

УДК 620.179.1

DOI 10.52928/2070-1616-2026-55-3-69-72

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ВЗАИМОСВЯЗЕЙ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ И СТРУКТУРНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ ДИАГНОСТИРОВАНИИ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ**В.А. ЗЕНЬКОВ***(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)*

Проанализированы зависимости зазоров цилиндропоршневой группы и коренных подшипников от среднеквадратического значения ускорения RMS и среднеквадратического огибающей ускорения $EnvRMS$, полученных виброакустическим датчиком со стенки блока цилиндров двигателя внутреннего сгорания. Для цилиндропоршневой группы лучшее качество аппроксимации получено по RMS , для коренных подшипников – по $EnvRMS$. Проверены монотонность и диапазоны применения моделей. Выявлен внутренний максимум зависимости зазора цилиндропоршневой группы от $EnvRMS$, ограничивающий ее использование. Обоснованы условия косвенного контроля зазоров и последующего перехода к оценке ресурса.

Ключевые слова: *автомобильный двигатель, зазор, виброакустическое диагностирование, RMS , $EnvRMS$, регрессия, цилиндропоршневая группа, коренные подшипники, диагностический параметр, структурный параметр.*

Введение. Количественный контроль изнашивания автомобильного двигателя требует оценки зазоров соединений, определяющих его работоспособность. Непосредственные измерения связаны с его разборкой. Виброакустическое диагностирование позволяет оценивать структурные параметры по колебаниям наружной стенки блока цилиндров. Практическая ценность подхода зависит от устойчивости связи диагностического признака с зазором. В работах по вибрационному диагностированию подчеркивается необходимость различать источники и уровни вибросигналов – от отдельного подшипника до агрегата [1]. В двигателе одновременно наблюдаются колебания и волны от сгорания рабочей смеси, движения поршней, вращения валов и деталей газораспределительного механизма. Для определения зазоров необходима калибровочная зависимость, учитывающая особенность группы трения. Для модели принята квадратичная регрессия, параметры которой определяются методом наименьших квадратов [2]. Для подтверждения пригодности модели для новых наблюдений необходимо провести анализ остатков и установить область применимости модели [2]. Для сохранения качества общей зависимости и предпочтительности диагностического признака исследование проводилось отдельно по каждому виду соединений.

Неинвазивная диагностика ДВС по вибрации головки цилиндров описана в [3]. Вибрации сгорания и ударов поршня накладываются; их разделение исследовано в [4]. Влияние зазора между поршнем и гильзой на вибрацию судового дизеля показано в [5], а выявление износа коренных подшипников ДВС по вибрации – в [6]. В [7] изучено влияние частоты вращения, нагрузки и зазора на проявления ударов поршня.

Цель работы – подтвердить обоснованность выбранных диагностических параметра и условия применения регрессионных зависимостей для оценки зазоров цилиндропоршневой группы и коренных подшипников. Для достижения цели сопоставлены показатели аппроксимации четырех моделей, исследована их монотонность и определены ограничения использования результатов при контроле технического состояния двигателя.

Объект исследования и исходные материалы. Объектом являются соединения «поршень–цилиндр» в цилиндропоршневой группе (ЦПГ), и «коленчатый вал–коренной подшипник» (КП). Структурный параметр P_c характеризует зазор в соответствующем соединении. Диагностическими параметрами выступают среднеквадратическое значение ускорения RMS и среднеквадратическое огибающей ускорения $EnvRMS$, выраженные в единицах ускорения свободного падения g . RMS характеризует общий среднеквадратический уровень виброускорения, $EnvRMS$ – среднеквадратический уровень огибающей сигнала после процедуры обработки. Количественный анализ выполнен для режима работы ДВС при частоте вращения коленчатого вала 3000 об/мин. Для ЦПГ каждая модель объединяет 40 наблюдений четырех точек контроля, для КП – 50 наблюдений пяти точек. Колебания регистрируются на наружной поверхности блока цилиндров в информативно чувствительных зонах контролируемых соединений. Сопоставимость измерений требовала сохранения точки установки, направления оси, крепления датчика и режима двигателя. В качестве базовой формы принята однофакторная квадратичная зависимость

$$\hat{P}_c = a_0 + a_1x + a_2x^2, \quad (1)$$

где $\hat{P}_c$ – расчетный зазор, мм; x – RMS , g , либо $EnvRMS$, g ; a_0 , a_1 , a_2 – коэффициенты.

Коэффициент детерминации R^2 характеризует вариацию зазора относительно среднего. Величина $RMSE$ – аппроксимацию исходной выборки b и равна квадратному корню из суммы квадратов остатков с делением на число наблюдений. Признаки сравнивались внутри каждой группы по R^2 , $RMSE$ и форме зависимости. Монотонность проверяется по производной функции.

Основная часть. Выражение для ЦПГ по RMS имеет вид:

$$\hat{P}_C = -0,074029 + 0,339099RMS - 0,064422RMS^2. \quad (2)$$

Диапазон RMS составляет 0,2700–2,0217 g. Из исходной выборки получены $R^2 = 0,9284$ и $RMSE = 0,02792$ мм. Положительный линейный и отрицательный квадратичный коэффициенты формируют возрастающую кривую с постепенно уменьшающимся наклоном. Максимум расположен при $RMS \approx 2,6319$ g за правой границей исходного диапазона, следовательно, внутри него направление связи сохраняется.

Уравнение для того же соединения по $EnvRMS$ записывается следующим образом:

$$\hat{P}_C = -0,016615 + 0,146143EnvRMS - 0,015160EnvRMS^2. \quad (3)$$

Диапазон $EnvRMS$ равен 0,3618–6,2132 g; $R^2 = 0,6919$, $RMSE = 0,05793$ мм. Максимум достигается при $EnvRMS \approx 4,8200$ g и расчетном зазоре около 0,3356 мм. После этой точки функция убывает, хотя диагностический признак продолжает увеличиваться. На верхней границе диапазона расчетный зазор составляет около 0,3062 мм, т.е. меньше значения в вершине.

Рисунок 1 показывает зависимости зазора в ЦПГ от RMS и $EnvRMS$ в пределах диапазонов, приведенных в описании регрессий. Кривая RMS возрастает на всем рассматриваемом участке, тогда как зависимость $EnvRMS$ имеет внутренний максимум, а ее нисходящая ветвь выделена штриховой линией. Разные масштабы горизонтальных осей обусловлены различием диапазонов признаков и не позволяют сравнивать их чувствительность только по визуальному наклону. Линии построены по уравнениям (2) и (3).

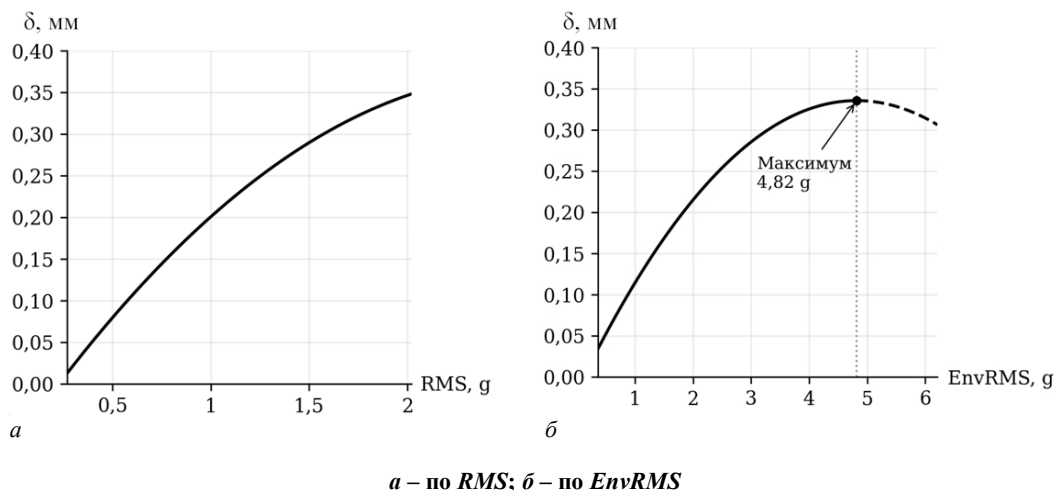


Рисунок 1. – Расчетные зависимости зазора ЦПГ при 3000 об/мин

Для ЦПГ использование RMS уменьшает $RMSE$ относительно $EnvRMS$ на 51,8%, а R^2 увеличивается на 0,2365. Это обосновывает предварительное предпочтение RMS для объединенных данных в рамках квадратичной модели. Недостаточное качество зависимости $EnvRMS$ может быть связано с неоднородностью точек, формой функции или обработкой сигнала; сводные данные не позволяют разделить эти причины.

Зависимость зазора в коренных подшипниках коленчатого вала от RMS имеет вид:

$$\hat{P}_C = -0,91904 + 0,345850RMS - 0,018727RMS^2. \quad (4)$$

Выражение относится к диапазону RMS 0,3508–0,9718 g; показатели аппроксимации составляют $R^2 = 0,8773$ и $RMSE = 0,02088$ мм. Небольшой по модулю квадратичный член задает слабую кривизну, поэтому на исследованном участке зависимость близка к линейной. Расчетная вершина находится при $RMS \approx 9,2340$ g существенно за пределами исходного диапазона и не имеет здесь самостоятельной диагностической интерпретации.

Для признака $EnvRMS$ получена зависимость

$$\hat{P}_C = -0,080002 + 0,229674EnvRMS - 0,009292EnvRMS^2. \quad (5)$$

Диапазон $EnvRMS$ составляет 0,4801–1,4488 g; $R^2 = 0,9071$, $RMSE = 0,01817$ мм. Кривая также возрастает на всем исходном участке, а ее максимум расположен при $EnvRMS \approx 12,3587$ g. По сравнению с RMS ошибка аппроксимации уменьшается на 13,0%, коэффициент детерминации увеличивается на 0,0298. Поэтому для исследования коренного подшипника (КП) при данном режиме предварительно предпочтителен $EnvRMS$.

На рисунке 2 представлены расчетные зависимости зазора КП от двух диагностических параметров. Обе кривые монотонно возрастают и имеют небольшой изгиб вниз, соответствующий отрицательному коэффициенту при квадрате признака. Значения на концах линий получены подстановкой границ диапазонов в уравнения и не должны трактоваться как измеренные минимальный и максимальный зазоры. Близкая форма кривых показывает, что выбор между ними определяется, прежде всего, качеством аппроксимации и результатами последующей проверки, а не наличием визуально выраженной нелинейности.

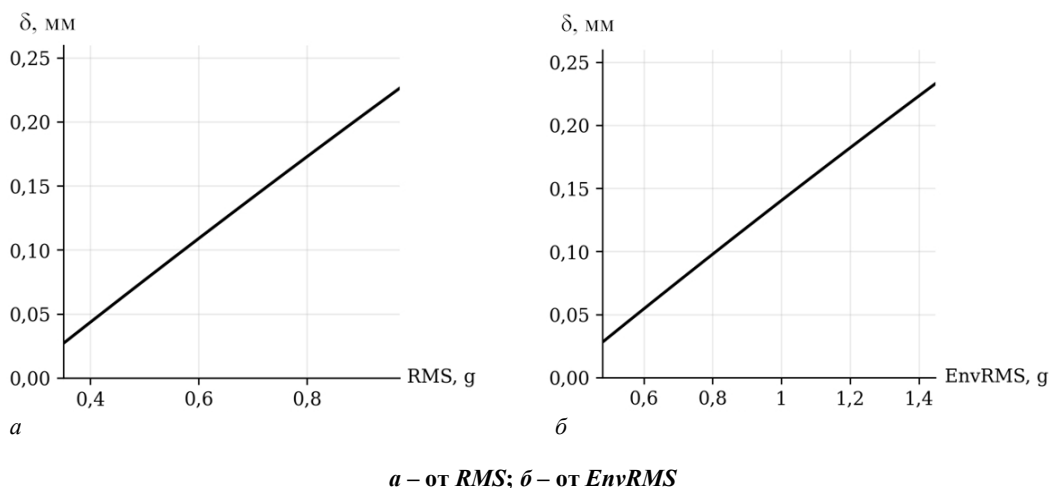


Рисунок 2. – Расчетные зависимости зазора КП δ при 3000 об/мин

Предпочтение $EnvRMS$ для КП отличается от раннего вывода главы по индивидуальным линейным моделям. Здесь изменены форма зависимости и способ объединения наблюдений. Среднее качество отдельных регрессий не является качеством одной общей регрессии, поэтому прежние показатели не переносятся на уравнения (2) и (5).

Сводные характеристики четырех зависимостей приведены в таблице 1.

Таблица 1. – Показатели аппроксимации при 3000 об/мин

Группа	Признак	Число строк	R^2	$RMSE$, мм
ЦПГ	RMS	40	0,9284	0,02792
ЦПГ	$EnvRMS$	40	0,6919	0,05793
КП	RMS	50	0,8773	0,02088
КП	$EnvRMS$	50	0,9071	0,01817

Предпочтительный признак зависит от исследуемой группы соединений. Для ЦПГ RMS одновременно обеспечивает большее R^2 и меньшее $RMSE$, а для КП такое сочетание получено по $EnvRMS$. Более широкий диапазон $EnvRMS$ в ЦПГ не сопровождается лучшей точностью общей зависимости. Все ошибки относятся к аппроксимации исходных данных и не характеризуют достоверность прогноза ресурса.

Для количественной оценки формы кривых вычислен коэффициент преобразования диагностического параметра в структурный:

$$C(x) = a_1 + 2a_2x, \quad (6)$$

где $C(x)$ – производная расчетного зазора по диагностическому признаку, мм/г.

Зависимость показывает локальное изменение расчетного структурного параметра соответствует малому изменению диагностического параметра. Положительный знак означает возрастающую зависимость; нулевое значение соответствует вершине параболы. Отрицательный знак указывает на нисходящую ветвь. Значения коэффициента на границах исходных диапазонов и положения вершин приведены в таблице 2.

Таблица 2. – Проверка монотонности регрессионных зависимостей

Модель	C в начале, мм/г	C в конце, мм/г	Вершина x^* , г
ЦПГ, RMS	0,30431	0,07862	2,6319
ЦПГ, $EnvRMS$	0,13517	-0,04224	4,8200
КП, RMS	0,33271	0,30945	9,2340
КП, $EnvRMS$	0,22075	0,20275	12,3587

В таблице 2 только модель ЦПГ по *EnvRMS* изменяет знак коэффициента преобразования внутри исходного диапазона. Для ЦПГ по *RMS* положительный наклон заметно уменьшается, а обе модели КП сохраняют сравнительно стабильный положительный наклон. Расположение вершины за пределами диапазона подтверждает монотонность на исходном участке, но не разрешает экстраполяцию до этой вершины. Значения рассчитаны по округленным коэффициентам, поэтому представляют аналитическую проверку опубликованных уравнений.

Заключение.

1. Для ЦПГ предпочтительна модель по *RMS*: $R^2 = 0,9284$ и $RMSE = 0,02792$ мм против 0,6919 и 0,05793 мм по *EnvRMS*. Для КП предпочтительна модель по *EnvRMS*: $R^2 = 0,9071$ и $RMSE = 0,01817$ мм против 0,8773 и 0,02088 мм по *RMS*. Уменьшение ошибки аппроксимации составляет соответственно 51,8 и 13,0%.

2. Модель ЦПГ по *EnvRMS* имеет максимум при 4,8200 г внутри исходного диапазона и не обеспечивает монотонного увеличения зазора на всем участке. Наличие внутреннего максимума ограничивает применение полученной квадратичной зависимости зазора ЦПГ от *EnvRMS* во всем исследованном диапазоне. Использование ее нисходящей ветви без дополнительной проверки может привести к занижению оценки зазора и ошибочной интерпретации технического состояния соединения. Это ограничение относится к полученной регрессионной модели; общий вывод о непригодности самого параметра *EnvRMS* из наличия максимума не следует. Остальные зависимости возрастают в заданных диапазонах. Проверка формы функции позволяет выявить ограничение, которое не раскрывается одним значением коэффициента детерминации.

3. Цель работы достигнута на уровне анализа представленных регрессионных результатов: обоснован выбор параметров и определены условия применения зависимостей для косвенного контроля зазоров. Использование методики требует согласования вида зазора, воспроизведения условий калибровки и независимой проверки моделей. Переход к оценке остаточного ресурса возможен после подтверждения связи изменения зазора с наработкой и учета неопределенности получаемого прогноза.

ЛИТЕРАТУРА

1. Русов В.А. Диагностика дефектов вращающегося оборудования по вибрационным сигналам. – 2012. – Гл. 3. – URL: <https://vibrocenter.ru/book2012.html> (дата обращения: 13.07.2026).
2. Френкель А.А., Адамова Е.В. Корреляционный и регрессионный анализ в экономических приложениях: учеб. пособие. – М.: МЭСИ, 1987. – 96 с.
3. Diagnosis of internal combustion engine through vibration and acoustic pressure non-intrusive measurements / L. Barelli, G. Bidini, C. Buratti et al. // Applied Thermal Engineering. – 2009. – Vol. 29, № 8-9. – P. 1707–1713. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2008.07.025
4. Liu X., Randall R. B. Blind source separation of internal combustion engine piston slap from other measured vibration signals // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2005. – Vol. 19, № 6. – P. 1196–1208. DOI: 10.1016/j.ymssp.2005.08.004
5. Experimental Study Results Processing Method for the Marine Diesel Engines Vibration Activity Caused by the Cylinder-Piston Group Operations / O. Afanaseva, O. Bezyukov, D. Pervukhin et al. // Inventions. – 2023. – Vol. 8, № 3. – Art. 71. DOI: 10.3390/inventions8030071
6. 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
7. Chen J., Randall R. B., Peeters B. Advanced diagnostic system for piston slap faults in IC engines, based on the non-stationary characteristics of the vibration signals // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2016. – Vol. 75. – P. 434–454. DOI: 10.1016/j.ymssp.2015.12.023

Поступила 20.07.2026

PATTERNS OF INTERRELATION BETWEEN DIAGNOSTIC AND STRUCTURAL PARAMETERS IN AUTOMOTIVE ENGINE DIAGNOSTICS

V. ZENKOV

(Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk)

The relationships between the clearances in the cylinder–piston group and main bearings and the root-mean-square acceleration (RMS) and the root-mean-square value of the acceleration envelope (EnvRMS) were analyzed. The diagnostic parameters were obtained using a vibroacoustic sensor mounted on the wall of the cylinder block of an internal combustion engine. For the cylinder–piston group, the RMS-based model provided the best fit, whereas the EnvRMS-based model performed better for the main bearings. The monotonicity and applicability ranges of the models were assessed. An internal maximum in the relationship between cylinder–piston group clearance and EnvRMS was identified, limiting the applicability of this model. The conditions for indirect clearance monitoring and subsequent residual life assessment were substantiated.

Keywords: vehicle engine, clearance, vibroacoustic diagnostics, regression, RMS, envelope RMS, main bearing, diagnostic parameter, structural parameter.