

ПРИМЕНЕНИЕ ЦИФРОВОЙ ПЛАТФОРМЫ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЕМ ПРЕДПРИЯТИЙ ГОРНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Ф.С. НЕПША, М.И. КРАСИЛЬНИКОВ, К.В. ПЕРЕВАЛОВ (ООО «ИНТЭЛАБ»)



В статье рассматриваются вопросы применения цифровой платформы для интеллектуальной распределенной энергетики в рамках предприятий горной промышленности. Приведены направления развития угольной промышленности, для которых целесообразно использование платформенного подхода. С учетом внедрения платформы в статье рассмотрена структура угледобывающего предприятия с интеграцией распределенных энергоресурсов (РЭР) и возможные сценарии использования платформы на предприятии минерально-сырьевого комплекса. Рассмотрены основные направления использования цифровых двойников для повышения энергоэффективности угледобывающего предприятия. Показаны стороны, заинтересованные в использовании цифровой платформы для автоматизации процессов горного производства. В заключение сделаны выводы о целесообразности использования цифровой платформы для реализации концепции «Индустрия 4.0».

Ключевые слова: горная промышленность; распределенная энергетика; цифровой двойник; Индустрия 4.0; Energy 4.0; цифровая платформа.

ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на мировую тенденцию к отказу от углеводородного топлива в пользу возобновляемой энергетики, спрос на уголь и развитие угольной промышленности сохранится в ближайшие десятилетия. Программа развития угольной промышленности России на период до 2035 г. [1] предполагает изменение спроса на уголь к 2035 г. от $-1,16\%$ (консервативный сценарий) до $+13,95\%$ (оптимистический сценарий). При этом должны быть обеспечены:

- освоение технологии добычи угля без постоянного присутствия людей в очистных и подготовительных забоях на базе современной комплексной механизации;
- разработка и внедрение инновационных технологий с элементами промышленной стратегии «Индустрия 4.0» на базе цифровых платформ и технологий;
- организация взаимодействия науки и производства для укрепления научно-технической базы угольных компаний и отраслевых научных центров, обеспечивающих непрерывность процессов технологической модернизации производства в соответствии с передовыми мировыми практиками;
- развитие малой генерации, работающей на извлеченном из угольных пластов метане;

- развитие промышленного интернета вещей при подземном способе добычи угля (формирование единой информационно-управляющей инфраструктуры для мониторинга и управления технологическим оборудованием в шахте, обеспечения связи и сигнализации, наблюдения, оповещения и поиска людей, застигнутых аварией).

При анализе мирового опыта цифровизации горных предприятий становится ясно, что наибольших успехов в этой области достигли китайские ученые. Они рассматривают 3 стадии развития угольной промышленности 3.0, 4.0, 5.0 [2]. На стадии 3.0 (горизонт до 2025 года) планируется снизить количество персонала и негативное влияние промышленности на окружающую среду. На перспективу до 2035 года планируется достигнуть состояния практически безлюдной угольной шахты с минимизацией выбросов вредных веществ в атмосферу. За горизонтом 2035 года планируется достигнуть цели «нет угля на поверхности, нет персонала под землей, отсутствие выбросов и вреда окружающей среде».

Для достижения поставленной цели цифровая экономика предполагает использование цифровых платформ, призванных ускорить темпы цифровизации и повысить эффективность производства. Вопросами разработки таких платформ для горных предприятий ши-

роко занимаются в КНР. Так, в публикации [3] рассматривается необходимость создания цифровой платформы для проектирования цифровых угольных шахт. Отмечается, что процесс проектирования сопровождается обменом большим количеством документации, в результате возникают проблемы с версионностью документации, возможными ошибками. Это существенно влияет на быстроту реализации концепции “Индустрия 4.0”. В работе [4] предложена динамическая цифровая платформа, реализующая принципы неразрушающего контроля качества анкеровки механизированных крепей. Структура цифровой платформы, необходимой для организации сбора, анализа и передачи данных, а также организации прикладных систем управления, предложена в [5]. Прикладные системы автоматизации, используемые при управлении выемочным участком, рассмотрены в работе [6]. Предсказано широкое распространение IoT-устройств на угольной шахте будущего. Тем не менее, количество исследований в области интернета вещей угольных шахт весьма ограничено.

В работе [7] обозначены основные задачи повышения эффективности электроснабжения угольных шахт. Отмечено, что при решении этих задач должны быть задействованы современные технологии, такие как IoT (интернет вещей) и BIG DATA (большие данные). Кроме того, все большее применение на предприятиях минерально-сырьевого комплекса находит распределенная энергетика, в частности известны следующие проекты: 1) внедрение мобильных солнечных электростанций (СЭС) компании SunShift (Австралия) на угольных разрезах [8]; 2) внедрение карьерных самосвалов с электродвигателями и последующим развитием инфраструктуры заряда электротранспорта в качестве одного из вариантов диверсификации бизнеса; 3) внедрение гибридной солнечной электростанции 36 МВт на золотодобывающей шахте на юго-западе Мали с использованием all-sky-камер [9] для повышения качества прогноза солнечной генерации и снижения расхода топлива на дизель-генераторных установках.

С учетом вышесказанного можно заключить, что значимой составляющей в создании цифрового горного предприятия является цифровизация энергоснабжения при внедрении распределенной генерации, накопителей энергии и соответствующих систем управления. В таком случае цифровизацию

энергоснабжения можно выделить в отдельный кластер “Индустрии 4.0”, именуемый Energy 4.0 [10]. Суть Energy 4.0 состоит в эффективном использовании распределенных энергоресурсов с применением современных методов оптимизации и прогнозирования при использовании технологий искусственного интеллекта и больших данных. Имплементация Energy 4.0 на практике призвана принести дополнительное снижение удельных затрат электроэнергии на величину до 30%. В связи с этим становится актуальной разработка цифровых платформ для электроэнергетики, обеспечивающих снижение затрат на цифровизацию систем энергоснабжения промышленных предприятий. Известны цифровые платформы Powerpeers (Netherlands), Sonnen Community (Germany) и др. [11], позволяющие оптимизировать процесс интеграции и эксплуатации объектов малой энергетики. В России также ведется разработка цифровой платформы для управления интеллектуальной распределенной энергетикой “√Платформа” (“А-Платформа”). “А-Платформа” предназначена для разработки, внедрения и исполнения систем управления объектами интеллектуальной распределенной энергетикой (ИРЭ) [12, 13].

В связи с вышесказанным вопросы применения “А-Платформы” являются актуальными для современных горнодобывающих предприятий. В настоящей статье рассмотрены вопросы устойчивого развития инфраструктуры горнодобывающих предприятий, возможные сценарии использования цифровой платформы, вопросы создания цифровых двойников и определен состав участников экосистемы платформы для горной промышленности.

НАПРАВЛЕНИЯ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ ИНФРАСТРУКТУРЫ ГОРНОДОБЫВАЮЩЕГО ПРЕДПРИЯТИЯ

При реализации концепции “Индустрия 4.0” необходимо учитывать следующие направления устойчивого развития инфраструктуры горнодобывающего предприятия:

- **Повышение управляемости и наблюдаемости процессов с последующим построением цифровых двойников и эргономичных человеко-машинных интерфейсов.** Это направление имеет особое значение для создания безлюдной угольной шахты и совершенствования подходов к проектированию энергоэффективных горных предприятий.

- **Учет взаимосвязи технологических процессов, процессов передачи и распределения электроэнергии при построении систем оптимального управления производственными процессами, включая управление электротехническим комплексом.** Поскольку потребление горнодобывающего предприятия определяется технологическим процессом, при управлении системой энергоснабжения становится целесообразным учитывать особенности технологического процесса для повышения качества и энергоэффективности энергоснабжения. Интерес представляет реализация интеллектуальных алгоритмов управления устройствами компенсации реактивной мощности и устройствами FACTS (D-STATCOM, ДКИН, ФКУ).
- **Внедрение объектов малой генерации на шахтном метане на разных стадиях обработки угольных пластов.** В ходе технологического процесса выделяется большое количество шахтного метана, который в большинстве случаев выбрасывается в атмосферу. Учитывая, что шахтный метан определяет 17 % вклада в выбросы парниковых газов, его утилизация путем преобразования в электрическую и тепловую энергию (когенерация) имеет ключевое значение не только для повышения эффективности предприятия, но и для глобальной экологии.
- **Применение возобновляемых источников энергии, в том числе на рекультивируемых землях.** На угледобывающих предприяти-

ях, размещенных на территориях с высоким потенциалом возобновляемых источников энергии, целесообразно применение генерации на ВИЭ для минимизации выбросов в атмосферу. Такой подход позволяет приблизиться к основной цели “Индустрии 5.0”, а именно исключению выбросов в атмосферу, в том числе при производстве электрической энергии, потребляемой угольной шахтой.

- **Диверсификация бизнеса угледобывающих предприятий.** Бизнес угледобывающих предприятий может быть диверсифицирован при развертывании на предприятии центров обработки данных [14], а также при создании собственной инфраструктуры электрозаправочных станций, что особенно актуально, учитывая, что крупные горнодобывающие предприятия размещаются вблизи небольших городов, расположенных на трассах регионального и федерального значения.
- **Создание систем управления для минимизации платы за энергоснабжение:**
 - применение современных технологий накопления электрической энергии (в т.ч. для аварийного электроснабжения);
 - оптимальное управление потребителями регуляторами;
 - участие в оказании услуг по управлению спросом.

Вышеуказанные направления позволяют сформировать структурную схему угледобывающего предприятия с интеграцией распределенных энергоресурсов (рис. 1).



Рис. 1. Структурная схема угледобывающего предприятия с интеграцией распределенных энергоресурсов

Структурная схема угледобывающего предприятия с распределенными энергоресурсами включает следующие элементы:

1. **Питающая сеть**, обеспечивающая необходимую надежность электроснабжения.
2. **Возобновляемые источники энергии**. В зависимости от региона могут быть представлены солнечными электростанциями (Якутия), ветроэлектростанциями.
3. **Накопители энергии**. Могут рассматриваться в качестве альтернативы дизельным генераторам, которые применяются в качестве автономного независимого источника питания. Однако накопители, в отличие от дизельных генераторов, могут быть использованы для снижения платы за электроэнергию и получения дополнительного дохода при участии в управлении спросом.
4. **Нагрузка угольной шахты**. Нагрузка угольной шахты представлена технологическим оборудованием, размещенным в подземной и наземной частях угольной шахты. В наземной части системы электроснабжения размещается оборудование вентиляции, клетевых подъемов, оборудование административного комплекса. Подземные электроприемники угольных шахт представлены оборудованием выемочного участка угольной шахты (очистные комбайны, конвейеры, маслонасосы, перегружатели и пр.).
5. **Когенерация на шахтном метане**, обеспечивающая преобразование шахтного метана в тепловую и электрическую энергию при минимизации выбросов парниковых газов в атмосферу.
6. **SCADA-система**, обеспечивающая сбор и передачу данных, а также формирование управляющих воздействий на оборудование.
7. **Автоматизированное рабочее место (АРМ) персонала**, позволяющее персоналу следить за технологическим процессом и осуществлять его корректировку при необходимости.
8. **Облачный уровень**, включающий компоненты цифровой платформы, реализующий функции работы с большими данными, прогнозирования и формирования оптимальных управляющих воздействий.

СЦЕНАРИИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПЛАТФОРМЫ НА ГОРНОДОБЫВАЮЩЕМ ПРЕДПРИЯТИИ

В рамках представленной структуры угледобывающего предприятия с интеграцией РЭР цифровая платформа может

быть использована при реализации следующих бизнес-сценариев:

1. **Управление спросом на электроэнергию**. Управление спросом на электроэнергию конечным потребителем относительно нормального профиля нагрузки при определенных экономических сигналах рынка электроэнергии с получением выручки за осуществление такого снижения потребления. Управление спросом широко распространено в мире, так как позволяет обеспечить надежность электроснабжения, повысить эффективность интеграции возобновляемых источников энергии и повысить конкуренцию на рынке электроэнергии. На горнодобывающих предприятиях присутствуют потребители-регуляторы, которые могут быть задействованы для снижения потребления при возникновении события управления спросом. Такими потребителями являются водоотливные насосы (емкость водосборника рассчитана на максимальный приток воды на время до 4 часов, поэтому отключение водоотливов на этот промежуток времени не приведет к нарушению технологического процесса), вентиляторы главного проветривания (с частотным приводом), клетевые подъемы. В среднем такая нагрузка составляет 1-2 МВт.

Платформа обеспечивает автоматизацию процессов управления спросом: обмен информацией, планирование и реализацию событий управления спросом, выбор оптимального алгоритма управления с учетом особенностей технологического процесса.

При управляемой нагрузке в 1,5 МВт экономический эффект может составить до 475 тыс. рублей в месяц (при стоимости оказания услуги 350 тыс. руб./МВт·мес и при необходимости снижения нагрузки не более чем 5 раз в месяц).

2. **Коммерческая диспетчеризация потребителей (EMS)**. Большинство предприятий минерально-сырьевого комплекса приобретают электроэнергию по двухставочному тарифу. В связи с этим присутствуют следующие задачи коммерческой диспетчеризации:

- **Снижение платы за мощность**. Объем покупной (потребленной) мощности определяется как среднее за месяц из значений потребления предприятия в часы пиковой нагрузки с максимальным совокупным потреблением по субъекту Рос-

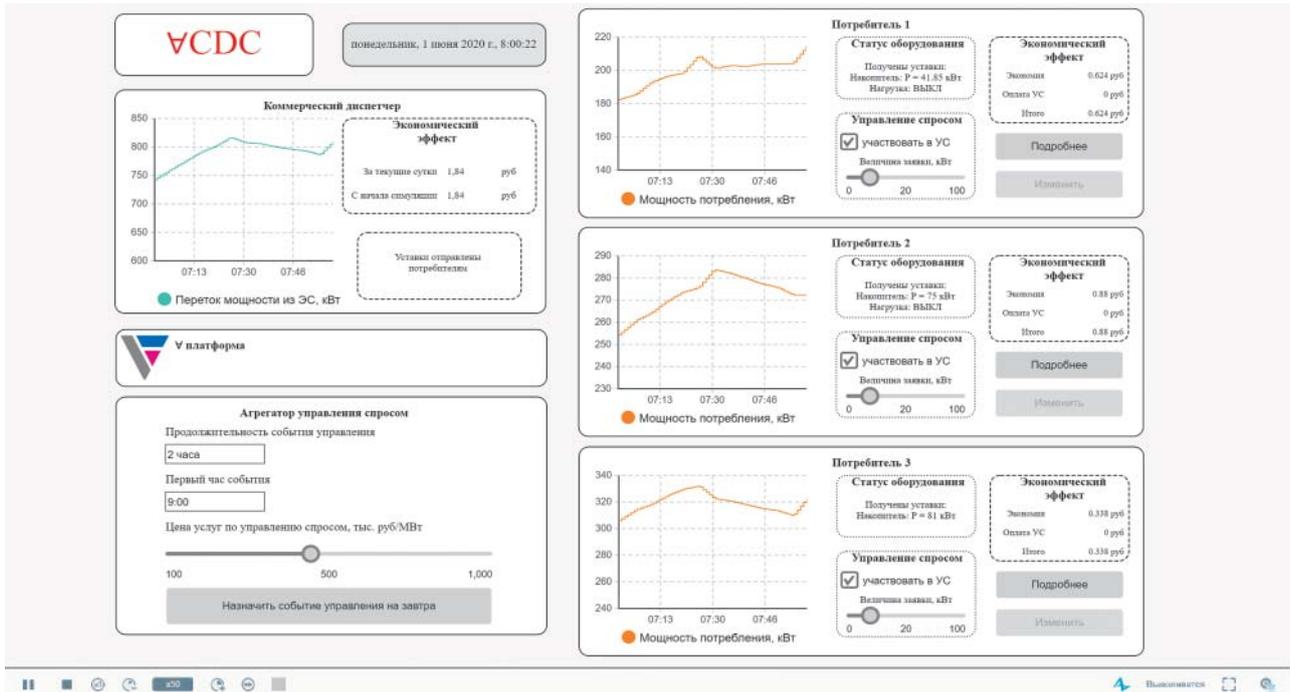


Рис. 2. Имитационная модель исполнения сценария коммерческой диспетчеризации потребителей

сийской Федерации, в котором находится предприятие. Поэтому целесообразно управлять потребителями-регуляторами и распределенными энергоресурсами так, чтобы снизить объемы потребления в час пиковой нагрузки.

- **Снижение платы за сетевую мощность.** Объем сетевой мощности определяется как среднее за месяц из максимальных значений потребления предприятия в часы пиковой нагрузки, которые ежегодно определяются Системным оператором. Например, для первой ценовой зоны в марте 2021 года такими часами являются часы с 8-го по 21-й по московскому времени. В связи с этим целесообразно максимально выравнять потребление в часы пиковой нагрузки.
- **Снижение объемов покупки и продажи отклонений на балансирующем рынке** за счет формирования оптимальных заявок на "рынок на сутки вперед" при использовании современных методов прогнозирования нагрузки и анализа ценовых сигналов на оптовом рынке.

Решение вышеуказанных задач возможно с использованием платформы, которая имеет в своем составе модули для прогнозирования потребления/генерации электроэнергии, наступления часа пико-

вой нагрузки, цены электроэнергии. Кроме того, присутствуют модули, позволяющие формировать стратегию управления распределенной генерацией и потребителями-регуляторами с целью оптимизации графика потребления электрической энергии.

3. Специальные сценарии управления технологическими процессами.

Дополнительно в составе платформы могут быть предусмотрены компоненты, позволяющие автоматизировать реализацию сценариев, связанных с технологическим процессом. В частности, возможно применение платформы для оптимизации технологического процесса, координации режимов работы оборудования, выполнения предиктивной диагностики оборудования.

Эффективность реализации сценария управления спросом на электроэнергию и коммерческой диспетчеризации потребителей может быть оценена предварительно на базе имитационных моделей в среде Anylogic. На рис. 2 представлен фрагмент имитационной модели исполнения сценария коммерческой диспетчеризации потребителей, позволяющей моделировать режим работы промышленного предприятия и задействовать управляемую нагрузку и накопитель электрической энергии для снижения платы за электроэнергию и получения дохода от участия в управлении спросом на электроэнергию.



Рис. 3. Организация управления на основе цифрового двойника (включая задачи цифрового горного предприятия)

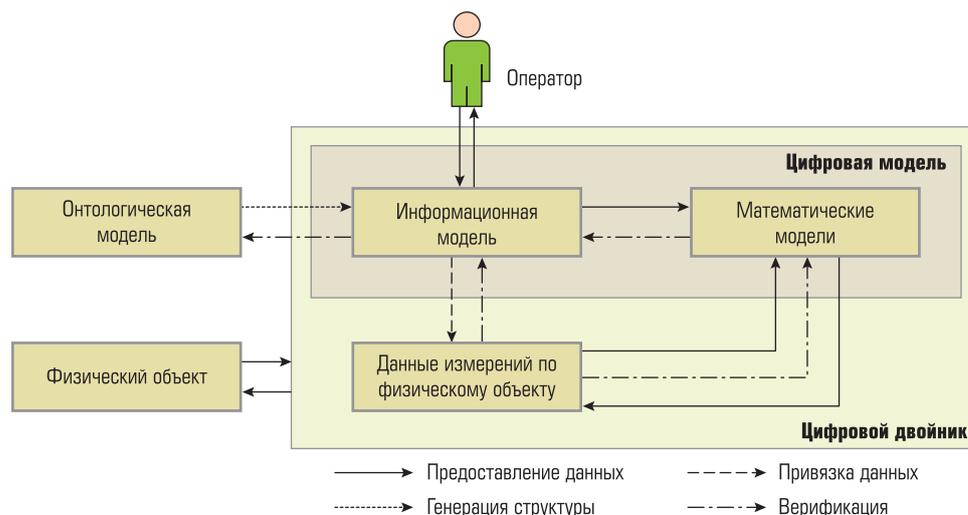
Подобные модели могут быть разработаны на этапе предварительной оценки технико-экономической эффективности цифровой платформы на горнодобывающем предприятии.

СОЗДАНИЕ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ НА БАЗЕ ПЛАТФОРМЫ

Для эффективной имплементации бизнес-сценариев целесообразно применение цифровых двойников, которые могут быть использованы на горнодобывающем предприятии следующим образом (рис. 3):

- 1. Виртуальная апробация и оценка проектных решений (поддержка принятия решений).** Проектная организация использует компоненты цифровых двойников – цифровые модели для оценки проектных решений на этапе моделирования с учетом продолжительности жизненного цикла угольной шахты, которые на этапе внедрения применяются для создания цифровых двойников. При этом на этапе проектирования могут быть смоделированы внештатные ситуации, проведена оценка безопасности предприятия и предусмотрены соответствующие меры.
- 2. Калибровка и верификация моделей и управляющих алгоритмов.** Цифровые двойники могут быть использованы для совершенствования алгоритмов управления оборудованием, особенно на первых этапах ввода шахты в эксплуатацию. В таком случае по мере накопления данных выполняется оптимизация алгоритмов управления с использованием методов машинного обучения, оптимизируются процессы запуска и остановки оборудования, корректируются алгоритмы управления частотными преобразователями для повышения эффективности электропривода, регулируются скорости подачи комбайна для достижения оптимальных энергетических параметров.
- 3. Обучение и виртуальная тренировка персонала.** В сочетании с VR-технологиями персонал может проходить стажировку на предприятии, будучи на поверхности, что исключает возникновение внештатных ситуаций и позволяет оптимизировать процесс ремонта оборудования.
- 4. Предсказательный мониторинг состояния оборудования и определение потребности в техническом обслуживании.** За счет применения методов машинного обучения обеспечивается оптимизация жизненного цикла горношахтного оборудования, сокращение простоя оборудования и увеличение коэффициента использования машинного времени оборудования.
- 5. Оценка и прогнозирование генерации, потребления, хранения энергоресурсов во всех аспектах.** Позволяет обеспечить эффектив-

Рис. 4.
Взаимосвязь онтологической и информационной моделей цифрового двойника физического объекта



- ную интеграцию распределенных энерго-ресурсов в структуру горнодобывающего предприятия и снижение платы за электроэнергию при внедрении современных технологий.
- Планирование горно-подготовительных и очистных работ (ВИМ технология).** Внедрение ВИМ-технологий позволяет с использованием цифрового двойника месторождения оптимизировать перемещение оборудования и процесс добычи угля. Все это дополнительно обеспечивает повышение энергоэффективности.
 - Оценка и прогнозирование пропускной способности сегментов энергосетей.** Актуально на этапе проектирования угольной шахты для обеспечения оптимального подбора экономии и сокращения капитальных затрат на приобретение оборудования.
 - Оценка производительности подсистем и предприятия в целом, включая финансовые показатели.** Платформа должна позволять агрегировать данные от разных подсистем с целью оценки финансово-экономических показателей и оптимизации технологического процесса.

Опыт создания цифровых двойников на производстве показывает, что для обеспечения интероперабельности цифровых моделей и описания процессов целесообразно использовать онтологический подход к формированию информационного обеспечения. В основе данного подхода лежит построение онтологии, представляющей собой формальное описание сущностей, включая их свойства и отношения между ними [15, 16]. Применение такого подхода обуславливает единство информационного обеспечения цифрового двойника физического объекта за счет качественного описания семантики процессов взаимодействия элемен-

тов системы управления и обеспечения совместности стандартов для разных предметных областей. Структурная схема, поясняющая взаимосвязь онтологической и информационной моделей цифрового двойника физического объекта в контексте онтологического подхода, представлена на рис. 4.

Из рис. 4 видно, что онтологическая модель является основой для генерации структуры информационной модели, в которой представлены различные параметры, характеризующие физический объект. При этом информационная модель объекта служит базой для верификации онтологической модели. В свою очередь информационная модель обеспечивает привязку данных измерений по физическому объекту и является источником мастер-данных для математической модели. При этом данные измерений и результаты работы математической модели позволяют верифицировать информационную модель. Данные измерений поступают в математическую модель для обеспечения ее работы и верификации. Оператор осуществляет калибровку цифрового двойника и ввод данных в информационную модель. Информационная и математическая модели в совокупности представляют цифровую модель, которая не имеет информационной связи с физическим объектом и предназначена для моделирования различных ситуаций. При совмещении цифровой модели с данными, получаемыми в режиме реального времени, формируется цифровой двойник. Вышеуказанный подход позволяет с минимальными затратами вносить изменения в информационное обеспечение платформы, что с учетом стремительного развития горно-шахтного оборудования позволяет снизить затраты на формирование АСУ ТП.

ЭКОСИСТЕМА ЦИФРОВОЙ ПЛАТФОРМЫ ДЛЯ ГОРНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Создание платформы сопряжено с формированием экосистемы платформы, обеспечивающей повышение эффективности взаимодействия субъектов с разноречивыми интересами. В таком случае платформа должна обеспечивать уровень доверия, для того чтобы служить в качестве среды взаимодействия между заинтересованными сторонами.

При рассмотрении горной промышленности можно выделить следующие заинтересованные стороны:

1. **Научно-исследовательские институты и ВУЗы** заинтересованы в развитии научно-технической базы для угольной промышленности и подготовке кадров, обладающих цифровыми компетенциями. При этом целью их деятельности является стимулирование импортозамещения за счет собственных разработок. Применение платформенного подхода позволяет облегчить доступ к получению данных, необходимых для проведения исследований, и оптимизировать процесс планирования дальнейших исследований на основе опросов и анализа данных, собираемых на платформе.
2. **Разработчики программного обеспечения** заинтересованы в сокращении времени вывода приложения на рынок и трудозатрат на его разработку. Применение платформенного подхода позволяет оптимизировать работу с информационным обеспечением, гарантировать совместимость приложений разных разработчиков, а также сократить время внедрения новых приложений на предприятии.
3. **Энергоаудиторские организации и надзорные органы** заинтересованы в получении достоверных данных о потреблении энерго-ресурсов и сокращении времени на получение и анализ данных. Цифровая платформа призвана оптимизировать процесс получения доступа к информации при соблюдении требований информационной безопасности.
4. **Проектные организации** заинтересованы в использовании платформы для формирования цифровых моделей на этапе проектирования и их последующем преобразовании в цифровые двойники на этапе внедрения. Необходимо отметить, что при

проектировании горных предприятий активно внедряются BIM-технологии, которые могут быть интегрированы со SCADA-системами для повышения наблюдаемости технологических процессов и повышения безопасности.

5. **Горнодобывающие предприятия** заинтересованы в снижении удельных затрат на добычу угля, повышении безопасности производства и проектировании шахт, обладающих высокой степенью энергоэффективности и автоматизации. При этом программное обеспечение, используемое для управления технологическими процессами, должно быть эргономичным и обеспечивать быстрый доступ к любым данным.

Таким образом, количество субъектов экосистемы предприятий горной промышленности значительно и требует формирования цифровой платформы, обеспечивающей имплементацию современных технологий и позволяющей достичь синергии во взаимодействии организаций с разными интересами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Цифровые платформы позволяют сократить затраты на создание систем автоматического управления на промышленном предприятии. Принимая во внимание высокую долю импортного оборудования на горнодобывающих предприятиях, возникает проблема их интеграции в отечественные системы сбора, анализа и передачи данных, в связи с чем вопрос создания и использования цифровых платформ на горнодобывающих предприятиях является актуальным.

“А-Платформа”, предназначенная, главным образом, для интеллектуальной распределенной энергетики, может рассматриваться как одно из решений для повышения энергоэффективности горнодобывающего предприятия путем имплементации различных сценариев при внедрении накопителей электрической энергии, малой генерации, возобновляемых источников энергии.

При этом важно обеспечить синергию разрабатываемых платформенных решений в электроэнергетике и горнодобывающей промышленности для сокращения суммарных затрат на создание цифровых горных предприятий и поэтапной реализации концепции “Индустрия 4.0”.

Работа, по результатам которой написана статья, выполнена при поддержке гранта на проведение научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ №34/19 гр. от 29 ноября 2019 г. между Фондом поддержки проектов Национальной технологической инициативы и акционерным обществом "РТСофт".

Список литературы

1. *Распоряжение* Правительства РФ от 13.06.2020 № 1582-р "Об утверждении Программы развития угольной промышленности России на период до 2035 года" // СПС КонсультантПлюс URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_355241/ (дата обращения: 15.07.2020).
2. *G. Wang, Y. Xu, H. Ren*, Intelligent and ecological coal mining as well as clean utilization technology in China: Review and prospects, *Int. J. Mining Sci. Technol.* 2019, b. 29(2), p. 161-169.
3. *Wang J.; Bi L.; Wang L.; Jia M.; Mao D.A.* Mining Technology Collaboration Platform Theory and Its Product Development and Application to Support China's Digital Mine Construction. *Appl. Sci.* 2019, b. 9, p. 5373.
4. *Y. Hao, Y. Wu, Ranjith P. G., K. Zhang, H. Zhang, Y. Chen, M. Li, P. Li*, New insights on ground control in intelligent mining with Internet of Things, *Computer Communications*, Volume 150, 2020 Pages 788-798, ISSN 0140-3664. <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2019.12.032>
5. *Y. Wu, M. Chen, K. Wang, G. Fu*, A dynamic information platform for underground coal mine safety based on internet of things, *Saf. Sci.* 2019, b. 113, p. 9-18.
6. *S.S. Peng, F. Du, J. Cheng, Y. Li*, Automation in U.S. longwall coal mining: A state-of-the-art review, *Int. J. Mining Sci. Technol.* 2019, b. 29(2), p. 151-159.
7. *Nepsha F., Belyaevsky R., Efremenko V., Varnavskiy K.* Modern Problems of Increasing Coal Mines Power Supply Efficiency, The Fourth International Innovative Mining Symposium, E3S Web Conf. 2019, p. 105-106.
8. *SunSHIFT* is the world's first pre-fabricated modular and movable solar power plant for large-scale, on-grid and off-grid electricity generation // *SunSHIFT* URL: <https://www.sunshift.com/> (дата обращения: 05.04.2021).
9. *MALI: Reuniwatt to build weather forecasting system for Fekola solar hybrid power plant* // *Afrik21* URL: <https://www.afrik21.africa/en/mali-reuniwatt-to-buid-weather-forecasting-system-for-fekola-solar-hybrid-power-plant/> (дата обращения: 05.04.2021).
10. *ENERGY 4.0: How digital revolution is shaping the future of electricity* // *DEXMA Energy Intelligence* URL: <https://www.dexma.com/blog-en/energy-4-0-how-digital-revolution-is-shaping-the-future-of-electricity/> (дата обращения: 05.04.2021).
11. *Kloppenburg S. and Boekelo M.* Digital platforms and the future of energy provisioning: Promises and perils for the next phase of the energy transition. *Energy Research & Social Science.* 2019, b. 49, p. 68-73.
12. *Небера А.А., Веруго А.Р., Ненша Ф.С.* Цифровая платформа как основа для разработки систем интеллектуального управления децентрализованной распределенной энергетикой // *Электрооборудование: эксплуатация и ремонт.* 2020, №8, с. 34-40.
13. *Ковалёв С.П., Небера А.А., Губко М.В.* Цифровая платформа для реализации автоматизированных систем управления распределенными энергоресурсами // *Проблемы управления.* 2020, № 6, с. 57-70.
14. *К. Varnavskiy, F. Nepsha, R. Kostomarov, Chen Q.G.* Underground hard-coal mine as a hosting facility for a data processing center infrastructure. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Volume 684, XX Conference of PhD Students and Young Scientists 14-16 October 2020, Poland.
15. *Ненша Ф.С., Андриевский А.А., Красильников М.И.* Онтология как основа для создания цифровых двойников объектов управления интеллектуальной распределенной энергетикой, 2021, *Автоматизация в промышленности* № 1. – DOI: 10.25728/avtprom. 2021.01.04.
16. *Андрюшкевич С.К., Ковалев С.П., Нефедов Е.И.* Разработка цифрового двойника энергетической системы на основе онтологической модели // *Автоматизация в промышленности.* 2020, № 1, с. 51-56.

ООО "ИНТЭЛАБ"

Непша Федор Сергеевич – канд. техн. наук, аналитик группы развития платформенных решений,
Красильников Михаил Иванович – инженер группы развития программных продуктов и сервисов,
Перевалов Кирилл Владимирович – руководитель группы развития программных продуктов и сервисов.