods using seven criteria are presented. Conditions are specified for incorporating clearance estimates into remaining useful life assessment and adapting the procedure to other automotive units.

Keywords: automotive unit, vibroacoustic diagnostics, clearance, resolution, measurement uncertainty, remaining useful life.