

Научная статья
УДК 621.4
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-4-502-511>
EDN: VOLAZE



АКУСТИЧЕСКОЕ ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

В.Д. Габидулин

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет,
г. Санкт-Петербурга, Россия
toymail_2014@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Для обеспечения стабильной работоспособности транспортно-технологических машин необходимо постоянный контроль их технического состояния. Своевременное диагностирование сложно осуществлять при работе в удаленных регионах, а также при грузоперевозках на большие расстояния из-за отсутствия близкорасположенных центров технического обслуживания.

Материалы и методы. Одним из решений вышеперечисленной проблемы является использование метода диагностирования по звуковым параметрам. В частности, данный метод применим и к силовым установкам. Его преимущество состоит в возможности оперативно оценить состояние механизмов и систем двигателя на месте при помощи портативного прибора (без применения крупногабаритной и маломобильной техники) методом неразрушающего контроля. Таким образом, исследование и внедрение метода акустического диагностирования на сегодняшний день является перспективным и востребованным. Одним из важнейших направлений совершенствования силовых установок сегодня является автоматизация процессов управления их функционированием на основе использования электроники и микропроцессорных систем. При положительном воздействии на эффективность функционирования двигателя эти сложные системы расширяют диапазон его потенциальных неисправностей. Целью данного исследования являлась оценка принципиальной возможности определения и сопоставления акустических параметров двигателя с нарушениями и без нарушений режима функционирования при возникновении отказов в электронных системах управления его работой. В качестве примера объектом исследования выбран легковой автомобиль Ford Focus. В качестве тестовой неисправности использовался сбой в работе электронного модуля зажигания. Полученные спектральные картины звукового излучения ДВС без нарушения и с нарушением режима работы позволяют определить характер неисправности двигателя по звуковым параметрам.

Результаты. Был получен диапазон частот, при котором возможно идентифицировать спектральную картину двигателя с нарушениями режима работы и двигателя без нарушений режима работы. Этот диапазон составил 6 000–6 500 Гц, поскольку на данном отрезке уровень звука достигает более 40 дБ.

Обсуждение и заключение. Проведенный эксперимент является начальной стадией проведения масштабного экспериментального исследования, результат которого послужит отправной точкой для внедрения акустического метода в процесс диагностирования электронных систем управления двигателями внутреннего сгорания.

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

Статья поступила в редакцию 07.04.2024; одобрена после рецензирования 21.06.2024; принята к публикации 14.08.2024.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

Прозрачность финансовой деятельности: автор не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Для цитирования: Габидулин В.Д. Акустическое диагностирование двигателя внутреннего сгорания // Вестник СибАДИ. 2024. Т. 21, № 4. С. 502-511. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-4-502-511>

© Габидулин В.Д., 2024



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Origin article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-4-502-511>

EDN: VOLAZE

INTERNAL COMBUSTION ENGINE ACOUSTIC DIAGNOSTICS

Vladimir D. Gabidulin

*St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering,
Saint Petersburg, Russia
moymail_2014@mail.ru*

ABSTRACT

Introduction. To ensure stable performance of transport and technological machines, constant monitoring of their technical condition is necessary. Timely diagnosis is difficult to carry out when working in remote regions, as well as when transporting goods over long distances due to the lack of closely located maintenance centers.

Materials and methods. One of the solutions to the above problem is the use of a diagnostic method based on sound parameters. In particular, this method is applicable to power plants. Its advantage is the ability to quickly assess the condition of the engine mechanisms and systems on site using a portable device (without the use of large-sized and low-mobility equipment) by non-destructive testing. Thus, the research and implementation of the acoustic diagnostic method is promising and in demand today. One of the most important areas for improving power plants today is the automation of control processes for their operation based on the use of electronics and microprocessor systems. With a positive effect on the efficiency of the engine, these complex systems expand the range of its potential malfunctions. The purpose of this study was to evaluate the fundamental possibility of determining and comparing the acoustic parameters of an engine with and without violations of the operating mode in the event of failures in electronic control systems of its operation. As an example, the Ford Focus passenger car was chosen as the object of the study. A malfunction in the electronic ignition module was used as a test fault. The obtained spectral patterns of the sound radiation of the internal combustion engine (with and without violations of the operating mode) enable to determine the nature of the engine malfunction by sound parameters.

Results. A frequency range at which it is possible to identify the spectral pattern of an engine with impaired operation and an engine without impaired operation was obtained. This range was 6,000-6,500 Hz, since in this segment the sound level reaches more than 40 dB.

Discussions and conclusions. The conducted experiment is the initial stage of a large-scale experimental study, the result of which will serve as a starting point for the introduction of the acoustic method into the process of diagnosing electronic control systems for internal combustion engines.

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

The article was submitted 07.04.2024; approved after reviewing 21.06.2024; accepted for publication 14.08.2024.

Author 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. Internal combustion engine acoustic diagnostics. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2024; 21 (4): 502-511. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-4-502-511>

© Gabidulin V.D., 2024



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

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время транспорт является одной из важнейших отраслей экономики¹. Для обеспечения стабильной работоспособности транспортных и транспортно-технологических машин (ТТМ) в процессе эксплуатации необходимо производить своевременный контроль их технического состояния. При этом предпочтение отдается методам неразрушающего контроля. К такому виду контроля, в частности, относится диагностирование двигателей внутреннего сгорания (ДВС). В процессе эксплуатации ТТМ возникают ситуации, при которых оперативное проведение диагностирования современных ДВС, оснащенных электронными системами управления их функционированием, традиционными методами является проблематичным, например, при работе в удаленных и труднодоступных регионах, при длительных грузоперевозках [1, 2], в условиях подземного строительства [3] и т. п. В связи с этим в России и за рубежом активно ведутся исследования по усовершенствованию существующих и разработке новых способов и средств диагностирования силовых установок. Эти исследования распространяются не только на двигатели наземных машин [4], но и на силовые установки воздушного и водного транспорта [5]. При этом большинство подходов базируется на методе сканирования с использованием показаний встроенных датчиков [6]. Датчики подвержены негативному воздействию окружающей среды (пыль, вода и т. д.), и при выходе их из строя определить неисправность методом сканирования невозможно, что является проблемой. Более того, на транспортно-технологических машинах не все узлы и системы оснащаются датчиками. Кроме того, возникают ситуации, при которых для диагностирования двигателя необходимо подвергнуть частичной разборке, что требует значительных затрат сил и средств. Для решения вышеперечисленных проблем предлагается использование метода акустической оценки качества работы ДВС. Акустический метод диагностирования является методом неразрушающего контроля [7, 8]. Сегодня активно исследуется пассивный акустический

метод, основанный на явлении акустической эмиссии [9]. Среди научных трудов известны исследования по оптимизации способов обработки акустических сигналов при диагностировании двигателей [10], по созданию более эффективных диагностических приборов для их акустической оценки². Ведутся исследования по диагностированию систем питания двигателей с использованием датчиков акустических импульсов [11]. Проведена оценка возможности применения регистрации акустических колебаний для контроля состояния поверхностей трения узлов двигателя внутреннего сгорания [12]. Исследование зарубежного опыта показывает значительный интерес к акустическому методу диагностирования иностранных специалистов [13]. В частности, значительное внимание уделяется акустическому диагностированию системы впрыска топлива [14, 15], оценке состояния топливного насоса высокого давления [16], а также акустическому контролю сгорания дизельного топлива [17]. Поднимается вопрос о контроле выброса загрязняющих веществ, рассматривается возможность восстановления давления в цилиндрах двигателя при помощи акустической эмиссии [18]. Исследователи рассматривают возможность применения метода акустической эмиссии для обнаружения повреждений клапанов в двигателях [19]. Зарубежные специалисты также находят применение акустическому диагностированию в авиационной сфере [20, 21]. Такие работы ведутся и в отечественной авиационной отрасли [22, 23]. В железнодорожной отрасли метод акустического контроля находит свое применение, например, при диагностики силовых трансформаторов электроснабжения железных дорог [24, 25]. Таким образом, исследование по внедрению и усовершенствованию метода акустического контроля технического состояния двигателей внутреннего сгорания является актуальным. В вышеперечисленных источниках исследуется перечень неисправностей, по большей части связанных с оценкой состояния механических систем двигателя – износа трущихся поверхностей кривошипно-шатунного механизма и цилиндрико-поршневой группы, состояния привода и регулировки газораспределительного механизма, систе-

¹ Правительство Российской Федерации от 27 ноября 2021 года №3363-р «О транспортной стратегии Российской Федерации с прогнозом на период до 2035 года».

² Патент 2667826 Российская Федерация, G01M 15/02 G01M 15/05. Устройство для акустической диагностики двигателя: № 2016115114: заявл. 19.04.2016: опубл. 24.09.2018 / Серобабин А.Т., Горбачев А.А., Ворончихин Н.В.; патентообладатель Федеральное государственное казенное военное образовательное учреждение высшего образования «Военная академия материально-технического обеспечения имени генерала армии А.В. Хрулева».

мы впрыска топлива и т.п. Акустических исследований влияния состояния электронных систем управления работой двигателя на его работоспособность на сегодняшний день не выявлено. Для реализации такого замысла поставлена задача проведения масштабного эксперимента с регистрацией акустических параметров, соответствующих целому комплексу неисправностей электронных компонентов, ограничивающих работоспособность ДВС. Для подготовки к такому исследованию необходимо получить «первичный» опыт решения научных задач подобного рода с целью идентификации необходимых приборов и инструментов, условий и порядка проведения экспериментов, подбора программного обеспечения и аппаратуры. В данной статье изложены результаты подобного «первичного» исследования. Описывается методика и результаты проведения эксперимента по акустическому диагностированию двигателя на примере силовой установки легкового автомобиля.

Цель исследования: оценка принципиальной возможности определения и сопоставления акустических параметров исправного двигателя и двигателя с нарушенными режимами работы из-за возникновения отказов в его электронных системах управления, отработка методики, инструментального и программного обеспечения экспериментов.

Задачи эксперимента:

1. Получение спектральных картин акустического излучения двигателя в исправном состоянии и с нарушенным режимом работы электронной системы управления им.
2. Выявление на основе спектрального анализа зависимости частоты и уровня шума издаваемых звуковых параметров от технического состояния двигателя.
3. Обоснование и апробация инструментального и программного обеспечения эксперимента.

Важность проведенного исследования:

Проведенное исследование является полезным и важным опытом для подготовки к полномасштабному эксперименту, который может стать фундаментом для практического применения метода акустического диагностирования.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования являлся бензиновый двигатель внутреннего сгорания автомобиля Ford Focus-2 объемом 1.6 литра с пробегом 214 тыс. км. Для анализа звуковых сигналов, издаваемых двигателем, проводи-

лось преобразование аудиосигнала из временной области в частотную. Для выполнения этой задачи использовался программный комплекс, работа которого основана на методе преобразования Фурье (ПФ) [26]. Теория ПФ применяется к бесконечному гармоническому и непрерывному сигналу. Однако, поскольку в реальных условиях возникает необходимость работать с сигналом в ограниченном временном пространстве, существует метод быстрого преобразования Фурье (БПФ), основанный на ПФ. БПФ – улучшенный алгоритм, созданный с целью уменьшения количества операций, выполняемых во время ПФ. Таким образом, для анализа исходных данных необходимо использовать математический метод обработки звуковых сигналов:

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

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;

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

Так как звук представляет собой распространение упругих волн, то измеряемый исходный звуковой сигнал имеет синусоидальный характер с определенным комплексным значением амплитуд $x(k)$, которые разбиваются на количество N значений сигнала за период, в результате чего представляется возможным исходные аудиосигналы рассмотреть в частотной форме, где по оси ординат разложена амплитуда (дБ), а по оси абсцисс – частота сигнала. Таким образом, в ходе эксперимента параметром сравнения будет являться уровень звука (дБ), отложенный по оси ординат на определенных частотах. На сегодняшний день уже существует опыт акустического метода диагностирования при использовании БПФ [27].

Последовательность выполнения исследования

1. Техническое диагностирование двигателя, при необходимости проведение регулировок для вывода его в режим исправного функционирования.

2. Введение неисправности в электронную систему управления двигателем при сохранении возможности его работы, пробеговая оценка функционирования двигателя.

3. Регистрация акустических данных в трех точках работающего неисправного двигателя.

4. Устранение неисправности двигателя.

5. Регистрация акустических данных в тех же точках работающего исправного двигателя и пробеговая оценка его функционирования.

6. Спектральное разложение полученных акустических данных.

7. Обработка и анализ результатов исследования.

8. Формулировка выводов.

Этапы экспериментальных исследований

Первый этап – регистрация акустических сигналов неисправного двигателя.

Перед проведением эксперимента введена неисправность двигателя – сбой в функционировании электронного модуля зажигания, вызывающий перебои в работе второго цилиндра.

При работе двигателя после запуска наблюдаются:

- внешние визуальные отклонения в работе двигателя – высокая интенсивность вибраций;
- хаотичные звуковые излучения – свисты, неравномерность шума и т. п.;
- при движении АТС со скоростью 60 км/ч на III передаче частота вращения двигателя нестабильна, колеблется в диапазоне 2,1 тыс.

– 1,7 тыс. об/мин. Минимальный показатель крутящего момента – 131 Н·м. Минимальный текущий показатель мощности – 23 кВт. Коэффициент полезной мощности двигателя – соотношение максимальной мощности (85 кВт) к текущей, равняется 0,27. Характеристики мощности и моментов определялись в соответствии с графиком, представленном на рисунке 1.

Звуковые сигналы при работающем двигателе регистрировались диктофоном в трех точках. Данные точки указаны на рисунке 2.

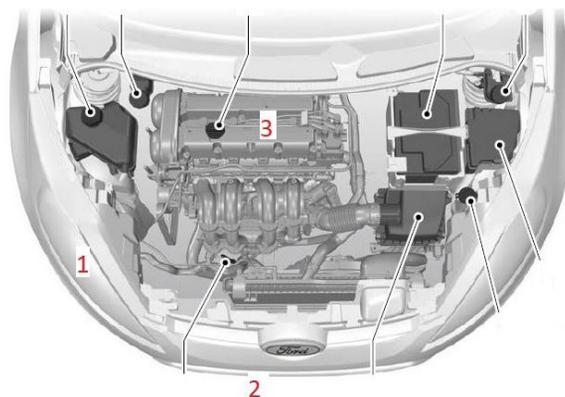


Рисунок 2 – Точки регистрации звуковых сигналов
Источник: составлено автором.

Figure 2 – Audio signal registration points
Source: compiled by the author.

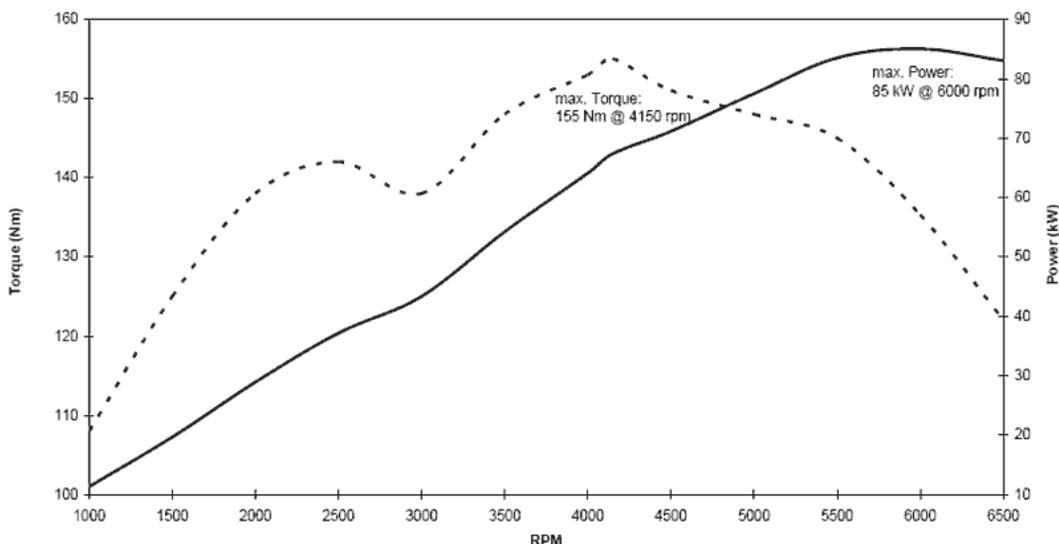


Рисунок 1 – Зависимость момента и мощности от частоты вращения испытуемого двигателя
Источник: открытые электронные ресурсы.

Figure 1 – Dependence of torque and power on the rotation speed of the tested engine.
Source: Open Electronic Resources.

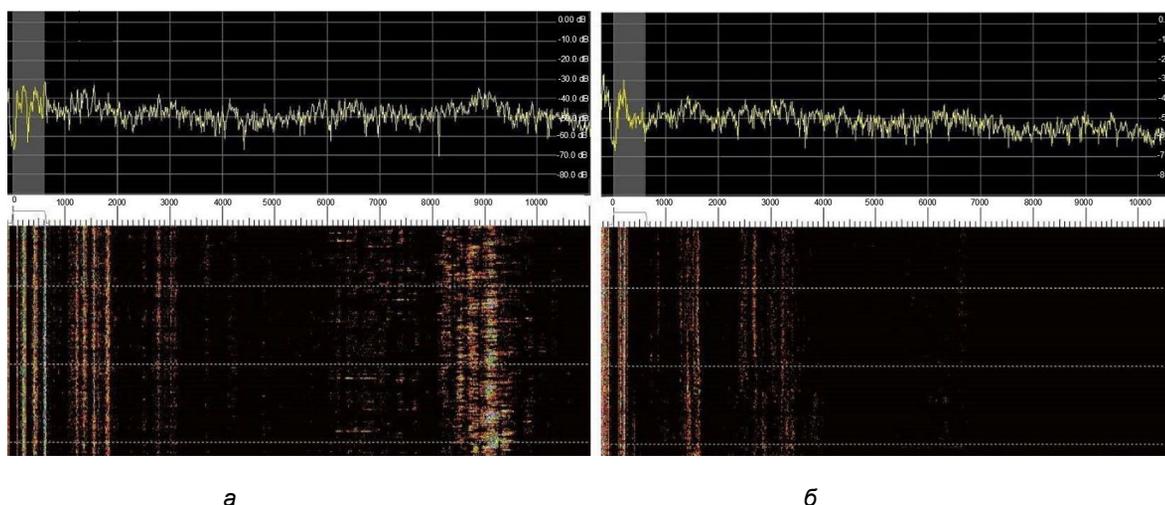


Рисунок 3 – Показания в первой точке:
 а – работа двигателя в режиме ограниченного функционирования;
 б – работа исправного двигателя
 Источник: составлено автором.

Figure 3 – Indications at the first point:
 a) engine operation in limited operation mode
 b) serviceable engine operation
 Source: compiled by the author.

• После регистрации звуковых параметров неисправность двигателя была устранена путем замены модуля зажигания. В результате цилиндры двигателя заработали равномерно, вышеперечисленные внешние отклонения в его работе были устранены. При движении АТС со скоростью 60 км/ч на III передаче частота вращения двигателя стабилизировалась на уровне 2,1 тыс. об/мин. Показатель крутящего момента – 139 Н·м. Показатель мощности – 30 кВт. Коэффициент полезной мощности двигателя – 0,39.

Второй этап – регистрация акустических сигналов двигателя с исправными режимами работы.

Были зарегистрированы сигналы двигателя с исправным режимом работы в аналогичных точках, указанных на рисунке 1.

Таким образом, получен архив из 6 записей. Данный архив разделен на две группы: первая – три записи при неисправно работающем двигателе; вторая – три записи при исправно работающем двигателе.

Третий этап – спектральное разложение полученных данных.

При анализе звуковых сигналов при помощи БПФ представляется возможным рас-

смотрение картины в частотной форме, где по оси ординат разложена амплитуда (дБ), а по оси абсцисс – частота. Для обработки данных использовалось программное обеспечение Spectrum Lab³ (автор – Wolfgang Buesher). Программа является универсальным средством для записи и анализа поступающего на вход звуковой карты сигнала. Однако программа способна анализировать предварительно записанный WAV-файл. Ранее зарегистрированные в ходе эксперимента сигналы записаны в формате MP3. При помощи конвертера файлы были преобразованы в формат WAV. Таким образом, записанные файлы были подготовлены к спектральному разложению полученных данных. На рисунках 3, 4, 5 изображена спектральная картина состояния исправного и неисправного ДВС в разных точках замеров, слева для неисправного двигателя: верхняя картина – амплитуда изменения уровня звука в зависимости от частоты, нижняя картина – визуализация спектра; справа – тоже для исправного двигателя. Условные обозначения визуализации спектра указаны на рисунке 6.

³ Spectrum Lab Users Manual [сайт]. URL: https://qsl.net/dl4yhf/specclab/SpecLab_Manual.pdf. Текст: электронный.

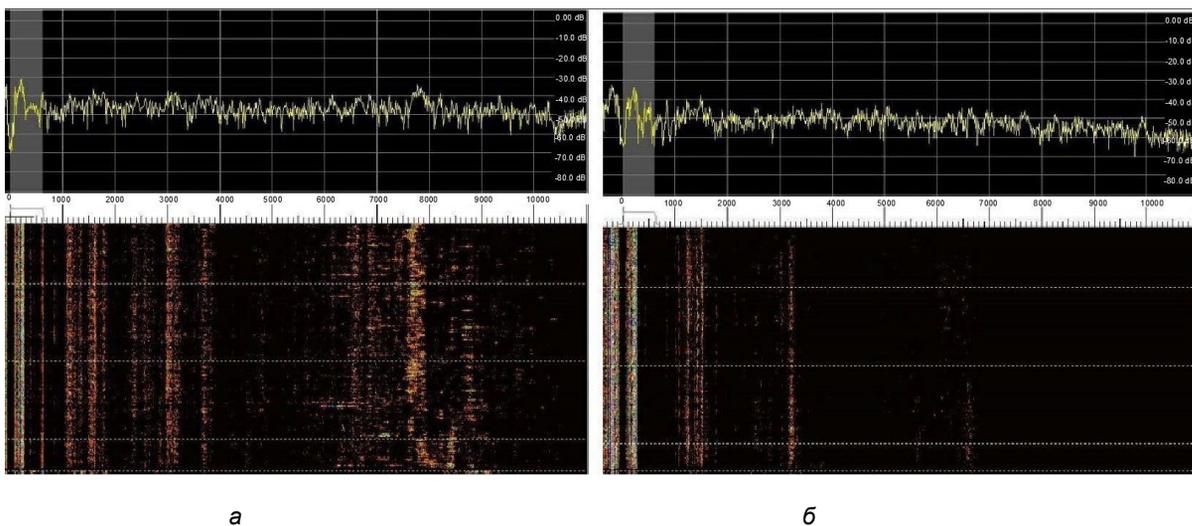


Рисунок 4 – Показания во второй точке:
 а – работа двигателя в режиме ограниченного функционирования; б – работа исправного двигателя
 Источник: составлено автором.

Figure 4 – Readings at the second point:
 a) engine operation in limited operation mode b) serviceable engine operation
 Source: compiled by the author.

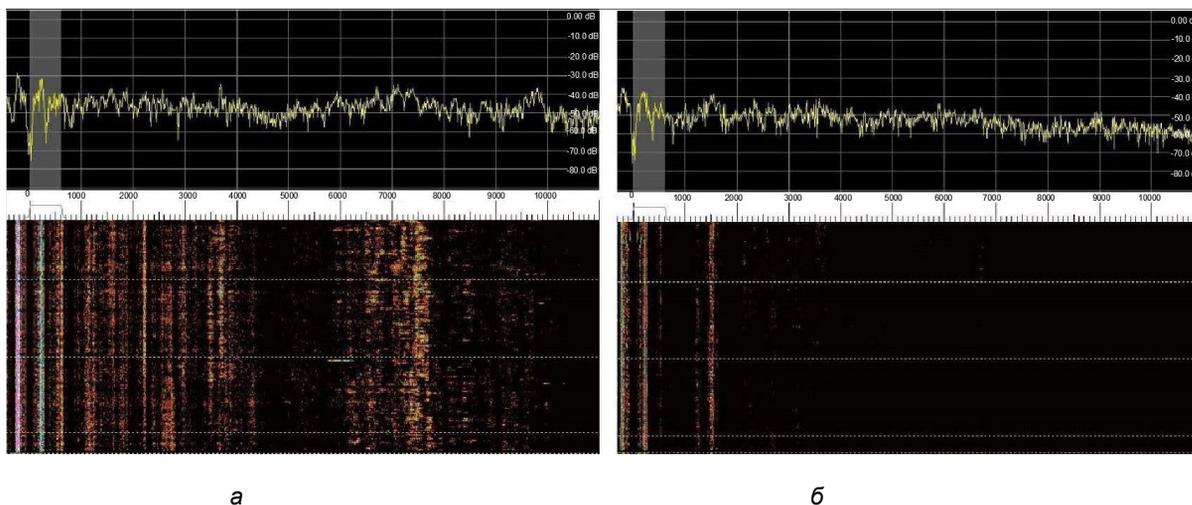


Рисунок 5 – Показания в третьей точке:
 а – работа двигателя в режиме ограниченного функционирования; б – работа исправного двигателя
 Источник: составлено автором.

Figure 5 – Indications at the third point:
 a) engine operation in limited operation mode
 b) serviceable engine operation
 Source: compiled by the author.

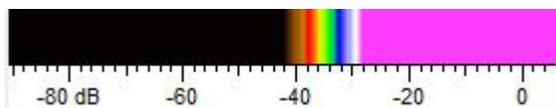


Рисунок 6 – Условные обозначения уровня звука
 Источник: составлено автором.

Figure 6 – Sound level symbols
 Source: compiled by the author.

РЕЗУЛЬТАТЫ

При обработке и анализе полученных результатов установлено:

– при неисправном двигателе наблюдается большее количество частот, при которых уровень звука достигает более 40 дБ;

– амплитуда звука более 40 дБ на диапазоне частот 4500 ... 5500 Гц в обоих состояниях двигателя отсутствует;

– диапазон частот, при котором можно обнаружить двигатель с нарушениями режима работы - 6000 ... 9500 Гц, в нем стабильно наблюдается повышение амплитуды уровня звука более 40 дБ при работе в режиме ограниченного функционирования; в исправном двигателе в данном диапазоне значения амплитуды уровня звука более 40 дБ отсутствуют.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе эксперимента были успешно зарегистрированы и проанализированы выходные данные акустических параметров как исправного двигателя, так и неисправного. Результатами эксперимента стали спектральные картины, на которых отчетливо прослеживается изменение амплитуды частоты и уровня звука исправного и неисправного двигателя в различных точках.

Был выявлен диапазон частот, при котором можно определить спектральную картину двигателя с нарушенными режимами работы и исправного двигателя. Таким диапазоном целесообразно считать 6000 ... 9500 Гц, так как именно в нем прослеживается повышение уровня звука более 40 дБ в режиме ограниченного функционирования двигателя во всех трех точках. Изменение максимальной плотности уровня звука в различных точках обусловлено удаленностью записывающего устройства и влиянием внешних шумовых факторов. Результаты исследования позволяют определить конкретные акустические параметры, при которых возможно идентифицировать двигатель с нарушенным режимом работы.

Примененный метод акустического диагностирования в сравнении с существующим методом сканирования не требует подключения аппаратуры измерения для контроля показаний встроенных датчиков, что упрощает диагностирование в «полевых» условиях, и исключает зависимость от исправности встроенных датчиков в силовой установке.

Таким образом, подобранные инструментарий, программное обеспечение и метод проведения эксперимента подтвердили возможность

достижения поставленной цели исследования и могут быть использованы для проведения экспериментов на натуральных стендах бензиновой и дизельной силовых установок, имеющих на кафедре наземных транспортно-технологических машин Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета, и обладающих возможностью задавать значительное количество различных режимов ограниченного функционирования электронных систем управления их работой.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Острецов Д.А. Проблемы грузоперевозок в России и пути их решения // Наука без границ. 2016. № 1 (1). С. 27–30.

2. Kuruma M., Kulikov A.V. Improving the organization of food transportation by road to shopping centres in Conakry (Guinea) by optimizing supply chains. // Архитектура, строительство, транспорт. 2021. № 2. С. 76–89. DOI 10.31660/2782-232X-2021-2-76-89.

3. Довольнов И.С. Анализ применимости методов подземного строительства гражданских и промышленных зданий // Архитектура, строительство, транспорт. DOI 10.31660/2782-232X-2021-2-50-57. 2021. № 2. С. 50–57.

4. Мусаелянц Г.Г., Павленко Е.А., Сысов Д.К. Способ диагностирования бензиновых двигателей с впрыском топлива с выявлением конкретных неисправностей // Вестник СибАДИ. 2018; 15 (1): 69–76. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2018-1-69-76>

5. Батялов А.А., Гордеев В.И. Системы технического диагностирования двигателей // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. 2003. № 5. С. 67–77.

6. Гончаров А.А., Гончаров Н.С. Совершенствование методики диагностирования датчика кислорода автомобильных двигателей // Вестник Оренбургского государственного университета. 2014. № 10(171). С. 236–240.

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 // Альтернативная энергетика и экология. 2014. № 16 (156). С. 61–77.

9. Лузина Н.П. Анализ результатов контроля технических изделий методом акустической эмиссии // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2011. № 3 (73). С. 78–83.

10. Дрейзин В.Э., Касем М.М. Возможности диагностики автомобильных двигателей путём анализа шума работающего двигателя // Известия Курского государственного технического университета. 2009.

11. Уваров Г.А. Совершенствование акустического метода диагностирования автомобильных бензиновых двигателей // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. Промышленность. Прикладные науки. 2014. № 3. С. 95–98.
12. Деев А.А. Акустические колебания в фрикционном контакте как способ контроля поверхностей трения на этапе приработки двигателей внутреннего сгорания // Вестник Рязанского государственного университета им. С. А. Есенина. 2010. № 29. С. 132–148.
13. Mathew S.K., & Zhang Y. Acoustic-Based engine fault diagnosis using WPT, PCA and Bayesian Optimization. *Applied Sciences*. 2020. 10(19), 6890. DOI: 10.3390/app10196890
14. Albarbar A., Gu F., & Ball A. Diesel engine fuel injection monitoring using acoustic measurements and independent component analysis. *Measurement*. 2010. 43(10), 1376–1386. DOI: 10.1016/j.measurement.2010.08.003
15. Deptuła A., Osiński P., & Radziwanowska U. Decision support system for identifying technical condition of combustion engine. *Archives of Acoustics*. 2016. 41(3). 449–460. DOI: 10.1515/aoa-2016-0046
16. Albarbar A., Gu, F., Ball A., & Starr A. Acoustic monitoring of engine fuel injection based on adaptive filtering techniques. *Applied Acoustics*. 2010. 71(12), 1132–1141. DOI: 10.1016/j.apacoust.2010.07.001
17. Broatch, A., Novella, R., García-Tiscar, J., Gómez-Soriano, J., & Pal, P. Analysis of combustion acoustic phenomena in compression–ignition engines using large eddy simulation. *Physics of Fluids* (1994). 2020. 32(8). DOI: 10.1063/5.0011929
18. Rahman M.S., Verma P., Zare A., Borghesani, P., Bodisco T. A., Ristovski Z., & Brown R.J. In-cylinder pressure reconstruction by engine acoustic emission. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2021. 152. 107490. DOI: 10.1016/j.ymsp.2020.107490
19. Jafari S.M., Mehdigholi H., & Behzad M. Valve fault diagnosis in internal combustion engines using acoustic emission and artificial neural network. *Shock and Vibration*. 2014. 1–9. DOI: 10.1155/2014/823514
20. Umair Ahmed U.A. F. A. Acoustic monitoring of an aircraft auxiliary power unit. *ISA Transactions*. 2023. 137. 670–691. DOI: 10.1016/0019-0578(92)90040-p
21. 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*. 2020. 154. 107460. DOI: 10.1016/j.measurement.2019.107460
22. Виноградов В.Ю., Сайфуллин А.А. Контроль технического состояния авиационных ГТД по акустическим параметрам, измеренным на срезе сопла двигателя // Вестник двигателестроения. 2012. № 2. С. 25–29.
23. Никитина Н.Е., Мотова Е.А., Тарасенко Ю.П. Неразрушающий контроль рабочих компрессорных лопаток авиационного двигателя // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). 2012. № 3-1 (34). С. 291–295.
24. Волчанина М.А. Статистические исследования сигналов акустического контроля при диагностировании силовых трансформаторов // Известия Транссиба. 2022. № 3. С. 80–89.
25. Черемсин В.Т., Кузнецов А.А., Волчанина М.А., Горлов А.В. Измерение параметров акустических сигналов имитатора дефектов силовых трансформаторов // Инновационные транспортные системы и технологии. 2020. № 4. С. 161–171.
26. Терехов В.И. Автоматизация определения характеристик звукового сигнала // Научно-практический электронный журнал Аллея Науки. 2022. № 7 (70).
27. Mayuraj Ekatpure, Sevlikar, R., & Kamble S. The Condition Monitoring of I.C. Engine using Acoustic Signal Analysis. *International Research Journal of Engineering and Technology*. 2022. 09(06). 1349–1352. Режим доступа: <http://www.irjet.net/archives/V9/i6/IRJET-V9I6238.pdf>

REFERENCES

1. Ostretsov D.A. Problems of a cargo transportation in russia and a way of their decision. *Nauka bez granits*. 2016; 1(1):27-30. (In Russ.)
2. Kuruma M., & Kulikov A.V. Improving the organization of food transportation by road to shopping centres in Conakry (Guinea) by optimizing supply chains. *Arkhitektura, stroitel'stvo, transport [Architecture, construction, transport]*. 2021; (2): 76-89. (In English). DOI: 10.31660/2782-232X2021-2-76-89
3. Dovolnov I.S. Analysis of the applicability of methods of underground construction of civil and industrial buildings. *Arkhitektura, stroitel'stvo, transport [Architecture, construction, transport]*. 2021; (2): 50-57. (In Rus.). DOI: 10.31660/2782-232X-2021-2-50-57
4. Musayelyants G.G., Pavlenko E.A., Sysoyev D.K. Diagnosing method of specific faults' identifying of gasoline engines with fuel injection. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2018; 15(1): 69–76. (In Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2018-1-69-76>
5. Batjalov A.A., Gordeev V.I. Systems of technical diagnosing of engines. *Bulletin of VSAW*. 2003; (5): 67–77. (In Russ.)
6. Goncharov A.A., Goncharov N.S. Improved methods of diagnosing oxygen sensor automobile engines. *Vestnik of the Orenburg State University*, 2014; (10(171)): 236–240. (In Russ.)
7. Gorbash V.G., Delendick M.N., Pavlenko P.N. Nondestructive testing in Industry. *Acoustic testing. Nondestructive testing and diagnostics*. 2011; (4): 35–51. (In Russ.)
8. Rybochkin A.F., Smirnov A.V., Savelyev S.V. Diagnosing the condition of a running automobile engine based on analysis of the acoustic noise it produces. *Alternative Energy and Ecology (ISJAE)*. 2014; 16 (156): 61–77. (In Russ.)
9. Luzina N.P. Analysis of the results of control of technical products by acoustic emission method. *Scientific and Technical Bulletin of Information Technologies, Mechanics and Optics*. 2011; 3 (73): 78–83. (In Russ.)

10. Dreisin V.E., Kasem M.M. Possibilities of diagnostics of automobile engines by analyzing the noise of the running engine. *Proceedings of the Kursk State Technical University*. 2009;2 (27): 32–35. (In Russ.).
11. Uvarov G.A. Improvement of the acoustic method for diagnosing automobile gasoline engines. *Bulletin of Polotsk State University. Series B. Industry. Applied Science*. 2016; (3):95–98. (In Russ.).
12. Deev A.A. Acoustic vibrations in frictional contact as a way to control friction surfaces during the running-in stage of internal combustion engines. *Bulletin of the Ryazan State University. S. a. Yesenina*. 2008; (29):132–148. (In Russ.)
13. Mathew S.K., & Zhang Y. Acoustic-Based engine fault diagnosis using WPT, PCA and Bayesian Optimization. *Applied Sciences*. 2020;10(19), 6890. DOI: 10.3390/app10196890
14. Albarbar A., Gu F., & Ball A. Diesel engine fuel injection monitoring using acoustic measurements and independent component analysis. *Measurement*. 2010; 43(10): 1376–1386. DOI: 10.1016/j.measurement.2010.08.003
15. Deptuła A., Osiński P., & Radziwanowska U. Decision support system for identifying technical condition of combustion engine. *Archives of Acoustics*. 2016; 41(3): 449–460. DOI: 10.1515/aoa-2016-0046
16. Albarbar A., Gu F., Ball A., & Starr A. Acoustic monitoring of engine fuel injection based on adaptive filtering techniques. *Applied Acoustics*. 2010; 71(12): 1132–1141. DOI: 10.1016/j.apacoust.2010.07.001
17. Broatch A., Novella R., García-Tíscar J., Gómez-Soriano J., & Pal P. Analysis of combustion acoustic phenomena in compression–ignition engines using large eddy simulation. *Physics of Fluids (1994)*. 2020; 32(8). DOI: 10.1063/5.0011929
18. Rahman M.S., Verma P., Zare A., Borghesani, P., Bodisco T. A., Ristovski Z., & Brown R.J. In-cylinder pressure reconstruction by engine acoustic emission. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2021; 152. 107490. DOI: 10.1016/j.ymssp.2020.107490
19. Jafari S.M., Mehdiqholi H., & Behzad M. Valve fault diagnosis in internal combustion engines using acoustic emission and artificial neural network. *Shock and Vibration*. 2014; 1–9. DOI: 10.1155/2014/823514
20. Umair Ahmed U.A. F. A. Acoustic monitoring of an aircraft auxiliary power unit. *ISA Transactions*. 2023; 137: 670–691. DOI: 10.1016/0019-0578(92)90040-p
21. 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*. 2020; 154. 107460. DOI: 10.1016/j.measurement.2019.107460
22. Vinogradov V.U., Sayfullin A.A. Monitoring the technical condition of aviation gas turbine engines using acoustic parameters measured at the engine nozzle exit. *Bulletin of Engine Building*. 2012; (2): 25–29. (In Russ.)
23. Nikitina N.E., Motova E.A., Tarasenko U.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.)
24. Volchanina M.A. Statistical studies of acoustic control signals when diagnosing power transformers. «Izvestia Transsiba» (Journal of Transsib Railway Studies). 2020; (3): 80–89. (In Russ.).
25. Cheremsin V.T., Kuznetsov A.A., Volchanina M.A. Measurement of parameters of acoustic signals of a power transformer defect simulator. *Innovative Transport Systems and Technologies*. 2020; (4): 161–171. (In Russ.). DOI 10.17816/transsyst202064161-171
26. Terekhov V.I. Automation of determining the characteristics of a sound signal. *Scientific and Practical Electronic Journal Alley of Science*. 2022; 7 (70). (In Russ.)
27. Mayuraj Ekatpure, Sevlikar, R., Kamble, S. The Condition Monitoring of I.C. Engine using Acoustic Signal Analysis. *International Research Journal of Engineering and Technology*. 2022; 09(06): 1349–1352. Available at: //www.irjet.net/archives/V9/I6/IRJET-V9I6238.pdf

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

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:** 0009-0008-0565-5440, **SPIN-код:** 1960-0168, e-mail: moymail_2014@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Vladimir D. Gabidulin – Postgraduate Student of the Ground Transportation and Technological Machines Department, Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (4, 2 Krasnoarmeiskaia Str., St Petersburg, 190005), **ORCID:** 0009-0008-0565-5440, **SPIN-код:** 1960-0168, e-mail: moymail_2014@mail.ru