

Научная статья
УДК 621.4
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-3-332-345>
EDN: VPQLKJ



ВЫЯВЛЕНИЕ НЕИСПРАВНОСТЕЙ ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ДВИГАТЕЛЕМ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ ПО АКУСТИЧЕСКИМ ПАРАМЕТРАМ

В.Д. Габидулин ✉, В.Н. Добромиров

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет,
г. Санкт-Петербург, Россия

✉ ответственный автор
toymail_2014@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Процесс обеспечения работоспособности транспортно-технологических машин (ТТМ) предполагает проведение регулярного контроля их технического состояния путем диагностирования различных агрегатов, узлов и систем, в том числе электронных систем контроля и управления функционированием двигателя внутреннего сгорания (ДВС). Однако в реальной эксплуатации могут возникать ситуации, в которых проведение оперативного диагностирования силовых установок является проблематичным. К таким ситуациям можно отнести, например, работу ТТМ в труднодоступных слабо освоенных регионах при отсутствии близкорасположенных центров технического обслуживания.

Материалы и методы. Одним из ключевых направлений развития современных силовых установок является внедрение автоматизированных систем управления и контроля, основанных на использовании электронных и микропроцессорных технологий. Такие системы значительно повышают эффективность работы двигателя, однако ввиду их сложности и конструктивных особенностей увеличивается количество потенциально возможных неисправностей ДВС, что требует разработки и реализации специальных подходов к их диагностированию и обслуживанию. Одним из решений проблемы оперативного диагностирования электронных систем управления ДВС является оценка работоспособного состояния двигателя по издаваемому им акустическому шуму, регистрируемому при помощи портативного прибора, обрабатываемому и анализируемому с использованием специализированного программного обеспечения. Преимущество метода состоит в простоте и возможности проведения диагностирования в полевых условиях, непосредственно в местах применения машин. Целью данного исследования являлась экспериментальная оценка принципиальной возможности идентификации неисправностей электронных систем управления ДВС путем сравнения акустических характеристик при нормальном режиме функционирования и в условиях ограниченной функциональности, вызванной отказами в электронных системах управления его работой. В качестве объекта исследования использован бензиновый двигатель, являющийся элементом обучающего стенда фирмы GNFA, предназначенного для изучения электронных систем управления работой ДВС. В ходе исследования на стенде задавались различные возможные неисправности электронных систем управления работой двигателя, вызывающие переход его работы в режим ограниченной функциональности, и при этом замерялись и анализировались шумовые параметры в сравнении с параметрами исправного ДВС.

Результаты. В работе проанализированы различного рода неисправности электронных систем управления ДВС, из них выделены такие, при которых двигатель, сохраняя свою работоспособность, переходит в режим ограниченной функциональности, т.е. работает с перебоями, со снижением мощности, увеличением расхода топлива и т.п. Проведен сравнительный анализ акустических параметров работы исправного двигателя в условиях наличия таких неисправностей, с последующим спектральным разложением для обоснования правил их идентификации.

Обсуждение и заключение. Результаты проведенного исследования могут служить основой для разработки метода оперативного акустического диагностирования электронных систем управления работой силовых установок с использованием мобильного портативного оборудования.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: двигатель внутреннего сгорания, электронные системы управления и контроля, акустическое диагностирование, звуковое излучение, метод быстрого преобразования Фурье, спектральный анализ

© Габидулин В.Д., Добромиров В.Н., 2025



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Статья поступила в редакцию 23.03.2025; одобрена после рецензирования 15.04.2025; принята к публикации 16.06.2025.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Для цитирования: Габидулин В.Д., Добромиров В.Н. Выявление неисправностей электронных систем управления двигателем внутреннего сгорания по акустическим параметрам // Вестник СибАДИ. 2025. Т. 22, № 3. С. 332-345. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-3-332-345>

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-3-332-345>

EDN: VPQLKJ

DETECTING FAULTS IN ELECTRONIC INTERNAL COMBUSTION ENGINE CONTROL SYSTEMS BY ACOUSTIC PARAMETERS

Vladimir D. Gabidulin ✉, Viktor N. Dobromirov

St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering,
St. Petersburg, Russia

✉ corresponding author
moymail_2014@mail.ru

ABSTRACT

Introduction. The process of ensuring the operability of transport and technological machines (TTM) presupposes regular checking of its technical condition by diagnosing various units, assemblies and systems, including electronic systems for monitoring and controlling the functioning of the internal combustion engine (ICE). However, in real operation, there may arise situations in which conducting operational diagnostics of power plants is problematic. Such situations contain, for example, the work of transport and technological machines in hard-to-reach poorly developed regions with the absence of maintenance centers nearby.

Materials and methods. One of the key evolution areas of modern power plants is the introduction of automated control and monitoring systems based on the use of electronic and microprocessor technologies. Such systems significantly increase the efficiency of the engine, however, due to their complexity and design features, the number of potentially possible internal combustion engine malfunctions increases, which requires the development and implementation of special approaches to their diagnosis and maintenance. One of the solutions to the problem of electronic control systems' operational diagnostics of an internal combustion engine is to assess the operational condition by the acoustic noise it produces, recorded with the use of a portable device, processed and analyzed by specialized software. The advantage of this method is in its simplicity and the possibility of conducting diagnostics in the field, directly at places where the machines are being used. The purpose of this study was an experimental assessment of the fundamental possibility of identifying malfunctions of electronic control systems of an internal combustion engine by comparing acoustic characteristics in normal operation and in conditions of limited functionality caused by failures in electronic control systems of its operation. A gasoline engine was used as an object of research, which is an element of the GNFA training stand designed to study electronic control systems for internal combustion engines. During the study, various possible malfunctions of the electronic control systems of the engine were set at the stand, causing its operation to switch to the mode of limited functionality, and noise parameters were measured and analyzed in comparison with the parameters of a serviceable internal combustion engine.

Results. Various kinds of malfunctions of the electronic control systems of the internal combustion engine have been analyzed and some have been identified in which the engine switches to a mode of limited functionality while maintaining its operability, i.e. it operates intermittently, with reduced power, increased fuel consumption, etc. A comparative analysis of the acoustic parameters of a serviceable engine in the presence of such malfunctions, followed by spectral decomposition to substantiate the rules for their identification.

Discussions and conclusions. The results of the conducted research can serve as a basis for the development of the method for rapid acoustic diagnostics of electronic control systems for power plants with the use of mobile portable equipment.

© Gabidulin V.D., Dobromirov V.N., 2025



Content is available under the license
Creative Commons Attribution 4.0 License.

KEYWORDS: *internal combustion engine, electronic control and monitoring systems, acoustic diagnostics, sound radiation, spectral analysis, fast Fourier transform method, spectral analysis*

The article was submitted: March 23, 2025; **approved after reviewing:** April 15, 2025; **accepted for publication:** June 16, 2025.

All authors have read and approved the final manuscript.

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

For citation. Gabidulin V.D., Dobromirov V.N. Detecting faults in electronic combustion engine control systems by acoustic parameters. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal.* 2025; 22 (3): 332-345. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-3-332-345>

ВВЕДЕНИЕ

Активное развитие в современной России дорожного строительства, создание транспортной инфраструктуры в труднодоступных, в т.ч. в полярных регионах, ужесточение государственной политики в сфере безопасного содержания дорожных сетей выдвигает актуальные требования в части обеспечения строительных работ, дорожного строительства и содержания улично-дорожных сетей современными наземными транспортно-технологическими машинами (НТТМ). Одним из активно развивающихся направлений конструктивного совершенствования НТТМ является автоматизация процессов управления и контроля их технического состояния, основанная на широком использовании электронных микропроцессорных систем. В связи с этим к традиционным задачам и методам поддержания в эксплуатации работоспособного состояния транспортных и транспортно-технологических машин добавляются задачи контроля функционирования и обеспечения работоспособности таких электронных систем. В полной мере это относится к силовым установкам НТТМ, обеспечивающим функционирование как ходового, так и рабочего оборудования. Одним из этапов реализации такой задачи является диагностирование ДВС. Диагностирование ДВС в современных условиях реализуется различными методами, но приоритет отдается методам неразрушающего контроля [1]. В сложных условиях эксплуатации ТТМ [2] при значительной удаленности от пунктов размещения стационарных средств контроля, технического обслуживания и ремонта, реализация существующих методов диагностирования современных двигателей, оснащенных электронными системами управления, оказывается проблематичной, а потребность в их применении существенно возрастает. В связи с этим отечественными специалистами [3, 4], а также специалистами за рубежом [5] активно ведется работа по совершенствованию мето-

дов диагностирования современных силовых установок НТТМ. Аналогичные исследования проводятся и в отношении силовых установок авиа- и водного транспорта [6]. Реализуемые сегодня методы ориентированы на анализ показаний встроенных датчиков, однако их восприимчивость к факторам окружающей среды (пыль, влага и т.п.) и связанная с этим достаточно высокая вероятность отказов ограничивают эффективность таких методов. Стоит также отметить, что далеко не во всех случаях для контроля узлов и систем ТТМ представляется конструктивная возможность установки датчиков контроля диагностических параметров, что ограничивает возможности безразборной диагностики, основанной на изложенном подходе. Диагностирование на основе контроля структурных параметров технического состояния машин требует выполнения большего объема вспомогательных разборочно-сборочных работ, требующих значительных временных и экономических ресурсов, что непозволительно с точки зрения проведения оперативного технического контроля. Решение данных проблем видится в более широком внедрении методов акустического диагностирования ДВС, относящихся к неразрушающим методам контроля [7, 8]. В настоящее время активно исследуется пассивный акустический метод, основанный на эффекте акустической эмиссии [9]. В научной литературе представлены работы по оптимизации обработки акустических сигналов [10], созданию диагностических устройств, оценке состояния ДВС с помощью оптико-акустических приборов [11]. Активно ведутся исследования по обнаружению неисправностей систем питания двигателя с использованием датчиков акустических импульсов [12], а также по акустическому контролю состояния поверхностей трения в сопряжениях ДВС [13]. Значительный интерес к акустическому диагностированию демонстрируется зарубежными исследованиями [14]. Иностранные специалисты изучают такие вопросы, как акустическая оценка состояния топливного насоса высокого

давления [15], системы впрыска топлива [16], а также процесса его сгорания [17]. Необходимо отметить успешность практического внедрения методов акустического контроля на железнодорожном транспорте, в частности при диагностировании силовых трансформаторов железных дорог [18, 19], в авиационной отрасли как отечественными специалистами [20, 21], так и зарубежными [22, 23]. Таким образом, исходя из анализа научных исследований, можно сделать вывод о повышенном интересе к изучению возможностей акустического диагностирования, что свидетельствует о его актуальности. Отображенные в современной научно-технической литературе результаты исследований затрагивают в основном акустическую оценку механических систем двигателя – износ трущихся поверхностей цилиндрической группы, кривошипно-шатунного механизма, системы впрыска топлива и т.п. Целенаправленных исследований по влиянию на акустический шум ДВС отказов его электронных систем не выявлено. В настоящее время основным методом диагностирования электронных систем считается метод сканирования, основанный на извлечении информации из бортового компьютера транспортного средства. Однако у данного метода имеется ряд недостатков [24], основным из которых является его зависимость от возможностей электронного блока управления (ЭБУ), наличия и фактического состояния встроенных датчиков. Функцией сканирования является обмен данными с ЭБУ, поэтому невозможно получить больше первичной информации, чем содержится в электронном блоке. Переход датчиков в неработоспособное состояние от воздействия внешних физических факторов вызывает накопление в ЭБУ недостоверной информации. Зачастую для диагностирования электронных систем НТТМ требуется использование фирменных сканеров, доступность которых в специфических условиях эксплуатации ограничивается условиями производителя по организации фирменного сервисного обслуживания. В таких случаях возникает необходимость проведения ручного поиска и идентификации ошибки, что требует особых навыков и высокой квалификации персонала, выполняющего сканирование. Метод акустического диагностирования позволяет обойти указанные ограничения.

Для реализации замысла исследования необходимо выявить неисправности в элек-

тронных системах двигателя, нарушающие стабильность его работы при сохранении работоспособности в режиме ограниченной функциональности, не обеспечивающем получения нормированных выходных параметров. По выявленному перечню неисправностей необходимо зафиксировать и оценить акустический шум ДВС при нестабильном режиме работы, произвести его всесторонний анализ и установить идентификационные акустические признаки неисправности. В данной статье изложена методика проведения такого эксперимента, а также представлены его результаты.

Цель исследования

Определить и сопоставить акустические параметры исправного двигателя и двигателя с ограниченным режимом функциональности из-за неисправностей электронных систем, влияющих на его работу. Выявить идентификационные акустические признаки таких неисправностей.

Задачи эксперимента

Выявить возможные неисправности электронных систем управления ДВС, переводящие его работу в режим ограниченной функциональности. Оценить их влияние на акустический шум двигателя.

Обосновать, разработать и провести апробацию инструментального и программного обеспечения эксперимента.

Установить на основе спектрального анализа зависимости частоты и уровня шума звуковых параметров от технического состояния двигателя.

Выявить идентификационные акустические признаки исследованных неисправностей.

Важность проведенного исследования

Проведенное исследование является полезным и важным опытом для практического применения метода акустического диагностирования при оценке технического состояния электронных систем управления работой ДВС.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования выступает бензиновый двигатель внутреннего сгорания TU5JP4 производства PSA, входящий в состав комплектации обучающего стенда фирмы GNFA для исследования электронных систем управления работой ДВС. Стенд представлен на рисунке 1.



Рисунок 1 – Стендовый бензиновый двигатель внутреннего сгорания TU5JP4 производства PSA
Источник: составлено авторами.

Figure 1 – The TU5JP4 bench-type gasoline internal combustion engine, manufactured by PSA.
Source: compiled by the author.

Стенд обладает возможностью задавать различные неисправности электронных систем управления работой двигателя путем «разрыва» электрических цепей в блоке предохранителей (рисунок 2).

На рисунке 3 представлена электрическая схема систем управления работой двигателя, отдельные цепи которой можно разорвать, тем самым задав неисправность той или иной электронной системы.

Для анализа звуковых сигналов, издаваемых двигателем, проводилось преобразование аудиосигнала из временной области в частотную. Для выполнения этой задачи использовался программный комплекс, работа которого основана на методе быстрого преобразования Фурье (БПФ) [25], который активно применяется для решения задач акустического диагностирования [26]. Для анализа исходных данных был использован математический метод обработки звуковых сигналов:

$$X(n) = \sum_{k=0}^{N-1} x(k) e^{-j\frac{2\pi kn}{N}}. \quad (1)$$

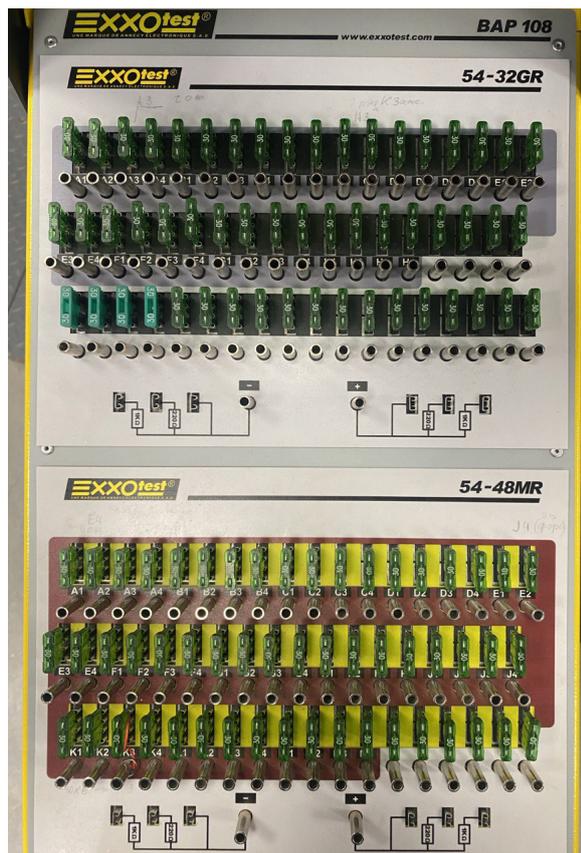


Рисунок 2 – Блок предохранителей
Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Fuse box
Source: compiled by the author.

где $X(n)$ – измеренные значения сигнала в дискретных временных точках;

N – количество значений сигнала, измеренных за период;

$x(k)$ – комплексные амплитуды синусоидальных сигналов, слагающих исходные сигналы;

k – частота k -й синусоиды, измеренная в колебаниях за период;

$n = 0, \dots, N-1$.

Параметром сравнения будет уровень звука (дБ), отложенный по оси ординат на определенных частотах. Инструментальное обеспечение эксперимента – микрофон и звукозаписывающее устройство.

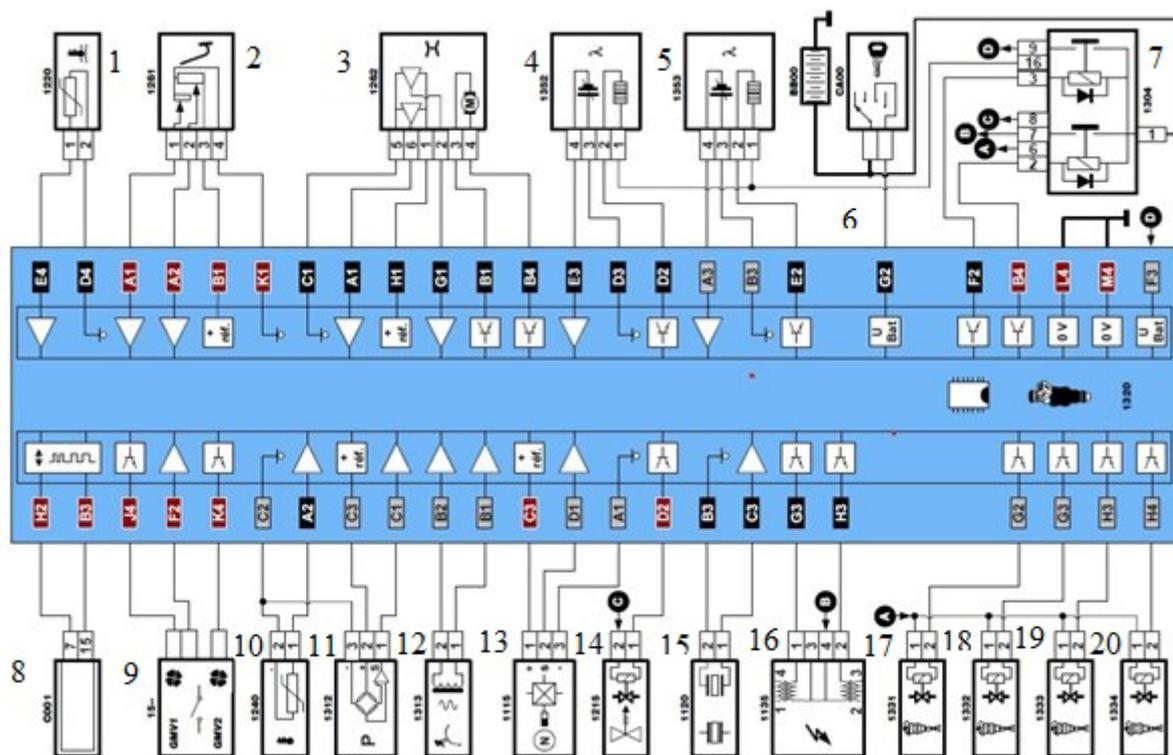


Рисунок 3 – Электрическая схема систем управления работой двигателя:
 1 – датчик температуры охлаждающей жидкости; 2 – датчик положения педали акселератора;
 3 – датчик положения дроссельной заслонки; 4 – датчик кислорода (верхний);
 5 – датчик кислорода (нижний); 6 – замок зажигания; 7 – двойное реле контроля двигателя;
 8 – диагностический разъем; 9 – электровентиляторы; 10 – датчик температуры и давления масла;
 11 – датчик абсолютного давления воздуха; 12 – датчик частоты вращения коленчатого вала;
 13 – датчик фазы; 14 – электроклапан продувки адсорбера; 15 – датчик детонации; 16 – блок катушки зажигания;
 17 – форсунка № 1; 18 – форсунка № 2; 19 – форсунка № 3; 20 – форсунка № 4
 Источник: Интернет-ресурс¹.

Figure 3 – Electrical scheme of engine control systems:
 1 – Coolant fluid temperature sensor, 2 – Accelerator pedal position sensor,
 3 – Throttle position sensor, 4 – Upper oxygen sensor,
 5 – Lower oxygen sensor, 6 – Ignition switch, 7 – Dual engine monitoring relay,
 8 – Diagnostic connector, 9 – Electric fans, 10 – Oil temperature and pressure sensor,
 11 – Absolute air pressure sensor, 12 – Crankshaft speed sensor,
 13 – Phase sensor, 14 – Adsorber purge solenoid valve, 15 – Knock sensor, 16 – Ignition coil unit,
 17 – Injector №1, 18 – Injector №2, 19 – Injector №3, 20 – Injector №4.
 Source: Internet resource¹.

¹ «Общее устройство и возможности учебного стенда». Учебный портал ФГБОУ ВО «СибАДИ». Дата обращения: 01.03.2025. Доступно: <https://portal.sibadi.org/course/view.php?id=701#section-0>

Алгоритм проведения исследования

Блок-схема алгоритма проведения исследования представлена на рисунке 4.

Этапы экспериментальных исследований

Первый этап – классификация неисправностей в электронной системе управления двигателем по принципу ограничения его работоспособного состояния.

Под ограниченной работоспособностью подразумевается режим работы двигателя, при котором наблюдаются характерные признаки проявления его нестабильной работы – интенсивные колебания, повышенные вибрации, посторонние шумы и т.п.

На этом этапе задавались различные неисправности электронной системы. Двигатель при этом работал на холостом ходу с частотой вращения коленчатого вала 1200 об/мин). Путем отключения в блоке предохранителей той или иной подсистемы происходило размыкание электрической цепи, в результате чего имитировались отказы электронных подсистем управления. После введения неисправности производился пуск двигателя, и определялась его работоспособность по трем признакам поведения:

- двигатель не запускается;
- двигатель работает исправно;
- двигатель работает с нарушенным режимом функционирования.

На рисунке 5 представлена сформированная схема режимов работы двигателя при введении различных неисправностей.

Как видно из схемы, двигатель не функционирует при глобальных неисправностях, таких как отключение АКБ, отключение ЭБУ или замка зажигания. Стоит отметить, что при отключении датчика частоты вращения коленчатого вала двигатель также не запускается. При отключении трех или четырех форсунок двигатель сразу же «глохнет».

Двигатель работает исправно при отключении диагностического разъема, датчика положения педали акселератора, положения дроссельной заслонки и температуры охлаждающей жидкости. Данные неисправности влияют на информационное обеспечение водителя и не вызывают сбоев в режиме работы двигателя.

При отключении одной или двух форсунок, катушки зажигания или датчика детонации двигатель начинает работать с перебоями, повышенными вибрациями и нехарактерным

акустическим фоном в сравнении с исправным режимом работы.

Таким образом, для регистрации акустических параметров работы двигателя в режиме ограниченной функциональности рассматривались четыре неисправности:

- отключение одной форсунки;
- отключение двух форсунок;
- отключение блока катушки зажигания;
- отключение датчика детонации.

При этих неисправностях шум работающего двигателя в дальнейшем подвергался акустическому анализу.

Второй этап – регистрация акустического шума, издаваемого двигателем.

На данном этапе производилась запись шума, издаваемого двигателем при той или иной неисправности. Предварительно перед этим измерялись акустические параметры исправно работающего двигателя. Запись производилась в изолированном помещении через микрофон на звукозаписывающее устройство. Стоит отметить, что в перспективе необходимо использовать микрофоны с пассивным шумоподавлением для отсеивания посторонних шумов, которые могут возникнуть при работе в полевых условиях.

Третий этап – спектральное разложение полученных данных.

При анализе звуковых сигналов при помощи БПФ представляется возможным рассмотрение картины в частотной форме. Каждый записанный файл был обрезан до пятисекундного отрезка времени. При спектральном разложении сформированы графики. По оси X представлен промежуток времени, по оси Y – частоты. На самом графике цветом отображен уровень шума в дБ. Для обработки данных использовалось программное обеспечение Sonic Visualiser, которое является универсальным средством для записи и анализа поступающего на вход звуковой карты сигнала. Программа использует метод нормализации, устанавливающий, что самый громкий пик в аудиофайле принимается за 0 дБ, а все остальные уровни шума выражаются относительно данного пика. Чем тише звук, тем больше по модулю будет значение уровня шума со знаком минус.

На рисунке 6 представлена спектрограмма исправно работающего двигателя. Средний уровень шума составляет – 24 дБ на частотах 43...53 Гц. Спектр имеет плавный и непрерывный характер, пиковые значения совпадают со средним значением на этих частотах.

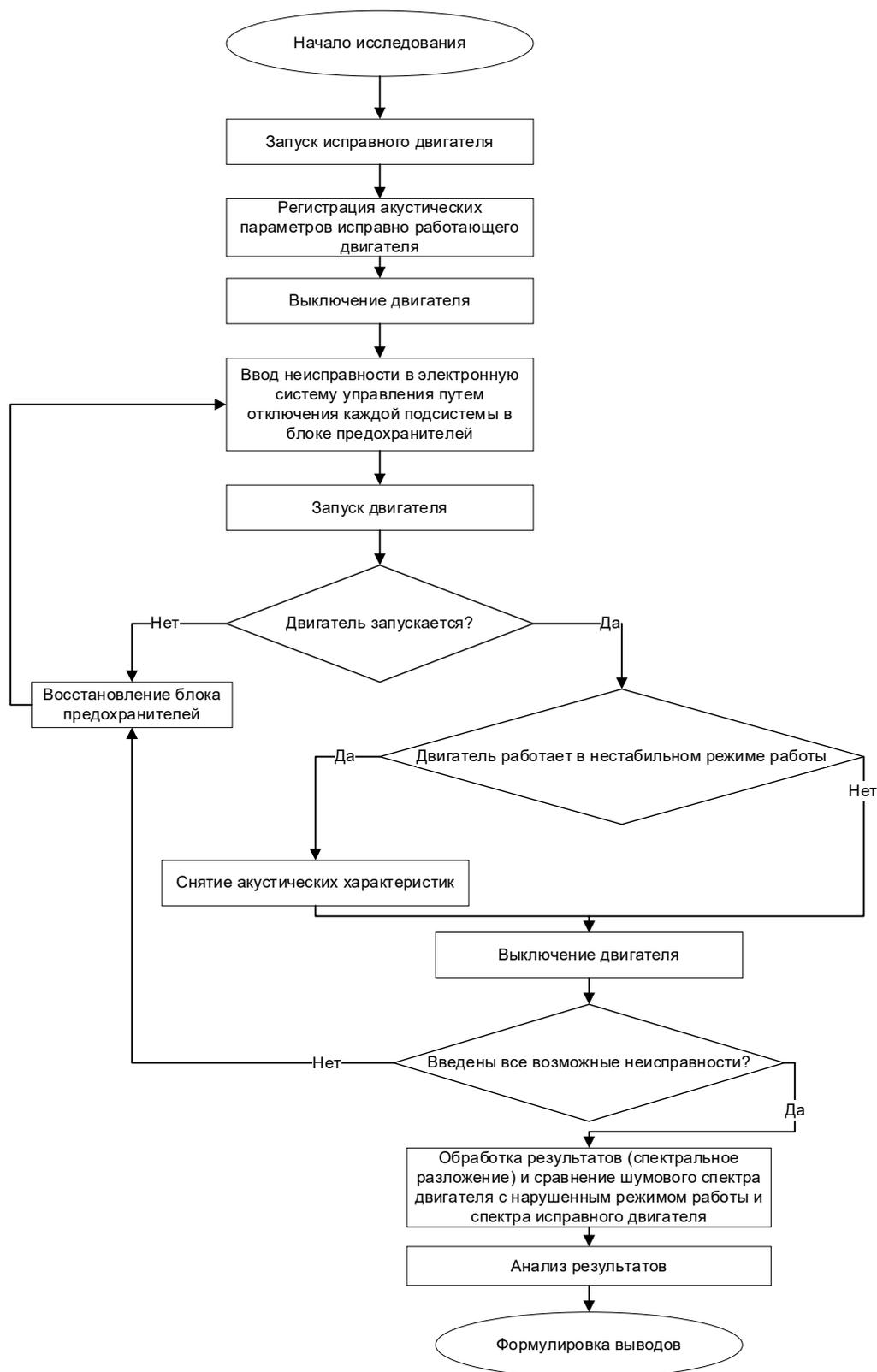


Рисунок 4 – Блок-схема алгоритма проведения исследования
Источник: составлено авторами.

Figure 4 – Experiment conduction algorithm flow chart
Source: compiled by the author.

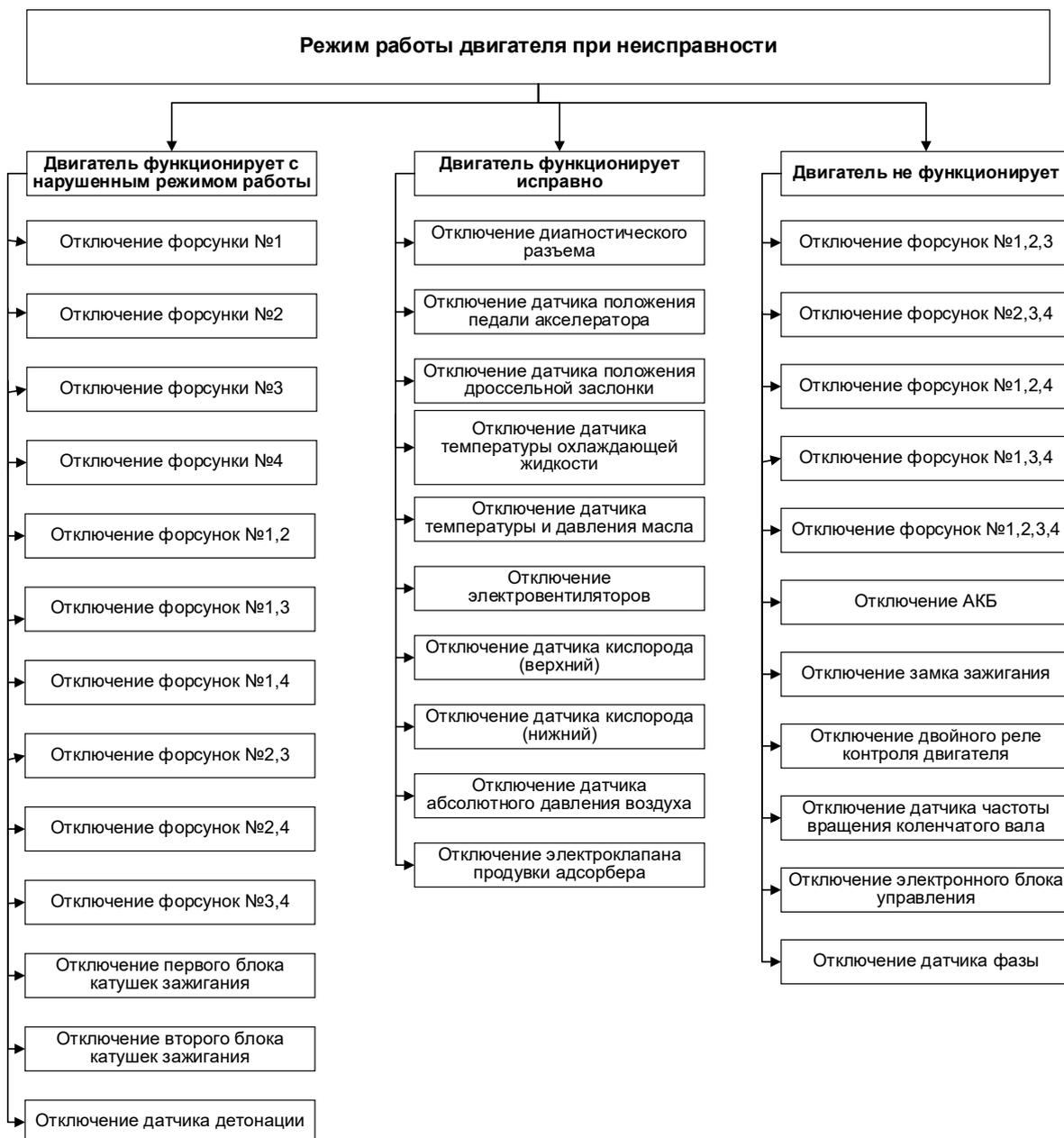


Рисунок 5 – Схема режимов работы двигателя при введении неисправностей
 Источник: составлено авторами.

Figure 5 – Scheme of engine operating modes with introduced faults.
 Source: compiled by the author.

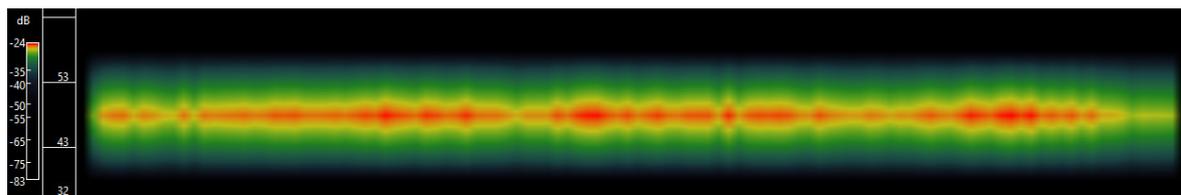


Рисунок 6 – Спектрограмма исправно работающего двигателя
Источник: составлено авторами.

Figure 6 – Spectrogram of the properly functioning engine
Source: compiled by the author.

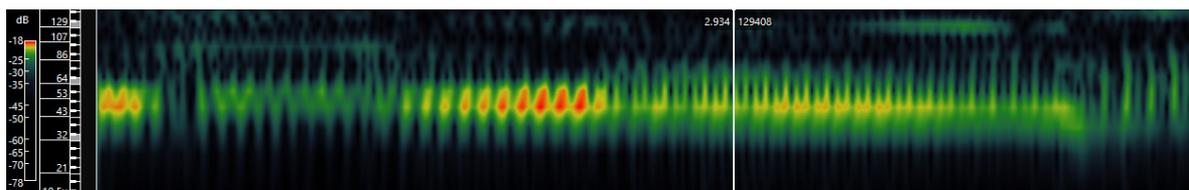


Рисунок 7 – Спектрограмма двигателя, работающего с одной отключенной форсункой
Источник: составлено авторами.

Figure 7 – Spectrogram of the engine running with one disconnected injector
Source: compiled by the author.

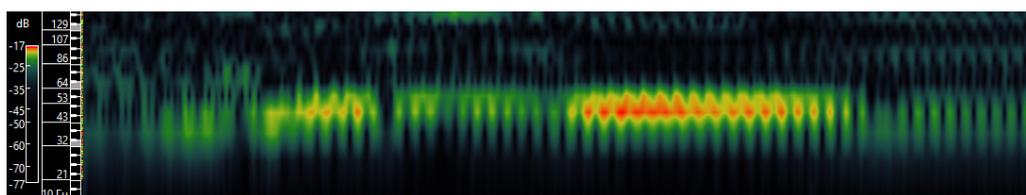


Рисунок 8 – Спектрограмма двигателя, работающего с двумя отключенными форсунками
Источник: составлено авторами.

Figure 8 – Spectrogram of the engine running with two disconnected injectors
Source: compiled by the author.

На рисунке 7 представлена спектрограмма двигателя, работающего с одной отключенной форсункой. Спектр шума имеет минимальные различия вне зависимости от номера отключенной форсунки (№ 1...4). Как видно, на отрезке времени замера наблюдаются обрывы уровня шума. Пиковые значения уровня шума составляют -18 дБ на частотах 43...53 Гц. При этом в указанном диапазоне преимущественный уровень шума -21 дБ. Пиковый уровень шума стал громче в сравнении с исправным двигателем. Это связано с тем, что при отключенной форсунке двигатель начинает «тро-

ить», вызывая сильные колебания корпуса двигателя, в результате чего возникает дополнительный шум от крепежных узлов двигателя.

На рисунке 8 представлена спектрограмма двигателя, работающего с двумя отключенными форсунками. На отрезке времени замера также наблюдаются обрывы уровня шума. Пиковые значения уровня шума составляют -17 дБ на частотах 43...53 Гц. Преимущественный уровень шума в указанном диапазоне составляет также -21 дБ. Картина имеет минимальные отличия от шумового спектра двигателя, работающего с одной отключенной форсункой.

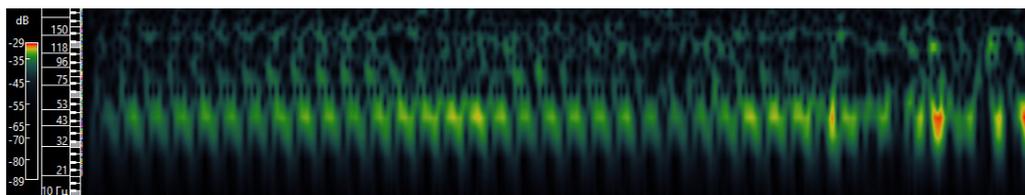


Рисунок 9 – Спектрограмма двигателя, работающего с отключенным датчиком детонации
Источник: составлено авторами.

Figure 9 – Spectrogram of the engine running with the disconnected knock sensor
Source: compiled by the author.

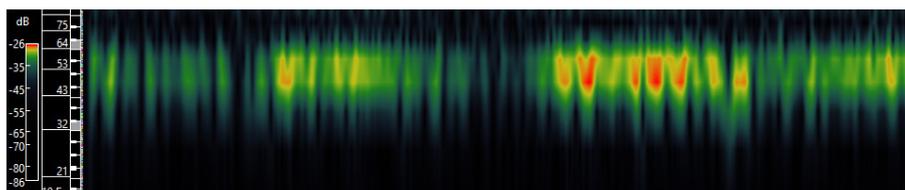


Рисунок 10 – Спектрограмма двигателя, работающего с отключенным блоком катушки зажигания
Источник: составлено авторами.

Figure 10 – Spectrogram of the engine running with the disconnected ignition coil unit
Source: compiled by the author.

На рисунке 9 представлена спектрограмма двигателя, работающего с отключенным датчиком детонации. Преимущественный уровень шума составляет -33 дБ на частотах 43...53 Гц. При отключенном датчике детонации двигатель работает тише в сравнении с отключенными форсунками. Пиковое значение уровня шума в этом диапазоне частот составляет -29 дБ.

На рисунке 10 представлена спектрограмма двигателя, работающего с отключением блока катушки зажигания. Преимущественный уровень шума составляет -31 дБ на частотах 43...53 Гц. Имеются пиковые промежутки, при которых уровень шума достигает -26 дБ.

РЕЗУЛЬТАТЫ

При обработке и анализе полученных результатов установлено:

- диапазон частот акустического шума двигателя при работе на оборотах холостого хода составляет вне зависимости от наличия неисправностей, ограничивающих его функциональность, 43...53 Гц;

- исправно работающий двигатель дает равномерный шумовой спектр со средним уровнем шума -24 дБ;

- при отключении форсунок наблюдаются разрывы шумового спектра по временной шкале, пиковые значения уровня шума достигают – 17...-18 дБ при преимущественном уровне -21 дБ;

- при отключении датчика детонации пиковое значение уровня шума составляет -29 дБ при преимущественном уровне -33 дБ;

- при отключении модуля катушки зажигания пиковое значение уровня шума составляет -26 дБ при преимущественном уровне -31 дБ.

На основе полученных результатов можно сформировать признаки неисправностей в электронной системе управления работой исследованного бензинового двигателя, работающего в режиме ограниченного функционирования (таблица).

Таблица
Идентификационные признаки неисправностей элементов
электронной системы управления работой бензинового двигателя
Источник: составлено автором.

Table 1
Identification signs of malfunctions of the electronic control system elements
of the gasoline engine operation
Source: compiled by the author.

Рассматриваемый диапазон частот	Среднее значение шума, дБ	Пиковые значения, дБ	Вывод о неисправности
43 Гц- 53 Гц	-24	-24	Двигатель исправный
	-21	-17, -18	Неисправны форсунки двигателя
	-33	-29	Неисправен датчик детонации
	-31	-26	Неисправен модуль катушки

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

В результате исследования были выявлены неисправности электронных систем управления работой бензинового ДВС, влияющие на его работу путем перевода в режим ограниченной функциональности. К таким неисправностям относятся неработоспособность датчика детонации, блока катушек зажигания, неисправность форсунок. Были записаны акустические параметры двигателя при работе в режиме ограниченной функциональности из-за введения вышеперечисленных неисправностей. По результатам записей были построены и проанализированы спектральные графики, характеризующие ту или иную неисправность. Полученные графики имеют уникальный характер для каждого вида отказа, в результате чего возможно идентифицировать ту или иную неисправность в электронной системе управления работой ДВС. Проведенное исследование является одним из локальных этапов разработки метода оперативного акустического диагностирования электронных систем управления работой силовых установок с использованием мобильного портативного оборудования. Дальнейшим этапом предполагается исследование возможности реализации метода в полевых условиях при наличии активных посторонних шумов. Полученные при этом результаты позволят оценить целесообразность проведения большого объема испытаний по формированию базы данных акустических спектров исправных силовых установок, применяемых на различных НТТМ.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Федосов А.В., Гайнуллина Л.А. Методы неразрушающего контроля // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2015. Т. 11, № 2. С. 73–78.
2. Острецов Д.А. Проблемы грузоперевозок в России и пути их решения // Наука без границ. 2016. № 1 (1). С. 27–30.
3. Диагностика современного автомобиля / Ю.Н. Храпов, И.А. Успенский, Г.Д. Кокорев [и др.] // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2016. № 118. С. 1001–1025.
4. Гончаров А.А., Гончаров Н.С. Совершенствование методики диагностирования датчика кислорода автомобильных двигателей // Вестник Оренбургского государственного университета. 2014. № 10 (171). С. 236–240.
5. Deptuła A., Osiński P., Radziwanowska U. Decision Support System for Identifying Technical Condition of Combustion Engine // Archives of Acoustics. 2016. Vol. 41. No 3. P. 449–460.
6. Батялов А.А., Гордеев В.И. Системы технического диагностирования двигателей // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. 2003. № 5. С. 67–77.
7. Горбаш В.Г., Делендик М.Н., Павленко П.Н. Неразрушающий контроль в промышленности. Акустический контроль // Неразрушающий контроль и диагностика. 2011. № 4. С. 35–51.
8. Рыбочкин А.Ф., Савельев С.В., Смирнов А.В. Диагностирование состояния работающего автомобильного двигателя на основе анализа издаваемого им акустического шума // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология». 2014. № 16 (156). С. 61–77.
9. Лузина М.П. Анализ результатов контроля технических изделий методом акустической

эмиссии // Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики воз- можности. 2011. № 3 (73). С. 78–83.

10. Дрейзин В.Э., Касем М.М. Возможности диагностики автомобильных двигателей путём анализа шума работающего двигателя // Известия Кур- ского государственного технического университета. 2009. № 2 (27).

11. Горбачев А.А. Диагностика двигателя вну- треннего сгорания автомобиля по акустическому излучению двигателя // Теория и практика совре- менной науки. 2016. № 6-1 (12). С. 275–291.

12. Уваров Г.А. Совершенствование акусти- ческого метода диагностирования автомобильных бензиновых двигателей // Вестник Полоцкого госу- дарственного университета. Серия В: Промышлен- ность. Прикладные науки. 2014. № 3. С. 95–98.

13. Деев А.А. Акустические колебания в фри- кционном контакте как способ контроля поверх- ностей трения на этапе приработки двигателей внутреннего сгорания // Вестник Рязанского госу- дарственного университета им. С.А. Есенина. 2010. № 29. С. 132–148.

14. Mathew S.K., Zhang Y. Acoustic-Based Engine Fault Diagnosis Using WPT, PCA and Bayesian Optimization // Applied Sciences. 2020. Vol. 10. № 19. P. 68–90.

15. Albarbar A., Gu F., Ball A. D., Starr A. Acoustic monitoring of engine fuel injection based on adaptive filtering techniques // Applied Acoustics. 2010. Vol. 71. № 12. P. 1132–1141.

16. Albarbar A., Gu F., Ball A.D. Diesel engine fuel injection monitoring using acoustic measurements and independent component analysis // Measurement. 2010. Vol. 43. № 10. P. 1376–1386.

17. Broatch A., Novella R., García-Tíscar J. [et al.] Analysis of combustion acoustic phenomena in compression-ignition engines using large eddy simulation // Physics of Fluids. 2020. Vol. 32. № 8. P. 085101.

18. Волчанина М.А. Статистические исследо- вания сигналов акустического контроля при диагно- стировании силовых трансформаторов // Известия Транссиба. 2022. № 3 (51). С. 80–89.

19. Черемисин В.Т., Кузнецов А.А., Волчани- на М.А., Горлов А.В. Измерение параметров аку- стических сигналов имитатора дефектов силовых трансформаторов // Инновационные транспортные системы и технологии. 2020. Т. 6, № 4. С. 161–171.

20. Виноградов В.Ю., Сайфуллин А.А. Кон- троль технического состояния авиационных ГТД по акустическим параметрам, измеренным на сре- зе сопла двигателя // Контроль. Диагностика. 2013. № 3. С. 53–57.

21. Никитина Н.Е., Мотова Е.А. (Шабанова), Тарасенко Ю.П. Неразрушающий контроль рабочих компрессорных лопаток авиационного двигателя // Вестник Самарского государственного аэрокосми- ческого университета им. академика С.П. Королёва. 2012. № 3-1 (34). С. 291–295.

22. Umair A., Fakhre A., Jennions I. Acoustic monitoring of an aircraft auxiliary power unit // ISA Transactions. 2023. Vol. 137. P. 670–691.

23. Waligórski M., Batura K., Kucal K., Merksiz J. Research on airplanes engines dynamic processes with modern acoustic methods for fast and accurate diagnostics and safety improvement // Measurement. 2019. Т. 154. P. 107460.

24. Сургутсков К.Н., Трегубова И.М. (Титла) Проблемы компьютерной диагностики современ- ных автомобильных двигателей // Инженерный вестник Дона. 2019. № 1 (52). С. 25.

25. Терехов А.В., Гужаковская К.П. Анализ спектра звукового сигнала // NBI-technologies. 2020. Т. 14, № 1. С. 23–28.

26. Mayuraj E., Rohan S., Saurabh K. The condition monitoring of I.C. engine using acoustic signal analysis. 2022. Vol. 09. № 06.

REFERENCES

1. Fedosov A.V., & Gainullina L.A. Methods of non-destructive testing. *Electrical and data processing facilities and systems*. 2015; 11(2): 73-78. (In Russ.)

2. Ostretsov D.A. Problems of freight transporta- tion in Russia and ways to solve them. *Science Without Borders*. 2016; 1(1): 27-30. (In Russ.)

3. Khrapov Y.N., Uspensky I.A., Kokorev G.D., et al. Diagnostics of modern vehicles. *Polythematic on- line scientific journal of Kuban State Agrarian Universi- ty*. 2016; 118: 1001–1025. (In Russ.)

4. Goncharov A.A., Goncharov N.S. Improving the methodology for diagnosing oxygen sensors in au- tomotive engines. *Vestnik of the Orenburg State Uni- versity*. 2014; 10(171): 236–240. (In Russ.)

5. Deptuła A., Osiński P., Radziwanowska U. Decision support system for identifying technical condi- tion of combustion engine. *Archives of Acoustics*. 2016; 41(3): 449–460.

6. Batyalov A.A., Gordeev V.I. Systems for tech- nical diagnostics of engines. *Bulletin of VSAWT*. 2003; 5: 67-77. (In Russ.)

7. Gorbash V.G., Delendik M.N., Pavlenko P.N. Non-destructive testing in industry. Acoustic test- ing. *Non-Destructive Testing and Diagnostics*. 2011; 4: 35–51. (In Russ.)

8. Rybochkin A., Saveliev S., Smirnov A. Diag- nosis of Automobile Engine Condition Based on the Analysis of Acoustic Noise. *Alternative Energy and Ecology (ISJAEE)*. 2014; (16): 61–77. (In Russ.)

9. Luzina M.P. Analysis of the results of testing technical products by the acoustic emission method. *Scientific and Technical Bulletin of St. Petersburg State University of Information Technologies. Mechanics and Optics*. 2011; 3(73): 78–83. (In Russ.)

10. Dreyzin, V. E., & Kasem, M. M. (2009). Possi- bilities of diagnosing automotive engines by analyzing the noise of a running engine. *Proceedings of Kursk State Technical University*, 2(27). (In Russ.)

11. Gorbachev A.A. Diagnostics of internal com- bustion engines based on the acoustic radiation of the engine. *Theory and Practice of Modern Science*. 2016; 6-1(12): 275–291. (In Russ.)

12. Uvarov G.A. Improvement of the acoustic method for diagnosing automotive gasoline engines.

Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya B. Promyshlennost'. Prikladnye nauki. 2014; 3: 95–98. (In Russ.)

13. Deev A.A. Acoustic vibrations in frictional contact as a method for monitoring friction surfaces during the running-in of internal combustion engines. *The Bulletin of the Ryazan State University named for S.A. Yesenin.* 2010; 29: 132–148. (In Russ.)

14. Mathew S.K., Zhang Y. Acoustic-based engine fault diagnosis using WPT, PCA, and Bayesian optimization. *Applied Sciences.* 2020; 10(19): 68–90.

15. Albarbar A., Gu F., Ball A.D., Starr A. Acoustic monitoring of engine fuel injection based on adaptive filtering techniques. *Applied Acoustics.* 2010; 71(12): 1132–1141.

16. Albarbar A., Gu F., Ball A.D. Diesel engine fuel injection monitoring using acoustic measurements and independent component analysis. *Measurement.* 2010; 43(10): 1376–1386.

17. Broatch A., Novella R., García-Tíscar J., et al. Analysis of combustion acoustic phenomena in compression-ignition engines using large eddy simulation. *Physics of Fluids.* 2020; 32(8): 085101.

18. Volchanina M.A. Statistical investigations of acoustic control signals in diagnostic of power transformers. «*Izvestia Transsiba*» (Journal of *Transsib Railway Studies*). 2022; 3(51): 80–89. (In Russ.)

19. Cheremisin V.T., Kuznetsov A.A., Volchanina M.A., Gorlov A.V. Measuring the acoustic signals parameters of the defect simulator of power transformers. *Modern Transportation Systems and Technologies.* 2020; 6(4): 161–171. (In Russ.)

20. Vinogradov V.Y., Saifullin A.A. Monitoring the technical condition of aircraft gas turbine engines based on acoustic parameters measured at the engine nozzle exit. *Kontrol'. Diagnostika (Testing. Diagnostics).* 2013; 3: 53–57. (In Russ.)

21. Nikitina N.E., Motova (Shabanova), E.A., Tarasenko Y.P. Non-destructive testing of working compressor blades of an aircraft engine. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering.* 2012; 3-1(34): 291–295. (In Russ.)

22. Umair A., Fakhre A., Jennions I. Acoustic monitoring of an aircraft auxiliary power unit. *ISA Transactions.* 2023; 137, 670–691.

23. Waligórski M., Batura K., Kucal K., & Merksiz J. Research on airplanes engines dynamic processes with modern acoustic methods for fast and accurate diagnostics and safety improvement. *Measurement.* 2019; 154: 107460.

24. Surgutskov K.N., Tregubova I.M. (Titla). Problems of computer diagnostics of modern automobile engines. *Engineering Bulletin of the Don.* 2019; 1(52): 25.

25. Terekhov A.V., Guzhakovskaya K.P. Spectral analysis of audio signal. *NBI-Technologies.* 2020; 14(1): 23–28. (In Russ.)

26. Mayuraj E., Rohan S., Saurabh K. The condition monitoring of I.C. engine using acoustic signal analysis. *Journal of Emerging Technologies and Innovative Research.* 2022; 9(6).

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ

Габидулин В.Д. Анализ состояния вопроса, планирование и проведение экспериментальных исследований, снятие спектрограмм и спектральный анализ акустических параметров двигателя, оформлению статьи.

Добромиров В.Н. Разработка замысла научного исследования, участие в экспериментальных исследованиях, анализ полученных результатов, формулировка выводов, общее редактирование статьи.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

V.D. Gabidulin Analysis of the problem status, planning and conducting experimental studies, recording spectrograms, performing spectral analysis of engine acoustic parameters, design of the article.

V.N. Dobromirov Development of the scientific research plan, participation in experimental studies, analysis of the obtained results, formulation of conclusions, general editing of the article.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Габидулин Владимир Дмитриевич – аспирант кафедры «Наземные транспортно-технологические машины» Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета (190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-0565-5440>,

SPIN-код: 1960-0168,

e-mail: moymail_2014@mail.ru

Добромиров Виктор Николаевич – д-р техн. наук, проф. кафедры «Наземные транспортно-технологические машины» Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета (190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7803-4049>,

SPIN-код: 4389-7998,

e-mail: viktor.dobromirov@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Vladimir D. Gabidulin – Postgraduate Student, Department of Ground Transport and Technological Machines, St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (4, 2-nd Krasnoarmeyskaya Street, St. Petersburg, 190005).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-0565-5440>,

SPIN-code: 1960-0168,

e-mail: moymail_2014@mail.ru

Viktor N. Dobromirov – Dr. of Sci. (Eng.), Professor, Department of Ground Transport and Technological Machines, St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (4, 2-nd Krasnoarmeyskaya Street, St. Petersburg, 190005).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7803-4049>,

SPIN-code: 4389-7998,

e-mail: viktor.dobromirov@mail.ru