Оригинальная статья / Original Paper

https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-S2-37-46

Методические основы оценки технического состояния оборудования роботизированных комплексов для добычи угля и прогнозирования его изменения в процессе эксплуатации

П.Б. Герике[1], В.И. Клишин[1, 2]✉, Б.Л. Герике[1, 2]

[1] *Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук, г. Кемерово, Российская Федерация*

[2] *Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, г. Кемерово, Российская Федерация*

✉ Kvi194917@mail.ru

Резюме: В статье рассмотрены вопросы построения прогностических оценок работоспособности оборудования в составе роботизированного комплекса для подземной добычи угля. Из всех видов возможных отказов оборудования выделены постепенные отказы, позволяющие построить деградационные модели на основе функциональных методов диагностики их технического состояния по параметрам виброакустических сигналов, температурных полей и работающего масла. Для всех рассмотренных видов неразрушающего контроля обоснованы предельные состояния оборудования по используемым диагностическим критериям. Проанализированы различные модели изменения технического состояния горных машин, входящих в роботизированный комплекс, обоснованы критерии оценки адекватности модели фактическим значениям и определены две основные оценки границ интервала: доверительный интервал и интервал предсказания. Разработаны методики долгосрочного (для существующей системы планово-предупредительных ремонтов) и краткосрочного (для системы профилактического обслуживания) прогнозирования изменения технического состояния оборудования роботизированного комплекса для подземной разработки угольных месторождений. Предложенные фактографические модели основаны на обработке и анализе статистического материала, полученного при мониторинге диагностических параметров.

Ключевые слова: роботизированный комплекс, параметры вибрации, параметры температурного поля, параметры горюче-смазочных материалов, техническое состояние, изменение, оценка

Для цитирования: Герике П.Б., Клишин В.И., Герике Б.Л. Методические основы оценки технического состояния оборудования роботизированных комплексов для добычи угля и прогнозирования его изменения в процессе эксплуатации. *Горная промышленность.* 2023;(S2):37–46. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-S2-37-46

Methodological bases for assessing the health of equipment being part of robotic coal mining complexes and predicting its changes during operation

P.B. Gerike[1], V.I. Klishin[1, 2]✉, B.L. Gerike[1, 2]

[1] *Federal Research Center for Coal and Coal Chemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Kemerovo, Russian Federation*

[2] *T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo, Russian Federation*

✉ Kvi194917@mail.ru

Abstract: The article discusses the challenges of building predictive assessments of equipment availability that is part of robotic complex for underground coal mining. Gradual failures that make it possible to build degradation models based on functional methods of their health diagnostics using parameters of vibroacoustic signals, temperature fields and working oil have been selected from all the types of possible equipment failures. Limit states of equipment health have been justified for all the considered types of nondestructive testing based on the used diagnostic criteria. Various models of changes in the health of mining equipment being part of the robotic complexes have been analyzed, criteria for assessing the adequacy of the model to the actual values have been justified, and two main estimates of the interval limits, i.e. the confidence interval and the prediction interval, have been determined. Methodologies have been developed for long-term (for the existing system of scheduled maintenance) and short-term (for the system of preventative maintenance) forecasting of changes in the health of equipment being part of robotic complexes for underground coal mining. The proposed factographic models are based on processing and analysis of statistical material obtained by monitoring of diagnostic parameters.

Keywords: robotic complex, vibration parameters, temperature field parameters, fuel, oil and lubricant parameters, technical condition, change, assessment

For citation: Gerike P.B., Klishin V.I., Gerike B.L. Methodological bases for assessing the health of equipment being part of robotic coal mining complexes and predicting its changes during operation. *Russian Mining Industry.* 2023;(S2):37–46. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-S1-37-46

Введение

Научные исследования и технические обоснования технологии отработки мощных угольных пластов с управляемым выпуском угля подработанной подкровельной толщи интенсивно проводятся в различных странах [1–6].

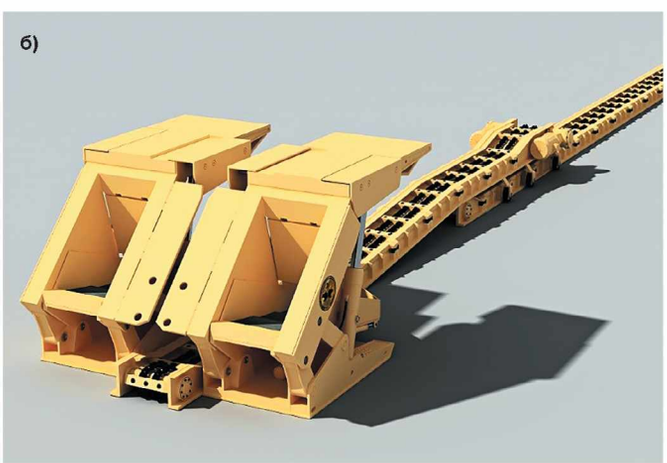


Рис. 1
Секция механизированной крепи с регулируемым выпуском угля на забойный скребковый конвейер для разработки пологих пластов (а) и крепь подэтажного обрушения для разработки крутых мощных угольных пластов (б)

Fig. 1
Powered support section with the controlled coal release on a drag-type conveyor for mining of flat-lying seams (a) and a support section for sub-level caving for mining of steep thick coal seams (b)

Предложенная сотрудниками Института угля ФИЦ УУХ СО РАН новая конструкция механизированной крепи с устройством регулируемого выпуска угля на забойный конвейер (рис. 1) содержит достоинства известных вариантов и исключает их недостатки [7; 8].

Постановка задачи

Для новых роботизированных комплексов необходимо разработать методику определения технического состояния оборудования, входящего в комплекс, для внедрения новой системы его технического обслуживания и ремонта по фактическому состоянию (профилактическое обслуживание) вместо существующей в настоящее время на угольных предприятиях системы планово-предупредительных ремонтов. Такой подход исключит аварийные отказы горных машин и оборудования и позволит осуществлять эффективное планирование ремонтных работ, предупреждающих возникновение аварийных ситуаций.

Длительная эксплуатация горно-шахтного оборудования неизбежно приводит к нарушению работоспособности его элементов даже при отсутствии дефектов изготовления и соблюдении правил эксплуатации [9; 10], что определяется спецификой работы горных машин: стесненностью пространства, высокими динамическими нагрузками и давлением рабочей жидкости, высокой запыленностью рабочего пространства и изменчивостью горнотехнических условий, сложностью напряженно-деформированного состояния металлоконструкций и изменчивостью внешних факторов.

Из функциональных методов диагностики технического состояния оборудования роботизированных комплексов наиболее приемлемыми являются вибродиагностика, тепловой контроль и анализ параметров работающего масла.

Методика проведения диагностических обследований

Анализ отечественного и зарубежного опыта контроля технического состояния оборудования показывает, что для обнаружения возможных отказов наиболее эффективен контроль состояния оборудования по параметрам механических колебаний, поскольку пути внешнего проявления скрытых механических дефектов весьма ограничены – это температура, шум и вибрация. При этом вибрация в шахтных условиях может быть легко измерена и вибрационные процессы практически мгновенно реагируют на изменение технического состояния, в то время как тепловые поля имеют большую инерционность, акустический сигнал слишком сложно выделить из шумовых помех, создаваемых другим работающим оборудованием, а эмиссионно-спектральный анализ требует камеральных исследований. Однако в совокупности эти методы позволяют существенно повысить достоверность результатов выводов диагностического обследования[1] [11–13].

На основании анализа ранее выполненных работ [14–17]:

– разработаны требования к измерению и регистрации результатов вибрационной диагностики;

– определены требования к измерению температурных полей, генерируемых работающим оборудованием;

– разработаны требования к проведению эмиссионно-спектрального анализа горюче-смазочных материалов для выявления посторонних примесей, характеризующих износ отдельных узлов и деталей редукторов;

– определены требования к моделям деградации технического состояния оборудования роботизированного комплекса при различных видах технического обслуживания.

При этом способ обработки получаемых результатов диагностики для выделения полезной информации о возникающих дефектах определяется необходимой глубиной диагностического обследования и возможными затратами на его проведение.

Результаты исследования

1. Вибродиагностика

Для обследования технического состояния выбран питатель для выпуска подкровельной толщи на забойный конвейер, макетный образец которого представлен на рис. 2.

1 РД 26.260.004-91. Методические указания. Прогнозирование остаточного ресурса оборудования по изменению параметров его технического состояния при эксплуатации. М.: Стандартинформ. 1991. 27 с.

Измерения параметров вибрации (виброускорения a, м/с^2) производились при различных скоростях полотна питателя v, м/с, в трех контрольных точках на гидроцилиндре и двух контрольных точках на гидроблоке питателя (рис. 3), результаты измерений приведены в табл. 1.

В каждой контрольной точке проводилась серия замеров ($n = 5$) для получения осредненных результатов.

Рис. 2
Разгрузка угля из бункера на питатель

Fig. 2
Coal discharge out of the bunker onto the feeder

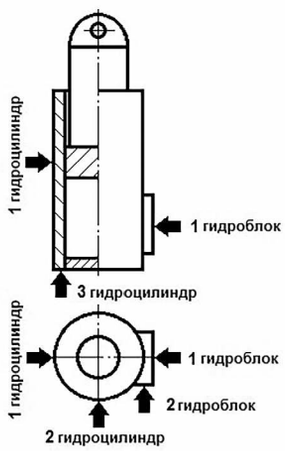


Рис. 3
Схема контрольных точек измерения виброакустического сигнала

Fig. 3
Schematic layout of test points for measuring vibroacoustic signals

Таблица 1
Вибрация корпуса цилиндра и гидроблока

Table 1
Cylinder body and hydraulic block vibration

N° п/п	Без нагрузки			При полной нагрузке		
	v_1 = 0,1 м/с	v_2 = 0,2 м/с	v_3 = 0,3 м/с	v_1 = 0,1 м/с	v_2 = 0,2 м/с	v_3 = 0,3 м/с
1ц	a=0,09 м/с^2	a=0,07 м/с^2	a=0,14 м/с^2	a=0,08 м/с^2	a=0,11 м/с^2	a=0,12 м/с^2
2ц	a=0,12 м/с^2	a=0,13 м/с^2	a=0,13 м/с^2	a=0,13 м/с^2	a=0,12 м/с^2	a=0,13 м/с^2
3ц	a=0,16 м/с^2	a=0,19 м/с^2	a=0,20 м/с^2	a=0,18 м/с^2	a=0,11 м/с^2	a=0,12 м/с^2
1г	a=0,08 м/с^2	a=0,11 м/с^2	a=0,12 м/с^2	a=0,10 м/с^2	a=0,12 м/с^2	a=0,12 м/с^2
2г	a=0,07 м/с^2	a=0,10 м/с^2	a=0,10 м/с^2	a=0,09 м/с^2	a=0,10 м/с^2	a=0,09 м/с^2

Из анализа полученных результатов вибрации, измеренных на корпусе гидроцилиндра и гидроблоке, следует, что максимальное значение виброускорения возникает при движении питателя со скоростью v_3= 0,3 м/с без нагрузки (см. табл. 1). Как следует из спектрального анализа виброускорения (рис. 4 и 5), превалирующая частота составляет около $f \approx 680$ Гц, что связано с возникновением кавитационных перетоков рабочей жидкости через манжетные уплотнения.

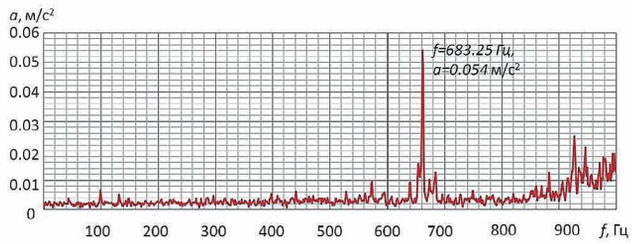


Рис. 4
Поперечная составляющая вибрации в контрольной точке 1ц при v_3 = 0,3 м/с (a = 0,14 м/с^2)

Fig. 4
Lateral component of vibration at the 1ц test point at v_3 = 0,3 м/с (a = 0,14 м/с^2)

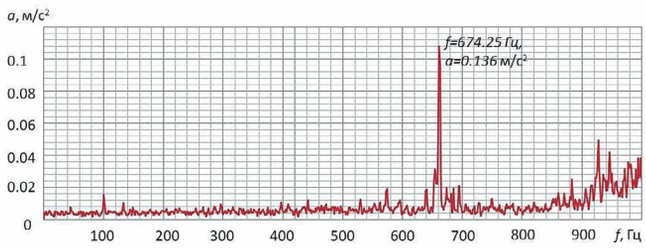


Рис. 5
Вертикальная составляющая вибрации в контрольной точке 3ц при v_3 = 0,3 м/с (a = 0,20 м/с^2)

Fig. 5
Vertical component of vibration at the 3ц test point at v_3 = 0,3 м/с (a = 0,20 м/с^2)

Таким образом, доказано, что разработанная методика пригодна для контроля технического состояния устройств, обеспечивающих управляемый выпуск угля подкровельной толщи на забойный конвейер.

2. Термография

В условиях горного производства для получения необходимой информации об изменении состояния машины достаточно использовать методы сравнительной термографии, без получения точного значения абсолютной температуры. Указанный метод позволяет обнаружить разницу в работе машины, при минимальных требованиях к условиям измерения. Качество и достоверность получаемой информации зависят как от применяемого инструмента и алгоритма обработки данных, так и от квалификации оператора [18].

Анализ температурных аномалий результатов инфракрасной термографии позволяет использовать критерии оценки технического состояния на основе определения разности температур (критерий ΔT), а также на основе максимально допустимой температуры (критерий T_{max}).

В случае выявления температурной аномалии проводится оценка возникшего дефекта, если дефект признан критическим и ясна причина его возникновения, необходимо устранить дефект. Если причина не ясна, требуется провести дополнительное обследование методами вибрационной диагностики и провести анализ параметров смазочного масла.

Предварительные оценки категории технического состояния, созданные на анализе термограмм редукторов забойных конвейеров, исследованы в работе [19] и приведены в табл. 2.

На рис. 6 приведены примеры термограмм редукторов забойного конвейера.

Таблица 2
Категории технического состояния редукторов по результатам теплового контроля

Table 2
Categories of gearbox technical condition according to the thermal inspection results

Температурная аномалия, ΔT,°C	Фактическая температура смазки, T_{max}, °C	Категории технического состояния
0–5	≤ 80	Категория A – хорошее состояние
5–10	80–90	Категория B – ограниченно работоспособное
10–15	90–100	Категория C – критическое состояние, дополнительная диагностика
> 15	> 100–110	Категория D – недопустимое состояние, требуется оперативное вмешательство

а) б)

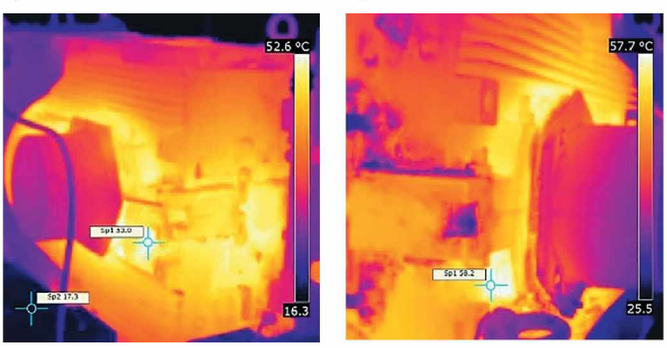
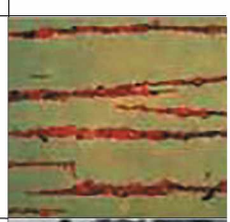
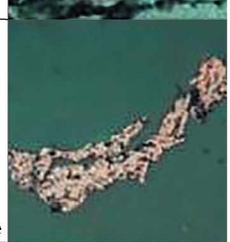
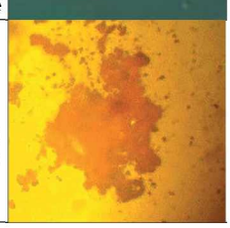


Рис. 6
Термограммы редукторов одного привода в хорошем техническом состоянии:
а – температура 53,0 °C,
б – температура 58,2 °C

Fig. 6
Thermograms of gearboxes of one drive in good technical condition:
a – the temperature of 53,0°C,
b – the temperature of 58,2 °C

Таблица 3
Вид и характеристика частиц изнашивания элементов редуктора конвейера

Table 3
The view and characteristics of wear fragments of conveyor reduction gear box elements

Вид изнашивания (терминология на английском языке)	Характеристика частиц изнашивания	Форма и размеры частиц
Окислительное (Oxidative wear)	Гладкие пластины, длина частиц 0,5...15 мкм, толщина частиц 0,15...1 мкм	
Абразивное (Abrasive wear)	Частицы абразивного изнашивания стержневой или игольчатой формы длиной от 5 мкм и толщиной от 0,25 мкм	
Адгезионное (Adhesive wear)	Сферические или чешуйчатые частицы, размеры до 20–50 мкм	
Усталостное (Fatigue wear)	Плоские хлопьевидные пластины с гладкой поверхностью и хаотичная, беспорядочная форма периферии. Размеры частиц 10...100 мкм и более	
Фреттинг-коррозия (Fretting corrosion wear)	Мелкодисперсные частички окислов железа Fe_2O_3 от светло-коричневого до светло-красного цвета	

3. Спектрально-эмиссионный анализ работающего масла

Ранее выполненные исследования показали, что абразивное изнашивание вызывается процессами микрорезания рабочих поверхностей твердыми частицами пыли (горных пород) или другими продуктами износа. На микрофотографии частицы абразивного износа имеют вид микростружки, а на поверхностях трения имеются царапины, ориентированные в направлении скольжения[2] [20].

Характеристика видов изнашивания представлена в табл. 3.

В качестве объекта диагностики были выбраны три редуктора Moventas Santasalo D3RST82XO шахтовых конвейеров.

Результаты комплексного обследования параметров смазочного масла, вибрации и инфракрасного излучения редукторов D3RST82XO приведены в работах [14; 21–22].

2 АНСИ/АГМА 1010: E95 (ANSI/AGMA 1010: E95) Внешний вид зубьев зубчатых колес. Терминология износа и отказа (Appearance of gear teeth – terminology of wear and failure).

Рассмотрим результаты мониторинга параметров смазочного масла для редукторов ленточного конвейера 3ЛЛ1600 с расположением приводных блоков P3, P4, P5, представленном на рис. 7.

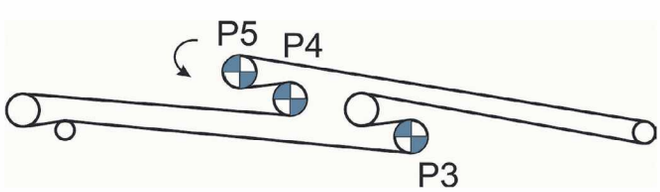


Рис. 7
Схема расположения приводных блоков на конвейере 3ЛЛ1600

Fig. 7
Layout of drive units of the ZLL1600 conveyor

Содержание механических примесей, содержащихся в работающем масле, представлены на рис. 8–11.

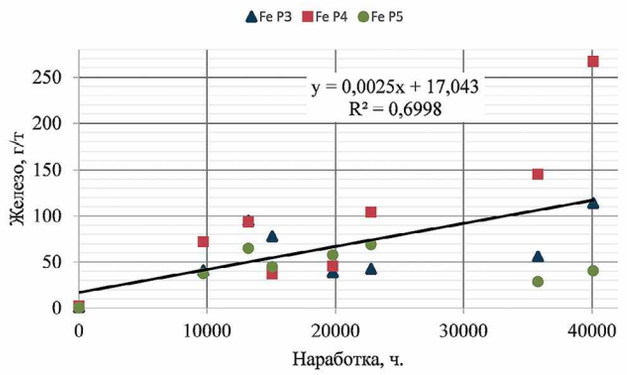


Рис. 8
График изменения содержания железа в масле редукторов

Fig. 8
Graph of varying iron content in reduction gear box oil

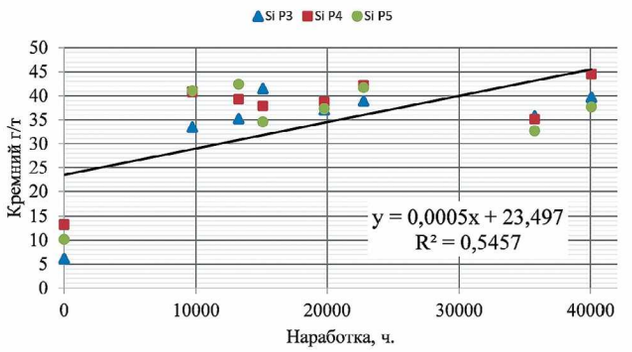


Рис. 9
График изменения содержания кремния в масле редукторов

Fig. 9
Graph of varying silicon content in reduction gear box oil

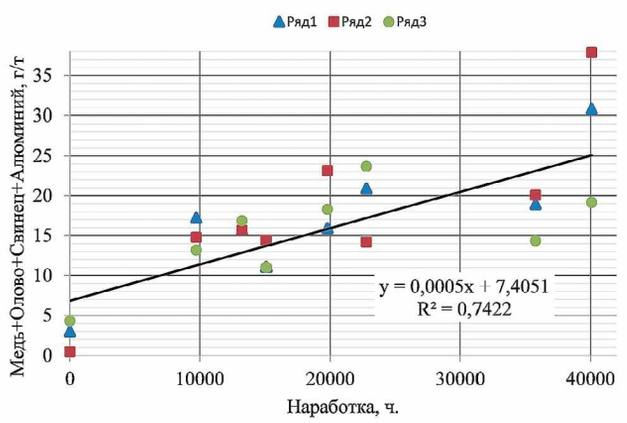


Рис. 10
График изменения содержания совокупности цветных металлов (медь, олово, свинец, алюминий) в масле редукторов

Fig. 10
Graph of varying non-ferrous metals (copper, tin, lead, aluminum) content in reduction gear box oil

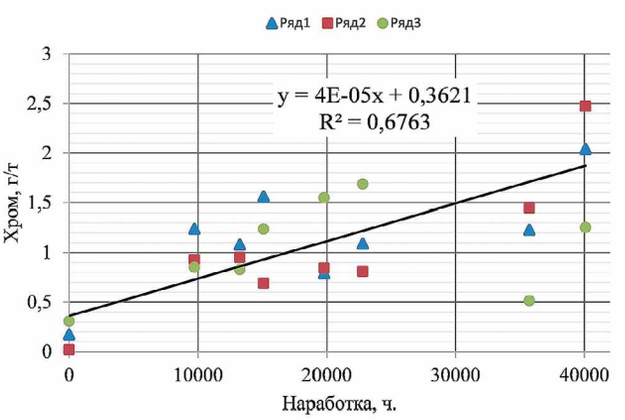


Рис. 11
График изменения содержания хрома в масле редукторов

Fig. 11
Graph of varying chromium content in reduction gear box oil

Анализ графиков изменения характерных параметров масла и усредненных линий трендов (рис. 8–11) показывает приемлемые коэффициенты детерминации ($R^2 \geq 0{,}5$) для накопления кремния и хорошие ($R^2 \geq 0{,}7$) для накопления совокупности цветных металлов, железа и хрома.

4. Построение долгосрочного прогноза

Если рассматриваемый ряд представляет собой непериодический тренд, то последующей задачей прогнозирования является отыскание аналитической зависимости, наиболее точно соответствующей детерминированной составляющей временного ряда. Как правило, для этого используется метод наименьших квадратов, имеющий ряд преимуществ перед другими [23–25], который основывается на допущении, что результаты измерения нормально распределены относительно своего математического ожидания.

В случае отличия закона распределения диагностического параметра от нормального можно использовать другие формы законов распределения [26].

Поскольку на стадии зарождения дефектов абсолютные значения различных диагностических параметров растут экспоненциально [13; 27], а результаты их представляются, как правило, в логарифмическом масштабе, то искомая зависимость тренда будет иметь линейный вид. Другие модели, высокие аппроксимирующие свойства которых могут быть получены за счет увеличения их сложности, зачастую имеют неудовлетворительные экстраполяционные свойства [28; 29].

В этом случае величина K является логарифмом диагностического параметра и рассматривается как зависимая, а величина t является независимой переменной (в нашем случае – время).

Предположим, что при работе диагностируемой системы за время её эксплуатации T произошло возрастание контролируемого параметра на величину ΔK_T. Тогда искомый тренд будет выглядеть следующим образом:

$$K_T - K_0 = b(t - t_0) \quad (1)$$

или

$$K_T - K_0 = \bar{V}_K(t - t_0), \quad (2)$$

откуда несложно определить величину средней скорости деградации диагностируемой системы $\bar{V}_K$ и сроки достижения предельного состояния (рис. 12 здесь $V_{ПР}$ – предельное значение диагностического параметра, $V_{пес}$ и $V_{опт}$ – 95% доверительные интервалы оценки предельного состояния, $T_{пес}$, $T_{ср}$ и $T_{опт}$ – пессимистическая, средняя и оптимистическая оценки остаточного ресурса).

Прямую, соответствующую минимальной сумме ква-

дратов погрешности, с наибольшей вероятностью можно рассматривать в виде $(K - \bar{K}) = b(t - \bar{t})$,

где $\bar{K} = \frac{\sum_1^n K_i}{n}$; $\bar{t} = \frac{\sum_1^n t_i}{n}$.

Прямая, описываемая уравнением $(K - \bar{K}) = b(t - \bar{t})$, проходит через начало координат. Однако на практике часто возникают ситуации, когда значение искомой функции $K \neq 0$ при нулевом значении аргумента t_0. В этом случае уравнение прямой можно описать функцией вида $\tilde{K} = a + bt$. Коэффициент регрессии b и свободный член a искомой зависимости определяются совместной изменчивостью переменных, которую можно определить через сумму квадратов отклонений между наблюдаемыми и вычисленными величинами по формуле

$$s^2 = \sum_1^N (K_i - a - bt_i), \tag{3}$$

а сами коэффициенты a и b из уравнений

$$\frac{\partial s}{\partial a} = -\sum_1^N (K_i - a - bt_i) = 0; \tag{4}$$

Для проверки адекватности регрессионной модели используется коэффициент корреляции $r \in [-1; +1]$, который рассчитывается по формуле

$$r = \frac{\left[\sum_1^N K_i t_i - N\bar{K}\bar{t}\right]}{\left[\left(\sum_1^N t_i^2 - N\bar{t}^2\right)\left(\sum_1^N K_i^2 - N\bar{K}^2\right)\right]^{0,5}}. \tag{5}$$

Для оценки надежности коэффициента корреляции определяют его погрешность по приближенной формуле [23]

$$m_r = \frac{1 - r^2}{\sqrt{N}}. \tag{6}$$

При небольшом числе наблюдений ($N \leq 50$) корреляционную связь с доверительной вероятностью p0 считают существенной (значимой), если соблюдается условие $t_p > t_\alpha$,

$$t_p = r\sqrt{\frac{N-2}{1-r^2}}, \tag{7}$$

где t_p – расчетная величина коэффициента Стьюдента; t_α – табличное значение коэффициента Стьюдента для уровня значимости $\alpha = (1 - p_0)$ и числа степеней свободы $k = N - 2$.

Полученные значения коэффициентов линейной регрессии также являются по своей сути статистическими оценками и характеризуются своими статистическими параметрами (доверительным интервалом). На практике используются две основные оценки границ интервала: доверительный интервал Δ и интервал предсказания δ [30]:

$$\Delta = \sqrt{\frac{\sum_1^N \left(\tilde{K}_i - K_i\right)^2}{N-2}\left[1 + \frac{1}{N} - \frac{(t_i - \bar{t})^2}{N\bar{t}^2 - \sum_1^N t_i^2}\right]}; \tag{8}$$

$$\delta = \sqrt{\frac{\sum_1^N (\tilde{K}_i - K_i)^2}{N-2}\left[\frac{1}{N} - \frac{(t_i - \bar{t})^2}{N\bar{t}^2 - \sum_1^N t_i^2}\right]}.$$

Таким образом, искомый тренд находится в некотором интервале оценок, определяемом одной из границ и заданной доверительной вероятностью P по статистике Стьюдента t_s [23]:

$$K = \tilde{K} \pm t_s(P)\Delta \tag{9}$$

или

$$K = \tilde{K} \pm t_s(P)\delta. \tag{10}$$

На практике при оценке остаточного ресурса при малом числе измерений используется очень простой подход [25]. Остаточный ресурс определяется по формуле

$$T = \frac{K_{\text{ПР}} - K_0}{\bar{V}_K}, \tag{11}$$

где $K_{\text{ПР}}$, K_0 – предельное и начальное значения контролируемого параметра; $\bar{V}_K$ – средняя скорость изменения контролируемого параметра.

Предельное техническое состояние любой системы может быть определено двумя способами [31; 32]:

– на стадии проектирования, когда на основании расчетов устанавливают допустимые значения различных «отклонений», например, допустимый остаточный дисбаланс, допустимую величину расцентровки, допустимые зазоры в подшипниках и т.д.;

– во время эксплуатации, путем накопления и анализа параметров, характеризующих состояние системы.

Если первый способ сопряжен с серьезными вычислительными сложностями и целым рядом приближений и допущений, то второй способ при диагностике сложных систем гораздо более эффективен.

В общем случае задача прогнозирования остаточного ресурса диагностируемой системы по совокупности значений диагностического параметра, полученных на основании данных мониторинга, сводится к экстраполяции найденного тренда и определению времени его пересечения с линией, определяющей пороговое состояние (рис. 12), как это было показано ранее.

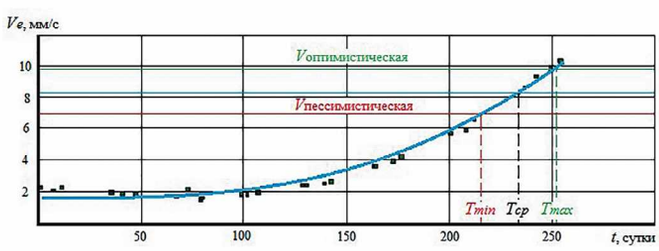


Рис. 12
Прогнозируемое изменение технического состояния объекта диагностики в координатах «диагностический параметр – время»

Fig. 12
Predicted change in technical condition of the diagnosed object in "diagnostic parameter – time" coordinates

В общем случае это допущение может быть представлено в следующем виде:

$$s_L^2 = s^2\left[\frac{1}{N} + \frac{3(N + 2T - 1)^2}{N(N^2 - 1)}\right], \tag{12}$$

или в предельном случае при равенстве дисперсий

$$\frac{1}{N} + \frac{3(N + 2T - 1)^2}{N(N^2 - 1)} = 1, \tag{13}$$

откуда для выбранного периода прогнозирования T может быть получено минимально необходимое число измерений N.

Для решения задач прогнозирования развития неисправностей особо ответственного оборудования может

быть использована величина T_{min} – гарантируемый период надежной работы, которая рассчитывается из уравнения

$$\widetilde{K} \pm t_s(P)s_r = K_0 + \Delta K, \quad (14)$$

где s_r – среднеквадратичное отклонение прогнозируемой величины.

5. Построение краткосрочного прогноза

Ранее было показано, что для построения долгосрочного прогноза необходимо проведение большого количества измерений. Это часто бывает сопряжено с целым рядом сложностей, среди которых можно назвать:

– удаленность объектов контроля;
– малочисленность служб диагностики;
– изменения режимов работы оборудования и т.д.

С другой стороны, потребность в таком долгосрочном прогнозе существует лишь при организации обслуживания оборудования по фактическому состоянию. При системе плановых ремонтов, существующей в настоящее время на предприятиях Кузбасса, гораздо важнее построить прогноз, дающий ответ на основной вопрос эксплуатации: проработает ли объект диагностики до ближайшего планового ремонта или до следующего момента диагностики.

Ответ на этот вопрос позволяет дать краткосрочное прогнозирование. Для построения эффективного краткосрочного прогноза ряд источников, например [24; 25; 33], рекомендует обратиться к адаптивному краткосрочному прогнозированию, в котором наиболее полно учитывается диагностическая информация, содержащаяся в последних измерениях. На основе этой информации корректируются параметры принятой модели, т.е. модель адаптируется к изменившимся условиям. Прогнозирование с помощью адаптивных методов дает хорошие результаты на относительно малых промежутках времени (как правило, на 1–2 интервала вперед), что, однако, полностью удовлетворяет возникающие при системе плановых ремонтов потребности.

Простейшая адаптивная модель процесса основана на вычислении экспоненциальной средней в момент времени t и выглядит следующим образом:

$$S_t = \alpha K_t + \beta S_{t-1}, \quad (15)$$

где α – параметр экспоненциального сглаживания ($0<\alpha<1$), $\beta = 1-\alpha$.

Формула (15) может быть представлена в виде

$$S_t = \alpha K_t + (1-\alpha)S_{t-1} = S_{t-1} + \alpha(K_t - S_{t-1}). \quad (16)$$

Если S_{t-1} рассматривать как прогноз на один шаг вперед, то величина $K_t - S_{t-1}$ является погрешностью этого прогноза, а новый прогноз S_t получается в результате корректировки предыдущего прогноза с учетом его ошибки. В общем случае для ряда, имеющего N членов, получаем следующую формулу:

$$S_t = \alpha \sum_{i=0}^{N-1} \beta^i K_{t-i} + \beta^N S_0, \quad (17)$$

где S_0 – величина, характеризующая начальные условия для применения формулы.

При большом количестве данных для построения краткосрочного прогноза состояния диагностируемой системы, обслуживаемой по стратегии плановых ремонтов, в качестве S_0 может быть использовано среднеарифметическое значение рассчитанного ранее единого диагностического критерия.

При практическом использовании адаптивных методов для построения краткосрочных прогнозов существенные затруднения вызывает выбор величины параметра экспоненциального сглаживания α. В работе [34] показано, что с увеличением α повышается роль последней информации об измерениях в развитии временного ряда, однако при этом плохо сглаживаются случайные колебания. Уменьшение параметра α приводит к большему сглаживанию осредненной кривой, т.к. дисперсия экспоненциальной средней рассчитывается по формуле

$$D(S_t) = \alpha \frac{\sigma^2}{2-\alpha}. \quad (18)$$

Рекомендуется, в тех случаях, когда априорная информация о величине α отсутствует, для единичных вычислений прогнозируемых параметров использовать величину α от 0,1 до 0,3 [34]. В общем случае выбор значения α во многом определяется целью исследования. Чем на меньшее время строится прогноз, тем большую ценность имеет последняя информация. В этом случае рекомендуются значения α в диапазоне от 0,5 до 0,7. При относительно долгосрочных прогнозах необходимо в большей степени учитывать информацию о развитии процесса за продолжительный период времени и значение α при этом составляет от 0,1 до 0,3.

На основании ряда практических работ, выполненных в рамках периодического мониторинга состояния подшипниковых узлов основного и вспомогательного оборудования на горнорудных и угольных предприятиях, для решения задач краткосрочного прогнозирования состояния подшипниковых узлов адаптивными методами были рассчитаны значения параметра α, удовлетворяющие требованиям надежности в условиях системы плановых обслуживаний и ремонтов. Для агрегатов, работающих на стационарных (установившихся) режимах работы с интервалом мониторинга менее 1/20 межремонтного интервала, значение α может составлять 0,55. Для агрегатов, работающих на нестационарных режимах (нагрузка постоянно меняется) работы или с интервалом мониторинга более 1/20 межремонтного интервала, значение α не должно превышать 0,3.

Заключение и общие выводы

Разработанные на основе анализа научно-информационных источников методики функциональной диагностики оборудования роботизированного комплекса прошли апробацию на модельном образце крепи с установленным гидравлическим питателем, а также на аналогах редукторов забойных конвейеров, проходческих и очистных комбайнов и подтвердили свою пригодность для оценки работоспособности узлов и агрегатов роботизированного комплекса в производственных условиях (используемое диагностическое оборудование имеет взрывозащиту РВ Ex ib I Mb x – для работы в горных выработках).

Комплексное использование методов вибродиагностики, пассивного теплового неразрушающего контроля и спектрально-эмиссионного контроля состава горючесмазочных материалов обеспечивает (при 95%-ной доверительной вероятности) необходимую достоверность

(0,85–0,98) результатов долгосрочного прогнозирования работы оборудования комплекса.

Рассмотренные способы выделения тренда детерминированной компоненты для построения прогноза позволяют получить меры достоверности для статистических оценок.

Отдельные элементы методических основ оценки технического состояния роботизированных комплексов нашли свое применение при диагностике различных горных машин и оборудования – экскаваторов и буровых станков [10; 35], проходческих комбайнов [36], конвейеров [37], вентиляционных установок [38], комплексов глубокой разработки угля [39] и др.

Список литературы

1. Шундулиди И.А., Марков А.С., Калинин С.И., Егоров П.В. *Выбор параметров технологии отработки мощных угольных пластов с выпуском межслоевых и подкровельных пачек угля.* Кемерово: Кемер. отд-ние Акад. горн. наук; 1999. 258 с.
2. Jabinpoura A., Bafghib A.Y., Gholamnejad J. Application of vibration in longwall top coal caving method. *International Academic Journal of Science and Engineering*. 2016;3(2): 102–109.
3. Rakesh K., Kumar S.A., Kumar M.A., Rajendra S. Underground mining of thick coal seams. *International Journal of Mining Science and Technology.* 2015;25(6):885–896. https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2015.09.003
4. Hebblewhite B.K. Status and Prospects of Underground Thick Coal Seam Mining Methods. In: The 19th *International Mining Congress and Fair of Turkey, IMCET2005, Izmir, Turkey, June 09–12, 2005,* pp. 169–178.
5. Guo J., Ma L., Wang Y., Wang F. Hanging wall pressure relief mechanism of horizontal section top-coal caving face and its application – A case study of the Urumqi coalfield, China. *Energies,* 2017;10(9):1371. https://doi.org/10.3390/en10091371
6. Unver B., Yasitli N.E. Modelling of strata movement with a special reference to caving mechanism in thick seam coal mining. *International Journal of Coal Geology,* 2006;66(4):227–252. https://doi.org/10.1016/j.coal.2005.05.008
7. Клишин В.И., Шундулиди И.А., Ермаков А.Ю., Соловьев А.С. *Технология разработки запасов мощных пологих пластов с выпуском угля.* Новосибирск: Наука; 2013. 248 с.
8. Клишин В.И., Фокин Ю.С., Кокоулин Д.И., Кубанычбек Б. *Разработка мощных пластов механизированными крепями с регулируемым выпуском угля.* Новосибирск: Наука; 2007. 135 с.
9. Артемьев А.А., Потапенко В.С., Иванов С.Л., Кремчеев Э.А., Поддубная А.А., Фокин А.С. К вопросу оценки ресурса элементов трансмиссий горных машин. *Горное оборудование и электромеханика.* 2007;(9):31–35.
10. Герике П.Б., Герике Б.Л. Прогнозирование остаточного ресурса горных машин и оборудования. *Наукоемкие технологии разработки и использования минеральных ресурсов.* 2020;(6):144–150.
11. Клюев В.В., Фурсов А.С., Филинов М.В. Подходы к построению систем оценки остаточного ресурса технических объектов. *Контроль. Диагностика.* 2007;(3):18–23. Режим доступа: http://www.idspektr.ru/download/kd_03_2007.pdf
12. Решетов А.А., Аракелян А.К. *Неразрушающий контроль и техническая диагностика энергетических объектов.* Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та; 2010. 470 с.
13. Бигус Г.А., Даниев Ю.Ф., Быстрова Н.А., Галкин Д.И. *Основы диагностики технических устройств и сооружений.* М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана; 2015. 445 с.
14. Kuzin E.G., Gerike B.L, Drozdenko Yu.V., Lupiy M.G., Grigoryeva N.V. Diagnostics of technical condition of gear units of belt conveyors for the aggregate of methods of nondestructive testing. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2017;253:012013. https://doi.org/10.1088/1757-899X/253/1/012013
15. Герике Б.Л., Клишин В.И., Кузин Е.Г. Распознавание технического состояния редукторов горнотранспортного оборудования. *Наукоемкие технологии разработки и использования минеральных ресурсов.* 2017;(3):184–192.
16. Gerike P.B., Gerike B.L., Klishin V.I. Analyzing the vibration parameters of gas-cleaning units operated in coal and mining industry of Kuzbass. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.* 2021;823:012012. https://doi.org/10.1088/1755-1315/823/1/012012
17. Герике Б.Л., Клишин В.И., Пудов Е.Ю., Кузин Е.Г. Построение системы интеллектуального обслуживания редукторов горношахтного оборудования. *Горный журнал.* 2017;(12):68–73. https://doi.org/10.17580/gzh.2017.12.13
18. Вавилов В.П. *Инфракрасная термография и тепловой контроль.* М.: ИД Спектр; 2009. 544 с.
19. Хорешок А.А., Кузин Е.Г., Шальков А.В., Мамаева М.С., Лупий М.Г. Оценка энергоэффективности транспортных установок по результатам технической диагностики. *Вестник Кузбасского государственного технического университета.* 2017;(5):79–85. https://doi.org/10.26730/1999-4125-2017-5-79-84
20. Крагельский И.В. *Трение и износ.* М.: Машиностроение; 1968. 480 с.
21. Кузин Е.Г. Совершенствование технического обслуживания редукторов на основании мониторинга параметров эксплуатационных материалов. В кн.: Пудов Е.Ю., Клаус О.А. (ред.) *Перспективы инновационного развития угольных регионов России: сб. тр. 6-й Междунар. науч.-практ. конф., Прокопьевск, 10–12 апреля 2018 г.* Прокопьевск: филиал КузГТУ в г. Прокопьевске; 2018. С. 47–52.
22. Gerike B.L., Klishin V.I., Kuzin E.G. Identification of mine rescue equipment reduction gears technical condition. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.* 2017;84:012022. https://doi.org/10.1088/1755-1315/84/1/012022
23. Вентцель Е.С. *Теория вероятностей.* 8-е изд., стереотип. М.: Высшая школа; 2002. 575 с.
24. Айвазян С.А., Енюков И.С., Мешалкин Л.Д. *Прикладная статистика. Исследование зависимостей.* М.: Финансы и статистика; 1985. 487 с.
25. Шпаков П.С., Попов В.Н. *Статистическая обработка экспериментальных данных.* М.: Издательство Московского государственного горного университета; 2003. 268 с.
26. Профос П. (ред.) *Измерения в промышленности. Кн. 1. Теоретические основы.* М.: Металлургия; 1990. 492 с.
27. Drygin S., Peton N., Ahmad S. Oil whirl instability on a gearbox and gas turbine unbalance. In: *International Machine Vibration Analysis Conference (IMVAC Europe). Antwerp, Belgium. June 03–06, 2019.*
28. Краковский Ю.М. *Математические и программные средства оценки технического состояния оборудования.* Новосибирск: Наука; 2005. 200 с.

29. Yu J., Peton N. Fluid Film Bearing Damage Detection Based on Vibration Data. In: *48th Turbomachinery Symposium. Houston, Texas, USA. September 10–12, 2019.*
30. Румшинский Л.З. *Математическая обработка результатов эксперимента.* М.: Наука; 1971. 164 с.
31. Ширман А.Р., Соловьев А.Б. *Практическая вибродиагностика и мониторинг состояния механического оборудования.* М.; 1996. 276 с.
32. Graham K.S. *Advanced vibration analysis.* 2013. 637 p.
33. Broomhead D.S., King G.P. Extracting qualitative dynamics from experimental data. *Physica D: Nonlinear Phenomena.* 1986;20 (2-3):217–236. https://doi.org/10.1016/0167-2789(86)90031-X
34. Сушко А.Е., Грибанов В.А. Проблемы оценки технического состояния динамического оборудования опасных производственных объектов. *Безопасность труда в промышленности.* 2011;(10):58–65.
35. Герике Б.Л., Герике П.Б., Ещеркин П.В. Математическая модель оценки фактического состояния бурового станка. *Уголь.* 2010;(2):45–46.
36. Kovalev V., Gerike B, Khoreshok A., Gerike P. Preventive maintenance of mining equipment based on identification of its actual technical state. In: P*roceedings of the Taishan Academic Forum – Project on Mine Disaster Prevention and Control, October 17–20, 2014, Qingdao, China.* Amsterdam, Paris, Beijing: Atlantis Press; 2014, pp. 184–189. https://doi.org/10.2991/mining-14.2014.29
37. Kuzin E., Bakin V., Dubinkin D. Mining equipment technical condition monitoring. *E3S Web of Conferences.* 2018;41:03020. https://doi.org/10.1051/e3sconf/20184103020
38. Герике Б.Л., Шахманов В.Н. Оценка остаточного ресурса вентиляторов главного проветривания при незначительном числе наблюдений. В кн.: *Современные тенденции и инновации в науке и производстве: материалы 3-й Междунар. науч.-практ. конф., Междуреченск, 2–4 апреля 2014 г.* Кемерово: Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева; 2014. С. 26–27.
39. Герике Б.Л., Копытин Д.В., Тациенко В.П. Опыт использования цифровых технологий в оценке технического состояния комплексов глубокой разработки пластов. *Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности.* 2019;(3):72–80. https://doi.org/10.26631/arc3-2019-72-80

References

1. Shundulidi I A., Markov A.S., Kalinin S.I., Yegorov P.V. *Selecting technological parameters for developing thick coal seams with releasing interlayer and underroof patches of coal.* Kemerovo: Kemerovskoye otdeleniye academii gornykh nauk; 1999, 258 p. (In Russ.)
2. Jabinpoura A., Bafghib A.Y., Gholamnejad J. Application of vibration in longwall top coal caving method. *International Academic Journal of Science and Engineering.* 2016;3(2): 102–109.
3. Rakesh K., Kumar S.A., Kumar M.A., Rajendra S. Underground mining of thick coal seams. *International Journal of Mining Science and Technology.* 2015;25(6):885–896. https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2015.09.003
4. Hebblewhite B.K. Status and Prospects of Underground Thick Coal Seam Mining Methods. In: *The 19th International Mining Congress and Fair of Turkey, IMCET2005, Izmir, Turkey, June 09–12, 2005,* pp. 169–178.
5. Guo J., Ma L., Wang Y., Wang F. Hanging wall pressure relief mechanism of horizontal section top-coal caving face and its application – A case study of the Urumqi coalfield, China. *Energies,* 2017;10(9):1371. https://doi.org/10.3390/en10091371
6. Unver B., Yasitli N.E. Modelling of strata movement with a special reference to caving mechanism in thick seam coal mining. *International Journal of Coal Geology,* 2006;66(4):227–252. https://doi.org/10.1016/j.coal.2005.05.008
7. Klishin V.I., Shundulidi I.A., Ermakov A.Yu., Solovyov A.S. The technology for developing thick flat seams with coal release. Novosibirsk: Nauka; 2013. 248 p. (In Russ.)
8. Klishin V.I., Fokin Yu.S., Kokoulin D.I., Kubanychbek B. *Development thick seams by mechanized supports with regulated coal release.* Novosibirsk: Nauka; 2007. 135 p. (In Russ.)
9. Artemiev A.A., Potapenko S.L., Ivanov S.L., Kremcheev E.A., Poddubnaya A.A., Fokin A.S. To the issue of evaluating mining machine transmission elements. *Gornoe Oborudovanie i Elektromekhanika = Mining Equipment and Electromechanics.* 2007;(9):31–35. (In Russ.)
10. Gerike P.B., Gerike B.L. Forecasting mining machine and equipment remaining life time. *Naukoemkie Tekhnologii Razrabotki i Ispolzovaniya Mineralnykh Resursov.* 2020;(6):144–150. (In Russ.)
11. Klyuev V.V., Fursov A.S., Filinov M.V. Approaches to forming up the system for evaluating technical objects remaining life time. *Kontrol'. Diagnostika.* 2007;(3):18–23. (In Russ.) Available at: http://www.idspektr.ru/download/kd_03_2007.pdf
12. Reshetov A.A., Arakelyan A.K. *Non-destructive control and technical diagnostics of power facilities.* Cheboksary: Chuvash State University; 2010. 470 p. (In Russ.)
13. Bigus G.A., Daniyev Yu.F., Bystrova N.A., Galkin D.I. B*ases of technical devices and facilities diagnostics.* Moscow: Bauman Moscow State Technical University; 2015. 445 p. (In Russ.)
14. Kuzin E.G., Gerike B.L, Drozdenko Yu.V., Lupiy M.G., Grigoryeva N.V. Diagnostics of technical condition of gear units of belt conveyors for the aggregate of methods of nondestructive testing. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.* 2017;253:012013. https://doi.org/10.1088/1757-899X/253/1/012013
15. Gerike B.L., Klishin V.I., Kuzin E.G. Detecting technical condition of mining and conveyor equipment reduction gear boxes. Naukoemkie *Tekhnologii Razrabotki i Ispolzovaniya Mineralnykh Resursov.* 2017;(3):184–192. (In Russ.)
16. Gerike P.B., Gerike B.L., Klishin V.I. Analyzing the vibration parameters of gas-cleaning units operated in coal and mining industry of Kuzbass. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.* 2021;823:012012. https://doi.org/10.1088/1755-1315/823/1/012012
17. Gerike B.L., Klishin V.I., Pudov E.Yu., Kuzin E.G. Intelligent maintenance of mining equipment gears. *Gornyi Zhurnal.* 2017;(12):68–73. (In Russ.) https://doi.org/10.17580/gzh.2017.12.13
18. Vavilov V.P. *Infrared thermography and thermal control.* Moscow: ID Spektr; 2009. 544 p. (In Russ.)
19. Khoreshok A.A., Kuzin E.G., Shalkov A.V., Mamaeva M.S., Lupiy M.G. Evaluation of the efficiency of the transport units according to results of technical diagnostics. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University.* 2017;(5):79–85. (In Russ.) https://doi.org/10.26730/1999-4125-2017-5-79-84
20. Kragelsky I.V. *Adhesion and wearing.* Moscow: Mashinostroenie; 1968. 480 p. (In Russ.)
21. Kuzin E.G. Improvement if technical maintenance of reductions gear boxes on the bases of operating suppliers parameters. In: Pudov E.Yu., Klaus O.A. (eds) *Perspectivy innovatsionnogo razvitiya ugolnykh regionov Rossii: Collected papers of the 6th International scientific and practical conference, Prokopievsk, April 10–12, 2018.* Prokopievsk: branch of the Kuzbass State Technical University in Prokopyevsk; 2018, pp. 47–52. (In Russ.)

22. Gerike B.L., Klishin V.I., Kuzin E.G. Identification of mine rescue equipment reduction gears technical condition. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2017;84:012022. https://doi.org/10.1088/1755-1315/84/1/012022
23. Venttsel E.S. *Probability theory*. 8th ed. Moscow: Vysshaya shkola; 2002. 575 p. (In Russ.)
24. Ayvazyan S.A., Enyukov, I.S., Meshalkin L.D. *Applied statistics. Researching dependances*. Moscow: Finansy i statistika; 1985. 487 p. (In Russ.)
25. Shpakov P.S., Popov V.N. *Statistic processing of experimental data*. Moscow: Moscow State Mining University; 2003. 268 p. (In Russ.)
26. Profos P. (ed.) *Industrial measurements. Book. 1. Theoretical foundations*. Moscow: Metallurgiya; 1990. 492 p. (In Russ.)
27. Drygin S., Peton N., Ahmad S. Oil whirl instability on a gearbox and gas turbine unbalance. In: *International Machine Vibration Analysis Conference (IMVAC Europe)*. Antwerp, Belgium. June 03–06, 2019.
28. Krakovsky Yu.M. *Mathematical software for evaluating equipment condition*. Novosibirsk: Nauka; 2005. 200 p. (In Russ.)
29. Yu J., Peton N. Fluid Film Bearing Damage Detection Based on Vibration Data. In: *48th Turbomachinery Symposium. Houston, Texas, USA. September 10–12, 2019*.
30. Rumshinsky L.Z. *Mathematical processing of the experimental results*. Moscow: Nauka; 1971. 164 p. (In Russ.)
31. Shirman A.R., Soloviev A.B. *Practical vibrodiagnostics for mechanical equipment condition*. Moscow; 1996. 276 p. (In Russ.)
32. Graham K.S. *Advanced vibration analysis*. 2013. 637 p.
33. Broomhead D.S., King G.P. Extracting qualitative dynamics from experimental data. Physica D: *Nonlinear Phenomena*. 1986;20 (2-3):217–236. https://doi.org/10.1016/0167-2789(86)90031-X
34. Sushko A.E., Gribanov V.A. The issues of evaluating technical condition of dynamic equipment of dangerous industrial objects. *Occupational Safety in Industry*. 2011;(10):58–65. (In Russ.)
35. Gerike B.L., Gerike P.B., Eshcherkin P.V. Mathematical model of evaluating real state of a drilling rig. *Ugol'*. 2010;(2):45–46. (In Russ.)
36. Kovalev V., Gerike B, Khoreshok A., Gerike P. Preventive maintenance of mining equipment based on identification of its actual technical state. In: *Proceedings of the Taishan Academic Forum – Project on Mine Disaster Prevention and Control, October 17–20, 2014, Qingdao, China*. Amsterdam, Paris, Beijing: Atlantis Press; 2014, pp. 184–189. https://doi.org/10.2991/mining-14.2014.29
37. Kuzin E., Bakin V., Dubinkin D. Mining equipment technical condition monitoring. *E3S Web of Conferences*. 2018;41:03020. https://doi.org/10.1051/e3sconf/20184103020
38. Gerike B.L., Shakhmanov V.N. Evaluating remaining lifetime of the main fan under the limited number of checkups. In: *Modern trends and innovations in science and production: materials of the 3rd International Scientific and Practical Conference, Mezhdurechensk, April 2–4, 2014*. Kemerovo: T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University; 2014, pp. 26–27. (In Russ.)
39. Gerike B.L., Kopytin D.V., Tatsienko V.P. The experience of using digital technologies in assessing the technical condition of deep formation development complexes. *Vestnik Nauchnogo Tsentra po Bezopasnosti Rabot v Ugolnoi Promyshlennosti = Industrial Safety*. 2019;(3):72–80. (In Russ.) https://doi.org/10.26631/arc3-2019-72-80

Информация об авторах
Герике Павел Борисович – кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник лаборатории угольного машиноведения, Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук, г. Кемерово, Российская Федерация; https://orcid.org/0000-0003-2085-6108; e-mail: am_besten@mail.ru
Клишин Владимир Иванович – доктор технических наук, член-корреспондент РАН, профессор, директор Института угля, Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук, г. Кемерово, Российская Федерация; e-mail: klishinvi@ic.sbras.ru
Герике Борис Людвигович – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук; профессор кафедры горных машин и комплексов, Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, г. Кемерово, Российская Федерация; https://orcid.org/0000-0001-9586-8723; e-mail: gbl_42@mail.ru

Information about the authors
Pavel B. Gerike – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Senior Research Associate, Coal Engineering Laboratory, Federal Research Center for Coal and Coal Chemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Kemerovo, Russian Federation; https://orcid.org/0000-0003-2085-6108; e-mail: am_besten@mail.ru
Vladimir I. Klishin – Dr. Sci. (Eng.), Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Professor, Director of the Institute of Coal, Federal Research Center of Coal and Coal Chemistry of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Kemerovo, Russian Federation; e-mail: klishinvi@ic.sbras.ru
Boris L. Gerike – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Chief Research Associate, Federal Research Center for Coal and Coal Chemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; Professor, Department of Mining Machines and Complexes, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo, Russian Federation; https://orcid.org/0000-0001-9586-8723; e-mail: gbl_42@mail.ru

Информация о статье
Поступила в редакцию: 03.08.2023
Поступила после рецензирования: 28.08.2023
Принята к публикации: 29.08.2023

Article info
Received: 03.08.2023
Revised: 28.08.2023
Accepted: 29.08.2023