

МЕТОД ОЦЕНКИ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ РЕСУРСНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КАРЬЕРНЫХ САМОСВАЛОВ НА ОСНОВЕ КОНТРОЛЬНЫХ КАРТ ШУХАРТА

Р.Н. Сафиуллин¹, Р.Р. Сафиуллин¹, К.В. Сорокин¹

¹ Санкт-Петербургский Горный университет императрицы Екатерины II,
Санкт-Петербург, Россия, e-mail: safravi@mail.ru

Аннотация: В данном исследовании был произведен анализ существующих методов оценки и прогнозирования технического состояния карьерных самосвалов. Были выявлены их основные недостатки, которые заключались в больших экономических и человеческих затратах на их проведение. Сделан вывод о необходимости разработки нового подхода управления техническим состоянием ресурсных элементов горных машин. Представлен новый метод оценки и прогнозирования технического состояния ресурсных элементов исходя из оценки диагностических параметров, который, в отличие от известных, использует в качестве инструмента статистического управления техническим состоянием транспортных средств контрольные карты Шухарта, наряду с традиционным механизмом прогнозирования показателей долговечности ресурсных элементов. В сочетании с использованием средств неразрушающего контроля методика позволяет подготовить исходные данные для принятия решения об отводе образцов техники в ремонт на различный период прогноза. Реализация метода оценки и прогнозирования технического состояния ресурсных элементов карьерных самосвалов позволит заблаговременно принимать решения по их техническому обслуживанию и ремонту, что безусловно скажется на повышении эффективности карьерных самосвалов эксплуатации.

Ключевые слова: карьерные самосвалы, методика оценки технического состояния горных машин, прогнозирование технического состояния горных машин, мониторинг технического состояния, интеллектуальные транспортные системы, повышение эффективности использования горных машин, ресурсные элементы, диагностирование горных машин.

Для цитирования: Сафиуллин Р. Н., Сафиуллин Р. Р., Сорокин К. В. Метод оценки и прогнозирования технического состояния ресурсных элементов карьерных самосвалов на основе контрольных карт Шухарта // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. – № 7. – С. 111–124. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_7_0_111.

Assessment and prediction of technical condition of dump truck life components using the Shewhart control charts

R.N. Safiullin¹, R.R. Safiullin¹, K.V. Sorokin¹

¹ Empress Catherine II Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia

Abstract: This article reviews the current methods available for the assessment and prediction of technical condition of dump trucks. The main shortage revealed are the high economic and human resources required for the implementation of these methods. The conclusion is drawn that it is necessary to develop a new approach to the technical condition management for the machine life components. The presented new method of technical condition assessment and prediction for the machine life components, as against the other methods of statistical control, assesses diagnostic parameters using the Shewhart control charts in combination with the conventional prediction of endurance of the machine components. In combination with the means of nondestructive control, the new procedure makes it possible to prepare basic data for making decisions on placement of equipment under repair for different periods of prediction. Implementation of this method of technical condition assessment and prediction in terms of the vital elements of dump trucks can enable prompt decision-making on maintenance and repair of the machines, which unconditionally can enhance operating efficiency of dump trucks.

Key words: dump trucks, procedure of technical condition assessment of mining machines, technical condition prediction of mining machines, technical condition monitoring, intelligence transport systems, enhanced mining machine use efficiency, resource elements, mining machine diagnostics.

For citation: Safiullin R. N., Safiullin R. R., Sorokin K. V. Assessment and prediction of technical condition of dump truck life components using the Shewhart control charts. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2024;(7):111-124. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_7_0_111.

Введение

Карьерные самосвалы являются грузовыми автомобилями, доставляющими горные породы в тяжелых эксплуатационных условиях от места добычи до места их переработки, которые часто подвергаются интенсивному износу, а за-

тем и выходу из строя его ресурсных элементов (табл. 1).

На основе результатов проведенного анализа причин отказов и времени простоев карьерных самосвалов был составлен граф состояний ресурсных элементов карьерного самосвала [2 – 4].

Таблица 1

Причины отказов и время простоев карьерных самосвалов [1]
Causes of failures and downtime of mining dump trucks [1]

Наименование причины отказа	2022			
	БелАЗ-7555		БелАЗ-75581	
	общее количество отказов	часы простоя на 1 ед. транспорта	общее количество отказов	часы простоя на 1 ед. транспорта
Двигатель внутреннего сгорания (ДВС)	135	220	142	246
Электрооборудование	117	32	102	37
Гидросистема	191	42	17	36
Ходовая часть	657	147	752	138

На рис. 1 приведен граф состояний процесса оценки и прогнозирования технического состояния ресурсных элементов карьерных самосвалов. Переходом p_{ij} обозначена вероятность перехода процесса из технологического состояния i в состояние j . При этом

$$\sum_{j=1}^J p_{ij} = 1, \text{ где } j = 1, \dots, J.$$

S_1 – исправное состояние ресурсных элементов карьерных самосвалов; S_2 – неработоспособное состояние ресурсных элементов карьерных самосвалов; S_3 – техническое обслуживание ресурсных элементов карьерных самосвалов; S_4 – работоспособное состояние ресурсных элементов карьерных самосвалов; S_5 – текущий ремонт ресурсных элементов карьерных самосвалов; S_6 – средний ремонт ресурсных элементов карьерных самосвалов; S_7 – капитальный ремонт ресурсных элементов карьерных самосвалов; S_8 – предель-

ное состояние ресурсных элементов карьерных самосвалов [5–7].

Так как данные системы подвержены наибольшему числу выхода из строя, то отказ любой из приведенных систем влечет за собой потерю работоспособности ресурсных элементов карьерного самосвала в целом. Существующее положение способствует интенсивному развитию мониторинга технического состояния отдельных элементов и систем в режиме реального времени. Разработанная автоматизированная система удаленной диагностики технического состояния транспортных средств на основе матричного QR-кода (Патент РФ № 2792386) может быть примером системы или средством мониторинга технического состояния карьерных самосвалов [8]. Исходя из этого, возникает необходимость в исследовании и разработке методов, позволяющих обрабатывать и прогнозировать данные, полученные с транспортного средства и, как следствие, производить управляющее

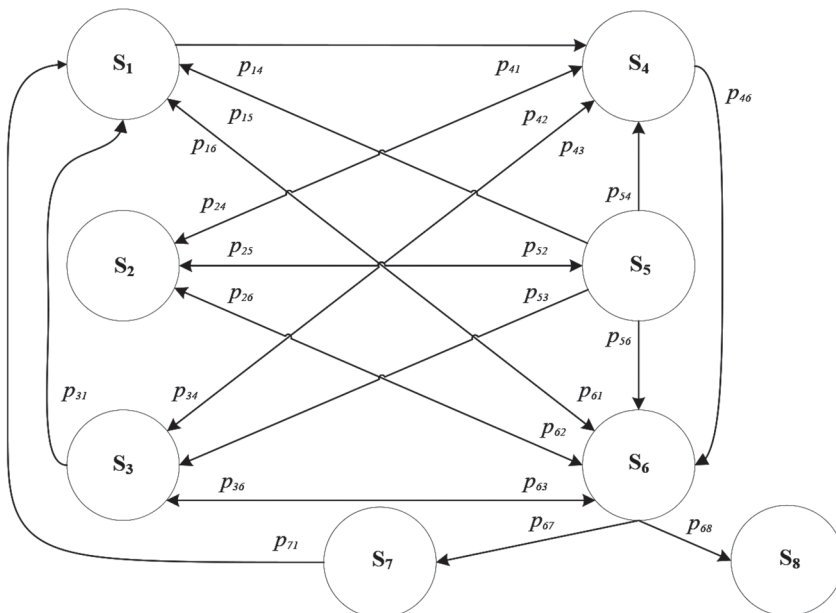


Рис. 1. Граф состояния ресурсных элементов карьерного самосвала [Составлено авторами]

Fig. 1. Graph of the state of resource elements of a dump truck [Compiled by the authors]

воздействие на него с целью повышения технического ресурса и долговечности ресурсных элементов [9, 10].

Для прогнозирования отказов и неисправностей существуют различные методы, например, «Дерево неисправностей» или «Анализ видов и последствий отказов». Безусловно, данные методы способны прогнозировать техническое состояние транспортных средств, но применение их — трудоемкий и материально затратный процесс. Таким образом, установлено, что проведенное исследование в области прогнозирования отказов и неисправностей технического состояния ресурсных элементов карьерных самосвалов выявило необходимость внедрения альтернативных методов управления и прогнозирования с целью повышения их надежности.

Результаты исследования

Для реализации стратегии технического обслуживания и ремонта по фактическому техническому состоянию (РТС), как наиболее прогрессивной в современных экономических условиях, необходима определенная информационная поддержка, направленная на оптимизированное планирование функционирования ремонтных органов. Принятие решения о проведении ресурсовосстанавливающего ремонта транспортного средства основано на проведении оценки фактического состояния его ресурсных элементов (РЭ). При этом под РЭ понимается запасная часть горной машины, неустранимый дефект которой обуславливает предельное состояние образца в целом и срок службы которой определяет срок службы образца в целом [11 — 13]. Образец, как правило, содержит несколько РЭ, каждый из которых ограничивает срок его службы в целом. Однако возможность непосредственного измерения в процессе эксплуатации структурных параметров (износов, зазоров)

без разборки РЭ весьма ограничена. Поэтому при диагностировании пользуются косвенными признаками, отражающими техническое состояние транспортных средств, а также отдельных элементов. Они называются диагностическими параметрами и являются пригодными для измерения физических величин, так как связаны с параметрами технического состояния (ТС) и несут в себе информацию о состоянии ресурсных элементов. Диагностическими параметрами могут быть: параметры рабочих процессов (мощности, расхода масла и др.), параметры сопутствующих процессов (вибраций, шума и т.п.), геометрические параметры (зазоры, люфты, биения и др.). Закономерности изменения диагностических параметров в функции наработки ресурсного элемента аналогичны закономерностям изменения параметров технического состояния транспортных средств [14 — 16].

Учитывая, что на этапе жизненного цикла функционирования карьерных самосвалов — эксплуатации — существует необходимость исследовать отказы «износозового» типа элементов транспортных средств [17 — 19], изменение диагностических параметров в общем виде происходит качественно единообразно и описывается так называемой кривой износа. На ней выделяются области наработки, нормальной работы и аварийного износа. Нахождение параметра в области аварийного износа означает, что срок службы ресурсного элемента заканчивается и возникает необходимость проведения его замены или ремонта [20].

Идентификация нахождения параметра в области аварийного износа предполагает выявление аномальных вариаций его значений.

Для этого предлагается использовать контрольные карты Шухарта (Уолтер Эндрю Шухарт (англ. Walter Andrew Shewhart; 18 марта 1891 — 11 марта 1967) —

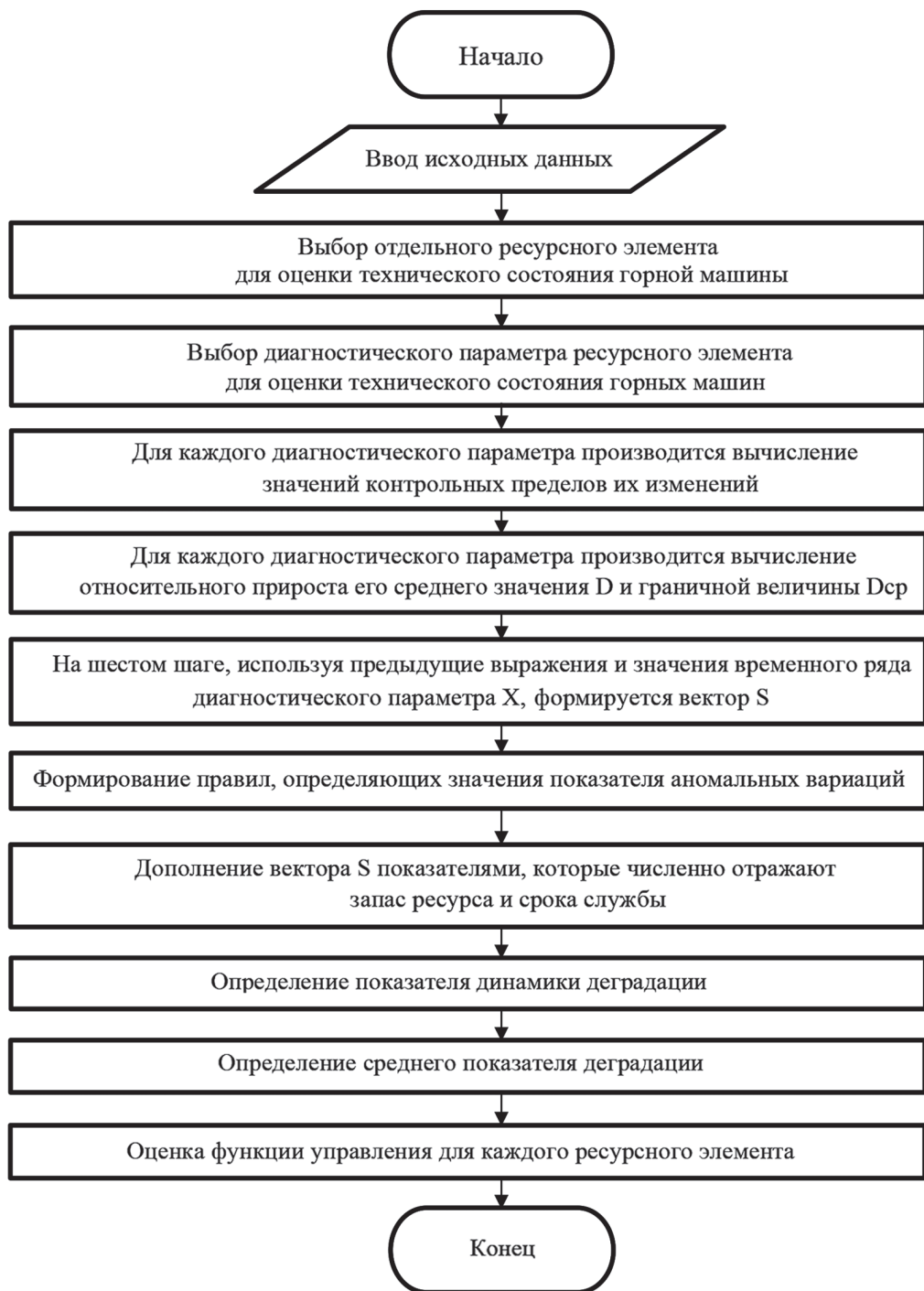


Рис. 2. Алгоритм применения контрольных карт Шухарта [Составлено авторами]
 Fig. 2. The algorithm for using Shewhart control maps [Compiled by the authors]

американский ученый и консультант по теории управления качеством) [21–23], которые являются инструментом управления процессами производства различного рода продукции, и основное их достоинство заключается в большой чувствительности определения вариаций наблюдаемого процесса, что дает возможность применения контрольных карт не только в сфере контроля качества изготовления продукции, но и в области технической диагностики транспортных средств.

Контрольные карты Шухарта применяются для мониторинга процессов и выявления исключительных или аномальных значений данных. Они основаны на статистическом анализе и представляют данные об изменении процесса в виде графика. На графике отображается среднее значение (\bar{X} -среднее) и диапазон (R) наблюдаемых значений.

Для использования контрольных карт Шухарта необходимо собирать данные о процессе или параметре, узле или агрегате, который нужно контролировать.

Набор собираемых данных чаще всего состоит из нескольких последовательных измерений, проведенных в течение определенного периода времени или количества произведенных изделий [24–26].

Контрольные карты Шухарта способны выявлять аномалии, контролировать процессы и предотвращать допущение ошибок. При этом они являются инструментом для улучшения качества и эффективности процессов, а также их применение может способствовать сокращению времени, затрачиваемого на обработку и устранение проблем [27].

Для оценки технического состояния любого i -го ресурсного элемента транспортных средств по k диагностическим параметрам необходимо воспользоваться методикой оценки технического состояния ресурсных элементов горных

машин при применении контрольных карт Шухарта, которая включает в себя следующие шаги, представленные на рис. 2.

Шаг 1. Ввод исходных данных: $N_{PЭ}$ – перечень тех образцов транспортных средств, у которых имеются РЭ ($n = 1, 2, \dots, N_{PЭ}$); $\Psi_n^{PЭ}$ – номенклатура ресурсных элементов каждого n -го образца; $K_{\Psi_n^{PЭ}}^n$ – перечень диагностических параметров для ресурсных элементов $\Psi_n^{PЭ}$ -й номенклатуры.

Шаг 2. Выбор отдельного ресурсного элемента для оценки технического состояния горной машины. Для оценки технического состояния карьерного самосвала можно рассмотреть следующие ресурсные элементы соответствующих систем:

- двигатель: проверка его работоспособности, обслуживание и замена изношенных деталей, например, свечей накаливания, фильтров воздуха и масла;
- подвеска: проверка состояния амортизаторов, пружин и других компонентов подвески, их замена при необходимости;
- трансмиссия: проверка состояния коробки передач, сцепления, переднего и заднего мостов, замена масла и фильтров;
- тормозная система: проверка состояния тормозных дисков, колодок, тормозных шлангов, замена или регулировка тормозов;
- электрическая система: проверка работы системы зажигания, стартера, генератора, аккумулятора и других электрических компонентов;
- шины: проверка состояния шин, их износа, давления, балансировки и амортизационных характеристик;
- кузов и кабина: проверка состояния машины, наличия коррозии, повреждений кузова или стекол, а также состояния и работоспособности сидений, ремней безопасности, зеркал и других элементов кузова и салона.

Подходящий ресурсный элемент для оценки технического состояния горной машины будет зависеть от ее конкретного типа и характеристик, а также от потребностей и требований при эксплуатации [28–30].

Шаг 3. Выбор диагностического параметра ресурсного элемента для оценки технического состояния горных машин. Например, к диагностическим параметрам горных машин можно отнести: скорость работы двигателя, температуру охлаждающей жидкости, уровень масла и давление масла в системе, а также уровень выбросов, температуру трансмиссионной жидкости, скорости переключения передач, наличие шумов и вибраций во время работы, толщину тормозных колодок, а также давление в тормозной системе и другие [31–33].

Шаг 4. На четвертом шаге для каждого диагностического параметра производятся вычисления значений контрольных пределов их изменений:

а) для верхнего контрольного предела карты индивидуальных значений

$$X_B = X_{cp} + 2,66R_{cp}; \quad (1)$$

б) для нижнего контрольного предела карты индивидуальных значений

$$X_H = X_{cp} - 2,66R_{cp}; \quad (2)$$

в) для верхнего контрольного предела карты скользящего размаха значений

$$X_R = 3,267R_{cp}, \quad (3)$$

где X_{cp} – среднее из двух значений диагностического параметра; R_{cp} – среднее скользящего размаха, рассчитывается как среднее абсолютное значение разности следующих друг за другом измерений.

Шаг 5. На пятом шаге для каждого диагностического параметра производится вычисление относительного прироста его среднего значения D и граничной величины D_{cp} .

Относительный прирост среднего значения диагностического параметра вычисляется в соответствии с выражением

$$D = \frac{X_{cp}(t) \cdot X_{cp}(t-2)}{X_{cp}^2(t-1)},$$

где $X_{cp}(t)$ – среднее значение диагностического параметра в соответствующий момент контроля.

Граничное значение величины D вычисляется как скользящее среднее

$$D_{cp} = \frac{1}{3} \left(\frac{2X_{cp}(t)}{X_{cp}(t-1)} + \frac{X_{cp}(t-1)}{X_{cp}(t-2)} \right). \quad (4)$$

Шаг 6. На шестом шаге, используя выражения (1)–(4) и значения временного ряда диагностического параметра X , формируется вектор $\vec{S} = (v_x, v_r, v_d)$, элементами которого являются показатели отсутствия особых причин отклонения в контрольных картах средних v_x , размахов v_r и относительного прироста v_d , которые определяются как

$$v_x = \begin{cases} X_H < X < X_B \\ 0, \text{ в противном случае,} \end{cases} \quad (5)$$

$$v_r = \begin{cases} 1, \text{ если } 0 < R_{cp} < X_R \\ 0, \text{ в противном случае,} \end{cases} \quad (6)$$

$$v_d = \begin{cases} 1, \text{ если } D > D_{cp} \\ 0, \text{ если } D \leq D_{cp}. \end{cases} \quad (7)$$

Шаг 7. Вектор \vec{S} описывает текущее состояние диагностического параметра. Для правильного отнесения текущего значения диагностического параметра к области нормального или форсированного износа на седьмом шаге задаются правила, определяющие значения показателя аномальных вариаций a , который может принимать значение 0, 1 или 2, где 0 – «Параметр в области форсированного износа», значение 1 соответствует признаку «Параметр в области нормального износа» и 2 обозначает, что

Таблица 2

**Перечень комбинаций элементов вектора состояния диагностического параметра
[составлена авторами]
List of combinations of elements of the diagnostic parameter state vector
[compiled by the authors]**

Вариант комбинации	v_x	v_r	v_d	Значение показателя аномальных вариаций a	
1	0	0	0	0	параметр в области форсированного износа
2	0	0	1	2	необходимо провести повторное измерение
3	0	1	0	2	необходимо провести повторное измерение
4	0	1	1	1	параметр в области нормального износа
5	1	0	0	0	параметр в области форсированного износа
6	1	0	1	1	параметр в области нормального износа
7	1	1	0	1	параметр в области нормального износа
8	1	1	1	1	параметр в области нормального износа

область нахождения измерения не определена, т.е. принято решение «Необходимо провести повторное измерение» (табл. 2).

В случае получения комбинации, при которой $a = 2$ (принятие решения о необходимости проведения повторного измерения), необходимо повторить измерение и при повторном получении значения $a = 2$ «Необходимо провести повторное измерение» сделать вывод: $a = 0$ «Параметр в области форсированного износа».

Шаг 8. Принимая во внимание, что один ресурсный элемент характеризуется набором диагностических параметров, решение о его ТС должно приниматься по совокупности всех параметров, характеризующих этот элемент, а также с учетом выработки ресурса и срока службы. На основании этого на восьмом шаге вектор \vec{S} дополняется показателями r и n , которые численно отражают запас ресурса и срока службы и определяются как

$$r = \begin{cases} 0, & \text{если ресурс элементом выработан} \\ 1, & \text{если ресурс элементом не выработан} \end{cases} \quad (8)$$

$$n = \begin{cases} 0, & \text{если срок службы выработан} \\ 1, & \text{если срок службы не выработан} \end{cases} \quad (9)$$

Шаг 9. Анализ литературы [11, 12] показывает, что повышение точности определения технического состояния ресурсных элементов возможно при использовании совместно с вектором \vec{S} показателя динамики деградации этих диагностических параметров P . Поэтому на девятом шаге определяется показатель динамики деградации параметра P в соответствии с табл. 3, где a_{t-1} и a_t — показатель аномальных вариаций этого параметра в моменты времени $t - 1$ и t соответственно (см. табл. 3).

Шаг 10. Далее для каждого диагностического параметра шаги 1 — 9 повторяются и на десятом шаге определяется средний показатель деградации $P_{срi}(t)$ для каждого момента проведения мониторинга технического состояния и динамика изменения деградации ресурсного элемента ΔP_i в процессе мониторинга транспортных средств:

$$P_{срi}(t) = \frac{\sum_{k=1}^K P_k(t)}{K}; \quad (10)$$

Таблица 3

Порядок определения динамики деградации [составлена авторами]
The procedure for determining the dynamics of degradation [compiled by the authors]

№ комбинации	Значение показателей		
	a_{t-1}	a_t	P
1	0	0	0
2	0	1	1
3	0	2	0
4	1	0	0
5	1	1	1
6	1	2	0
7	2	0	0
8	2	1	1
9	2	2	0

$$\Delta P_i = P_{cpi}(t) - P_{cpi}(t-1). \quad (11)$$

Шаг 11. На одиннадцатом шаге производится оценка функции управления

для каждого ресурсного элемента в соответствии с табл. 4.

Проведение подобного алгоритма для каждого ресурсного элемента, на основании табл. 4, позволяет сделать вывод о техническом состоянии транспортных средств в целом [34 – 36].

Заключение

В результате проведенного исследования были изучены существующие методы по оценке отказов и неисправностей транспортных средств, а также выявлены их достоинства и недостатки. Введено понятие «Ресурсный элемент», под которым понимается запасная часть горной машины, неустранимый дефект которой обуславливает предельное состояние образца в целом и срок службы которой определяет срок службы образца в целом. Каждый ресурсный элемент имеет ряд диагностических параметров, которые необходимо определить и оценить их влияние на систему. Для ре-

Таблица 4

Правила определения технического состояния ресурсного элемента транспортных средств [составлена авторами]
Rules for determining the technical condition of a vehicle resource element [compiled by the authors]

№ п/п	Значения показателей мониторинга технического состояния ресурсного элемента				Значение функции управления F_{S3}
	$P_{cpi}(t)$	r	n	ΔP_i	
1	1	при любых значениях			1 – «элемент работоспособен»
2	0	при любых значениях			0 – «элемент не работоспособен, требует ремонта»
3	$0 < P_{cpi}(t) < 1$	0	0	при любых значениях	0 – «элемент не работоспособен, требует ремонта»
4		0	1	$\Delta P_i < 0$	0 – «элемент не работоспособен, требует ремонта»
5		0	1	$\Delta P_i \geq 0$	1 – «элемент работоспособен»
6		1	0	при любых значениях	0 – «элемент не работоспособен, требует ремонта»
7		1	1	$\Delta P_i < 0$	0 – «элемент не работоспособен, требует ремонта»
8		1	1	$\Delta P_i \geq 0$	1 – «элемент работоспособен»

шения данной задачи был разработан «Метод оценки и прогнозирования технического состояния ресурсных элементов карьерных самосвалов на основе контрольных карт Шухарта», основой которого являются сформулированные правила принятия решений о техническом состоянии горных машин, включающие в себя 11 шагов — от определения элементов и их диагностических параметров до оценки функции управления для каждого параметра. Применение данной методики в полной мере позволяет

определить необходимые сроки, силы и средства для проведения ремонтных мероприятий, провести необходимую оценку производственных мощностей ремонтных предприятий с целью организации ресурсовосстанавливающего ремонта по фактическому состоянию. Помимо этого, сформулированные правила позволяют сделать прогноз состояния ресурсного элемента и выдвинуть предположение об отказе в будущем, что позволит повысить эффективность эксплуатации горных машин.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузин Е. Г., Пудов Е. Ю., Дубинкин Д. М. Анализ отказов узлов карьерных самосвалов в условиях эксплуатации // Горное оборудование и электромеханика. — 2021. — № 2. — С. 55–61. DOI: 10.26730/1816-4528-2021-2-55-61.
2. Борисов С. В., Колтунова Е. А., Кладиев С. Н. Совершенствование структуры имитационной модели тягового асинхронного электропривода рудничного электровоза // Записки Горного института. — 2021. — Т. 247. — С. 1–8. DOI: 10.31897/PMI.2021.1.12.
3. Селиверстов Я. А., Гергель Г. Ю., Селиверстов С. А., Никитин К. В. Развитие интеллектуальных транспортных систем на основе мобильных технологий и процедур анализа социальной активности городского населения // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. — 2018. — Т. 11. — С. 47–64. DOI: 10.18721/JCSTCS.11105.
4. Бузмаков С. А., Санников П. Ю., Кучин Л. С., Игошева Е. А., Абдулманова И. Ф. Применение беспилотной аэрофотосъемки для диагностики техногенной трансформации природной среды при эксплуатации нефтяного месторождения // Записки Горного института. — 2023. — Т. 260. — С. 180–193. DOI: 10.31897/PMI.2023.22.
5. Marusin A., Tian H., Safiullin R., Safiullin R., Marusina I. Integral evaluation of the effectiveness of the implementation of automated technical means of controlling the movement of vehicles on the road / Proceedings of the 2022 International Conference on Engineering Management of Communication and Technology (EMCTECH), Vienna, Austria, 2022, pp. 1–4. DOI: 10.1109/EMCTECH55220.2022.9934048.
6. Проников А. С. Параметрическая надежность машин. — М.: Изд-во МГТУ имени Баумана, 2002. — 560 с.
7. Четыркин Е. М. Статистические методы прогнозирования. — М.: Статистика, 1975. — 200 с.
8. Сафиуллин Р. Н., Сафиуллин Р. Р., Унгефук А. А., Сорокин К. В., Тянь Хаотянь Патент РФ № 2792386, 24.01.2023. Автоматизированная система удаленной диагностики технического состояния транспортных средств на основе матричного QR-кода. 2023. Бюл. № 9.
9. Биргер И. А. Техническая диагностика. — М.: Машиностроение, 1978. — 240 с.
10. Пашковский Г. С. Задачи оптимального обнаружения и поиска отказов в РЭА. — М.: Радио и связь, 1981. — 280 с.
11. Маринин М. А., Рахманов Р. А., Должиков В. В., Сушкова В. И. Исследование влияния параметров взорванной горной массы на производительность экскаваторно-автомобильного комплекса // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2023. — № 9-1. — С. 35–48. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_91_0_35.
12. Назарычев А. Н., Дяченко Г. В., Сычев Ю. А. Исследование надежности тягового электропривода карьерных самосвалов на основе анализа отказов его функциональных узлов // Записки Горного института. — 2023. — Т. 261. — С. 363–373. EDN HCLPJVB.

13. Fedotov V. N., Chudakova N. V., Ismailov R. Automation of the technological process of spare parts at the car service company // E3S Web of Conferences. 2023, vol. 402, article 10009. DOI: 10.1051/e3sconf/202340210009.

14. Атрощенко В. А., Авксентьев С. Ю., Махараткин П. Н., Труфанова И. С. Экспериментальная гидротранспортная установка для определения стойкости материалов трубопроводов и деталей грунтовых насосов к гидроабразивному износу // Обогащение руд. – 2021. – № 3. – С. 39–45. DOI: 10.17580/or.2021.03.07.

15. Korshak A. A., Pshenin V. V. Determination of parameters of non-pump ejector gasoline vapor recovery unit // Science and Technologies: Oil and Oil Products Pipeline Transportation. 2023, vol. 13, no. 1, pp. 25–31. DOI: 10.28999/2541-9595-2023-13-1-25-31.

16. Кацуба Ю. Н. Повышение уровня интеграции беспилотных технологий в эксплуатацию сельскохозяйственной техники // Известия Международной академии аграрного образования. – 2023. – № 67. – С. 60–65. EDN MTZELG.

17. Grigorescu S., Trasnea B., Cocias T., Macesanu G. Survey of deep learning techniques for autonomous driving // Journal of Field Robotics. 2022, vol. 37, no. 3, pp. 362–386. DOI: 10.1002/rob.21918.

18. Katsuba Y. N., Grigoreva L. V. Application of artificial neural networks in the system of self-diagnosis car // International Journal of Applied Engineering Research. 2017, vol. 12, pp. 246–248. <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?origin=resultslist&authorId=57194605681&zone=>

19. Babyr N. V. Topical themes and new trends in mining industry: Scientometric analysis and research visualization // International Journal of Engineering. 2024, vol. 37, no. 2, pp. 439–451. DOI: 10.5829/ije.2024.37.02b.18.

20. Brummelen V., O'Brien M., Gruyer D., Najjaran H. Autonomous vehicle perception: The technology of today and tomorrow // Transportation Research Part C: Emerging Technologies. 2018, vol. 89, pp. 384–406. DOI: 10.1016/j.trc.2018.02.012.

21. Lomazov V., Lomazov A., Petrosov D., Akupiyan O. Intelligent evaluation of implementation road infrastructure development program // Transportation Research Procedia. 2022, vol. 63, pp. 1089–1094. DOI: 10.1016/j.trpro.2022.06.111.

22. Yang C., Zha M., Wang W., Liu K., Xiang C. Efficient energy management strategy for hybrid electric vehicles/plug-in hybrid electric vehicles: Review and recent advances under intelligent transportation system // IET Intelligent Transport Systems. 2020, vol. 14, no. 7, pp. 702–711. DOI: 10.1049/iet-its.2019.0606.

23. Ладанов В. И. Применение на военной автомобильной технике войск бортовых информационно-управляющих систем // Альманах Пермского военного института войск национальной гвардии. – 2022. – № 2(6). – С. 85–91. EDN МУТЫУТ.

24. Ge J., Avedisov S. S., He C., Qin W. B., Sadeghpour M., Orosz G. Experimental validation of connected automated vehicle design among human-driven vehicles // Transportation Research Part C: Emerging Technologies. 2018, vol. 91, pp. 335–352. DOI: 10.1016/j.trc.2018.04.005.

25. Zhang L., Orosz G. Beyond-line-of-sight identification by using vehicle-to-vehicle communication // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. 2018, vol. 19, no. 6, pp. 1962–1972. DOI: 10.1109/TITS.2017.2747582.

26. Katsuba Y. N., Grigoreva L. V. Application of artificial neural networks in vehicles' design self-diagnostic system for safety reasons // Transportation Research Procedia. 2017, vol. 20, pp. 283–287. <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57193744586&origin=resultslist&zone=contextBox>.

27. Cao H., Gangakhedkar S., Ali A., Gharba M., Eichinger J. A 5G V2X testbed for cooperative automated driving / IEEE Vehicular Networking Conference, USA. 2016, pp. 1–4. DOI: 10.1109/VNC.2016.7835939.

28. Aramrattana M., Larsson T., Jansson J., Nabo A. A simulation framework for cooperative intelligent transport systems testing and evaluation // Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behavior. 2019, vol. 61, pp. 268–280. DOI: 10.1016/j.trf.2017.08.004.

29. Degtyarev Yu. Classification of categorical structures of structural complexities based on prototypes in simple complexes / Proceedings of the 10th International conference on the application of fuzzy systems and soft computing. 2012, pp. 27–37.

30. Кондратьев А. А. Барьеры внедренческих процессов ИТС / Сборник трудов Международной академии транспорта. – 2014. – № 17. – С. 89–95.

31. Кисуленко Б. В. Концепция нормирования безопасности автомобилей с высоким уровнем автоматизации // Автомобильная промышленность. — 2019. — № 4. — С. 1–5. EDN YUUICC.
32. Афанасьев А. С., Крайнов А. Н., Михалев Ю. В. Совершенствование методики диагностирования грузовых автомобилей с использованием системных сканеров TEXA // Известия Международной академии аграрного образования. — 2023. — № 67. — С. 71–79. EDN MBVYCM.
33. Сафиуллин Р. Н., Сафиуллин Р. Р., Ефремова В. А. Метод комплексной оценки бортовых информационно-управляющих систем на горных машинах // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2023. — № 9-1. — С. 49–63. DOI: 10.25018/0236/1493/2023/91049.
34. Симонова Л. А., Капитонов А. А., Клочкова К. В. Построение интеллектуальной надстройки автоматизированной системы диагностики двигателя внутреннего сгорания // Научно-технический вестник Поволжья. — 2020. — № 12. — С. 110–113. EDN PWDS DH.
35. Махараткин П. Н., Абдулаев Э. К., Вишняков Г. Ю., Ботян Е. Ю., Пушкарев А. Е. Повышение эффективности функционирования карьерных автосамосвалов на основе обоснования их рациональной скорости с помощью имитационного моделирования // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 6-2. — С. 237–250. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_62_0_237.
36. Afanasyev A., Egoshin A., Alekseev S. The choice substantiation method of road construction equipment for mining enterprises // Journal of Physics: Conference Series. 2019, vol. 1399, no. 3, article 033021. DOI: 10.1088/1742-6596/1399/3/033021. **IAE**

REFERENCES

1. Kuzin E. G., Pudov E. Yu., Dubinkin D. M. Analysis of failures of mining dump truck units under operating conditions. *Mining Equipment and Electromechanics*. 2021, no. 2, pp. 55–61. [In Russ]. DOI: 10.26730/1816-4528-2021-2-55-61.
2. Borisov S. V., Koltunova E. A., Kladiev S. N. Improving the structure of the simulation model of the traction asynchronous electric drive of a mine electric locomotive. *Journal of Mining Institute*. 2021, vol. 247, pp. 1–8. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2021.1.12.
3. Seliverstov Ya. A., Gergel G. Yu., Seliverstov S. A., Nikitin K. V. Development of intelligent transport systems based on mobile technologies and procedures for analyzing the social activity of the urban population. *St Petersburg State Polytechnical University Journal Computer Science Telecommunications and Control Systems*. 2018, vol. 11, pp. 47–64. [In Russ]. DOI: 10.18721/JCSTCS.11105.
4. Buzmakov S. A., Sannikov P. Yu., Kuchin L. S., Igosheva E. A., Abdulmanova I. F. Application of unmanned aerial photography for diagnosing technogenic transformation of the natural environment during the exploitation of an oil field. *Journal of Mining Institute*. 2023, vol. 260, pp. 180–193. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2023.22.
5. Marusin A., Tian H., Safullin R., Safullin R., Marusina I. Integral evaluation of the effectiveness of the implementation of automated technical means of controlling the movement of vehicles on the road. *Proceedings of the 2022 International Conference on Engineering Management of Communication and Technology (EMCTECH)*, Vienna, Austria, 2022, pp. 1–4. DOI: 10.1109/EMCTECH55220.2022.9934048.
6. Pronikov A. S. *Parametricheskaya nadezhnost' mashin* [Parametric reliability of machines], Moscow, Izd-vo MGTU imeni Bauman, 2002, 560 p.
7. Chetyrkin E. M. *Statisticheskie metody prognozirovaniya* [Statistical methods of forecasting], Moscow, Statistika, 1975, 200 p.
8. Safullin R. N., Safullin R. R., Ungefuk A. A., Sorokin K. V., Tian Haotian *Patent RU 2792386*, 24.01.2023.
9. Birger I. A. *Tekhnicheskaya diagnostika* [Technical diagnostics], Moscow, Mashinostroenie, 1978, 240 p.
10. Pashkovskiy G. S. *Zadachi optimal'nogo obnaruzheniya i poiska otkazov v REA* [Problems of optimal detection and search of failures in electronic equipment], Moscow, Radio i svyaz', 1981, 280 p.
11. Marinin M. A., Rakhmanov R. A., Dolzhikov V. V., Sushkova V. I. Study of the effect of blasted rock mass parameters on the performance of excavator-automobile complex. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023, no. 9-1, pp. 35–48. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_91_0_35.
12. Nazarychev A. N., Dyachenok G. V., Sychev Yu. A. Study of the reliability of the traction electric drive of mining dump trucks based on the analysis of failures of its functional units. *Journal of Mining Institute*. 2023, vol. 261, pp. 363–373. [In Russ]. EDN HCLPJB.

13. Fedotov V. N., Chudakova N. V., Ismailov R. Automation of the technological process of spare parts at the car service company. *E3S Web of Conferences*. 2023, vol. 402, article 10009. DOI: 10.1051/e3sconf/202340210009.
14. Atroshchenko V. A., Avksentiev S. Y., Makharatkin P. N., Trufanova I. S. Experimental hydro-transportation unit for testing material resistance of pipelines and parts of dredging pumps to hydro-abrasive wear. *Obogashchenie rud*. 2021, no. 3, pp. 39–45. [In Russ]. DOI: 10.17580/or.2021.03.07.
15. Korshak A. A., Pshenin V. V. Determination of parameters of non-pump ejector gasoline vapor recovery unit. *Science and Technologies: Oil and Oil Products Pipeline Transportation*. 2023, vol. 13, no. 1, pp. 25–31. DOI: 10.28999/2541-9595-2023-13-1-25-31.
16. Katsuba Yu. N. Increasing the level of integration of unmanned technologies into the operation of agricultural machinery. *Izvestiya Mezhdunarodnoy akademii agrarnogo obrazovaniya*. 2023, no. 67, pp. 60–65. [In Russ]. EDN MTZELG.
17. Grigorescu S., Trasnea B., Cocias T., Macesanu G. Survey of deep learning techniques for autonomous driving. *Journal of Field Robotics*. 2022, vol. 37, no. 3, pp. 362–386. DOI: 10.1002/rob.21918.
18. Katsuba Y. N., Grigoreva L. V. Application of artificial neural networks in the system of self-diagnosis car. *International Journal of Applied Engineering Research*. 2017, vol. 12, pp. 246–248. <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?origin=resultslist&authorId=57194605681&zone=>
19. Babyr N. V. Topical themes and new trends in mining industry: Scientometric analysis and research visualization. *International Journal of Engineering*. 2024, vol. 37, no. 2, pp. 439–451. DOI: 10.5829/ije.2024.37.02b.18.
20. Brummelen V., O'Brien M., Gruyer D., Najjaran H. Autonomous vehicle perception: The technology of today and tomorrow. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2018, vol. 89, pp. 384–406. DOI: 10.1016/j.trc.2018.02.012.
21. Lomazov V., Lomazov A., Petrosov D., Akupiyani O. Intelligent evaluation of implementation road infrastructure development program. *Transportation Research Procedia*. 2022, vol. 63, pp. 1089–1094. DOI: 10.1016/j.trpro.2022.06.111.
22. Yang C., Zha M., Wang W., Liu K., Xiang C. Efficient energy management strategy for hybrid electric vehicles/plug-in hybrid electric vehicles: Review and recent advances under intelligent transportation system. *IET Intelligent Transport Systems*. 2020, vol. 14, no. 7, pp. 702–711. DOI: 10.1049/iet-its.2019.0606.
23. Ladanov V. I. Application of on-board information and control systems on military vehicles. *Almanac of the Perm Military Institute of National Guard Troops*. 2022, no. 2(6), pp. 85–91. [In Russ]. EDN MYTYWT.
24. Ge J., Avedisov S. S., He C., Qin W. B., Sadeghpour M., Orosz G. Experimental validation of connected automated vehicle design among human-driven vehicles. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2018, vol. 91, pp. 335–352. DOI: 10.1016/j.trc.2018.04.005.
25. Zhang L., Orosz G. Beyond-line-of-sight identification by using vehicle-to-vehicle communication. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2018, vol. 19, no. 6, pp. 1962–1972. DOI: 10.1109/TITS.2017.2747582.
26. Katsuba Y. N., Grigoreva L. V. Application of artificial neural networks in vehicles' design self-diagnostic system for safety reasons. *Transportation Research Procedia*. 2017, vol. 20, pp. 283–287. <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57193744586&origin=resultslist&zone=contextBox>.
27. Cao H., Gangakhedkar S., Ali A., Gharba M., Eichinger J. A 5G V2X testbed for cooperative automated driving. *IEEE Vehicular Networking Conference, USA*. 2016, pp. 1–4. DOI: 10.1109/VNC.2016.7835939.
28. Aramrattana M., Larsson T., Jansson J., Nabo A. A simulation framework for cooperative intelligent transport systems testing and evaluation. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behavior*. 2019, vol. 61, pp. 268–280. DOI: 10.1016/j.trf.2017.08.004.
29. Degtyarev Yu. Classification of categorical structures of structural complexities based on prototypes in simple complexes. *Proceedings of the 10th International conference on the application of fuzzy systems and soft computing*. 2012, pp. 27–37.
30. Kondratiev A. A. Barriers to ITS implementation processes. *Sbornik trudov Mezhdunarodnoy akademii transporta* [Collection of proceedings of the International Academy of Transport], 2014, no. 17, pp. 89–95. [In Russ].

31. Kisulenko B. V. The concept of standardizing the safety of cars with a high level of automation. *Avtomobil'naya promyshlennost'*. 2019, no. 4, pp. 1–5. [In Russ]. EDN YUUICC.
32. Afanasyev A. S., Krainov A. N., Mikhalev Yu. V. Improving the methodology for diagnosing trucks using TEXA system scanners. *Izvestiya Mezhdunarodnoy akademii agrarnogo obrazovaniya*. 2023, no. 67, pp. 71–79. [In Russ]. EDN MBBYCM.
33. Safiullin R. N., Safiullin R. R., Efremova V. A. Method of complex assessment of on-board information and control systems on mining machines. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023, no. 9-1, pp. 49–63. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236/1493/2023/91049.
34. Simonova L. A., Kapitonov A. A., Klochkova K. V. Construction of an intelligent superstructure for an automated diagnostic system for an internal combustion engine. *Scientific and Technical Bulletin of the Volga Region*. 2020, no. 12, pp. 110–113. [In Russ]. EDN PWDS DH.
35. Maharatkin P. N., Abdulaev E. K., Vishnyakov G. Yu., Botyan E. Yu., Pushkarev A. E. Increasing the efficiency of the functioning of quarry dump trucks based on justification of their rational speed using simulation modeling. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 6-2, pp. 237–250. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_62_0_237.
36. Afanasyev A., Egoshin A., Alekseev S. The choice substantiation method of road construction equipment for mining enterprises. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019, vol. 1399, no. 3, article 033021. DOI: 10.1088/1742-6596/1399/3/033021.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Сафиуллин Равиль Нуруллович¹ — д-р техн. наук,
профессор, e-mail: safravi@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0002-8765-6461,

Сафиуллин Руслан Равиллович¹ — канд. техн. наук,
доцент, e-mail: safiyllin@yandex.ru,
ORCID ID: 0000-0003-2315-3678,

Сорокин Кирилл Владиславович¹ — аспирант,
e-mail: kiros_00@bk.ru,
ORCID ID: 0009-0006-3781-1407,

¹ Санкт-Петербургский Горный университет императрицы Екатерины II.

Для контактов: Сафиуллин Р.Н., e-mail: safravi@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

R.N. Safiullin¹, Dr. Sci. (Eng.), Professor,
e-mail: safravi@mail.ru,

ORCID ID: 0000-0002-8765-6461,

R.R. Safiullin¹, Cand. Sci. (Eng.),

Assistant Professor,

e-mail: safiyllin@yandex.ru,

ORCID ID: 0000-0003-2315-3678,

K.V. Sorokin¹, Graduate Student,

e-mail: kiros_00@bk.ru,

ORCID ID: 0009-0006-3781-1407,

¹ Empress Catherine II Saint-Petersburg Mining University,
199106, Saint-Petersburg, Russia.

Corresponding author: R.N. Safiullin, e-mail: safravi@mail.ru.

Получена редакцией 19.12.2023; получена после рецензии 19.02.2024; принята к печати 10.06.2024.

Received by the editors 19.12.2023; received after the review 19.02.2024; accepted for printing 10.06.2024.

