

УДК 622.831

## ЦИФРОВИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ НА ПРИМЕРЕ УГОЛЬНЫХ ШАХТ

**В. А. Волошин, А. В. Безносков**

Сибирский государственный индустриальный университет (Россия, 654007, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

**Аннотация.** Обозначена необходимость создания «Цифрового двойника» на угольных шахтах для формирования стандартных параметров подготовительного забоя. Представлены предварительные результаты анализа работоспособности системы на основе когнитивного моделирования с целью повышения безопасности работ, сокращения внеплановых простоев. Предложена к использованию автоматизированная система расчета «дерева» отказов и событий с определением возможных рисков с использованием пакета компьютерных программ и оценки качества системы по коэффициенту вероятности аварии.

**Ключевые слова:** цифровая модель, информационные системы, оптимизация работы предприятия, технологическая схема

**Для цитирования:** Волошин В.А., Безносков А.В. Цифровизация производственных процессов на примере угольных шахт // *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2021. № 3 (37). С. 31 – 36.

## PRODUCTION PROCESSES DIGITALIZATION BY THE EXAMPLE OF COAL MINES

**V. A. Voloshin, A. V. Beznosov**

Siberian State Industrial University (42 Kirova Str., Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass 654007, Russian Federation)

**Abstract.** Relevance of a coal mine digital twin development for estimation of standard parameters of the development face is indicated. Preliminary results of system performance analysis based on cognitive modeling have been presented in order to improve work safety, reduce unscheduled downtime. An automated system for calculating the "tree" of failures and events with identification of possible risks using computer programs package and assessing system quality by the coefficient of accident probability has been proposed.

**Keywords:** digital model, information systems, optimization of the enterprise, technological scheme

**For citation:** Voloshin V.A., Beznosov A.V. Production processes digitalization by the example of coal mines // *Bulletin of SibSIU*. 2021, no. 3 (37), p. 31–36. (In Russ.).

Внедрение цифровых технологий не только увеличивает эффективность производства, но и повышает его безопасность; роботизация отдельных процессов позволяет сократить количество работников в опасных зонах.

По подсчетам экспертов создание полностью безлюдного рудника приводит к сокращению

штата всего на 35 %, но зато объем требуемых компетенций для оставшихся сотрудников увеличивается на 80 %. Автоматизация – это, прежде всего, не про сокращение рабочей силы, а про ее переквалификацию. Беспилотный транспорт превращает водителя грузовика в оператора, который управляет техникой удаленно при помо-

щи дистанционного пульта управления. Экспансия «цифры» снижает потребность в людях, отвечающих за рутинные операции, повышается потребность в специалистах, которые способны взаимодействовать с автономной техникой и настраивать алгоритмы ее работы [1].

Разработка цифрового двойника (копии), который создается и развивается одновременно с реальным объектом, – это одно из направлений цифровизации.

С помощью «Цифрового двойника» можно управлять ключевыми технологическими и производственными процессами, эксплуатационными режимами и рассматривать сценарии «что, если» без негативного вмешательства в реальное производство.

Использование программного обеспечения для управления производственным процессом может помочь оптимизировать работу отдельных участков путем проектирования и разработки смоделированных прототипов в виртуальном мире [2].

На одной из шахт города Новокузнецк начата работа по созданию математической модели прогноза работы проходческих забоев и всего предприятия в целом. Целью настоящей работы является определение возможности прогнозирования эффективности принятия технических решений без вмешательства в рабочий процесс подготовительных участков и шахты. Руководством предприятия были поставлены задачи: 1 – выполнить анализ эффективности базы ресурсов (существующего на шахте оборудования и оценки квалификации персонала); 2 – определить направления оптимизации расходов на материалы, оборудование, кадровые ресурсы; 3 – определить причины сбоев в работе оборудования и невыполнения нарядных заданий; 4 – повысить эффективность существующих технологических схем работы подготовительных забоев и транспортных сообщений; 5 – создать электронную базу данных фактической производительности труда в реальном времени, предусмотреть возможность сопоставления с планом.

Подготовительный забой как один из элементов производственного процесса в угольной шахте представляет собой сложно структурированную геотехническую систему, которую можно представить в виде вариационной математической модели с применением когнитивного подхода для обеспечения рационального сценария развития участка в ходе моделирования в постоянно изменяющихся горно-геологических условиях.

На первом этапе работы на основании утвержденного плана развития горных работ на пери-

од один год была составлена карта движения каждого забоя трех участков. Запланированные показатели темпов проведения выработки, сроков монтажных работ горно-шахтного оборудования (ГШО), усиления крепи выработок на сопряжении, выполнения мероприятий по приведению рабочего места в безопасное состояние приняты за «стандарт забоя». Программное обеспечение позволило на любом этапе работы в каждом из трех участков определить плановый расход материалов по сменам и с начала отчетного периода, трудоемкость основных и вспомогательных процессов запланированных работ, длительность выполняемых монтажных работ и мероприятий, обеспечивающих безопасность рабочего места (рис. 1).

Предложенная комплексная диагностика работоспособности горно-шахтного оборудования в режиме реального времени, ежесменный мониторинг рабочих процессов с внедрением карты нормирования труда, создание постоянно пополняемой базы данных эффективности мероприятий по обеспечению безопасности рабочего места способствовали лучшему планированию, а также обеспечили сокращение незапланированных простоев, снизили затраты на техническое обслуживание (табл. 1).

По полученным данным автоматически формируется сводная таблица ошибок, обнаруженных программой по результатам ежесменного мониторинга.

По разработанным «чек-листам», заполняемым горными мастерами и систематизированным диспетчером, создана постоянно пополняемая электронная база данных плановых и фактических показателей работы подготовительных участков с указанием количества суток, смен отказа системы и причин невыполнения нарядных заданий (тип ошибки) (табл. 2).

В течение трех месяцев разработанная программа автоматически подсчитывала количество смен и тип ошибки, в режиме «онлайн» составляла визуальный график со всеми зафиксированными отказами и ошибками.

По полученным значениям построено графическое изображение (рис. 2) для более наглядного понимания и дальнейшего анализа сложившейся ситуации.

Анализ результатов работы подготовительных забоев при сравнении запланированных и фактических показателей позволил определить основные направления решения поставленных задач. Основные отказы системы можно условно разделить на четыре группы:

– квалификационный потенциал персонала; нормирование труда по представленным процессам; хронометраж операций по всем участкам; определение стандарта (норм выработки с фактическими паспортами крепления анкерной крепью) [3];

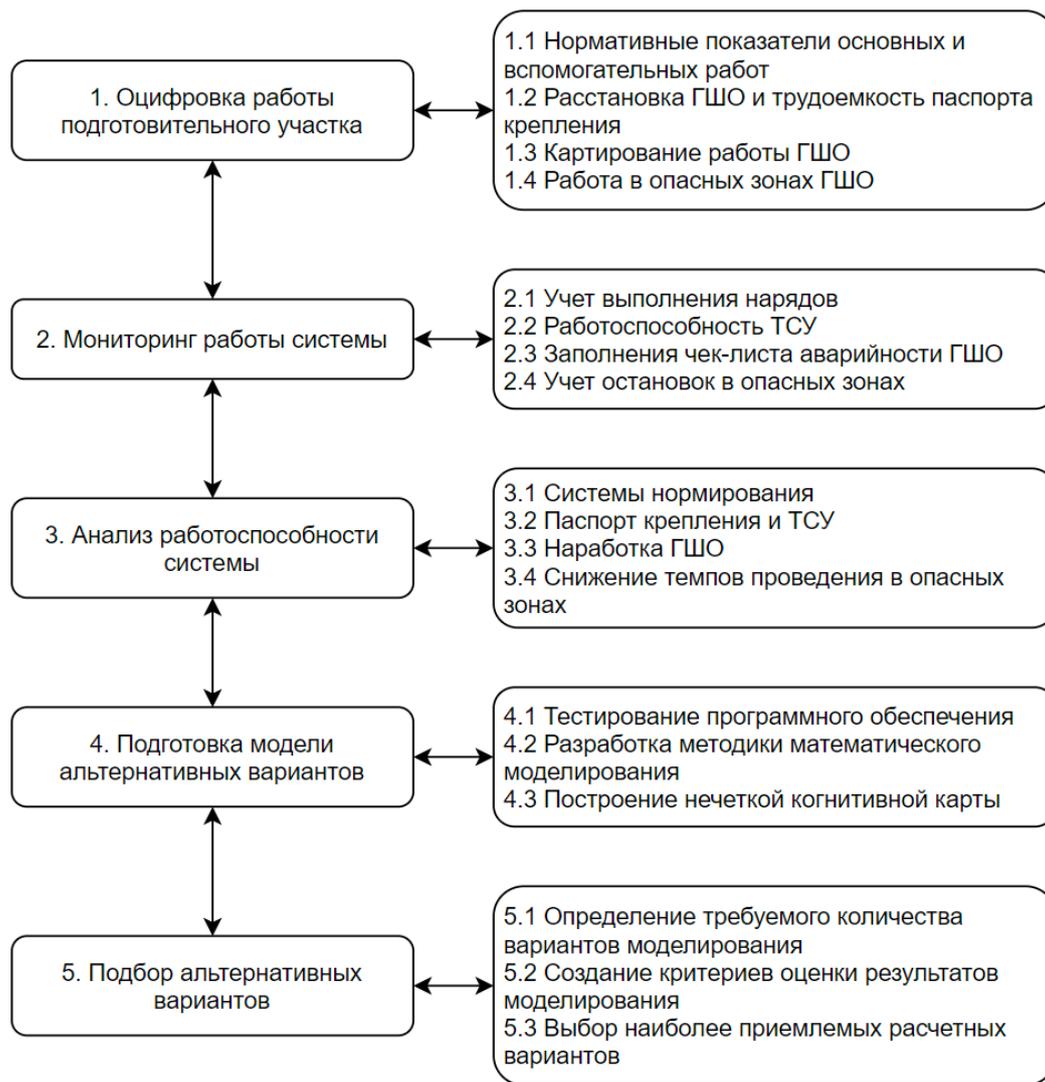


Рис. 1. Схема выбора оптимального сценария развития решения с использованием установленных критериев (ТСУ – технологическая схема участка)

Fig. 1. Scheme for choosing optimal scenario for the solution development using established criteria (STS - site technological scheme)

– наработка оборудования «на отказ»; проверка работоспособности ГШО; контроль фактического времени выполнения сервисного обслуживания и финансовых затрат на замену узлов оборудования;

– анализ эффективности эксплуатации существующего горно-шахтного оборудования на подготовительном участке, технологических схем расстановки оборудования, мероприятий по сокращению ручного труда; оптимизация паспортов крепления за счет перераспределения материальных и людских ресурсов;

– обеспечение безопасности рабочего места; сокращение рисков работы в опасных геологических зонах, своевременное принятие мер по динамическим явлениям, вентиляции и дегазации подготовительных забоев за счет оптимизации схем проветривания и дегазации, сокраще-

ния вынужденных простоев и затрат времени на дополнительные мероприятия.

По данным количества отказов системы автоматически формируется график ошибок системы (потерянных метров) с учетом принятых к анализу категорий (табл. 3, рис. 3).

В процессе оценки работоспособности системы «подготовительный забой» для «цифрового двойника» необходимо выполнять большой объем трудоемких операций расчета вероятных отказов системы с анализом коэффициента риска. Для устранения этой проблемы предлагается использование автоматизированной системы расчета «дерева» отказов и событий. Программное обеспечение позволяет проводить оценку возможных рисков с учетом критериев зависимости и вероятности наступления события. Система автоматически производит расчет вероят-

**Показатели ошибок по результатам ежемесячного мониторинга плановых и фактических значений проведения выработки за февраль 2021 г.**  
**Error indicators based on the results of monthly monitoring of the planned and actual values of production in February 2021**

Дата	Количество метров		Причина невыполнения	Код ошибки
	плановое	фактическое		
01.02	10	7	Кадры	1
03.02	9	8	ГГУ	2
05.02	9	6	ГШО	17
06.02	10	11	ПВП	100
08.02	9	8	Кадры	1
09.02	10	9	ГШО	17
11.02	10	7	ГШО	17
12.02	10	8	Кадры	1
14.02	10	9	ГШО	17
15.02	10	8	ГГУ	2
16.02	10	8	Кадры	1
18.02	10	9	ГШО	17
20.02	10	7	Кадры	1

Примечание. ГГУ – горно-геологические условия; ПВП – перевыполнение плана.

ности возникновения отказов по каждому объекту, а также дает оценку качества системы с коэффициентом вероятности аварии. Автоматизированная система имеет огромный потенциал при анализе работоспособности широкого круга опасных производственных объектов.

Любой сценарий, описывающий отказ в работе объекта, начинается с инициирующего события, которое может возникнуть с некоторой частотой [4].

При определении частот инициирующих событий рассматриваемого объекта использовали следующие источники и методики:

- статистическая оценка причин сбоя в работе объекта на аналогичных объектах;
- экспертные оценки.

Расчет вероятности возникновения инициирующих отказов событий по шахте в целом про-

водился по следующей формуле:

$$P_{с.ш} = 1 - (1 - P_{c1}) \cdot (1 - P_{c1}) \cdot \dots \cdot (1 - P_{cN}),$$

где  $P_{cN}$  – вероятность возникновения инициирующих отказов события для объекта  $N$ .

Анализ полученных результатов позволяет утверждать, что наиболее вероятными отказами на шахте являются отказы, связанные с внеплановыми остановками горно-шахтного оборудования (общая вероятность возникновения остановок опасных по аварийности ГШО по забою  $P_{cN} = 0,21$ , по шахте  $P_{cN} = 0,13$ ). Менее вероятными являются аварии, связанные с возникновением источников возгорания ( $P_{cN} = 0,0173$ ), а также аварии, связанные с недопустимым скоплением

**Количественный анализ отказов системы подготовительного забоя**  
**Quantification of failures in development face system**

Код ошибки	Наименование элементов ошибки	Количество ошибок по сменам
1	Квалификация персонала	18
100	Перевыполнение плановых заданий (ПВП)	12
2	Сложные горно-геологические условия	8
17	Аварийность ГШО	21
28	Безопасность рабочего места	9

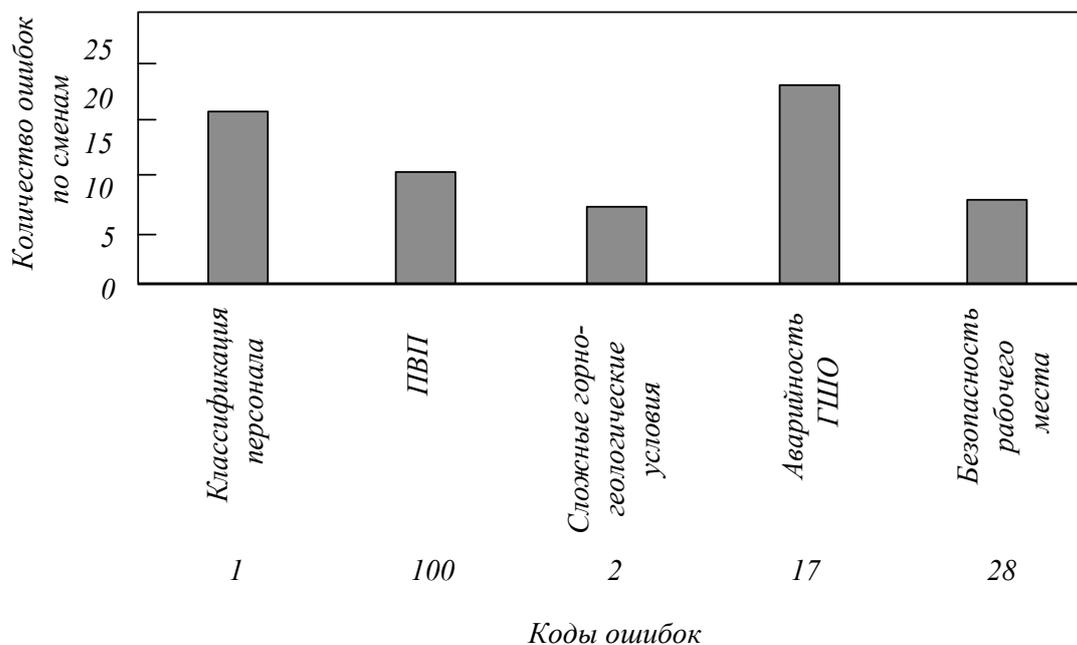


Рис. 2. Распределение частоты отказа системы по принятым показателям  
 Fig. 2. Distribution of the system failure frequency by accepted indicators

газа при выполнении запланированных мероприятий ( $P_{сN} = 0,0972$ ).

**Выводы.** В результате выполнения комплекса работ по цифровизации отдельных производственных процессов и шахты в целом стало возможным определить риски отказов с расчетом вероятного ущерба последствий по следующим факторам: проветривание отдельного участка и работа системы вентиляции на шахте в целом участкового и общешахтного транспорта горной массы; отказ работы вспомогательного транспорта, потери подготовительных и монтажных участков; аварийность и вероятные отказы в работе энерго-механической службы участка и шахты; вероятные простои, связанные с работой в зонах повышенных геодинамических явлений, определение соотношения планового и фактического объема мероприятий по предотвращению негативных последствий; срыв (отказы) в работе по причине низкой квалификации персонала на всех местах работы (нормирование труда).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Клебанов А.Ф. Автоматизация и роботизация открытых горных работ: опыт цифровой трансформации // Горная промышленность. 2020. № 1. С. 8–11.
2. Кулак В.Ю., Петрова Т.В. Обоснование направлений поэтапного развития технологии подземной угледобычи на действующих шахтах на основе когнитивного моделирования // Вести Забайкальского государственного университета. 2017. Т. 23. № 3. С. 12–21.
3. ФЗ РФ Об утверждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Инструкция по расчету и применению анкерной крепи на угольных шахтах» от 19 ноября 2020 г. № 448.
4. Лисанов М.В., Ханин Е.В., Сумской С.И. О регулировании промышленной безопасности по количественным критериям допустимого риска // Безопасность труда в промышленности. 2012. № 12. С. 54–62.

Т а б л и ц а 3

### Суммарные изменения плановых показателей по участку за контрольный период Total loss of planned indicators at production site for the control period

Причина отказа системы	Количество потерянных метров за контрольный период
Квалификация персонала	33
Перевыполнение наряда	58
Сложные горно-геологические условия	17
Аварийность ГШО	49
Безопасность рабочего места	21

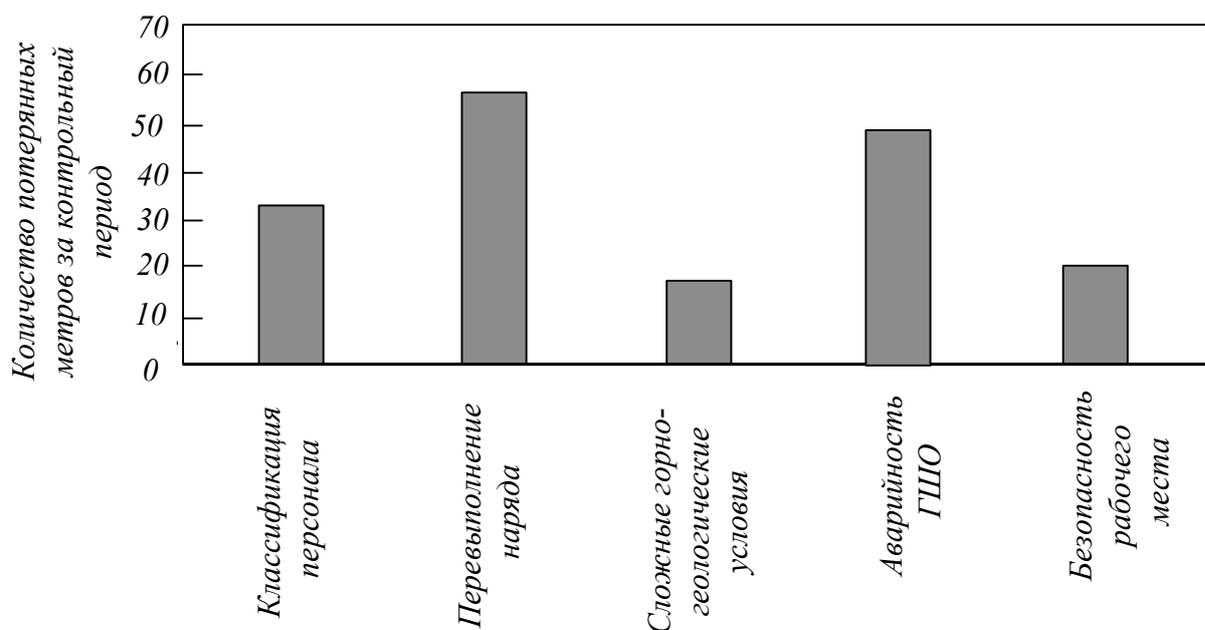


Рис. 3. Распределение потерянных метров по причине невыполнения наряда  
 Fig. 3. Distribution of lost meters due to non-fulfillment of the order

## REFERENCES

1. Klebanov A.F. Automation and robotization of open pit mining: digital transformation experience. *Gornaya promyshlennost'*. 2020, no. 1, pp. 8–11. (In Russ.).
2. Kulak V.Yu., Petrova T.V. Substantiation of directions for step-by-step development of underground coal mining technology at operating mines based on cognitive modeling. *Vesti Zabaikal'skogo gosudarstvennogo universiteta*. 2017, vol. 23, no. 3, pp. 12–21. (In Russ.).
3. Federal Law of the Russian Federation “On approval of the Federal norms and rules in the field of industrial safety “Instructions for the calculation and use of roof bolting in coal mines”” dated November 19, 2020 No. 448.
4. Lisanov M.V. Khanin E.V., Sumskoi S.I. On industrial safety regulation by quantitative criteria of acceptable risk. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti*. 2012, no. 12, pp. 54–62. (In Russ.).

## Сведения об авторах:

**Владимир Анатольевич Волошин**, к.т.н., доцент кафедры технологии, Сибирский государственный индустриальный университет

**Анатолий Владиславович Безносков**, студент, Сибирский государственный индустриальный университет

## Information about the authors:

**Vladimir A. Voloshin**, Cand. Sci. Eng. Associate Professor of the Department of geotechnology, Siberian State Industrial University

**Anatolii V. Beznosov**, student, Siberian State Industrial University

© 2021 г. В.А. Волошин, А.В. Безносков  
 Поступила в редакцию 09.09.2021 г.