

Научная статья

УДК 622.23.05

DOI: 10.26730/1816-4528-2025-6-16-22

Быков Дмитрий Владимирович^{1,3}, Лагунова Юлия Андреевна^{1,2}, Сушко Андрей Евгеньевич³¹ ООО НПО «ДИАТЕХ»² Уральский государственный горный университет³ Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина

* для корреспонденции: yu.lagunova@mail.ru

ПРИМЕНЕНИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ЭКСПЕРТНЫХ СИСТЕМ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ ГОРНОДОБЫВАЮЩЕЙ ОТРАСЛИ**Информация о статье**

Поступила:

31 октября 2025 г.

Одобрена после
рецензирования:

14 ноября 2025 г.

Принята к печати:

15 ноября 2025 г.

Опубликована:

18 декабря 2025 г.

Ключевые слова:

экспертная система; SAFE PLANT; автоматизированная оценка; гибридная модель; техническое обслуживание и ремонт, отказоустойчивость, горнодобывающая отрасль

Аннотация.

Оценка фактического технического состояния горнодобывающего оборудования является интересной и актуальной задачей. Большое количество работ посвящено разработке экспертных систем оценки технического состояния объектов. В настоящей статье приведен обобщенный опыт применения экспертной системы программно-аппаратного комплекса SAFE PLANT в разрезе влияния результатов автоматизированной оценки технического состояния на процесс корректировки стратегии технического обслуживания оборудования. Выполнен анализ эффективности и достаточности автоматизированных экспертных вибродиагностических правил для своевременного выявления нарушений целостности динамического оборудования без привлечения для этой работы обслуживающего технического персонала. Проведены теоретические и экспериментальные исследования на основе анализа применения инструментов автоматизированной экспертной системы, предложена модель оценки своевременности реагирования ремонтных служб по недопущению аварийных остановов оборудования. Результаты проведенных исследований основаны на сформированной логике гибридной модели экспертной системы программно-аппаратного комплекса SAFE PLANT, для оценки технического состояния конвейерного, насосного и тягодутьевого оборудования различных горнодобывающих предприятий страны. Выполнен анализ эффективности применения сотрудниками системы технического обслуживания и ремонта (ТОиР) заключений экспертной системы в процессе планирования и проведения ремонтов оборудования. Полученные в рамках настоящего исследования результаты свидетельствуют о возможности заблаговременного выявления дефектов на ранней стадии их развития. Высокая отказоустойчивость динамического оборудования горнорудной промышленности позволяет осуществлять длительный мониторинг развития дефектов в оборудовании, что приводит к возможности персональной корректировки стратегии технического обслуживания агрегатов с целью недопущения их аварийных остановов в условиях горнодобывающего предприятия.

Для цитирования: Быков Д.В., Лагунова Ю.А., Сушко А.Е. Применение автоматизированных экспертных систем оценки технического состояния оборудования на предприятиях горнодобывающей отрасли // Горное оборудование и электромеханика. 2025. № 6 (182). С. 16-22. DOI: 10.26730/1816-4528-2025-6-16-22, EDN: CAZTLW

Введение

Ремонт горного оборудования регламентируется государственными стандартами (ГОСТ 18322-78, ГОСТ 0831-79, ГОСТ 21571-76, ГОСТ 21623-76, ГОСТ 22952-78, ГОСТ 23660-79 и др.). Однако эти стандарты не учитывают особенности и режимы работы машин различного отраслевого примене-

ния. Поэтому в каждой отрасли разрабатываются свои Положения о техническом обслуживании и ремонте (ТОиР) однотипного оборудования [1, 2].

Согласно ГОСТ 18322-78, под системой ТОиР техники понимается «совокупность взаимосвязанных средств, документации технического обслуживания и ремонта и исполнителей, необходимых для

поддержания и восстановления качества изделий, входящих в эту систему» [3]. Целью системы ТОиР является обеспечение безопасной, безаварийной, высокопроизводительной работы оборудования.

Основными задачами системы ТОиР являются: обеспечение требуемого уровня надежности, безопасности и экологичности при эксплуатации горного оборудования; снижение финансовых затрат на его ремонт и эксплуатацию, сокращение времени простоев, сбережение трудозатрат обслуживающего персонала и повышение эффективности функционирования машин и оборудования [4].

Организация ТОиР, таким образом, основана на выборе критериев оценки эффективности, формировании стратегии и определении методов достижения цели [2].

Существуют две принципиально разные методики ТОиР, которые различаются по способу получения информации: стохастическая модель на основе вероятностных статистических показателей и детерминированная модель на основе сведений о фактическом техническом состоянии горного оборудования [2].

Существуют реактивные и превентивные методы ТОиР. Реактивные – это те, при которых ремонтные воздействия наступают по факту отказа, а превентивные – это те, которые не допускают отказов и аварий, вызванных деградацией оборудования.

На предприятиях горнорудной промышленности уже не первый год наблюдается две ключевые проблемы: сокращение ремонтного персонала и увеличение среднего срока службы оборудования. Оба этих фактора приводят к снижению надежности оборудования и вынуждают технические службы предприятий корректировать стратегии технического обслуживания и ремонта (ТОиР), добавляя методы оценки технического состояния в процессе эксплуатации. При недостаточной штатной численности задачу оценки технического состояния закрывают путем установки автоматизированных систем сбора и анализа данных. В зависимости от категорий критичности состояния оборудования существует четыре варианта систем сбора и анали-

за вибрационных данных (см. Таблицу 1).

Рассмотрим более подробно такой инструмент анализа диагностических данных, как экспертная система оценки технического состояния. В начале восьмидесятых годов в исследованиях по искусственному интеллекту сформировалось самостоятельное направление, получившее название «экспертные системы». Цель исследований по экспертным системам состоит в разработке программ, которые при решении задач, трудных для эксперта-человека, получают результаты, не уступающие по качеству и эффективности. Преимущества таких систем перед человеком очевидны: у программы не может возникнуть предубеждений, она не делает поспешных выводов, а выбирает наиболее подходящее под установленные правила решение. Экспертная система устойчива к помехам и способна за считанные секунды обрабатывать огромные массивы данных, необходимых для постановки правильного диагноза. Со временем была четко определена область использования подобных систем. Экспертные системы целесообразно использовать в тех случаях, когда не могут быть построены строгие алгоритмы одиночных решений, а задачи относятся к области интерпретации данных и последующего прогнозирования и решаемы методами формальных рассуждений. Важной и неотъемлемой частью программы являются и сами эксперты, которые ее формируют [5]. Тем не менее, ключевое преимущество использования автоматизированной экспертной системы – это возможность быстрого тиражирования, накопленного за десятки лет экспертного опыта на те предприятия, где таких компетенций еще нет без вовлечения самих экспертов [6]. На сегодняшний день такие системы разрабатывают как производители оборудования и диагностического программного обеспечения, внедряя их в свои решения, так и научные институты, создавая отдельные программные утилиты для оценки технического состояния объектов исследований [7]. Тем не менее, общедоступных материалов по эффективности практического применения таких экспертных систем со статистически значимыми результатами на объектах горнорудной промышлен-

Таблица 1. Вариативность инструментов сбора и анализа вибрационных данных

Table 1. Variability of vibration data collection and analysis tools

Критичность объекта контроля	Инструменты сбора диагностических данных	Анализ диагностических данных
Особо ответственное критическое оборудование (категория А)	- Проводные стационарные системы вибрационного контроля	- Автоматическая экспертная система оценки тех. состояния по спектральным составляющим; - Анализ индекса технического состояния (ИТС).
Ответственное оборудование (категория В и С)	- Беспроводные стационарные системы вибрационного контроля; - Переносные виброанализаторы; - Системы мобильных обходов; - Датчики LoRa со сбором спектральных составляющих.	- Автоматическая экспертная система оценки тех. состояния по спектральным составляющим; - Ручной анализ спектральных составляющих; - Анализ ИТС.
Неответственное оборудование (D), либо, ответственное оборудование с резервированием	- Переносные виброанализаторы; - Системы мобильных обходов; - Датчики LoRa со сбором спектральных составляющих.	- Ручной анализ спектральных составляющих; - Анализ ИТС.

ности в научных публикациях обнаружить не удалось, в связи с этим было принято решение провести собственное исследование эффективности применения экспертных систем оценки технического состояния оборудования.

Методы

В качестве инструмента оценки технического состояния был выбран модуль экспертных правил смешанного типа, используемый в программном обеспечении (ПО) SAFE PLANT в версиях 1.14-1.20. Сведения о спектральных картинах различных дефектов динамического оборудования описаны в большом количестве источников [8-12].

Однако сложность формирования достоверных экспертных систем заключается в потребности точно и однозначно описать в математическом виде диагностические признаки различных дефектов на разных стадиях их развития. От того, насколько детально будут описаны эти признаки в системе, будет зависеть корректность автоматического выявления дефектов. Экспертная система смешанного типа представляет собой инструмент, объединяющий точность предустановленных экспертных правил с гибкостью механизма для самостоятельного формирования новых правил и возможностью дополнения существующих. Экспертный модуль ПО SAFE PLANT имеет древовидную структуру построения правил (см. Рис. 1). Применяемый массив предустановленных экспертных правил описывает такие дефекты, как: расцентровка, дисбаланс, перекос подшипника, выкрашивание наружного кольца подшипника, выкрашивания на внутреннем кольце подшипника, износ сепаратора подшипника, раковины тел качения, разрушение подшипника, ослабление посадки подшипника в корпусе, ослабление натяжения подшипника на валу, низкая жесткость системы, проскальзывание подшипника, недостаточное количество смазки подшипника, дефекты статора электродвигателя, дефекты ротора электродвигателя, такие как выгорание элементов беличьей клетки ротора, дефекты зубчатых передач, в том

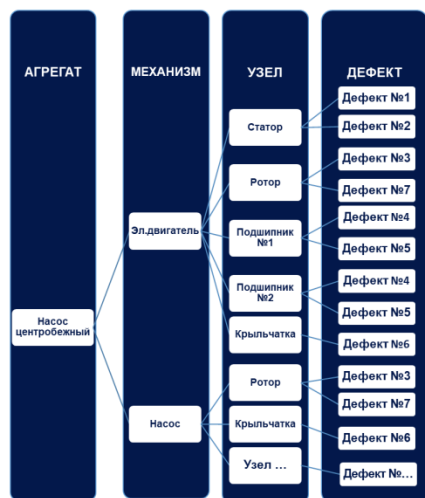


Рис. 1. Древовидная структура дефектов экспертной системы SAFE PLANT

Fig. 1. Tree structure of defects of the SAFE PLANT expert system

числе выкрашивание зубьев и несоосность зубозацеплений, увеличение зазора в подшипниках скольжения, срыв масляного клина и прочее. На текущий момент экспертный модуль определяет порядка 80 различных дефектов оборудования, которые можно обнаружить путем анализа спектральных составляющих вибрационного сигнала, являющихся механическими гармоническими колебаниями системы (1):

$$W(t) = A * \cos(2\pi F * t + \varphi) \quad (1)$$

Каждое из экспертных правил по обнаружению дефектов имеет различные признаки дефекта со своими весовыми коэффициентами. В общем виде формула формирования правил приведена ниже. **Ошибка! Источник ссылки не найден.** (2):

$$F_{\text{деф}} = \frac{\sum a_i f_i}{\sum f_i} \quad (2)$$

где: $F_{\text{деф}}$ — величина значимости дефекта, выявленного на агрегате; a_i — весовой коэффициент значимости i -го признака дефекта, который был обнаружен экспертной системой при анализе спектральных составляющих и формы сигнала; f_i — i -й обнаруженный признак дефекта.

В рамках исследования был проведен анализ результатов работы экспертной системы на трех крупных горнодобывающих предприятиях различных отраслей промышленности. Объектами исследования послужили три наиболее распространенных типа агрегатов: конвейерное, насосное и тягодутьевое оборудование. Период выборки данных работы экспертной системы составил 2,5 года, с января 2023 по июнь 2025 года. Источниками данных для работы экспертной системы выступали как стационарные системы вибромониторинга различных производителей, так и виброанализаторы экспертного уровня Falcon OneProd и STD-3300, а также виброанализаторы бюджетного уровня Диана-2М и STD-510. Масштаб выборки составил 3567 единиц оборудования с 17 производственных площадок.

Участвующие в аналитическом срезе предприятия используют различные подходы к организации процессов оценки технического состояния, но на всех предприятиях загрузка оборудования находится на уровне выше 90%. В связи с требованиями соглашений о неразглашении с предприятиями их наименования были обезличены. Сотрудники предприятий проводят вибрационный анализ переносными приборами с периодичностью от 1 раза в месяц до 1 раза в квартал, в зависимости от критичности объектов контроля. Стационарные системы вибромониторинга осуществляют сбор спектральных составляющих с периодичностью от 1 раз в 10 минут, до 1 раз в 6 часов:

1) На предприятии № 1 служба диагностики существует более 10 лет и имеет на каждой из площадок в штате не менее 10 сотрудников, отвечающих за оценку технического состояния оборудования. Сотрудники площадок предприятия №1 оснащены как переносными приборами для вибрационного анализа, так и стационарными системами вибромониторинга.

Таблица 2. Анализ эффективности работы с данными экспертной системы
Table 2. Analysis of the efficiency of working with expert system data

		Количество о объектов в выборке	Среднее количество дефектов на оборудовании (СКО)	Среднее количество дефектов перед ремонт (СКО)	Качество устранения дефектов по результатам воздействий, %	Частота выявления дефектов в рамках обследований
Предприятие № 1	Насос	722	4,027 (4,061)	4,185 (4,182)	98,00	0,52%
	Конвейер	548	3,491 (3,390)	3,661 (3,649)	98,00	0,14%
	ТДО	317	4,268 (4,150)	4,672 (4,377)	93,00	1,04%
Предприятие № 2	Насос	681	3,347 (2,679)	3,948 (3,011)	80,00	12,72%
	Конвейер	877	5,99 (5,427)	7,142 (5,937)	58,00	29,89%
	ТДО	162	3,164 (2,681)	3,336 (2,862)	69,00	4,63%
Предприятие № 3	Насос	71	4,026 (4,061)	6,233 (4,401)	86,00	57,63%
	Конвейер	89	6,76 (6,070)	8,121 (7,064)	57,00	70,78%
	ТДО	100	3,279 (2,223)	3,815 (2,488)	68,00	56,55%

2) На предприятии № 2 служба оценки технического состояния имеет второе меньший штат диагностической службы и не имеет стационарных систем оценки технического состояния. На площадках предприятия № 2 сбор спектральных составляющих вибрационного сигнала осуществляется только с использованием переносных виброанализаторов различного уровня.

3) На предприятии № 3 одна производственная площадка со службой оценки технического состояния, которая состоит из двух специалистов с переносными приборами. Стационарных систем на приведенных типах устройств не установлено.

Результаты: Результаты анализа работы с данными от экспертной системы приведены в Таблице 2.

Объективность анализа построена на том, что экспертные правила унифицируют метрики для оценки отсутствия или наличия дефектов в агрегате, исключая влияние субъективных факторов, таких как человеческое влияние при анализе данных, за счет того, что после каждой загрузки вибрационных данных экспертный модуль производит автоматический поиск дефектов и их запись в базу удалось установить как общее количество дефектов, а также удалось найти моменты сокращения количества дефектов в агрегатах, которые совпали с эпизодами ремонтов или замены дефектных механизмов в оборудовании. Качество устранения дефектов по результатам воздействий выражено в проценте оставшихся после ремонта дефектов на агрегате. Частота выявления дефектов в рамках обследований представляет собой вероятностную величину обнаружения дефекта при выполнении обследования агрегата, установленную по историческим данным.

Выводы: Несмотря на высокую неоднородность полученных в срезе данных, все приведенные предприятия имеют схожие параметры среднего количества дефектов в оборудовании. Приведенный срез показывает, что вне зависимости от типа агрегата сотрудники ТОиР производят ремонт не

ранее, чем общее количество дефектов, обнаруженных экспертной системой, станет превышать среднее количество дефектов на этом типе оборудования. Высокий уровень среднеквадратичного отклонения (СКО) свидетельствует о неоднородности стратегий технического обслуживания. Количество сотрудников и их приборное оснащение оказывает прямое влияние на частоту выявления дефектов в рамках обследования. Отсутствие на предприятиях № 2 и № 3 стационарных систем приводит к высокой вероятности обнаружения дефектов при каждом обследовании агрегатов, в то же время косвенным подтверждением своевременности выявления дефектов являются сопоставимые показатели как среднего общего количества дефектов, так и среднего количества дефектов перед ремонтом. Высокая частота выявления дефектов при плановом ручном обследовании без применения стационарных систем является прямым признаком низкого качества работ по устранению выявленных дефектов. Полученные данные о среднем количестве дефектов перед ремонтом свидетельствуют о том, что на текущем этапе развития средств сбора и оценки технического состояния оборудования автоматизированные экспертные системы имеют высокую эффективность и позволяют выявлять более 3 дефектов в агрегатах, до того, как произойдет неплановый аварийный простой производственных линий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бобровицкий В. И., Сидоров А. В. Совершенствование системы ТОиР оборудования в условиях централизации ремонтной службы предприятия // Вибрация машин: измерение, снижение, защита. – 2011. № 1 (24). С. 23–28.
2. Дрыгин М. Ю. Анализ систем технического обслуживания и ремонта горного оборудования // Горное оборудование и электромеханика. 2020. № 2. С. 35–43.
3. ГОСТ 18322-78. Система технического обслуживания и ремонта техники. Термины и определения. 1978. 32 с.

4. Кизим А. В. Постановка и решение задач автоматизации работ по ремонту и техническому обслуживанию оборудования // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. 2009. № 2 (20). С. 131–135.

5. Сушко А. Е., Демин М. А. Особенности внедрения экспертных систем автоматизированной диагностики // Вибрация машин: измерение, снижение, защита. 2011. № 4. С. 51–55.

6. Кузин Е. Г. Предиктивное управление техническим состоянием горных транспортных машин. // Горное оборудование и электромеханика. 2023. № 1 (165). С. 41–49.

7. Герике П. Б., Герике Б. Л. К вопросу прогнозирования безаварийной работы генераторных групп карьерных экскаваторов. // Вестник КузГТУ. 2024. № 5. С. 115–123.

8. Прыгунов А. И., Папуша А. Н. Вибрационная динамика машин и виброакустическая диагностика // Вестник МГТУ. 1998. Т. 1. № 1. С. 21–27.

9. Ширман А. Р., Соловьев А. Б. Практическая вибродиагностика и мониторинг состояния механического оборудования. М. : Москва, 1996. 276 с.

10. Розенберг Г. Ш., Мадорский Е. З., Голуб Е. С. [и др.] Вибродиагностика / Под ред. Г. Ш. Розенберга. Петерб. энерг. ин-т повышения квалификации М-ва энергетики (Россия), Каф. диагностики энерг. оборудования. Санкт-Петербург : ПЭИПК, 2003. 283 с.

11. Петрухин В. В., Петрухин С. В. Основы вибродиагностики и средства измерения вибрации : учебное пособие. Москва : Инфра-Инженерия, 2010. 168 с. ISBN 978-5-9729-0026-8.

12. Girdhar P. Practical machinery vibration analysis and predictive maintenance. Ed. by C. Scheffer, PhD. Oxford, Burlington (MA) : Newnes, 2004. VII, 255 с. (Practical professional); ISBN 0-7506-6275-1.

13. Сушко А. Е. Практические аспекты внедрения систем вибрационной диагностики в условиях современных промышленных производств // Вибрация машин: измерение, снижение, защита. 2007. № 4. С. 24–30.

14. Kim S. H., Park J. W., Kim J. H. Functional data analysis for assessing the fatigue life of construction equipment attachments // Journal of Mechanical Science and Technology. 2021. Vol. 35. P. 495–506. DOI: 10.1007/s12206-021-0108-0.

15. Zhang Z., Zhang H., Chen Y., Yan H. Research on dynamic load estimation method of crawler travel system // Journal of Mechanical Science and Technology. 2023. Vol. 37. P. 555–567. DOI: 10.1007/s12206-023-0102-9.

16. Bouhalais M. L., Djebala A., Ouelaa N., Khemissi M. CEEMDAN and OWMRA as a hybrid method for rolling bearing fault diagnosis under variable speed // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2018. Vol. 94. P. 2475–2489. DOI: 10.1007/s00170-017-1044-0.

17. Сушко А. Е., Быков Д.ИВ., Лагунова Ю. А. Комплексная оценка технического состояния технологического оборудования // В сборнике: Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности. Сборник трудов «Чтения памяти В. Р. Кубачека». XXIII международной научно-технической конференции. Екатеринбург, 2025. С. 413–417.

© 2025 Автор. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Об авторах:

Быков Дмитрий Владимирович, аспирант, Уральский государственный горный университет (620144, Россия, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30), руководитель проекта ООО НПО «ДИАТЕХ» (107061, г. Москва, Преображенская площадь, д. 8),

Лагунова Юлия Андреевна, проф., доктор техн. наук, Уральский государственный горный университет (620144, Россия, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30), Уральский Федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина (620002, Россия, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19), ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3828-434X>, e-mail: yu.lagunova@mail.ru,

Сушко Андрей Евгеньевич, директор, канд. техн. наук, ООО НПО «ДИАТЕХ» (107061, г. Москва, Преображенская площадь, д. 8).

Заявленный вклад авторов:

Быков Дмитрий Владимирович – проведение промышленных испытаний, написание текста статьи

Лагунова Юлия Андреевна – генерация идеи исследования, постановка задачи исследования, научный менеджмент.

Сушко Андрей Евгеньевич – анализ результатов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Dmitriy V. Bykov^{1,2}, Yuliya A. Lagunova^{1,3}, Andrey E. Sushko²¹ Limited Liability Company NPO DIATEKH² Ural State Mining University³ Ural Federal University named after the First President of Russia B. N. Yeltsin

* for correspondence: yu.lagunova@mail.ru

APPLICATION OF AUTOMATED EXPERT SYSTEMS FOR ASSESSING
THE TECHNICAL CONDITION OF EQUIPMENT AT MINING ENTERPRISES

Article info

Received:

31 October 2025

Accepted for publication:

14 November 2025

Accepted:

15 November 2025

Published:

18 December 2025

Keywords: expert system; SAFE PLANT; automated assessment; hybrid model; maintenance and repair, fault tolerance, mining.

Abstract.

Evaluation of the actual technical condition of mining equipment is an interesting and relevant task. A large number of works are devoted to the development of expert systems for assessing the technical condition of objects. This article provides a generalized experience in using the expert system of the SAFE PLANT hardware and software complex in terms of the impact of the results of automated assessment of the technical condition on the process of adjusting the strategy for equipment maintenance. An analysis of the effectiveness and sufficiency of automated expert vibration diagnostic rules for the timely detection of violations of the integrity of dynamic equipment without involving maintenance technical personnel in this work is performed. Theoretical and experimental studies are carried out, based on the analysis of the use of automated expert system tools, a model for assessing the timeliness of the response of repair services to prevent emergency shutdowns of equipment is proposed. The results of the studies are based on the formed logic of the hybrid model of the expert system of the SAFE PLANT hardware and software complex for assessing the technical condition of conveyor, pumping and draft equipment of various mining enterprises in the country. The analysis of the efficiency of using expert system conclusions by the maintenance and repair system (MRO) employees in the process of planning and carrying out equipment repairs was performed. The results obtained in this study indicate the possibility of early detection of defects at an early stage of their development. High fault tolerance of dynamic equipment in the mining industry allows for long-term monitoring of the development of defects in the equipment, which leads to the possibility of personal adjustment of the strategy for maintenance of units in order to prevent their emergency shutdowns in the conditions of a mining enterprise.

For citation: Bykov D.V., Lagunova Yu.A., Sushko A.E. Application of automated expert systems for assessing the technical condition of equipment at mining enterprises. *Mining Equipment and Electromechanics*, 2025; 6(182):16-22 (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1816-4528-2025-6-16-22, EDN: CAZTLW

REFERENCES

1. Bobrovitsky V.I., Sidorov A.V. Improving the equipment maintenance and repair system in the context of centralized enterprise repair service. *Machine vibration: measurement, reduction, protection*. 2011; 1(24):23–28.
2. Drygin M.Yu. Analysis of mining equipment maintenance and repair systems. *Mining equipment and electromechanics*. 2020; 2:35–43.
3. GOST 18322-78. Equipment maintenance and repair system. Terms and definitions. 1978. 32 p.
4. Kizim A.V. Statement and solution of equipment repair and maintenance automation problems. *Reports*

of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics. 2009; 2 (20):131–135.

5. Sushko A.E., Demin M.A. Features of the implementation of expert systems for automated diagnostics. *Machine vibration: measurement, reduction, protection*. 2011; 4:51–55.

6. Kuzin E.G. Predictive control of the technical condition of mining transport machines. *Mining equipment and electromechanics*. 2023; 1 (165):41–49.

7. Guericke P.B., Guericke B.L. On the issue of forecasting the trouble-free operation of generator groups of quarry excavators. *Bulletin of KuzGTU*. 2024; 5:115–123.

8. Prygunov A.I., Papusha A.N. Vibration dynamics of machines and vibroacoustic diagnostics. *Bulletin of Moscow State Technical University*. 1998; 1(1):21–27.
9. Shirman A.R., Soloviev A.B. Practical vibration diagnostics and monitoring of the condition of mechanical equipment. Moscow: Moscow; 1996. 276 p.
10. Rosenberg G.Sh., Madorsky E.Z., Golub E.S. [et al.] Vibration diagnostics. Edited by G.Sh. Rosenberg. St. Petersburg Power Engineering Institute for Advanced Studies of the Ministry of Power Engineering (Russia), Dept. of Diagnostics of Power Engineering Equipment. Saint Petersburg: PEIPK; 2003. 283 p.
11. Petrukhin V.V., Petrukhin S.V. Fundamentals of vibration diagnostics and vibration measurement tools : a tutorial. Moscow : Infra-Engineering, 2010. 168 p. ISBN 978-5-9729-0026-8
12. Girdhar P. Practical machinery vibration analysis and predictive maintenance. Ed. by C. Scheffer, PhD. Oxford, Burlington (MA): Newnes; 2004. VII, 255 p. (Practical professional); ISBN 0-7506-6275-1.
13. Sushko A.E. Practical aspects of implementing vibration diagnostics systems in modern industrial production. *Machine vibration: measurement, reduction, protection*. 2007; 4:24–30.

14. Kim S.H., Park J.W., Kim J.H. Functional data analysis for assessing the fatigue life of construction equipment attachments. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2021. Vol. 35. P. 495–506. DOI: 10.1007/s12206-021-0108-0.
15. Zhang Z., Zhang H., Chen Y., Yan H. Research on dynamic load estimation method of crawler travel system. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2023; 37:555–567. DOI: 10.1007/s12206-023-0102-9.
16. Bouhalais M.L., Djebala A., Ouelaa N., Khemissi M. CEEMDAN and OWMRA as a hybrid method for rolling bearing fault diagnosis under variable speed. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2018; 94:2475–2489. DOI: 10.1007/s00170-017-1044-0.
17. Sushko A.E., Bykov D.V., Lagunova Yu.A. Comprehensive assessment of the technical condition of process equipment. *In the collection: Process equipment for the mining and oil and gas industry. Collection of works "Readings in memory of V.R. Kurbachek". XXIII international scientific and technical conference*. Ekaterinburg, 2025. Pp. 413–417.

© 2025 The Author. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

The authors declare no conflict of interest.

About the author:

Dmitry V. Bykov, postgraduate student, Ural State Mining University (620144, Russia, Ekaterinburg, Kuibysheva St., 30), project manager of LLC NPO "DIATECH" (107061, Moscow, Preobrazhenskaya Square, 8),

Yulia A. Lagunova, prof., doctor of technical sciences. Sciences, Ural State Mining University (620144, Russia, Ekaterinburg, Kuibysheva St., 30), Ural Federal University named after. the first President of Russia B.N. Yeltsin (620002, Russia, Ekaterinburg, Mira St., 19), ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3828-434X>, e-mail: yu.lagunova@mail.ru.

Andrey E. Sushko, Director, PhD in Engineering, NPO DIATEKH LLC (107061, Moscow, Preobrazhenskaya Square, 8).

Contribution of the authors:

Dmitry V. Bykov – conducting industrial tests, writing the text of the article.

Yulia A. Lagunova – generating the research idea, setting the research task, scientific management.

Andrey E. Sushko – analysis of the results.

Authors have read and approved the final manuscript.

