

УДК 629.424

## Проблемы диагностики современных тепловозных двигателей

А. А. Беляев<sup>1</sup>, Д. П. Кононов<sup>1</sup>, С. В. Кротов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Россия, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

<sup>2</sup> Ростовский государственный университет путей сообщения, Россия, 344038, Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, 2

**Для цитирования:** Беляев А. А., Кононов Д. П., Кротов С. В. Проблемы диагностики современных тепловозных двигателей // Бюллетень результатов научных исследований. — 2024. — Вып. 1 — С. 7–20. DOI: 10.20295/2223-9987-2024-01-7-20

### Аннотация

**Цель:** рассмотреть вопрос диагностики современных тепловозных двигателей, в частности вибродиагностики. Рассмотреть современные стратегии и методы, основанные на виброакустических сигналах, которые позволяют осуществлять: контроль технического состояния, поиск места и определение причин отказа (неисправности), прогнозирование технического состояния тепловозных двигателей, а также оценку рабочего процесса в двигателе. Определить, какие средства измерения параметров вибрации и методы обработки вибросигналов можно считать наиболее надежными и информативными. Предложить внести корректировку в уже используемые в настоящее время методы обработки вибросигналов. **Методы:** сравнение эффективности средств измерения параметров вибрации и математических методов обработки вибросигналов. **Результаты:** указана необходимость выбора математических методов обработки вибросигнала как для отдельных узлов тепловозного двигателя, так и для оценки рабочего процесса. Современные математические методы применительно к вибродиагностике требуют актуализации вследствие увеличения вычислительной мощности, а также из-за развития мощных методов обработки сигналов. Для повышения достоверности результатов сравнения следует учитывать большую вариативность узлов и процессов тепловозного двигателя. Выявлена необходимость в проведении дополнительного изучения современных математических методов обработки вибросигналов. **Практическая значимость:** показана необходимость внедрения более современных методов обработки вибросигнала, что позволит оптимизировать долговечность конструкции компонентов с использованием длительных циклов эксплуатации, снизить затраты на техническое обслуживание, отслеживать сроки службы ДВС во время эксплуатации тепловоза, совершенствовать системы мониторинга и диагностики двигателя тепловоза. Представленный обзор существующих методов обработки вибросигналов, и оценка применения вейвлет-анализа может быть рекомендована для дальнейшего совершенствования вибродиагностики тепловозных дизелей.

**Ключевые слова:** диагностика, тепловоз, дизельный двигатель, вибродиагностика, виброакустический контроль.

Своевременная и качественная диагностика технического состояния узлов и деталей дизеля с последующим устранением обнаруженных неисправностей позволяет в значительной степени снизить большие временные и материальные затраты на

устранение этих неисправностей [1, 2]. Для выполнения операций по диагностике могут использоваться разные подходы (стратегии) в зависимости от условий эксплуатации: реостатные испытания или мониторинг в процессе эксплуатации [3–5]. Во время реостатных испытаний можно получить данные о состоянии двигателя с помощью анализа рабочих характеристик, анализа масла, визуального осмотра, анализа вибрации и акустического анализа. Во время эксплуатации это может быть наблюдение за термогазодинамическими параметрами: давлением, температурой, скоростью течения, расходом рабочих тел и др. и за эксплуатационными параметрами: давлением и температурой топлива, моторного масла, охлаждающей воды; перепадами давления на фильтрах; разрежением в картере дизеля; уровнями вибрации и т. п. Для достижения этой цели вибрационный анализ служит эффективным и мощным средством для обнаружения неисправностей на ранних этапах. Вибрация и звук, характерные для поршневых механизмов, таких как двигатели внутреннего сгорания, компрессоры и насосы, являются при этом наиболее сложными и трудно поддающимися анализу. В последние несколько лет заметно увеличилось количество работ, направленных на разработку методов обработки сигналов для мониторинга состояния не только из-за увеличения вычислительной мощности, но и большого количества методов математической обработки вибросигнала.

Вибродиагностика может применяться как для контроля вибраций дизельного двигателя в целом, так и для его основных узлов (или агрегатов). Также вибродиагностика позволяет контролировать отдельные рабочие процессы. Основные контролируемые узлы и показатели:

1) дизель-генератор (недопустимая вибрация ротора генератора и коленчатого вала дизеля из-за несоосности, дефекты крепления, вызванные изменением жесткости опорной системы и снижении ее демпфирующих свойств) [6, 7];

2) газораспределительный механизм (определение величин тепловых зазоров в приводе клапанов, фаз газораспределения, упругости пружин, величине зазора между направляющей втулкой и стержнем клапана, плотности прилегания клапанов к седлам) [8–10];

3) детали цилиндропоршневой группы (ЦПГ) (зазоры между поршнем и кольцом по высоте канавки, в замках поршневых колец, между цилиндром и поршнем) [11];

4) привод масляного и водяного насосов, а также распределительного вала (износ шестерен, неправильный монтаж полумуфт на узлах сочленения валов);

5) кривошипно-шатунного механизм (КШМ) (зазоры в подшипниках коленчатого вала и во втулке поршневой головки шатуна);

6) турбокомпрессор (дисбаланс ротора, вибрация рабочих лопаток турбины и компрессора, дефекты крепления компрессора) [12, 13];

7) топливная аппаратура (оценка технического состояния форсунок и топливного насоса) [14];

8) оценка рабочего процесса (контроль технического состояния) дизеля (индикаторная диаграмма, разрегулировка цилиндров в ходе рабочего процесса — изменение количества подаваемого топлива по сравнению с номинальными значениями, изменение угла опережения подачи топлива, ухудшение качества смесеобразования и т. д.) [6].

Методы вибродиагностики включают в себя следующие этапы:

- 1) выбор инструментов (средств) измерения;
- 2) подбор местоположения и ориентации для вибрационного контроля;
- 3) выбор метода крепления датчика вибрации к объекту, подлежащему контролю;
- 4) определение интервала и частоты измерений;
- 5) выбор метода математической обработки вибросигнала.

Основной фактор при выборе средств измерения — это метод измерения параметров. Выделяют несколько классификаций средств измерения (датчиков), в зависимости от параметра, положенного в основу:

а) по принципу работы (генераторные осуществляют прямое преобразование механической энергии в электрическую; параметрические имеют внешние источники питания, позволяют изменять сопротивление, частоту и другие электрические параметры за счет механического воздействия);

б) по способу получения информации (контактные — связанные механически с исследуемым объектом; бесконтактные — то есть когда отсутствует механическое соединение с объектом);

в) по способу получения первичной информации (рис. 1).

Каждое из упомянутых средств измерений (измерительные преобразователи, датчики) находит применение в определенной области.

Датчики бесконтактного измерения вибрации не требуют механической связи с объектом. Зондирование объекта звуковыми, электромагнитными и световыми волнами является основой для этих методов.

Среди новейших разработок выделяются датчики, использующие метод ультразвуковой фазометрии. Метод заключается в измерении разницы фаз между опорным ультразвуковым сигналом и сигналом, который отражается от объекта, который исследуется. В данном случае применяется пьезоэлектрическая керамика в качестве чувствительных элементов.

Оптические датчики, использующие видимый свет для исследования объектов, получили широкое распространение и обладают выдающейся разрешающей способностью. Оптические датчики могут быть основаны на регистрации эффекта Доплера с использованием лазеров или могут использовать голографию.

**Радиоволновые датчики основаны на анализе взаимосвязей между контролируемой величиной и разнообразными параметрами электромагнитных систем, используемыми в роли первичных измерительных преобразователей.**



Рис. 1. Средства измерения параметров вибрации

Ключевые характеристики средств бесконтактного измерения вибраций приведены в табл. 1.

В табл. 2 представлена оценочная карта сравнительной эффективности наиболее распространенных средств измерения вибрации с позиции ресурсоэффективности.

Термин «ресурсоэффективность» в общем смысле означает способность эффективно использовать доступные ресурсы (такие как время, энергия, материалы и др.) для достижения определенных целей или результатов. В контексте методов вибродиагностики ресурсоэффективность означает использование минимального количества ресурсов (времени, средств и т. д.) для диагностирования состояния машин и оборудования на основе анализа и исследования их вибрационных характеристик. Применение ресурсоэффективных методов вибродиагностики позволяет сократить время, затрачиваемое на диагностику, уменьшить нагрузку на оборудование и снизить эксплуатационные расходы.

ТАБЛИЦА 1. Ключевые характеристики методов бесконтактного анализа вибраций

Характеристики	Вибрация		
	оптический	радиоволновой	ультразвуковой
1	2	3	4
Величины волн в зондирующем сигнале.	400–760 нм	3–8 мм	1–15 мм
Область перемещений	от 1,0 пм до 1,0 м	от 1,0 мкм до 5,0 м	10,0–50,0 мкм
Диапазон измеряемых частот	0–20 МГц	0–250 кГц	0–3000 Гц
Разрешающая способность	<1,0 пм	<1,0 мкм	10,0–30,0 мкм
Дистанция до объекта	0,1–10 м	0,2–10 м	Не более 1,5–2 м
Негативные аспекты	Сложности и высокие издержки при оборудовании, а также строгие критерии по поводу поверхности объекта и условий окружающей среды	Проблемы с настройкой (для амплитудных методов)	Низкое разрешение, ограниченный динамический диапазон и отсутствие возможности измерения перемещений
Позитивные аспекты	Высокая точность и разрешающая способность, возможность точечных измерений	Эффективное измерение динамических характеристик в разнообразных условиях, включая случаи, когда прямая видимость недоступна, а также возможность проведения комплексных измерений вибрации на различных поверхностях и в различных средах	Экономичность и малогабаритность оборудования

Оценка конкурентных технических решений определяется по формуле:

$$K = \sum V_i \cdot B_i \quad (1)$$

где  $K$  — уровень конкурентной эффективности вида;  $V_i$  — значимость критерия (в процентах от общей важности);  $B_i$  — оценка  $i$ -го показателя в баллах.

По данным оценочной карты можно увидеть, что для повышения конкурентоспособности с минимальными издержками более эффективно использовать оптические датчики контроля вибрации для проведения вибродиагностики, то есть, например, лазерный виброметр.

В целом выбор средств вибродиагностики зависит от особенностей и требований конкретной задачи.

Определение правильных точек контроля, направлений измерения вибрации и соответствующего способа крепления датчика являются неотъемлемой составляющей вибрационного контроля.

ТАБЛИЦА 2. Рейтинговая оценка средств вибродиагностики по их эффективности

Факторы оценки	Значимость критерия	Баллы			Уровень конкурентной эффективности		
		Бп	Бо	Бв	Кп	Ко	Кв
Технические критерии оценки							
1. Легкость выполнения	0,1	3	5	1	0,3	0,5	0,1
2. Расходы, связанные с предоставлением услуги	0,2	1	5	3	0,2	1	0,6
3. Погрешность измерения	0,2	4	5	3	0,8	1	0,6
4. Широкий спектр применения метода	0,15	3	4	3	0,45	0,6	0,45
5. Безопасность метода	0,15	5	4	5	0,75	0,6	0,75
Экономические критерии оценки							
6. Стоимость	0,1	3	5	4	0,3	0,5	0,4
7. Конкурентная эффективность	0,1	5	5	2	0,5	0,5	0,2
Итого	1	24	33	21	3,3	4,7	3,1

Примечания. Б<sub>п</sub> — измерение вибрации пьезоэлектрическим датчиком; Б<sub>о</sub> — измерение вибрации оптическим датчиком; Б<sub>в</sub> — измерение вибрации вихретоковым датчиком.

В основном датчики вибрации настроены на измерение в одном направлении, однако существуют и специальные датчики, предназначенные для многопараметрического измерения в трех направлениях. Степень удобства зависит от нюансов механизма, но обычно выбор делается в пользу датчиков вибрации с одним направлением. Следовательно, наибольшая чувствительность датчика достигается в его основном (базовом) направлении.

Определение наиболее подходящего метода математической обработки вибросигнала в соответствии с конкретной ситуацией представляет собой сложную и ключевую научно-практическую задачу. Предъявляемые требования к методам обработки вибросигнала: высокая чувствительность, повышенная селективность, необходимость гарантировать информативность измерений на всех этапах эксплуатации машины, постоянство результатов измерения, возможность анализа динамики развития повреждения и прогнозирование работоспособности узла двигателя.

Основные методы обработки вибросигнала приведены в табл. 3.

ТАБЛИЦА 3. Методы обработки вибросигнала

Трендовый анализ (анализ изменения значений интегральной вибрации)	Анализ вибрации во временной области	Анализ вибрации в частотной области	Многомерный анализ
Оценка по максимально допустимому уровню	Метод ударных импульсов	Прямое спектральное оценивание	Анализ среднего положения центра вала
		Спектр огибающей вибрации	
Анализ амплитудно-частотных характеристик	Экссес	Вейвлет-анализ	Анализ траектории перемещения центра вала
Анализ регрессионных вибромоделей	Пик-фактор	Октавный анализ	
	Анализ процессов затухания	Преобразование Фурье	

Аналитическое исследование основных существующих методов обработки вибросигнала в отношении дизельного двигателя тепловоза по ряду критериев оценки показывает, что многие не удовлетворяют предъявляемым требованиям [15].

Безусловно, по чувствительности и избирательности, глубине и достоверности контроля наиболее эффективен вейвлет-анализ.

Многомерный анализ не всегда применим, так как требует размещения датчиков непосредственно на валу, хотя дает и наибольшую полноту контроля.

Вейвлет-анализ (ВА) — это метод анализа сигналов, который использует вейвлеты — кратковременные волновые пакеты, способные быть масштабированными и сдвинутыми по временной оси. Этот метод обладает рядом преимуществ перед другими методами анализа, среди которых:

1) при оценке по максимально допустимому уровню вейвлет-анализ позволяет более точно определить пики и спады сигнала, что может быть полезно при оценке допустимого уровня сигнала;

2) по сравнению с анализом амплитудно-частотных характеристик вейвлет анализ способен исследовать частотные характеристики сигнала в различных временных масштабах, что позволяет получить более полное представление о его свойствах;

3) при анализе регрессионных вибромоделей, вейвлеты могут быть использованы, поскольку они способны представлять сигналы сложной формы с высокой точностью, хотя уступают нейронному исследованию, которое часто оказывается более мощным и гибким, позволяя представлять сложные модели вибрации с высокой точностью;

4) ВА предоставляет более точные результаты при анализе сигналов с ударными импульсами;

- 5) ВА лучше подходит для определения эксцесса, так как он обеспечивает более точное разделение между сигналами и шумами;
- 6) ВА может быть использован для измерения пик-фактора сигнала;
- 7) ВА дает возможность исследовать процессы затухания колебаний, что не всегда доступно при использовании других методов;
- 8) по отношению к спектральному оцениванию ВА предлагает более детальное представление спектра сигнала;
- 9) вейвлет-спектр огибающей позволяет исследовать вибрации, которые содержат несколько частот и могут изменяться во времени, то есть обрабатывать нестационарные сигналы, которые присутствуют в процессе эксплуатации, например, когда скорость вращения вала не является постоянной величиной;
- 10) по сравнению с октавным анализом ВА более эффективен для анализа сложных сигналов, таких как шум, который имеет широкий спектр частот;
- 11) сравнительный анализ преобразования Фурье и вейвлет-преобразования может быть выполнен на основе различных параметров, таких как разрешение в частотной области, способность обнаруживать временные изменения и способность различать разные типы дефектов.

Преобразование Фурье является одним из классических методов анализа, который преобразует сигнал из временной области в частотную область. Он основан на представлении сигнала в виде суммы синусоидальных компонентов с различными частотами. Преимуществом преобразования Фурье является его простота и широкое использование. Однако он имеет недостаток в том, что не обеспечивает информацию о временной локализации событий и может создавать артефакты при анализе сигналов с высоким уровнем шума.

Вейвлет-преобразование, с другой стороны, позволяет анализировать сигналы не только в частотной, но и во временной области. Оно основано на использовании вейвлет-функций, которые являются компактными во временной и частотной областях. Вейвлет-преобразование позволяет обнаруживать временные изменения в сигнале и имеет хорошую способность различать неодинаковые типы дефектов. Однако оно может быть более сложным в реализации и требовать вычислительных ресурсов для обработки сигналов.

Таким образом, по своей сути преобразование Фурье дает представление о том, какие частоты в спектре сигнала присутствуют, но не может ответить на вопрос, каково время существования спектральных составляющих сигнала. Для временной локализации спектральных компонентов необходимо сконструировать частотно-временное представление сигнала. Эту задачу в некоторой степени решает так называемое оконное преобразование Фурье, однако наиболее полно ее решает вейвлет-преобразование.

Оконное преобразование Фурье позволяет в целом выявить информацию, заключенную в изучаемом сигнале, как по времени, так и по частоте. Разрешающая

способность локализации особенностей сигнала имеет ограничения, которые заложены в самой логике алгоритма и определяются условием, аналогичным принципу неопределенности Гейзенберга в квантовой механике. Из требований, накладываемых на ширину окна, следует, что невозможно получить точное частотно-временное представление сигнала, т. е. нельзя определить для конкретного момента времени, какие спектральные компоненты присутствуют в сигнале. Чем короче окно, тем точнее разрешение по времени, но хуже разрешение по частоте и наоборот. Кроме того, чем короче окно, тем более справедливым становится заложенное в логику алгоритма предположение о стационарности сигнала в пределах окна.

При нестационарности сигнала более эффективен вейвлет-анализ, так как вейвлеты могут быть локализованы как во временной, так и в частотной области представления. При создании таких функций опять имеет значение принцип, аналогичный принципу неопределенности Гейзенберга, который связывает эффективные значения длительности функций и ширины их спектра. Чем точнее осуществлять локализацию временного положения функции, тем шире будет становиться ее спектр.

Особенностью вейвлет-анализа является то, что в нем можно использовать большое число основных вейвлет-функций, реализующих различные варианты соотношения между частотой и локализацией при анализе сигнала. Поэтому при исследовании имеется возможность выбора между семействами вейвлетных функций и гибкого применения тех, которые наиболее эффективно решают конкретную задачу.

Вейвлет-анализ является одним из наиболее универсальных и мощных инструментов для анализа сигналов и функций. Он имеет ряд преимуществ перед другими методами, которые делают его привлекательным для использования при вибродиагностике:

1. Локализация во времени и частоте: вейвлеты обеспечивают возможность локализовать события как во временной, так и в частотной областях. Это позволяет идентифицировать и анализировать вибрационные аномалии, проявляющиеся в определенные моменты времени и определенных частотах.

2. Высокая разрешающая способность: вейвлет-преобразование обладает лучшей разрешающей способностью по сравнению с классическими методами анализа сигналов, такими как преобразование Фурье.

3. Работа с нестационарными сигналами: вейвлет-преобразование эффективно работает с нестационарными сигналами, которые меняются во времени. Это особенно полезно в вибродиагностике, так как вибрационные сигналы обычно являются нестационарными из-за вариативности дефектов и рабочих условий оборудования.

4. Устойчивость к шуму: вейвлет-преобразование демонстрирует хорошую устойчивость к шумам в вибрационных сигналах. Вейвлеты могут фильтровать

нежелательные шумы или помехи, что позволяет более точно анализировать частотные составляющие вибрационного сигнала и выделять сигналы дефектов от фонового шума, что способствует повышению точности диагностики.

Использование вейвлет-анализа приведет к более точным и детальным результатам при вибродиагностике основных узлов дизельного двигателя тепловоза. Это поможет диагностировать даже слабые или скрытые неисправности, позволит выделять и анализировать временные изменения вибрации для предотвращения отказов и прогнозирования технического состояния оборудования.

### Библиографический список

1. Грачев В. В. Научные основы применения методов интеллектуального анализа данных для контроля технического состояния локомотивов: автореф. дис. ... докт. техн. наук. СПб.: ПГУПС, 2020. 32 с.
2. Ходжиев Ж. Д., Хамидов О. Р., Грачев В. В. Современные методы диагностики узлов локомотивов // Материалы I Международной научно-технической конференции «Железнодорожный подвижной состав: проблемы, решения, перспективы». Ташкент, ТашИИТ, 2022. С. 189–194.
3. Федотов М. В., Клименко Ю. И., Грачев В. В. Интеллектуальное управление техническим состоянием локомотива // Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте (ИММВ-2021). Сб. научных трудов X Международной научно-технической конференции. Смоленск, 2021. С. 356–368.
4. Федотов М. В., Грачев В. В. Предиктивная аналитика технического состояния систем тепловозов с использованием нейросетевых прогнозных моделей // Бюллетень результатов научных исследований. СПб.: ПГУПС. 2021. № 3. С. 102–114.
5. Грищенко А. В., Хамидов О. Р., Камалов И. С. и др. Диагностирование и обнаружение неисправностей подшипников качения тягового электродвигателя подвижного состава с применением искусственных нейронных сетей // Локомотивы. Электрический транспорт. XXI век. Материалы VII Международной научно-технической конференции. СПб.: ПГУПС, 2020. С. 220–225.
6. Зигельман Е. Б. Исследование возможности вибродиагностики среднеоборотных дизель-генераторов / Е. Б. Зигельман, И. А. Лощинин, Д. Ф. Скворцов // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2013. № 6. С. 42–48.
7. Грачев В. В. О причинах низкочастотных колебаний рамы тепловоза на холостом ходу силовой установки / В. В. Грачев, А. В. Грищенко, Ф. Ю. Базилевский и др. // Проблемы безопасности на транспорте: Материалы XII Международной научно-практической конференции, посвященной 160-летию Белорусской железной дороги. В 2 ч. Гомель, 24–25 ноября 2022 года / Под общ. ред. Ю. И. Кулаженко. Ч. 1. Гомель: Учреждение образования «Белорусский государственный университет транспорта», 2022. С. 101–102.

8. Грачев В. В., Федотов М. В., Грищенко А.В. и др. Диагностирование газоздушного тракта тепловозного дизеля с использованием интеллектуального классификатора // Бюллетень результатов научных исследований. СПб.: ПГУПС. 2022. № 2. С. 124–140.

9. Четвергов В. А. Использование виброакустического метода контроля для оценки качества функционирования газораспределительного механизма дизелей / В. А. Четвергов, А. И. Володин, В. Р. Ведрученко, Ю. Н. Хмельницкий // Диагностика повышения эффективности, экономичности и долговечности двигателей: тез. докл. науч.-техн. семинара стран СНГ. СПб., 1993. С. 45–49.

10. Грищенко А. В. Исследование параметров работы газораспределительного механизма при виброакустическом контроле в режиме тестового диагностирования / А. В. Грищенко, К. В. Глемба, А. С. Балясников // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. 2020. № 3 (47). С. 65–73.

11. Панченко М. Н., Грачев В. В., Грищенко А. В. Определение технического состояния цилиндро-поршневой группы дизеля ПД1М по спектру мгновенной угловой скорости коленчатого вала // Локомотивы. Электрический транспорт. XXI век. Материалы VII Международной научно-технической конференции. СПб.: ПГУПС, 2020. С. 315–324.

12. Волков А. В. Виброакустическая диагностика турбокомпрессоров тепловозных дизелей: дис. ... канд. техн. наук. Ростов-на-Дону. 2005. 215 с.

13. Аксенов С. П. Исследование путей снижения виброперегрузок многороторных систем ГТД / С. П. Аксенов, С. Г. Валюхов, А. И. Зубко и др. // Насосы. Турбины. Системы. 2017. № 4. (25). С. 59–63.

14. Володин А. И. Диагностирование форсунок по параметрам вибрационных процессов / А. И. Володин, В. В. Попков, В. В. Вихирев // Тезисы научно-технической конференции кафедр Омского института инженеров железнодорожного транспорта / Омский институт инженеров железнодорожного транспорта. Омск: ОмИИТ, 1986. С. 39.

15. Федотов М. В., Шарапов А. Л., Грачев В. В. Способы повышения качества обучения нейросетевых диагностических моделей сложных технических объектов // Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте ИММВ-2022. Сб. науч. трудов XI Международной научно-практической конференции. В 2 т. Коломна, 2022. С. 258–267.

Дата поступления: 19.12.2023

Решение о публикации: 02.02.2024

### **Контактная информация**

БЕЛЯЕВ Андрей Александрович — аспирант; belyaevaa@list.ru

КОНОНОВ Дмитрий Павлович — доктор техн. наук, доцент; d\_kononov@mail.ru

КРОТОВ Сергей Викторович — канд. техн. наук, доцент; svk-19587@yandex.ru

## Problems of diagnostics of modern diesel engines

**A. A. Beliaev<sup>1</sup>, D. P. Kononov<sup>1</sup>, S. V. Krotov<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russia

<sup>2</sup> Rostov State Transport University, 2, Rostov Strelkovogo Polka Narodnogo Opolchenia sq., Rostov-na-Donu, 344038, Russia

**For citation:** *Beliaev A. A., Kononov D. P., Krotov S. V. Problems of diagnostics of modern diesel engines // Bulletin of scientific research results, 2024, iss. 1, pp. 7-20. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2024-01-7-20*

### Abstract

**Objective:** to consider the issue of diagnostics of modern diesel engines, in particular vibration diagnostics. Consider modern strategies and methods based on vibroacoustic signals that allow you to track and diagnose diesel engine malfunctions, as well as an assessment of the working process in the engine. To determine which means of measuring vibration parameters and methods of processing vibration signals can be considered the most reliable and informative. Propose to make adjustments to the currently used methods of processing vibration signals. **Methods:** comparison of the effectiveness of vibration measurement tools and mathematical methods of vibration signal processing. **Results:** the necessity of choosing mathematical methods of vibration signal processing is indicated, both for individual components of a diesel locomotive engine and for evaluating the workflow. Modern mathematical methods, applied to vibration diagnostics, require updating, due to an increase in computing power, as well as due to the development of powerful signal processing methods. To increase the reliability of the comparison results, it is necessary to take into account the large variability of the components and processes of the diesel engine. The need for additional study of modern mathematical methods of vibration signal processing is revealed. **Practical importance:** the necessity of introducing more modern methods of vibration signal processing is shown, which will optimize the durability of the components' design using long operating cycles, reduce maintenance costs, track the service life of the internal combustion engine during the operation of the locomotive, improve the monitoring and diagnostics systems of the locomotive engine. The presented methods of assessing the use of certain methods of vibration diagnostics for diesel locomotives can be recommended for practical use.

**Keywords:** diagnostics, diesel locomotive, diesel engine, vibration diagnostics, vibration acoustic control.

### References

1. Grachev V. V. Nauchnye osnovy primeneniya metodov intellektual'nogo analiza dannyh dlja kontrolja tehničeskogo sostojanija lokomotivov: avtoref. dis. ... dokt. tehn. nauk. SPb.: PGUPS, 2020. 32 s. (In Russian)

2. Hodzhiev Zh. D., Hamidov O. R., Grachev V. V. Sovremennye metody diagnostiki uzlov lokomotivov // Materialy I Mezhdunarodnoj nauchno-tehničeskoj konferencii "Zheleznodorozhnyj podvizhnoj sostav: problemy, reshenija, perspektivy". Tashkent, TashIIT, 2022. S. 189–194. (In Russian)

3. Fedotov M. V., Klimenko Ju. I., Grachev V. V. Intellektual'noe upravlenie tehničeskim sostojaniem lokomotiva // Integrirovannye modeli i mjagkie vychislenija v iskusstvennom intellekte (IMMV-2021). Sb. nauchnyh trudov X Mezhdunarodnoj nauchno-tehničeskoj konferencii. Smolensk, 2021. S. 356–368. (In Russian)

4. Fedotov M. V., Grachev V. V. Prediktivnaja analitika tehničeskogo sostojanija sistem teplovozov s ispol'zovaniem nejrosetevyh prognoznyh modelej // Bjuleten' rezul'tatov nauchnyh issledovanij. SPb.: PGUPS. 2021. № 3. S. 102–114. (In Russian)

5. Grishhenko A. V., Hamidov O. R., Kamalov I. S. i dr. Diagnostirovanie i obnaruzhenie neispravnostej podshipnikov kachenija tjagovogo jelektrodivigatelja podvizhnogo sostava s primeneniem iskusstvennyh nejronnyh setej // Lokomotivy. Jelektricheskij transport. XXI vek. Materialy VII Mezhdunarodnoj nauchno-tehničeskoj konferencii. SPb.: PGUPS, 2020. S. 220–225. (In Russian)

6. Zigel'man E. B. Issledovanie vozmozhnosti vibrodiagnostiki sredneoborotnyh dizel'-generatorov / E. B. Zigel'man, I. A. Loshhinin, D. F. Skvorcov // Izvestija vysshiz uchebnyh zavedenij. Mashinostroenie. 2013. № 6. S. 42–48. (In Russian)

7. Grachev V. V. O prichinah nizkochastotnyh kolebanij ramy teplovoza na holostom hoduz silovoj ustanovki / V. V. Grachev, A. V. Grishhenko, F. Ju. Bazilevskij i dr. // Problemy bezopasnosti na transporte : Materialy XII Mezhdunarodnoj nauchno-praktičeskoj konferencii, posvjashhennoj 160-letiju Belorusskoj zheleznoj dorogi. V 2 ch. Gomel', 24–25 nojabrja 2022 goda / Pod obshh. red. Ju. I. Kulazhenko. Ch. 1. Gomel': Uchrezhdenie obrazovanija "Belorusskij gosudarstvennyj universitet transporta", 2022. S. 101–102. (In Russian)

8. Grachev V. V., Fedotov M. V., Grishhenko A. V. i dr. Diagnostirovanie gazovozdushnogo trakta teplovoznogo dizelja s ispol'zovaniem intellektual'nogo klassifikatora // Bjuleten' rezul'tatov nauchnyh issledovanij. SPb.: PGUPS. 2022. № 2. S. 124–140. (In Russian)

9. Chetvergov V. A. Ispol'zovanie vibroakustičeskogo metoda kontrolja dlja ocenki kachestva funkcionirovanija gazoraspredivitel'nogo mehanizma dizelej / V. A. Chetvergov, A. I. Volodin, V. R. Vedruchenko, Ju. N. Hmel'nickij // Diagnostika povyshenija jeffektivnosti, jekonomičnosti i dolgovechnosti divigatelej: tez. dokl. nauch.-tehn. seminaru stran SNG. SPb., 1993. S. 45–49. (In Russian)

10. Gricenko A. V. Issledovanie parametrov raboty gazoraspredivitel'nogo mehanizma pri vibroakustičeskoj kontrole v rezhime testovogo diagnostirovanija / A. V. Gricenko, K. V. Glemba, A. S. Baljasnikov // Vestnik Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshhenija. 2020. № 3 (47). S. 65–73. (In Russian)

11. Panchenko M. N., Grachev V. V., Grishhenko A. V. Opredivlenie tehničeskogo sostojanija cilindro-porshnevoj gruppy dizelja PD1M po spektru mgnovennoj uglovoj skorosti kolenchatogo vala // Lokomotivy. Jelektricheskij transport. XXI vek. Materialy VII Mezhdunarodnoj nauchno-tehničeskoj konferencii. SPb.: PGUPS, 2020. S. 315–324. (In Russian)

12. Volkov A. V. Vibroakustičeskaja diagnostika turbokompressorov teplovoznnyh dizelej: dis. ... kand. tehn. nauk. Rostov-na-Donu. 2005. 215 s. (In Russian)

13. Aksenov S. P. Issledovanie putej snizhenija vibroperegruzok mnogorotornyh sistem GTD / S. P. Aksenov, S. G. Valjuhov, A. I. Zubko i dr. // Nasosy. Turbiny. Sistemy. 2017. № 4. (25). S. 59–63. (In Russian)

14. Volodin A. I. Diagnostirovanie forsunok po parametram vibracionnyh processov / A. I. Volodin, V. V. Popkov, V. V. Vihirev // Tezisy nauchno-tehničeskoj konferencii kafedr Omskogo

instituta inzhenerov zheleznodorozhnogo transporta / Omskij institut inzhenerov zheleznodorozhnogo transporta. Omsk: OmIIT, 1986. S. 39. (In Russian)

15. Fedotov M. V., Sharapov A. L., Grachev V. V. Sposoby povysheniya kachestva obucheniya nejrosetevykh diagnosticheskikh modelej slozhnykh tehnikeskikh obektov // Integrirovannye modeli i mjagkie vychisleniya v iskusstvennom intellekte IMMV-2022. Sb. nauch. trudov XI Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii. V 2 t. Kolomna, 2022. S. 258–267. (In Russian)

Received: 19.12.2023

Accepted: 02.02.2024

**Author's information:**

Andrei A. BELIAEV — postgraduate student; belyaevaa@list.ru

Dmitry P. KONONOV — Dr. Sci. in Engineering, Associate Professor; d\_kononov@mail.ru

Sergey V. KROTOV — PhD Sci. in Engineering, Associate Professor; svk-19587@yandex.ru