Русскоязычный перевод статьи DOI: 10.17580/em.2020.02.12 *

Концепция цифровых двойников для разработки симуляторов обучения операторов техники для горнодобывающей и перерабатывающей промышленности

И.И. БЕЛОГЛАЗОВ ✉, П.А. ПЕТРОВ, В.Ю. БАЖИН
Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия
✉ *beloglazov@spmi.ru*

Ссылка для цитирования оригинальной статьи: Beloglazov, I.; Petrov, P.; Bazhin, V. The concept of digital twins for tech operator training simulator design for mining and processing industry. *Eurasian Mining* 2020. 50-54. DOI: 10.17580/em.2020.02.12

Аннотация: В соответствии с приоритетными тенденциями и вызовами в минерально-сырьевом секторе и стратегией горной науки для сохранения устойчивости автоматизации крайне важно организовать усиленный контроль, прогнозирование и обеспечение безопасности производственных объектов и их функционирования. Совершенствование контроля баз данных, нормативных связей, управления, логистики и принципов устойчивого развития в горном деле позволяет снизить технологические отклонения и аварийность на крупных горно-обогатительных комбинатах.
Большинство технологических нарушений и аварий на открытых и подземных рудниках происходит из-за неквалифицированных действий операторов технологических процессов. Ущерб в этом случае может быть значительным, особенно по сравнению с затратами, связанными с качественным обучением и постоянным развитием персонала, занятого диспетчерским управлением и сбором данных для эффективной работы SCADA-систем в рамках автоматизации горно-обогатительных комбинатов.
Определение цифровых систем и их взаимосвязи с многоуровневым автоматизированным управлением может быть некорректным. Обзор новых принципов может пробудить интерес к концептуализации процессов цифровизации с использованием таких понятий, как: численные модели, симулятор, искусственный интеллект. Часто применяемые формулировки и принципы цифровой модели подменяются без обоснования функциональных связей. С другой стороны, под цифровой системой сегодня можно понимать роботизированные линии и другие числовые модели и интеллектуальные технологии, например, обрабатывающие станции с числовым программным управлением. Необходимо определить практическую значимость концептуализации и цифровой трансформации объектов минерально-сырьевого сектора с использованием Big Data, понять, как цифровой двойник может повлиять на изменчивую технологическую ситуацию, обеспечить оперативное прогнозирование, устранить аварию, сохранить физический баланс во всей производственной системе. Для таких интеллектуальных и гибких производств особенно необходимы компьютерные симуляторы и цифровые двойники, основанные на технологиях Индустрии 4.0-расширенной и виртуальной реальности на базе цифровых двойников. Цифровые двойники позволяют максимально имитировать реальную деятельность операторов технологических процессов. Навыки, полученные персоналом после такого симуляционного обучения, позволяют операторам освоить оптимизированный порядок действий в аварийных ситуациях при добыче и переработке полезных ископаемых. В данной работе приводится пример дистанционного обучения и управления технологическими потоками, что актуально в современной международной ситуации.

Ключевые слова: горно-обогатительная промышленность, цифровой двойник, симулятор, трансформация, интеллектуальная система, SCADA-система, безопасность производства, обучение, расширенная реальность, динамика.

The concept of digital twins for tech operator training simulator design for mining and processing industry

I.I. BELOGLAZOV, P.A. PETROV, V.Yu. BAZHIN
Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia
✉ *beloglazov@spmi.ru*

Abstract: According to the top-priority trends and challenges in the mineral sector, and as per the mining science strategy, it is highly critical to arrange enhanced control, prediction and safety of production objects and their functioning for the preservation of automation sustainability. Improved control of databases, regulatory bonds, management, logistics and principles of sustainable development in mining makes it possible to reduce technological deviations and accidents at large mining and processing plants.

---

* Перевод подготовлен для повышения интереса русскоязычной аудитории к данной статье.

© 2020, Beloglazov I. I., Petrov P. A., Bazhin V. Yu. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).
© Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II (перевод), 2024.

DOI: 10.17580/em.2020.02.12

Most procedural violations and accidents in surface and underground mines occur because of the unskilled actions of process flow operators. Damage in this case can be considerable, especially as compared with the expenses connected with qualitative training and persistent development of personnel engaged with supervisory control and data acquisition for the efficient operation of SCADA-systems within the automation framework of mining and processing plants.
Definition of digital systems and their interrelation with multilevel automated control can be incorrect. The review of new principles can awaken interest in the conceptual assessment of digitalization processes using such notions as: numerical models, simulator, and artificial intelligence. Often applied formulations and principles of a digital model are substituted without justification of functional connections. On the other hand, a digital system today can be assumed as robotic lines and other numerical models and smart technologies, for instance, machining stations with numerical program control. It is necessary to define the practical significance of conceptual modifications and digital transformation regarding objects of the mineral sector, using Big Data; to understand how a digital twin can influence a changeable process situation; to provide prompt prediction; to eliminate an accident; and to preserve the physical balance in the whole production system. Such intelligent and flexible productions particularly need computerbased simulators and digital twins based on technologies of Industry 4.0–extended and virtual reality on the basis of digital twins. Digital twins allow maximal simulation of real-life activity of process flow operators. The skills acquired by personnel after such simulation training enable operators to master the optimized procedure for functioning in emergency situations in mineral mining and processing. This paper exemplifies the remote training and control of process flows, which is of concern in the current international situation.

Keywords: mining and processing industry, digital twin, simulator, transformation, intelligent system, SCADA-system, production safety, training, extended reality, dynamic modeling.

Введение

Интеллектуальные системы и интеллектуальные технологии стали реальностью в секторе добычи полезных ископаемых, что требует пересмотра подходов к инженерному и математическому моделированию при разработке новых продуктов и проектировании высокопроизводительных производственных линий, особенно в рамках многофункциональной технологической системы горно-обогатительного комбината [1-7].

Распространенным и наиболее эффективным методом обучения оперативного персонала в настоящее время является компьютерное моделирование, которое представляет собой эффективный инструмент подготовки операторов машин к работе в штатных, аварийных и нештатных производственных ситуациях [8, 9]. Во всех развитых странах использование специализированных тренажеров является законодательно обязательным для опасных производственных объектов (в горнодобывающей и обрабатывающей промышленности, в металлургии, химической промышленности и т.д.). Четвертая промышленная революция требует более высокого уровня знаний для реализации все более сложных процессов на новом уровне взаимодействия оборудования, автоматики и человека. Новый принцип работы технологических объектов должен стать повседневным инструментом любого инженера в случае любого продукта на протяжении всей его жизни, чтобы возможности Индустрии 4.0 были использованы в полной мере [10, 11].

Моделирование уже не является редкой технологией, применяемой исключительно при создании сложных коммерческих продуктов. В настоящее время моделирование является неотъемлемым процессом любого нового проекта НИОКР и называется цифровой трансформацией в промышленности. До недавнего времени применение методов моделирования ограничивалось одним параметром: одна дисциплина, одна деталь, одно проектное решение. В настоящее время многие варианты проектирования или технологии изучаются на уровне решения междисциплинарных задач в горнодобывающей промышленности. Важно, что моделирование применяется как на стадии НИОКР, так и на протяжении всего срока службы продукта – начиная с выявления потребностей рынка и проектирования прототипа и заканчивая удовлетворением спроса и утилизацией продукта. Иными словами, инженерное моделирование и технология цифровых двойников приобретают все более широкое применение благодаря своему положительному влиянию на инновации, рост доходов и льготы для конечного потребителя.

Активно применяясь в многоступенчатом производстве, моделирование повышает его эффективность, экономичность и гибкость. С помощью удаленных систем сбора больших данных, аналитики и системных симуляторов инженеры создают цифровые двойники объектов и сооружений, позволяющие прогнозировать остаточный ресурс конструктивных элементов и оптимизировать техническое обслуживание и ремонт. Использование имитационного моделирования с виртуальными системами и симуляторами особенно эффективно, когда невозможно использовать

 Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

физический объект, или его осмотр и эксплуатация ограничены, особенно в условиях замкнутых пространств подземных шахт [12, 13].

Сегодня технология цифрового двойника находится на стадии становления и является одним из компонентов Индустрии 4.0, включающей в себя, помимо прочего интеллектуальное производство, глобальный Интернет вещей и Интернет вещей и Интернет услуг, а также облачные вычисления в отложениях. Моделирование становится частью процесса, в котором цифровой двойник плотно интегрируется в проектирование и эксплуатацию процедуры наряду с искусственным интеллектом и машинным обучением.

Цифровые симуляторы

Системы динамического моделирования и тренажеры оператора уже давно присутствуют на рынке. За последние 5 лет, активно развиваются такие технологии, как компьютерные расчеты, программное обеспечение и инструменты анализа, получили стремительное развитие. Симуляторы широко применяются во многих отраслях промышленности. Тренажеры служат для подготовки пилотов, космонавтов, операторов А-станций. Тренажеры работают на плавучих сооружениях для добычи, подготовки, хранения и перевалки углеводородов, на терминалах СПГ, на заводах по конверсии газа в жидкость, на нефтеперерабатывающих заводах и т.д. Методы моделирования могут быть плодотворно применены в добыче и переработке полезных ископаемых.

В связи с бурным развитием технологий, использованием высокопроизводительных компьютеров и современного программного обеспечения для удовлетворения постоянно растущего спроса со стороны потребителей необходимо создание новой интерактивной среды для компьютерных симуляторов, включающей детальное моделирование технологических потоков, входящих в производство в режиме реального времени. Использование такого подхода и специализированного программного обеспечения виртуализации поможет решить такие актуальные задачи, как моделирование и производство возможных сценариев технологических процессов. Подобные системы безопасного обучения, использующие контекстную информацию и цифровые модели полного погружения, обеспечивают операторов реальными профессиональными компетенциями в решении нештатных ситуаций и в предотвращении неблагоприятных условий протекания процессов, вызванных производственными или техногенными факторами [14-17].

Основной проблемой при обучении персонала шахт является невозможность вмешательства обучаемого в технологический процесс. Из опыта подготовки и переподготовки персонала можно утверждать, что процесс обучения либо не связан с реальным технологическим процессом и навыки не применимы на производстве, либо процесс обучения пассивен и обучаемый может только наблюдать за действиями мастера или инструктора. По оценкам экспертов, последний метод крайне неэффективен, занимает много времени и, что самое страшное, не учитывает нештатные и аварийные ситуации, характерные для горной и химической промышленности [18, 19].

Неопытные операторы после профориентационного обучения могут либо нарушить технологический процесс без серьезных последствий, в лучшем случае, либо, в худшем, стать причиной серьезной аварии с травмами и смертями на действующих шахтах или химических заводах [20]. Поэтому необходимо использовать специализированные обучающие технологии и средства, способные всесторонне моделировать технологический процесс на рабочем месте оператора или интерфейс пользователя.

Такие цифровые модели в сочетании с техническими средствами (тренажерами) представляют собой единую систему обучения персонала, как в штатном режиме, так и в аварийных ситуациях, без ущерба для технологических процессов (рис. 1). Требования к информационным тренажерам заключаются в имитации технологического оборудования, моделировании физико-химических процессов, точной реализации управления на операторских станциях, обучении в различных режимах реального или модельного времени, а также планировании сценариев обучения.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

DOI: 10.17580/em.2020.02.12

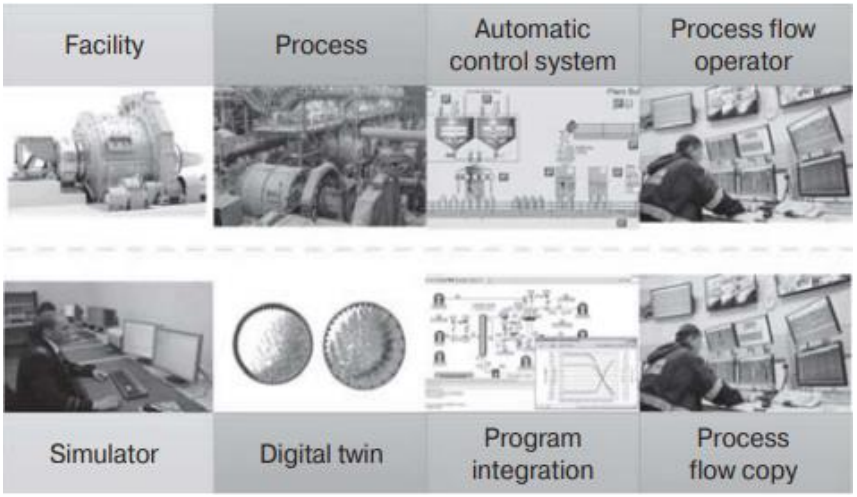


Рис. 1. Пример симуляционной системы, совмещенной с технологическим процессом

Эффективность компьютерных тренажеров во многом определяется знаниями и навыками специалистов в области технологии и управления технологическими процессами, квалификацией персонала, а также внедрением, эксплуатацией и обслуживанием тренажеров [21].

Цифровые двойники для горно-обогатительных комбинатов

Цифровые двойники в добыче и переработке полезных ископаемых впервые предназначены для экспериментов не с технологическим процессом или оборудованием, а с более удобным представлением – цифровой моделью. Кроме того, за счет использования цифровой модели в качестве тренажера параллельно решается проблема, связанная с обучением технологов и операторов горно-обогатительного комбината. Системы компьютерной симуляции (СКС) предназначены для обучения персонала и проверки квалификации в автоматизированном производстве.

Одной из приоритетных задач цифровых систем для шахт является анализ динамических параметров в рамках технологической схемы. В качестве примера можно привести этап фрезерования – самый энергоемкий процесс в шахтах. В настоящее время, учитывая критический характер эффективности процесса, надежные и высокопроизводительные методы дробления и измельчения находятся в центре внимания крупных игроков бизнеса.

Динамическое моделирование процесса измельчения в барабанных дробилках, например, позволяет реализовать управление скоростью вращения барабана с целью оптимизации существующего процесса измельчения. Преимущества, связанные с надежностью, комплексным функционированием, снижением износа мельничных лифтов и технического обслуживания, могут быть достигнуты при использовании передовых технологий частотно-регулируемых приводов и динамического моделирования. Внедрение таких систем может вывести процесс измельчения на новый уровень более высокой производительности и рентабельности [22, 23].

Главный вопрос, на который должен ответить каждый инженер-конструктор производства: как получить максимальную прибыль при барабанном измельчении? Такие параметры, как расход воды, размер и количество шаров, подача материала, могут быть отрегулированы таким образом, чтобы оптимизировать производительность размольной цепи. Однако такая настройка всегда занимает много времени, предполагает использование технологической установки при настройке и приводит к износу или простою оборудования. Таким образом, параметры, которые могут быть отрегулированы для достижения максимальной эффективности измельчения, обычно остаются неизменными. В то же время такие параметры могут быть легко изменены, без лишних затрат времени и проблем, связанных с износом. Процесс размола в основном зависит от скорости движения дробилки, которая определяет тип сырья и оказывает непосредственное влияние на такие переменные процесса, как скорость разрушения, объемный выброс и производительность дробилки. В итоге изменяется размер выходного продукта и, соответственно, производительность дробилки. Цифровой двойник полуавтоматической

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

дробилки состоит из нескольких стадий и может быть реализован с помощью специализированных программ [24-28]. В дальнейшем полученные результаты могут быть направлены в среду динамического моделирования технологических процессов.

Динамическое моделирование

Примером динамического моделирования является симулятор на базе программного обеспечения Schneider Electric, разработанный в Горном университете. Преимуществом тренажера является то, что операторы проходят обучение в режиме ускоренного моделирования и в режиме реального времени [29, 30]. Это способствует развитию навыков работы в аварийных ситуациях. В случае возникновения аварийной ситуации необходимо выполнить ряд заданных сценариев, что позволяет получить опыт поведения в нештатных ситуациях [31].

В качестве мастер-среды была выбрана DYNSIM как практически апробированное и интегрированное программное обеспечение для динамического моделирования, позволяющее пользователю решать задачи проектирования и безопасной эксплуатации современных технологических установок. Системы динамического моделирования технологических потоков в DYNSIM описаны в [32-34].

Комбинируя встроенные модели оборудования с точными термодинамическими моделями элементов управления и электрическими моделями, DYNSIM позволяет моделировать различные технологические установки, включая системы управления, блокировки отключения и электропитания. Кроме того, DYNSIM может [35-37]:

- добавлять уравнения и другие пользовательские объекты;
- добавлять различные библиотеки и уравнения кинетики реакций;
- разрабатывать специальные режимы управления технологической установкой.

Представленная УСС моделирует упрощенный процесс сгущения и фильтрации. На главном дисплее оператора отображается мнемосхема фильтрации с возможностью вызова различных всплывающих окон для настройки контроллеров и эффекторов (рис. 2).

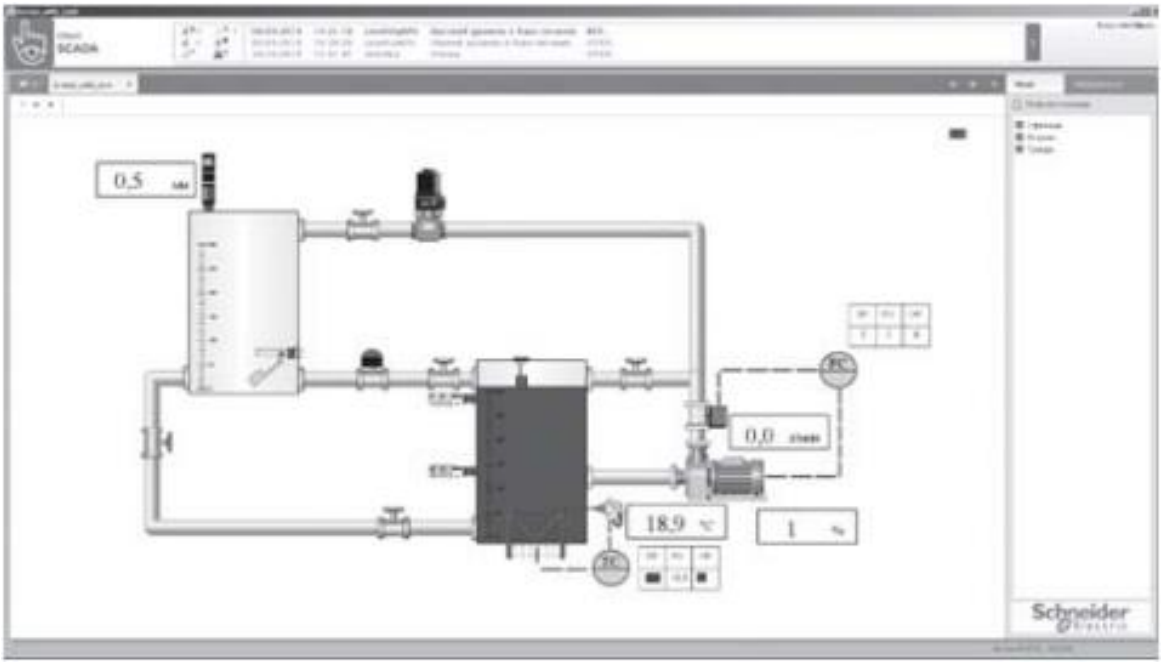


Рис. 2. Дисплей оператора

Аналогичным образом включается рабочее место тренера (рис. 3). Рабочее место тренера представляет собой набор инструментов для одновременного управления и обучения нескольких операторов, а также включает в себя оценщики навыков.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

DOI: 10.17580/em.2020.02.12

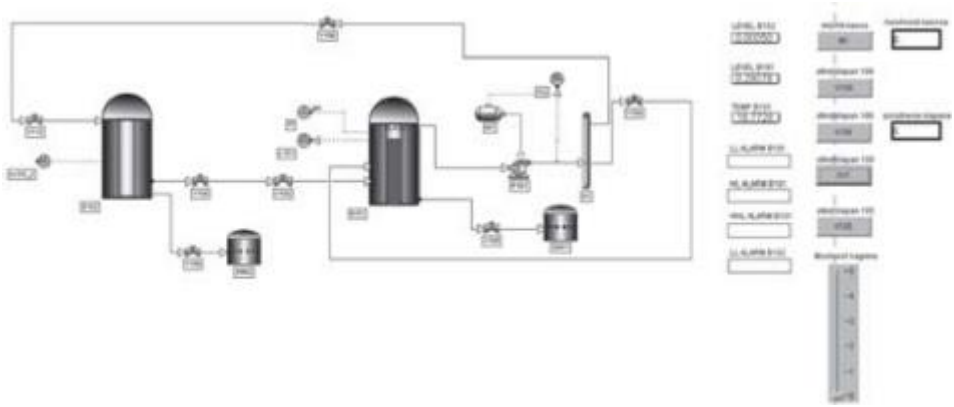


Рис. 3. Дисплей тренера

Тренер может одновременно задавать реализацию сценария технологического процесса с автоматическими обучающими упражнениями или с мониторингом обучения. В этом режиме действия оператора описываются с помощью различных оценок эффективности или весов, а тренер способен непредвзято оценить деятельность оператора, проследить за его действиями и управлять процессом обучения.

Динамические модели технологической установки интегрируются с программой моделирования соответствующей системы управления. Основной средой является модульное программное обеспечение для динамического моделирования. Модульная архитектура позволяет разрабатывать масштабируемые интегрированные системы пакетов подготовки операторов [38].

Среда разработки, включая исполнительное динамическое моделирование, может переключаться на различные подпроцессы, такие как имитационные модели, эмуляционные модели систем управления, эмуляция программируемых логических контроллеров, графический интерфейс пользователя, приложения внешних поставщиков (например, Excel) и многие другие [38, 39]. Вся система объединена общей средой, которая синхронизирует передачу данных (рис. 4).

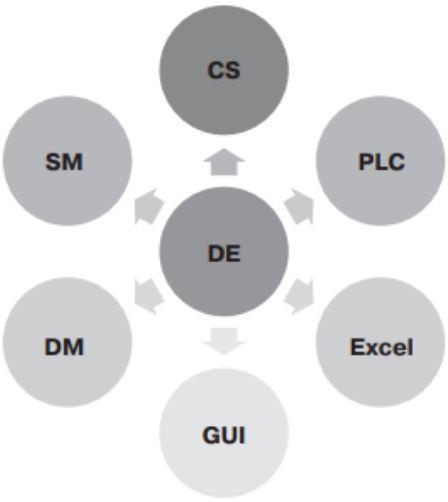


Рис. 4. Модульная система динамического моделирования: DE – среда разработки; CS – система управления; PLC – программируемый логический контроллер; C UI – графический интерфейс пользователя; DM – динамическое моделирование; SM – симуляционные модели

Одновременно с развитием цифровых технологий происходит модернизация компьютерных симуляторов. Все более мощные компьютеры и прогрессивное программное обеспечение позволяют осуществлять 3D-визуализацию, расширенную и виртуальную реальность, взаимодействие различных программ. Передовые технологии становятся более доступными и экономически эффективными и обеспечивают корректную работу тренажеров в сложных производственных условиях.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

DYNSIM интегрируется с программой моделирования стационарных процессов PRO/II компании Schneider Electric и включает модульные термодинамические принципы, рамки и алгоритмы. Используя общую архитектуру, программное обеспечение легко интегрируется с различными системами управления, что обеспечивает платформу для инженерных решений, настройки управления и разработки более надежного программного обеспечения, включая обучение операторов [40, 41].

Подобные информационные технологии могут заменить аппаратные элементы реальной системы управления (технологическая схема, контроллеры, компьютеры) на программные эквиваленты в горной промышленности [42-45]. Это, в свою очередь, может позволить создать более компактные, мобильные и простые операционные тренажеры.

Выводы

Цифровое двойное моделирование – это гораздо больше, чем простое создание доски оператора. Этот подход имеет решающее значение для оптимизации управления как в горнодобывающей, так и в химической промышленности. Данные измерений, статистика и численное моделирование являются основой для машинного обучения. Набор унифицированных цифровых двойников может быть оптимизирован в рамках единой системы управления.

Такие технологии, как виртуальная и расширенная реальность для визуализации проектных решений и скрытых элементов технологических процессов, помогают в обучении персонала и повышении безопасности труда, так как обеспечивают визуальное представление и буквально впускают обучающихся и операторов в реальный технологический процесс или производственный объект, находясь при этом дистанционно и в учебных классах, что в настоящее время особенно актуально.

Внедрение цифровых технологий в горнодобывающую и перерабатывающую промышленность – это необходимость сегодняшнего дня. Руководство многих горнодобывающих компаний понимает, что цифровые технологии могут принести реальные преимущества и прибыль. Концепция цифровой трансформации позволяет передовым технологиям стимулировать прозрачность и доходность реального сектора экономики. Это происходит благодаря виртуализации бизнес-систем, визуализации данных и знаний о ресурсах (полезных ископаемых, оборудовании, рабочей силе), актуализации данных в режиме реального времени, совершенствованию проектных решений, плавному контролю, а также анализу и автоматизации принятия управленческих решений.

Для эффективной и экономичной эксплуатации нового оборудования существующие системы обучения и развития персонала недостаточны. При этом во главу угла ставятся навыки оператора по управлению конкретным процессом или оборудованием, а они могут не зависеть от квалификации, теоретических знаний и опыта работы оператора.

Решением этой проблемы является разработка обучающего набора на основе математической модели, максимально приближенной к реальному объекту.

Использование компьютерного моделирования позволяет значительно повысить практические знания и навыки выпускников вузов, молодых специалистов и персонала в области добычи полезных ископаемых, что, в свою очередь, может существенно повысить безопасность производства. Квалификация инженеров, сертифицированных по результатам работы в области компьютерного моделирования, может быть признана во всех странах мира. Актуальность такой высокопрофессиональной сертификации специалистов, особенно тех, кто недавно получил дипломы о высшем образовании, обусловлена острым дефицитом квалифицированных кадров в горнодобывающей промышленности, особенно с учетом исключительных стандартов безопасности производства.

Доказано, что цифровые двойники, основанные на численном моделировании и современном программном обеспечении, применимы в любой отрасли: транспорт, энергетика, производство, авиация и т.д. Некоторые компании уже экономят миллионы долларов за счет интеграции информации, цифрового моделирования, платформ имитационного моделирования, облачных технологий и машинного обучения.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

ЛИТЕРАТУРА

1. Availabe at: http://static.government.ru/media/files/WXRSEBj6jnRWNrumRkDakLcqfAzY14VE.pdf (accessed: 27.03.2020)
2. Available at: http://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/70484380/#ixzz4aP1zXHhy (accessed: 27.03.2020)
3. Available at: https://spmi.ru/sites/default/files/imci_images/univer/bloks/napr_iiul_2019_s.pdf (accessed: 27.03. 2020)
4. Litvinenko V.S. Digital Economy as a Factor in the Technological Development of the Mineral Sector. *Natural Resources Research*. 2019. Vol. 28, Iss. 28. pp. 1–21.
5. Litvinenko V.S.The Role of Hydrocarbons in the Global Energy Agenda: The Focus on Liquefied Natural Gas. *Resources*. 2020. Vol. 9, Iss. 59. DOI: 10.3390/resources9050059
6. Berman S. Digital transformation: Opportunities to create new business models. *Strategy & Leadership*. 2012. Vol. 40, Iss. 2. pp. 16–24.
7. Gukovskiy Y.L., Sychev Y.A. and Pelenev D.N. The automatic correction of selective action of relay protection system against single phase earth faults in electrical networks of mining enterprises. *International Journal of Applied Engineering Research*. *Research India Publications*. 2017. Vol. 12, Iss. 5. pp. 833–838.
8. Rylov S.A., Sofiev A.E., Tarakanov Yu.V. Mobile computerbased simulator for training process flow operators. *Pribory*. 2010. No. 3. pp. 19–24.
9. Dozortsev V., Nazin V., Oboznov A., Mironova A. Structural knowledge as an evaluation instrument of trainess progress in learning. *11th IEEE International Conference on Application of Information and Communication Technologies*. 2017. Vol. 2. pp. 275–279.
10. Alvarez A., Fernandez E., Prokofeva E.N., Vostrikov A.V. The building of effective systems of training and development for mining engineers with the basis of digital technologies. *Eurasian Mining*. 2019. No. 1. pp. 49–52. DOI: 10.17580/em.2019.01.12
11. Gurskaya T.V., Krasavin A.V., Fedorova S.V., Khudyakov P.Y. Practice-oriented approach to mining engineer training. *Gornyi Zhurnal*. 2018. No. 2. pp. 97–103. DOI: 10.17580/gzh.2018.02.14
12. Dozortsev V.M., Kreidlin E.Y. State-of-the-art automated process simulation systems. *Automation and Remote Control*. 2010. Vol. 71, Iss. 9. pp. 1955–1963.
13. Dozortsev V.M. New Challenges to industrial safety — Will computer simulators help? *Bezopasnost' Truda v Promyshlennosti*. 2019. No. 9. pp. 31–38.
14. Corbetta M., Grossmann I.E., Manenti F. Process simulatorbased optimization of biorefinery downstream processes under the Generalized Disjunctive Programming framework. *Computers & Chemical Engineering*. 2016. Vol. 88. pp. 73–85.
15. Alekseenko V.A., Pashkevich M.A., Alekseenko A.V. Metallisation and environmental management of mining site soils. *Journal of Geochemical Exploration*. 2017. Vol. 174. pp. 121–127.
16. Pashkevich M.A., Petrova T.A. Development of an operational environmental monitoring system for hazardous industrial facilities of Gazprom Dobycha Urengoy. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. Vol. 1384. pp. 1–7.
17. Koptev V.Y., Kopteva A.V., Improving paraffin deposits detection methodology for better ecological safety during hydrocarbon transportation. *International Journal of Applied Engineering Research*. 2017. Vol. 12(5). pp. 618–621
18. Katuntsov E.V., Kultan Y., Makhovikov A.B. Application of electronic learning tools for training of specialists in the field of information technologies for enterprises of mineral resources sector. *Journal of Mining Institute*. 2017. Vol. 226. pp. 503–508. DOI: 10.25515/PMI.2017.4.503
19. Dozortsev V.M. Computer-based simulators for training process flow operators. Moscow : SINTEG, 2009. pp. 29–31, 42–44.
20. Sganzerla C., Seixas C., Conti A. Disruptive Innovation in Digital Mining. *Procedia Engineering*. 2016. Vol. 138. pp. 64–71.
21. Rylov S.A., Sofiev A.E. Applicaton of Virtual Machine Technology in engineering of computer-based simulators for training of process flow operators. *Pribory*. 2020. No. 5. pp. 22–25.
22. Skorych V., Dosta M., Hartge E.-U., Heinrich S. Novel system for dynamic flowsheet simulation of solids processes. *Powder Technol*. 2017. Vol. 314. pp. 665–679.
23. Vasilyeva N.V., Nikitina L.N. Using Modern Technologies in Research Complexes and Laboratories of Saint-Petersburg Mining University for Improving the Preparation Efficiency of Specialists in the Mining Industry. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 753. DOI: 10.1088/1757-899X/753/6/062031
24. Monov V., Sokolov B., Stoenchev S. Grinding in ball mills: Modeling and process control. *Cybernetics and Information Technologies*. 2012. Vol. 12, Iss. 2. pp. 51–68.
25. Cleary P.W., Owen P. Effect of operating condition changes on the collisional environment in a SAG mill. *Minerals Engineering*. 2018. DOI: 10.1016/j.mineng.2018.06.027.
26. Kiangi K., Potapov A., Moys M. DEM validation of media shape effects on the load behaviour and power in a dry pilot mill. *Minerals Engineering*. 2013. DOI: 10.1016/j.mineng.2013.03.025.
27. Cleary P.W., Owen P. Effect of particle shape on structure of the charge and nature of energy utilisation in a SAG mill. *Minerals Engineering*. 2019. Vol. 132. pp. 48–68.
28. Beloglazov I.I., Stepanyan A.S., Feoktistov A.Yu., Yusupov G.A. Disintegration process modeling for a jaw crusher with complex jaws swing. *Obogashchenie Rud*. 2018. No. 2. pp. 3–8. DOI: 10.17580/or.2018.02.01.
29. Savchenkov S.A., Nikitina L.N., Bazhin V.Y. Experience of mining specialists training at the chair of process and production automation of the mining university. *Eurasian Mining*. 2017. No. 1. pp. 42–44. DOI: 10.17580/em.2017.01.11
30. Voronina M.V., Tretyakova Z.O., Krivonozhkina E.G., Buslaev S.I., Sidorenko G.G. Augmented Reality in Teaching Descriptive Geometry, Engineering and Computer Graphics – Systematic Review and Results of the Russian Teachers' Experience. *Eurasia Journal of Mathematics, Science and Technology Education*. 2019. Vol. 15, Iss 12. DOI: 10.29333/ejmste/113503
31. Dong P., Shi L. Emergency pressure relief simulation of diesel hydrogenation unit. *Petroleum Refinery Engineering*. 2019. Vol. 49, Iss. 11. pp. 55–59.
32. Available at: https://download.schneider-electric.com/files?p_enDocType=Customer+success+story&p_File_Name=SuccessStory_SE-LIO-SimSci_Intermountain-Power_11-16.pdf&p_Doc_Ref=Intermountain_Power (accessed: 27.03. 2020).

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

33. Dave D., Arnold W., Timothy S., Reed M. Dynamic simulation studies for boiler draft. *Applied Thermal Engineering*. 2017. Vol. 121. pp. 255–293.

34. Gani R., Soerensen E.L., Perregaard J. Design and analysis of chemical processes through DYNSIM. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 1992. Vol. 31, Iss.1. pp. 244–254.

35. Corbetta M., Grossmann I.E., Manenti F. Process simulatorbased optimization of biorefinery downstream processes under the Generalized Disjunctive Programming framework. *Computers & Chemical Engineering*. 2016. Vol. 88. pp. 73–85.

36. Potapov A.I., Kulchitskii A.A., S morodinskii Ya.G., Smirnov A.G. Evaluating the Error of a System for Monitoring the Geometry of Anode Posts in Electrolytic Cells with Self-Baking Anode. *Russian Journal Nondestructing Testing*. 2020. Vol. 56. pp. 268–274.

37. Slastenov I., Tasanbaev S., Dozortsev V. First principles simulation model identification based on real industrial process data. *21st European Concurrent Engineering Conference.* 2015. pp.11–14.

38. Marcano L., Haugen F.A., Sannerud R., Komulainen T. Review of simulator training practices for industrial operators: How can individual simulator training be enabled? *Safety Science*. 2019. Vol. 115. pp. 414–424.

39. Patle D.S., Manca D., Nazir S., Sharma S. Operator training simulators in virtual reality environment for process operators: a review. *Virtual Reality*. 2018. DOI: 10.1007/s10055-018-0354-3

40. Kluge A. The acquisition of knowledge and skills for taskwork and teamwork to control complex technical systems: A cognitive and macroergonomics perspective. Springer, 2014. 196 p.

41. Overchenko M.N., Marinin M.A., Mozer S.P. Quality Improvement of Mining SpecialistsTraining on the Basis of Cooperation Between Saint-Petersburg Mining University and Orica Company. *Journal of Mining Institute.* 2017. Vol. 228. pp. 681–687.

42. Litvinenko V.S., Tsvetkov P.S., Dvoynikov M.V., Buslaev G.V., Eichlseder W. Barriers to implementation of hydrogen initiatives in the context of global energy sustainable development. *Journal of Mining Institute*. 2020. Vol. 244. pp. 428–438. DOI:10.31897/PMI.2020.4.5

43. Boikov A.V., Savelev R.V., Payor V.A., Erokhina O.O. The control method concept of the bulk material behavior in the pelletizing drum for improving the results of DEM-modeling. *CIS Iron and Steel Review*. 2019. Vol. 17. DOI: 10.17580/cisisr.2019.01.02

44. Golubev V.O., Chistiakov D.G., Brichkin V.N., Litvinova T.E. Systems and aids of mathematical modeling of the alumina refinery methods: Problems and solutions. *Nonferrous Metals*. 2019. No. 1. pp. 40–47. DOI: 10.17580/nfm.2019.01.07

45. Beregovoi D.V., Younes J.A., Mustafin M.G. Monitoring of Quarry Slope Deformations with the Use of Satellite Positioning Technology and Unmanned Aerial Vehicles. *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 189. pp. 737–743.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0