

**Непша Федор Сергеевич\***, кандидат техн. наук, старший научный сотрудник, **Воронин Вячеслав Андреевич**, старший преподаватель, **Ермаков Александр Николаевич**, кандидат техн. наук, заместитель директора горного института по НИР

Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28

\*E-mail: nepshafs@kuzstu.ru

## МЕТОДОЛОГИЯ ИМИТАЦИОННОГО КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ВЫЕМОЧНОГО УЧАСТКА УГОЛЬНОЙ ШАХТЫ

**Аннотация:** В настоящее время проектирование электротехнического комплекса выемочных участков выполняется по устаревшим нормативным документам, сформированным в начале 90-х годов XX века. Это замедляет реализацию концепции «цифрового горного предприятия» и не позволяет полностью реализовать потенциал к энергосбережению. В то же время развитие цифровых технологий делает актуальными вопросы имитационного компьютерного моделирования электротехнического комплекса выемочных участков угольных шахт. Имитационное компьютерное моделирование необходимо для разработки мероприятий по повышению эффективности электротехнического комплекса существующих угольных шахт, а также при проектировании новых угольных шахт.

В статье предложена методология формирования имитационных компьютерных моделей для оценки энергоэффективности системы электроснабжения выемочного участка угольной шахты. Для обеспечения корректности формирования профилей потребления активной и реактивных мощностей предложено использование сценарного подхода к моделированию динамических процессов. В качестве примера использования предложенного подхода рассмотрен один из сценариев работы электротехнического комплекса выемочного участка одной из угольных шахт Кузбасса.

**Ключевые слова:** угольные шахты, «Индустрия 4.0», имитационное моделирование, повышение эффективности, сценарное моделирование, FACTS, системы электроснабжения.

**Благодарности:** Работа выполнена при поддержке Гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых №МК-236.2020.8 по теме «Исследование и разработка энергоэффективных схем электроснабжения выемочных участков угольных шахт с применением технологий интеллектуального управления потоками электроэнергии и мощности».

**Информация о статье:** принята 20 ноября 2020 г.  
DOI: 10.26730/1816-4528-2020-6-59-67

**Введение.** Развитие подземного способа добычи угля характеризуется постоянным совершенствованием горно-шахтного оборудования и технологических процессов (рис. 1):

– в 40-60-е гг. XX века на шахтах был достаточно низкий уровень автоматизации. Очистные комбайны, скребковые конвейеры только начинали широко внедряться. При этом на шахтах уровень напряжения в системе электроснабжения не превышал 660 В.

– в 70-90-е гг. XX века была завершена комплексная механизация выемки угля, при этом постепенно развивался частотный электропривод, что обеспечило повышение эффективности подземной добычи угля. На угольных шахтах появляется оборудование с номинальным напряжением 1140 В.

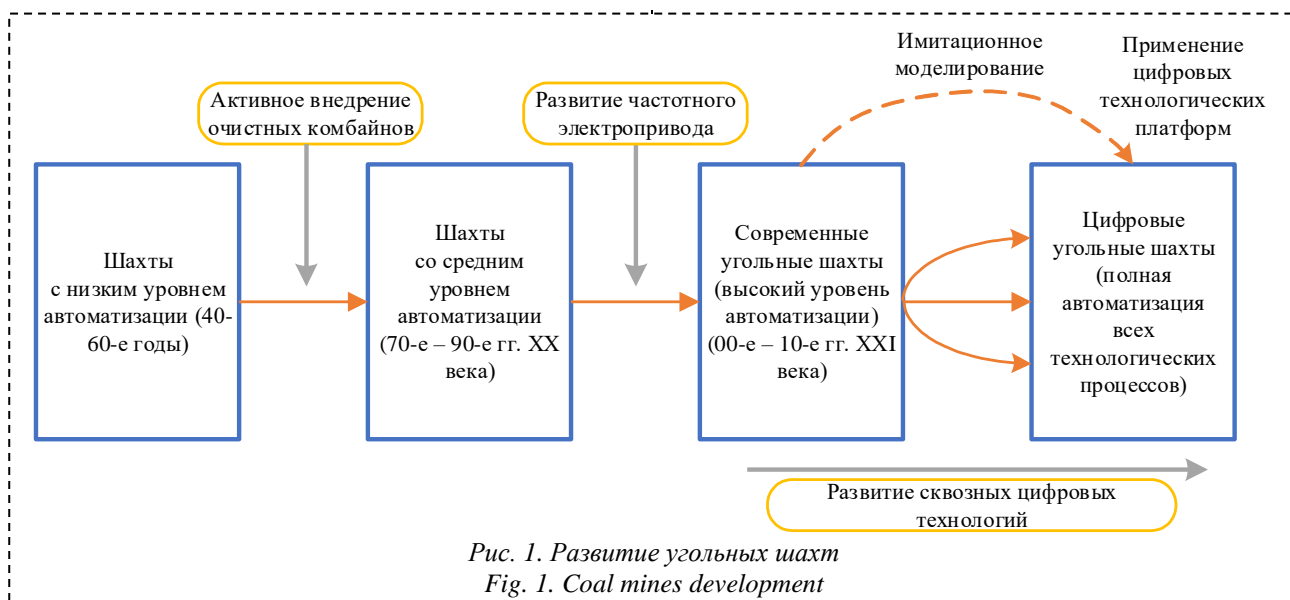
– в 00-10-е гг. XXI века большинство угольных шахт имеют высокий уровень автоматизации, присутствующий системы

автоматизированного управления, позволяющие контролировать основные технологические процессы с поверхности. Активно внедряются очистные комбайны с номинальным напряжением электропривода 3300 В, а также ленточные конвейеры с электроприводом 6 кВ.

В настоящее время угольная промышленность находится на этапе цифровизации, в результате которой на шахтах должна быть достигнута максимальная автоматизация всех технологических процессов.

В июне 2020 года Правительство РФ утвердило программу развития угольной промышленности до 2035 года [14], одним из ключевых направлений которой является реализация концепции «Индустрия 4.0» с последующим повышением производительности оборудования в 1,8 раз и эффективности труда в 3-4 раза.

В Китае широко занимают интеллектуализацией процессов [1], связанных с



проектированием и эксплуатацией угольных шахт. В работе [2] отмечается 3 этапа развития угольной промышленности: Индустрия -3.0, -4.0, -5.0. Стадия «Индустрия 3.0» соответствует снижению численности персонала, снижению выбросов в окружающую среду и практически уже реализована на большинстве угольных шахт Кузбасса. Стадия «Индустрия 4.0» предполагает почти безлюдные угольные шахты с практическим отсутствием выбросов в атмосферу, тогда как «Индустрии 5.0» соответствуют полная переработка угля в подземной части угольной шахты, отсутствие персонала в подземной части шахты и отсутствие любых выбросов в атмосферу. В публикации [4] предложен термин «интеллектуальная угледобыча» (intelligence coal mining), в публикации [3] – термин «устойчивая чистая угледобыча» (sustainable mining, green mining).

В публикации [7] обсуждается вопрос создания технологической платформы для создания цифровых горных предприятий. В ней отмечается, что процесс проектирования угольных предприятий сопровождается большим количеством документации, что приводит к проблемам с версионностью документации и возможным ошибкам. Все это негативно влияет на темпы цифровизации горных предприятий.

В части электротехнического комплекса снижение темпов цифровизации связано с тем, что, несмотря на рост энерговооруженности, проектирование систем электроснабжения (СЭС) выемочных участков угольных шахт по-прежнему выполняется в соответствии с морально устаревшей «Инструкцией по проектированию электростанций угольных шахт, разрезов, обогатительных и брикетных фабрик» (1993 г.) (далее – Инструкция). Данная Инструкция разрабатывалась в 60-80-е гг. XX века и поэтому не учитывает особенностей электротехнического комплекса выемочных участков современных угольных шахт. В результате на угольных шахтах до сих пор слабо распространены технологии интеллектуального управления потоками активной и

реактивной мощностей, что не позволяет в полной мере реализовать потенциал к повышению энергоэффективности.

В литературе встречается целый ряд имитационных моделей выемочных участков угольных шахт и связанного оборудования, используемых для разных целей:

- в статье [17] приведено обоснование разработки имитационных компьютерных моделей для исполнительных органов очистных и проходческих комбайнов;
- в статье [18] рассмотрена проблема определения силовых и кинематических параметров законтурных исполнительных органов геолода и предложен вариант решения задачи в среде MatLAB Simulink;
- в статье [19] кратко описаны принципы реализации модели законтурных исполнительных органов геолода в среде MatLAB Simulink;
- в статье [20] приводится достаточно подробное описание технологического процесса на очистном участке, модель на выходе выдает КРІ в виде объема добытого угля и расстояния, пройденного комбайном.
- в [21] описывается трехмерная модель, разработанная в среде MTSS. Сделано заключение о том, что увеличение длины забоя с определенного момента не приводит к увеличению производительности.
- в статье [22] рассматриваются имитационные модели различных подсистем угольной шахты (подсистема ленточный конвейеров, насосная система, забойный участок) с использованием интерактивной среды 3D-моделирования. Предлагаемая среда моделирования обеспечивает быстрое моделирование с использованием библиотек элементов при взаимодействии с внешними системами.
- в статье [23] описывается имитационная модель полностью автоматизированного очистного участка угольной шахты. Модель позволяет определить выделение метана с учетом

вентиляции и режима работы горно-шахтного оборудования.

– в диссертации [24] с использованием дискретного моделирования исследуется эффективность работы забойного комплекса и определены параметры, оказывающие наибольшее влияние на производительность выемочного участка.

Отметим, что в вышеуказанных публикациях не исследовалась динамика потребления реактивной мощности горно-шахтным оборудованием очистного участка. Таким образом, их результаты не позволяют оценить энергоэффективность системы электроснабжения очистного участка.

В связи с вышесказанным требуется разработка имитационных компьютерных моделей электротехнического комплекса выемочных участков, позволяющих сформировать методологию проектирования систем электроснабжения цифрового горного предприятия.

Отметим, что имитационное компьютерное моделирование необходимо для создания адекватных математических моделей, позволяющих в совокупности с информационной моделью обеспечить создание цифрового двойника [15], достаточного для выполнения следующих действий: достоверное отображение состояния объекта в

реальном времени; достоверное предсказание поведения объекта в штатных и нештатных условиях эксплуатации; достоверное порождение управляющих воздействий на объект.

**Постановка проблемы.** Энерговооруженность горно-шахтного оборудования и технологические особенности выемки угля в значительной степени влияют на себестоимость продукции, поэтому выемочному участку необходимо уделить особое внимание при разработке мероприятий по повышению энергоэффективности, позволяющих снизить себестоимость добычи угля.

На рис. 2 представлена структурная схема размещения горно-шахтного оборудования и системы электроснабжения выемочного участка одной из угольных шахт Кузбасса.

Основным ресурсом, потребляемым горно-шахтным оборудованием, является электроэнергия. Выемочный участок получает электроснабжение от распределительного подземного пункта (РПП), от которого кабельные линии приходят на передвижные участковые подземные подстанции (ПУПП). ПУПП понижают напряжение с 6 кВ до номинального уровня напряжения горно-шахтного оборудования. До недавнего времени номинальное напряжение оборудования не превышало значения 1140 В, однако электроприводы

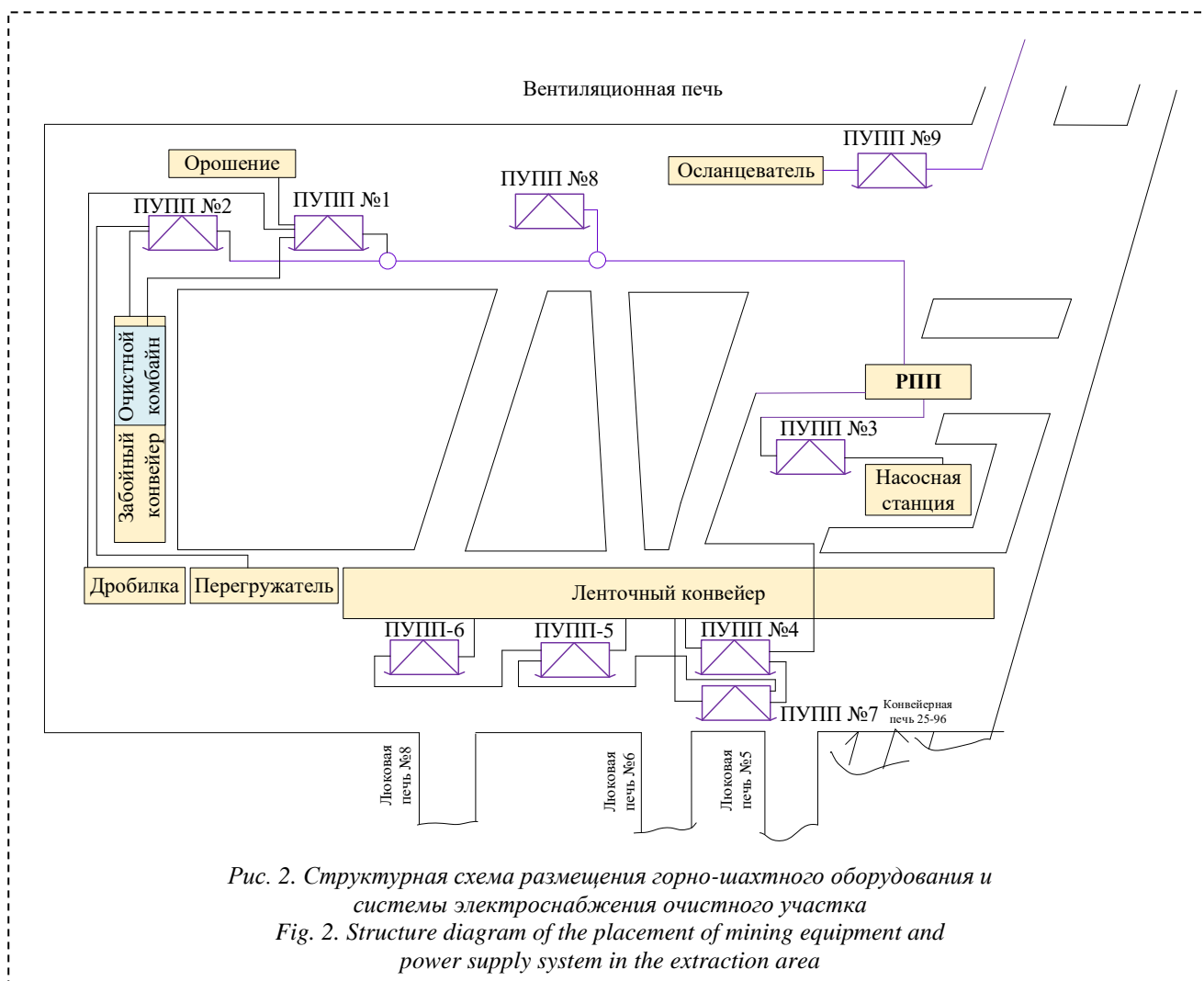


Рис. 2. Структурная схема размещения горно-шахтного оборудования и системы электроснабжения очистного участка  
Fig. 2. Structure diagram of the placement of mining equipment and power supply system in the extraction area

современных очистных комбайнов уже имеют номинальное напряжение 3300 В. Также встречаются ленточные конвейеры с электроприводом 6 кВ.

Увеличение уровня напряжения вызвано увеличением энергоемкости оборудования выемочного участка, необходимостью снижения потерь в кабельных линиях, а также более низкими массогабаритными показателями высоковольтных двигателей сопоставимой мощности.

Данные [16] показывают, что выемочный участок угольной шахты обладает высокой энерговооруженностью. При этом даже при номинальной нагрузке оборудования потребление реактивной мощности весьма значительно.

Кроме того, в связи с преобладанием двигательной нагрузки, работающей в повторно-кратковременном режиме, необходимо учитывать переходные процессы, оказывающие существенное

влияние на потребление реактивной мощности. Эффективность такого подхода доказана в работах В. В. Дабарова [9], Marcio M. de Oliveira [10], Z. Ming [11], Y. Lee, L. Liudvinavicius [12] и др. Кроме того, это необходимо для оценки эффективности быстродействующих устройств управления потоками активной и реактивной мощности.

**Методология моделирования электротехнического комплекса угольной шахты.** Для моделирования электротехнического комплекса угольной шахты авторы предлагают использовать алгоритм, представленный на рисунке ниже (рис. 3).

Имитационные компьютерные модели необходимы для оценки показателей энергоэффективности СЭС выемочных участков угольных шахт, а также для оценки технико-экономической целесообразности использования устройств

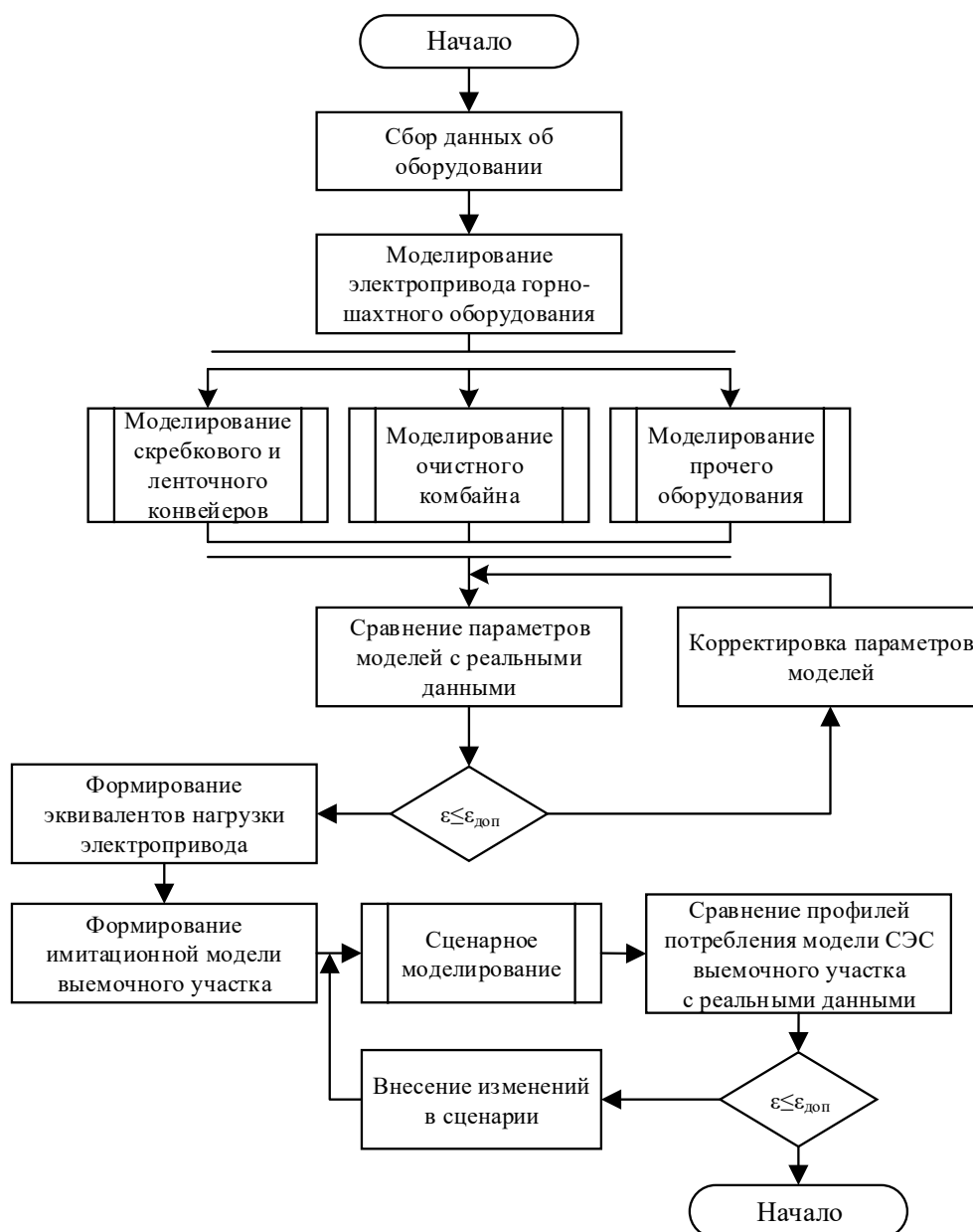


Рис. 3. Алгоритм формирования имитационной модели электротехнического комплекса угольной шахты  
Fig. 3. Algorithm of the simulation model formation for a coal mine electrical complex

компенсации реактивной мощности (УКРМ), активных фильтрокомпенсирующих устройств (ФКУ), устройства FACTS (статические тиристорные компенсаторы, СТАТКОМ, динамические компенсаторы искажения напряжения (ДКИН)), систем накопления электрической энергии в шахтных условиях.

Формирование имитационной модели электротехнического комплекса включает выполнение следующих этапов:

1) Сбор данных об оборудовании, необходимых для моделирования электропривода основного горно-шахтного оборудования:

- Очистной комбайн. Моделирование момента сопротивления электропривода резания очистного комбайна выполняется путем расчета сил резания резцов исполнительного органа в зависимости от угла поворота шнека.

Для выполнения данного расчета требуется информация о конструктивных и технологических параметрах комбайна и горно-геологических параметрах разрабатываемого пласта. Случайный характер изменения сопротивляемости угля резанию учитывается по среднему значению и дисперсии сопротивляемости угля резанию разрабатываемого пласта. Для моделирования момента сопротивления электропривода подачи необходимы данные о массе комбайна и угле падения пласта [25].

- Скребок и ленточный конвейер. Моделирование момента сопротивления тягового органа скрепковых и ленточных конвейеров выполняется на основе представления тягового органа совокупностью элементарных динамических звеньев, представляющих собой некоторую инерционную массу, которая связана с соседними массами при помощи линейного упруго-диссипативного элемента.

Для составления модели требуются данные о длине конвейера; массе участка тягового органа; коэффициентах жесткости и сопротивления звеньев тягового органа; диаметре, массе, коэффициентах жесткости и сопротивления приводного барабана (звездочки); коэффициентах сопротивления движению; параметрах грузопотока. Для ленточных конвейеров также необходимо знать вес груза натяжного устройства.

- Дробилка, перегружатель, оросительная установка. Моделирование электропривода для данных элементов производится в упрощенном виде – без детального учета факторов, влияющих на момент нагрузки на валу электродвигателей.

Модель каждого электропривода горного оборудования также включает в себя редукторы и электродвигатели. Для редукторов требуются следующие данные: передаточные отношения; моменты инерции; коэффициенты жесткости и сопротивления.

Для моделирования электродвигателя достаточно паспортных параметров (номинальная мощность; номинальное напряжение; коэффициент мощности; коэффициент полезного действия;

число пар полюсов; кратность пускового момента и тока; момент инерции; скольжение).

2) Моделирование горно-шахтного оборудования. На этом этапе создаются имитационные модели в специализированной среде моделирования MATLAB Simulink.

3) Сравнение результатов моделирования с реальными данными. Результаты моделирования сравниваются с фактическими результатами замеров, в итоге определяется значение среднего отклонения кривой потребления активной и реактивной мощностей от реальных значений ( $\epsilon$ ). Если значение  $\epsilon$  меньше либо равно допустимому значению погрешности моделирования  $\epsilon_{\text{доп}}$ , то результаты моделирования признаются удовлетворительными и пригодными для дальнейшего формирования имитационной модели СЭС выемочного участка угольной шахты. В противном случае в модель электропривода вносятся изменения до тех пор, пока погрешности моделирования не будут соответствовать допустимым значениям.

4) Формирование эквивалентов нагрузки электропривода горно-шахтного оборудования выполняется в случае большого объема имитационных моделей, не позволяющего обеспечить требуемое время моделирования. Эквивалент нагрузки представляет собой функцию потребляемой активной и реактивной мощностей от модельного времени.

5) Формирование имитационной модели выемочного участка. На основе разработанных моделей электропривода формируется модель электротехнического комплекса выемочного участка угольной шахты.

6) Сценарное моделирование. Для выполнения сценарного моделирования необходимо обеспечить мониторинг работы электрооборудования с целью последующего моделирования набора режимов, характерных для конкретных этапов технологического процесса. В случае отсутствия таких данных можно воспользоваться планограммой работ. Цель моделирования состоит в том, чтобы установить связь между режимом работы единиц электрооборудования и технологическими процессами.

7) Сравнение профилей потребления модели СЭС выемочного участка с реальными данными. Сравниваются данные реальных измерений с результатами моделирования. В результате определяется погрешность моделирования, которая не должна превышать допустимых значений.

8) Внесение изменений в сценарий. В случае значительной погрешности моделирования вносятся изменения в сценарий моделирования (изменяется время пуска/останова оборудования, длительность его работы в конкретном режиме).

Конечным результатом моделирования является формирование имитационной модели высокой степени достоверности, пригодной в том числе для последующего формирования

цифрового двойника электротехнического комплекса угольной шахты.

**Сценарный подход к формированию имитационных моделей.** Сценарный подход к формированию имитационных моделей состоит в пошаговом описании режимов работы электрооборудования в ходе технологического процесса. Для этого сначала изучаются технологические карты и планыграммы работ при нагрузке на очистной забой.

На выемочном участке технологический процесс продолжается круглосуточно и разделен на 4 смены: 1 смена (ремонтная, обычно с 7-00 до 12-00), 2-4 смены (рабочая с 12-00 до 7-00).

В ремонтную смену горнорабочие очистного забоя занимаются обслуживанием оборудования, далее начинается технологический процесс добычи угля, который остается практически идентичным в течение 2-4 смен. Отметим, что в силу значительного количества случайных факторов реальные графики режимов работы горно-шахтного оборудования могут отличаться от планыграммы.

В связи с этим работу выемочного участка можно разделить на следующие основные сценарии: ремонтная смена и рабочая смена.

Ремонтная смена включает следующие подсценарии:

- 1) Останов горно-шахтного оборудования.
- 2) Ремонт и обслуживание оборудования (периодические включения оборудования для его проверки).

- 3) Прием-сдача смены.

Рабочая смена включает следующие подсценарии:

- 1) Пуск горно-шахтного оборудования (перед сменой №2).

- 2) Зарубка комбайна.

- 3) Выемка угля комбайном (относительно постоянная нагрузка комбайна в сравнении с пусковым режимом).

- 4) Зачистка комбайновой дорожки и передвижка лавного конвейера (с остановкой оборудования).

- 5) Прием-сдача смены.

Ниже приведено описание подсценария «Пуск горно-шахтного оборудования».

1. Запуск ленточного конвейера (одновременный запуск приводных станций). Условие – запущены ленточные конвейеры.

2. Запуск дробилки.

3. Запуск перегружателя.

4. Запуск скребкового конвейера.

5. Запуск очистного комбайна (пуск привода резания, пуск привода подачи).

6. Зарубка комбайна.

7. Выемка угля комбайном.

8. Останов привода резания.

9. Перегон комбайна и зачистка почвы.

10. п. 1-9 повторяются n раз.

Далее сценарий детализируется до определения конкретного времени запуска

электропривода, чтобы обеспечить адекватность имитационной компьютерной модели.

Направления дальнейших исследований. В дальнейшем планируется использование предложенной методологии для создания детальных имитационных моделей электротехнического комплекса выемочного участка угольной шахты с целью проверки гипотез о целесообразности применения интеллектуальных устройств управления потоками активной и реактивной мощностей. Кроме того, предложенный подход может быть использован для расширения функциональности существующих SCADA-систем в части создания цифровых двойников, обеспечивающих поддержку принятия решений и оценки эффекта использования новых технологий.

**Выводы.** Стремительная цифровизация угледобывающих предприятий требует развития методологии имитационного моделирования с целью получения компьютерных моделей высокой степени достоверности. Такие модели могут быть использованы на этапах проектирования и эксплуатации.

Представленная в статье методология позволяет сформировать имитационную модель, достаточную для дальнейшего анализа целесообразности изменения топологии схемы электропитания, а также оценки эффективности применения устройств FACTS.

Предложенный подход к сценарному моделированию режимов работы выемочного участка обеспечивает корректное моделирование динамических процессов для последующей оценки эффективности применения интеллектуальных устройств управления потоками активной и реактивной мощности, что позволит с высокой точностью оценить влияние устройств FACTS на уровень потерь активной мощности, а также показатели качества электрической энергии.

Кроме того, предлагаемую методологию можно использовать при развитии систем автоматизированного проектирования для проектирования энергоэффективных систем электропитания выемочных участков.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. R. Y. Zhong, X. Xu, E. Klotz, S.T. Newman, Intelligent manufacturing in the context of industry 4.0: A review, *Engineering* 3 (5) (2017) 616–630.

2. X. Heping, G. Feng, J. Yang, Theoretical and technological conception of the fluidization mining for deep coal resources, *J. China Coal Soc.* 42 (3) (2017) 547–556.

3. 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.* 29 (2) (2019) 161-169.

4. M. Qian, J. Xu, J. Wang, Further on the sustainable mining of coal, *J. China Coal Soc.* 43 (1) (2018) 1-13.

5. G. Wang, F. Liu, Y. Pang, H. Ren, Y. Ma, Coal mine intellectualization: The core technology of high-quality development, *Meitan Xuebao/J. China Coal Soc.* 44(2) (2019) 349-357.
6. G. Wang, G. Zhao, H. Ren, Analysis on key technologies of intelligent coal mine and intelligent mining, *Meitan Xuebao/J. China Coal Soc.* 44 (1) (2019) 34-41.
7. 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, 9, 5373.
8. Wu, Y., Chen, M., Wang, K., & Fu, G. (2019). A dynamic information platform for underground coal mine safety based on internet of things. *Safety Science.*
9. Дабаров В. В. Компенсация реактивной мощности в динамических режимах работы электродвигательной нагрузки: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03. – Кемерово, 2013. – 18 с.
10. Oliveira, M. M. de and M. Halonen. "Dynamic reactive power compensation: Opportunities and challenges in the mexican grid." 2016 IEEE PES Transmission & Distribution Conference and Exposition-Latin America (PES T&D-LA) (2016): 1-6.
11. Ming, Z., Bo, T., & Shuang-feng, Z. (2013). Controller of Dynamic Reactive Power Compensation Based on FPGA. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 11, 4523-4529.
12. Yunhwan Lee & Hwachang Song, 2019. "A Reactive Power Compensation Strategy for Voltage Stability Challenges in the Korean Power System with Dynamic Loads," *Sustainability*, MDPI, Open Access Journal, vol. 11(2), pages 1-19, January.
13. Liudvinavičius, L. (2018). The methods of reactive power compensation in the 25 kV, 50 Hz contact network. *Transport Problems*, 13, 59-68.
14. Распоряжение Правительства РФ от 13.06.2020 N 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/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_355241/) (дата обращения: 15.07.2020).
15. Окольнишников В. В., Ордин А. А., Рудометов С. В. Разработка цифрового двойника очистного забоя угольной шахты // Труды XVII Международной конференции DICR-2019, Новосибирск, 3-6 декабря 2019 г. – Новосибирск: 2019.
16. Копылов К. Н. Имитационное моделирование системы электроснабжения выемочного участка угольной шахты / К. Н. Копылов, С. Н. Решетняк, С. С. Кубрин // ГИАБ. 2016. №12. С. 40-50.
17. Бабарыкин А. В., Шнаймиллер Н. К., Хорешок А. А. Обоснование необходимости разработки ряда имитационных компьютерных моделей работы исполнительных органов очистных и проходческих комбайнов. Сборник материалов XI Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Россия молодая» (16-19 апреля 2019 г.), Кемерово [Электронный ресурс] / ФГБОУ ВО «Кузбас. гос. техн. ун-т им. Т. Ф. Горбачева»; редкол.: С. Г. Костюк (отв. ред.) [и др.]. – Кемерово, 2019.
18. Аксенов В. В., Хорешок А. А., Ананьев К. А., Ермаков А. Н. Оценка возможности применения методов имитационного моделирования для определения параметров законтурных исполнительных органов геолога // ГИАБ. 2016. №2. URL: [https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-vozmozhnosti-primeneniya-metodov-imitatsionnogo-modelirovaniya-dlya-opredeleniya-parametrov-zakonturnyh-ispolnitelnyh](https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-vozmozhnosti-primeneniya-metodov-imitatsionnogo-modelirovaniya-dlya-opredeleniya-parametrov-zakonturnyh-ispolnitelnyh-organov-geohoda) (дата обращения: 17.10.2020)
19. Аксенов В. В., Хорешок А. А., Ананьев К. А., Ермаков А. Н. Определение силовых и кинематических параметров исполнительных органов геолога методом имитационного моделирования // Вестник КузГТУ. 2016. №1 (113). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/opredelenie-silovyh-i-kinematcheskikh-parametrov-ispolnitelnyh-organov-geohoda-metodom-imitatsionnogo-modelirovaniya> (дата обращения: 17.10.2020)
20. Cai, D; Baafi, E; and Porter, I, "Modelling a longwall production system using flexsim 3D simulation software" (2012). Faculty of Engineering and Information Sciences - Papers: Part A. 214. <https://ro.uow.edu.au/eispapers/214> .
21. V. V. Okolnishnikov, "Modelling of Longwall Coal Mining," 2020 International Conference on Mathematics and Computers in Science and Engineering (MACISE), Madrid, Spain, 2020, pp. 202-208, doi: 10.1109/MACISE49704.2020.00044.
22. Okolnishnikov, V., S. Rudometov and S. Zhuravlev. "Simulating the Various Subsystems of a Coal Mine." *Engineering, Technology & Applied Science Research* 6 (2016): 993-999.
23. Okolnishnikov, V. V., Ordin, A. A. & Rudometov, S. V. Modeling of Underground Coal Mining Processes. *Optoelectron. Instrument. Proc.* 55, 383-387 (2019). <https://doi.org/10.3103/S8756699019040095>
24. Enver Yilmaz Discrete event simulation of a shearer performance for a longwall operation, thesis for the degree of master of science in mining engineering September 2018.
25. К. А. Ананьев, А. В. Бабарыкин, А. Н. Ермаков. Влияние угла падения пласта на усилие подачи очистных комбайнов. Перспективы инновационного развития угольных регионов России: Сборник трудов VI Международной научно-практической конференции. – Прокопьевск: изд-во филиала КузГТУ в г. Прокопьевске, 2018. – 533 с.

**Fedor S. Nepsha**<sup>1,\*</sup>, C. Sc. (Engineering), senior researcher, **Vyacheslav A. Voronin**<sup>1</sup>, senior lecturer, **Alexandr N. Ermakov**<sup>1</sup>, C. Sc. (Engineering), Deputy Director of Mining Institute for Research

<sup>1</sup> T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 28 street Vesennyaya, Kemerovo, 650000, Russian Federation

\*E-mail: nepshafs@kuzstu.ru

## METHODOLOGY OF SIMULATION COMPUTER MODELING OF THE POWER SUPPLY SYSTEM OF THE COAL MINE EXTRACTION AREA

**Abstract:** Currently, the design of the electrical complex of coal mine extraction areas is carried out according to outdated regulatory documents, formed in the early 90s of the 20th-century. It slows down the implementation of the “digital mining enterprise” concept and does not fully realize the potential for energy savings. At the same time, the development of digital technologies makes relevant the simulation computer modeling issues for the electrical complex of coal mine extraction areas. Simulation computer modeling is necessary for the development of measures to improve the efficiency of the electrical complex of existing coal mines, as well as in the design of new coal mines.

The article proposes a methodology for the formation of simulation computer models to assess the energy efficiency of the power supply system of a coal mine extraction area. To ensure the correctness of the formation of consumption profiles of active and reactive power, the authors proposed to use a scenario approach to modeling dynamic processes. As an example of using the proposed approach, one of the scenarios for the operation of the electrical complex of an excavation site of one of the coal mines of Kuzbass is considered.

**Keywords:** coal mines, «Industry 4.0», simulation, efficiency improvement, scenario modeling, FACTS, power supply systems

**Acknowledgment:** In this paper, the research was sponsored by the Grant of the President of the Russian Federation for the state support of young Russian scientists No. MK-236.2020.8.

**Article info:** received November 20, 2020  
DOI: 10.26730/1816-4528-2020-6-59-67

### REFERENCES

1. Zhong R. Y., Xu X., Klotz E., Newman S.T. (2017) Intelligent manufacturing in the context of industry 4.0: A review. *Engineering* 3(5):616.
2. Heping X., Feng G., Yang J. (2017) Theoretical and technological conception of the fluidization mining for deep coal resources. *J. China Coal Soc.* 42(3):547.
3. Wang G., Xu Y., Ren H. (2019) Intelligent and ecological coal mining as well as clean utilization technology in China: Review and prospects. *Int. J. Mining Sci. Technol.* 29 2):161.
4. Qian M., Xu J., Wang J. (2018) Further on the sustainable mining of coal, *J. China Coal Soc.* 43(1):1.
5. Wang G., Liu F., Pang Y., Ren H., Ma Y. (2019) Coal mine intellectualization: The core technology of high quality development *Meitan Xuebao/J. China Coal Soc.* 44(2):349.
6. Wang G., Zhao G., Ren H. (2019) Analysis on key technologies of intelligent coal mine and intelligent mining, *Meitan Xuebao/J. China Coal Soc.* 44 (1):34.
7. Wang J., Bi L., Wang, L., Jia M., Mao D. A. (2019) Mining Technology Collaboration Platform Theory and Its Product Development and Application to Support China’s Digital Mine Construction. *Appl. Sci.*, 9, 5373.
8. Wu Y., Chen M., Wang K., Fu G. (2019). A dynamic information platform for underground coal mine safety based on internet of things. *Safety Science*.
9. Dabarov V. V. (2013) Kompensatsiya reaktivnoy moshchnosti v dinamicheskikh rezhimakh raboty elektrodvigateľnoy nagruzki: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.09.03. – Kemerovo, 2013. 18 s.
10. Oliveira, M. M., M. Halonen (2016) Dynamic reactive power compensation: Opportunities and challenges in the mexican grid. *IEEE PES Transmission & Distribution Conference and Exposition-Latin America (PES T&D-LA)*: 1.
11. Ming Z., Bo T., Shuang-feng Z. (2013). Controller of Dynamic Reactive Power Compensation Based on FPGA. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 11:4523.
12. Yunhwan Lee, Hwachang Song (2019). A Reactive Power Compensation Strategy for Voltage Stability Challenges in the Korean Power System with Dynamic Loads, *Sustainability, MDPI. Open Access Journal*, 11(2):1.
13. Liudvinavičius, L. (2018) The methods of reactive power compensation in the 25 kV, 50 Hz contact network. *Transport Problems*, 13:59.
14. Rasporyazhenie Pravitel'stva RF ot 13.06.2020 N 1582-r Ob utverzhenii Programmy razvitiya ugol'noy promyshlennosti Rossii na period



do 2035 goda // SPS Konsul'tantPlyus URL: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_355241/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_355241/)

15. Okol'nishnikov V. V., Ordin A. A., Rudometov S. V. (2019) Razrabotka tsifrovogo dvoynika ochistnogo zaboya ugol'noy shakhty // Trudy XVII Mezhdunarodnoy konferentsii DICR-2019, Novosibirsk.

16. Kopylov K. N., Reshetnyak S. N., Kubrin S. S. (2016) Imitatsionnoe modelirovanie sistemy elektrosnabzheniya vyemochnoy uchastka ugol'noy shakhty. GIAB, 12:40.

17. Babarykin A. V., Shnaydmiller N. K., Khoreshok A. A. (2019) Obosnovanie neobkhodimosti razrabotki ryada imitatsionnykh komp'yuternykh modeley raboty ispolnitel'nykh organov ochistnykh i prokhodcheskikh kombaynov. Sbornik materialov XI Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem «Rossiya molodaya» (16-19 aprelya 2019 g.), Kemerovo .

18. Aksenov V. V., Khoreshok A. A., Anan'ev K. A., Ermakov A. N. (2016) Otsenka vozmozhnosti primeneniya metodov imitatsionnogo modelirovaniya dlya opredeleniya parametrov zakonturnykh ispolnitel'nykh organov geokhoda. GIAB, 2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-vozmozhnosti-primeneniya-metodov-imitatsionnogo-modelirovaniya-dlya-opredeleniya-parametrov-zakonturnykh-ispolnitelnykh>

19. Aksenov V. V., Khoreshok A. A., Anan'ev K. A., Ermakov A. N. (2016) Opredelenie silovykh i kinematicallykh parametrov ispolnitel'nykh organov geokhoda metodom imitatsionnogo modelirovaniya // Vestnik KuzGTU,

1(113). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/opredelenie-silovykh-i-kinematicallykh-parametrov-ispolnitelnykh-organov-geokhoda-metodom-imitatsionnogo-modelirovaniya>

20. Cai D., Baafi E., Porter I. (2012) Modelling a longwall production system using flexsim 3D simulation software. Faculty of Engineering and Information Sciences – Papers: Part A. 214. <https://ro.uow.edu.au/eispapers/214>

21. Okol'nishnikov V. V. (2020) Modelling of Longwall Coal Mining, 2020 International Conference on Mathematics and Computers in Science and Engineering (MACISE). Madrid, Spain, 202, doi: 10.1109/MACISE49704.2020.00044.

22. Okol'nishnikov V., Rudometov S., Zhuravlev S. (2016) Simulating the Various Subsystems of a Coal Mine. Engineering, Technology & Applied Science Research, 6:993.

23. Okol'nishnikov V. V., Ordin A. A., Rudometov, S. V. (2019) Modeling of Underground Coal Mining Processes. Optoelectron.Instrument.Proc, 55:383. <https://doi.org/10.3103/S8756699019040095>

24. Enver Y. (2018) Discrete event simulation of a shearer performance for a longwall operation, thesis for the degree of master of science in mining engineering

25. Anan'ev K. A., Babarykin A. V., Ermakov A. N. (2018) Vliyanie ugla padeniya plasta na usilie podachi ochistnykh kombaynov. Perspektivy innovatsionnogo razvitiya ugol'nykh regionov Rossii: Sbornik trudov VI Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. – Prokop'evsk: izd-vo filiala KuzGTU v g. Prokop'evske. 533

#### Библиографическое описание статьи

Непша Ф.С., Воронин В.А., Ермаков А.Н. Методология имитационного компьютерного моделирования системы электроснабжения выемочного участка угольной шахты // Горное оборудование и электромеханика – 2020. – № 6 (152). – С. 59-67.

#### Reference to article

Nepsha F.S., Voronin V.A., Ermakov A.N. Methodology of simulation computer modeling of the power supply system of the coal mine extraction area. Mining Equipment and Electromechanics, 2020, no.6 (152), pp. 59-67.