УДК 681.5:622.2

Косыгина Анастасия Анатольевна, студентка бакалавриата
(ДВФУ, г. Владивосток)
Коробейников Илья Алексеевич, магистрант
(ДВФУ, г. Владивосток)
Anastasia A. Kosygina, undergraduate student
(FEFU, Vladivostok)
Ilya A. Korobeinikov, Master's student
(FEFU, Vladivostok)

РОБОТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ И ОБСЛУЖИВАНИЯ ГОРНЫХ МАШИН

ROBOTIC SYSTEM FOR DIAGNOSTICS AND MAINTENANCE OF MINING MACHINES

Аннотация. Рассмотрена роботизированная система диагностики и обслуживания горных машин. Описаны состав мобильной платформы, диагностические средства, алгоритм обследования и интеграция с системой управления оборудованием.

Abstract. A robotic system for mining machine diagnostics and maintenance is considered. The mobile platform, diagnostic sensors, inspection workflow and integration with equipment control systems are described.

Введение

Очистные и проходческие комбайны, конвейеры, дробильные установки эксплуатируются в условиях запылённости, вибрации, ударных нагрузок и ограниченного доступа к узлам. Ручной осмотр связан с выходом персонала в неблагоприятную зону и не обеспечивает одинаковой воспроизводимости измерений на всех обходах. Возможности мобильных инспекционных роботов для подземных работ рассмотрены в современных исследованиях [1, 2].

Цель статьи - описать роботизированную систему обследования и обслуживания горных машин: её аппаратную структуру, диагностические показатели, последовательность маршрута и оценку ожидаемого эффекта. Численные результаты приведены как предварительные проектные оценки, требующие проверки.

1. Функциональные требования и оборудование

Таблица 1 - Класс задач роботизированной системы

Операция	**Точка приложения**	**Получаемая информация / результат**
Патрулирование	Заданный маршрут вдоль машины	Повторяемый доступ к контрольным точкам
Видеоконтроль	Корпус, соединения, подтеки	Изображения дефектов
Тепловизионный осмотр	Редукторы, подшипниковые узлы	Температурные поля
Контроль вибрации и шума	Контрольные точки узлов	Спектры и уровни сигнала [3]
Обмен со штатными датчиками	Температура, давление, расход	Совместная оценка состояния
Технологические операции	Поверхности, точки смазки, сменные детали	Очистка, смазка, условно возможная замена

Таблица 2 - Аппаратная композиция мобильного робота

Подсистема	**Исполнение**	**Назначение / ограничения**
Платформа	Колёсная или гусеничная; автономное/дистанционное управление	Подземная эксплуатация: гусеничная база с пыле-влагозащитой
Навигация	LiDAR, камеры, инерциальные датчики	Локализация и движение без GNSS [1]
Манипулятор	Многозвенный с взаимозаменяемыми насадками	Контактный контроль и локальное обслуживание
Инструменты	Вибродатчик, ультразвуковой дефектоскоп, щетка, смазчик	Сменная конфигурация задач
Техническое зрение	Стереокамеры и лазерный сканер	3D-модель и координаты точек
Диагностика	Промышленный компьютер и аналитика	Спектры, тепловые карты, сравнение с эталоном
Связь [4]	OPC UA или MQTT через интерфейс предприятия	Передача в SCADA/MES; зависит от инфраструктуры

2. Формализация методов диагностики

$$X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x\,(t)\, e^{-j2\pi ft}\, dt \qquad (1)$$

где $x(t)$- измеренная вибрация; $X(f)$- её спектр; j- мнимая единица; f- частота, Гц. Вычисление на практике может выполняться дискретным БПФ.

$$D_v = \max_{f\in\Omega} |X(f) - X_{\text{ref}}(f)| \qquad (2)$$

где D_v- условный индикатор отличия спектра от эталона на контролируемом диапазоне частот Ω; X_{ref}- эталонный спектр.

$$\Delta T(x, y) = T(x, y) - T_{\text{ref}}(x, y) \qquad (3)$$

где $T(x, y)$- тепловизионная температура в точке изображения; T_{ref}- эталон при сопоставимой нагрузке и излучательной способности.

$$D_T = \max_{(x,y)\in S} \Delta T(x, y) \qquad (4)$$

где D_T- максимум температурного превышения в области интереса S; превышение требует проверки смазки, нагрузки и состояния контактов.

$$D_{\text{vis}} = \sum_{k=1}^{K} w_k\, I_k \qquad (5)$$

где I_k- бинарный признак дефекта (трещина, коррозия, утечка, ослабленное крепление); w_k- задаваемый вес значимости.

$$z = [D_v, , D_T, , D_{\text{vis}}, p, T_s, q]^{\text{T}} \qquad (6)$$

где z- объединённый набор диагностических признаков; p, T_s, q- давление, температура штатного датчика и расход.

Таблица 3 - Методы измерения и диагностические признаки

Метод	**Датчик**	**Операция**	**Возможные признаки / оговорка**
Вибрационный [3]	Контактный акселерометр	Прикладывание к подшипнику/редуктору, БПФ	Дисбаланс, подшипниковые и зубчатые дефекты
Тепловизионный	ИК-камера	Съёмка температурного поля	Повышенное трение, нарушение смазки, перегрузка

Метод	**Датчик**	**Операция**	**Возможные признаки / оговорка**
Визуальный	Стереокамеры	Сегментация и поиск аномалий	Трещины, коррозия, утечки, крепления
Ультразвуковой	Дефектоскоп с насадкой	Контакт в заданной точке	Внутренние дефекты по методике прибора
Штатные датчики	Датчики машины	Считывание и сопоставление во времени	Контекст нагрузки и режима работы

3. Процедура осмотра и обслуживания

Таблица 4 - Режимы функционирования

Режим	**Пусковое событие**	**Действия**	**Выход**
Плановый	Регламент и маршрут	Обход, фиксация, измерение	Протокол состояния
По отклонению	Превышение порога вибрации/температуры	Адресное обследование узла	Уточненный диагноз
Локальное обслуживание	Разрешенное технологическое задание	Очистка, смазка, смена быстроизнашиваемого элемента	Запись операции
Аварийное обследование	Останов оборудования после события	Осмотр опасной зоны без присутствия человека	Карта обнаружений
Взаимодействие с АСУ	Доступна SCADA/MES	Передача диагностики и статуса	Наряд, архив, уведомление

$$\text{Alarm} = 1\ (D_v > \gamma_v \ \vee \ D_T > \gamma_T \ \vee \ D_{\text{vis}} > \gamma_{\text{vis}}) \qquad (7)$$

где γ_v, γ_T, γ_{vis}- назначаемые по типу машины пороги; индикатор 1 означает необходимость дополнительного обследования.

$$T_{\text{cycle}} = T_{\text{move}} + T_{\text{position}} + T_{\text{measure}} + T_{\text{transfer}} \qquad (8)$$

где T_{cycle}- длительность обследования; составляющие - движение, позиционирование, измерение и передача данных.

4. Проектная эффективность и неопределённость

Таблица 5 – Оценки ожидаемых эффектов

Показатель	**Значение**	**Примечание**
Снижение времени диагностики	40–60 %	Оценка при автоматизации обхода
Внеплановые простои	Уменьшение на 10–15 %	Предварительная оценка
Безопасность	Снижение контакта персонала с опасными зонами	-
Достоверность	Стандартизация точек и процедур	Стандартизация точек и процедур
Размер обслуживаемого парка	5–10 машин	-
Окупаемость	2–3 года	-

$$\eta_{\text{diag}} = \frac{T_{\text{manual}} - T_{\text{robot}}}{T_{\text{manual}}} \cdot 100\,\% = 40 - 60\,\% \qquad (9)$$

где η_{diag}- расчетная доля экономии времени относительно ручной процедуры;

$$\eta_{\text{down}} = \frac{D_{\text{before}} - D_{\text{after}}}{D_{\text{before}}} \cdot 100\,\% = 10 - 15\,\% \qquad (10)$$

где D_{before}и D_{after}- неплановые простои за сопоставимый период;

$$\text{CAPEX} = C_{\text{platform}} + C_{\text{arm}} + C_{\text{sensor}} + C_{\text{software}} \qquad (11)$$

где CAPEX - капитальные затраты на базу, манипулятор, датчики и программное обеспечение.

$$T_{\text{pay}} = \frac{\text{CAPEX}}{S_{\text{year}}} = 2 - 3 \text{ года} \qquad (12)$$

где T_{pay}- простой срок окупаемости; S_{year}- чистая годовая экономия при учёте эксплуатационных затрат;

Таблица 6 - Требуемая экспериментальная верификация

Показатель	**Процедура проверки**	**Контроль качества**
Сопоставимость измерений	Одинаковые точки, нагрузка, режим и методика	Повторяемость спектров и температур [3]
Производительность	Хронометраж ручных и роботизированных обходов	Одинаковая программа контроля
Простои	Анализ журналов эксплуатации	Сопоставимый парк и период
Безопасность	Оценка рисков и разрешение работ	Исключение опасных операций без защит
Экономика	Фактические CAPEX/OPEX, стоимость простоя	Обоснованный S_{year} для (11)

Заключение

Представлена концепция автономной роботизированной диагностики с контактными и дистанционными средствами контроля, передачей информации в АСУ и отдельными операциями обслуживания. Формулы (1)–(12) раскрывают процедуры сопоставления сигналов, принятия решений и оценки эффективности, ранее описанные преимущественно словами. Численные показатели сокращения времени, простоев и окупаемости являются предварительными; для подтверждения требуются испытания прототипа и учёт эксплуатационных затрат.

Список литературы

1. Konieczna-Fuławka M., Koval A., Nikolakopoulos G. et al. Autonomous Mobile Inspection Robots in Deep Underground Mining - The Current State of the Art and Future Perspectives // Sensors. 2025. Vol. 25, No. 12. Art. 3598. DOI: 10.3390/s25123598. https://doi.org/10.3390/s25123598
2. Tian Y., Yu J., Gu J. Overview of Digital Twins in Mining Equipment // Intelligent Equipment and Special Robots. 2024. DOI: 10.3233/ATDE240242. https://doi.org/10.3233/ATDE240242
3. ISO 20816-1:2026. Mechanical vibration - Measurement and evaluation of machine vibration - Part 1: General guidelines. 2nd ed. International Organization for Standardization. https://www.iso.org/standard/89921.html
4. OPC Foundation. OPC Unified Architecture - Part 1: Overview and Concepts. OPC-10000-1, v1.05.06. https://reference.opcfoundation.org/specs/OPC-10000-1/full