



Научная статья

УДК 622.23:681.518.5

DOI: 10.26730/2618-7434-2022-3-4-24

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РЕСУРСА ГОРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЕДИНОГО ДИАГНОСТИЧЕСКОГО КРИТЕРИЯ ЕГО ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ

Герике П.Б.¹, Герике Б.Л.^{1,2}

¹ Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН

² Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева



Информация о статье

Поступила:

18 августа 2022 г.

Рецензирование:

25 сентября 2022 г.

Принята к печати:

29 сентября 2022 г.

Ключевые слова:

горное оборудование, диагностика, техническое состояние, эксплуатация, вибродиагностика, ресурс оборудования

Аннотация.

Внедрение системы обслуживания горной техники по её фактическому техническому состоянию требует от горных предприятий не только создания службы диагностики, оснащенной современными техническими средствами неразрушающего контроля и укомплектованной специалистами по обеспечению инженерной надёжности контролируемого оборудования. Обработка большого количества информации о техническом состоянии контролируемых объектов требует использования специальных знаний в области механического изнашивания контактирующих поверхностей, теории надёжности механических систем, статистической обработки результатов пассивных экспериментов и методов прогнозирования потери изделием работоспособности. Все это требует создания универсальной прогностической модели деградации узлов и агрегатов горного оборудования, учитывающей большое количество разнородной информации, в том числе внешние (горнотехнические и погодноклиматические условия эксплуатации, квалификацию операторов горной техники) и внутренние (режим функционирования, история эксплуатации) факторы на показатели работоспособности горных машин. Главное отличие разрабатываемой модели от уже существующих заключается в использовании в качестве моделируемых параметров новых единых диагностических критериев, каждый из которых способен заменить собой большое количество диагностических признаков и правил в области контроля вибрации, что позволит отказаться от высоких требований к специалистам-вибродиагностам.

Для цитирования: Герике П.Б., Герике Б.Л. Прогнозирование ресурса горного оборудования с использованием единого диагностического критерия его технического состояния // Техника и технология горного дела. 2022. № 3(18). С. 4-24. DOI: 10.26730/2618-7434-2022-3-4-24

Постановка задачи

Математическая модель оценки фактического состояния объекта диагностики может строиться на основе следующих основных допущений о том, что имеющаяся на данный момент совокупность технических параметров объекта диагностики (образующих пространство оценок технического состояния) зависит от:

- начального состояния объекта;
- режима функционирования объекта;
- истории его эксплуатации [1-5].



Поскольку результаты диагностических измерений являются случайными величинами, то описанную модель нельзя считать полностью детерминированной, поэтому необходимо использовать статистические закономерности измерений и их стохастические связи с показателями фактического состояния объекта диагностики. По сути, оценка истинных значений технических параметров является задачей распознавания состояния, в котором находится объект диагностики, для решения которой может быть применен вероятностный подход [6-9].

Если по параметру технического состояния нет ретроспективных данных, то рекомендуется накапливать и обрабатывать данные по аналогам [9].

При неизвестном законе распределения для наработки до отказа должны определяться точечные оценки среднего и гамма-процентного ресурсов и их нижние доверительные границы.

Точечная оценка среднего остаточного ресурса определяется через выражение:

$$T_0(t) = \sum_{i=k+1}^N \frac{z_i}{[rK_N(t)]} \quad (1)$$

где $z_i = t_i - t$;

t – время эксплуатации, после которого стали исследовать группу однотипного оборудования;

t_i – время отказа i -й единицы оборудования;

N – число единиц оборудования;

k – число отказавших единиц оборудования до момента времени t ;

$r = N - k$;

$$K_N(t) = 1 - [1 - P_0(t)]^N \quad (2)$$

$P_0(t) = 1 - k/N$ – точечная оценка вероятности безотказной работы.

В том случае, если на интервале $[t_0]$ отказ получили s изделий, то точечная оценка среднего остаточного ресурса определится как

$$T_0(t) = \frac{\sum_1^s z_i + (r - s)t_0}{r} \quad (3)$$

Нижняя доверительная граница среднего остаточного ресурса

$$T_1 = \frac{T_0(t)}{1 + u_q/r^{0,5}} \quad (4)$$

где u_q – квантиль нормированного нормального закона ($q = 0,8; 0,9; 0,95, 0,99$).

Точечная оценка гамма-процентного остаточного ресурса

$$T_\gamma^0(t) = z_{m-1} + \frac{(z_{m-1} - z_m)(\gamma - R_0 z_{m-1})}{R_0(z_{m-1} - z_m)} \quad (5)$$

где $z_i < \dots < z_m < \dots$ – вариационный ряд остаточных наработок.

Для z_m, z_{m-1} :

$$R_0(z_m) \leq \gamma < R_0(z_{m-1});$$

$R_0(z)$ – оценка вероятности безотказной работы для остаточного ресурса;

$R_0(z) = (r - s)/r$;

s – число отказавших изделий за время z после t .

Нижняя доверительная граница гамма-процентного остаточного ресурса

$$T_{\gamma,q}^0 = \frac{T_\gamma^0(t)}{1 + u_q f(r, \gamma)} \quad (6)$$

где



$$f(r, \gamma) = \frac{(1/\gamma - 1)^{0,5}}{r^{0,5} \ln(1/\gamma)} \quad (7)$$

Использование формул (1)-(7) рекомендуется в том случае, если время эксплуатации изделия заметно меньше среднего ресурса.

Очевидно, что прогнозирование остаточного ресурса сложных систем, эксплуатируемых в рамках реактивного обслуживания, не имеет практической ценности, поэтому в дальнейшем будем рассматривать только плановую и активную стратегии обслуживания.

Особенностью планово-предупредительного обслуживания является то, что сроки эксплуатации и межремонтный период строго регламентированы, и перед специалистом, выполняющим диагностику, ставится лишь один вопрос: проработает ли диагностируемая система до очередного ремонта или нужны незамедлительный останов и замена изношенных узлов и деталей. В этом случае прогнозирование должно выполняться на незначительном интервале времени – от момента диагностики до очередного ремонта.

При обслуживании оборудования по фактическому состоянию (активное обслуживание) четких сроков вывода в ремонт не существует, поэтому выполнение долгосрочного прогнозирования жизненно необходимо, так как позволяет не только оценить примерное время выхода из строя, но и заблаговременно подготовиться к его ремонту.

Таким образом, для эффективной работы диагностической системы в условиях использования различных форм технического обслуживания и ремонта необходимо на основании накопленной статистики решить три основные задачи:

- разработать алгоритм выделения полезного диагностического тренда,
- разработать алгоритмы среднесрочного и краткосрочного прогнозирования процессов деградации технического состояния горных машин.

Так как результаты диагностических измерений носят случайный характер, то необходимо использовать статистические закономерности для интерпретации результатов измерений и их стохастические связи с показателями фактического технического состояния диагностируемого оборудования, что, по сути, является задачей распознавания состояния, в котором находится горное оборудование на момент проведения диагностики [10, 11].

Используемые при диагностике данные обычно могут быть зашумлены, поэтому любые измеряемые параметры обычно представляются в виде [8]:

$$K_i = \tilde{K} + k_i, \quad (8)$$

где K_i – значение диагностического параметра, зарегистрированного в момент времени t_i ;

\tilde{K} – детерминированная компонента диагностического параметра K_i ;

k_i – случайная компонента диагностического параметра.

Детерминированная, медленно изменяющаяся составляющая \tilde{K} , определяет информативный тренд, который может быть использован при построении прогноза, а случайная компонента k_i зависит от режима работы горного оборудования, квалификации оператора, погрешности измерений и т.п. Поэтому задачу выявления происходящих в системе изменений можно свести к задаче поиска составляющей \tilde{K} .

Методология решения задачи

Выделение полезного диагностического тренда. На сегодняшний день разработано большое количество методов выявления тренда значимой составляющей из зашумленной совокупности результатов измерений [10...13], среди которых наиболее распространен метод проверки статистического ряда на отсутствие тренда по критерию Стьюдента. Ряд с числом членов N разбивают произвольно на две части с числом точек m и $(N-m)$, для каждой из которых рассчитывают оценки средних значений

$$\bar{K}_m = \frac{1}{m} \sum_{1}^m K_i; \quad \bar{K}_{N-m} = \frac{1}{N-m} \sum_{m+1}^N K_i \quad (9)$$



и среднеквадратических отклонений

$$s_m^2 = \frac{1}{m-1} \sum_1^m (K_i - \bar{K})^2; \quad s_{N-m}^2 = \frac{1}{N-m-1} \sum_{m+1}^N (K_i - \bar{K})^2. \quad (10)$$

Различия признаются значимыми, если выполняется следующее неравенство

$$\frac{|\bar{K}_m - \bar{K}_{N-m}|}{[ms_m^2 + (N-m)s_{N-m}^2]^{0,5}} \left[\frac{m(N-m)(N-2)}{N} \right]^{0,5} > t(P, N-2) \quad (11)$$

где $t(P, N-2)$ – табличное значение коэффициента Стьюдента для доверительной вероятности P и числа степеней свободы $(N-2)$ [6].

Построение среднесрочного прогноза. Если рассматриваемый ряд представляет собой неперiodический 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 существенных преимуществ [6...8], который основывается на допущении о том, что результаты измерения нормально распределены относительно своего математического ожидания.

В случае отлiчия закона распределения диагностического параметра от нормального можно использовать другие формы законов распределения [14].

Поскольку на стадии зарождения дефектов абсолютные значения различных параметров вибрации растут экспоненциально [15, 16], а результаты измерения диагностических параметров представляются, как правило, в логарифмическом масштабе, то искомая зависимость тренда будет иметь линейный вид (см. рисунок 1). Другие модели, высокие аппроксимирующие свойства которых могут быть получены за счет увеличения их сложности, зачастую имеют неудовлетворительные экстраполяционные свойства [17, 18].

В этом случае величина K является логарифмом диагностического параметра и рассматривается как зависимая, а величина t является независимой переменной.

Если при работе диагностируемой системы за время её эксплуатации T происходит возрастание контролируемого параметра на величину ΔK_T , то искомый тренд будет выглядеть следующим образом

$$K_T - K_0 = b(t - t_0) \quad (12)$$

или

$$K_T - K_0 = \bar{V}_K(t - t_0), \quad (13)$$

откуда можно определить величину средней скорости деградации диагностируемой системы \bar{V}_K и сроки достижения предельного состояния (см. рисунок 1, здесь $K_{\text{ПР}}$ – предельное значение диагностического параметра, $K_{\text{пес}}$ и $K_{\text{опт}}$ – 95% доверительные интервалы оценки предельного состояния, $T_{\text{пес}}$ и $T_{\text{опт}}$ – пессимистическая и оптимистическая оценки остаточного ресурса).

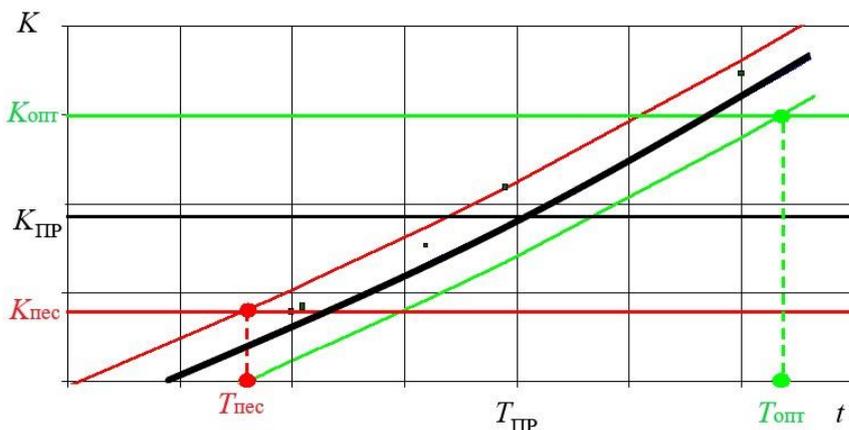


Рис. 1. Схема изменения технического состояния объекта диагностики в координатах «диагностический параметр – время»
Fig. 1. Scheme of changing the technical condition of the diagnostic object in the coordinates «diagnostic parameter – time»



Прямую, соответствующую минимальной сумме квадратов 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

$$s^2 = \sum_1^N (K_i - a - bt_i), \quad (14)$$

а сами коэффициенты a и b из уравнений

$$\begin{aligned} \frac{\partial s}{\partial a} &= - \sum_1^N (K_i - a - bt_i) = 0; \\ \frac{\partial s}{\partial b} &= - \sum_1^N (K_i - a - bt_i)t_i = 0. \end{aligned} \quad (15)$$

Для проверки адекватности регрессионной модели используется коэффициент корреляции r , который рассчитывается по формуле

$$r = \frac{[\sum_1^N K_i t_i - N\bar{K}\bar{t}]}{\left[(\sum_1^N t_i^2 - N\bar{t}^2) (\sum_1^N K_i^2 - N\bar{K}^2) \right]^{0,5}} \quad (16)$$

Для оценки надежности коэффициента корреляции определяют его погрешность по приближенной формуле [6]

$$m_r = \frac{1-r^2}{\sqrt{N}}. \quad (17)$$

При небольшом числе наблюдений ($N \leq 50$) корреляционную связь с доверительной вероятностью p_0 считают существенной (значимой), если соблюдается условие $t_p > t_\alpha$

$$t_p = r \sqrt{\frac{N-2}{1-r^2}} \quad (18)$$

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 [10]

$$\Delta = \sqrt{\frac{\sum_1^N (\tilde{K}_i - K_i)^2}{N-2} \left[1 + \frac{1}{N} - \frac{(t_i - \bar{t})^2}{N\bar{t}^2 - \sum_1^N t_i^2} \right]} \quad (19)$$

$$\delta = \sqrt{\frac{\sum_1^N (\tilde{K}_i - K_i)^2}{N-2} \left[\frac{1}{N} - \frac{(t_i - \bar{t})^2}{N\bar{t}^2 - \sum_1^N t_i^2} \right]} \quad (20)$$



Таким образом, искомый тренд находится в некотором интервале оценок, определяемым одной из границ и заданной доверительной вероятностью P по статистике Стьюдента t_s [6]

$$K = \tilde{K} \pm t_s(P)\Delta \quad (21)$$

или

$$K = \tilde{K} \pm t_s(P)\delta \quad (22)$$

На практике при оценке остаточного ресурса при малом числе измерений используется формула [6]:

$$T = \frac{K_{\text{пр}} - K_0}{\bar{V}_K}, \quad (23)$$

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 [19, 20]:

- 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 (рисунок 2), как это было показано ранее.

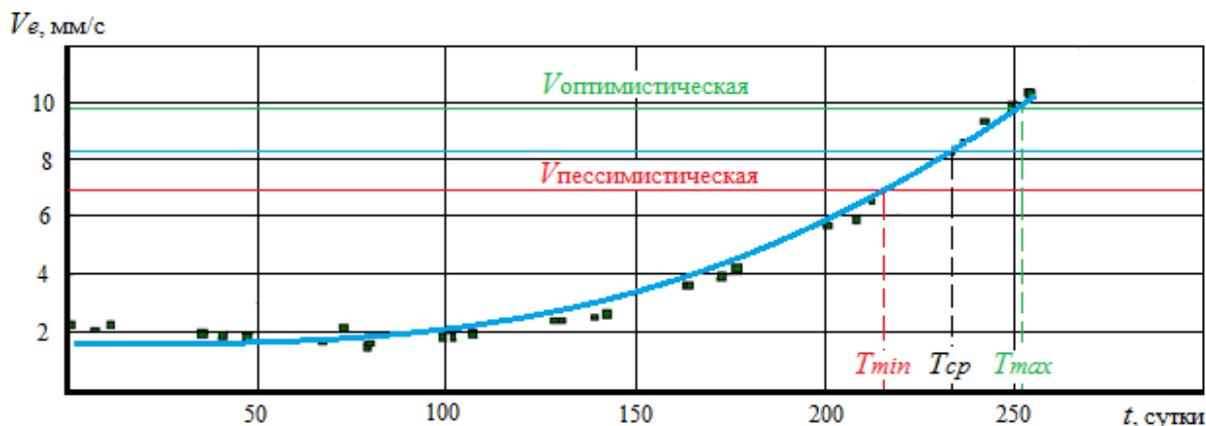


Рис. 2. Прогнозируемое изменение технического состояния объекта диагностики в координатах «диагностический параметр – время»

Fig. 2. Predicted change in the technical condition of the diagnostic object in the coordinates «diagnostic parameter – time»

Очевидно, что с увеличением количества проведенных наблюдений и уменьшением периода прогнозирования точность прогноза повышается. При накоплении данных переносными измерительными системами сбор большого количества данных существенно затруднен, поэтому особенно важно знать минимальное число измерений, обеспечивающее необходимую точность прогноза. На основании диаграммы, характеризующей зависимость погрешности прогнозирования (отношения среднеквадратичного отклонения прогнозируемой величины к



дисперсии) от числа измерений [21], с учетом допущения, о том, что дисперсия, вносимая трендом, не должна превышать дисперсии, вносимой случайными отклонениями от линии тренда, справедливы следующие соотношения:

- для прогноза на 1 интервал измерений – 6 измерений;
- для прогноза на 10 интервалов измерений – 16 измерений.

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

$$s_L^2 = s^2 \left[\frac{1}{N} + \frac{3(N + 2T - 1)^2}{N(N^2 - 1)} \right], \quad (24)$$

или в предельном случае при равенстве дисперсий

$$\frac{1}{N} + \frac{3(N + 2T - 1)^2}{N(N^2 - 1)} = 1, \quad (25)$$

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

$$\tilde{K} \pm t_s(P)s_r = K_0 + \Delta K, \quad (26)$$

где s_r – среднеквадратичное отклонение прогнозируемой величины.

Построение краткосрочного прогноза. Ранее было показано, что для построения среднесрочного прогноза необходимо проведение достаточно 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 научных источников рекомендует обратиться к адаптивному краткосрочному прогнозированию, в котором наиболее полно учитывается диагностическая информация, содержащаяся в последних измерениях [7...9]. 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.

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

$$S_t = \alpha K_t + \beta S_{t-1}, \quad (27)$$

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

K_t – последний результат измерений (от которого строится прогноз).

Выражение (27) может быть представлено в виде

$$S_t = \alpha K_t + (1 - \alpha)S_{t-1} = S_{t-1} + \alpha(K_t - S_{t-1}). \quad (28)$$

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:

$$S_t = \alpha \sum_{i=0}^{N-1} \beta^i K_{t-i} + \beta^N S_0, \quad (29)$$

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 . Доказано, 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

$$D(S_t) = \alpha \frac{\sigma^2}{2 - \alpha}. \quad (30)$$

В тех случаях, когда априорная информация о величине α отсутствует, для единичных вычислений прогнозируемых параметров рекомендуется использовать величину α от 0,1 до 0,3 [22]. 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 [23-24]. 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.

При определении векторов комплексных критериев необходимо выделить и удалить из расчетов недостоверные результаты, использование которых в дальнейших вычислениях неизбежно приведет к искажению результатов моделирования и ошибкам в построении прогноза изменения технического состояния горной техники. Для решения этой задачи использовалась методика обнаружения грубых погрешностей, предложенная в работах [25-26]. Под грубыми здесь и далее понимаются погрешности, явно превышающие по своему значению уровень погрешностей, оправданных условиями проведения эксперимента. Для их устранения желательно еще перед измерениями определить значение искомой величины приближенно, с тем чтобы в дальнейшем можно было сконцентрировать внимание лишь на уточнении предварительных данных. Если оператор в процессе измерений обнаруживает, что результат одного из наблюдений резко отличается от других, и находит причины этого, то он, конечно, вправе отбросить этот результат и провести повторные измерения. Но необдуманное отбрасывание резко отличающихся от других результатов может привести к существенному искажению характеристик рассеивания ряда измерений, поэтому повторные измерения лучше проводить не взамен сомнительных, а в дополнение к ним. Особенно остро стоит вопрос об устранении грубых погрешностей при анализе уже имеющегося материала, когда невозможно



учесть все обстоятельства, при которых проводились измерения. В этом случае приходится прибегать к чисто статистическим методам.

Вопрос о том, содержит ли данный результат наблюдений грубую погрешность, решается общими методами проверки статистических гипотез. Проверяемая гипотеза состоит в утверждении, что результат наблюдения X_i не содержит грубой погрешности, т. е. является одним из значений случайной величины X с законом распределения $F(x)$, статистические оценки параметров которого предварительно определены. Сомнительным может быть в первую очередь лишь наибольший X_{max} или наименьший X_{min} из результатов наблюдений. Поэтому для проверки гипотезы следует воспользоваться распределениями величин

$$v = \frac{X_{max} - \bar{X}}{S_x} \text{ или } v = \frac{\bar{X} - X_{min}}{S_x}.$$

Функции их распределения определяются методами теории вероятностей. Для нормального распределения результатов наблюдений они представлены в таблице 1.

Таблица 1. Значения параметра v_α при различных числах измерений n

Table 1. Values of the parameter v_α for different numbers of measurements n

n	$q = 1 - \alpha$				n	$q = 1 - \alpha$			
	0,10	0,05	0,025	0,01		0,10	0,05	0,025	0,01
3	1,406	1,412	1,414	1,414	14	2,297	2,461	2,602	2,759
4	1,645	1,689	1,710	1,723	15	2,326	2,493	2,638	2,808
5	1,731	1,869	1,917	1,955	16	2,354	2,523	2,670	2,837
6	1,894	1,996	2,067	2,130	17	2,380	2,551	2,701	2,871
7	1,974	2,093	2,182	2,265	18	2,404	2,557	2,728	2,903
8	2,041	2,172	2,273	2,374	19	2,426	2,600	2,754	2,932
9	2,097	2,237	2,349	2,464	20	2,447	2,623	2,778	2,959
10	2,146	2,294	2,414	2,540	21	2,467	2,644	2,801	2,984
11	2,190	2,383	2,470	2,606	22	2,486	2,664	2,823	3,008
12	2,229	2,387	2,519	2,663	23	2,504	2,683	2,843	3,030
13	2,264	2,426	2,562	2,714	24	2,520	2,701	2,862	3,051
					25	2,537	2,717	2,880	3,071

По данным таблицы 1, при заданной доверительной вероятности α или уровне значимости $q = 1 - \alpha$ можно для чисел измерения $n = 3-25$ найти те наибольшие значения v_α , которые случайная величина v может еще принять по чисто случайным причинам.

Если вычисленное по опытным данным значение v окажется меньше v_α , то гипотеза принимается; в противном случае ее следует отвергнуть как противоречащую данным наблюдений. Тогда результат X_{max} или соответственно X_{min} приходится рассматривать как содержащий грубую погрешность и не принимать его во внимание при дальнейшей обработке результатов наблюдений.

Таким образом, обобщая вышесказанное, можно заключить, что задача по прогнозированию остаточного ресурса диагностируемой системы на основе использования новых единых диагностических критериев в общем виде решается через поиск и экстраполяцию полезного диагностического тренда и определение времени его пересечения с линиями, определяющими пороговое состояние диагностических параметров исследуемого объекта.

В ходе выполнения настоящей работы были подвергнуты формализации более ста двадцати диагностических признаков и правил выявления дефектов в области контроля вибрации, в том числе признаки нарушения жесткости системы, расцентровки валов агрегатов, неуравновешенности вращающихся конструктивных элементов, дефектов подшипников качения и зубчатых передач, а также дефектов соединительных муфт, поршневых компрессоров и дефектов электродвигателей и генераторов электрической природы (замыкание обмоток, нарушения воздушного зазора и т.д.). Большая часть рассматриваемых диагностических



признаков определена правилами спектрального анализа, кроме того, формализации подверглись результаты анализа с использованием алгоритмов поиска огибающей и эксцесса.

Результаты исследования

Рассмотрим более подробно результаты прогнозирования остаточного ресурса для различных узлов и агрегатов электрических карьерных одноковшовых экскаваторов.

Расчет параметров **среднесрочного прогнозирования для подшипников качения.**

Таблица 2. Результаты вибрационной диагностики и расчета комплексных критериев для подшипников качения

Table 2. Results of vibration diagnostics and calculation of complex criteria for rolling bearings

№ п/п	Место измерения	Результаты виброобследования						Результаты дефектовки	Комплексный критерий	Недостовверные результаты
	Агрегат	Точка Направление	Частота вращения	Спектр V	Спектр a	Спектр огибающей	Эксцесс			
1	Агрегат 1	3 Рад	750	0,45	0,49	11,00	3,51	Норма	11,5656	
2		4 Рад		0,38	0,25	14,10	3,06	Норма	14,4354	
3	Агрегат 2	2 Рад	1500	4,39	11,01	35,14	3,42	Предельное	37,2426	+
4		3 Рад		0,47	1,49	13,70	3,18	Норма	14,1507	
5		4 Рад		0,50	4,17	12,10	2,92	Норма	13,1368	
6	Агрегат 4	2 Рад	1000	0,97	10	119,50	18,49	Авария	121,3387	+
7		3 Рад		1,90	2,21	18,20	7,12	Норма	19,7593	
8		4 Рад		2,02	5,25	20,30	4,11	Норма	21,4622	
9	Агрегат 6	2 Рад	750	1,12	3,89	8,50	3,16	Норма	9,9309	+
10		3 Рад		0,44	0,97	13,20	3,08	Норма	13,5964	
11		4 Рад		0,58	1,12	49,40	2,19	Предельное	49,4646	
12	Агрегат 9	3 Рад	1000	5,05	1,92	20,00	4,32	Норма	21,1625	
13		4 Рад		2,01	3,82	9,60	5,2	Норма	11,7402	
14	Агрегат 12	1 Рад	1000	0,91	8,17	15,80	3,18	Норма	18,0922	
15		2 Рад		0,69	3,21	15,00	2,81	Норма	15,6101	
16		3 Рад		1,87	1,61	10,80	2,45	Норма	11,3460	
17		4 Рад		0,48	1,49	24,90	3,04	Норма	25,1339	
18	Агрегат 13	1 Рад	1000	1,07	42,88	52,8	3,94	Авария	68,1411	
19		2 Рад		0,55	11,41	18,40	1,4	Предельное	21,7028	
20		3 Рад		0,29	3,67	5,10	5,81	Норма	8,5627	+
21		4 Рад		1,12	2,87	3,50	1,12	Норма	4,7954	+
22	Агрегат 14	1 Рад	1000	1,18	5,99	25,40	3,01	Предельное	26,2962	
23		2 Рад		0,80	15,97	20,00	4,01	Предельное	25,9184	
24		3 Рад		0,65	1,88	21,60	2,55	Норма	21,8408	
25		4 Рад		1,04	4,38	13,00	6	Норма	15,0089	
26	Агрегат 16	1 Рад	1500	1,08	4,18	7,10	2,81	Норма	8,7718	+
27		2 Рад		1,54	31,12	6,02	1,3	Предельное	31,7609	
28		3 Рад		7,04	89,57	51,30	10,15	Авария	103,9570	
29		4 Рад		5,80	65,98	27,70	6,12	Авария	72,0538	

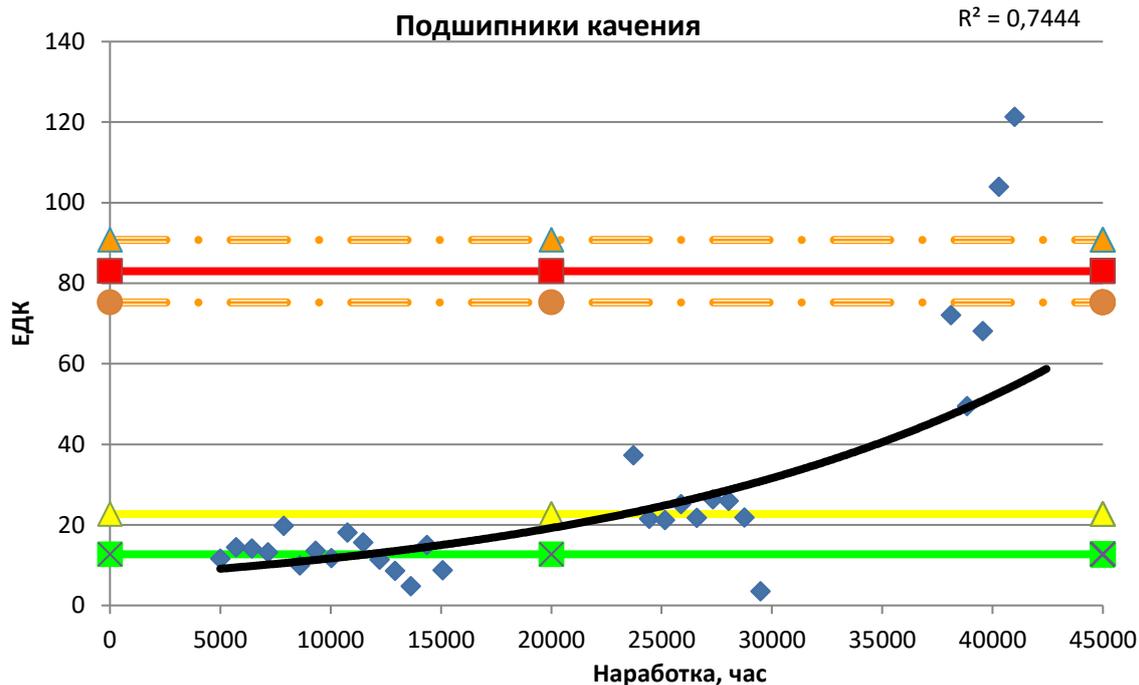


Рис. 3. Обобщение результатов расчета ЕДК и построение среднесрочного прогноза в зависимости от наработки подшипников

Fig. 3. Generalization of the results of the calculation of the EDC and the construction of a medium-term forecast depending on the operating time of the bearings

В таблице 2 приведены результаты проведенных виброизмерений 29 подшипников различных агрегатов, входящих в механическое оборудование карьерных экскаваторов (лебедки подъема и напора, механизм поворота, преобразовательный агрегат, компрессоры) и результаты дефектации подшипников методом визуального контроля [27]. На рисунке 3 приведены результаты расчетов ЕДК для данного оборудования и результаты оценки достоверности полученных данных в соответствии с разработанной Методикой.

Как следует из анализа проведенных расчетов и графиков, уровень АВАРИЯ на заданном интервале диагностирования ($T=60$ календарных дней) не будет достигнут. Уровень $ЕДК_{АВАРИЯ_ПК}=82,99$, доверительные границы прогноза уровня АВАРИЯ – пессимистическая 75,23 и оптимистическая 90,75, при прогнозе на 60 суток в момент наработки 42440 часов $ЕДК=59,32$. Величина достоверности аппроксимации $R^2=0,7444$. Низкий уровень R^2 обусловлен значительным разбросом диагностических данных, собранных на различном динамическом оборудовании карьерных экскаваторов (лебедки подъема и напора, механизм поворота, преобразовательный агрегат, компрессоры) при значительном периоде наблюдений, увеличить достоверность аппроксимации можно путем увеличения выборки диагностических данных. По результатам среднесрочного прогнозирования аварийного выхода из строя обследованных подшипниковых узлов не предвидится, механическим службам рекомендовано продолжить эксплуатацию оборудования с соблюдением режимных параметров.

Расчет параметров **краткосрочного прогнозирования для подшипников качения.**

Для проверки полученного результата по среднесрочному прогнозированию воспользуемся адаптивной моделью для краткосрочного прогнозирования $S_t = \alpha K_t + \beta S_{t-1}$. В соответствии с рекомендациями для данного типа оборудования с учетом специфики его эксплуатации принимаем $S_{t-1}=25,13$ и $\alpha=0,3$, а период прогнозирования $T = 30$ календарных дней. При этих условиях краткосрочный прогноз в соответствии с принятой моделью в момент наработки $t=26$ 600 часов (комплексный критерий равен 21,70 – см. табл. 2) на один период диагностирования будет равен $S_t=0,3 \times 21,7 + 0,7 \times 25,13 = 24,10 < 82,99$, из чего следует, что на рассматриваемом



диагностическом интервале уровень АВАРИЯ достигнут не будет. Рекомендуется продолжить эксплуатацию с соблюдением режимных параметров.

В качестве другого примера рассмотрим расчет параметров **среднесрочного прогнозирования для соединительных муфт.**

В таблице 3 приведены результаты проведенных виброизмерений соединительных муфт, входящих в энерго-механическое оборудование карьерных экскаваторов типа ЭКГ и ЭШ [28], а на рисунке 4 – результаты расчетов ЕДК для данного оборудования и результаты оценки достоверности полученных данных в соответствии с разработанной Методикой.

Как следует из анализа проведенных расчетов и графика (см. рисунок 4), на заданном интервале диагностирования ($T=60$ календарных дней) уровень АВАРИЯ будет достигнут. Уровень $ЕДК_{\text{АВАРИЯ, муфты}}=45,90$, доверительные границы прогноза уровня АВАРИЯ – пессимистическая 31,02 и оптимистическая 60,78, при прогнозе на 60 суток в момент наработки 8928 часов $ЕДК=52,81$. Величина достоверности аппроксимации $R^2=0,8756$. Рекомендовано механическим службам карьеров провести ревизию до прогнозируемого момента выхода из строя оборудования с заменой изношенных элементов соединительных муфт.

Табл. 3. Результаты вибрационной диагностики и расчета комплексных критериев для соединительных муфт

Table 3. Results of vibration diagnostics and calculation of complex criteria for coupling couplings

№ п/п	Результаты виброобследования				Результаты дефектовки	Комплексный критерий	Недостоверные результаты
	Спектр V	Спектр a	Спектр отгибающей	Экцесс			
1	3,4	2,99	23,7	3,63	Норма	24,40014	
2	4,64	4,77	6,54	3,03	Норма	9,809943	+
3	7,53	4,81	16,4	3,03	Норма	18,92030	
4	4,45	3,15	39,6	4,22	Предельное	40,19568	
5	2,56	11,77	15,5	3,19	Норма	19,88749	
6	1,15	9,96	12	3,31	Норма	15,98374	
7	4,44	1,34	17,4	3,12	Норма	18,27576	
8	4,78	2,15	20,1	3,28	Норма	21,02948	
9	1,33	2,48	20,3	3,97	Норма	20,87510	
10	3,54	13,63	21,6	4,92	Норма	26,25023	
11	2,59	8,18	12,1	3,52	Норма	15,24535	
12	2,7	7,1	8,8	6,05	Норма	13,10505	
13	11,64	3,15	4,6	5,4	Норма	13,99042	
14	12,49	5,75	11,6	9,07	Норма	20,14664	
15	12,79	9,65	8	17,42	Норма	24,98325	
16	3,52	0,32	14,0	4,52	Норма	15,14871	
17	10,82	0,45	15,1	9,62	Норма	20,90994	
18	2,12	2,43	38,9	3,46	Предельно	39,18648	+
19	6,99	9,52	45,1	7,8	Авария	47,26881	
20	8,74	26,78	13,5	3,46	Предельное	31,42892	
21	11,48	42,87	23,1	4,43	Авария	50,22810	

Для проверки правильности сделанного вывода произведем расчет параметров **краткосрочного прогнозирования для соединительных муфт.**



В соответствии с рекомендациями для данного типа оборудования с учетом особенностей конструкции и специфики его эксплуатации принимаем $S_{t-1}=24,98$ и $\alpha=0,3$. Принимаем в расчете краткосрочного прогнозирования (интервал прогнозирования $T=30$ календарных дней) адаптивную модель вида $S_t = \alpha K_t + \beta S_{t-1}$. Тогда краткосрочный прогноз в соответствии с принятой моделью в момент наработки $t=5808$ часов (комплексный критерий равен 24,40, см. табл.3) на один период диагностирования равен $S_t=0,3 \times 24,4 + 0,7 \times 24,98 = 24,81 < 45,9$, из чего следует, что на рассматриваемом диагностическом интервале уровень АВАРИЯ достигнут не будет. Рекомендуется продолжить эксплуатацию оборудования с соблюдением режимных параметров. Анализ результатов обработки экспериментально полученных диагностических данных подтвердил корректность краткосрочного прогноза, на момент наработки муфты 6480 час (плюс примерно 1 календарный месяц к моменту, когда было получено значению K_t) величина комплексного критерия не достигает уровня АВАРИЯ.

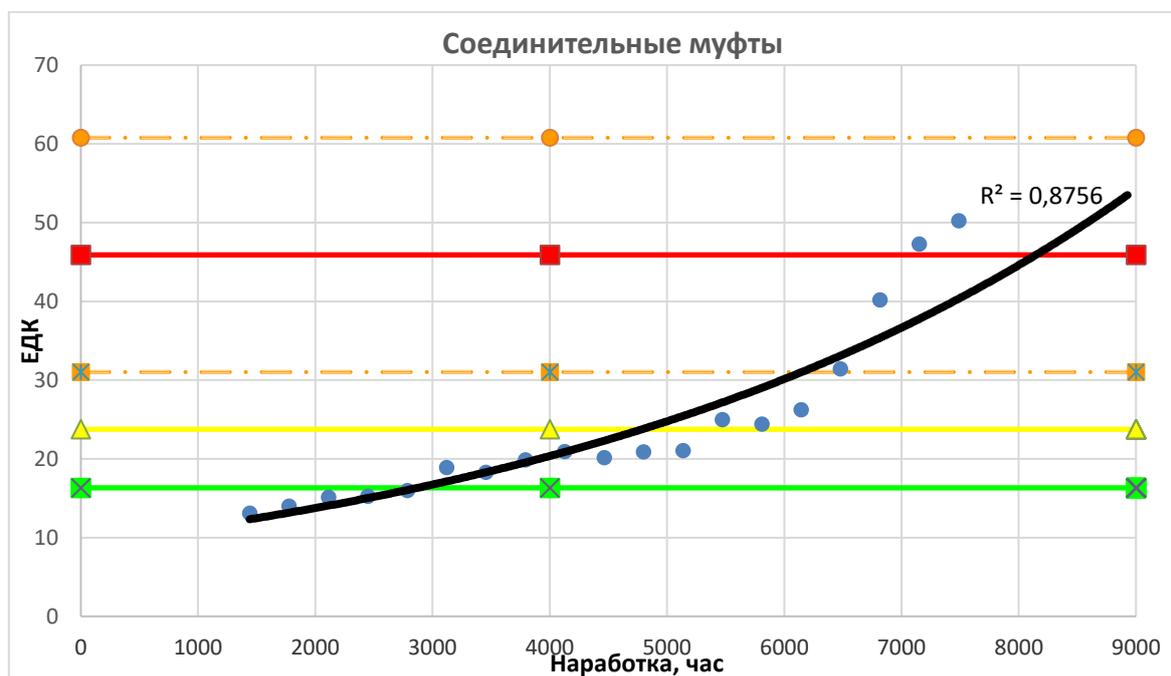


Рис. 4. Обобщение результатов расчета ЕДК и построение среднесрочного прогноза в зависимости от наработки соединительных муфт

Fig. 4. Generalization of the results of the calculation of the EDC and the construction of a medium-term forecast depending on the operating time of the coupling couplings

Расчет параметров среднесрочного прогнозирования для дисбаланса.

В таблице 4 приведены результаты измерений по 24 измерительным точкам агрегатов роторного оборудования карьерных экскаваторов типа ЭКГ и ЭШ [29]. На рисунке 5 приведены результаты расчетов ЕДК для данного оборудования и результаты оценки достоверности полученных данных в соответствии с разработанной Методикой.

Как следует из анализа проведенных расчетов и графиков, на заданном интервале диагностирования ($T=60$ календарных дней) уровень АВАРИЯ будет достигнут. Уровень $ЕДК_{\text{АВАРИЯ_ДИСБАЛАНС}}=18,94$, доверительные границы прогноза уровня АВАРИЯ – пессимистическая 14,58 и оптимистическая 23,30, при прогнозе на 60 суток в момент наработки 10 272 часов $ЕДК=28,12$. Величина достоверности аппроксимации $R^2=0,8222$. Механической службе разреза рекомендовано выполнить ревизию и балансировку роторного оборудования до критического момента аварийного отказа с последующим измерением остаточного уровня механических колебаний.

Расчет параметров краткосрочного прогнозирования для дисбаланса.



В соответствии с рекомендациями для данного типа оборудования с учетом специфики его эксплуатации принимаем $S_{t-1}=20,49$ и $\alpha=0,3$. Принимаем в расчете краткосрочного прогнозирования (интервал прогнозирования $T=30$ календарных дней) адаптивную модель вида $S_t = \alpha K_t + \beta S_{t-1}$. Тогда краткосрочный прогноз в соответствии с принятой моделью в момент наработки $t=8$ 832 час (комплексный критерий равен 30,31, см. табл.4) на один период диагностирования равен $S_t=0,3 \times 30,31 + 0,7 \times 20,49 = 23,43 > 18,94$, из чего следует, что на рассматриваемом диагностическом интервале по единому критерию наличия дисбаланса уровень АВАРИЯ будет достигнут. Службе главного механика рекомендовано незамедлительно выполнить ревизию и балансировку роторного оборудования с последующим измерением остаточного уровня механических колебаний.

Табл. 4. Результаты вибрационной диагностики и расчета комплексных критериев для неуравновешенности вращающихся деталей

Table 4. Results of vibration diagnostics and calculation of complex criteria for unbalance of rotating parts

№ п/п	Агрегат	Точка Направление	Результаты виброобследования					Результаты дефектовки	Комплексный критерий	Недостовверные результаты	
			Частота вращения, об/мин	f_p	$2f_p$	$3f_p$	$4f_p$				$5f_p$
1	Агрегат 1	1 Вер	1000	5,6	18,2	2,31	7,1	1,21	Авария	20,4893	
2		1 Гор		3,21	4,15	1,25	0,89	0,56	Предельное	5,4950	
3		1 Ос		4,91	2,18	0,97	0,54	0,87	Предельное	5,5543	
4		2 Вер		5,47	19,23	4,18	1,21	0,98	Авария	20,4844	
5		2 Гор		2,79	4,29	2,32	1,18	0,79	Предельное	5,7954	
6		2 Ос		4,12	2,17	1,56	1,12	1,02	Предельное	5,1392	
7	Агрегат 2	1 Вер	1000	0,89	2,18	1,12	1,16	0,53	Норма	2,9027	
8		1 Гор		1,02	2,21	0,78	1,00	0,69	Норма	2,8300	
9		1 Ос		2,61	1,08	0,97	0,51	0,32	Норма	3,0466	
10		2 Вер		1,36	1,61	0,88	0,32	0,16	Норма	2,3117	
11		2 Гор		1,91	1,23	1,70	0,51	0,22	Норма	2,8913	
12		2 Ос		0,98	0,93	1,01	0,24	0,18	Норма	1,7133	
13	Агрегат 3	1 Вер	1000	5,11	2,21	2,58	1,64	1,69	Предельное	6,5725	
14		1 Гор		3,48	3,17	2,98	1,93	0,65	Предельное	5,9319	
15		1 Ос		0,34	0,97	1,15	0,89	0,35	Норма	1,8148	
16		2 Вер		4,98	2,71	2,16	1,45	0,78	Предельное	6,2866	
17		2 Гор		3,11	2,80	1,54	1,48	1,12	Предельное	4,8300	
18		2 Ос		0,51	0,42	0,34	0,34	0,11	Норма	0,8245	+
19	Агрегат 4	1 Вер	1000	4,50	4,60	2,30	2,21	1,78	Предельное	7,3995	
20		1 Гор		5,12	4,87	3,12	2,56	1,71	Предельное	8,3153	
21		1 Ос		3,18	11,69	5,23	3,66	1,54	Авария	13,7800	
22		2 Вер		4,69	3,97	4,71	3,18	1,87	Предельное	8,5762	
23		2 Гор		5,90	5,61	3,18	2,78	2,91	Авария	9,6224	
24		2 Ос		5,98	28,61	5,32	4,19	4,32	Авария	30,3119	

Рассмотрим пример расчета параметров **среднесрочного прогнозирования для зубчатых передач.**

Зубчатые передачи являются одним из самых сложных технических объектов с точки зрения анализа параметров генерируемой при их работе вибрации, полученные результаты диагностирования имеют значительные трудности в интерпретации, для корректного использования ЕДК и построения максимально реалистичного прогноза работу по сбору и анализу диагностических данных на редукторах горных машин необходимо продолжить [30]. Однако результаты прогнозирования работоспособности зубчатых передач с использованием

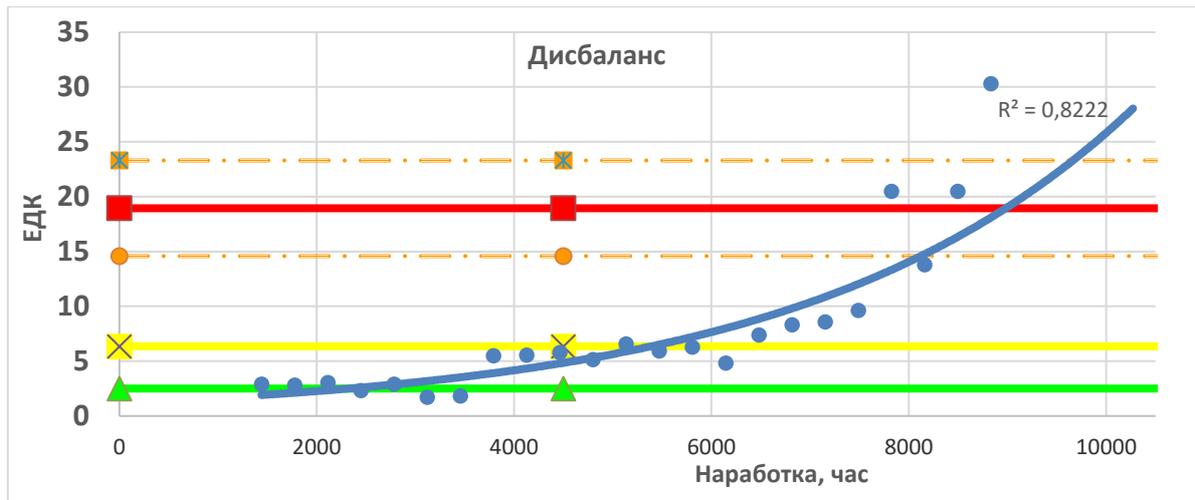


Рис. 5. Обобщение результатов расчета ЕДК для неуравновешенности вращающихся деталей карьерных экскаваторов и построение среднесрочного прогноза в зависимости от наработки
 Fig. 5. Generalization of the results of the calculation of the EDC for the unbalance of rotating parts of quarry excavators and the construction of a medium-term forecast depending on the operating time

Табл. 5. Результаты вибрационной диагностики и расчета комплексных критериев для дефектов зубчатых передач

Table 5. Results of vibration diagnostics and calculation of complex criteria for gear defects

№ п/п	Агрегат	Спектральные составляющие, мм/с									Комплексный критерий
		f_{VI}	f_p	$2f_p$	f_{z23}	$3f_p$	$4f_p$	f_{z1}	$2f_{z1}$	$3f_{z1}$	
1	Редуктор подъема 1	3,80	3,10	2,17	1,78	1,56	1,48	1,12	0,98	0,56	6,2514
2		4,17	4,51	3,18	2,13	1,81	1,90	1,89	1,65	1,12	8,1740
3		3,56	3,47	2,98	2,06	1,59	1,68	1,32	1,39	1,00	6,9183
4		4,19	3,05	3,22	1,90	2,00	1,73	1,12	1,54	1,90	7,4206
5	Редуктор подъема 2	15,61	18,32	8,36	5,78	4,19	4,69	6,18	5/47	4,20	28,4236
6		14,98	16,32	7,15	3,51	3,87	4,15	6,58	4/12	4,90	25,8972
7		12,87	18,48	22,39	36,47	18,23	12,47	9,87	6,89	3,79	54,6407
8	Редуктор подъема 3	9,78	13,56	15,42	5,97	5,41	4,38	4,12	3,97	2,73	25,3233
9		2,32	3,15	2,01	1,87	1,25	0,98	0,45	0,45	0,12	5,0778
10		1,56	2,89	1,89	1,56	1,12	0,65	0,41	0,32	1,02	4,4474
11		2,51	1,69	1,87	1,42	1,36	1,47	1,24	0,49	0,25	4,5299
12	Редуктор подъема 4	1,98	1,87	3,49	2/02	1,12	0,45	0,89	0,51	0,54	5,1457
13		3,98	4,11	2,73	1,86	1,15	0,96	0,45	0,42	0,91	6,8627
14		4,21	3,65	2,14	2,06	1,54	1,33	1,42	0,87	0,54	6,8611
15		3,47	3,90	2,58	3,17	1,98	1,36	1,45	0,79	0,67	7,2734
16	Редуктор подъема 5	6,15	8,12	4,45	3,18	2,69	2,51	2,71	3,12	2,49	13,0571
17		5,78	16,36	28,79	18,42	12,44	10,69	8,78	4,56	3,78	43,0165
18		6,45	18,98	31,22	32,14	15,78	12,46	10,48	6,51	2,54	54,5200
19		3,97	12,47	23,41	16,22	11,29	10,23	7,69	5,12	2,89	36,1690
20		7,12	13,20	21,38	14,23	8,24	3,45	8,49	4,15	3,79	33,0968



ЕДК уже в первом приближении показали принципиальную возможность его использования для построения прогностической модели. Использование дополнительного объема диагностических данных позволит более точно определить влияющие параметры виброакустического сигнала и границы зон допустимого состояния редукторов по оценке величин ЕДК, что увеличит точность прогнозирования и позволит оптимизировать текущую схему ремонтов горного оборудования.

Для примера в таблице 5 приведены результаты измерений по выборке из пяти редукторов лебедок подъема экскаваторов ЭШ 10/70 и ЭШ 11/70, содержащие данные по 20 измерительным точкам (направление измерений – вертикальное). Также приведены результаты расчетов ЕДК для данного оборудования и результаты оценки достоверности полученных данных в соответствии с разработанной Методикой (рисунок 6).

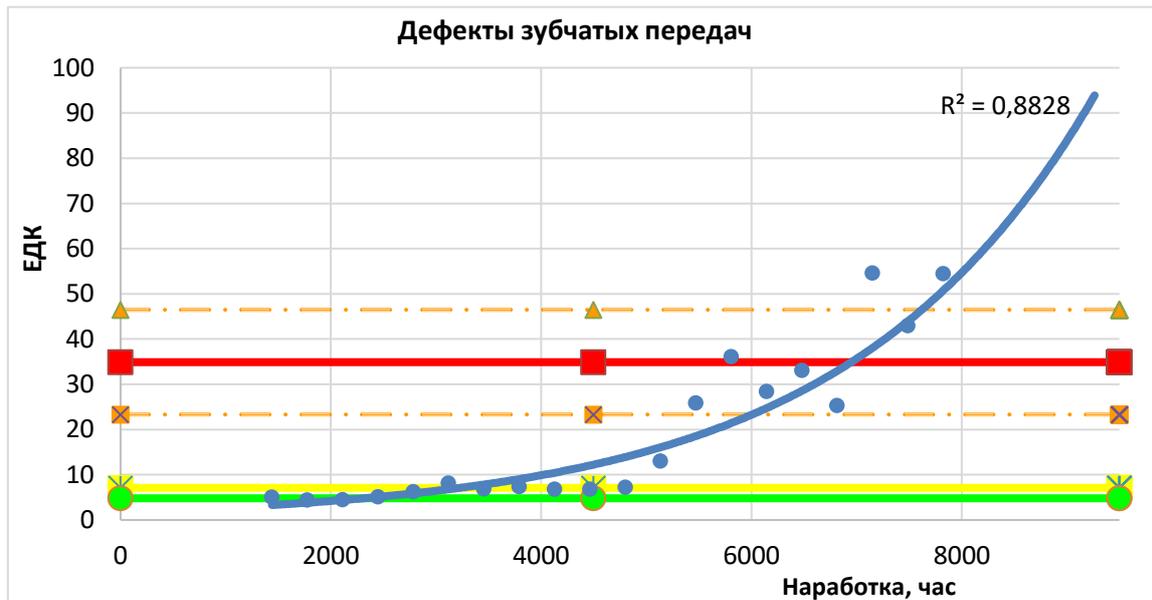


Рис. 6. Обобщение результатов расчета ЕДК для зубчатой передачи лебедки подъема карьерных экскаваторов типа драглайн и построение среднесрочного прогноза в зависимости от наработки
Fig. 6. Generalization of the results of the calculation of the EDC for the gear transmission of the lifting winch of the dragline-type mining excavators and the construction of a medium-term forecast depending on the operating time

Как следует из анализа проведенных расчетов и графиков, на заданном интервале диагностирования ($T=60$ календарных дней) уровень АВАРИЯ будет достигнут. Уровень **ЕДК_{АВАРИЯ} ЗУБЧАТЫЕ ПЕРЕДАЧИ=34,90**, доверительные границы прогноза уровня АВАРИЯ – пессимистическая 23,32 и оптимистическая 46,48, при прогнозе на 60 суток в момент наработки 9 264 часов ЕДК=93,74. Величина достоверности аппроксимации $R^2=0,8828$. Рекомендовано выполнить ревизию лебедки подъема, а также планировать замену изношенных зубчатых пар с последующей центровкой валов редуктора.

Расчет параметров краткосрочного прогнозирования для зубчатых передач

В соответствии с рекомендациями для данного типа оборудования с учетом специфики его эксплуатации принимаем $S_{t-1}=43,02$ и $\alpha=0,3$. Принимаем в расчете краткосрочного прогнозирования (интервал прогнозирования $T=30$ календарных дней) адаптивную модель вида $S_t = \alpha K_t + \beta S_{t-1}$. Тогда краткосрочный прогноз в соответствии с принятой моделью в момент наработки $t=7\ 824$ час (комплексный критерий равен 54,52, см. табл. 5) на один период диагностирования равен $S_i=0,3 \times 54,52 + 0,7 \times 43,02 = 46,47 > 34,90$, следовательно, на рассматриваемом диагностическом интервале по критерию наличия дефектов зубчатых передач, как и в случае среднесрочного прогнозирования, уровень АВАРИЯ будет достигнут. Службе главного механика рекомендовано незамедлительно выполнить ревизию лебедок подъема, а



также планировать замену изношенных зубчатых пар с последующей центровкой валов редуктора.

Заключение и общие выводы.

Предложенный подход к анализу диагностических данных с применением разработанных единых диагностических критериев позволил осуществить прогноз развития деградационных процессов на оборудовании горных машин на кратко- и среднесрочную перспективу, что позволяет закрыть все существующие потребности в прогнозировании для системы планово-предупредительных ремонтов. Реализованные способы выделения тренда детерминированной компоненты из исходного виброакустического сигнала позволяют получить меры достоверности для статистических оценок, используемых при построении прогноза. Полученные научные результаты позволили доказать эффективность предложенной методологии создания адаптивной прогнозной деградационной модели при использовании в качестве моделируемых параметров новых единых диагностических критериев, основанных на принципе комплексного диагностирования оборудования по параметрам вибрации. Применение предложенного подхода к прогнозированию процессов деградации фактического состояния сложных механических систем позволит снизить аварийность при проведении открытых горных работ, а также оптимизировать логистику и складское хозяйство эксплуатирующих предприятий угольной и горнорудной промышленности. Использование единых диагностических критериев, разработанных для всего спектра дефектов горного оборудования, в качестве параметров адаптивной модели для прогнозирования процессов деградации технического состояния горных машин открывает инновационный путь к реализации в условиях угольных предприятий России системы управления ремонтами на основе оценки фактического состояния эксплуатируемой техники, что позволит уменьшить негативное влияние человеческого фактора на результаты вибродиагностики, снизить требования к квалификации специалистов, осуществляющих контроль фактического состояния горных машин, уменьшить себестоимость добычи за счет минимизации аварийных отказов и ухода от морально устаревшей системы планово-предупредительных ремонтов и аварийного обслуживания техники. Применение результатов кратко- и среднесрочного прогнозирования позволит свести к минимуму количество несчастных случаев на производстве, связанных с фактически недопустимым техническим состоянием эксплуатируемого оборудования и уменьшить риски для ремонтного и обслуживающего персонала сложной и дорогостоящей горной техники.

Список литературы

1. Клюев В.В., Фурсов А.С., Филинов М.В. Подходы к построению систем оценки остаточного ресурса технических объектов // Контроль. Диагностика. – 2007. – № 3. – С. 18-23.
2. Диагностика горных машин и оборудования / Б.Л. Герике, П.Б. Герике, В.С. Квагинидзе [и др.] // М.: ИПО «У Никитских ворот». – 2012. – 400 с.
3. Федеральный закон от 21.07.93 № 116-ФЗ. О промышленной безопасности опасных производственных объектов (действует с 01.07.2021 г.).
4. Решетов, А.А. Неразрушающий контроль и техническая диагностика энергетических объектов: учеб. пособие / А.А. Решетов, А.К. Аракелян; под ред. проф. А.К. Аракеляна. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2010. – 470 с.
5. Сушко, А.Е. Разработка норм на допустимые пороговые уровни вибрационного состояния основного оборудования металлургических производств // Науч. сессия МИФИ-2006: Сб. науч. тр. В 16 т. М.: МИФИ, 2006. Т. 2. С. 162-163.
6. Вентцель, Е.С. Теория вероятностей: Учеб. для вузов. 8-е изд., стереотип. М.: Высшая школа, 2002. 575 с.
7. Айвазян С.А., Енюков, И.С., Мешалкин Л.Д. Прикладная статистика. Исследование зависимостей // М.: Финансы и статистика. – 1985. – 487 с.
8. Шпаков П.С., Попов В.Н. Статистическая обработка экспериментальных данных: Учебное пособие. – М.: Издательство Московского государственного горного университета. – 2003. – 268 с.
9. Broomhead, D.; King, G. Extracting qualitative dynamics from experimental data // Physica D. – 1986. – V.20. – P. 217-236.



10. Румшинский Л.З. Математическая обработка результатов эксперимента // М.: Наука, 1971. – 164 с.
11. Александров Ф.И., Голяндина Н.Э. Автоматизация выделения трендовых и периодических составляющих временного ряда в рамках метода «Гусеница»-SSA // EXPONENTA PRO. – 2004. – №3-4. – С. 54-61.
12. Костюков В.Н., Костюков А.В. Мониторинг состояния оборудования в реальном времени // Контроль. Диагностика. – 2010. – № 3. – С. 43-50.
13. Бухштабер В.М. Многомерные развертки временных рядов. Теоретические основы и алгоритмы // Обозрение прикладной промышленной математики. Серия: Вероятность и статистика. – 1997. – Т.4. – Вып. 4. – С. 629-645.
14. Измерения в промышленности: справ. изд. В 3 кн. Кн. 1. Теоретические основы. / Под ред. П. Профоса // М.: Металлургия. – 1990. – 492 с.
15. Основы диагностики технических устройств и сооружений. / Г. А. Бигус, Ю. Ф. Даниев, Н. А. Быстрова, Д. И. Галкин // М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015. – 445 с.
16. Drygin, S, Peton, N, Ahmad, S (2019). Oil whirl instability on a gearbox and gas turbine unbalance. IMVAC Europe. Antwerp, Belgium. June 03-06, 2019.
17. Краковский Ю.М. Математические и программные средства оценки технического состояния оборудования // Новосибирск: Наука. – 2005. – 200 с.
18. Yu J, Peton N. (2019). Fluid Film Bearing Damage Detection Based on Vibration Data. 48th Turbomachinery Symposium. Houston, Texas, USA. September 10-12, 2019.
19. Ширман А.Р., Соловьев А.Б. Практическая вибродиагностика и мониторинг состояния механического оборудования. // М.: 1996. – 276 с.
20. Kelly, S. Graham. Advanced vibration analysis // 2013. – Dekker mechanical engineering. – 637 p.
21. Четыркин Е.М. Статистические методы прогнозирования // М.: Статистика. – 1977. – 200 с.
22. Сушко А.Е., Грибанов В.А. Проблемы оценки технического состояния динамического оборудования опасных производственных объектов // Безопасность труда в промышленности. – 2011. – №10. – С. 58-65.
23. Kovalev V., Gerike B., Khoreshok A., Gerike P. Preventive Maintenance of Mining Equipment Based on Identification of Its Actual Technical State. – Taishan Academic Forum – Project on Mine Disaster Prevention and Control. – October, 17-20 Qingdao, China. – Atlantis Press. Amsterdam, Paris, Beijing. – 2014. – P. 184-189.
24. Построение системы интеллектуального обслуживания редукторов горношахтного оборудования / Б.Л. Герике, В.И. Клишин, Е.Ю. Пудов, Е.Г. Кузин // Горный журнал. – 2017. – №12. – С. 68-73.
25. Kuzin E., Bakin V., Dubinkin D. Mining equipment technical condition monitoring // E3S Web of Conferences. – 2018. – Vol. 41. – Article 03020. DOI: 10.1051/e3sconf/20184103020
26. Герцбах И. Теория надежности с приложениями к профилактическому обслуживанию: Монография / Под ред. В.В. Рыкова; пер. с англ. М.Г. Сухарева. М.: ГУП Изд-во «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина. – 2003. – 263 с.
27. Герике П.Б., Герике Б.Л. Формирование единого диагностического критерия для оценки технического состояния горного оборудования // Горное оборудование и электромеханика. – 2021. – № 2. – С. 17-22.
28. Герике П.Б., Герике Б.Л. Разработка системы единых диагностических критериев для оценки технического состояния горных машин и оборудования по параметрам механических колебаний // Инновации в топливно-энергетическом комплексе и машиностроении (ТЭК-2022): Сборник трудов III Международной научно-практической конференции. – Кемерово, 2022. – С. 206-213.
29. Герике П.Б., Герике Б.Л. Выбор и обоснование единого критерия неуравновешенности роторов энергомеханического оборудования карьерных электрических экскаваторов // Горное оборудование и электромеханика. – 2021. – № 4. – С. 52-59.
30. Герике П.Б., Герике Б.Л., Ещеркин П.В. Применение единого критерия для диагностики редукторов горных машин // Научные технологии разработки и использования минеральных ресурсов. – 2022. – №8. – С. 147-152.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2022 Авторы. Издательство Кузбасского государственного технического университета имени Т.Ф. Горбачева. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



Информация об авторах

Герике Павел Борисович, к.т.н., старший научный сотрудник

e-mail: am_besten@mail.ru

Федеральный исследовательский центр угля и углехимии, Институт угля
Российская Федерация, г. Кемерово, 650010, пр. Ленинградский, 10

Герике Борис Людвигович, главный научный сотрудник, докт. техн. наук, профессор

e-mail: gbl_42@mail.ru

Федеральный исследовательский центр угля и углехимии
Российская Федерация, г. Кемерово, 650010, пр. Ленинградский, 10
Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева
Российская Федерация, г. Кемерово, 650000, ул. Весенняя, 28

PREDICTION OF THE SERVICE LIFE OF MINING EQUIPMENT WITH THE USE OF A UNIFIED DIAGNOSTIC CRITERION OF ITS TECHNICAL CONDITION

Pavel B. Gerike¹, Boris L. Gerike^{1,2}

¹Federal State Budget Scientific Centre «The Federal Research Center of Coal and Coal-Chemistry of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences», Institute of Coal

²Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University»



Article info

Received:

18 August 2022

Revised:

25 September 2022

Accepted:

29 September 2022

Keywords: mining equipment, diagnostics, technical condition, operation, vibrodiagnostics, equipment service life

Abstract.

Implementation of the system of maintenance of mining equipment according to its actual technical condition requires from mining enterprises not only creation of diagnostics service, equipped with modern technical means of nondestructive control and staffed by specialists on providing engineering reliability of the monitored equipment. Processing of large amount of information about technical condition of controlled objects requires use of special knowledge in the field of mechanical wear of contacting surfaces, theory of reliability of mechanical systems, statistical processing of results of passive experiments and methods of prediction of the product workability loss. All this requires creation of a universal prognostic model of mining equipment units and assemblies degradation, which takes into account a large amount of diverse information, including both external (mining-technical and weather-climatic operating conditions, qualification of mining machinery operators) and internal (operating mode, exploitation history) factors on mining machinery serviceability indicators. The main difference of the developed model from the existing ones is in the use of new unified diagnostic criteria as modeled parameters, each of which can replace a large number of diagnostic attributes and rules in the field of vibration control, which will allow to give up high requirements for vibrodiagnostic specialists.

For citation Gerike P., Gerike B. (2022) Prediction of the service life of mining equipment with the use of a unified diagnostic criterion of its technical condition, *Journal of mining and geotechnical engineering*, 3(18):4. DOI: 10.26730/2618-7434-2022-3-4-24

References

1. Klyuev V.V., Fursov A.S., Filinov M.V. Podkhody k postroeniyu sistem otsenki ostatochnogo resursa tekhnicheskikh ob'ektov // *Kontrol'. Diagnostika*. – 2007. – № 3. – S. 18-23.



2. Diagnostika gornyykh mashin i oborudovaniya / B.L. Gerike, P.B. Gerike, V.S. Kvagimidze [i dr.] // M.: IPO «U Nikitskikh vorot». – 2012. – 400 s.
3. Federal'nyy zakon ot 21.07.93 № 116-FZ. O promyshlennoy bezopasnosti opasnykh proizvodstvennykh ob"ektov (deystvuet s 01.07.2021 g.).
4. Reshetov, A.A. Nerazrushayushchiy kontrol' i tekhnicheskaya diagnostika energeticheskikh ob"ektov: ucheb. posobie / A.A. Reshetov, A.K. Arakelyan; pod red. prof. A.K. Arakelyana. – Cheboksary: Izd-vo Chuvash. un-ta, 2010. – 470 s.
5. Sushko, A.E. Razrabotka norm na dopustimye porogovye urovni vibratsionnogo sostoyaniya osnovnogo oborudovaniya metallurgicheskikh proizvodstv // Nauch. sessiya MIFI-2006: Sb. nauch. tr. V 16 t. M.: MIFI, 2006. T. 2. S. 162-163.
6. Venttsel', E.S. Teoriya veroyatnostey: Ucheb.dlya vuzov. 8-e izd., stereotip. M.: Vysshaya shkola, 2002. 575 s.
7. Ayvazyan S.A., Enyukov, I.S., Meshalkin L.D. Prikladnaya statistika. Issledovanie zavisimostey // M.: Finansy i statistika. – 1985. – 487 s.
8. Shpakov P.S., Popov V.N. Statisticheskaya obrabotka eksperimental'nykh dannykh: Uchebnoe posobie. – M.: Izdatel'stvo Moskovskogo gosudarstvennogo gornogo universiteta. – 2003. – 268 s.
9. Broomhead D, King G. Extracting qualitative dynamics from experimental data // Physica D. – 1986. – V.20. –P.217-236
10. Rumshinskiy L.Z. Matematicheskaya obrabotka rezul'tatov eksperimenta // M.: Nauka, 1971. – 164 c.
11. Aleksandrov F.I., Golyandina N.E. Avtomatizatsiya vydeleniya trendovykh i periodicheskikh sostavlyayushchikh vremennogo ryada v ramkakh metoda «Gusenitsa»-SSA // EXPONENTA PRO. – 2004. – №3-4. – S. 54-61.
12. Kostyukov V.N., Kostyukov A.V. Monitoring sostoyaniya oborudovaniya v real'nom vremeni // Kontrol'. Diagnostika. – 2010. – № 3. – S. 43-50.
13. Bukhshtaber V.M. Mnogomernye razvertki vremennykh ryadov. Teoreticheskie osnovy i algoritmy // Obozrenie prikladnoy promyshlennoy matematiki. Seriya: Veroyatnost' i statistika. – 1997. – T.4. – Vyp. 4. – S. 629-645.
14. Izmereniya v promyshlennosti: sprav. izd. V 3 kn. Kn. 1. Teoreticheskie osnovy. / Pod red. P. Profosa // M.: Metallurgiya. – 1990. – 492 s.
15. Osnovy diagnostiki tekhnicheskikh ustroystv i sooruzheniy. / G. A. Bigus, Yu. F. Daniev, N. A. Bystrova, D. I. Galkin // M.: Izdatel'stvo MGTU im. N.E. Bauman, 2015. – 445 s.
16. Drygin, S, Peton, N, Ahmad, S (2019). Oil whirl instability on a gearbox and gas turbine unbalance. IMVAC Europe. Antwerp, Belgium. June 03-06, 2019.
17. Krakovskiy Yu.M. Matematicheskie i programmnye sredstva otsenki tekhnicheskogo sostoyaniya oborudovaniya // Novosibirsk: Nauka. – 2005. – 200 s.
18. Yu J, Peton N. (2019). Fluid Film Bearing Damage Detection Based on Vibration Data. 48th Turbomachinery Symposium. Houston, Texas, USA. September 10-12, 2019.
19. Shirman A.R., Solov'ev A.B. Prakticheskaya vibrodiagnostika i monitoring sostoyaniya mekhanicheskogo oborudovaniya. // M.: 1996. – 276 s.
20. Kelly, S. Graham. Advanced vibration analysis // 2013. – Dekker mechanical engineering. – 637 p.
21. Chetyrkin E.M. Statisticheskie metody prognozirovaniya // M.: Statistika. – 1977. – 200 s.
22. Sushko A.E., Griбанov V.A. Problemy otsenki tekhnicheskogo sostoyaniya dinamicheskogo oborudovaniya opasnykh proizvodstvennykh ob"ektov // Bezopasnost' truda v promyshlennosti. – 2011. – №10. – S. 58-65.
23. Kovalev V., Gerike B., Khoreshok A., Gerike P. Preventive Maintenance of Mining Equipment Based on Identification of Its Actual Technical State. – Taishan Academic Forum – Project on Mine Disaster Prevention and Control. – October, 17-20 Qingdao, China. – Atlantis Press. Amsterdam, Paris, Beijing. – 2014. – P. 184-189.
24. Postroenie sistemy intellektual'nogo obsluzhivaniya reduktorov gornoshakhtnogo oborudovaniya / B.L. Gerike, V.I. Klishin, E.Yu. Pudov, E.G. Kuzin // Gornyy zhurnal. – 2017. – №12. – S. 68-73.
25. Kuzin E., Bakin V., Dubinkin D. Mining equipment technical condition monitoring // E3S Web of Conferences. – 2018. – Vol. 41. – Article 03020. DOI: 10.1051/e3sconf/20184103020
26. Gertsbakh I. Teoriya nadezhnosti s prilozheniyami k profilakticheskomu obsluzhivaniyu: Monografiya / Pod red. V.V. Rykova; per. s angl. M.G. Sukhareva. M.: GUP Izd-vo «Neff' i gaz» RGU nef'ti i gaza im. I.M. Gubkina. – 2003. – 263 s.
27. Gerike P.B., Gerike B.L. Formirovanie edinogo diagnosticheskogo kriteriya dlya otsenki tekhnicheskogo sostoyaniya gornogo oborudovaniya // Gornoe oborudovanie i elektromekhanika. – 2021. – № 2. – S.17-22.
28. Gerike P.B., Gerike B.L. Razrabotka sistemy edinykh diagnosticheskikh kriteriev dlya otsenki tekhnicheskogo sostoyaniya gornyykh mashin i oborudovaniya po parametram mekhanicheskikh kolebaniy //



Innovatsii v toplivno-energeticheskom komplekse i mashinostroenii (TEK-2022): Sbornik trudov III Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. – Kemerovo, 2022. – С. 206-213.

29. Gerike P.B., Gerike B.L. Vybor i obosnovanie edinogo kriteriya neuravnoveshennosti rotorov energomekhanicheskogo oborudovaniya kar'ernykh elektricheskikh ekskavatorov // Gornoe oborudovanie i elektromekhanika. – 2021. – № 4. – S. 52-59.

30. Gerike P.B., Gerike B.L., Eshcherkin P.V. Primenenie edinogo kriteriya dlya diagnostiki reduktorov gornykh mashin // Naukoemkie tekhnologii razrabotki i ispol'zovaniya mineral'nykh resursov. – 2022. – №8. – S. 147-152.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2022 The Authors. Published by T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Information about the authors

Pavel B. Gerike, senior researcher, C. Sc. in Engineering

e-mail: am_besten@mail.ru

Federal State Budget Scientific Centre «The Federal Research Center of Coal and Coal-Chemistry of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences», Institute of Coal
10 Leningradsky Av., Kemerovo, Russia, 650010

Boris L. Gerike, Dr. Sc. in Engineering, Professor, Chief researcher

e-mail: gbl_42@mail.ru

Coal Machinery Laboratory of Federal State Budget Scientific Centre «The Federal Research Center of Coal and Coal-Chemistry of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences», Institute of Coal
10 Leningradsky Av., Kemerovo, Russia, 650010

Department of Mining Machines and Complexes, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University
28 Vesennaya str., Kemerovo, Russia, 650000

