

УДК 656.13

Сафиуллин Р.Н., доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Транспортно-технологических процессов и машин», Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, СПб, Россия, safravi@mail.ru

Пеплер А.Э., аспирант, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, СПб, Россия, artem_pepler@mail.ru

Кузнецов П.С., студент, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, СПб, Россия, petrku11@gmail.com

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ БЕЗОТКАЗНОСТИ ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ КАРЬЕРНЫМИ АВТОСАМОСВАЛАМИ

Аннотация. В статье проведен системный анализ безотказности электронных систем управления карьерных автосамосвалов. Рассмотрены современные подходы к повышению надежности, включая комбинацию классических методов (анализ видов и последствий отказов, дерево неисправностей) и инновационных технологий (искусственный интеллект, IoT-мониторинг, цифровые двойники). Показано, что интеграция данных методов позволяет прогнозировать и предотвращать сбои, снижая простои техники и затраты на ремонт. Особое внимание уделено факторам, влияющим на безотказность эксплуатации. В работе также обозначены перспективные направления развития, такие как внедрение автономных систем на базе ИИ для обеспечения безопасности, экономической эффективности и устойчивости горнодобывающих предприятий.

Ключевые слова: безотказность, карьерные самосвалы, электронные системы управления, прогнозная аналитика, цифровые двойники.

Введение

Современная горнодобывающая промышленность немыслима без использования карьерных автосамосвалов - ключевых звеньев в цепочке транспортировки полезных ископаемых. Эти машины ежедневно работают в экстремальных условиях: под воздействием высоких нагрузок, перепадов температур, вибраций и запыленности, а их бесперебойная работа напрямую влияет на рентабельность предприятий. Однако возрастающая сложность электронных систем управления, отвечающих за безопасность, навигацию и диагностику автосамосвалов, делает их уязвимыми к отказам. Даже

кратковременный сбой может привести к авариям, многомиллионным убыткам из-за простоя или повреждению дорогостоящего оборудования.

Актуальность системного анализа безотказности электронных систем управления обусловлена растущими требованиями к надежности и эффективности оборудования. Традиционные методы прогнозирования отказов, такие как метод анализа видов и последствий потенциальных отказов и метод анализа дерева неисправностей, сегодня дополняются цифровыми инновациями: предиктивной аналитикой на основе ИИ, мониторингом через IoT-платформы и моделированием сценариев с помощью цифровых двойников. Эти инструменты позволяют не только минимизировать риски, но и оптимизировать затраты на обслуживание.

Цель данной статьи - обобщить современные подходы к анализу безотказности электронных систем управления карьерных автосамосвалов, оценить их эффективность в условиях реальной эксплуатации и обозначить перспективные направления развития.

Результаты и обсуждение

Системный анализ безотказности - это комплексный подход к оценке способности технической системы выполнять заданные функции в определенных условиях и течение установленного времени без возникновения критических сбоев. Его ключевая задача заключается в прогнозировании, предотвращении и минимизации отказов, а также в оптимизации процессов восстановления.

В контексте электронных систем управления особое значение приобретают международные стандарты, такие как ISO 26262 (функциональная безопасность автомобильных систем) и IEC 61508 (требования к безопасности электронных устройств). Эти документы регламентируют методы проектирования, тестирования и валидации, направленные на снижение рисков до приемлемого уровня.

Современные автосамосвалы оснащены сложными электронными системами, которые интегрируют:

- микропроцессорные контроллеры;
- сенсоры и датчики;
- интерфейсы для передачи данных;
- программное обеспечение (алгоритмы диагностики и оптимизации работы).

Особенностью таких систем является необходимость баланса между высокой производительностью и устойчивостью к внешним воздействиям.

Современные подходы к анализу безотказности электронных систем управления карьерных автосамосвалов условно разделить на классические подходы и подходы с использованием современных технологии. К первым относятся проверенные временем инженерные методики: анализ видов и последствий отказов, построение деревьев неисправностей и статистические расчеты (среднее время наработки на отказ). Эти методы направлены на систематическое выявление уязвимостей, оценку их критичности и разработку профилактических мер. Однако их эффективность часто ограничена трудоемкостью и зависимостью от экспертных знаний. В свою очередь, современные технологии позволяют вывести анализ на новый уровень. Становится возможным обработка больших данные с датчиков с использованием ИИ и машинного обучения для предсказания отказов, создание цифровых двойников с моделированием экстремальные сценарии в виртуальной среде. При этом технология IoT обеспечивает контроль параметров в режиме реального времени. Несмотря на высокую стоимость внедрения и необходимость цифровой инфраструктуры, эти инструменты обеспечивают предиктивность и адаптивность, недостижимые для классических подходов. На практике оптимальные результаты достигаются при комбинации методов: анализ видов и последствий отказов помогает устранить известные риски на этапе проектирования, а ИИ и IoT минимизируют непредвиденные сбои в процессе эксплуатации, что особенно актуально для тяжелой техники, работающей в условиях повышенных нагрузок и экстремальных сред.

Надежность электронных систем управления карьерных автосамосвалов определяется совокупностью внешних и внутренних факторов, взаимодействие которых формирует комплексный риск возникновения отказов. Анализ этих факторов является ключевым этапом системного подхода к обеспечению безотказности рис.1.

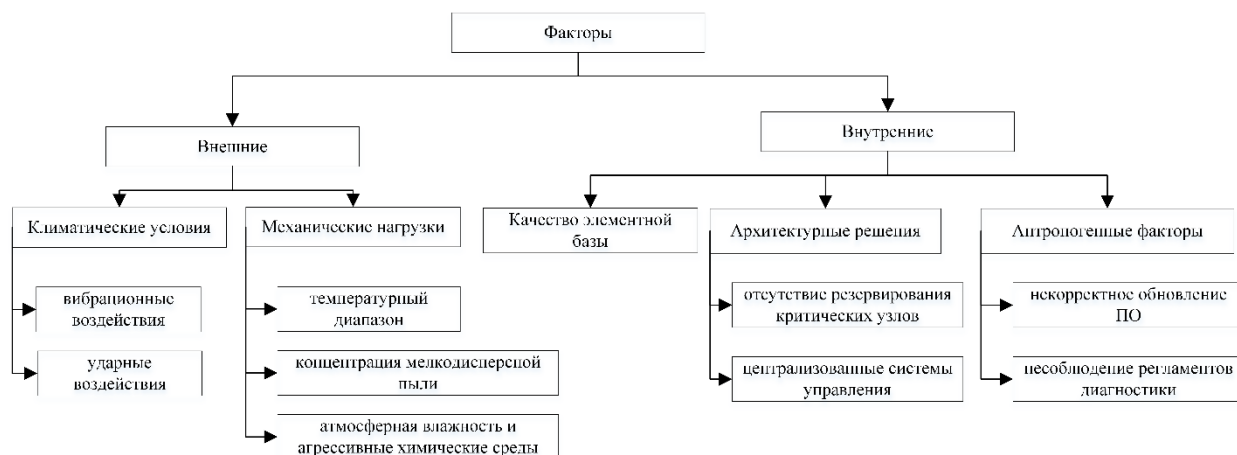


Рис. 1. Факторы, влияющие на безотказность электронных систем управления карьерными автосамосвалами

При этом наибольшую опасность представляют комбинированные воздействия. Оптимизация безотказности возможна только при учете всех категорий факторов. Современные подходы, включая предиктивную аналитику и цифровое моделирование, позволяют прогнозировать комбинированные риски, что подтверждается снижением частоты отказов на 25-40% в системах с интегрированными решениями [9].

Перспективы развития системного анализа безотказности

Эволюция методов обеспечения надежности электронных систем управления карьерных автосамосвалов тесно связана с технологическими трендами четвертой промышленной революции. Ниже рассмотрены ключевые направления, которые определяют развитие отрасли в ближайшее десятилетие.

Внедрение автономных технологий, таких как искусственный интеллект и машинное зрение, позволит минимизировать человеческий фактор - основную причину 20–30% отказов [1]. Перспективным направлением является разработка самоадаптирующихся систем, способных динамически корректировать параметры

работы в зависимости от износа компонентов (например, автоматическое снижение нагрузки при деградации подшипников).

Рост объема данных от IoT-датчиков (до 10 ТБ в сутки на один самосвал [3]) требует новых подходов к анализу. Одновременно блокчейн-технологии предлагают решения для отслеживания истории обслуживания, обеспечивая неизменяемость записей и прозрачность для всех участников цепочки (производители, сервисные центры, горнодобывающие компании).

Выводы

Надежность электронных систем карьерных самосвалов напрямую влияет на безопасность работников и экономику горнодобывающих предприятий. Чтобы снизить риск поломок, сегодня используют два подхода: классические методы и современные технологии. Практика показывает, что такие решения сокращают простои техники на 30–60% и уменьшают затраты на ремонт. Однако их успех зависит от качества деталей, условий работы и грамотного обслуживания. В будущем упор будет сделан на автономные системы, которые самостоятельно адаптируются к нагрузкам, и новые материалы, устойчивые к износу.

Список использованных источников

1. Земенкова М.Ю., Чижевская Е.Л., Земенков Ю.Д. Интеллектуальный мониторинг состояний объектов трубопроводного транспорта углеводородов с применением нейросетевых технологий // Записки Горного института. 2022. Т. 258. С. 933-944. DOI: 10.31897/PMI.2022.105
2. Simonova L.A., Dem'yanov D.N., Kapitonov A.A. Smart information system for generating design constraints in the auto industry. Russian Engineering Research. 2020;40(12):1034–1038. <https://doi.org/10.3103/S1068798X20120199>
3. Беликова Д.Д., Морозов Е.В., Хисамутдинова Э.Л. Оптимальное управление силовыми агрегатами горных машин в диапазоне эксплуатационных режимов при применении системы контроля качества моторного масла. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2021;(6):95–103. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_6_0_95

4. Курганов В.М., Грязнов М.В., Колобанов С.В. Оценка надежности функционирования экскаваторно-автомобильных комплексов в карьере. Записки Горного института. 2020;241:10–21. <https://doi.org/10.31897/pmi.2020.1.10>
5. Макарова И.В., Ганиев М.М., Баринов А.С., Габсалихова Л.М., Мавляутдинова Г.Р. Современный автотранспорт горнопромышленного комплекса: проблемы и решения. Горная промышленность. 2025;(1S):28–33. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-1S-28-33>
6. В России зарегистрировано 90 тысяч электрокаров и гибридов [Электронный ресурс] // Автостат: сайт. – URL: <https://www.autostat.ru/infographics/58435/> (дата обращения: 15.04.2025)
7. Авксентьев С.Ю., Белоусов В.И. Определение рациональных параметров для безостановочной работы гидротранспортных систем в условиях низких температур. Горная промышленность. 2025;(1S):86–91. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-1S-86-91>
8. Sadegh Kouhestani, H., Yi, X., Qi, G., Liu, X., Wang, R., Gao, Y., Yu, X., & Liu, L. (2022). Prognosis and Health Management (PHM) of Solid-State Batteries: Perspectives, Challenges, and Opportunities. *Energies*, 15(18), 6599. <https://doi.org/10.3390/en15186599>
9. Zhao, J., Zhu, Y., Zhang, B., Liu, M., Wang, J., Liu, C., & Hao, X. (2023). Review of State Estimation and Remaining Useful Life Prediction Methods for Lithium-Ion Batteries. *Sustainability*, 15(6), 5014. <https://doi.org/10.3390/su15065014>
10. Akbar, K., Zou, Y., Awais, Q., Baig, M. J. A., & Jamil, M. (2022). A Machine Learning-Based Robust State of Health (SOH) Prediction Model for Electric Vehicle Batteries. *Electronics*, 11(8), 1216. <https://doi.org/10.3390/electronics11081216>
11. Huang, S.-C., Tseng, K.-H., Liang, J.-W., Chang, C.-L., & Pecht, M. G. (2017). An Online SOC and SOH Estimation Model for Lithium-Ion Batteries. *Energies*, 10(4), 512. <https://doi.org/10.3390/en10040512>
12. X. Cui and T. Hu, "State of Health Diagnosis and Remaining Useful Life Prediction for Lithium-ion Battery Based on Data Model Fusion Method," in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 207298-207307, 2020, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3038182>

13. Ming-Feng Ge, Yiben Liu, Xingxing Jiang, Jie Liu, A review on state of health estimations and remaining useful life prognostics of lithium-ion batteries, Measurement, 174, 2021, 109057, ISSN 0263-2241, <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.109057>
14. Kocsis Szürke, S., Sütthö, G., Apagy, A., Lakatos, I., & Fischer, S. (2022). Cell Fault Identification and Localization Procedure for Lithium-Ion Battery System of Electric Vehicles Based on Real Measurement Data. Algorithms, 15(12), 467. <https://doi.org/10.3390/a15120467>
15. Natthida Sukkam, Thossaporn Onsree, Nakorn Tippayawong; Overview of machine learning applications to battery thermal management systems in electric vehicles. AIP Conf. Proc. 17 November 2022; 2681 (1): 020004. <https://doi.org/10.1063/5.0115829>

Safiullin R.N., Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Transport and Technological Processes and Machines, St. Petersburg Mining University of Empress Catherine II, St. Petersburg, Russia, safravi@mail.ru

Pepler A.E., Postgraduate Student, St. Petersburg Mining University of Empress Catherine II, St. Petersburg, Russia, artem_pepler@mail.ru

Kuznetsov P.S., Student, St. Petersburg Mining University of Empress Catherine II, St. Petersburg, Russia, petrku11@gmail.com

SYSTEM ANALYSIS OF RELIABILITY OF ELECTRONIC DUMP TRUCK MANAGEMENT SYSTEMS

Abstract. The article provides a systematic analysis of the reliability of electronic control systems for mining dump trucks. Modern approaches to reliability improvement are considered, including a combination of classical methods (analysis of types and consequences of failures, fault tree) and innovative technologies (artificial intelligence, IoT monitoring, digital twins). It is shown that the integration of these methods makes it possible to predict and prevent failures, reducing equipment downtime and repair costs. Special attention is paid to the factors affecting the reliability of operation. The paper also outlines promising areas of development, such as the introduction of autonomous AI-based systems to ensure the safety, economic efficiency and sustainability of mining enterprises.

Keywords: reliability, mining dump trucks, electronic control systems, predictive analytics, digital twins.