

МЕТОД КОМПЛЕКСНОЙ ОЦЕНКИ БОРТОВЫХ ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ НА ГОРНЫХ МАШИНАХ

Р.Н. Сафиуллин¹, Р.Р. Сафиуллин¹, В.А. Ефремова¹

¹ Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия,
e-mail: safravi@mail.ru

Аннотация: Для полноценного информационного взаимодействия транспортного средства с транспортной инфраструктурой и управлением необходимо использовать интеллектуальные транспортные системы, особенно серьезное влияние это может оказать на процесс грузоперевозки. Для повышения коэффициента технической готовности карьерных экскаваторов осуществляется внедрение интеллектуальных систем – информационно-диагностических и телекоммуникационных. На основе системного анализа функционирования транспортных средств на горнодобывающем предприятии установлена возможность сокращения времени простоев карьерных экскаваторов, затрачиваемого на техническое обслуживание и устранение неисправностей, что означает снижение экономических потерь. Определены направления повышения производительности горных машин с учетом влияния технического состояния грузовых транспортных средств. Предложен подход к повышению коэффициента технической готовности грузового транспорта за счет внедрения бортовых информационно-управляющих систем на транспорте. Представлен алгоритм сбора и обработки информации, получаемой с бортовых информационно-управляющих систем транспортных средств, с возможностью отслеживания технического состояния систем в режиме реального времени и последующим созданием модели прогнозирования ресурсов. Разработан метод комплексной оценки бортовых информационно-управляющих систем для выбора оптимального состава систем в зависимости от весомости критериев, влияющих на эффективность функционирования транспортного средства.

Ключевые слова: карьерные экскаваторы, бортовая информационно-управляющая система, метод комплексной оценки бортовых систем, грузовой транспорт, повышение эффективности использования грузового транспорта, критерии эффективности, мониторинг технического состояния, интеллектуальные транспортные системы.

Для цитирования: 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_91_0_49.

Method of complex assessment of on-board information and control systems on mining machines

R.N. Safiullin¹, R.R. Safiullin¹, V.A. Efremova¹

¹ Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia, e-mail: safravi@mail.ru

Abstract: For a full-fledged information interaction of a vehicle with transport infrastructure and management, it is necessary to use intelligent transport systems, this can have a particularly serious impact on the cargo transportation process. To increase the coefficient of technical readiness of quarry excavators, intelligent systems are being implemented – information, diagnostic and telecommunication. Based on a system analysis of the functioning of excavators at a mining enterprise, the possibility of reducing the downtime of quarry excavators spent on maintenance and troubleshooting has been established, which means reducing economic losses. The directions of increasing the productivity of mining machines are determined, taking into account the influence of the technical condition of cargo vehicles. An approach is proposed to increase the coefficient of technical readiness of cargo transport through the introduction of on-board information and control systems. An algorithm for collecting and processing information received from on-board information and control systems of vehicles with the ability to track the technical condition of systems in real time and the subsequent creation of a resource forecasting model is presented. A method of integrated assessment of on-board information and control systems has been developed to select the optimal composition of systems depending on the weight of criteria affecting the efficiency of the vehicle.

Key words: excavators, on-board information and control system, method of integrated assessment of on-board systems, cargo transport, improving the efficiency of using cargo transport, efficiency criteria, monitoring of technical condition, intelligent transport systems.

For citation: Safiullin R. N., Safiullin R. R., Efremova V. A. Nazvanie. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023;(9-1):49-63. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_91_0_49.

Введение

Карьерные экскаваторы — землеройно-транспортные горные машины, предназначенные для работы в карьерах, нарушение работоспособности которых приводит к простоям и серьезным экономическим потерям. Кроме того, горнодобывающая промышленность признана отраслью с наиболее высокими профессиональными рисками (более 30% травматических случаев на производстве по данным Управления по безопасности и охране труда MSHA в 2017 г.), и существует приоритетная задача, связанная с повышением безопасности при работе с техникой [1].

Актуальность задачи также обуславливается потребностью улучшения экологических показателей — горнодобывающая промышленность потребляет более 10% мировой энергии. Требуется

находить пути снижения энергопотребления машин и сокращения выброса парниковых газов [2].

Решить поставленные задачи можно при помощи внедрения бортовых информационно-управляющих систем (БИУС) для автоматизации работы транспортных средств. Система подразумевает использование карьерных экскаваторов нового поколения, оборудованных интеллектуальными системами управления и бортовыми информационно-управляющими системами, в том числе полностью автоматизированными комплексами [3 — 5].

Важнейшим перспективным направлением развития автоматизации на карьерных экскаваторах является разработка унифицированных средств модульной электроники для построения «интеллектуальных» интегрированных БИУС нового поколения с целью повы-

шения технического уровня и эффективности использования всего парка образцов транспортных средств нового поколения.

Данное направление одновременно предусматривает обеспечение дальнейшей расширяемости и развиваемой на основе открытой архитектуры БИУС путем применения стандартизованных технических решений, унифицированных электронных модулей, стандартных протоколов информационного обмена, серийной аппаратуры, модульной структуры программного обеспечения, новых методов обработки информации и принятия решений.

Структура БИУС включает в себя три блока обработки информации:

- блок обработки внешней информации;
- блок обработки внутренних параметров;
- блок обработки оперативной информации.

Блок обработки внешней информации принимает информацию от GSM-антенны и навигационную информацию от спутника. Блок обработки внутренней информации принимает информацию о параметрах движения, расходе топлива, состоянии узлов транспортного средства и о параметрах проведения необходимого обслуживания. Блок обработки оперативной информации принимает оперативную информацию. Затем эти три блока собирают и передают всю информацию в БИУС. БИУС управляет режимами работы блоков и, используя информацию от них, решает навигационную задачу с применением различных алгоритмов определения параметров движения с учетом реально сложившейся транспортной обстановки. Структура и состав БИУС сформированы на основании анализа задач контроля, управления и навигации. Обоснование принципиальной схемы БИУС основано на

придании системе управления движением машины свойства адаптивности, т.е. свойства автоматического учета информации, не только априорной, использованной на стадии проектирования, но и текущей.

Задание адаптивной системы управления предполагает задание нескольких уравнений. Первое из них — сенсорное уравнение:

$$q_t = S(x_0^t, u_0^t, t, y_t).$$

Эта запись означает, что каждому набору $x_0, \dots, x_t, u_0, \dots, u_{t-1}, t, y_t$ сопоставлен элемент $q_t \in Q$, называемый значением сенсора в момент времени t . Сенсорное уравнение описывает работу измерителей, датчиков.

Второе уравнение — эволюционное:

$$x_{t+1} = X(x_0^t, u_0^t, t, y_t).$$

Эволюционное уравнение описывает изменение состояния системы во времени при условии задания начального состояния x_0 , режима движения y_t и последовательности управлений

$$u_0^\infty = [u_0, u_1, \dots].$$

Однако обоснование самого состава БИУС не основывается на каком-либо научно-методическом аппарате, т.е. в вышеописанных уравнениях решается только задача адаптивного управления и не решается задача влияния электронных систем управления на эксплуатационные свойства карьерных экскаваторов.

Внедрение бортовых информационно-управляющих систем в карьерные экскаваторы существенно повышает эффективность, производительность и надежность горной техники за счет возможности непрерывного мониторинга технического состояния компонентов горной техники и управления ими в режиме реального времени.

Кроме того, внедрение интеллектуальных систем дает возможность уда-

ленного диагностирования, что, в свою очередь, обеспечивает:

- предотвращение аварийных остановок;
- минимизацию простоев;
- прогнозирование ресурса машины;
- повышение безопасности работников;
- снижение расходов на техническое обслуживание и ремонт;
- снижение парниковых выбросов и др. [6–8].

Методы. Оценка коэффициента технической готовности

Поддержание высокого коэффициента технической готовности (КТГ) минимизирует простои техники, а следо-

вательно, экономические потери, т.е. это эксплуатационный потенциал имеющейся техники. В среднем значение КТГ ($K_{тг}$) варьируется в пределах 0,8–0,88 и определяется по следующей зависимости:

$$K_{тг} = \frac{T_{кфв} - T_{ф.рем}}{K_{кфв}}, \quad (1)$$

где $K_{кфв}$ — календарный фонд времени; $T_{ф.рем}$ — фактическое время простоев экскаватора на ремонтах и в ожидании ремонтов.

Расчет КТГ и анализ его значений позволяет прогнозировать и планировать постановку техники на техническое обслуживание (ТО) и ремонт (Р). Анализ статистики неисправностей позволяет

Таблица 1

Время устранения неисправностей отдельных узлов и деталей [1] Troubleshooting time of individual components and parts [1]

Наименование узла	Среднее время устранения неисправностей, ч/мес	Доля аварийных простоев, % КФВ	Примечание
Напорные оси	27,7	3,85	оси находятся в неснижаемом запасе
Рукоять	10,4	1,45	выполнены усиления конструкции и дополнительный контроль (рентген, МПД)
Канаты (напор, возврат, подъем)	8,4	1,16	разработаны рекомендации по использованию
Натяжные колеса	4,1	0,54	изменена система смазки, усилен входной контроль за качеством поставляемой бронзы
ИТОГО	50,6	7	

Таблица 2

Сравнение средних плановых, фактических и достигнутых затрат времени на техническое обслуживание и ремонты экскаватора [1] Comparison of the average planned, actual and achieved time spent on maintenance and repairs of the excavator [1]

Вид ремонтных работ	Продолжительность ремонтов в месяц, ч			Отклонение фактических затрат времени от нормативных	
	факт	план ГОКа	норматив сервисной компании	время, ч	% КФВ
Ежемесячное ТО	61	24	24	+37	+5,1
Ежемесячное электрическое ТО	12	12	12	0	0

своевременно осуществлять закупку необходимых запасных частей. Но даже при осуществлении регулярного анализа измерений КТГ и сопоставления с основными причинами выхода из строя оборудования аварийные простои экскаваторов составляют 9%, а иногда и больше. Время устранения неисправностей узлов и деталей представлены в табл. 1 [1]. Сравнение затрат времени на ТО и Р карьерных самосвалов и экскаваторов при различных неисправностях представлено в табл. 2 [1].

Для повышения КТГ карьерных экскаваторов осуществляется внедрение интеллектуальных систем — информационных, диагностических и телекоммуникационных. Кроме того, требуется разработать систему оценивания эффек-

тивности внедрения бортовых информационно-управляющих систем в технологический процесс доставки грузов. Бортовые БИУС состоят из трех уровней: восприятие, планирование и контроль [9–13]. Уровень восприятия выполняет сканирование окружающей местности, а также мониторинга работы датчиков и электронных блоков управления в режиме реального времени. Уровень планирования выполняет функцию составления плана функционирования техники в зависимости от информации, получаемой с уровня восприятия. Третий уровень — контроль — отслеживает выполнение задач, поставленных на втором уровне, поддерживает принятие решений и проводит интеллектуальный анализ выполненных действий [14–16].



Рис. 1. Алгоритм сбора и обработки информации, получаемой с бортовых информационно-управляющих систем карьерных экскаваторов [составлено авторами]

Fig. 1. Algorithm for collecting and processing information received from on-board information and control systems of quarry excavators [compiled by the authors]

БИУС выполняет следующие функции:

- сбор, обработку, передачу и хранение входных и выходных сигналов от датчиков;
- диагностирование и прогнозирование ресурсов техники;
- управление системами транспортного средства;
- обеспечение информационного взаимодействия экскаваторно-автомобильного комплекса и сервера;
- определение количественных показателей, т.е. изменение показателей работы экскаватора, расход энергии и проч.;
- формирование отчетов по работе [17 – 19].

Существенным недостатком функционирования БИУС является отсутствие постоянной записи и хранения информации в единой информационной базе. Предлагается использовать разработанный алгоритм сбора и обработки информации, получаемой с бортовых информационно-управляющих систем грузового транспорта, решающий задачи анализа работы систем, составления базы данных эксплуатируемой техники и прогнозирования работы систем (см. рис. 1) [20 – 23].

Результаты. Методика оценки эффективности использования грузового транспорта

Для полноценного информационно-взаимодействия транспортного средства с транспортной инфраструктурой

и управлением необходимо использовать интеллектуальные транспортные системы, особенно серьезное влияние это может оказать на процесс грузоперевозки. Для корректной работы транспортной системы каждое транспортное средство должно полностью информационно взаимодействовать с элементами управления транспортной системы [24]. На данный момент взаимодействие транспортного средства и транспортной инфраструктуры не реализовано на требуемом уровне [25, 26]. Предлагается производить оценку эффективности использования транспортного средства на основе многокритериального подхода, учитывающего широкий спектр факторов. Многокритериальный подход позволит обоснованно совершать выбор бортовых информационно-управляющих систем, а следовательно, организовать систему взаимодействующих транспортных средств, подключенных к транспортной инфраструктуре. Кроме того, мониторинг состояния систем транспортного средства в режиме реального времени, автоматическое составление диаграмм рабочего процесса и возможность удаленного регулирования рабочего процесса позволит существенно сократить простои транспортного средства за счет предупреждения неисправностей транспортных средств [27].

Бортовые информационно-управляющие системы внедряются в состав

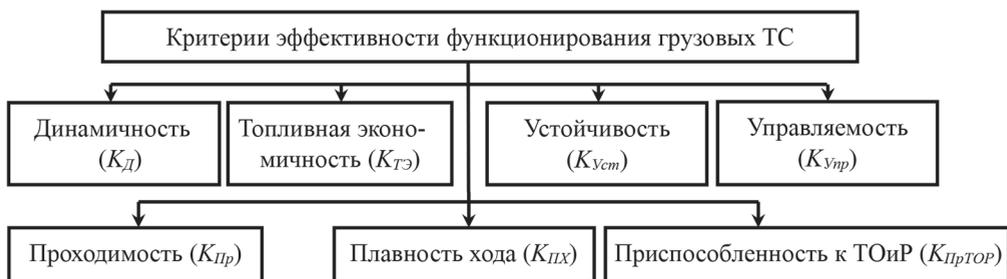


Рис. 2. Критерии эффективности функционирования грузовых транспортных средств [составлено авторами]

Fig. 2. Criteria for the effectiveness of the functioning of cargo vehicles [compiled by the authors]

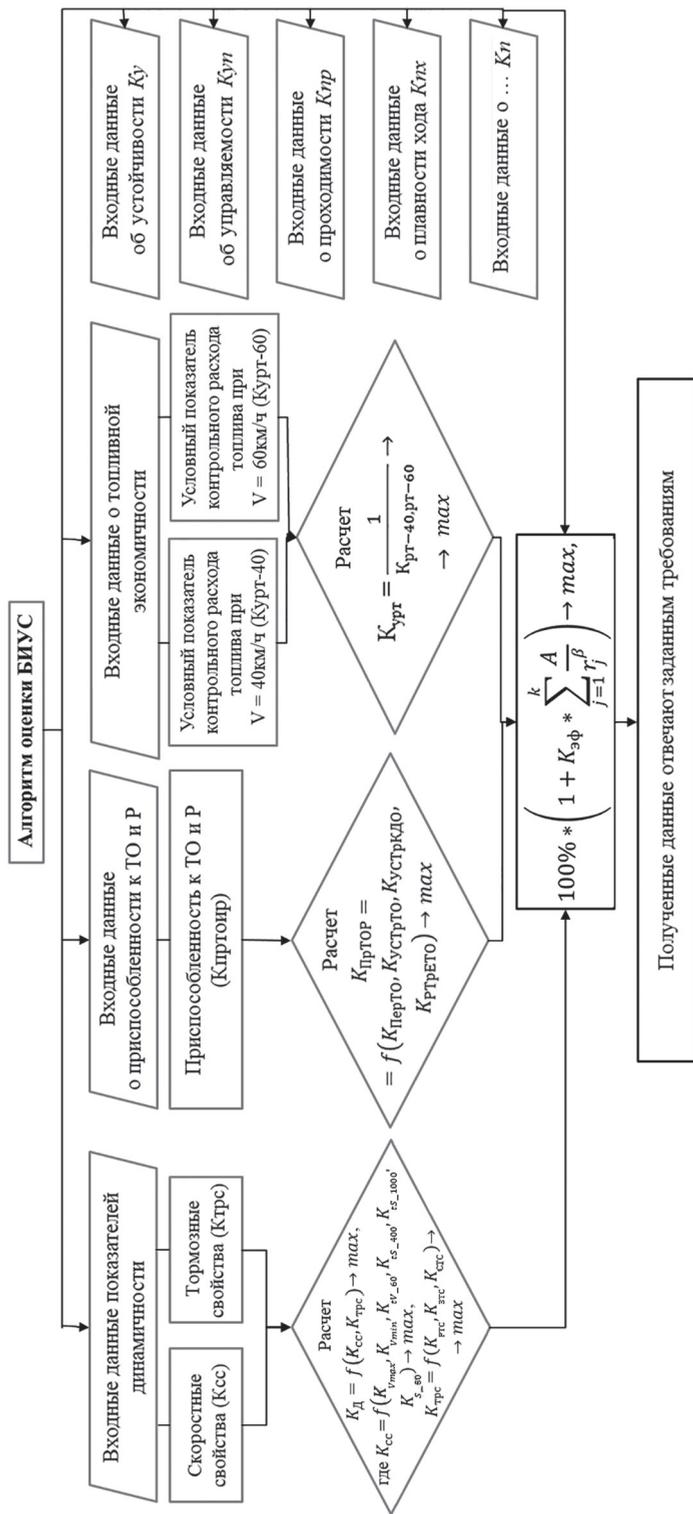


Рис. 3. Алгоритм оценки эффективности внедрения бортовых информационно-управляющих систем в состав грузового транспортного средства [составлено авторами]
 Fig. 3. Algorithm for evaluating the effectiveness of the implementation of on-board information and control systems in a cargo vehicle [compiled by the authors]

оборудования транспортного средства с целью повышения его эффективности. Новизна внедрения технологий для повышения автономности транспортного средства требует создания инструментов оценки потенциального влияния различных систем на свойства транспортного средства [28 – 30].

Использование многокритериального подхода к выбору бортовых информационно-управляющих систем производится путем определения основных параметров, влияющих на эффективность функционирования транспортного средства. Для каждого критерия определяются параметры, имеющие влияние на техническое состояние транспортного средства (см. рис. 2) [40].

Для рационального выбора состава бортовых информационно-управляющих систем необходимо провести сравнительный анализ влияния систем на эффективность свойств ТС и выбрать тот комплекс, при котором каждое свойство будет иметь максимальное значение. Определив свойства каждого критерия и наиболее благоприятный состав БИУС, можно повысить функциональные возможности грузового ТС.

Общий алгоритм сравнительной оценки эффективности БИУС представлен на рис. 3.

В ходе исследования мы получаем зависимость повышения эффективности функционирования грузовых транспортных средств при применении БИУС, которая примет следующий вид (составлено авторами):

$$100\% \times \left(1 + K_{эф} \times \sum_{j=1}^K \frac{A}{r_j^\beta} \right) \rightarrow \max \quad (2)$$

где $K_{эф}$ – коэффициент повышения эффективности функционирования грузовых транспортных средств по параметрам: динамичности, топливной экономичности, устойчивости, управляемости, проходимости, плавности хода, приспособ-

ленности к техническому обслуживанию и ремонту); $\sum_{j=1}^K \frac{A}{r_j^\beta}$ – сумма весовых коэффициентов, влияющих на эффективность функционирования грузовых транспортных средств.

Метод комплексной оценки БИУС

Комплексная оценка БИУС производится с учетом коэффициента весомости параметров, влияющих на эффективность функционирования горных машин (составлено авторами):

$$\sum P = K_{\Delta} \times P_{\Delta} + K_m \times P_m,$$

где K_{Δ} – коэффициент весомости параметра; P_{Δ} – коэффициент повышения эффективности функционирования по определенным параметрам свойств горных машин.

Средневзвешенный комплексный показатель оценки БИУС на горных машинах рассчитывается по следующей формуле:

$$K_r = \prod_{i=1}^n (q_i)^{m_i} = \sqrt[b_1]{q_1} \times \sqrt[b_2]{q_2} \times \sqrt[b_3]{q_3} \times \dots \times \sqrt[b_n]{q_n}, \quad (3)$$

где $m_i = 1/b_i$ – показатель (коэффициент) весомости i -го параметров; b_i – знаменатель долевого коэффициента весомости i -го параметров; q_i – относительное значение i -го параметра.

Расчет средневзвешенного комплексного показателя оценки БИУС с учетом коэффициентов весомости осуществляется в соответствии с целью развития и последующего совершенствования системы управления горных машин. При определении коэффициента весомости сравнивают показатели функционирования горных машин нескольких прототипов.

При расчете составляется система уравнений, в которой указываются приближенные зависимости комплексного показателя от выбранных параметров:

Таблица 3

Математическое описание гиперболического H-распределения [составлено авторами]
Mathematical description of the hyperbolic H-distribution [compiled by the authors]

Распределение	Ось абсцисс	Ось ординат	Форма записи
Видовое	число особей в виде x	число видов с одинаковым числом особей	$\Omega(x) = \frac{A}{x^{(1+a)}}$
Рангово-видовое	ранг R	число особей в виде	$\Lambda(R) = \frac{B}{R^\beta}$
Ранговое параметрическое	ранг r	значение параметра	$W(r) = \frac{A}{r^{(1+a)}}$

$$\begin{aligned}
 K_1 &= m_1 \times P_{11} + m_2 \times P_{21} + \dots + m_{1n} \times P_{n1} \\
 K_2 &= m_1 \times P_{12} + m_2 \times P_{22} + \dots + m_{1n} \times P_{n2}, (4) \\
 &\dots \\
 K_r &= m_n \times P_{1r} + m_2 \times P_{2r} + \dots + m_{1n} \times P_{nr}
 \end{aligned}$$

где P_{ij} — значение показателя i -го параметра j -го образца ($i = 1, 2, \dots, n$); m_i — коэффициент весомости i -го показателя.

В связи с тем, что мнения экспертов по значимости некоторых элементов БИУС оказались противоположными и определить весовые коэффициенты по существующим методикам экспертной оценки [31–33] не представляется возможным, результаты экспертного опроса были проанализированы с применением ценологического подхода [34], впервые предложенного в семидесятые годы XX в. Б.И. Кудриным, а именно с помощью методик рангового анализа теории техноценоза. В первую очередь был выделен техноценоз. БИУС карьерных самосвалов как совокупность электронных систем управления (ЭСУ) был представлен в виде техноценоза. В этом техноценозе каждая ЭСУ представляет собой техническую особь ценоза, совокупность ЭСУ каждого механизма (агрегата, системы) — вид особей ценоза, а совокупность ЭСУ каждой группы из предложенной классификации образуют популяции.

Вторым шагом в определении коэффициентов весомости ЭСУ БИУС карьер-

ных экскаваторов стало определение типа распределений.

Структура ценозов описывается разными типами распределений:

- видовое распределение — зависимость числа видов с равным количеством особей от количества особей в виде;
- рангово-видовое распределение — ранговое представление основывается на расположении элементов в порядке убывания величины описывающего их параметра или частоты появления;
- ранговое параметрическое, при расположении видов в порядке уменьшения какого-либо параметра.

Для моделирования невозрастающей функции всех трех распределений применяются выражения, представленные в табл. 3.

В нашем случае используется ранговое параметрическое распределение по коэффициентам весомости ЭСУ БИУС.

Согласно [34], закон рангового распределения особей в ценозе (H-распределение) имеет гиперболический вид и описывается математическим выражением

$$W_r = \frac{W_1}{r^\beta}, \quad (5)$$

где W_r — коэффициент весомости ЭСУ БИУС с рангом r ; W_1 — коэффициент весомости ЭСУ БИУС с рангом $r = 1$ (максимальный коэффициент весомости особи ценоза); r — ранг ЭСУ БИУС; β — ранговый коэффициент, характеризующий форму кривой распределения.

По [34] предполагается, что стабильность техноценоза характеризуется значением рангового коэффициента β , находящегося в пределах от 0,5 до 1,5. В ходе обработки результатов экспертной оценки ранговый коэффициент был принят $\beta = 0,6$.

В результате рангового параметрического анализа техноценоза получены весовые коэффициенты всех ЭСУ БИУС из предложенной классификации, сумма которых равна

$$\sum_{i=1}^n V_{esu_i} = 1.$$

На основании полученных данных возможно осуществить обоснованный подбор состава бортовых информационно-управляющих систем с учетом весо-мости выбранных критериев транспортного средства [35].

Заключение

В результате проведенных исследований эксплуатации карьерных экскава-

торов установлено, что сокращение времени простоев, затрачиваемое на устранение неисправностей отдельных узлов и агрегатов, техническое обслуживание, возможно при использовании автоматизированных систем удаленного диагностирования за счет внедрения бортовых информационно-управляющих систем в состав транспортного средства.

Представлен алгоритм сбора и обработки информации, получаемой с бортовых информационно-управляющих систем транспортных средств с возможностью отслеживания технического состояния систем в режиме реального времени и последующего создания модели прогнозирования ресурсов.

Разработан метод комплексной оценки бортовых информационно-управляющих систем для выбора оптимального состава систем в зависимости от весо-мости критериев, влияющих на эффективность функционирования транспортного средства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шибанов Д. А., Иванов С. Л., Емельянов А. А., Пумпур Е. В. Оценка показателей работоспособности карьерных экскаваторов в реальных условиях эксплуатации // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2020. — № 10. — С. 86–94. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-10-0-86-94.
2. 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.
3. Малафеев С. И., Малафеев С. С. Информационные и управляющие компоненты электрических карьерных экскаваторов // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2021. — № 4. — С. 33–45. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_4_0_33.
4. Курганов В. М., Грязнов М. В., Колобанов С. В. Оценка надежности функционирования экскаваторно-автомобильных комплексов в карьере // Записки Горного института. — 2020. — Т. 241. — С. 10. DOI: 10.31897/rmi.2020.1.10.
5. Кацуба Ю. Н., Караваев Н. А. Повышение уровня интеграции беспилотных технологий в эксплуатацию сельскохозяйственной техники // Известия Международной академии аграрного образования. — 2023. — № 67. — С. 60–65.
6. Шпенст В. А., Терлеев А. В. Оценка покрытия шлюзом Logawan для Т приложений «Умного города» // Интеллектуальные инновации, системы и технологии. — 2021. — № 220. — С. 513–521. DOI: 10.1007/978-981-33-6632-9_45.

7. 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.

8. Козярук А. Е., Камышьян А. М. Повышение энергетической эффективности электромеханической трансмиссии карьерного автосамосвала // Записки Горного института. — 2019. — Т. 239. — С. 576. DOI: 10.31897/pmi.2019.5.576.

9. Вытришко Ф. М., Сазонов В. М., Ефанов В. В., Шибиров А. В., Лапшин И. А. Патент РФ № 2013149686/08, 20.12.2014. Бортовая информационная система беспилотного транспортного средства. 2013. Бюл. № 21.

10. 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.

11. 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.

12. 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.

13. 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.

14. 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.

15. 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.

16. Шпенст В. А. Комплексование телекоммуникационных и электрических систем в шахтах и подземных сооружениях // Записки Горного института. — 2019. — Т. 235. — С. 78–87. DOI: 10.31897/pmi.2019.1.78.

17. Бааке Э., Шпенст В. А. Последние научные исследования по электротермическим металлургическим процессам // Записки Горного института. — 2019. — Т. 240. — С. 660–668. DOI: 10.31897/pmi.2019.6.660.

18. 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.

19. 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.

20. 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.

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

22. Кисуленко Б. В. Концепция нормирования безопасности автомобилей с высоким уровнем автоматизации // Автомобильная промышленность. — 2019. — № 4. — С. 1–5.

23. Кисуленко Б. В. Безопасность автоматизированных и беспилотных автомобилей и ее оценка при допуске к эксплуатации // Автомобильная промышленность. — 2022. — № 2. — С. 7–13.

24. 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/pm.2021.1.12.
25. Fedotov V. N., Komarov Yu. Ya., Ganzin S. V. Optimization of using fixed route taxibuses with account of security of road traffic and air pollution in big cities // Transportation Research Procedia. 2018, vol. 36, pp. 173–178. DOI: 10.1016/j.trpro.2018.12.060.
26. 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 // Информатика. Телекоммуникации. Управление. – 2018. – Т. 11. – С. 47–64. DOI: 10.18721/JCSTCS.11105.
27. 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/pm.2023.22.
28. Курганов В. М., Грязнов М. В., Колобанов С. В. Оценка надежности функционирования экскаваторно-автомобильных комплексов в карьере // Записки Горного института. – 2020. – Т. 241. – С. 10–21. DOI: 10.31897/pm.2020.1.10.
29. 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.
30. Komashinskiy V. I., Malygin I. G., Korolev O. Introduction into cognitive multimodal transportation systems // Transportation Research Procedia. 2020, vol. 50, pp. 273–279. DOI: 10.1016/j.trpro.2020.10.033.
31. Boryaev A. A., Malygin I. G., Marusin A. V. Areas of focus in ensuring the environmental safety of motor transport // Transportation Research Procedia. 2020, vol. 50, pp. 68–76. DOI: 10.1016/j.trpro.2020.10.009.
32. Симонова Л. А., Демьянов Д. Н., Капитонов А. А. Интеллектуальная информационная система формирования требований при проектировании автомобильной техники // СТИН. – 2020. – № 7. – С. 11–15.
33. 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.
34. Андрейчук А. П., Гурко А. В. Тенденции внедрения технологий искусственного интеллекта и робототехники в Арктике: опыт Российской Федерации // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 10-2. – С. 24–38. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_102_0_24.
35. Safiullin R. N., Reznichenko V. V., Safiullin R. R. The software adaptive system for managing the heavy cargo transportation process based on the automated vehicle weight and size control system // Journal of Physics Conference Series. 2021, vol. 1753, no. 1, article 012063. DOI: 10.1088/1742-6596/1753/1/012063.
36. Safiullin R. N., Kerimov M. A. Intellectual onboard transport systems in road transport. Monograph. M.-Berlin: Direct Media, 2017, p. 35. 

REFERENCES

1. Shibanov D. A., Ivanov S. L., Yemelyanov A. A., Pumpur E. V. Evaluation of working efficiency of open pit shovels in real operating conditions. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, no. 10, pp. 86–94. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-10-0-86-94.

2. Nazarychev A. N., Dyachenok G. V., Sychev Y. A. A reliability study of the traction drive system in haul trucks based on failure analysis of their functional parts. *Journal of Mining Institute*. 2023, vol. 261, pp. 363 – 373. [In Russ].

3. Malafeev S. I., Malafeev S. S. Information and control elements of electric mining shovels. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021, no. 4, pp. 33 – 45. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_4_0_33.

4. Kurganov V. M., Gryaznov M. V., Kolobanov S. V. Assessment of operational reliability of quarry excavator-dump truck complexes. *Journal of Mining Institute*. 2020, vol. 241, pp. 10. DOI: 10.31897/pmi.2020.1.10

5. Katsuba Yu. N., Karavaev N. A. Increasing the level of integration of unmanned technologies into the operation of agricultural machinery. *Izvestia MAAO*. 2023, no. 67, pp. 60 – 65.

6. Shpenst V. A., Terleev A. V. Evaluation of Lorawan gateway coverage for Smart City applications. *Modern Innovations, Systems and Technologies*. 2021, no. 220, pp. 513 – 521. [In Russ]. DOI: 10.1007/978-981-33-6632-9_45.

7. 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.

8. Kozyaruk A. E., Kamyshyan A. M. Improving the energy efficiency of the electromechanical transmission of an open-pit dump truck. *Journal of Mining Institute*. 2019, vol. 239, pp. 576. [In Russ]. DOI: 10.31897/pmi.2019.5.576.

9. Vytrishko F. M., Sazonov V. M., Efanov V. V., Shibirov A. V., Lapshin I. A. *Patent RU 2013149686/08*, 20.12.2014.

10. 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.

11. 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.

12. 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.

13. Ladanov V. I. Application of onboard information and control systems on military automotive equipment of troops. *Al'manakh Permskogo voennogo instituta voysk natsional'noy gvardii*. 2022, no. 2(6), pp. 85 – 91. [In Russ].

14. 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.

15. 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.

16. Shpenst V. A. Integration of telecommunication and electrical systems in mines and underground structures. *Journal of Mining Institute*. 2019, vol. 235, pp. 78 – 87. [In Russ]. DOI: 10.31897/pmi.2019.1.78

17. Baake E., Shpenst V. A. Recent scientific research on electrothermal metallurgical processes. *Journal of Mining Institute*. 2019, vol. 240, pp. 660 – 668. [In Russ]. DOI: 10.31897/pmi.2019.6.660.

18. 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.

19. 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.
20. 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.
21. Kondratiev A. A. Barriers of ITS implementation processes. *Sbornik trudov Mezhdunarodnoy akademii transporta* [Proceedings of the International Academy of Transport], 2014, no. 17, pp. 89–95. [In Russ].
22. Kisulenko B. V. The concept of rationing the safety of cars with a high level of automation. *Avtomobil'naya promyshlennost'*. 2019, no. 4, pp. 1–5. [In Russ].
23. Kisulenko B. V. Safety of automated and unmanned vehicles and its assessment during admission to operation. *Avtomobil'naya promyshlennost'*. 2022, no. 2, pp. 7–13. [In Russ].
24. Borisov S. B., Koltunova E. A., Klavdiev S. N. Improvement of the structure of ionization technology for the heaviest asynchronous electrical equipment of a mine electric locomotive. *Journal of Mining Institute*. 2021, vol. 247, pp. 1–8. [In Russ]. DOI: 10.31897/pmi.2021.1.12.
25. Fedotov V. N., Komarov Yu. Ya., Ganzin S. V. Optimization of using fixed route taxibuses with account of security of road traffic and air pollution in big cities. *Transportation Research Procedia*. 2018, vol. 36, pp. 173–178. DOI: 10.1016/j.trpro.2018.12.060.
26. 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. *Computing, Telecommunications and Control*. 2018, vol. 11, pp. 47–64. [In Russ]. DOI: 10.18721/JCSTCS.11105.
27. Buzmakov S. A., Sannikov P. Yu., Kuchin L. S., Igosheva E. A., Abdulmanova I. F. The use of unmanned aerial photography for the diagnosis of technogenic transformation of the natural environment during the operation of an oil field. *Journal of Mining Institute*. 2023, vol. 260, pp. 180–193. [In Russ]. DOI: 10.31897/pmi.2023.22.
28. Kurganov V. M., Gryaznov M. V., Kolobanov S. V. Evaluation of the reliability of the functioning of excavator-automobile complexes in a quarry. *Journal of Mining Institute*. 2020, vol. 241, pp. 10–21. [In Russ]. DOI: 10.31897/pmi.2020.1.10.
29. Makharatkin P. N., Abdulaev E. K., Vishnyakov G. Yu., Botyan E. Yu., Pushkarev A. E. Improving the efficiency of the operation of dump trucks based on the justification of their rational speed using simulation modelling. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 6-2, pp. 237–250. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_62_0_237.
30. Komashinskiy V. I., Malygin I. G., Korolev O. Introduction into cognitive multimodal transportation systems. *Transportation Research Procedia*. 2020, vol. 50, pp. 273–279. DOI: 10.1016/j.trpro.2020.10.033.
31. Boryaev A. A., Malygin I. G., Marusin A. V. Areas of focus in ensuring the environmental safety of motor transport. *Transportation Research Procedia*. 2020, vol. 50, pp. 68–76. DOI: 10.1016/j.trpro.2020.10.009.
32. Simonova L. A., Demyanov D. N., Kapitonov A. A. Intelligent information system of requirements formation in the design of automotive equipment. *STIN*. 2020, no. 7, pp. 11–15.
33. Simonova L. A., Kapitonov A. A., Klochkova K. V. Building an intelligent superstructure of an automated internal combustion engine diagnostics system. *Scientific and Technical Volga region Bulletin*. 2020, no. 12, pp. 110–113. [In Russ].
34. Andreychuk A. P., Gurko A. V. Trends in the introduction of artificial intelligence and robotics technologies in the Arctic: experience of the Russian Federation. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 10-2, pp. 24–38. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_102_0_24.
35. Safullin R. N., Reznichenko V. V., Safullin R. R. The software adaptive system for managing the heavy cargo transportation process based on the automated vehicle weight and size control system. *Journal of Physics Conference Series*. 2021, vol. 1753, no. 1, article 012063. DOI: 10.1088/1742-6596/1753/1/012063.

36. Safiullin R.N., Kerimov M.A. *Intellectual onboard transport systems in road transport*. Monograph. M.-Berlin: Direct Media, 2017, p. 35.

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,
Ефремова Виктория Александровна¹ — аспирант, e-mail: vikaefr99@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-3981-6061,

¹ Санкт-Петербургский горный университет.

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,
V.A. Efremova¹, Graduate Student, e-mail: vikaefr99@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-3981-6061,

¹ Saint-Petersburg Mining University, 199106, Saint-Petersburg, Russia.

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

Получена редакцией 02.05.2023; получена после рецензии 03.07.2023; принята к печати 10.08.2023.
Received by the editors 02.05.2023; received after the review 03.07.2023; accepted for printing 10.08.2023.

