

ОБОСНОВАНИЕ МЕСТ УСТАНОВКИ ДАТЧИКОВ ПРИ ДИАГНОСТИРОВАНИИ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ ВИБРОАКУСТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

В.А. ЗЕНЬКОВ

(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)

Обоснован выбор мест установки и ориентации виброакустических датчиков на блоке цилиндров двигателя внутреннего сгорания при определении технического состояния цилиндропоршневой группы и шатунных и коренных подшипников коленчатого вала на основе выбора диагностически информативных зон поверхности двигателя, обеспечивающих максимальную чувствительность статистических характеристик вибросигнала к изменению структурных параметров диагностируемых соединений. Предложенное решение позволяет перейти от эмпирического выбора точек измерения к формализованной процедуре построения измерительной схемы, пригодной для последующего установления количественных зависимостей между степенью износа сопряжений и параметрами виброакустического сигнала.

Ключевые слова *двигатель внутреннего сгорания, техническое состояние, виброакустическая диагностика, датчик виброускорения, диагностически информативная зона, блок цилиндров, цилиндропоршневая группа, коренные подшипники, шатунные подшипники.*

Введение. Диагностирование двигателей внутреннего сгорания в системе технической эксплуатации автомобилей относится к числу ключевых направлений повышения их надежности, безопасности и экономичности. В условиях перехода от регламентного обслуживания к обслуживанию по фактическому состоянию возрастает значение методов контроля, позволяющих выявлять развивающиеся повреждения без разборки агрегата и без вывода его из использования по назначению¹ [1; 2].

Виброакустический метод рассматривается как один из наиболее перспективных для безразборной оценки технического состояния двигателя, выявления начальных стадий дефектообразования и последующего перехода к оценке остаточного ресурса узлов^{2,3}[1; 2; 11]. Вибрационный мониторинг машин показывают, что статистические характеристики временного сигнала, спектральные показатели и параметры огибающей сохраняют высокую диагностическую значимость при условии корректной организации измерительного процесса и устойчивой связи между местом регистрации и источником возбуждения³ [1; 2].

Вместе с тем в прикладных исследованиях по двигателям внутреннего сгорания основное внимание часто уделяется алгоритмам обработки сигнала, распознаванию дефектов и построению классификаторов, тогда как выбор места установки датчика нередко определяется конструктивной доступностью, удобством монтажа либо общими рекомендациями по виброизмерениям. Такой способ размещения не приемлем для задач локализации дефектов цилиндропоршневой группы и подшипниковых узлов, поскольку регистрируемый на поверхности блока сигнал представляет собой суперпозицию колебаний от нескольких источников, проходящую через участки конструкции с различной жесткостью, демпфированием и направленностью колебательного движения⁴ [3–5].

Целью работы являлся выбор мест, наиболее чувствительных к изменению технического состояния основных трущихся соединений, способа установки виброакустических датчиков и их ориентации при диагностировании двигателя внутреннего сгорания.

Методы исследования. Методическая основа работы опирается на положения вибрационного мониторинга машин, согласно которым информативность диагностирования определяется качеством измерения, корректностью предварительной обработки сигнала, выбором признаков и устойчивостью связи между диагностическим и структурным параметрами [1; 2].

Выбор диагностически информативных зон выполнялся по совокупности критериев: амплитудной чувствительности сигнала к дефекту, диагностической контрастности между исправным и неисправным состояниями агрегата, селективности по отношению к исследуемому узлу, повторяемости результатов и технологиче-

¹ ГОСТ Р ИСО 13373-1:2002. Контроль состояния и диагностика машин. Вибрационный контроль состояния машин. Ч. 1. Общие методы. – М., 2010. – 42 с.

² ГОСТ Р ИСО 8528-9:202. Электроагрегаты генераторные переменного тока с приводом от двигателя внутреннего сгорания. Ч. 9. Измерения вибрации и оценка вибрационного состояния. – М., 2021. – 12 с.

³ ГОСТ Р ИСО 13373-2:2009. Контроль состояния и диагностика машин. Вибрационный контроль состояния машин. Ч. 2. Обработка, анализ и представление результатов измерений вибрации. – М., 2010. – 20 с.

⁴ Analog Devices. ADXL345: Data Sheet. Rev. G. – 2022. – URL: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/adxl345.pdf> (дата обращения: 28.03.2026).

ской пригодности точки установки. В качестве обобщенного критерия рациональности размещения датчика используется зависящая от координат точки крепления и угла ориентации чувствительной оси функция:

$$J(x, y, z, \varphi) \rightarrow \max.$$

Обобщенный критерий рациональности размещения датчика может быть представлен как функция нескольких частных показателей:

$$J(x, y, z, \varphi) = w_1 K_d(x, y, z, \varphi) + w_2 K_{sep}(x, y, z, \varphi) - w_3 V(x, y, z, \varphi) + w_4 P_{diag}(x, y, z, \varphi), \quad (1)$$

где $J(x, y, z, \varphi)$ – обобщенный критерий рациональности размещения виброакустического датчика;

x, y, z – координаты точки крепления датчика на поверхности корпусной детали;

φ – угол ориентации чувствительной оси датчика;

$K_d(x, y, z, \varphi)$ – коэффициент диагностической чувствительности в выбранной точке и при выбранной ориентации;

$K_{sep}(x, y, z, \varphi)$ – коэффициент различимости исправного и дефектного состояний;

$V(x, y, z, \varphi)$ – коэффициент вариации регистрируемых параметров;

$P_{diag}(x, y, z, \varphi)$ – достоверность диагностической оценки;

w_1, w_2, w_3, w_4 – весовые коэффициенты, отражающие значимость соответствующих показателей.

Знак минус перед V введен потому, что увеличение вариации ухудшает качество диагностического измерения, тогда как увеличение K_d , K_{sep} и P_{diag} , наоборот, повышает рациональность выбора точки установки и ориентации датчика. При этом измеряемое датчиком виброускорение рассматривается как проекция вектора ускорения колебаний точки корпуса на направление чувствительной оси датчика:

$$a_m(t) = a(t) \cdot n, \quad (2)$$

где $a_m(t)$ – измеряемое датчиком мгновенное значение виброускорения в момент времени t ;

$a(t)$ – вектор полного ускорения колебаний точки конструкции, в которой установлен датчик, в момент времени t ;

n – единичный вектор направления чувствительной оси датчика.

Из выражения следует, что датчик регистрирует не полный вектор ускорения колебаний, а лишь его составляющую вдоль собственной чувствительной оси. Поэтому при совпадении направления вектора $a(t)$ с направлением n измеряемый сигнал достигает максимального значения, а при отклонении оси датчика на угол φ величина измеряемого ускорения уменьшается пропорционально $\cos\varphi$. Тогда можно записать и эквивалентную форму:

$$am(t) = |a(t)| \cos\varphi.$$

Основная часть. Для двигателя внутреннего сгорания источником колебаний являются переменные газовые силы, инерционные нагрузки, ударные взаимодействия в сопряжениях, пульсации рабочих сред и вибрации деталей двигателя, возникающие в процессе его работы: вклад в общий сигнал вносят цилиндропоршневая группа, шатунные и коренные подшипники, газораспределительный механизм, а также вспомогательные агрегаты⁵ [2].

Диагностически информативные зоны установки датчиков целесообразно определять по совокупности критериев, которыми являются:

- чувствительность как способность регистрируемого в данной зоне вибросигнала заметно изменяться при изменении технического состояния исследуемого узла;
- контрастности, характеризующая степень преимущественного влияния контролируемого узла на параметры сигнала по сравнению с другими источниками колебаний;
- воспроизводимость измерений в виде устойчивости значений диагностических признаков при многократной регистрации сигнала в одинаковых условиях;
- помехоустойчивость, отражающая минимальную зависимость результата от внешних воздействий, нестабильности режима работы двигателя и особенностей крепления датчика;
- конструктивно-технологическая пригодность, включая возможность жесткого крепления датчика со стабильным контактом и повторяемого позиционирования измерительного средства.

Интегральный показатель информативности I_j -й диагностируемой зоны

$$I_j = \omega_1 K_{a,j} + \omega_2 K_{d,j} + \omega_3 K_{s,j} + \omega_4 K_{r,j} + \omega_5 K_{t,j}, \quad (3)$$

где $K_{a,j}$ – показатель амплитудной чувствительности;

$K_{d,j}$ – показатель диагностической контрастности;

$K_{s,j}$ – показатель воспроизводимости;

$K_{r,j}$ – показатель помехоустойчивости;

⁵ ГОСТ Р ИСО 13373-2-2009. Контроль состояния и диагностика машин. Вибрационный контроль состояния машин. Ч. 2. Обработка, анализ и представление результатов измерений вибрации. – М., 2010. – 20 с.

K_{ij} – показатель технологической пригодности;

$\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4, \omega_5$ – весовые коэффициенты, отражающие значимость соответствующих критериев.

При выборе датчика и способа его монтажа учитывались рекомендации изготовителя Analog Devices и общие требования к установке акселерометров. Рекомендуемая схема крепления датчика ADXL345, выполненного в виде модуля GY-291, приведена на рисунке 1. Для MEMS-акселерометра ADXL345 характерны трехосевая измерительная схема (рисунок 2), диапазон измерений ускорения до $\pm 16g$, поддержка частоты дискретизации до 3200 Гц и цифровой интерфейс SPI/I²C, что делает его пригодным для сравнительных диагностических исследований низко- и среднечастотных вибраций⁶. Вместе с тем нормативные и прикладные источники подчеркивают, что способ крепления акселерометра является одним из критических факторов точности измерений: предпочтительным является резьбовое крепление на ровную и жесткую поверхность, а мягкое крепление и паразитные нагрузки от кабеля способны исказить спектральный состав сигнала и снижать полезный частотный диапазон [3–6].

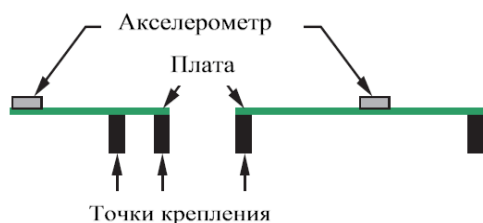


Рисунок 1. – Схема крепления датчика ADXL345

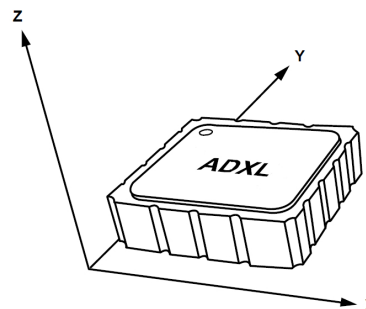


Рисунок 2. – Ориентация осей чувствительности датчика ADXL345

Учитывались требования к процедурам сбора данных и сопоставимости измерений. Согласно ГОСТ Р ИСО 13373-1, достоверность мониторинга определяется согласованностью измерительных процедур, стабильностью режимов и повторяемостью положения датчика⁷. При анализе вибраций контролируемых агрегатов важны также рекомендации ГОСТ Р ИСО 8528-9 по измерительным точкам и оценке внешних механических вибраций при различных типах опор и креплений⁸.

Для диагностирования цилиндропоршневой группы наиболее информативными являются зоны, расположенные вблизи верхней части цилиндров и воспринимающие ударно-импульсные процессы, возникающие при перекладке поршня. К таким зонам относятся головка блока цилиндров над диагностируемым цилиндром и боковые участки блока цилиндров на уровне верхней мертвой точки поршня. Такой вывод согласуется с данными о высокой информативности сигналов, снимаемых с цилиндрической головки и жестких участков блока при анализе процессов сгорания и механических воздействий [5].

Для шатунных подшипников рациональными являются участки картера двигателя или масляного поддона в проекции шатунной шейки. В этих зонах ожидается наиболее отчетливое проявление ударных импульсов, возникающих при изменении зазора и передаче нагрузки в верхней и нижней мертвых точках. Для коренных подшипников предпочтительными являются опорные площадки картера двигателя непосредственно под коренными опорами и торцовая часть блока цилиндров в зоне переднего или заднего коренного подшипника, где лучше регистрируются как радиальные, так и осевые составляющие колебаний коленчатого вала [7].

Выбор места установки датчика должен сочетаться с корректной ориентацией его осей чувствительности. Для контроля поршневой группы наибольший интерес представляют вертикальная и поперечная компоненты, регистрирующие инерционные и боковые удары, тогда как для коренных подшипников дополнительно возрастает значение продольной компоненты, совпадающей с осью коленчатого вала. Результаты исследований подтверждают, что диагностическая точность существенно зависит от положения датчика на двигателе; при неудачном расположении возрастает фоновая составляющая и снижается различимость состояний.

С учетом требований к воспроизводимости результатов для исследовательской установки предложено резьбовое крепление датчиков с жесткой фиксацией платы на переходную пластину (рисунки 3, 4) и крепление с помощью эпоксидного двухкомпонентного клея (рисунок 5). Также предусматривалась отдельная фиксация проводников, исключающей передачу паразитных механических воздействий на область расположения чув-

⁶ Analog Devices. ADXL345: Data Sheet. Rev. G. – 2022. – URL: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/adxl345.pdf> (дата обращения: 28.03.2026).

⁷ ГОСТ Р ИСО 13373-1:2002. Контроль состояния и диагностика машин. Вибрационный контроль состояния машин. Ч. 1. Общие методы. – М., 2010. – 42 с.

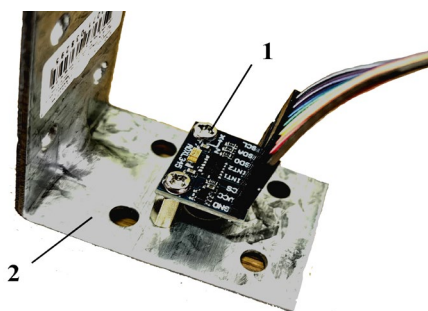
⁸ ГОСТ Р ИСО 8528-9-202. Электроагрегаты генераторные переменного тока с приводом от двигателя внутреннего сгорания. Ч. 9. Измерения вибрации и оценка вибрационного состояния. – М., 2021. – 12 с.

ствительного элемента. Такая схема (таблица) отвечает рекомендациям изготовителя и общим правилам виброизмерений⁹ [6].

Таблица. – Рекомендуемые зоны установки датчиков и ориентация их осей

Диагностируемый узел	Диагностически информативная зона	Предпочтительная ориентация осей	Ожидаемый диагностический эффект
Цилиндропоршневая группа	ГБЦ над диагностируемым цилиндром; боковая стенка блока на уровне ВМТ	вертикальная, поперечная	Регистрация ударов при переключке поршня и роста радиальных вибраций
Шатунные подшипники	Картер или поддон в проекции шатунной шейки	вертикальная, поперечная	Выделение импульсов передачи нагрузки в ВМТ и НМТ
Коренные подшипники	Опорные площадки картера под коренными опорами; торцевая часть блока	вертикальная, продольная	Контроль вибраций на частотах вращения и гармониках, а также осевых колебаний

Пространственная ориентация датчиков выбиралась по критерию расположения чувствительных осей датчика параллельно и ортогонально оси пар трения диагностируемого узла. Например, для коленчатого вала за базовую ось принималась ось вращения коленчатого вала. Ось *X* датчика устанавливается параллельно оси для коленчатого вала (продольное направление), ось *Y* датчика – ортогонально оси коленчатого вала в горизонтальной плоскости (горизонтальное направление), ось *Z* датчика – ортогонально оси коленчатого вала в вертикальной плоскости (вертикальное направление). Подобным образом ориентировались датчики для контроля цилиндропоршневой группы. Базовой осью в данном случае являлись оси цилиндров. Рациональность размещения подтверждалась изменением уровня регистрируемого сигнала при смещении и изменении угла наклона чувствительных осей (рисунки 5–7).



1 – датчик, 2 – переходная пластина

Рисунок 3. – Способ крепления датчика ADXL345 к переходной пластине

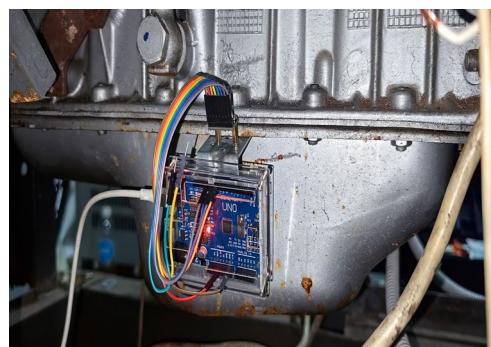
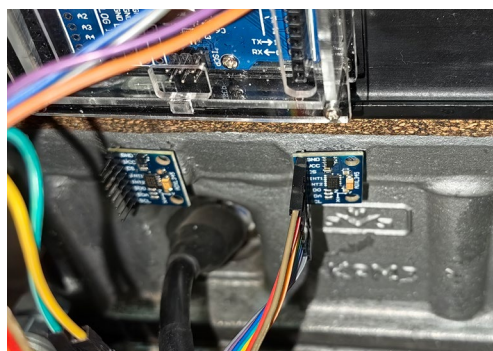
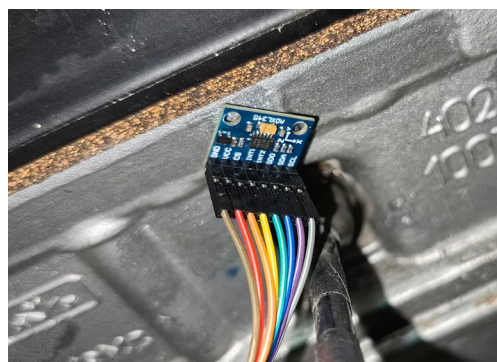


Рисунок 4. – Размещение датчика под 3-й коренной опорой через переходную пластину



а

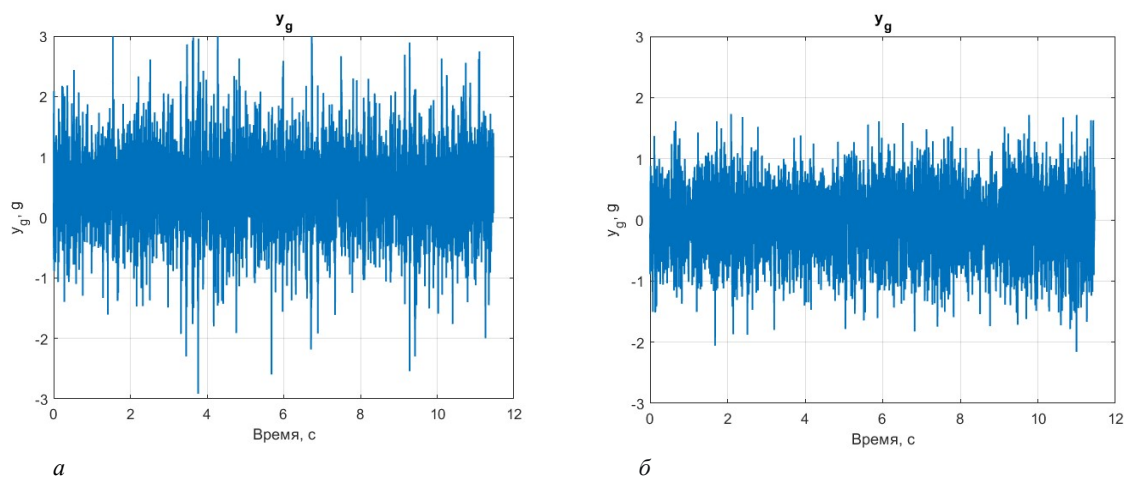


б

а – со смещением относительно проекции оси цилиндра; б – с изменением. Крепление с помощью эпоксидного клея

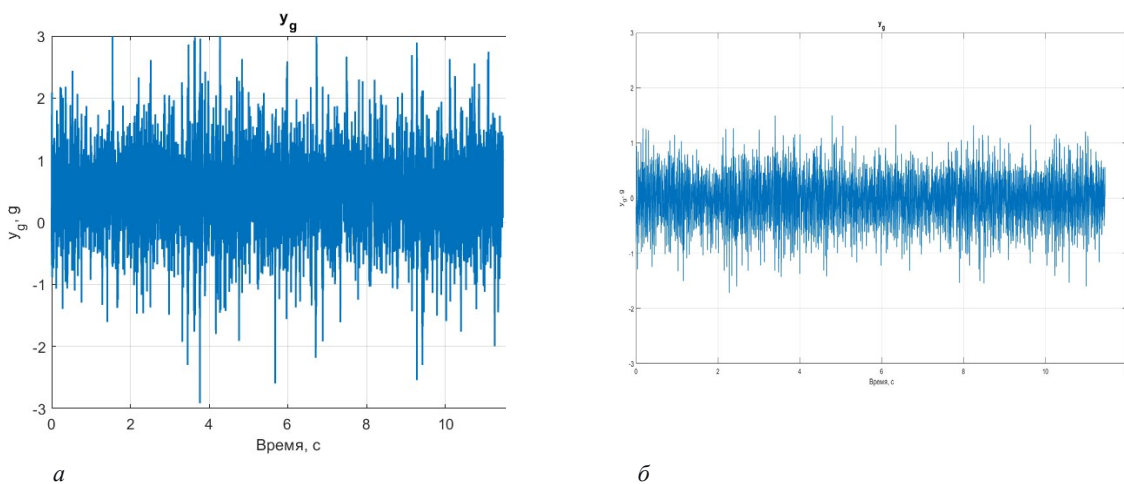
Рисунок 5. – Размещение датчика ADXL345 на блоке цилиндров

⁹ Analog Devices. ADXL345: Data Sheet. Rev. G. – 2022. – URL: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/adxl345.pdf> (дата обращения: 28.03.2026).



a – датчик в корректно выбранной точке; *б* – датчик смещен на 50 мм по горизонту

Рисунок 6. – Изменение сигнала при смещении датчика относительно оси цилиндра



a – оси чувствительности датчика ориентированы корректно;
б – продольная ось X и вертикальная ось Y отклонены на угол $\alpha = 45^\circ$

Рисунок 7. – Изменение сигнала датчика при изменении угла наклона осей чувствительности

Предлагаемая схема размещения датчиков позволяет пространственно разделить источники колебаний, снизить перекрестное влияние различных узлов и подготовить экспериментальную базу для установления корреляций между степенью износа сопряжений и статистическими характеристиками сигнала (RMS, Peak, Crest factor, Kurtosis, EnvRMS). Для обработки сигнала датчика использовалась связка микроконтроллерной платы Arduino Uno и персонального компьютера (ПК). Для Arduino Uno в среде Arduino IDE, с использованием стандартных библиотек, был написан скрипт работы с ADXL345. Для ПК в среде Visual Studio Code был написан программный модуль конвертации потоковых данных от датчика в файл формата csv. Дальнейшая обработка и визуализация производились средствами пакета Matlab.

Заключение. Проведенное обоснование показывает, что выбор мест установки виброакустических датчиков при диагностировании двигателя внутреннего сгорания должен опираться на анализ диагностически информативных зон, а не только на конструктивную доступность поверхности. Наиболее информативными для контроля цилиндропоршневой группы являются зоны вблизи цилиндров и головки блока, для контроля шатунных подшипников – участки картера или поддона в проекции шатунных шеек, а для коренных опор – опорные площадки картера и торцевая часть блока цилиндров.

Практическая значимость работы состоит в формировании воспроизводимой схемы размещения датчиков для исследовательской установки с использованием акселерометров ADXL345. Предложенное решение обосновывает выбор точек измерения, создает условия для получения пространственно-разнесенной диагностической информации и может быть использовано при разработке экспериментальных методик оценки технического состояния и остаточного ресурса двигателей. Научная значимость состоит в переходе от эмпирического выбора мест установки датчиков к критериальному, учитывающему чувствительность, контрастность, воспро-

изводимость, помехоустойчивость и технологическую реализуемость. Это позволяет рассматривать структуру измерительной схемы как составную часть способа виброакустического диагностирования двигателя.

ЛИТЕРАТУРА

1. Костюков В.Н., Науменко А.П. Основы виброакустической диагностики и мониторинга машин: учеб. пособие. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2011. – 360 с.
2. A Review on Vibration Monitoring Techniques for Predictive Maintenance of Rotating Machinery / M. Romanssini, P. C. C. de Aguirre, L. Compassi-Severo et al. // Eng. – 2023. – Vol. 4, No. 3. – P. 1797–1817. DOI: 10.3390/eng4030102
3. Nithin S. K., Hemanth K., Shamanth V. A review on combustion and vibration condition monitoring of IC engine // Materials Today: Proceedings. – 2021. – Vol. 45, Part 1. P. 65–70. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214785320376719> (дата обращения: 28.03.2026).
4. Hassan I. U., Panduru K., Walsh J. An In-Depth Study of Vibration Sensors for Condition Monitoring // Sensors. – 2024. – Vol. 24, No. 3. – Art. 740. DOI: 10.3390/s24030740
5. Combustion and Resilient Mounting Condition Diagnostics thru Structural Vibration Monitoring of a Diesel Generator Set / R. D. Barro, D. C. Lee, S. M. Son et al. // Asia Pacific Conference of the Prognostics and Health Management Society. – 2017. – URL: <https://papers.phmsociety.org/index.php/phmap/article/view/1780> (дата обращения: 28.03.2026).
6. Барков А.В., Баркова Н.А. Вибрационная диагностика машин и оборудования. Анализ. Вибрации. – СПб.: СПбГМТУ, 2004. – 156 с.
7. Moosavian A., Ahmadi H., Tabatabaefar A. Fault diagnosis of main engine journal bearing based on vibration analysis using Fisher linear discriminant, K-nearest neighbor and support vector machine // Journal of Vibroengineering. – 2012. – Vol. 14, Iss. 2. – P. 894–906. – URL: <https://www.extrica.com/article/10645/pdf> (дата обращения: 28.03.2026).

Поступила 01.04.2026

**RATIONALE FOR SELECTING SENSOR INSTALLATION LOCATIONS
FOR VIBROACOUSTIC DIAGNOSTICS OF INTERNAL COMBUSTION ENGINES**

V. ZENKOV

(Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk)

The selection of installation locations and orientation of vibroacoustic sensors on the cylinder block of an internal combustion engine for determining the technical condition of the cylinder-piston group and the connecting-rod and main bearings of the crankshaft is substantiated on the basis of identifying diagnostically informative zones on the engine surface that ensure maximum sensitivity of the statistical characteristics of the vibration signal to changes in the structural parameters of the diagnosed joints. The proposed solution makes it possible to move from an empirical choice of measurement points to a formalized procedure for constructing a measurement scheme suitable for the subsequent establishment of quantitative relationships between the degree of wear of mating parts and the parameters of the vibroacoustic signal.

Keywords: *internal combustion engine, technical condition, vibroacoustic diagnostics, vibration acceleration sensor, diagnostically informative zone, cylinder block, cylinder-piston group, main bearings, connecting-rod bearings.*