

УДК 004.89

**РАЗРАБОТКА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА  
И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СОСТОЯНИЯ ГОРНОДОБЫВАЮЩЕГО  
ОБОРУДОВАНИЯ НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИЙ ГРАНИЧНЫХ  
ВЫЧИСЛЕНИЙ И МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ**

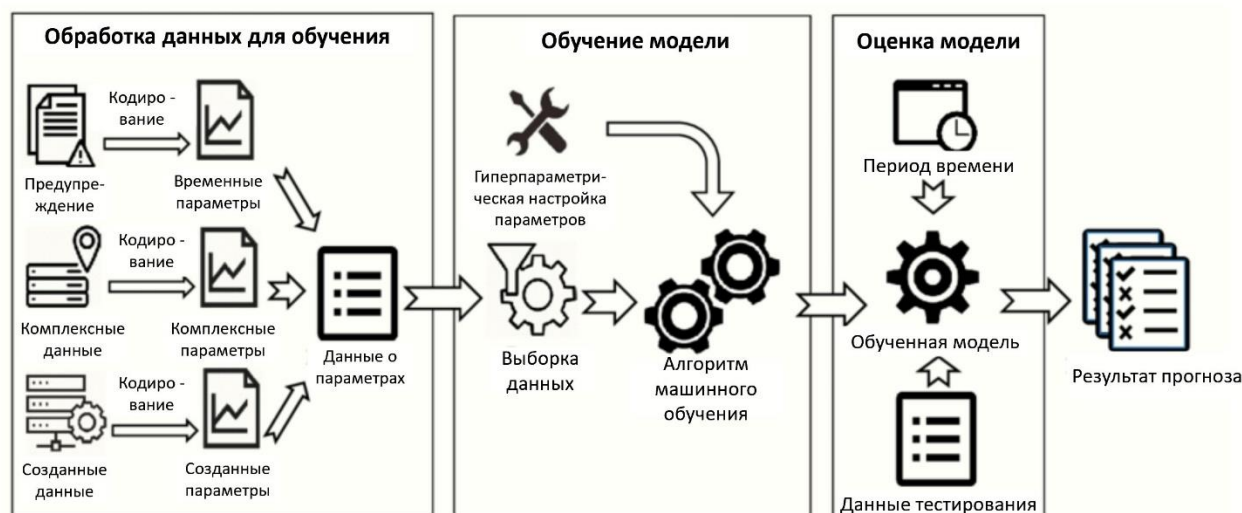
Савицкий О.М., студент гр. ОТм-231, II курс  
Научный руководитель: Тимощук И.В., профессор

Кемеровский государственный университет  
г. Кемерово

В условиях цифровой трансформации горнодобывающей промышленности Кузбасса одной из ключевых задач является повышение эффективности использования оборудования и сокращение времени его простоя. Традиционные методы обслуживания по регламенту не всегда учитывают реальное состояние оборудования, что приводит к неоптимальным затратам на техническое обслуживание и ремонт. Современные системы предиктивной аналитики, основанные на облачных вычислениях, имеют ряд существенных недостатков, связанных с задержками при передаче данных, проблемами подключения в условиях подземных выработок и вопросами информационной безопасности.

В данной работе предлагается инновационный подход к созданию интеллектуальной системы мониторинга и прогнозирования состояния горнодобывающего оборудования на базе технологий граничных вычислений (Edge Computing) и алгоритмов машинного обучения. Основная идея заключается в перемещении части вычислительных мощностей ближе к источникам данных – непосредственно на само оборудование или на ближайшие вычислительные узлы.

Разработанная архитектура системы (рис.1) включает три основных уровня: уровень сбора данных с сенсоров, уровень граничных вычислений и уровень централизованной аналитики. На уровне граничных вычислений применяются облегченные модели машинного обучения, способные функционировать на устройствах с ограниченными вычислительными ресурсами. Эти модели выполняют первичную обработку данных, выделение значимых признаков и оперативное обнаружение аномалий в работе оборудования.



**Рис. 1 Архитектура интеллектуальной системы мониторинга и прогнозирования**

Предлагаемая система использует ансамбль алгоритмов машинного обучения, включающий методы градиентного бустинга, рекуррентные нейронные сети и автоэнкодеры для детектирования аномалий. Разработан специальный механизм адаптации моделей к изменяющимся условиям эксплуатации оборудования, основанный на инкрементном обучении и периодической синхронизации с центральной аналитической системой.

Особое внимание в исследовании уделено оптимизации алгоритмов для работы в условиях ограниченных вычислительных ресурсов. Предложена методика квантизации нейросетевых моделей, позволяющая сократить требования к вычислительным ресурсам без существенной потери точности прогнозирования. Разработаны специализированные протоколы обмена данными между уровнями системы, учитывающие особенности сетевой инфраструктуры на горнодобывающих предприятиях.

В рамках исследования была реализована система выявления скрытых зависимостей между различными типами сенсорных данных с использованием методов глубокого обучения. Данный подход позволил обнаруживать нетривиальные паттерны, предшествующие отказам оборудования, которые не выявляются при традиционном анализе. Например, было установлено, что определенные комбинации показателей вибрации, температуры и потребления электроэнергии в сочетании с данными о внешних условиях эксплуатации (влажность, запыленность, сезонность) могут служить ранними индикаторами потенциальных неисправностей с вероятностью до 93%. Применение методов интерпретируемого ИИ (Explainable AI) позволило не только предсказывать возможные отказы, но и обосновывать причины принятия решений системой, что значительно повысило доверие технического персонала к рекомендациям системы.

Важным компонентом разработанной системы стал модуль самодиагностики и самокалибровки датчиков, реализованный с применением технологий федеративного обучения. Это позволило существенно повысить надежность системы в целом, выявляя и компенсируя искажения в показаниях отдельных сенсоров без необходимости их физической замены или калибровки. Проведенные испытания показали, что внедрение данного модуля позволило сократить количество ложных срабатываний системы на 42% и увеличить межповерочный интервал сенсорного оборудования в 1,8 раза, что дополнительно снизило эксплуатационные расходы.

Для валидации предложенного подхода была проведена серия экспериментов на базе одного из угледобывающих предприятий Кузбасса. В течение шести месяцев система осуществляла мониторинг состояния проходческого комбайна. Результаты показали, что применение разработанной системы позволило:

сократить время простоя оборудования на 27% по сравнению с традиционной системой планово-предупредительных ремонтов;

повысить точность прогнозирования отказов до 89%;

снизить затраты на техническое обслуживание на 18%.

Важным преимуществом предложенного подхода является возможность функционирования системы в условиях нестабильного или отсутствующего подключения к центральной инфраструктуре, что особенно актуально для подземных горных работ. Система способна автономно выявлять потенциальные проблемы и предоставлять рекомендации по предотвращению аварийных ситуаций непосредственно персоналу на месте эксплуатации оборудования.

Дальнейшие исследования будут направлены на расширение номенклатуры поддерживаемого оборудования, совершенствование алгоритмов прогнозирования и разработку интерфейсов для интеграции с существующими системами управления производством. Особое внимание планируется уделить вопросам энергоэффективности вычислений и обеспечению кибербезопасности системы.

Предлагаемая интеллектуальная система мониторинга и прогнозирования состояния горнодобывающего оборудования представляет собой инновационное решение, сочетающее современные подходы граничных вычислений и машинного обучения для повышения эффективности и безопасности горнодобывающих работ в Кузбассе.

### Список литературы:

1. Власов А.И., Карпунин А.А., Ганев Ю.М. Системный анализ технологий "Интернета вещей" для промышленности // Современные технологии автоматизации. 2023. № 3. С. 14-26.
2. Кононов Д.П., Петров С.Г., Маркова Е.В. Применение методов машинного обучения для предиктивной аналитики в угольной промышленности // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2022. № 11. С. 97-108.
3. Лукьянов Г.И., Аверьянов В.К. Граничные вычисления в системах промышленного "Интернета вещей" // Автоматизация в промышленности. 2022. № 7. С. 15-22.
4. Николаев П.А. Интеллектуальные методы обнаружения аномалий в работе промышленного оборудования // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2023. № 2. С. 39-47.
5. Соколов И.А., Дрожжин А.И., Куприяновский В.П. Цифровые двойники и цифровая трансформация предприятий ТЭК // International Journal of Open Information Technologies. 2022. Т. 10, № 5. С. 73-85.
6. Федоров А.Б., Щербаков В.А. Современные подходы к техническому обслуживанию горнодобывающего оборудования // Горное оборудование и электромеханика. 2023. № 1. С. 45-53.