

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ (ПО ВИДАМ ИЗМЕРЕНИЙ)/THE DEVICES AND METHODS OF MEASUREMENT (BY TYPES OF MEASUREMENTS)

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.155.31>

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ГЛАВНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ТЕПЛОХОДА ПРОГРАММНЫМ КОМПЛЕКСОМ ДИАГНОСТИКИ ПО ВИБРОАКУСТИЧЕСКИМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ

Научная статья

Рыжих В.В.^{1,*}¹ ORCID : 0009-0001-5498-1487;¹ Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (ryzhikh.vv[at]dvfu.ru)

Аннотация

В статье проведено исследование виброакустических сигналов судовых дизельных двигателей V-образной компоновки (14ZV40), работающих на частоте 420 об/мин, с целью выявления диагностических признаков неисправностей. Рассмотрены методы спектрального анализа, корреляционных функций, когерентности, кепстрального анализа и вейвлет-преобразований. Выявлены основные частоты, связанные с оборотами двигателя и вспышками цилиндров, проведена их взаимосвязь между главными двигателями левого и правого бортов. Приведён анализ преимуществ разложения на эмпирические моды и масштабно-временных характеристик, что позволяет эффективно диагностировать неисправности. Представлены скейлограммы сигналов для визуализации процессов.

Ключевые слова: виброакустическая диагностика, спектральный анализ, кепстральный анализ, вейвлет-анализ, виброускорение, скейлограмма, частота вращения, частота вспышек цилиндров.

STUDY OF MAIN ENGINES OPERATION OF A MOTOR SHIP USING A SOFTWARE DIAGNOSTICS SYSTEM BASED ON VIBROACOUSTIC CHARACTERISTICS

Research article

Rizhikh V.V.^{1,*}¹ ORCID : 0009-0001-5498-1487;¹ Far eastern federal university, Vladivostok, Russian Federation

* Corresponding author (ryzhikh.vv[at]dvfu.ru)

Abstract

The article studies vibroacoustic signals of V-shaped marine diesel engines (14ZV40) operating at 420 rpm in order to identify diagnostic signs of malfunctions. Spectral analysis, correlation functions, coherence, cepstral analysis and wavelet transform methods are reviewed. The main frequencies related to engine revolutions and cylinder flashes are identified, their correlation between the left and right main engines is carried out. An analysis of the advantages of decomposition into empirical modes and scale-time characteristics is given, which allows effective fault diagnosis. Scalograms of signals for visualisation of processes are presented.

Keywords: vibroacoustic diagnostics, spectral analysis, cepstral analysis, wavelet analysis, vibration acceleration, scalogram, rotational speed, cylinder flash rate.

Введение

Диагностика технического состояния дизельных двигателей является одной из ключевых задач в области обеспечения надежности и эффективности работы машин и оборудования. Современные методы диагностики, основанные на анализе вибрационных сигналов, позволяют выявлять дефекты на ранних стадиях, прогнозировать отказы и минимизировать простои. Актуальность исследования обусловлена ростом требований к точности диагностики, увеличением сложности конструкций двигателей и необходимостью снижения затрат на обслуживание.

Актуальность темы:

1. Рост требований к надежности оборудования.

Сложные условия эксплуатации дизельных двигателей (высокие нагрузки, экстремальные температуры, длительная работа) приводят к ускоренному износу компонентов. Традиционные методы диагностики, такие как визуальный осмотр или частичная разборка, не всегда позволяют своевременно выявить дефекты. Анализ вибросигналов предоставляет возможность непрерывного мониторинга состояния двигателя без его остановки.

2. Развитие технологий обработки данных.

Современные методы обработки сигналов, такие как вейвлет-анализ, преобразование Фурье, спектральный анализ и машинное обучение, значительно расширяют возможности диагностики. Эти технологии позволяют выделять скрытые закономерности в данных, что особенно важно для сложных систем, таких как дизельные двигатели.

3. Экономическая эффективность.

Прогнозирование отказов и предотвращение аварийных ситуаций позволяет снизить затраты на ремонт и обслуживание. Кроме того, своевременная диагностика способствует увеличению срока службы оборудования.

Вибросигналы Главных двигателей марки 14ZV40, работающих на 420 об/мин (7 Гц) левого (ЛБ) и правого (ПР.Б) бортов теплохода под номинальной нагрузкой были записаны для исследования и анализа их технического состояния. Основное внимание исследования уделено комплексному анализу вибрационных сигналов с целью выявления

основных диагностических признаков посредством использования спектрального, корреляционного [3], [8], кепстрального [1], [2], [9], [10] и вейвлетного [4], [5], [6], [7] анализов.

Методы и принципы исследования

Объекты исследования: два главных двигателя ЛБ и Пр.Б 14ZV40 (ГД№1 и ГД№2).

Вибрационные сигналы $x(t)$, $y(t)$, записанные с пьезоакселерометров типа АС102-1, установленных на головках цилиндров.

Методы анализа

Спектральный анализ позволяет выделить частотные компоненты сигнала, которые связаны с силовыми воздействиями механических процессов сопровождающих работу двигателя, в числе которых уверенно выявляются частоты 1-го и 2-го порядков вращательного характера коленчатого вала и поступательно движущихся элементов цилиндро-поршневой группы, которые разнятся от цилиндра к цилиндру в зависимости от их нагруженности рабочим процессом и регулировки топливной аппаратуры. Данный метод позволяет проводить регулировку равномерности рабочих процессов по цилиндрам.

$$G(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} |e^{-i\omega t} x(t)|^2 dt \quad (1)$$

Взаимный спектр мощности позволяет определить степень взаимосвязи между различными частотными составляющими сигналов главных двигателей №1 и №2, и определяет предполагаемые повышенные уровни в области оборотной частоты и частоты всплеск в цилиндре.

Корреляционный анализ основан на вычислении автокорреляционной функции (АКФ) и взаимокорреляционной функции (ВКФ). АКФ показывает степень сходства сигнала с самим собой в разные моменты времени, а ВКФ — сходство двух разных сигналов в разные моменты времени. С их помощью определена задержка и произведена синхронизация записей сигналов главных двигателей №1 и №2 для сравнения их работы вейвлет анализом и вычисления взаимного спектра, т.к. фазовая составляющая механических процессов в сигнале приведена к единой фазовой координате связанной с положением 1-го цилиндра в верхней мертвой точке (ВМТ).

$$R_{ГД1,2}(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} x_1(t)y_2(t-\tau)dt \quad (3)$$

Кепстральный анализ существенно отличается от функции автокорреляции $R(\tau)$ (3). Для сигнала со сплошным спектром мощности функции автокорреляции $R(\tau)$ и кепстра $K(\tau)$ не равны нулю лишь в окрестности $\tau = 0$ и близки к δ -функциям. В то же время наличие неоднородностей в сигнале $x(t)$ делает функцию автокорреляции отличной от нуля и при других значениях аргумента τ . Тогда как кепстр мощности $K(\tau)$ остаётся близким к нулю из-за присутствия логарифма, сглаживающего неоднородности спектра. Только при наличии в спектре мощности периодических неоднородностей кепстр мощности становится отличным от нуля. Таким образом, в отличие от функции автокорреляции $R(\tau)$, кепстр мощности $K(\tau)$ чувствителен не ко всем неоднородностям спектра $G(f)$, а лишь к неоднородностям, обусловленным присутствием в сигнале гармонических рядов, то есть, когда в сигнале есть периодически следующие друг за другом импульсы или модулированные сигналы.

$$K(\tau) = \mathcal{F}^{-1} \ln \left(|\mathcal{F}[x(t)]|^2 \right) \quad (4)$$

Вейвлет-анализ позволяет изучать сигналы как во временной, так и в частотной областях одновременно. В отличие от классического преобразования Фурье, которое предоставляет информацию только о частотных компонентах сигнала, вейвлет-анализ позволяет локализовать частотные компоненты во времени. Это делает его особенно полезным для анализа нестационарных сигналов, где частотные характеристики меняются со временем.

$$S(a, b) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) |a|^{-1/2} \psi_0 \left(\frac{t-b}{a} \right) dt \quad (5)$$

Программное обеспечение

Все расчёты выполнены в компьютерной программе написанной автором на языке программирования Python, позволяющей анализировать виброакустические данные вышеприведенными методами анализа.

Основные результаты

3.1. Спектральный анализ

Показал основную частоту вращения коленчатого вала (7 Гц) и частоту не синфазных всплеск в цилиндрах (3,5 всплеск за один оборот (24,5 Гц)) что подтверждает (рис. 1). Спектры мощности не показали повышенные уровни вибрации в сравнении с нормами РМРС, в диапазонах, связанных с рабочими частотами.

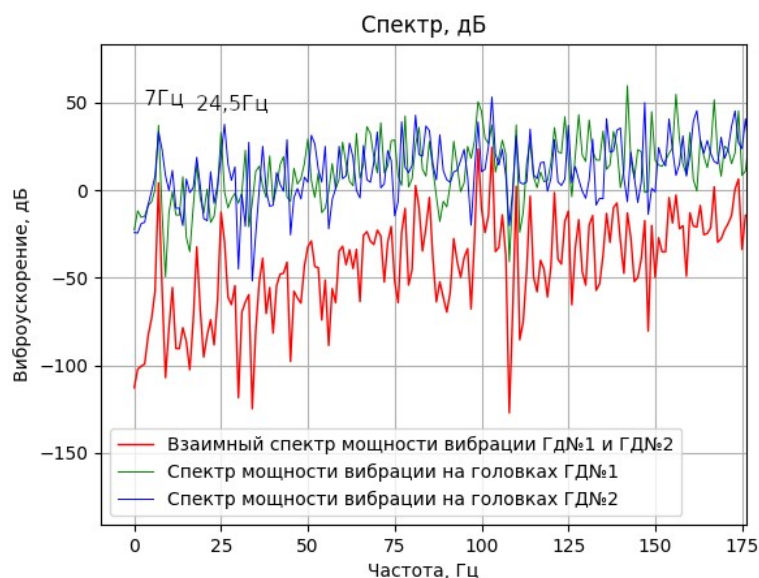


Рисунок 1 - Спектры мощности и взаимный спектр сигналов ГД№1 и ГД № 2
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.155.31.1>

3.2. Корреляционный анализ

С помощью автокорреляционной функции (АКФ) сигнала ГД1 и взаимнокорреляционной функции (ВКФ) сигналов ГД№1 и ГД№2 определена задержка и произведена синхронизация записей сигналов главных двигателей №1 и №2 для сравнения их работы вейвлет анализом и вычисления взаимного спектра, т.к. фазовая составляющая механических процессов в сигнале приведена к единой фазовой координате связанной с положением 1-го цилиндра в верхней мертвой точке (ВМТ) (рисунки 2 и 3).



Рисунок 2 - Автокорреляционная и взаимокорреляционная функции сигналов ГД № 1 и ГД № 2
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.155.31.2>



Рисунок 3 - Автокорреляционная и взаимокорреляционная функции виброакустических сигналов, сдвинутых на величину разности по времени между максимумами АКФ и ВКФ ГД № 1 и ГД № 2
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.155.31.3>

3.3. Кепстральный анализ

Показал чувствительность к периодическим компонентам в спектре сигнала, таким как гармоники оборотов и всплеск в цилиндре на головке которого установлен акселерометр (рис. 4).

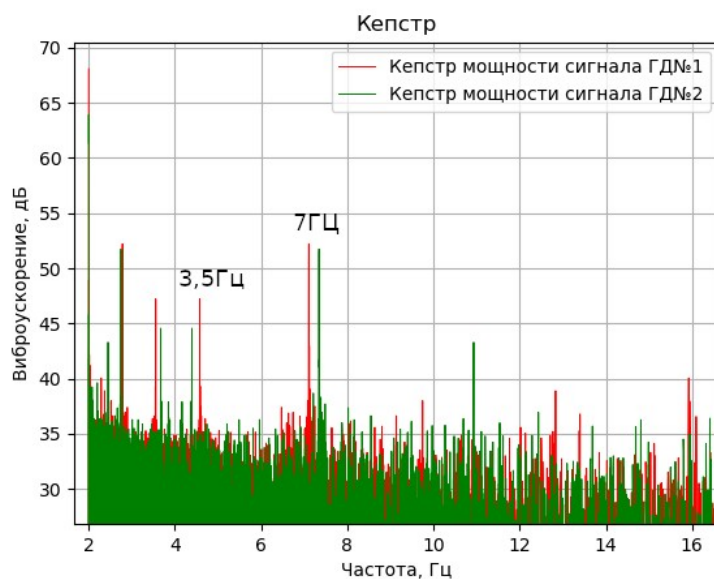


Рисунок 4 - Кепстр мощности сигналов ГД № 1 и ГД № 2
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.155.31.4>

3.4. Вейвлет анализ

Результат вейвлет преобразования — скейлограммы (рисунки 5 и 6) сигналов ГД № 1 и ГД № 2 выявили переходные процессы и гармоники, связанные с основными частотами вращения и всплесками в цилиндрах.

Использование вейвлета «Мексиканская шляпа» продемонстрировало высокую эффективность для анализа кратковременных вибраций и аномалий.

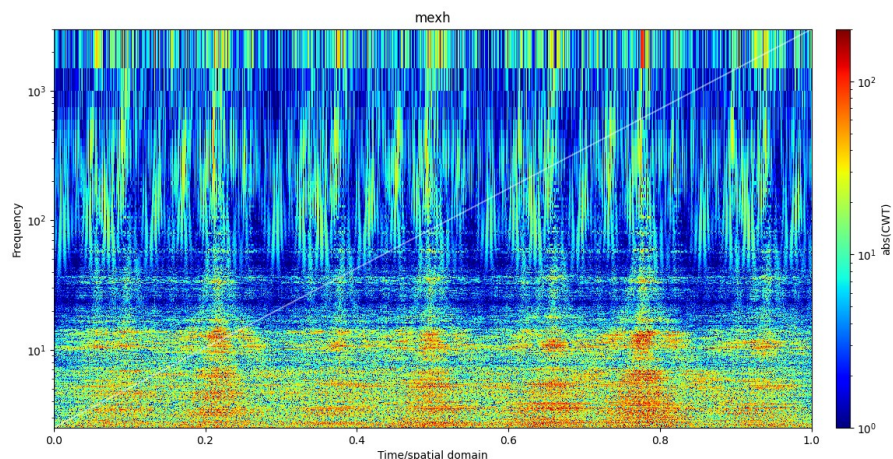


Рисунок 5 - Скейлограмма сигнала ГД № 1
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.155.31.5>

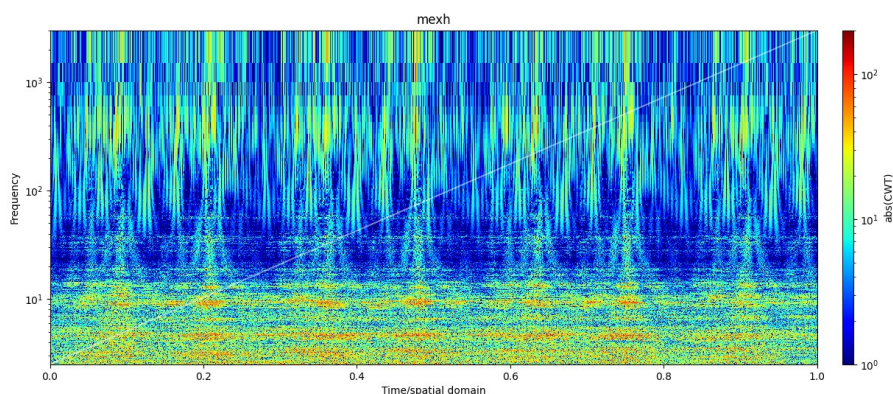


Рисунок 6 - Скейлограмма сигнала ГД № 2
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.155.31.6>

Обсуждение

Проведённое исследование виброакустических сигналов главных двигателей 14ZV40 подтвердило эффективность использования комплекса методов анализа для диагностики состояния судовых дизелей. Каждый из применённых методов — спектральный, корреляционный, кепстральный и вейвлет-анализ — внёс свой вклад в выявление диагностических признаков и оценку состояния двигателей.

Спектральный анализ позволил выделить основные частоты, связанные с работой двигателя: частоту вращения коленчатого вала (7 Гц) и частоту вспышек в цилиндрах (24,5 Гц). Эти данные являются базовыми для оценки равномерности работы цилиндров и выявления отклонений в топливной системе или механических компонентах. Спектры мощности не показали превышения нормативных значений, что свидетельствует о нормальной работе двигателей в исследуемый период.

Корреляционный анализ (АКФ и ВКФ) оказался эффективным для синхронизации сигналов двух двигателей и определения задержек между ними. Это позволило сравнить работу двигателей в единой фазовой координате, что особенно важно для анализа синхронности процессов в многодвигательных системах. Результаты корреляционного анализа подтвердили, что двигатели работают синхронно, без значительных фазовых расхождений.

Кепстральный анализ продемонстрировал свою чувствительность к периодическим компонентам в спектре сигнала, таким как гармоники оборотов и вспышек в цилиндрах. Этот метод позволил выявить скрытые периодичности, которые могут указывать на износ или неравномерность работы цилиндров. Кепстральный анализ особенно полезен для диагностики сложных механических систем, где важно выделить периодические дефекты.

Вейвлет-анализ стал ключевым методом для анализа нестационарных сигналов и выявления кратковременных аномалий. Использование вейвлета «Мексиканская шляпа» позволило визуализировать переходные процессы и гармоники, связанные с основными частотами вращения и вспышками в цилиндрах. Скейлограммы показали, что двигатели работают без значительных аномалий, но выявили незначительные переходные процессы, которые могут быть связаны с регулировкой топливной аппаратуры.

Взаимный спектр мощности позволил оценить степень взаимосвязи между частотными составляющими сигналов двух двигателей. Это особенно важно для анализа синхронности работы и выявления общих проблем, таких как

дисбаланс или износ подшипников. Результаты показали, что двигатели работают согласованно, без значительных отклонений.

Заключение

Исследование подтвердило, что виброакустическая диагностика является мощным инструментом для мониторинга состояния судовых дизельных двигателей. Комплексное применение спектрального, корреляционного, кепстрального и вейвлетного анализов позволило получить полную картину работы двигателей 14ZV40 и выявить основные диагностические признаки.

Спектральный анализ обеспечил базовую информацию о частотах вращения и вспыхах в цилиндрах, что важно для оценки равномерности работы двигателей.

Корреляционный анализ позволил синхронизировать сигналы и оценить синхронность работы двух двигателей.

Кепстральный анализ выявил периодические компоненты, связанные с циклом работы двигателя, что важно для диагностики износа и неравномерности.

Вейвлет-анализ стал ключевым методом для анализа нестационарных сигналов и выявления кратковременных аномалий.

Результаты исследования показали, что двигатели 14ZV40 работают в пределах нормы, без значительных отклонений. Однако выявленные переходные процессы и незначительные аномалии указывают на необходимость регулярного мониторинга и своевременного технического обслуживания.

Практическая значимость исследования:

1. Методы виброакустической диагностики позволяют выявлять дефекты на ранних стадиях, что минимизирует затраты на ремонт и повышает надёжность эксплуатации.

2. Использование программного обеспечения на Python для анализа данных делает процесс диагностики более гибким и адаптивным.

3. Результаты исследования могут быть использованы для разработки рекомендаций по техническому обслуживанию судовых дизелей и оптимизации их эксплуатации.

Перспективы дальнейших исследований:

1. Внедрение методов машинного обучения для автоматизации анализа виброакустических сигналов.

2. Разработка системы реального времени для мониторинга состояния двигателей в процессе эксплуатации.

3. Таким образом, проведённое исследование подтверждает, что комплексный подход к виброакустической диагностике позволяет эффективно выявлять дефекты и оптимизировать эксплуатацию судовых дизельных двигателей.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Иванов С.П. Анализ методов вибродиагностики асинхронных двигателей / С.П. Иванов, А.Н. Козлов, Д.В. Смирнов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. — 2021. — № 4. — С. 58–64. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-metodov-vibrodiagnostiki-asinhronnyh-dvigatoley> (дата обращения: 05.02.2025).

2. Петров В.А. Кепстральный анализ вибраций роторных машин / В.А. Петров, Е.Ю. Сидоров // Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. — 2022. — Т. 29, № 1. — С. 87–95. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=43176835> (дата обращения: 05.02.2025).

3. Зубарь Ф.М. Корреляционный анализ параметров вибрации для прогнозирования отказов насосного агрегата / Ф.М. Зубарь // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. — 2024. — № 6-1. — С. 209–213. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/korrelyatsionnyy-analiz-parametrov-vibratsii-dlya-prognozirovaniya-otkazov-nasosnogo-agregata> (дата обращения: 05.02.2025).

4. Яблоков А.Е. Применение СНС в вибродиагностике по спектрограммам и вейвлет-скалограммам сигнала / А.Е. Яблоков, Т.М. Жила // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. — 2021. — № 12. — С. 452–457. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-sns-v-vibrodiagnostike-po-spektrogrammam-i-veyvlet-skalogrammam-signala> (дата обращения: 05.02.2025).

5. Стародубцев П.А. Исследование параметров вибрации судовых конструкций вейвлет-анализом виброграмм / П.А. Стародубцев, Г.В. Дорофеев, А.О. Липовецкий // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. — 2021. — Т. 14, № 3. — С. 307–317. — DOI: 10.17516/1999-494X-0307. — URL: <https://elibrary.sfu-kras.ru/handle/2311/141279> (дата обращения: 05.02.2025).

6. Подклетнов С.Г. Применение методов преобразования Фурье и вейвлет-преобразования для вибродиагностики технического состояния тоннельных эскалаторов / С.Г. Подклетнов // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». — 2023. — Т. 16, № 5. — С. 24–32. — DOI: 10.32603/2071-8985-2023-16-5-24-32. — URL: <https://izv.etu.ru/assets/files/izvestiya-5-2023-24-32.pdf> (дата обращения: 05.02.2025).

7. Иванов И.И. Вейвлет-анализ и мультифрактальная параметризация при оценке технического состояния цифровых систем / И.И. Иванов. — Москва : МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2013. — 150 с. — URL: <https://www.dissercat.com/content/veivlet-analiz-i-multifraktnaya-parametrizatsiya-pri-otsenke-tekhnicheskogo-sostoyaniya-ts> (дата обращения: 05.02.2025).

8. Орлов А.И. Ошибки при использовании коэффициентов корреляции и детерминации / А.И. Орлов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. — 2018. — Т. 84, № 3. — С. 68–72. — DOI: 10.26896/1028-6861-2018-84-3-68-72. — URL: <https://www.zldm.ru/jour/article/view/696> (дата обращения: 05.02.2025).

9. Гринёв С.А. Вибрационные методы идентификации поврежденных зубчатых колес в составе многовальных приводов / С.А. Гринёв, А.Н. Беляев // Вестник Белорусского национального технического университета. — 2020. — № 2(112). — С. 33–48. — URL: <https://rep.bstu.by/bitstream/handle/data/3193/33-48.pdf> (дата обращения: 05.02.2025).

10. Золотарёв В.А. Анализ признаков и обоснование критериев вибродиагностики узлов карьерных автосамосвалов / В.А. Золотарёв, В.В. Чернов, А.В. Головин // Горное оборудование и электромеханика. — 2019. — № 3(123). — С. 34–40. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-priznakov-i-obosnovanie-kriteriev-vibrodiagnostiki-uzlov-kariernyh-avtosamosvalov> (дата обращения: 05.02.2025).

Список литературы на английском языке / References in English

1. Ivanov S.P. Analiz metodov vibrodiagnostiki asinhronnyh dvigatelej [Analysis of methods for vibration diagnostics of asynchronous motors] / S.P. Ivanov, A.N. Kozlov, D.V. Smirnov // Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Problemy energetiki [News of higher educational institutions. Energy problems]. — 2021. — No. 4. — P. 58–64. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-metodov-vibrodiagnostiki-asinhronnyh-dvigatlej> (accessed: 05.02.2025). [in Russian]

2. Petrov V.A. Kepstral'nyj analiz vibracij rotornyh mashin [Cepstral analysis of vibrations of rotary machines] / V.A. Petrov, E.Yu. Sidorov // Nauchno-tehnicheskij vestnik Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politehnicheskogo universiteta [Scientific and Technical Bulletin of the St. Petersburg State Polytechnic University]. — 2022. — Vol. 29, No. 1. — P. 87–95. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=43176835> (accessed: 05.02.2025). [in Russian]

3. Zubar F.M. Korrelyacionnyj analiz parametrov vibracii dlya prognozirovaniya otkazov nasosnogo agregata [Correlation analysis of vibration parameters for predicting pump unit failures] / F.M. Zubar // Mezhdunarodnyj zhurnal gumanitarnykh i estestvennykh nauk [International Journal of Humanities and Natural Sciences]. — 2024. — No. 6-1. — P. 209–213. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/korrelyatsionnyy-analiz-parametrov-vibratsii-dlya-prognozirovaniya-otkazov-nasosnogo-agregata> (accessed: 05.02.2025). [in Russian]

4. Yablokov A.E. Primenenie SNS v vibrodiagnostike po spektrogrammam i vejvlet-skalogrammam signala [Application of CNN in vibration diagnostics using spectrograms and wavelet scalograms of the signal] / A.E. Yablokov, T.M. Zhila // Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki [News of Tula State University. Technical Sciences]. — 2021. — No. 12. — P. 452–457. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-sns-v-vibrodiagnostike-po-spektrogrammam-i-vejvlet-skalogrammam-signala> (accessed: 05.02.2025). [in Russian]

5. Starodubtsev P.A. Issledovanie parametrov vibracii sudovyh konstrukcij vejvlet-analizom vibrogramm [Study of vibration parameters of ship structures using wavelet analysis of vibrograms] / P.A. Starodubtsev, G.V. Dorofeev, A.O. Lipovetskij // Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Tekhnika i tekhnologii [Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies]. — 2021. — Vol. 14, No. 3. — P. 307–317. — DOI: 10.17516/1999-494X-0307. — URL: <https://elib.sfu-kras.ru/handle/2311/141279> (accessed: 05.02.2025). [in Russian]

6. Podkletnov S.G. Primenenie metodov preobrazovaniya Fur'e i vejvlet-preobrazovaniya dlya vibrodiagnostiki tekhnicheskogo sostoyaniya tonnel'nyh eskalatorov [Application of Fourier transform and wavelet transform methods for vibration diagnostics of the technical condition of tunnel escalators] / S.G. Podkletnov // Izvestiya SPbGETU «LETI» [News of St. Petersburg Electrotechnical University "LETI"]. — 2023. — Vol. 16, No. 5. — P. 24–32. — DOI: 10.32603/2071-8985-2023-16-5-24-32. — URL: <https://izv.etu.ru/assets/files/izvestiya-5-2023-24-32.pdf> (accessed: 05.02.2025). [in Russian]

7. Ivanov I.I. Vejvlet-analiz i mul'tifraktnaya parametrizatsiya pri ocenke tekhnicheskogo sostoyaniya cifrovyyh sistem [Wavelet analysis and multifractal parameterization in assessing the technical condition of digital systems] / I.I. Ivanov. — Moscow : MSTU named after N.E. Bauman, 2013. — 150 p. — URL: <https://www.dissercat.com/content/veivlet-analiz-i-multifraktnaya-parametrizatsiya-pri-otsenke-tekhnicheskogo-sostoyaniya-ts> (accessed: 05.02.2025). [in Russian]

8. Orlov A.I. Oshibki pri ispol'zovanii koeffitsientov korrelyatsii i determinatsii [Errors when using correlation and determination coefficients] / A.I. Orlov // Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov [Factory Laboratory. Diagnostics of materials]. — 2018. — Vol. 84, No. 3. — P. 68–72. — DOI: 10.26896/1028-6861-2018-84-3-68-72. — URL: <https://www.zldm.ru/jour/article/view/696> (accessed: 05.02.2025). [in Russian]

9. Grinev S.A. Vibratsionnye metody identifikatsii povrezhdennykh zubchatykh koles v sostave mnogoval'nykh privodov [Vibration methods for identifying damaged gears as part of multi-shaft drives] / S.A. Grinyov, A.N. Belyaev // Vestnik Belorusskogo nacional'nogo tekhnicheskogo universiteta [Bulletin of the Belarusian National Technical University]. — 2020. — No. 2(112). — P. 33–48. — URL: <https://rep.bstu.by/bitstream/handle/data/3193/33-48.pdf> (accessed: 05.02.2025). [in Russian]

10. Zolotarev V.A. Analiz priznakov i obosnovanie kriteriev vibrodiagnostiki uzlov kar'ernykh avtosamosvalov [Analysis of signs and justification of criteria for vibration diagnostics of mining dump truck units] / V.A. Zolotarev, V.V. Chernov, A.V. Golovin // Gornoe oborudovanie i elektromekhanika [Mining equipment and electromechanics]. — 2019. — No. 3(123). — P. 34–40. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-priznakov-i-obosnovanie-kriteriev-vibrodiagnostiki-uzlov-kariernyh-avtosamosvalov> (accessed: 05.02.2025). [in Russian]