

УДК 622.271:681.5:658.5

**КОНЦЕПТУАЛЬНЫЕ ПОДХОДЫ К ПОСТРОЕНИЮ
МНОГОУРОВНЕВЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ (MES/SCADA) ДЛЯ
ОБЕСПЕЧЕНИЯ СКВОЗНОЙ ОПЕРАЦИОННОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ
НА КРУПНЫХ ОТКРЫТЫХ МЕДНЫХ РУДНИКАХ**

Сатанов Д. Г.,

*Старший инженер в сфере АСУТП, магистр техники и технологий,
Казахстан, Караганда.*

Аннотация

В статье рассмотрены концептуальные подходы к интеграции систем оперативного управления производством (MES) и диспетчерского управления (SCADA) на предприятиях открытой добычи меди. Проанализирована проблема низкой операционной эффективности, вызванная разрозненностью информационных систем горнотранспортного комплекса и передела подготовки руды. Предложена иерархическая модель управления, учитывающая специфику горных работ: цикличность экскавации, транспортировки и дробления. Обосновано применение метрики ОЕЕ (Overall Equipment Effectiveness) для оценки сквозной эффективности технологической цепочки. Результаты исследования могут быть использованы при проектировании комплексных систем автоматизации цифровых рудников («Индустрия 4.0»).

Ключевые слова: MES, SCADA, открытые горные работы, медная руда, операционная эффективность, ОЕЕ, промышленная автоматизация, цифровая трансформация.

***CONCEPTUAL APPROACHES TO BUILDING MULTI-LEVEL
CONTROL SYSTEMS (MES/SCADA) FOR ENSURING END-TO-END
OPERATIONAL EFFICIENCY AT LARGE OPEN-PIT COPPER MINES***

Satanov D. G.,

*Senior Engineer in APCS field, master of engineering and technology,
Kazakhstan, Karaganda.*

Abstract

The article examines conceptual approaches to the integration of Manufacturing Execution Systems (MES) and Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA) systems at open-pit copper mining enterprises. The problem of low operational efficiency caused by the fragmentation of information systems in the mining transport complex and ore processing stages is analyzed. A hierarchical management model is proposed, taking into account the specifics of mining operations: the cyclical nature of excavation, transportation, and crushing. The use of the OEE (Overall Equipment Effectiveness) metric for assessing end-to-end efficiency of the process chain is justified. The research results can be applied in the design of integrated automation systems for digital mines (Industry 4.0).

Keywords: MES, SCADA, open-pit mining, copper ore, operational efficiency, OEE, industrial automation, digital transformation.

Введение. Современная горнодобывающая промышленность функционирует в условиях высокой волатильности цен на сырье и ужесточения экологических требований. Для крупных открытых медных рудников ключевым фактором рентабельности становится повышение операционной эффективности и минимизация простоев горнотранспортного оборудования. Несмотря на активное внедрение локальных систем автоматизации, многие предприятия сталкиваются с

Дневник науки | www.dnevniknauki.ru | СМИ Эл № ФС 77-68405 ISSN 2541-8327

проблемой «лоскутной автоматизации», когда данные SCADA-систем не интегрированы с системами планирования. Это приводит к разрывам в информационных потоках, задержкам в принятии управленческих решений и, как следствие, снижению производительности на 10–30% [2].

Актуальность исследования обусловлена переходом отрасли к парадигме «Индустрия 4.0», предполагающей создание единого цифрового пространства [4]. Если системы класса SCADA обеспечивают мониторинг технологических параметров в реальном времени (нагрузка на приводы экскаваторов, состояние конвейерных лент, энергопотребление насосных станций), то системы MES отвечают за внутрицеховое планирование, контроль качества руды и материальный баланс. Интеграция этих уровней позволяет перейти от реактивного управления к предиктивному, повышая безопасность и устойчивость операций [3].

Цель работы - разработать и обосновать концептуальные подходы к построению интегрированной многоуровневой системы MES/SCADA для повышения сквозной эффективности добычи меди. Для достижения цели решены следующие задачи: проанализированы функциональные различия систем в контексте горных работ, выявлена специфика управления потоками руды и предложена модель расчета эффективности оборудования (OEE) для горной техники.

Теоретические основы взаимодействия MES и SCADA в горной промышленности. Согласно международному стандарту ISA-95, управление современным предприятием строится по иерархическому принципу (рис.1) [1; 7].



Рис. 1. Иерархическая модель многоуровневых систем управления (адаптировано по стандарту ISA-95).

SCADA (Уровень 2) представляет собой систему диспетчерского управления и сбора данных. На медном руднике объектами управления SCADA являются:

- Стационарное оборудование: дробильно-сортировочные комплексы, конвейерный транспорт, насосные станции, подстанции энергоснабжения.
- Мобильное оборудование: экскаваторы, буровые станки и карьерные самосвалы (через шлюзы интеграции с бортовыми системами FMS - Fleet Management Systems).

Основная функция SCADA - визуализация технологического процесса, архивирование трендов и аварийная сигнализация. Цикл обновления данных составляет миллисекунды или секунды, что критично для оперативного реагирования.

MES (Уровень 3) — это связующее звено между АСУ ТП (SCADA) и корпоративной ERP-системой. В контексте добычи MES выполняет функции, определенные ассоциацией MESA International [8].

Ключевые модули MES, адаптированные под задачи открытого рудника, представлены в таблице 1.

Таблица 1 - Основные функциональные модули MES-систем (с адаптацией для горной добычи)

| Модуль | Описание (стандарт MESA) | Адаптация для рудника |
|--------|---------------------------|---|
| QM | Управление качеством | Отслеживание содержания Cu в руде (шихтовка) |
| RAS | Контроль ресурсов | Мониторинг состояния парка самосвалов и буровых |
| PM | Управление процессами | Оптимизация циклов «экскавация - транспортировка» |
| PTG | Отслеживание продукции | Трекинг партий руды от карьера до обогащения |
| DCA | Сбор данных | Агрегация сигналов с датчиков SCADA и IoT |
| LM | Управление персоналом | Учет смен машинистов и водителей |
| PA | Анализ производительности | Расчет OEE и КИТГ (коэффициент тех. готовности) |
| DPU | Диспетчеризация | Оперативное перераспределение грузопотоков |
| MM | Техобслуживание | Предиктивный ремонт (CBM) дробилок и конвейеров |

Для оценки эффективности интеграции целесообразно использовать адаптированный показатель общей эффективности оборудования (OEE), рассчитываемый по формуле [6]:

$$OEE = A \times P \times Q$$

где:

A (Готовность): Отношение времени фактической работы оборудования к плановому фонду времени.

$$A = \frac{T_{run}}{T_{plan}} \times 100\%$$

P (Производительность): Отношение фактического объема добычи к паспортной производительности.

$$P = \frac{Cycle_{ideal} \times Count_{total}}{T_{run}} \times 100\%$$

Q (Качество): Доля руды, соответствующей плановому содержанию меди (без разубоживания).

$$Q = \frac{Count_{good}}{Count_{total}} \times 100\%$$

Традиционно SCADA фиксирует простои (влияет на параметр A), но не анализирует причины снижения качества (Q). MES-система, агрегируя данные, позволяет видеть картину целиком: например, намеренное снижение скорости подачи руды (P) для обеспечения требуемого гранулометрического состава. На ГОКах мировым стандартом считается ОЕЕ выше 85%, однако из-за отсутствия интеграции многие операции достигают лишь 65–70%, обладая потенциалом роста на 15–20% [5].

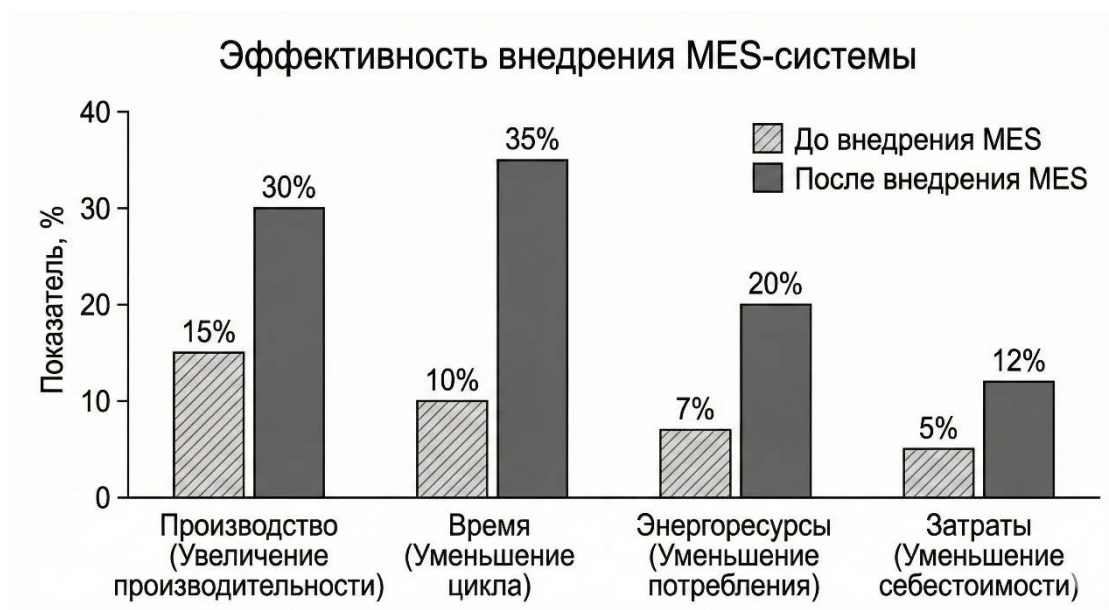


Рис. 3. Усредненные показатели эффективности внедрения интегрированных систем управления (составлено автором по данным MESA International [8])

Специфика применения многоуровневых систем управления в условиях открытой добычи. Специфика открытых горных работ накладывает ряд существенных ограничений, которые делают прямое применение стандартных решений MES/SCADA, разработанных для дискретного производства, невозможным без глубокой адаптации.

Ключевым отличием горного производства является стохастический (вероятностный) характер технологических процессов, протекающих в условиях постоянной изменчивости внешней среды и свойств сырья.

Анализ производственных процессов крупного медного рудника позволяет выделить три группы специфических вызовов для интеграции систем управления:

1. Разрыв технологической и информационной цепи. Процесс добычи представляет собой стык цикличной и поточной технологий.

- Цикличная часть: буровзрывные работы, экскавация и транспортировка автосамосвалами. Управление здесь дискретно и осуществляется преимущественно системами диспетчеризации горнотранспортного комплекса (FMS).

- Поточная часть: первичное дробление, конвейерный транспорт и усреднение на складах. Управление непрерывно и базируется на классических SCADA-системах.

На практике эти системы часто работают изолированно. SCADA дробилки «не знает» о том, руда какой крепости едет в кузове самосвала, пока она не попадет в бункер. Этот информационный разрыв ведет к неоптимальным режимам работы оборудования и снижению производительности (параметр P в формуле OEE).

2. Экстремальные условия эксплуатации полевого уровня. Нижний уровень автоматизации (датчики, ПЛК) функционирует в агрессивной среде. Критическими факторами являются высокая запыленность, значительные вибрационные нагрузки и широкий диапазон температур. Это требует применения специализированного оборудования с классом защиты не ниже IP67 и повышенной виброустойчивостью, что удорожает систему сбора данных.

3. Проблема связности и мобильности. В отличие от цеха, где станки стационарны, основные активы рудника (экскаваторы, самосвалы)

Дневник науки | www.dnevniknauki.ru | СМИ Эл № ФС 77-68405 ISSN 2541-8327

постоянно перемещаются. Глубина современных карьеров достигает сотен метров, а сложный рельеф создает зоны «радиотени», делая традиционные промышленные сети (Industrial Wi-Fi) неэффективными. Для обеспечения надежного канала связи между уровнем SCADA/FMS и полевыми устройствами требуется развертывание специализированной инфраструктуры, например, Mesh-сетей или частных сетей LTE (Private LTE), что является необходимым условием для работы MES-системы в реальном времени.

На рисунке 3 представлена адаптированная схема функциональных потоков оперативного управления, учитывающая указанную специфику и необходимость интеграции геологических данных.

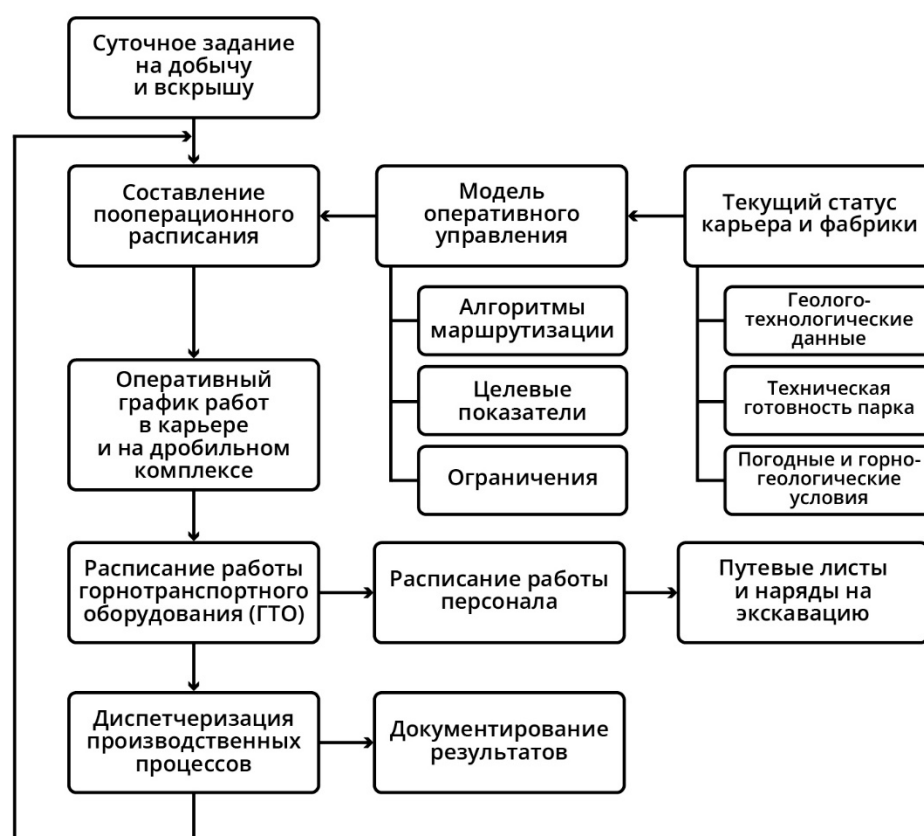


Рис. 3 - Функциональная схема оперативного планирования и диспетчеризации горных работ в адаптированной MES-системе (составлено автором).

Концептуальные подходы к обеспечению сквозной операционной эффективности. Для преодоления технологических и информационных разрывов, описанных в предыдущем разделе, и обеспечения сквозной эффективности горнодобывающего предприятия, предлагается концепция построения единого информационного пространства. В рамках данного подхода MES-система трансформируется из инструмента пассивного учета в активный оркестратор данных, связывающий уровень АСУ ТП (SCADA стационарных объектов и бортовые системы мобильной техники) с бизнес-уровнем (ERP).

Архитектура интеграции на базе Единого пространства имен (UNS). Традиционная жесткая иерархическая модель ISA-95 часто блокирует горизонтальный оперативный обмен данными между разнородными системами. Для реализации концепции «Индустрия 4.0» в условиях открытого рудника предлагается переход к событийно-ориентированной архитектуре, основанной на Едином пространстве имен (UNS) и использовании промежуточного программного слоя.

Ключевым техническим решением является использование легковесных протоколов обмена сообщениями по модели «издатель-подписчик» (например, MQTT). Это позволяет технологически развязать источники данных - датчики SCADA, ПЛК дробилок, GPS-трекеры самосвалов и их потребителей (модули MES, ERP, системы предиктивной аналитики). Такой подход обеспечивает необходимую гибкость и масштабируемость, а также позволяет реализовать буферизацию данных на борту мобильной техники в зонах отсутствия устойчивой радиосвязи.

Концептуальная схема предлагаемой архитектуры интеграции представлена на рисунке 4. В этой модели данные очищаются, нормализуются и контекстуализируются перед попаданием в аналитические модули MES.

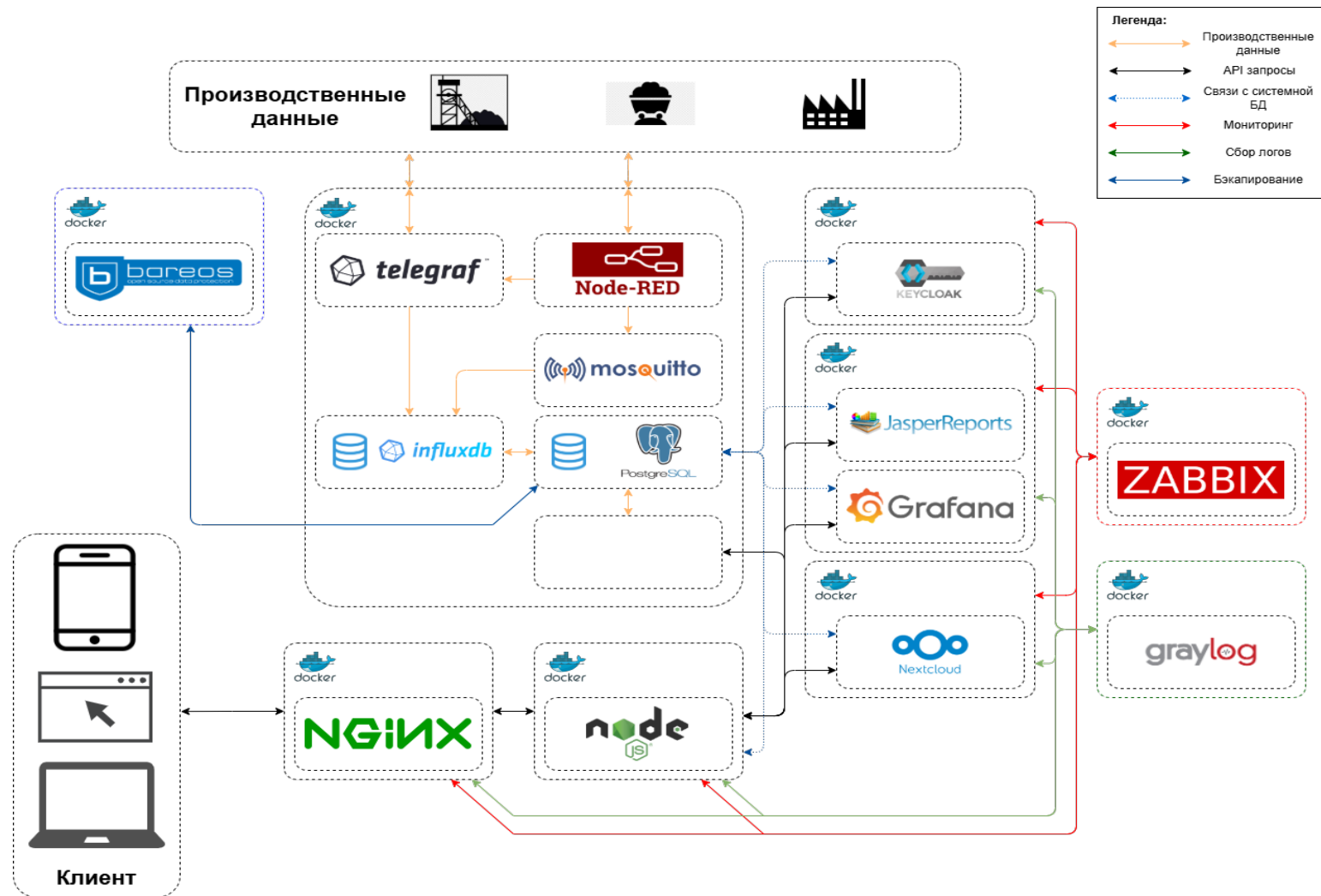


Рис. 4 - Концептуальная архитектура интеграции разнородных систем цифрового рудника на базе промежуточного ПО (составлено автором).

Сценарии сквозной оптимизации. Практическая ценность глубокой интеграции MES и SCADA раскрывается в сценариях автоматического реагирования на стохастические отклонения. Рассмотрим пример сквозной оптимизации технологической связки горнотранспортный комплекс – дробильно-сортировочный комплекс».

Проблема: Вариативность физико-механических свойств руды (например, попадание негабарита или особо крепкой руды из зоны геологического нарушения), не отраженная в оперативном плане.

- Реакция в традиционной системе: Самосвал доставляет крепкую руду в приемный бункер дробилки. SCADA дробильного комплекса фиксирует критическую перегрузку главного привода и аварийно останавливает оборудование. Это приводит к простоя дробилки и образованию очереди из самосвалов (снижаются показатели готовности A и Производительности P).

- Реакция в интегрированной системе:

1. Предиктивное распознавание: SCADA дробилки фиксирует начальный тренд на рост потребляемой мощности привода, еще не достигающий аварийных значений.

2. Контекстный анализ: MES-система коррелирует этот тренд с данными системы диспетчеризации (FMS) о том, с какого экскаватора прибыл последний разгрузившийся самосвал. Выявляется источник проблемного сырья.

3. Упреждающее воздействие: MES-система автоматически генерирует каскад управляющих команд для адаптации процесса. Во-первых, в SCADA дробильного комплекса отправляется новая уставка на превентивное снижение скорости питателя для сглаживания ожидаемой пиковой нагрузки на привод. Во-вторых, оператор поста управления приемным бункером получает визуальное/звуковое уведомление о

прибытии "сложного" самосвала для приведения в готовность стационарного гидромолота на случай фиксации негабаритных кусков.

4. Результат: Дробильный комплекс продолжает работу в штатном режиме, аварийный простой предотвращен, сквозная производительность цепочки сохранена.

Прогноз влияния на показатели эффективности. Внедрение предложенных архитектурных подходов и сценариев управления напрямую влияет на компоненты формулы ОЕЕ за счет перехода от реактивной модели управления к предиктивной.

Расчеты и анализ проектов цифровизации на предприятиях-аналогах показывают, что эффект от интеграции не проявляется мгновенно. Процесс выхода на целевые показатели проходит стадии стабилизации, оперативной оптимизации и зрелости. В таблице 2 представлена прогнозируемая динамика ключевого показателя ОЕЕ горнотранспортного комплекса, основанная на обобщении усредненных отраслевых данных и бенчмарков. Таблица 2. Прогнозная динамика ОЕЕ при внедрении интегрированной системы MES/SCADA (на основе анализа отраслевых данных) [2; 5]

| Период внедрения | ОЕЕ базовый (%, средний) | ОЕЕ целевой (%, прогноз) | Снижение внеплановых простоев (%) |
|--|-----------------------------|-----------------------------|---|
| Квартал 1 (Адаптация и стабилизация) | 64.5 | 68.2 | 7.5 |
| Квартал 2 (Оперативная оптимизация) | 64.5 | 75.4 | 14.0 |
| Квартал 3 (Зрелость и предиктивный анализ) | 64.5 | 81.1 | 22.5 |

Как видно из таблицы, в первом квартале прирост ОЕЕ умеренный (+3.7 п.п.), что связано с периодом адаптации процессов и отладкой качества данных. Основной рост эффективности прогнозируется во втором и третьем кварталах, по мере накопления исторических данных для моделей машинного обучения и полномасштабного запуска алгоритмов

автоматической диспетчеризации. Достижение показателя ОЕЕ на уровне выше 80% к концу первого года эксплуатации системы свидетельствует о значительном потенциале повышения рентабельности актива.

Заключение. В рамках проведенного исследования проанализирована проблематика оперативного управления на крупных открытых медных рудниках. Установлено, что ключевым барьером для повышения сквозной операционной эффективности является «лоскутная автоматизация» - фрагментарность информационных систем горнотранспортного комплекса (циклические процессы) и передела подготовки руды (поточные процессы). Изолированное функционирование систем SCADA и FMS не позволяет оперативно реагировать на стохастические изменения свойств руды и состояния оборудования, что ведет к потерям производительности.

В качестве решения предложены концептуальные подходы к построению интегрированной многоуровневой системы управления. Разработанная архитектура, основанная на принципах единого пространства и использовании промежуточного программного слоя для декупляции источников данных, позволяет преодолеть ограничения жесткой иерархической модели ISA-95 в специфических условиях открытой добычи (проблемы связи, мобильность активов).

Практическая значимость работы заключается в демонстрации конкретных сценариев сквозной оптимизации (на примере предотвращения аварийных простоев дробильного комплекса за счет адаптивной диспетчеризации самосвалов). Прогнозное моделирование, базирующееся на анализе отраслевых бенчмарков, показывает, что внедрение предложенных архитектурных решений позволяет обеспечить плавный рост интегрального показателя ОЕЕ горнотранспортного комплекса с базовых 65% до целевого уровня 80%+ в течение первого года эксплуатации системы.

Перспективы дальнейших исследований связаны с развитием предложенной архитектуры в направлении углубленной предиктивной аналитики. Созданное единое информационное пространство служит необходимым фундаментом для внедрения моделей машинного обучения (AI/ML), направленных на прогнозирование остаточного ресурса оборудования и динамическую оптимизацию рудопотоков в реальном времени.

Библиографический список

1. ГОСТ Р МЭК 62264-1-2014. Интеграция систем управления предприятием. Часть 1. Модели и терминология. – М.: Стандартинформ, 2015. – 56 с.
2. Клебанов, А. Ф. Автоматизация и роботизация открытых горных работ: опыт цифровой трансформации / А. Ф. Клебанов // Горная промышленность. – 2020. – № 1 (149). – С. 8–12.
3. Темкин, И. О. Интеллектуальные системы управления в горном деле: учебное пособие для вузов / И. О. Темкин. – М.: Горная книга, 2010. – 202 с.
4. Шваб, К. Четвертая промышленная революция / К. Шваб. – М.: Эксмо, 2016. – 208 с.
5. Elevli, S. Performance measurement of mining equipment by utilizing OEE / S. Elevli, B. Elevli // Acta Montanistica Slovaca. – 2010. – Vol. 15, № 2. – P. 95–101.
6. Nakajima, S. Introduction to TPM: Total Productive Maintenance / S. Nakajima. – Cambridge: Productivity Press, 1988. – 129 p.
7. ANSI/ISA-95.00.01-2010. Enterprise-Control System Integration. Part 1: Models and Terminology. – Research Triangle Park: ISA, 2010. – 129 p.

8. MESA International. MESA Model for Manufacturing Execution Systems [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.mesa.org> (дата обращения: 10.11.2025).