

РАЗРАБОТКА ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ MINING

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)

УДК 622 – 1:[2:331.101.1]

DOI: 10.18503/1995-2732-2021-19-4-5-15



ИНСТРУМЕНТЫ ПРЕДИКТИВНОЙ АНАЛИТИКИ В МИНИМИЗАЦИИ ОТКАЗОВ ГОРНОТРАНСПОРТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Великанов В.С.^{1,2}, Мусонов О.С.¹, Панфилова О.Р.², Ильина Е.А.², Дёрина Н.В.²

¹Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

²Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). Современный этап развития мировой горнодобывающей промышленности определяется рядом ключевых факторов в достижении высоких технико-экономических показателей, а именно комплексным решением теоретических и прикладных проблем в горной сфере, в контексте реализации основных подходов Индустрии 4.0. Перспективным с точки зрения экономических показателей и относительной возможности безопасной добычи сырьевых ресурсов на ближайшую перспективу останется открытый способ извлечения полезных ископаемых. Анализ статистических данных эксплуатации горнотранспортного оборудования на горных предприятиях Российской Федерации и научно-технической литературы определил, что отсутствуют значительные изменения в сокращении количества простоев основного технологического оборудования. Уменьшение количества отказов, а соответственно, и простоев может быть достигнуто, кроме обновления и оптимизации парков технологического оборудования, реализацией на горнодобывающих предприятиях, системы, позволяющей минимизировать процент отказов горнотранспортного оборудования. **Цель исследования.** В исследовании предпринимается попытка обосновать способы использования инструментов предиктивной аналитики с целью минимизации отказов горнотранспортного оборудования. **Используемые методы.** Для установления показателей надежности карьерных экскаваторов, эксплуатируемых на горных предприятиях УрФО, использована методология теории надежности, в частности порядок расчета показателей надежности нерезервированных систем, методы предиктивной аналитики. **Новизна.** Показана возможность реализации методов и инструментов предиктивной аналитики в уменьшении отказов горнотранспортных машин. **Результат.** Разработана структура дерева отказов карьерного гусеничного экскаватора с составлением графологической схемы. **Практическая значимость.** Прогнозирование остается необходимым шагом к предупреждению отказов горнотранспортного оборудования. Внедрение на горнодобывающих предприятиях современной эффективной системы прогнозирования изменений в состоянии оборудования является ключевым инструментом для минимизации простоев горного оборудования, увеличения срока службы оборудования, снижения стоимости содержания оборудования.

Ключевые слова: добыча, предиктивная аналитика, карьерный экскаватор, оборудование, отказ, элемент.

© Великанов В.С., Мусонов О.С., Панфилова О.Р., Ильина Е.А., Дёрина Н.В., 2021

Для цитирования

Инструменты предиктивной аналитики в минимизации отказов горнотранспортного оборудования / Великанов В.С., Мусонов О.С., Панфилова О.Р., Ильина Е.А., Дёрина Н.В. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2021. Т.19. №4. С. 5–15. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-4-5-15>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

PREDICTIVE ANALYTICS TOOLS IN MINIMISING MINING EQUIPMENT FAILURES

Velikanov V.S.^{1,2}, Musonov O.S.¹, Panfilova O.R.², Ilina E.A.², Dyorina N.V.²

¹Ural Federal University, Yekaterinburg, Russia

²Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). The current stage of global mining industry development is determined by a number of key factors in achieving high technical and economic performance, namely a comprehensive solution of theoretical and applied problems in the mining sector, in the context of implementing the main approaches to Industry 4.0. In terms of economic performance and the relative feasibility of safe extraction of raw materials, the open-pit mining method will remain promising for the near future. The statistical data analysis of mining transport equipment operation at mining enterprises of the Russian Federation and scientific and technical literature has defined that there are no significant changes in idle time reduction for the basic technological equipment. A reduction in failures and, consequently, downtime can be achieved, apart from the renovation and optimisation of the equipment fleets, by implementing the system, reducing the percentage of mining transport equipment breakdowns to minimum, at mining enterprises. **Objectives.** The study seeks to justify the use of predictive analytics tools to minimise failures of mining transport equipment. **Methods Applied.** To establish reliability indexes of open-pit excavators operated at mining enterprises of the Ural Federal District, the authors used the reliability theory methodology was used, in particular, the procedure for calculating reliability indexes of non-redundant systems and methods of predictive analytics. **Originality.** The authors have shown that how predictive analytics methods and tools could be applied to decrease failures of mining transport machines. **Result.** A failure tree structure, including a graphological scheme, has been developed for a crawler excavator in open-cast mining. **Practical Relevance.** Forecasting remains a necessary step for prevention of mining transport equipment failures. Introduction of a modern efficient system to forecast the changes in the equipment state is a key tool used to minimize idle time of mining equipment, increase equipment service life, and reduce the equipment maintenance cost at mining enterprises.

Keywords: mining, predictive analytics, open-pit excavator, equipment, failure, element.

For citation

Velikanov V.S., Musonov O.S., Panfilova O.R., Ilina E.A., Dyorina N.V. Predictive Analytics Tools in Minimising Mining Equipment Failures. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2021, vol. 19, no. 4, pp. 5–15. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-4-5-15>

Введение

В процессе добычи полезных ископаемых важное значение имеют мониторинг горного оборудования (машин) и анализ интенсивности отказов оборудования и машин, задействованных в технологической цепи добычи. Карьерный экскаватор – основное технологическое оборудование, реализующее функции выемки и погрузки горной массы в зависимости от физико-механических свойств горных пород. На современном этапе развития открытых горных работ наибольшее распространение в основном получили карьерные гусеничные экскаваторы (ЭКГ) и экскаваторы гидравлические (ЭГ). В научно-технической литературе [1–5] достаточно подробно представлены и описаны конструктивные схемы и область применения того или иного типа машины. Современный экскаватор – доста-

точно сложная и технологичная машина, и в зависимости от типоразмера его стоимость значительно изменяется. Точные данные по конечной стоимости отечественных образцов экскаваторов в рекламной продукции заводов-изготовителей практически отсутствуют. По оценкам экспертов, она может колебаться в достаточно широком диапазоне – от 250 до 800–900 млн руб. Очевидно, что простои такой дорогой машины накладывают значительную экономическую нагрузку на горное предприятие и в конечном итоге оказывают влияние на себестоимость готовой продукции.

По результатам анализа статистических данных работы горного оборудования на карьерах и разрезах Российской Федерации (РФ) и научно-технической литературы определено, что отсутствуют значительные изменения в сокращении числа простоев основного технологического

оборудования, уровень использования экскаваторов на горных предприятиях УрФО составляет 70% календарного времени [6]. Уменьшение количества простоев может быть достигнуто, кроме обновления и оптимизации парков экскаваторов, путем создания и внедрения на горнодобывающих предприятиях РФ, системы, позволяющей минимизировать процент отказов горно-транспортного оборудования на основе предиктивной аналитики.

Предиктивная аналитика – это инструмент для анализа статистически значимых и объективных данных, который помогает строить точные прогнозы для принятия решений. Как отмечается в ряде аналитических отчетов, предиктивная аналитика для получения прогноза использует данные о характеристиках оборудования, его использовании, внешних воздействиях, состоянии среды функционирования [7, 8]. Так, в отчете компании McKinsey отмечается, что на производстве использование инструментов предиктивной аналитики уменьшает простой технологических машин до 50% и увеличивает срок эксплуатации на 40%. Вместе с тем в экспертном заключении Zion Market Research указывается, что рынок предиктивной аналитики к 2022 году достигнет 10,9 млрд долл. при темпе роста в год 21% (GAGR) [8, 9].

Определение показателей надежности является сложной математической и логико-концептуальной задачей. Вопросами оценки надежности и качества горных машин посвящены работы Г.И. Солода, В.Н. Гетопанова, В.М. Рачека, Я.М. Радкевича, М.С. Островского, Б.И. Лактионова, С.П. Карасева, Э.Г. Щербины, А.Г. Фролова и других ученых [10–17].

Развитию системных взглядов по вопросам отказов горного оборудования посвящены зарубежные исследовательские работы следующих авторов: Morin C.R., Packer K.F., Slater J.E., Harish Kumar N.S., Choudhary R.P., Murthy Ch.S.N. и других [18–26].

В теории надежности решению задач по прогнозированию отказов оборудования уделяется особое внимание, особенно на этапе эксплуатации в конкретных условиях применения. Вопросы оценки и прогнозирования остаточного ресурса имеют важное значение при организации технического обслуживания и ремонта. С середины XX века техническое обслуживание в горнодобывающей промышленности было построено по системе планово-предупредительных ремонтов (ППР), которая была разработана на ос-

нове обобщения среднестатистических данных по всей горнодобывающей промышленности для идентичного горного оборудования. Для плановой экономики данный подход был оправдан и достаточно прогрессивен, так как позволял для достаточно большого количества однотипных горных машин (буровые станки типа СБШ, или карьерные экскаваторы ЭКГ-5, ЭКГ-8, ЭКГ-10 и др.) регламентировать объем и сроки ремонтных работ, а также иметь необходимый резерв запасных частей и узлов. При этом не учитывается различная наработка, горно-геологические условия эксплуатации, знакопеременные нагрузки и, как следствие, различный уровень износа конкретной единицы горного оборудования, что в конечном итоге приводит к завышенному расходу материальных ресурсов. Поэтому дальнейшие исследования в области минимизации отказов горнотранспортного оборудования являются актуальными, так как на их основании можно принять правильное решение о необходимости вывода его в ремонт либо о продлении эксплуатации на определенный период.

Полученные результаты и их обсуждение

В контексте рассматриваемой проблематики публикации, прежде всего, необходимо пояснить понятие «система». Понятие «система» трактуется учеными по-разному. На наш взгляд, наиболее полное и содержательное определение – это определение «сложной системы» – системы, состоящей из множества взаимосвязанных и взаимодействующих компонентов (подсистем), представляющих собой устойчивое единство и целостность, и вследствие чего она приобретает новые свойства и закономерности, которые отсутствуют на подсистемном уровне и не могут быть сведены к свойствам подсистемного уровня. Что касается системы с элементами предиктивной аналитики, то она характеризуется как совокупность избирательно-вовлеченных компонентов, которые взаимодействуют между собой с целью эффективной эксплуатации экскаватора при достижении минимального уровня отказов. На сегодняшний день методология по созданию данной системы описана разрозненно и ориентирована на решение узконаправленных и локальных задач. Слабо разработаны критерии и методики, позволяющие оценивать эффективность эксплуатации карьерных экскаваторов и учитывать особенности функционирования в конкретных условиях эксплуатации в процессе экскавации горной массы. Эффективность рабо-

ты экскаватора с минимальным количеством отказов достигается, прежде всего, за счет реализации комплекса целенаправленных воздействий. Данные воздействия обеспечивают заданную эксплуатационную производительность и выступают одним из определяющих факторов, определяющих качество и эффективность управления экскаватором согласно конкретным горно-геологическим условиям карьера [6, 10].

Современное исполнение карьерного гусеничного экскаватора включает в себя: рабочее оборудование, рабочие механизмы, ходовое оборудование, поворотную платформу и силовое оборудование. Рабочее оборудование расположено в передней части поворотной платформы экскаватора, с помощью которого он осуществляет процесс экскавации горной массы, поднимает ее, зачерпывает и перегружает. Элементами рабочего оборудования экскаватора карьерного гусеничного являются ковш, рукоять, стрела с головными блоками и пятой, балансир, подвеска ковша, стреловой полиспафт, подъемный канат (рис. 1).

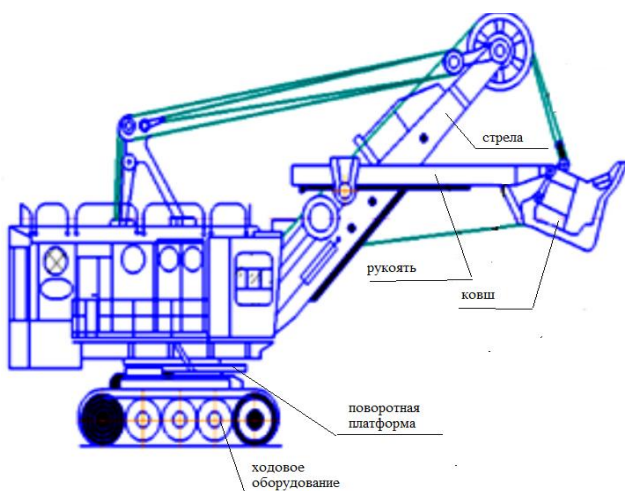


Рис. 1. Карьерный гусеничный экскаватор
Fig. 1. Open-pit crawler excavator

В процессе эксплуатации карьерных экскаваторов отказы возникают по причине множества условий и факторов: недостатки конструкции систем и агрегатов приводят к отказам в их работе; нарушения норм эксплуатации, например превышение проектных нагрузок; ошибки в работе машинистов и обслуживающего персонала; внешние условия и факторы и пр. В табл. 1 представлены основные дефекты металлоконструкций экскаваторов, влияющие на возможность возникновения отказов.

Таблица 1. Возможные дефекты металлоконструкций карьерных экскаваторов
Table 1. Possible defects in steel structures of open-pit excavators

Агрегат	Дефект
Подъемный механизм	Износ тормозных шкивов лебедки. Повышенный износ ручьев, заострение гребней барабанов лебедки
Напорный механизм	Повышенный износ ручьев, заострение гребней барабанов лебедки
Поворотная платформа	Трещины: - по сварным швам нижнего листа платформы и постели верхнего рельса; - по сварным швам постели подъемной лебедки; - нижнего листа площадки крепления редукторов поворота; - основного металла вертикальных стенок (наружных и внутренних), выходящие на края окон осмотра; - по основному металлу и ремонтным сварным швам нижнего листа платформы, в районе ступиц поворотных шестерен; - деформации силовых элементов рабочих площадок
Ходовой механизм	Износ кулаков ведущих колес. Дефекты опорных колес. Трещины на корпусе ходовой тележки. Трещина гусеничных рам в районе натяжных окон
Стрела	Трещины: - по основному металлу проушин крепления нижней секции на платформе; - по основному металлу и сварным швам поперечины нижней секции
Подвеска ковша	Трещины: - на корпусе уравнительного блока; - на коромысле; - на спицах шкива уравнительного блока

На рис. 2 представлен анализ отказов карьерных экскаваторов по основным механизмам на горнодобывающих предприятиях УрФО. Электромеханическое оборудование карьерного экскаватора при определении категории отказа рассматривается как единая система, состоящая из двух основных компонентов: механической и электрической.

Для установления показателей надежности карьерных экскаваторов, эксплуатируемых на горных предприятиях УрФО, воспользуемся методологией теории надежности, в частности, порядком расчета показателей надежности нерезервированных систем. Система считается нерезервированной, если отказ ее отдельного эле-

мента приводит к отказу всей системы. В этом случае остальные элементы системы прекращают свое функционирование [27–30].

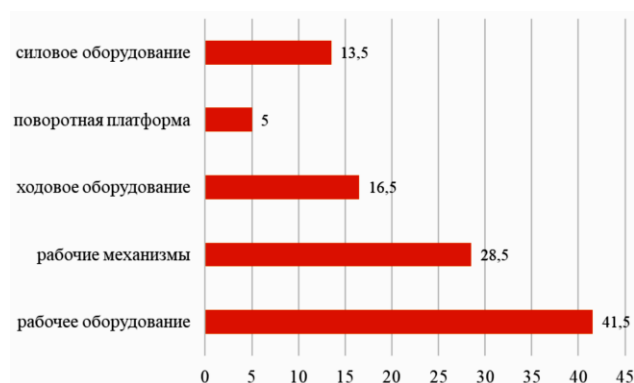


Рис. 2. Распределение отказов карьерных экскаваторов по основным механизмам
Fig. 2. Distribution of open-pit excavator failures by main machinery

В табл. 2 представлены виды законов распределения и их параметры [6].

Таблица 2. Законы распределения времени до отказа элементов и их параметры

Table 2. Time-to-failure distribution and its parameters

Элементы системы	Время наблюдения	Количество случайных величин в ряде	Интенсивность отказов $\lambda \cdot 10^{-3}$, 1/ч	Средняя наработка на отказ t_0 , ч	Закон распределения
Механическая	17520	627	30,3	32,9	Экспоненциальный
Электрическая	17520	640	78,1	12,8	Экспоненциальный

Важно определить стартовые моменты распределений – математическое ожидание и среднее квадратическое отклонение для каждого элемента и установить показатели надёжности:

- вероятность безотказной работы всех элементов и системы;
- вероятность отказа всех элементов и системы;
- плотность распределения времени безотказной работы всех элементов и системы;
- среднее время безотказной работы системы [11].

Поскольку решение многих задач теории надёжности связано с большим объемом однотипных вычислений, в ряде случаев целесообразно пользоваться системой Microsoft Excel. Использование данной системы позволяет существенно сократить время решения задачи и исключает технические ошибки в процессе вычислений.

С целью расчёта показателей, зависящих от времени (вероятности безотказной работы, плотности распределения времени безотказной работы и интенсивности отказов), необходимо создать таблицы, в левой колонке расположить ряд значений времени t , для каждого из которых эти показатели будут вычислены. Шаг выбирается с 10-ю отличными от нуля значениями показателей надёжности. Система Microsoft Excel содержит статистические функции, интегрирующиеся в ячейки таблицы при помощи мастера функций. Это характерно для большинства законов распределения времени безотказной работы (табл. 3–6).

Таблица 3. Начальные моменты распределения времени безотказной работы

Table 3. Initial points in the uptime distribution

Параметр	Элементы системы	
	Механическая	Электрическая
	Exp $(30,3 \cdot 10^{-3})$	Exp $(78,1 \cdot 10^{-3})$
m	33	13
σ	33	13

Таблица 4. Вероятности безотказной работы элементов и системы

Table 4. Non-failure probabilities of elements and systems

Время t , ч	Элементы системы		Система
	Механическая	Электрическая	
	Exp $(30,3 \cdot 10^{-3})$	Exp $(78,1 \cdot 10^{-3})$	
0	1,0000	1,0000	1,0000
100	0,9702	0,9249	0,8973
200	0,9412	0,8554	0,8051
300	0,9131	0,7911	0,7224
400	0,8859	0,7317	0,6482
500	0,8594	0,6767	0,5816
600	0,8338	0,6259	0,5218
700	0,8089	0,5789	0,4682
800	0,7847	0,5354	0,4201
900	0,7613	0,4951	0,3770
1000	0,7386	0,4579	0,3382

На основании данных, содержащихся в табл. 4–6, построены графики, отражающие изменение показателей надёжности элементов и системы во времени. Рис. 3–5 демонстрируют примеры таких графиков. На графиках по оси абсцисс откладывается время t в часах, а по оси ординат соответственно вероятность безотказ-

ной работы, вероятность отказа, плотность распределения времени безотказной работы.

Таблица 5. Вероятности отказа элементов и системы
Table 5. Failure probabilities of elements and the system

Время $t, \text{ч}$	Элементы системы		Система
	Механическая	Электрическая	
	$\text{Exp}(30,3 \cdot 10^{-3})$	$\text{Exp}(78,1 \cdot 10^{-3})$	
0	0,0000	0,0000	0,0000
100	0,0298	0,0751	0,1027
200	0,0588	0,1446	0,1949
300	0,0869	0,2089	0,2776
400	0,1141	0,2683	0,3518
500	0,1406	0,3233	0,4184
600	0,1662	0,3741	0,4782
700	0,1911	0,4211	0,5318
800	0,2153	0,4646	0,5799
900	0,2387	0,5049	0,6230
1000	0,2614	0,5421	0,6618

Таблица 6. Плотность распределения времени безотказной работы элементов и системы
Table 6. Density distribution of component and system uptime

Время $t, \text{ч}$	Элементы системы		Система
	Механическая	Электрическая	
	$\text{Exp}(30,3 \cdot 10^{-3})$	$\text{Exp}(78,1 \cdot 10^{-3})$	
0	3,03E-04	7,81E-04	1,08E-03
100	2,94E-04	7,22E-04	9,73E-04
200	2,85E-04	6,68E-04	8,73E-04
300	2,77E-04	6,18E-04	7,83E-04
400	2,68E-04	5,71E-04	7,03E-04
500	2,60E-04	5,29E-04	6,30E-04
600	2,53E-04	4,89E-04	5,66E-04
700	2,45E-04	4,52E-04	5,08E-04
800	2,38E-04	4,18E-04	4,55E-04
900	2,31E-04	3,87E-04	4,09E-04
1000	2,24E-04	3,58E-04	3,67E-04

В первой части статьи было показано, что перспективным направлением в прогнозировании отказов электромеханического оборудования карьерного экскаватора являются методы на основе предиктивной аналитики.

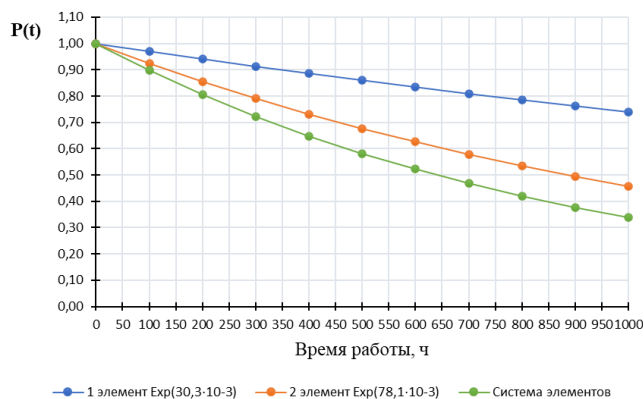


Рис. 3. Зависимость вероятности безотказной работы элементов и системы от времени
Fig. 3. Dependence of component and system non-failure probability on time

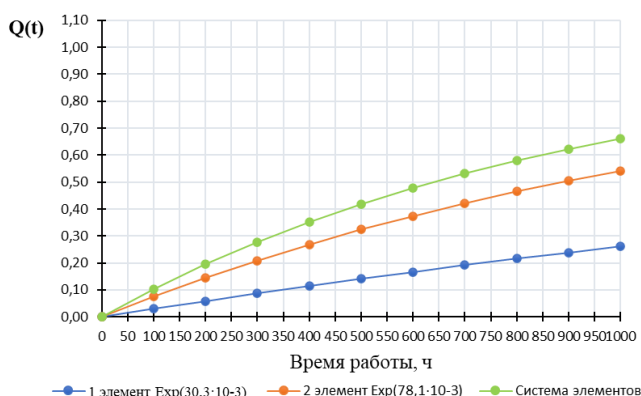


Рис. 4. Зависимость вероятности отказа элементов и системы от времени
Fig. 4. Dependence of component and system failure probability on time

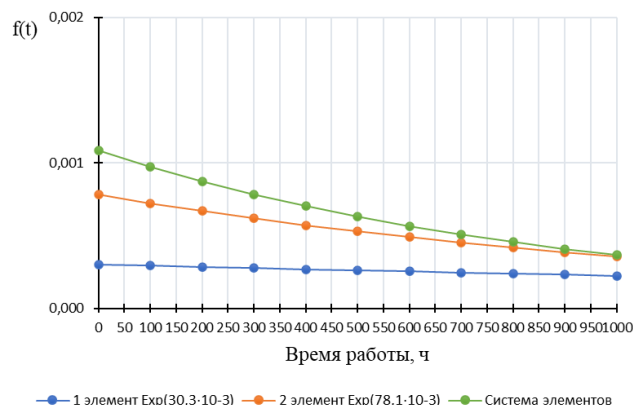


Рис. 5. Зависимость плотности распределения времени до отказа элементов и системы от времени
Fig. 5. The distribution density dependence of the time to failure of elements and the system on time

Одним из подходов в реализации методов предиктивной аналитики является анализ дерева отказов. Дерево отказов (аварий, происшествий, последствий, нежелательных событий)

представляет собой многоуровневую графологическую структуру причинных взаимосвязей, полученных в результате прослеживания опасных ситуаций в обратном порядке для того, чтобы отыскать возможные причины их возникновения [6].

К основным достоинствам метода можно отнести следующие факторы: в явном виде демонстрируются ненадежные места рассматриваемой системы; осуществляется качественный или количественный анализ надежности системы; определяется возможность для специалистов сосредотачиваться на конкретных отказах системы поочередно; дается подробный анализ поведения системы и взаимодействия ее элементов в процесс эксплуатации.

К ограничениям дерева отказов относятся: значительные временные затраты; схема дерева отказов строится на основе традиционной (булевой) логики, демонстрирующей только два состояния: рабочее и нерабочее; не учитывается частичный отказ элементов; от специалистов по надежности требуется глубокое понимание системы и конкретный анализ только одного опре-

деленного отказа в каждом конкретном случае; дерево отказов описывает систему в установившемся режиме.

Разработка структуры дерева отказов карьерного экскаватора характеризуется составлением графологической схемы, включающей два типа элементов – событие и логический символ. Верхний уровень дерева отказов описывает анализируемый отказ экскаватора, нижний указывает на возможные причины возникновения отказа. Далее события описываются на более низком уровне путем отдельного анализа каждой возможной причины. События связываются логическими символами «и» или «или». Символ «и» применяется в том случае, когда выходное событие происходит в результате всех входящих событий. Символ «или» применяется в случае, если осуществление выходного события происходит минимум одно из входных. В результате построения дерева отказов экскаватора выявлены основные комбинации отказов электрической и механической подсистем экскаватора, ошибки персонала и внешних воздействий, приводящие к основному событию (рис. 6).

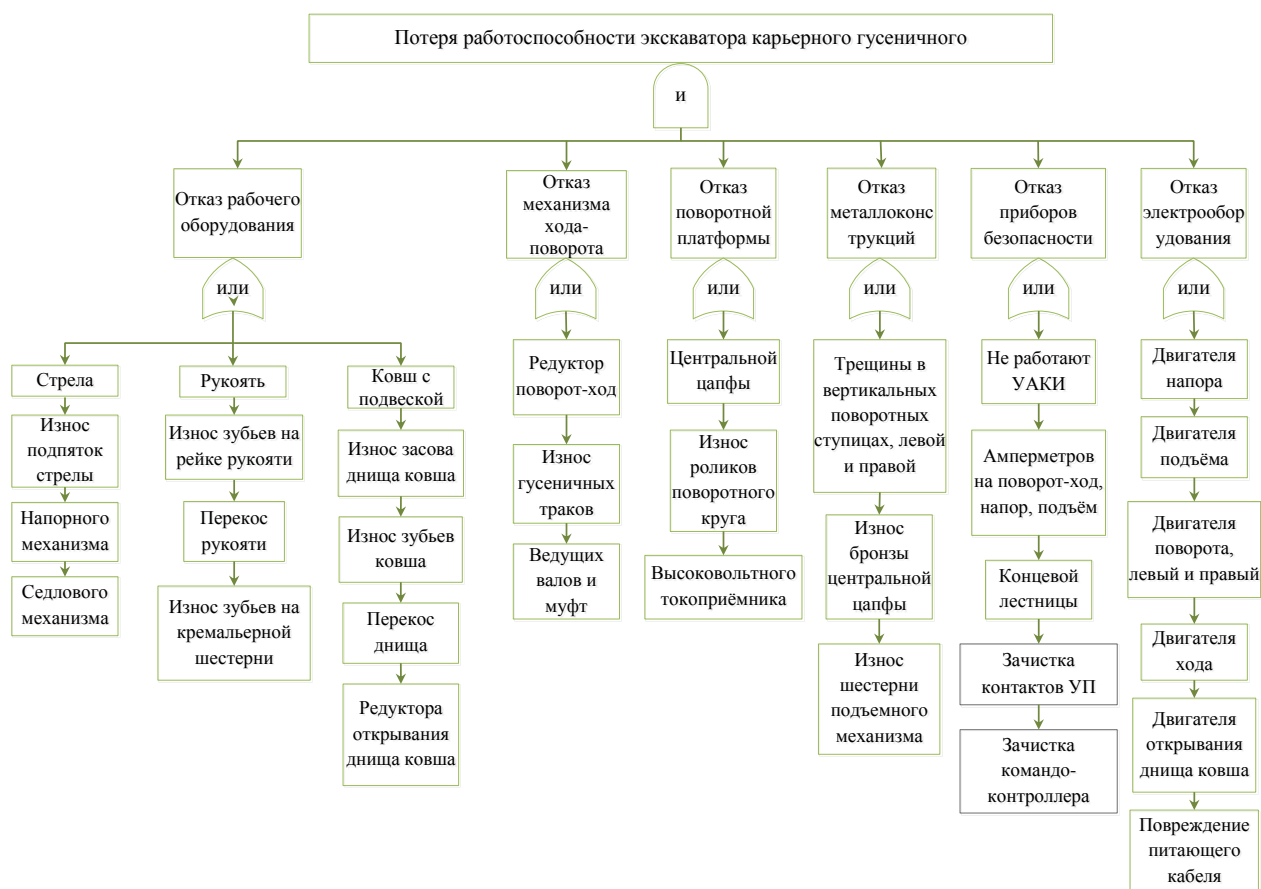


Рис. 6. Дерево отказов карьерного экскаватора
Fig. 6. Open-pit excavator failure tree

На основе анализа дерева отказов установлены основные определяющие факторы, которые в наибольшей степени влияют на простои горного оборудования, а именно:

- человеческий фактор (ошибки в эксплуатации, ремонте, сервисе);
- вызвано оборудованием (конструкторские, производственные ошибки);
- другие, не вытекающие из вышеупомянутых критериев, например особо тяжелые условия труда.

Направления дальнейших исследований

В развитии дальнейших исследований для решения задачи прогнозирования отказов и получения конкретных прогнозных данных по отказам электромеханического оборудования карьерного экскаватора необходима разработка универсального подхода, позволяющего оперативно обрабатывать большие объемы статистических данных по отказам оборудования, полученных в ходе исследований на горных предприятиях и находящихся в открытом доступе и пригодных для представления их в виде временных рядов. Необходима реализация математического аппарата, который позволил бы формализовать характер данных. Решение данной задачи имеет исключительную важность, так как большинство данных по отказам электромеханического оборудования карьерного экскаватора имеют разный формат представления, и для получения временного ряда, описывающего динамику наблюдаемого процесса с течением времени, необходим их анализ.

Заключение

Таким образом, прогнозирование остается необходимым шагом к предупреждению отказов горнотранспортного оборудования. Реализация и внедрение на горнодобывающих предприятиях РФ современной эффективной системы прогнозирования изменений в состоянии оборудования является ключевым инструментом для минимизации простоев горного оборудования, увеличения срока службы оборудования, снижения стоимости содержания оборудования, позволяющей на основе фактических данных о работе горнотранспортного оборудования к текущему моменту времени сделать прогноз о возможности дальнейшей эксплуатации.

Список литературы

1. Подэрни Р.Ю., Булес П. Сравнительный анализ гидравлических и механических экскаваторов с прямой лопатой // Горный журнал. 2015. №1. С. 55–61.
2. Подэрни Р.Ю., Булес П. Эффективность применения мощных гидравлических экскаваторов – результат повышения их надежности // Горная промышленность. 2015. №1. С. 46–51.
3. Побегайло П. А. Мощные одноковшовые гидравлические экскаваторы. Выбор основных геометрических параметров рабочего оборудования на ранних стадиях проектирования. М.: Ленанд, 2014. 296 с.
4. Булес П. Эффективность эксплуатации карьерных экскаваторов с электромеханическим и гидравлическим приводом основных механизмов // Горная промышленность. 2014. № 6 (118). С. 36–37.
5. Мельников Н.Н., Неволлин Д.Г., Скобелев Л.С. Технология применения и параметры гидравлических экскаваторов: монография. Апатиты: Кольский научный центр РАН, 1992. 216 с.
6. Великанов В.С. Научные основы системы снижения рисков отказов при управлении карьерным экскаватором: дис. ... д-ра техн. наук / Уральский государственный горный университет. Екатеринбург, 2020.
7. Дьяконов Н.А., Логунова О.С. Системы управления технологическим процессом на основе предиктивной аналитики: проектирование // Электротехнические системы и комплексы. 2021. № 1 (50). С. 58–64.
8. Шаханов Н.И., Ершов Е.В., Юдина О.В. Модель, метод и алгоритмы прогнозирования отказов роликов отводящего рольганга уборочной группы прокатного производства // Известия Юго-Западного государственного университета. Сер. Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2018. Т. 8. № 3 (28). С. 50–59.
9. <https://crn.ru>
10. Великанов В.С., Бочинская А.Н. Формирование системы минимизации рисков отказов карьерных экскаваторов при управлении // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: тезисы докладов 77-й международной научно-технической конференции. Магнитогорск, 2019. С. 36.
11. Зорин В.А. Надежность механических систем: учебник. М.: НИЦ ИНФРА-М, 2015. 380 с.
12. Малафеев С.И., Копейкин А.И. Надежность технических систем. Примеры и задачи: учебное пособие. СПб.: Лань, 2012. 313 с. : ил., граф., схемы, табл. (Учебники для вузов: Специальная литература). ISBN 978-5-8114-1268-6.
13. Надежность механических систем горных и транспортных машин [Электронный ресурс]: учебное пособие / Панфилова О.Р., Усов И.Г., Кутлубаев И.М., Великанов В.С. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2020. 60 с.
14. Острейковский В.А. Теория надежности: учебник / 2-е изд., испр. М.: Высшая школа, 2008. 463 с.: ил., граф., схемы, табл.

15. Половко А.М., Гуров С.В. Основы теории надежности: учебное пособие. 2-е изд., перераб. и доп. СПб.: БХВ-Петербург, 2006. 702 с. : ил., табл.
16. Половко А.М., Гуров С.В. Основы теории надежности. Практикум: учебное пособие. СПб.: БХВ-Петербург, 2006. 557 с. : ил., табл.
17. Эксплуатационная надежность и техническое обслуживание экскаваторов ЭКГ-8 и ЭКГ-8И: учебно-методическое пособие / В.А. Голубев, А.Е. Троп, Н.М. Карасев и др. Свердловск, 1971. 119 с.
18. Morin C.R., Packer K.F., Slater J.E. Failure Analysis Associated with Mining and Heavy Mechanical Equipment. In: McCall J.L., French P.M. (eds) Metallography in Failure Analysis. Springer, Boston, MA. 1978. https://doi.org/10.1007/978-1-4613-2856-8_8.
19. Harish Kumar N.S., Choudhary R.P., Murthy Ch. S.N. Model based reliability analysis of shovel – dumper system's mechanical failures used in the surface coal mine: a case study. Safety and Reliability 39:3-4, 2020, pp. 215–229.
20. Dindarloo Saeid R., Siami-Irdemoosa E. Data mining in mining engineering: results of classification and clustering of shovels failures data. International Journal of Mining, Reclamation and Environment 31:2, 2017, pp. 105–118.
21. Dindarloo Saeid R. Support vector machine regression analysis of LHD failures. International Journal of Mining, Reclamation and Environment 30:1, 2016, pp. 64–69.
22. Nick Vayenas, Xiangxi Wu. Maintenance study of a skip hoist. International Journal of Mining, Reclamation and Environment 25:2, 2011, pp. 177–186.
23. Vayenas N., Wu X. Maintenance and reliability analysis of a fleet of load-haul-dump vehicles in an underground hard rock mine. International Journal of Mining, Reclamation and Environment 23:3, 2009, pp. 227–238.
24. Elevli S., Uzgören N., Elevli B. Correspondence analysis of repair data: a case study for electric cable shovels. Journal of Applied Statistics 35:8, 2008, pp. 901–908.
25. Yuriy G., Vayenas N. Discrete-event simulation of mine equipment systems combined with a reliability assessment model based on genetic algorithms. International Journal of Mining, Reclamation and Environment 22:1, 2008, pp. 70–83.
26. Roy S.K., Bhattacharyya M. M., Naikan V. N. A. Maintainability and reliability analysis of a fleet of shovels. Mining Technology 110:3, 2001, pp. 163–171.
27. Голубев В.А., Троп А.Е. Надежность горного оборудования и эффективность его использования. М.: Недра, 1974. 80 с.
28. Кутлубаев И.М. Использование структурных схем для анализа многодвигательных машин // Вестник машиностроения. 2004. №12. С. 8–11.
29. Расчет ресурса деталей структурно-функциональных элементов горных машин / О.Р. Панфилова, В.С. Великанов, И.Г. Усов, Е.Ю. Мацко, И.М. Кутлубаев // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2018. № 2. С. 43–51.
30. Великанов В.С., Панфилова О.Р., Усов И.Г. Анализ показателей долговечности рукояти карьерного экскаватора // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2018. Т. 16. № 4. С. 13–20.

References

1. Poderni R.Yu., Buhles P. Comparative analysis of hydraulic and mechanical front shovel excavators. *Gornyi zhurnal* [Mining Journal], 2015, no. 1, pp. 55–61. (In Russ.)
2. Poderni R.Yu., Buhles P. Efficiency of the use of powerful hydraulic excavators - the result of increasing their reliability. *Gornaya promyshlennost* [Mining Industry], 2015, no. 1, pp. 46–51. (In Russ.)
3. Pobegailo P.A. *Moshchnye odnokovshovye gidravlicheskie ekskavatory. Vybór osnovnykh geometricheskikh parametrov rabocheho oborudovaniya na rannikh stadiyakh proektirovaniya* [Powerful single-bucket hydraulic excavators. The choice of the main geometric parameters of the working equipment at the early stages of design]. Moscow: Lenand, 2014, 296 p. (In Russ.)
4. Buhles P. Efficiency of operation of open-pit excavators with electromechanical and hydraulic drives of main mechanisms. *Gornaya promyshlennost* [Mining Industry], 2014, no. 6 (118), pp. 36–37. (In Russ.)
5. Melnikov N.N., Nevolin D.G., Skobelev L.S. *Tekhnologiya primeneniya i parametry gidravlicheskh ekskavatorov: monografiya* [Application technology and parameters of hydraulic excavators: monograph]. Apatity: Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 1992, 216 p. (In Russ.)
6. Velikanov V.S. *Nauchnye osnovy sistemy snizheniya riskov otkazov pri upravlenii karernym ekskavatorom: dis. ... d-ra tekhn. nauk* [Scientific foundation of the system for reducing the risks of failures when operating a mining excavator. Doctoral thesis]. Ural State Mining University. Yekaterinburg, 2020.
7. Dyakonov N.A., Logunova O.S. Process control systems based on predictive analytics: design. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2021, no. 1 (50), pp. 58–64. (In Russ.)
8. Shakhnov N.I., Ershov E.V., Yudina O.V. Model, method and algorithms for predicting failures of the rollers of the outgoing roller table of the disposal group of the rolling division. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Ser.: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie* [Proceedings of the South-West State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering], 2018, vol. 8, no. 3 (28), pp. 50–59. (In Russ.)
9. <https://crn.ru>
10. Velikanov V.S., Bochinskaya A.N. Formation of a system for minimizing the risks of failures, when operating open-pit excavators. *Aktualnye problemy sovremennoi nauki, tekhniki i obrazovaniya: tezisy dokladov 77-i mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii*

- [Current problems of modern science, technology and education. Abstracts of the 77th International Scientific and Technical Conference]. Magnitogorsk, 2019, p. 36. (In Russ.)
11. Zorin V.A. *Nadezhnost mekhanicheskikh sistem: ucheb-nik* [Reliability of mechanical systems: Textbook]. Moscow: NITs INFRA-M, 2015, 380 p. (In Russ.)
 12. Malafeev S.I., Kopeikin A.I. *Nadezhnost tekhnicheskikh sistem. Primery i zadachi: uchebnoe posobie* [Reliability of technical systems. Examples and tasks: Textbook]. Saint Petersburg: Lan, 2012, 313 p. ISBN 978-5-8114-1268-6. (In Russ.)
 13. Panfilova O.R., Usov I.G., Kutlubaev I.M., Velikanov V.S. *Nadezhnost mekhanicheskikh sistem gornykh i transportnykh mashin: uchebnoe posobie* [Reliability of mechanical systems of mining and transport machines: Textbook]. Magnitogorsk: Publishing House of Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2020, 60 p. (In Russ.)
 14. Ostreykovsky V.A. *Teoriya nadezhnosti: ucheb-nik* [Reliability theory: Textbook]. Moscow: Higher School, 2008, 463 p. (In Russ.)
 15. Polovko A.M., Gurov S.V. *Osnovy teorii nadezhnosti: uchebnoe posobie* [Fundamentals of the theory of reliability: Textbook]. Saint Petersburg: BKhV-Peterburg, 2006, 702 p. (In Russ.)
 16. Polovko A.M., Gurov S.V. *Osnovy teorii nadezhnosti. Praktikum: uchebnoe posobie* [Fundamentals of the theory of reliability. Workshop: tutorial]. Saint Petersburg: BKhV-Peterburg, 2006, 557 p. (In Russ.)
 17. Golubev V.A., Trop A.E., Karasev N.M. et al. *Ekspluatatsionnaya nadezhnost i tekhnicheskoe obsluzhivanie ekskavatorov EKG-8 i EKG-8I: uchebno-metodicheskoe posobie* [Operational reliability and maintenance of excavators EKG-8 and EKG-8I: Study guide]. Sverdlovsk, 1971, 119 p. (In Russ.)
 18. Morin C.R., Packer K.F., Slater J.E. Failure analysis associated with mining and heavy mechanical equipment. McCall J.L., French P.M. (eds) *Metallography in Failure Analysis*. Springer, Boston, MA, 1978. https://doi.org/10.1007/978-1-4613-2856-8_8
 19. Harish Kumar N.S., Choudhary R.P., Murthy Ch. S.N. Model based reliability analysis of shovel – dumper system’s mechanical failures used in the surface coal mine: a case study. *Safety and Reliability* 39:3-4, 2020, pp. 215–229.
 20. Dindarloo Saeid R., Siامي-Irdemoosa E. Data mining in mining engineering: results of classification and clustering of shovels failures data. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment* 31:2, 2017, pp. 105–118.
 21. Dindarloo Saeid R. Support vector machine regression analysis of LHD failures. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment* 30:1, 2016, pp. 64–69.
 22. Nick Vayenas, Xiangxi Wu. Maintenance study of a skip hoist. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment* 25:2, 2011, pp. 177–186.
 23. Vayenas N., Wu X. Maintenance and reliability analysis of a fleet of load-haul-dump vehicles in an underground hard rock mine. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment* 23:3, 2009, pp. 227–238.
 24. Elevli S., Uzgören N., Elevli B. Correspondence analysis of repair data: a case study for electric cable shovels. *Journal of Applied Statistics* 35:8, 2008, pp. 901–908.
 25. Yuriy G., Vayenas N. Discrete-event simulation of mine equipment systems combined with a reliability assessment model based on genetic algorithms. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment* 22:1, 2008, pp. 70–83.
 26. Roy S. K., Bhattacharyya M. M., Naikan V. N. A. Maintainability and reliability analysis of a fleet of shovels. *Mining Technology* 110:3, 2001, pp. 163–171.
 27. Golubev V.A., Trop A.E. *Nadezhnost gornogo oborudovaniya i effektivnost ego ispolzovaniya* [Reliability of mining equipment and efficiency of its use]. Moscow: Nedra, 1974, 80 p. (In Russ.)
 28. Kutlubaev I.M. The use of structural diagrams for the analysis of multi-engine machines. *Vestnik mashinostroeniya* [Vestnik of Mechanical Engineering], 2004, no. 12, pp. 8–11. (In Russ.)
 29. Panfilova O.P., Velikanov V.S., Usov I.G., Matsko E.Yu., Kutlubaev I.M. Calculating life of parts of structural and functional elements of mining machines. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh* [Physical and Technical Issues of Mining], 2018, no. 2, pp. 43–51. (In Russ.)
 30. Velikanov V.S., Panfilova O.R., Usov I.G. Analysis of the durability indicators of the open-pit excavator dipper arm. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2018, vol. 16, no. 4, pp. 13–20. (In Russ.)

Поступила 11.10.2021; принята к публикации 15.11.2021; опубликована 24.12.2021
Submitted 11/10/2021; revised 15/11/2021; published 24/12/2021

Великанов Владимир Семенович – доктор технических наук, профессор,
Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия.
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: rzhik_00@mail.ru. ORCID 0000-0001-5581-2733

Мусонов Олег Сергеевич – магистр,
Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия.
Email: musonovoleg@inbox.ru

Панфилова Ольга Рашидовна – кандидат технических наук, доцент,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: halikova@inbox.ru. ORCID 0000-0001-558-2733

Ильина Елена Александровна – кандидат педагогических наук, доцент,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: dar_nas@mail.ru. ORCID 0000-0002-9143-4343

Дёрина Наталья Владимировна – кандидат филологических наук, доцент,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: nataljapidckaluck@yandex. ORCID 0000-0002-0613-0864

Vladimir S. Velikanov – DrSc (Eng.), Professor,
Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia.
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: rzhik_00@mail.ru. ORCID 0000-0001-5581-2733

Oleg S. Musonov – master,
Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia.
Email: musonovoleg@inbox.ru

Olga R. Panfilova – PhD (Eng.), Associate Professor,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: halikova@inbox.ru. ORCID 0000-0001-558-2733

Elena A. Ilina – PhD (Pedagogy), Associate Professor,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: dar_nas@mail.ru. ORCID 0000-0002-9143-4343

Natalya V. Dyorina – PhD (Philology), Associate Professor,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: nataljapidckaluck@yandex. ORCID 0000-0002-0613-0864