

Исследование инструментов цифровых трансформаций подземных горнодобывающих предприятий в аспекте управления спросом на электроэнергию*

DOI: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2023-9-55-62>

В работе приведен опыт исследования и разработки цифровых технологий для повышения эффективности работы подземного горнодобывающего предприятия (ПГДП) в аспекте задач управления спросом на электроэнергию системы вентиляции. Представлены типовые инструменты цифровой трансформации на примере автоматизированной корпоративной системы регионального геомеханического мониторинга (СРГМ). Показаны функционально-алгоритмические возможности горно-геологической информационной системы (ГИС), встроенной в СРГМ. Приведены примеры реализации задач в подсистемах геолого-маркшейдерского сопровождения горных работ; САПР горных работ; интеллектуальной системе анализа, интерпретации и обработки первичной информации ГИС; приведен пример работы «самокорректирующейся» системы расчета сдвижений и деформаций дневной поверхности в новых горно-геологических и горнотехнических условиях. Показано, как набор цифровых двойников объектов и процессов системы проветривания ПГДП при интеграции в состав ГИС, может быть использован для динамического управления энергоресурсами.

Ключевые слова: управление спросом на электроэнергию, цифровые трансформации, подземное горнодобывающее предприятие, краткосрочное прогнозирование нагрузки, цифровой двойник.

Для цитирования: Исследование инструментов цифровых трансформаций подземных горнодобывающих предприятий в аспекте управления спросом на электроэнергию / М.Л. Журавков, А.В. Николаев, А.В. Кычкин и др. // Уголь. 2023. № 9. С. 55-62. DOI: 10.18796/0041-5790-2023-9-55-62.

ЖУРАВКОВ М.Л.

Доктор физ.-мат. наук, профессор,
заведующий кафедрой
«Теоретическая и прикладная механика» БГУ,
220141, г. Минск, Республика Беларусь,
e-mail: zhuravkov@bsu.by

НИКОЛАЕВ А.В.

Доктор техн. наук, доцент,
профессор кафедры
«Горная электромеханика» ПНИПУ,
614990, г. Пермь, Россия,
e-mail: nikolaev0811@mail.ru

КЫЧКИН А.В.

Канд. техн. наук, доцент,
научный сотрудник научно-учебной лаборатории
междисциплинарных эмпирических исследований
Национального исследовательского университета
«Высшая школа экономики»,
614070, г. Пермь, Россия,
e-mail: avkychkin@hse.ru

ПРЕСНЯКОВ А.А.

Студент кафедры «Горная электромеханика»
ПНИПУ,
614990, г. Пермь, Россия,
e-mail: arseny8950@gmail.com

* Исследование выполнено при финансовой поддержке Правительства Пермского края в рамках проекта Международной исследовательской группы «Разработка цифровой модели прогнозирования и ценозависимого управления спросом на электроэнергию, потребляемую подземными горнодобывающими предприятиями», 2020 г. (соглашение № С-26/506 от 09.03.2021).

ВВЕДЕНИЕ

Повышение эффективности работы подземных горнодобывающих предприятий (ПГДП) связано с обеспечением безопасности труда и снижением стоимости эксплуатации оборудования. Во многом эти задачи решаются путем цифровизации объектов и процессов, а также последующим анализом накапливаемой информации, что в конечном счете приводит к серьезным преобразованиям потоков данных и управления мероприятиями по энергосбережению. В горнодобывающей промышленности, где потенциал и эффективность использования цифровых технологий достаточно велики, примеров лучших практик цифровых трансформаций в аспекте управления спросом на электроэнергию еще мало.

Для цифровых трансформаций ПГДП необходимо наличие как минимум трех составляющих [1]: большие объемы данных и знаний, значительные вычислительные мощности, развитые интеллектуальные алгоритмы обработки информации. Необходимое требование к интеллектуализации аналитических методов в настоящее время должно состоять в том, чтобы расчетные модули не «работали» как «черные ящики», выдающие решение. Они должны постоянно самообучаться и адаптироваться к изменениям в части энергопотребления, представлять интерпретируемые результаты по стратегиям снижения нагрузок, демонстрировать понятный и эффективный путь получения решения. В особенности это проявляется при разработке автоматизированных систем поддержки принятия решений по управлению спросом на электроэнергию как одного из наиболее перспективных направлений развития цифровых фабрик в рамках концепции Индустрия 4.0, в особенности при разработке интеллектуальных систем моделирования и прогнозирования энергопотребления. Отметим, что на современном этапе речь идет об автоматизированных системах, то есть системах с участием человека в управлении процессом спроса на электроэнергию, осуществляемом в рамках протекающих на ПГДП цифровых трансформаций.

Одними из стратегических целей активного развития инструментов ценозависимого управления спросом на электроэнергию являются: разработка математических основ методов обработки и интеллектуального анализа данных для различных прикладных областей и направлений работы ПГДП; разработка математических основ систем компьютерного моделирования технологических процессов, расчетов и анализа физических процессов; переход к новым интеллектуальным CAD-, CAE- и CAM-технологиям [2, 3].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для эффективной работы подземного горнодобывающего предприятия необходимо все процессы, происходящие на нем, объединить в общую структуру и наладить процесс добычи полезного ископаемого таким образом, чтобы все процессы были оптимизированы и максимально эффективны. Реализовать эту работу можно при построении цифрового двойника (ЦД) предприятия.

Для создания ЦД такого сложного объекта, как горнодобывающее предприятие, необходимо построить ЦД от-

дельных структурных элементов объекта, которых может быть не только сотни, но и тысячи. Для этого необходимо выделить различные уровни функционирования цифровых двойников.

1. ЦД отдельного элемента (компонента).

Так, например, если успешная работа некоторого механизма (системы) определяющим образом зависит от функционального состояния конкретных деталей (модулей), то необходимо создать ЦД этих деталей (модулей), позаботившись, конечно, об организации «обратной связи» от них к их виртуальным копиям.

Например, это могут быть ролики в системе конвейеров в шахте, подшипники в вентиляторах местного проветривания в вентиляционной системе рудника, трос в системе подъемного комплекса.

2. ЦД отдельных модулей структурных элементов объекта, что обеспечивает контроль за состоянием конкретного оборудования, элемента объекта.

Например, в таком структурном элементе рудника, как «система вентиляции и проветривания подземного пространства», в качестве отдельных модулей можно выделить вентиляторы, двигатели. В этом случае, при необходимости, «физические модули» могут обмениваться информацией со своими виртуальными копиями.

3. ЦД структурных элементов объекта, что позволяет контролировать состояние и работу сложных элементов, состоящих из большого количества модулей, обеспечивающих выполнение определенной функциональности.

Так, например, применительно к объекту «рудник» структурным элементом может быть горно-добычный комплекс, подъемный комплекс и т.д.

4. ЦД всего объекта в целом, позволяющий получать информацию о текущем состоянии объекта и прогнозировать ситуацию в дальнейшем. Работа ЦД данного уровня зависит от согласованной совместной работы ЦД всех предыдущих уровней.

Так, ЦД рудника представляет собой сопряженный виртуальный двойник большого количества цифровых двойников всех внутренних компонентов рудника.

При реализации такого подхода можно повышать энергоэффективность технологических процессов при соблюдении правил безопасности. При этом повышение эффективности производства можно обеспечить не только снижением потребляемой оборудованием электроэнергии, но и за счет участия предприятия в работе по управлению спросом на электроэнергию.

Необходимость регулирования электроэнергии, потребляемой предприятиями, связана с проблемой баланса мощности в виде сопоставления генерируемой и потребляемой электроэнергии, поскольку большинство электростанций в промышленных районах производят ее непрерывно в течение суток, в то время как энергопотребление носит ярко выраженный циклический характер, привязанный к 24-часовому интервалу времени. Это приводит к тому, что электрическая мощность, производимая в часы низкого спроса, не востребована, в то время как в часы пикового спроса наблюдается нехватка [4]. Неспособность автоматического реагирования на динамику спроса приводит к снижению гибкости энерго-

системы и, как следствие, к высоким эксплуатационным затратам [5-7].

Рынок управления спросом является новым для России, он регламентируется нормативной документацией, утвержденной постановлением Правительства Российской Федерации от 20.03.2019 № 287. Для реализации данных мероприятий введен Агрегатор управления спросом на электрическую энергию – субъект электроэнергетики, объединяющий ресурсы розничных потребителей для предоставления услуги по управлению спросом на электрическую энергию. Агрегатор является участником оптового рынка электроэнергии, управляющим изменением нагрузки группы потребителей (например, на руднике или шахте), с целью продажи совокупности регулировочных способностей как единого объекта в качестве товара/услуги на оптовом рынке и/или на рынке системных услуг.

Система, которая позволит управлять потреблением электроэнергии в зависимости от спроса, предложена в работе [8]. Основная идея заключается в том, чтобы при помощи алгоритмов предиктивной аналитики заранее (за сутки вперед) выявить возможность временного и количественного снижения электроэнергии, потребляемой подземным горнодобывающим предприятием. Возможность снижения определяется в зависимости от стохастических и закономерных факторов.

В первом случае основную роль играет естественная тяга, возникающая между шахтными стволами вследствие разности плотностей воздуха, поступающего в них [9-12], то есть в зависимости от параметров наружного воздуха.

Ввиду того, что естественная тяга влияет на работу основного потребителя электроэнергии – главной вентиляционной установки (ГВУ), увеличивая или снижая ее энергопотребление, процесс изменения температуры наружного воздуха может стать фактором, влияющим на потребление электроэнергии ГВУ: при действии положительной естественной тяги (способствующей проветриванию) производительность ГВУ может быть снижена при сохранении объемного расхода воздуха, поступающего в шахту (рудник).

Учитывая тот факт, что успешность (оправдываемость) гидрометеорологических прогнозов и предупреждений об атмосферных явлениях в краткосрочный период (за сутки вперед) достигает 85-90 % [13, 14], можно заранее определить величину естественной тяги, которая будет действовать между шахтными стволами, а следовательно, определить режим работы ГВУ и возможность снижения ее производительности (потребления электроэнергии) в заданное время. Такой подход позволит учитывать в процессе ценозависимого спроса на электроэнергию режим работы ГВУ.

Алгоритм расчета величины естественной тяги, возникающей между шахтными стволами, в зависимости от параметров воздуха, поступающего в них, и производительности ГВУ с учетом ее действия приведен в работах [10, 15].

Учитывая тот факт, что только за счет управления работой ГВУ при изменении естественной тяги эффективно управлять спросом на электроэнергию не представляется возможным, в систему необходимо внести данные по работе устройств и механизмов, применяемых на подземных

горнодобывающих предприятиях, для возможности анализа их работы и внести их в ЦД предприятия.

В настоящее время разработаны научные основы, предложены и обоснованы состав и наполнение автоматизированных корпоративных систем регионального геомеханического мониторинга (СРГМ) для регионов крупномасштабного освоения подземного пространства [16, 17]. Элементы такой системы внедряются в ОАО «Беларуськалий».

Система регионального геомеханического мониторинга определяется как автоматизированная компьютерная информационно-измерительная и аналитическая система режимного (непрерывного, периодического, заданного) контроля, диагностики, математического и компьютерного моделирования и прогноза общего геомеханического и связанного с ним горно-экологического состояния подземного и поверхностного пространства экосистемы в регионе крупномасштабного освоения подземного и приповерхностного освоения толщи породного массива.

По сути, при таком определении СРГМ представляет собой ЦД геомеханических процессов для горнодобывающего предприятия.

Основу СРГМ составляет горно-геологическая информационная система (ГГИС) с многослойными компьютерными картами породной толщи с горными работами, дневной поверхности в пределах шахтных отводов, промплощадок [17]. На базе ГГИС разработан большой набор систем, подсистем и комплексов для решения широкого спектра прикладных задач (рис. 1). Наиболее значимой является уникальная автоматизированная система геолого-маркшейдерского сопровождения и текущего проектирования горных работ для ОАО «Беларуськалий» [17, 18], (рис. 2, 3). Обязательным элементом прикладного программного обеспечения является наличие функциональности, позволяющей выполнять интеллектуальный анализ данных и ситуаций с выдачей рекомендаций и решений. Так, важным элементом является модуль анализа, интерпретации и работы с Базами первичной информации (рис. 4).

Среди задач, в решении которых важную роль играет СРГМ, одной из наиболее важных является задача контроля за состоянием ответственных техногенных объектов и выдачи прогноза относительно их «устойчивости» по отношению к авариям и катастрофам.

В качестве примера можно привести разработку автоматизированной подсистемы расчета и прогноза развития и изменения во времени основных характеристик деформационных процессов на дневной поверхности и в приповерхностных областях породного массива вследствие ведения подземных горных работ с учетом данных натуральных геодезических наблюдений и обработки снимков спутниковых наблюдений [19].

Система моделирования и прогноза процессов смещений дневной поверхности и расчета основных деформационных характеристик базируется на использовании интегрированной цифровой модели породной толщи с подземными сооружениями, которая строится, в свою очередь, на данных ГГИС-проекта. Технологии построения базовых механико-математических моделей ориен-

Разработка программного обеспечения для совместной работы служб горного предприятия

Разработанные ГГИС и АРМы

Одновременная корпоративная работа на предприятии в режиме «online» (> 200-300 специалистов одновременно):

- маркшейдерские отделы всех рудников и отдел главного маркшейдера объединения;
- геологические отделы всех рудников и отдел главного геолога объединения;
- бюро проектирования всех рудников;
- горные участки всех рудников, горный отдел объединения;
- главные специалисты всех рудников и объединения и др.

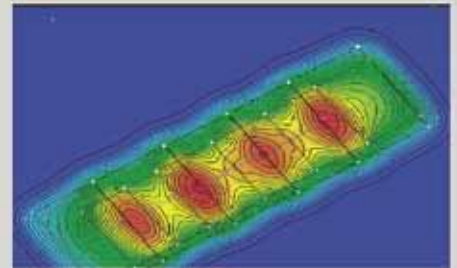
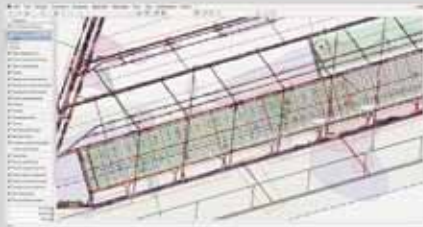
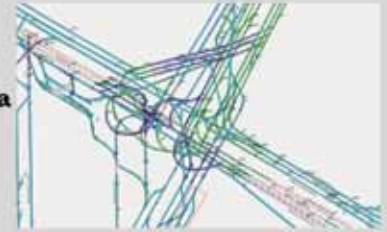


Рис. 1. Горно-геологическая информационная система (ГГИС) как базовый элемент многочисленных автоматизированных комплексов и рабочих мест специалистов горнодобывающего предприятия

Fig. 1. The mining geological information system (MGIS) as a basic element of numerous automated complexes and workstations of mining specialists

Геолого-маркшейдерское сопровождение горных работ

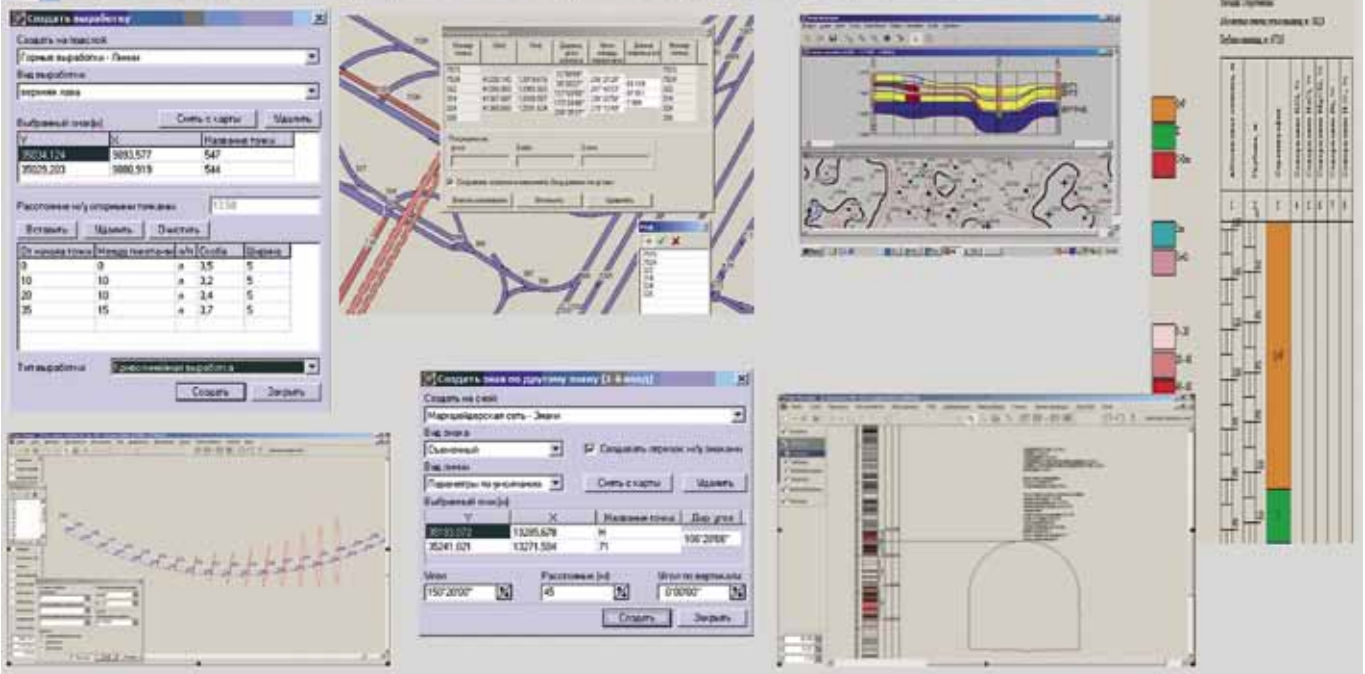


Рис. 2. Примеры реализации задач в подсистеме геолого-маркшейдерского сопровождения горных работ

Fig. 2. Examples of task implementation in the geological and mine surveying subsystem

САПР горных работ

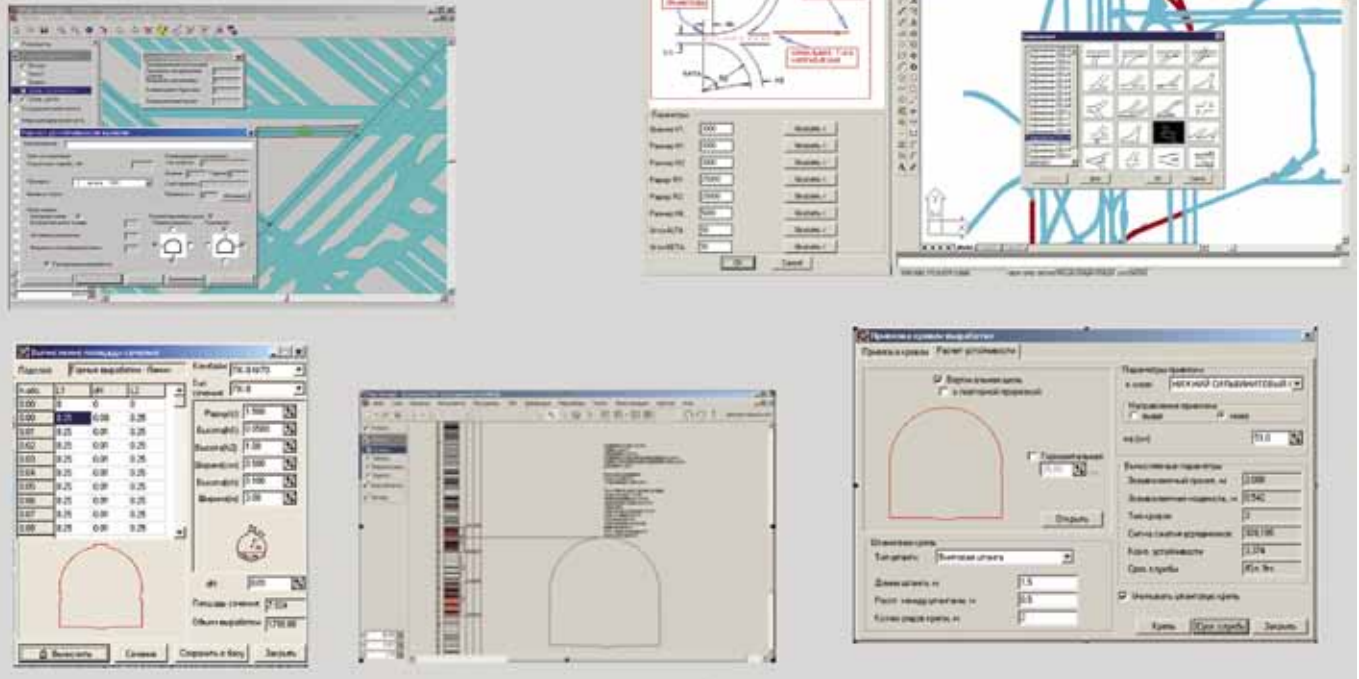


Рис. 3. Примеры реализации задач в подсистеме САПР горных работ
 Fig. 3. Examples of task implementation in the mining CAD subsystem

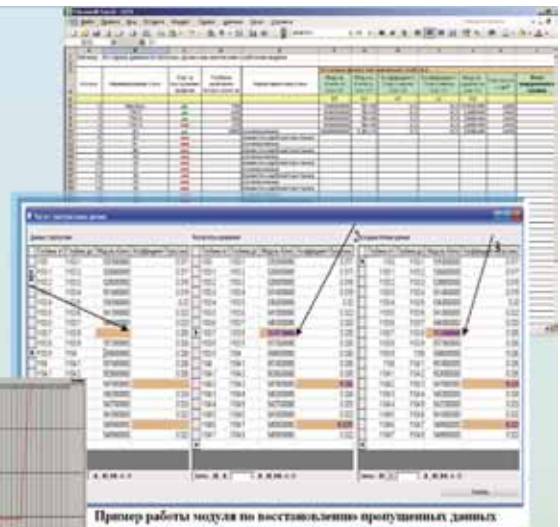
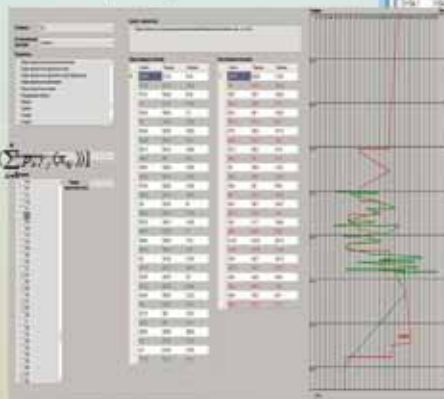
Система анализа, контроля, интерпретации и обработки исходной информации

Интеллектуальная обработка исходной (первичной) информации

- ✓ Статистическая обработка данных;
- ✓ Интерпретация данных;
- ✓ Восстановление данных;
- ✓ Вычисление эффективных и «вторичных» характеристик;
- ✓ Специализированные модули;
- ✓ Построение специализированных моделей

$$\rho(X, pE) = \frac{1}{n} \left\{ \sum_{i=1}^n \ln \left(1 - \frac{1}{n} \right)^2 \left(\sum_{j=1}^n \frac{x_j}{p_j} \right) \left(\sum_{j=1}^n p_j \gamma_j(x_j) \right) \right\} = \sum_{i=1}^n \ln \left(\sum_{j=1}^n \frac{x_j}{p_j} \right) \left(\sum_{j=1}^n p_j \gamma_j(x_j) \right)$$

$$F(X_{IT}) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (p_i^T(x_{it}) - p_i)^2} \rightarrow \min_{X_{IT}}$$



Пример работы модуля по восстановлению пропущенных данных

Рис. 4. Интеллектуальная система анализа, интерпретации и обработки первичной информации
 Fig. 4. Intelligent system for the analysis, interpretation and processing of primary information

«Самокорректирующая» система расчетов сдвигов и деформаций дневной поверхности с использованием данных натуральных измерений

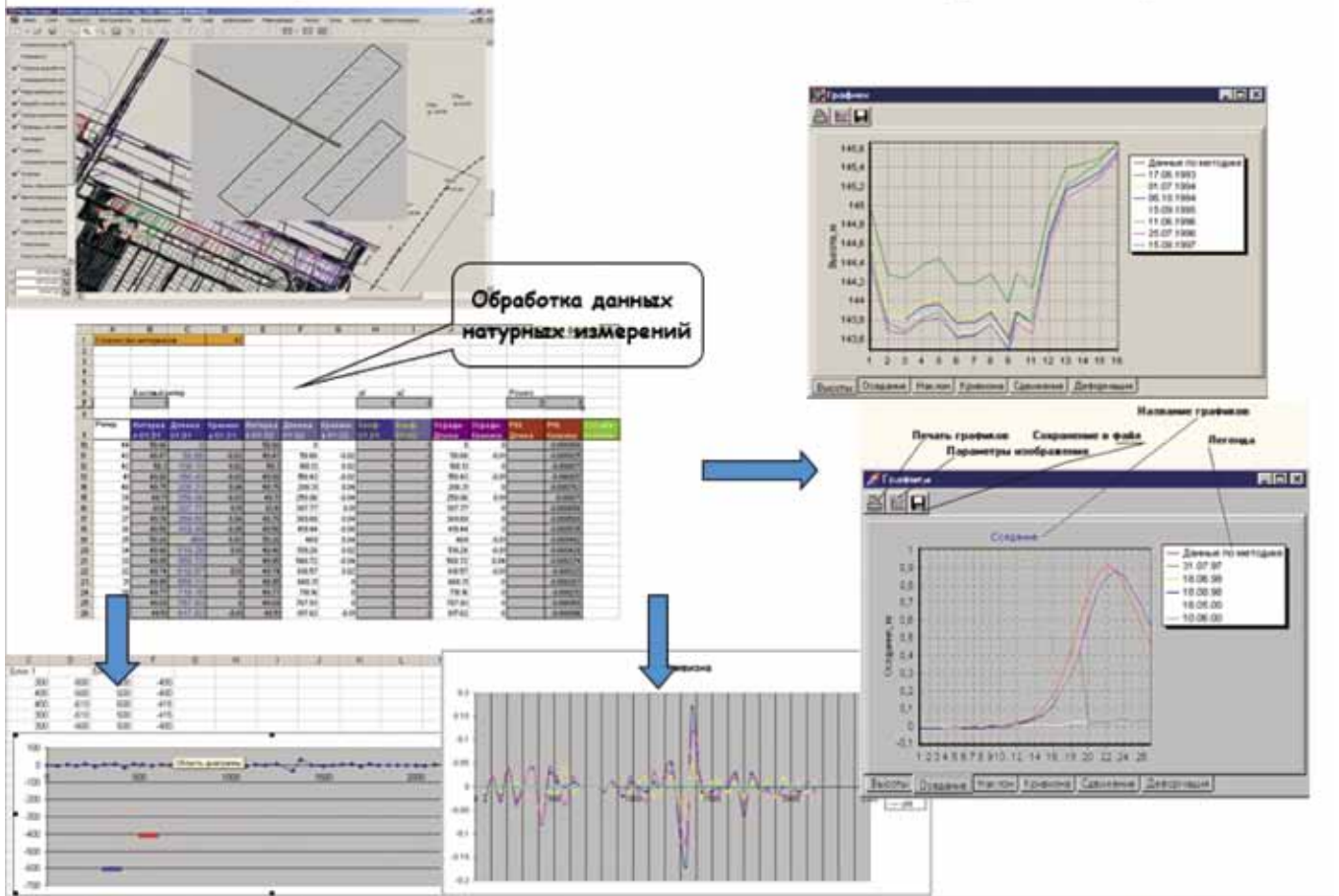


Рис. 5. Пример работы «самокорректирующейся» системы расчета сдвигов и деформаций дневной поверхности в новых горно-геологических и горнотехнических условиях

Fig. 5. An example of a «self-correcting» system for calculating surface displacements and deformations under new mining and geological and mining conditions

тированы на экспериментально-аналитический подход, совмещающий в себе достоинства строгих аналитических методов и моделей и результаты обработки конкретных детерминированных эмпирических данных.

С точки зрения разработки эффективной компьютерной системы достоверного расчета и прогноза основных характеристик процесса сдвигов земной поверхности, технологии ИИ интересны тем, что на их основе можно создать самокорректирующуюся интеллектуальную систему, самонастраивающуюся на конкретные горно-геологические и горнотехнические условия [20] (рис. 5).

Разработанная система ГИС позволит определять порядок отработки шахтного поля, уровень загрузки оборудования, а следовательно, возможность снижения энергопотребления подземным горнодобывающим предприятием как в долгосрочном, так и в краткосрочном периоде времени.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленная в работе система ГИС позволит спрогнозировать все этапы работы подземного горнодобывающего предприятия, в результате чего заранее будет известна загрузка применяемого электрооборудования. В этом случае будут определяться возможные варианты снижения потребления электроэнергии оборудованием и корректировка его работы в зависимости от необходимого снижения энергопотребления в установленное время.

Дополнительный модуль, позволяющий учитывать изменение параметров наружного воздуха, позволит в заданное время не просто снижать потребляемую ГВ электроэнергию, а делать это с учетом спроса.

При этом возможность снижения потребления электроэнергии не повлияет на безопасность ведения горных работ и не будет негативно влиять на технологический процесс.

Список литературы

1. Рассел С., Норвиг П. Искусственный интеллект: современный подход. М.: Издательство «Вильямс», 2016. 1408 с.
2. Искусственный интеллект в инженерном образовании / Б.А. Левин, А.А. Пискунов, В.Ю. Поляков и др. // Высшее образование в России. 2022. Т. 31. № 7. С. 79-95.
3. Рябко Т.В., Гуртов В.А., Степущ И.С. Анализ показателей подготовки кадров для сферы искусственного интеллекта по результатам мониторинга вузов // Высшее образование в России. 2022. Т. 31. № 7. С. 9-24.
4. Кудж С.А., Цветков В.Я. Сетевое управление и кибер-физические системы // Образовательные ресурсы и технологии. 2017. № 2. С. 86-92. DOI: 10.21777/2500-2112-2017-2-86-92.
5. Development and evaluation of fully automated demand response in large facilities / M. Piette, O. Sezgen, D. Watson et al. // Lawrence Berkeley National Laboratory, 2004.
6. Sezgen O., Goldman C.A., Krishnarao P. Option value of electricity demand response // Energy. 2007. Vol. 32. Is. 2. P. 108-119. DOI: 10.1016/j.energy.2006.03.024.
7. Methods for customer and demand response policies selection in new electricity markets / S. Valero, M. Ortiz, C. Senabre et al. // IET Generation, Transmission & Distribution. 2007. Vol. 1. Is. 1. P. 104-110. DOI: 10.1049/iet-gtd:20060183.
8. Nikolaev A.V., Vöth S., Kychkin A.V. Application of the cybernetic approach to price-dependent demand response for underground mining enterprise electricity consumption // Journal of Mining Institute. 2022. Vol. 261. P. 1-10. DOI: 10.31897/PMI.2022.33.
9. Factors defining value and direction of thermal pressure between the mine shafts and impact of the general mine natural draught on ventilation process of underground mining companies / A.V. Nikolaev, N.I. Alymenko, A.A. Kamenskikh et al. // IOP Conference. Series: Earth and Environmental Science. 2017. Vol. 87. № 052020. P. 561-566. DOI: 10.2991/aime-17.2017.91.
10. Kychkin A., Nikolaev A. IoT-based Mine Ventilation Control System Architecture with Digital Twin / 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). 2020. № 9111995. 5 p. DOI: 10.1109/ICIEAM48468.2020.9111995.
11. The results of air treatment process modeling at the location of the air curtain in the air suppliers and ventilation shafts / Nikolaev A., Alymenko N., Kamenskikh A. et al. // E3S Web of Conferences. 2017. Vol. 15. № 02004. 7 p. DOI: 10.1051/e3sconf/20171502004.
12. Факторы воздействия комбайна при добыче угля на увеличение метаноотдачи массива в рабочее пространство лавы / М.В. Павленко, М.П. Хайдина, Д.А. Кузиев и др. // Уголь. 2019. № 4. С. 8-11. DOI: 10.18796/0041-5790-2019-4-8-11.
13. Гидрометеорологическая безопасность и устойчивое развитие России / А.И. Бедрицкий, А.А. Коршунов, Л.А. Хандожко и др. // Право и безопасность. 2007. № 1-2. С. 7-13.
14. Tsirkunov V., Ulatov S., Korshunov A. Assessment of economic efficiency of the National hydrometeorological system modernization project. World Bank Working Paper, 2004.
15. Kychkin A.V., Nikolaev A.V. Architecture of a Cyber-Physical System for the Mining Enterprise Ventilation Control Based on the Internet of Things Platform // Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie. 2021. Vol. 22. Is. 3. P. 115-123. DOI: 10.17587/mau.22.115-123.
16. Журавков М.А. Корпоративные автоматизированные системы сопряженного геомониторинга // Наука и инновации. Научно-практический журнал. 2009. № 4. С. 51-54.
17. Журавков М.А. Роль и место корпоративных автоматизированных систем сопряженного геомониторинга в основных технологических процессах современного горнодобывающего предприятия // Рудник будущего. Научно-технический журнал. 2010. № 3. С. 108-112.
18. Журавков М.А., Плескунов В.Н., Невельсон И.С. Перспективы и основные направления внедрения автоматизированных геомониторинговых систем в РУП ПО «Беларуськалий» // Современные информационные технологии при добыче полезных ископаемых: материалы науч. практ. семинара-совещания. Минск: Изд. центр БГУ, 2004. С. 17-31.
19. Zhuravkov M.A., Krupoderov A.V., Konovalov O.L. Study of the stress-strain state in the mined potassium massif with inclined bedding // Geomaterials. 2014. No 4. P. 1-10.
20. Corporation computer system of designing and geological-surveying support of mining works and its subsystem of geomechanical supporting and simulation / M.A. Zhuravkov, O.L. Konovalov, V.E. Zeytc et al. / Proceedings of XIII International Congress of ISM 2007. Budapest, Hungary, 24-28 September 2007. P. 13-19.

UNDERGROUND MINING*Original Paper*

UDC 622.831+502.604 © M.L. Zhuravkov, A.V. Nikolaev, A.V. Kychkin, A.A. Presnyakov, 2023
 ISSN 0041-5790 (Print) • ISSN 2412-8333 (Online) • Ugol' – Russian Coal Journal, 2023, № 9, pp. 55-62
 DOI: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2023-9-55-62>

Title

RESEARCH OF THE DIGITAL TRANSFORMATION TOOLS FOR THE UNDERGROUND MINING ENTERPRISES FROM AN ELECTRICITY DEMAND RESPONSE PERSPECTIVE

Authors

Zhuravkov M.L.¹, Nikolaev A.V.², Kychkin A.V.³, Presnyakov A.A.²

¹ Belarusian State University, Minsk, 220030, Republic of Belarus

² Perm National Research Polytechnic University, Perm, 614990, Russian Federation

³ National Research University Higher School of Economics, Branch In Perm, Perm, 614070, Russian Federation

Authors information

Zhuravkov M.L., Doctor of Physics and Mathematics Sciences, Professor, Head of Theoretical and Applied Mechanics Department, e-mail: zhuravkov@bsu.by

Nikolaev A.V., Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor, Professor of the Mining Electromechanics Department, e-mail: nikolaev0811@mail.ru

Kychkin, A.V., PhD (Engineering), Associate Professor, Head of the Scientific and Educational Laboratory, e-mail: aleksey.kychkin@gmail.com

Presnyakov A.A., Student of the Mining Electromechanics Department, e-mail: arseny8950@gmail.com

Abstract

This paper presents the experience of research and development of digital technologies to improve the efficiency of underground mining enterprise (UMAE) in the aspect of ventilation system energy demand management tasks. Typical digital transformation tools on the example of the automated corporate system of regional geomechanical monitoring (GRM) are presented. Functional and algorithmic possibilities of the mining and geological information system (GIS) built in the SRMS are shown. Examples of problem realisation in the subsystems of geological – mine-surveyor accompaniment of mining works; CAD of mining works; intellectual system of analysis, interpretation and processing of primary information from GIS; an example of operation of the «self-correcting» system for computing shifts and deformations of the surface in new mining-geological and mining-technical conditions is given. It is shown how a set of digital twins of objects and processes of the PGDP ventilation system, when integrated into the GIS, can be used for dynamic energy resource management.

Keywords

Electricity demand response, Digital transformations, Underground mining, Short-term load forecasting, Digital twin.

References

- Russell S. & Norvig P. Artificial Intelligence: A Modern Approach. Moscow, Williams Publ., 2016, 1408 p. (In Russ.).
- Levin B.A., Piskunov A.A., Polyakov V.Yu. & Savin A.V. Artificial Intelligence in engineering education. *Vysshee obrazovanie v Rossii*, 2022, Vol. 31, (7), pp. 79-95. (In Russ.).
- Ryabko T.V., Gurtov V.A. & Stepus I.S. Analysis of indicators of personnel training for artificial intelligence based on monitoring results of universities. *Vysshee obrazovanie v Rossii*, 2022, Vol. 31, (7), pp. 9-24. (In Russ.).
- Kudzh S.A. & Tsvetkov V.Ya. Network-centred control and cyber-physical systems. *Obrazovatel'nye resursy i tehnologii*, 2017, (2), pp. 86-92. (In Russ.). DOI: 10.21777/2500-2112-2017-2-86-92.
- Piette M., Sezgen O., Watson D. et al. Development and evaluation of fully automated demand response in large facilities. *Lawrence Berkeley National Laboratory*, 2004.
- Sezgen O., Goldman C.A. & Krishnarao P. Option value of electricity demand response. *Energy*, 2007, Vol. 32, (2), pp. 108-119. DOI: 10.1016/j.energy.2006.03.024.
- Valero S., Ortiz M., Senabre C. et al. Methods for customer and demand response policies selection in new electricity markets. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2007, Vol. 1, (1), pp. 104-110. DOI: 10.1049/iet-gtd:20060183.
- Nikolaev A.V., Vöth S. & Kychkin A.V. Application of the cybernetic approach to price-dependent demand response for underground mining enterprise electricity consumption. *Journal of Mining Institute*, 2022, (261), pp. 1-10. DOI: 10.31897/PMI.2022.33.
- Nikolaev A.V., Alymenko N.I., Kamenskikh A.A. et al. Factors defining value and direction of thermal pressure between the mine shafts and impact of the general mine natural draught on ventilation process of underground mining companies. IOP Conference. Series: Earth and Environmental Science, 2017, Vol. 87, (052020), pp. 561-566. DOI: 10.2991/aime-17.2017.91.
- Kychkin A. & Nikolaev A. IoT-based Mine Ventilation Control System Architecture with Digital Twin. 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), 2020, (9111995), 5 p. DOI: 10.1109/ICIEAM48468.2020.9111995.
- Nikolaev A., Alymenko N., Kamenskikh A. & Nikolaev V. The results of air treatment process modeling at the location of the air curtain in the air suppliers and ventilation shafts. *E3S Web of Conferences*, 2017, Vol. 15, (02004), 7 p. DOI: 10.1051/e3sconf/20171502004.
- Pavlenko M.V., Khaidina M.P., Kuziev D.A., Pihorinskiy D. & Muratov A.Z. Impacts of the combine harvester in the production of coal to increase methane recovery array in the workspace lava. *Ugol*, 2019, (4), pp. 8-11. DOI: 10.18796/0041-5790-2019-4-8-11.
- Bedritsky A.I., Korshunov A.A., Khandozhko L.A. & Shaimardanov M.Z. Hydrometeorological Security and Sustainable Development of Russia. *Pravo i bezopasnost'*, 2007, (1-2), pp. 7-13. (In Russ.).
- Tsirkunov V., Ulatov S. & Korshunov A. Assessment of economic efficiency of the National hydrometeorological system modernization project. World Bank Working Paper, 2004.
- Kychkin A.V. & Nikolaev A.V. Architecture of a Cyber-Physical System for the Mining Enterprise Ventilation Control Based on the Internet of Things Platform. *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2021, Vol. 22, (3), pp. 115-123. DOI: 10.17587/mau.22.115-123.
- Zhuravkov M.A. Corporate automated systems for combined geomonitring. *Nauka i innovatsii*, 2009, (4), pp. 51-54. (In Russ.).
- Zhuravkov M.A. The role and place of corporate automated systems for combined geomonitring in the main technological processes of a present-day mining company. *Rudnik buduschego*, 2010, (3), pp. 108-112. (In Russ.).
- Zhuravkov M.A., Pleskunov V.N. & Nevelson I.S. Prospects and main trends in introduction of automated geomonitring systems at Belaruskali. Modern Information Technologies in Mining: Proceedings of the scientific seminar-meeting, Minsk, BGU Publ., 2004, pp. 17-31. (In Russ.).
- Zhuravkov M.A., Krupoderov A.V. & Konovalov O.L. Study of the stress-strain state in the mined potassium massif with inclined bedding. *Geomaterials*, 2014, (4), pp. 1-10.
- Zhuravkov M.A., Konovalov O.L., Zeytc V.E. & Slavashovich S.I. Corporation computer system of designing and geological-surveying support of mining works and its subsystem of geomechanical supporting and simulation. Proceedings of XIII International Congress of ISM 2007. Budapest, Hungary, 24-28 September 2007, pp. 13-19.

Acknowledgements

The study was carried out with the financial support of the Government of the Perm Territory within the framework of the International Research Group "Development of a digital model for forecasting and price-dependent demand response for electricity consumed by the underground mining enterprises" project, 2020 (agreement N C 26/506 dated 09.03.2021.)

For citation

Zhuravkov M.L., Nikolaev A.V., Kychkin A.V. & Presnyakov A.A. Research of the digital transformation tools for the underground mining enterprises from an electricity demand response perspective. *Ugol*, 2023, (9), pp. 55-62. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2023-9-55-62.

Paper info

Received March 14, 2023

Reviewed August 14, 2023

Accepted August 25, 2023