

DOI: 10.12731/2227-930X-2024-14-2-286
УДК 629.3.014



Научная статья |
Эксплуатация автомобильного транспорта

СИСТЕМА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ НА ОСНОВЕ ИЗМЕРЕНИЯ И АНАЛИЗА ВИБРАЦИИ

*А.Г. Садриев, Д.М. Шамсутдинов, С.А. Вильцын,
М.Х. Низамутдинов, О.В. Иванова*

Актуальность темы данного исследования обусловлена необходимостью обеспечения надежной эксплуатации транспортных средств и минимизации рисков перебоев в работе двигателей внутреннего сгорания (ДВС). Часто встречаемым явлением в работе двигателя считается пропуск зажигания, который негативно отражается на эффективности работы ДВС и может привести к аварийным ситуациям, влекущим за собой значительные финансовые и временные потери для коммерческих компаний. Постановка проблемы заключается в необходимости раннего выявления и предотвращения подобных неисправностей.

***Цель** – разработка и тестирование системы регистрации и анализа технического состояния ДВС посредством вибрационных измерений.*

***Метод и методология проведения работы.** В работе применялся метод безразборного диагностирования, использование которого повышает эффективность определения технического состояния двигателя внутреннего сгорания транспортного средства.*

Результаты. В статье описана разработанная авторами система для проверки технического состояния двигателя внутреннего сгорания на основе измерения и анализа вибрационных сигналов.

В среде MATLAB разработано программное обеспечение для обработки и записи данных вибрации и сигнала синхронизации. Проведено расчетно-экспериментальное исследование влияния дефектов в механизмах и системах ДВС на равномерность временно-амплитудной характеристики импульсов вибрации каждого отдельно взятого цилиндра, которые возникают во время работы двигателя.

В качестве основного вывода авторами отмечается, что разработанная система позволяет оперативно и неинвазивно определить неработающий цилиндр или тот цилиндр, вклад которого, по сравнению с другими, во вращательное движение коленчатого вала является наименьшим. Данная система позволяет провести диагностику двигателя за короткое время с использованием доступных средств.

Область применения результатов. Результаты исследований апробированы в условиях сервисного предприятия при проведении диагностирования ДВС легковых автомобилей и грузового автотранспорта, и могут быть применимы как авторемонтными мастерскими, так и автолюбителями.

Ключевые слова: диагностика; виброакустическая диагностика; вибрация; синхронизация; амплитуда; частота; MATLAB; программное обеспечение; программный код; дефект; двигатель внутреннего сгорания; ДВС

Для цитирования. Садриев А.Г., Шамсутдинов Д.М., Вильцын С.А., Низамутдинов М.Х., Иванова О.В. Система определения технического состояния двигателя внутреннего сгорания на основе измерения и анализа вибрации // International Journal of Advanced Studies. 2024. Т. 14, № 2. С. 32-50. DOI: 10.12731/2227-930X-2024-14-2-286

Original article | Operation of Road Transport

SYSTEM FOR DETERMINING THE TECHNICAL CONDITION OF AN INTERNAL COMBUSTION ENGINE BASED ON MEASUREMENT AND ANALYSIS OF VIBRATION

*A.G. Sadriev, D.M. Shamsutdinov, S.A. Viltsyn,
M.Kh. Nizamutdinov, O.V. Ivanova*

*The **relevance** of the topic of this study is due to the need to ensure reliable operation of vehicles and minimize the risks of interruptions in the operation of internal combustion engines (ICE). A common phenomenon in operation is misfiring, which negatively affects the efficiency of the ICE and can lead to emergencies that entail significant financial and temporary losses for commercial companies. The problem is the need to identify and prevent such malfunctions early.*

*The **purpose** of the study is to develop and test a system for monitoring and analyzing the technical condition of the internal combustion engine through vibration measurements.*

***Method and methodology.** The work used the method of in-place diagnostics, the use of which increases efficiency of determining the technical condition of the vehicle internal combustion engine.*

***Results.** This article describes the system developed by the authors for checking the technical condition of an internal combustion engine. As a result, software to process and record vibration and timing data has been developed in MATLAB. The study of influence of defects in mechanisms and systems of internal combustion engine on uniformity of time-amplitude characteristic of vibration pulses of each individual cylinder, which occur during operation of internal combustion engine, was carried out by calculation and experimentation.*

As a key conclusion, it is noted that the developed system allows to quickly and non-invasively identify the idle cylinder or the one of

which contribution to the rotational movement of the crankshaft is the least compared to others. The research makes it possible to provide diagnostics in a short time using available means.

Scope of application of the results. *The research results were tested in the conditions of a service company when diagnosing the internal combustion engines of passenger cars and trucks, and can be applied by both car repair shops and car enthusiasts.*

Keywords: *diagnostics; vibration diagnostics; vibration; synchronization; amplitude; frequency; MATLAB; software; program code; defect; internal combustion engine; ICE*

For citation. *Sadriev A.G., Shamsutdinov D.M., Viltsyn S.A., Nizamutdinov M.Kh., Ivanova O.V. System for Determining the Technical Condition of an Internal Combustion Engine Based on Measurement and Analysis of Vibration. International Journal of Advanced Studies, 2024, vol. 14, no. 2, pp. 32-50. DOI: 10.12731/2227-930X-2024-14-2-286*

Введение

В современном мире автомобили являются сложными системами мехатроники, собранными из огромного разнообразия материалов, при этом детали отличаются высокой степенью производства. Известно, что с течением времени эксплуатационные характеристики автомобилей претерпевают изменения. С развитием технологий в области автомобилестроения и диагностики появляются новые прогрессивные методы для обнаружения неисправностей и оценки условий эксплуатации техники. Понятие «техническая диагностика» охватывает теоретические и практические знания, а также средства, применяемые для определения текущего технического состояния различных устройств и механизмов.

Сегодня наблюдается тенденция применения методов, позволяющих оценивать состояние оборудования без его разборки, так называемых «предиктивных методов», что способствует сокращению расходов на его техническое обслуживание. Одним из та-

ких эффективных методов является вибрационная диагностика. Этот метод анализирует характеристики вибраций, излучаемые в процессе функционирования оборудования, для выявления потенциальных дефектов [9].

Цель работы: разработка приложения и устройства синхронизации фаз вибраций с положением коленчатого вала для пользователей, который упрощает процесс определения неисправного цилиндра, уменьшая временные и экономические затраты.

Материалы и методы

В качестве методов исследования были выбраны регистрация и анализ виброакустических сигналов, позволяющие оперативно оценивать техническое состояние поршневых двигателей внутреннего сгорания.

В процессе диагностирования силовых агрегатов их систем и механизмов используют обширный спектр методов, которые можно разделить по способу получения информации о текущем его состоянии, перечисленные ниже [4-5, 13].

1. Оценка эффективности: отслеживание изменений рабочих параметров агрегата и сравнение их с нормативами.
2. Виброакустический контроль: анализ вибрации и звука, генерируемых агрегатом, может помочь уловить неправильную работу или износ компонентов.
3. Проверка давления сжатия: оценка давления в цилиндрах двигателя может указывать на состояние сальников, клапанов и поршневой группы.
4. Анализ пульсаций давления на выпуске: помогает определить равномерность и корректность открытия и закрытия выпускных клапанов.
5. Анализ состава выхлопных газов: показатели состава смеси могут указывать на отклонение формирования топливно-воздушной смеси и качество ее сгорания с учетом режимов работы двигателя.

6. Мониторинг давления в картере: увеличение давления может быть признаком износа и потери упругости поршневых колец или неисправности других компонентов двигателя.
7. Анализ параметров системы зажигания: отклонение параметров искрообразования может свидетельствовать о неисправности при накоплении энергии и формировании искрового разряда.
8. Отслеживание неравномерности вращения коленчатого вала: неравномерность может свидетельствовать о недостаточном вкладе одного из цилиндров в работу двигателя.
9. Исследование работающего моторного масла: оценка концентрации металлических частиц для установления причин их образования и выявления предельного износа трущихся деталей двигателя.
10. Сопоставление моделей и данных: сравнение показателей, полученных в ходе испытаний, с математическими моделями для выявления отклонений.
11. Ультразвуковое тестирование: выявление внутренних дефектов, таких как трещины и износ.
12. Контроль температуры и уровня масла: позволяет оценить работоспособность системы охлаждения и смазки двигателя.
13. Тепловизионная диагностика: указывает на перегрев отдельных узлов двигателя из-за повышенного трения и потенциальную опасность их отказа.
14. Геометрические измерения: проверка размеров деталей и соответствие их первоначальным номинальным параметрам для выявления износа или деформации деталей, узлов и агрегатов.

С появлением доступных средств виброакустической диагностики, предназначенных для измерения вибраций и шумов высокочастотного диапазона, а также для спектрального анализа таких сигналов, стали актуальными исследования, направленные

на разработку специализированных методов обработки этих сигналов в области производства и технической эксплуатации автомобилей.

Результаты этих исследований показали, что данные, содержащиеся в сигнале вибрации, несут значимую информацию. Информация, получаемая традиционными методами диагностирования, повторяет и, тем самым, подтверждает данные сигнала вибрации [2-3, 12, 14-18]. Авторы [8, 10-11] показали, что дефекты начинают возникать задолго до аварийного состояния. Дефекты в узлах двигателей влияют на их вибрацию и уровень шума. Основной сложностью выделения искомым величин в вибрационном сигнале является их разграничение с изменениями, вызванными колебаниями нагрузки и температуры компонентов, неравномерностью частоты вращения и других рабочих параметров двигателя.

Вибрационный сигнал работающего двигателя внутреннего сгорания содержит большое количество информации о его состоянии. Диагностирование по параметрам вибраций дополнит существующие применяемые на практике методы определения технического состояния двигателя внутреннего сгорания.

Результаты и обсуждения

Для решения проблемы выхода из строя узлов ДВС предлагается внедрение системы определения технического состояния на основе измерения вибрации в реальном времени, что позволит обнаруживать неисправности на ранних стадиях в процессе эксплуатации и даст возможность локализовать их.

Для осуществления записи сигналов вибраций и их синхронизации по положению коленчатого вала написан программный код, на основе которого разработаны мобильное приложение записи сигнала вибраций ДВС и устройство синхронизации фаз вибраций с положением коленчатого и распределительного валов. Внешний вид приложения показан на рис. 1.

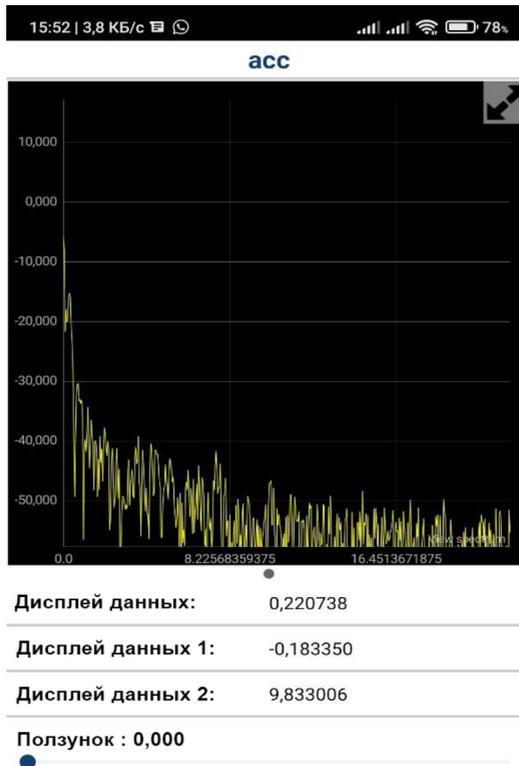


Рис. 1. Приложение для записи данных со смартфона

Для проведения корректного диагностирования поршневых машин по вибросигналам необходимо жестко синхронизировать сигналы вибрации с положением коленчатого вала для того, чтобы точно выделять в полном исходном сигнале временные зоны, соответствующие тем или иным фазам работы оборудования, в том числе ДВС [1, 6].

В связи с этим был разработан отдельным прибор, позволяющий регистрировать прохождение поршнем первого цилиндра верхней мертвой точки (ВМТ) в конце такта сжатия. Прибор состоит из датчика Холла, микроконтроллера и питающего элемента.

Для качественного замера вибрационных данных необходимо подобрать вибродатчики с определенными амплитудно-частотными характеристиками. В случае ДВС диапазон частот колебаний находится в пределах от сотен Гц до 1 кГц. Из этого следует, что можно применять микроэлектромеханические акселерометры, позволяющие измерять вибрации с частотой до 5 кГц.

Измерение вибрации осуществляли посредством смартфона, оборудованного трехосевым акселерометром LSM6DS3, характеристики которого приведены в таблице 1.

Таблица 1.

Основные характеристики встроенного в смартфон акселерометра [6]

Характеристики	Значение
Модель	LSM6DS3
Состав	Акселерометр и гироскоп
Диапазон измерения	$\pm 2, \pm 4, \pm 8, \pm 16 \text{ g};$ $\pm 125/\pm 245/\pm 500/\pm 1000/\pm 2000$ (диапазон полной шкалы)
Напряжение питания, В	1,71...3,6
Рабочая температура, °С	-40...85
Ток потребления, мкА	24
ODR для акселерометра, Гц	12,5...6664

Одной из базовых характеристик датчика ускорения является частота дискретизации, Output data rates (ODR) и чувствительность. Чтобы не потерять качество сигнала необходимо использовать акселерометр, частота измерения которого как минимум в 2 раза превышает, согласно теореме Котельникова, собственную частоту колебаний объекта измерения [7]. Исходя из этого, можно сделать вывод, что данный датчик соответствует требованиям и для измерения и анализа силового агрегата автомобиля, при условии, что частота колебаний в процессе сгорания не будет превышать значение – 3332 Гц.

Опытные замеры получены с двигателя автомобиля Ford Fusion. Сигналы снимались осциллографом АК ИП 4701/1 непосредствен-

но с датчика положения распределительного вала и разработанным устройством синхронизации. На рис. 2 синей стрелкой показано место расположения датчика положения распределительного вала (ДПРВ), а зеленой – расположение устройства синхронизации вблизи действия электромагнитного поля топливной форсунки первого цилиндра.



Рис. 2. Подключение измерительного оборудования

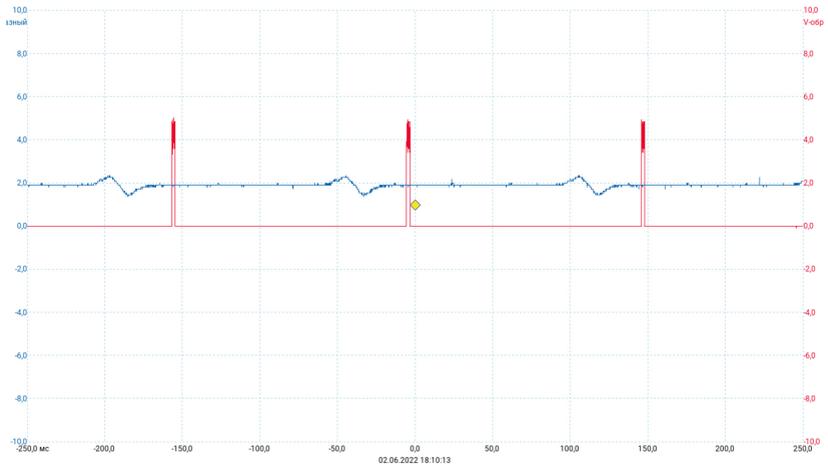


Рис. 3. Сигналы синхронизации

На рис. 3 синий график показывает сигнал от ДПРВ, который в свою очередь определяет время момент прохождения поршнем ВМТ такта сжатия первого цилиндра и синхронизирует управление форсунками, а красный график - сигнал устройства синхронизации.

На рис. 4 цифрами указаны номера цилиндров, согласно последовательности работы цилиндров ДВС. В данном случае сигналы зарегистрированы посредством встроенного в смартфон трехосевого акселерометра и устройства виброакустической синхронизации.

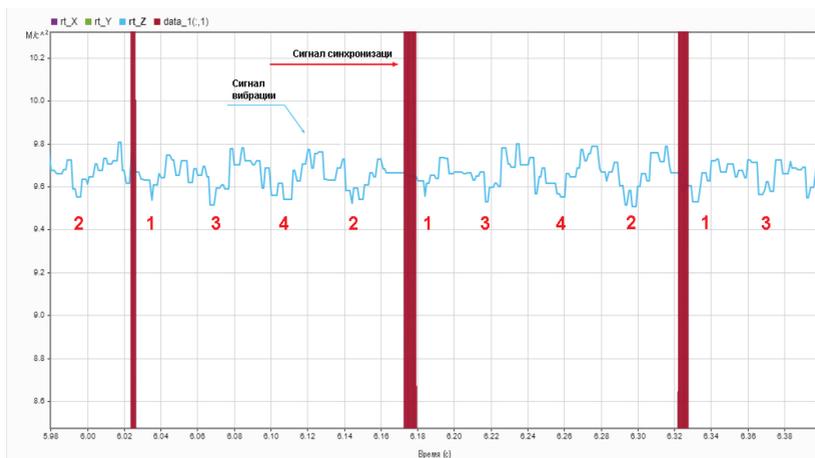


Рис. 4. График виброакустического сигнала

На рис. 5 (а, б) представлены результаты визуализации анализа записанных сигналов. Сигналы показаны с привязкой к углу поворота коленчатого вала, также показан момент искрообразования с указанием номера цилиндра, (последовательность работы цилиндров 1-3-4-2).

На рис. 5 (а) показан график сигнала вибрации с синхронизацией по первому цилиндру при исправной работе всех цилиндров, а на рис. 5 (б) – сигнал вибрации с имитацией неисправности ра-

боты системы зажигания, выполненной при помощи отключения высоковольтного провода четвертого цилиндра ДВС.

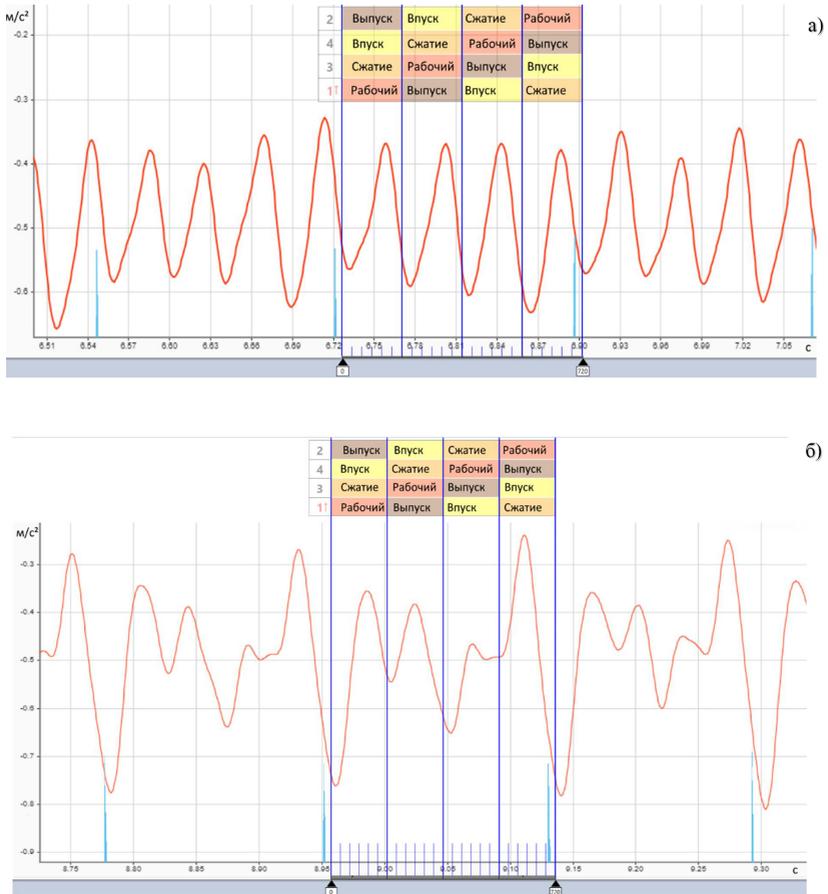


Рис. 5. График сигналов: а) при исправной работе всех цилиндров; б) при отключении четвертого цилиндра

Анализируя график вибрации с учетом сигнала устройства синхронизации, зная порядок работы цилиндров, нетрудно определить к какому цилиндру относятся фазы вибраций. Предложенный способ упрощает процесс определения неработающего цилиндра.

Выводы

Разработанная система позволяет определять техническое состояние ДВС на основе измерения и анализа сигнала вибрации. Корректность показаний и работоспособность была подтверждена при использовании системы в реальных условиях эксплуатации.

Достоинством данной установки является высокая точность диагностирования, мобильность, автономность, простая методика тестирования.

Необходимо отметить, что методика не требует значительных капиталовложений, так как используется высококачественный акселерометр мобильного телефона.

Доступность предложенного способа приобретает ключевое значение в процессе диагностики технического состояния автомобиля.

Список литературы

1. Вибродиагностика поршневых двигателей / Юдин П. Е., Лимонова И. А., Лиманов И. А. // Актуальные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций: материалы Всерос. науч.-техн. конференции. Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева. 2011. С. 99-103.
2. Волков Ю.В. Об особенностях оценки технического состояния дизелей на основе анализа вибросигналов // Вестник ВСГТУ. 2018. № 2. С. 5-12.
3. Диагностирование газораспределительного механизма виброакустическим методом / Грищенко А.В., Шепелев В.Д., Альметова З.В., Шепелева Е.В. // Вестник ЮУрГУ. 2017. Т. 17, №3. С. 48-57.
4. Диагностирование дизелей / Никитин Е.А., Станиславский Л.В., Улановский Э.А. и др. М: Машиностроение, 1987. 224 с.
5. Ждановский Н.С. Диагностика автотракторных двигателей. Л.: Колос, 1977. 264 с.
6. Костюков В. Н., Науменко А. П. Практические основы виброакустической диагностики машинного оборудования: учебное пособие. Омск: ОмГТУ, 2002. 125 с.

7. Котельников В. А. О пропускной способности «эффира» и проволоки в электросвязи // УФН. 2006. Том 176. №7. С. 762-770.
8. Методика расчёта характеристик бензинового двигателя и дизеля с отключаемыми цилиндрами / Савастенко А.А., Алексеев И.В., Иванов И.Е., Яковенко А.Л., Савастенко Э.А. // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). 2018. № 2(53). С. 30-37.
9. Новиков Д.С. Анализ вибрации двигателя в составе автомобильного силового агрегата: Дис. ... кандидата технических наук. Ярославль, 2013. 151 с.
10. Оценка крутящего момента двигателя по внутрицикловой вариации угловой скорости коленчатого вала на автомобиле / Сафонов П.В., Першутин Е.А., Алексеев И.В., Иванов И.Е., Богданов С.Н. // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). 2012. № 1 (28). С. 50-56.
11. Савастенко Э.А. Регулирование двигателя с искровым зажиганием изменением его рабочего объёма: Автореферат дис. ... кандидата технических наук. Москва, 2016. 15 с.
12. Формирование вектора диагностических признаков на основе характеристической функции виброакустического 536 сигнала / Костюков В.Н., Науменко А.П., Бойченко С.Н., Кудрявцева И.С. // Контроль. Диагностика. 2016. № 8. С. 22-29.
13. Sharkey A. J. C., Chandroth G. O. Acoustic emission, cylinder pressure and vibration: A multisensor approach to robust fault diagnosis // IEEE, International Joint Conference on Neural Networks. Como, Itali. 2000. Vol. 6. P. 223-228.
14. Gelle G., Colas M., Serviere C. Blind source separation: a tool for rotating machine monitoring by vibration analysis // Journal of Sound and Vibration. 2001. Vol. 248. P. 865-885.
15. Shibata K., Takahashi A., Shirai T. Fault diagnosis of rotating machinery through visualization of sound signals // Mechanical Systems and Signal Processing. 2000. Vol. 14. P. 229-241.

16. Geng Z., Chen J., Hull B. Analysis of engine vibration and design of an applicable diagnosis approach // *International Journal of Mechanical Science*. 2003. Vol. 45. P. 1391-1410.
17. Wang Q.W., Ismail F., Golnarghi F. Assessment of gear damage monitoring techniques using vibration measurements // *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2001. Vol. 5. P. 905-922.
18. Zheng H., Li Z., Chen X. Gear fault diagnosis based on continuous wavelet transform // *Mechanical System and Signal Processing*. 2002. Vol. 16. P. 447-457.

References

1. Yudin P. E., Limonova I. A., Limanov I. A. Vibrodiagnostics of piston engines. *Actual problems of radio electronics and telecommunications: proceedings of the All-Russian scientific and technical conference*. Samara State Aerospace University, 2011, pp. 99-103.
2. Volkov Yu.V. On the peculiarities of the technical condition assessment of diesel engines based on the analysis of vibration signals. *Vestnik VSGTU*, 2018, no. 2, pp. 5-12.
3. Grishchenko A.V., Shepelev V.D., Almetova Z.V., Shepeleva E.V. Diagnostics of the gas distribution mechanism by the vibroacoustic method. *Bulletin of SUSU*, 2017, vol. 17, no. 3, pp. 48-57.
4. Nikitin E.A., Stanislavskiy L.V., Ulanovskiy E.A. et al. *Diagnostics of diesel engines*. Moscow: Mashinostroenie, 1987, 224 p.
5. Zhdanovsky N.S. *Diagnostics of automobile and tractor engines*. L.: Kolos, 1977, 264 p.
6. Kostyukov V.N., Naumenko A. P. *Practical bases of vibroacoustic diagnostics of the machine equipment*: textbook. Omsk: OmSTU, 2002, 125 p.
7. Kotelnikov V. A. About the throughput capacity of the “ether” and wire in telecommunication. *Uspekhi physicheskikh nauk*, 2006, vol. 176, no. 7, pp. 762-770.
8. Savastenko A.A., Alekseev I.V., Ivanov I.E., Yakovenko A.L., Savastenko E.A. Methodology for calculating the characteristics of gasoline engine and diesel engine with disconnected cylinders. *Bulletin*

- of Moscow Automobile and Road State Technical University (MADI)*, 2018, no. 2(53), pp. 30-37.
9. Novikov D.S. *Analysis of the engine vibration as a part of an automobile power unit*. Yaroslavl, 2013, 151 p.
 10. Safronov P.V., Pershutin E.A., Alekseev I.V., Ivanov I.E., Bogdanov S.N. Estimation of the engine torque by the intra-cycle variation of the crankshaft angular velocity on the automobile. *Bulletin of Moscow Automobile and Road State Technical University (MADI)*, 2012, no. 1 (28), pp. 50-56.
 11. Savastenko E.A. *Regulation of the engine with spark ignition by changing of its working volume*. Moscow, 2016, 15 p.
 12. Kostyukov V.N., Naumenko A.P., Boychenko S.N., Kudryavtseva I.S. Formation of the diagnostic features vector on the basis of the characteristic function of the vibroacoustic 536 signal. *Control. Diagnostics*, 2016, no. 8, pp. 22-29.
 13. Sharkey A. J. C., Chandroth G. O. Acoustic emission, cylinder pressure and vibration: A multisensor approach to robust fault diagnosis. *IEEE, International Joint Conference on Neural Networks*. Como, Itali, 2000, vol. 6, pp. 223-228.
 14. Gelle G., Colas M., Serviere C. Blind source separation: a tool for rotating machine monitoring by vibration analysis. *Journal of Sound and Vibration*, 2001, vol. 248, pp. 865-885.
 15. Shibata K., Takahashi A., Shirai T. Fault diagnosis of rotating machinery through visualization of sound signals. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2000, vol. 14, pp. 229-241.
 16. Geng Z., Chen J., Hull B. Analysis of engine vibration and design of an applicable diagnosis approach. *International Journal of Mechanical Science*, 2003, vol. 45, pp. 1391-1410.
 17. Wang Q.W., Ismail F., Golnarghi F. Assessment of gear damage monitoring techniques using vibration measurements. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2001, vol. 5, pp. 905-922.
 18. Zheng H., Li Z., Chen X. Gear fault diagnosis based on continuous wavelet transform. *Mechanical System and Signal Processing*, 2002, vol. 16, pp. 447-457.

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Садриев Артур Гадифович, магистрант кафедры «Вычислительная техника и инженерная кибернетика»

Уфимский государственный нефтяной технический университет

ул. Космонавтов, 1, г. Уфа, Республика Башкортостан, 450062, Российская Федерация

sadriev-artur@bk.ru

Шамсутдинов Данир Миннихатович, доцент кафедры «Эксплуатация наземного транспорта в нефтегазовой промышленности и строительстве», кандидат физико-математических наук
Уфимский государственный нефтяной технический университет

ул. Космонавтов, 1, г. Уфа, Республика Башкортостан, 450062, Российская Федерация

danir@mail.ru

Вильцын Станислав Анатольевич, доцент кафедры «Вычислительная техника и инженерная кибернетика»

Уфимский государственный нефтяной технический университет

ул. Космонавтов, 1, г. Уфа, Республика Башкортостан, 450062, Российская Федерация

viltsyn_s.a@mail.ru

Низамутдинов Малик Халилович, доцент кафедры «Эксплуатация наземного транспорта в нефтегазовой промышленности и строительстве», кандидат технических наук

Уфимский государственный нефтяной технический университет

ул. Космонавтов, 1, г. Уфа, Республика Башкортостан, 450062, Российская Федерация

nizmal@mail.ru

Иванова Ольга Владимировна, доцент кафедры «Эксплуатация наземного транспорта в нефтегазовой промышленности и строительстве», кандидат технических наук, доцент
Уфимский государственный нефтяной технический университет
ул. Космонавтов, 1, г. Уфа, Республика Башкортостан, 450062, Российская Федерация
olgachemist@mail.ru

DATA ABOUT THE AUTHORS

Artur G. Sadriev, Graduate Student, Department of Computer Science and Engineering Cybernetics
Ufa State Petroleum Technological University
1, Kosmonavtov Str., Ufa, Bashkortostan, 450062, Russian Federation
sadriev-artur@bk.ru
SPIN-code: 7612-3163
ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-3473-3359>
ResearcherID: ITU-6131-2023

Danir M. Shamsutdinov, Assistant Professor, Department of Operation of Ground Transport in Oil, Gas, and Construction Industries, Candidate of Physical and Mathematical Sciences
Ufa State Petroleum Technological University
1, Kosmonavtov Str., Ufa, Bashkortostan, 450062, Russian Federation
danir@mail.ru
SPIN-code: 1334-8596
ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-4981-3698>
ResearcherID: IQR-7200-2023
Scopus Author ID: 6507089452

Stanislav A. Viltzyn, Assistant Professor, Department of Computer Engineering and Engineering Cybernetics

*Ufa State Petroleum Technological University
1, Kosmonavtov Str., Ufa, Bashkortostan, 450062, Russian Fe-
deration
viltsyn_s.a@mail.ru*

Malik Kh. Nizamutdinov, assistant professor, Department of Oper-
ation of Ground Transport in Oil, Gas, and Construction Indus-
tries, Candidate of Technical Science
*Ufa State Petroleum Technological University
1, Kosmonavtov Str., Ufa, Bashkortostan, 450062, Russian Fe-
deration
nizmal@mail.ru
SPIN-code: 7729-9170
ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-9447-6126>
ResearcherID: KIK-7379-2024*

Olga V. Ivanova, Assistant Professor, Department of Operation of
Ground Transport in Oil, Gas, and Construction Industries,
Candidate of Technical Science, Associate Professor
*Ufa State Petroleum Technological University
1, Kosmonavtov Str., Ufa, Bashkortostan, 450062, Russian Fe-
deration
olgachemist@mail.ru
SPIN-code: 1380-7421
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6678-8369>
ResearcherID: S-4929-2017
Scopus AuthorID: 57195293974*

Поступила 30.04.2024
После рецензирования 25.05.2024
Принята 07.06.2024

Received 30.04.2024
Revised 25.05.2024
Accepted 07.06.2024