

УДК 622.862.3 : 622.831.312

Булат А.Ф., акад. НАНУ, д-р техн. наук, професор,
Слащев И.Н., канд. техн. наук, ст. науч. сотр.,
(ИГТМ НАН Украины)

Яланский А.А., канд. техн. наук, доцент
(ГВУЗ «НГУ»)

Слащев А.И., канд. техн. наук
(ИГТМ НАН Украины)

ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДОВ И АЛГОРИТМОВ ОЦЕНКИ ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ВЕДЕНИЯ ГОРНЫХ РАБОТ

Булат А.Ф., акад. НАНУ, д-р техн. наук, професор,
Слащов І.М., канд. техн. наук, ст. наук. співр.
(ІГТМ НАН України)

Яланський О.А., канд. техн. наук, доцент
(ДВНЗ «НГУ»)

Слащов А.І., канд. техн. наук
(ІГТМ НАН України)

ОБГРУНТУВАННЯ МЕТОДІВ І АЛГОРИТМІВ ОЦІНКИ ГЕОМЕХАНІЧНОЇ БЕЗПЕКИ ВЕДЕННЯ ГІРНИЧИХ РОБІТ

Bulat A.F., Acad. NASU, D. Sc. (Tech.), Professor
Slashchov I.N., Ph.D. (Tech.), Senior Researcher
(IGTM NAS of Ukraine)

Yalanskiy A.A., Ph.D. (Tech.), Associate Professor
(State HEI «NMU»)

Slashchov A.I., Ph.D. (Tech.)
(IGTM NAS of Ukraine)

VALIDATION OF METHODS AND ALGORITHMS FOR ESTIMATING GEOMECHANICAL SAFETY OF MINING OPERATIONS

Аннотация. В статье решена актуальная задача обоснования методов мониторинга и совершенствования алгоритмов оценки состояний массива пород и горных выработок для использования в автоматизированных системах безопасности шахт.

Дальнейшее развитие получил метод оценки геомеханической безопасности ведения горных работ, отличающийся учетом потенциальных рисков возникновения аварийных ситуаций от факторов, влияющих на устойчивость системы «крепь-массив». Критерии оценки уровня геомеханической безопасности основаны на статистике прошлых наблюдений, шахтном инструментальном и автоматизированном мониторинге массива пород и горных выработок, результатах компьютерного моделирования развития предаварийных ситуаций. Для автоматизированных систем удаленного контроля безопасности усовершенствованы информационные и цифровые аппаратные технологии. Предложены алгоритмы отсева ложных значений и цифрового преобразования сигналов из временной области в частотную, обеспечивающие повышение надежности и уменьшение размеров передаваемой геотехнической информации.

Методы и алгоритмы могут быть использованы при совершенствовании существующих и разработке новых систем безопасности горных работ.

Ключевые слова: безопасность горных работ, автоматизированные системы, дистанционный контроль массива пород, математическое моделирование, геомеханические процессы.

Обеспечивать эффективность ведения подземных горных работ и поддерживать на должном уровне безопасность возможно только с учетом оценки уязвимостей предприятия по геомеханическим факторам, анализа и управления рисками для персонала, оборудования и горнотехнических объектов. Создание на базе современных информационных и цифровых аппаратных технологий средств предотвращения аварий, контроля текущих, аварийных и послеаварийных состояний элементов горнотехнической системы является одной из наиболее актуальных проблем горного производства. Это касается, прежде всего, совершенствования систем стационарного мониторинга и оценки уровней риска аварии на основных технологических участках, создания систем оперативного реагирования на внезапно возникшие очаги аварии.

Известные системы мониторинга параметров среды, обеспечения безопасности и управления технологическими процессами эффективно применяются и хорошо себя показали во многих странах: США и ЮАР (цифровые интеллектуальные высокоразрешающие системы для сейсмологического мониторинга и контроля «ISS»), Австралии, Германии («SIWA-2000»), Японии и Китае (японско-китайская система «CONSPEC»), Польше (система «EMAG»), Испании («RELIF-2000»), РФ (система сейсмологического мониторинга «GITS», комплексы «Байкал» и «Дельта Геон»), Казахстане (опыт применения системы «Quanterra» Институтом геофизических исследований), Канаде и др. В частности, на шахтах Великобритании применение систем мониторинга и управления состоянием оборудования, газогазовой среды и др. (разработка «Trolex Ltd», «Continental Conveyor Ltd»), позволило не допустить крупных взрывов и пожаров в течение последних десятков лет, а внедрение на производстве решений компании Cisco для коммуникаций и центров обработки данных на базе технологий Wi-Fi (объединение людей, процессов, данных и оборудования в сеть) в горнодобывающей компании Dundee Precious Metals позволило увеличить объем производства в четыре раза (с 0,5 млн. тонн до 2,0 млн. тонн ежегодно [1]), за два года сэкономить 2,5 млн. долларов США только на расходах на связь, кардинально повысить безопасность труда горняков.

Несмотря на то, что лидирующие места в производстве таких комплексов занимают австралийские и южноафриканские компании, в Украине также разработаны адаптированные к нуждам горного производства системы, контролирующие газогазовый режим шахт, технологические параметры и напряженное состояние породного массива. Разработаны методы мониторинга, способы получения информации о состоянии породного массива, крепи, оборудования, вентиляции и технологических процессов. Вместе с тем,

несмотря на наличие большого объема получаемой первичной информации, недостаточно отработаны методы и алгоритмы анализа данных, оценки уровня безопасности ведения горных работ. Отсутствуют указания по разработке элементов систем безопасности, учитывающих состояние породного массива, что часто не позволяет принять верные решения по безопасности горных работ.

К основным факторам риска, влияющим на геомеханическую безопасность и травмирование работников следует отнести: потерю устойчивости кровли, боков и почвы горных выработок; внезапные обрушения кровли; внезапные поднятия почвы; газодинамические проявления горного давления [2, 3]. Для прогнозирования предаварийных ситуаций в геотехнической системе, вызванных геомеханическими факторами, можно использовать широко апробированную модель теории случайных марковских процессов с дискретными состояниями и непрерывным временем, которая определяет вероятность нахождения системы во всех состояниях на базе линейной системы дифференциальных уравнений А.Н. Колмогорова [4]:

$$\frac{dP_i(t)}{dt} = \sum_{k=0}^n \lambda_{ik} P_k(t) - \sum_{j=0}^n \lambda_{ij} P_j(t), \text{ при условии } \sum_{i=1}^n P_i(t), \quad (1)$$

где $P_i(t)$ – вероятность нахождения системы в i -том состоянии в текущий момент времени t ; i – номер состояния системы, $i=1 \dots n$; λ_{ik} , λ_{ij} – интенсивности потоков событий, входящих и выходящих из i -го состояния системы, соответственно.

В начальный момент времени объект управления (система «крепь-массив») находится в работоспособном состоянии и имеет срок службы T (например, для участков штреков при столбовой системе разработки без их повторного использования может быть принят срок службы выемочного столба, обычно 6-18 месяцев). Вероятность безаварийной работы на момент времени t представляет собой функцию безопасности $S(t)$. Если состояние объекта управления характеризуется набором параметров, например, вектором полных перемещений контура выработки $u^{xy}(t)$ с допустимой по условиям безопасности областью значений, принадлежащих одному из дискретных интервалов параметров $\{[\Delta u_1 = u^{xy}(t_1) - 0], [\Delta u_2 = u^{xy}(t_2) - u^{xy}(t_1)], \dots, [\Delta u_n = u_{KR}(t_n = T) - u^{xy}(t_{n-1})]\}$, то функция безопасности определяется вероятностью того, что на отрезке времени $[0, t]$ ни разу не возникнет аварийная ситуация, которая заключается в выходе параметра мониторинга за пределы допускаемой области. При этом привлекается дополнительная информация о параметрах, определяющих физическую природу геомеханических процессов и приводящих к травматизму и авариям. Такая информация формируется в результате моделирования, так как экстраполирование эмпирических данных за пределы наблюдений часто приводит к ошибкам.

Состояние геотехнической системы в процессе эксплуатации горных выработок постоянно изменяется, что и фиксируется персоналом и системами

мониторинга. К важнейшим показателям безопасности, определяемым посредством текущего мониторинга объекта управления, относятся «риски» ($R(t)=I-S(t)$), определяемые как вероятность возникновения аварий, связанных с нежелательными событиями, такими, например, как потеря устойчивости выработки, внезапные подвижки или внезапные обрушения пород за фиксированный период времени. Расчет этих показателей выполняется по абсолютным значениям фиксируемых параметров мониторинга состояния объекта управления и по интенсивности их изменения за промежуток времени. Использование «рисков» для оценки степени опасности является общепринятым методом, который положен в основу оценки текущего состояния опасности геотехнической системы. Его использование позволяет предупредить персонал об опасности и принять превентивные меры для предотвращения тех или иных неблагоприятных событий на основе существующих данных об объекте управления.

Для выражения комплексных показателей оценки безопасности целесообразно использовать модель интегрированного риска. При оценке параметров текущего геомеханического мониторинга в разрабатываемой системе безопасности объединены факторы ожидаемого максимального технического риска путем интеграции вероятностных оценок информативных параметров состояния породного массива и горных выработок. Для каждой группы параметров, состоящих из m индикаторов (нормализованных в диапазоне $0...1$) сформированы два интегральных индекса безопасности.

Первый показатель отражает уровень максимального технического риска R_{\max} , определяется по находящемуся в наиболее неприемлемом состоянии параметру мониторинга объекта управления путем выбора максимального значения из рассчитанных функций распределения случайных значений риска:

$$R_{\max} = \begin{cases} R(E_r) = kr_1 R(E_r^1) + kr_2 R(E_r^2) + \dots + kr_{m_1} R(E_r^{m_1}) \\ R(E_s) = ks_1 R(E_s^1) + ks_2 R(E_s^2) + \dots + ks_{m_2} R(E_s^{m_2}) \\ R(E_g) = kg_1 R(E_g^1) + kg_2 R(E_g^2) + \dots + kg_{m_3} R(E_g^{m_3}) \\ R(K_r) = kr_1 R(K_r^1) + kr_2 R(K_r^2) + \dots + kr_{m_4} R(K_r^{m_4}) \\ R(K_g) = kg_1 R(K_g^1) + kg_2 R(K_g^2) + \dots + kg_{m_5} R(K_g^{m_5}) \end{cases}, \quad (2)$$

где m_1, m_2, m_3 – количество факторов риска, влияющих на потерю устойчивости кровли (фактор E_r), боков (фактор E_s) и почвы (фактор E_g) выработки, соответственно; m_4, m_5 – количество факторов риска, влияющих на внезапное обрушение кровли (фактор K_r) и внезапное поднятие почвы (фактор K_g), соответственно; $R(E_r), R(E_s), R(E_g), R(K_r), R(K_g)$ – потенциальный риск возникновения аварийной ситуации от факторов типа E (объемы зон неупругих деформаций, смещений контура выработки и др.) и типа K (интенсивность изменения смещений, напряжений, объемов зон разрыва сплошности и др.),

соответственно; kr , ks , kg – нормализованные коэффициенты влияния на потенциальный риск отдельных факторов в группе $kr_1+kr_2+\dots+kr_m=1$ и т.д.

Второй показатель отражает интегрированный технический риск геотехнической системы R_{Σ} , который определяется суммированием всех рисков:

$$R_{\Sigma} = k_1^v \sum_{i=1}^{m_1} R(E_r)_i + k_2^v \sum_{i=1}^{m_2} R(E_s)_i + k_3^v \sum_{i=1}^{m_3} R(E_g) + k_4^v \sum_{i=1}^{m_4} R(K_r)_i + k_5^v \sum_{i=1}^{m_5} R(K_g)_i, \quad (3)$$

где k_1^v , k_2^v , k_3^v , k_4^v , k_5^v – нормализованные весовые коэффициенты для групп факторов, $k_1^v + k_2^v + k_3^v + k_4^v + k_5^v = 1$.

Комплексные показатели позволяют оперативно дать оценку и обобщить сложившуюся ситуацию по безопасности системы «крепь-массив», а также принять своевременное решение возникшей проблемы. Расчеты производятся для текущего состояния геотехнической системы с выделением каждого из показателей, уровней максимальных технических рисков, превышений значений параметров выше допустимых и интегрального индекса безопасности.

Интенсивности потоков событий (1) и потенциальные риски возникновения аварийных ситуаций от различных геомеханических факторов (2) можно получать для условий конкретного предприятия по данным: статистики прошлых наблюдений; объективного контроля массива пород и горных выработок инструментальными методами (шахтных измерений смещений и деформаций выработок, параметров трещин, определения заколов и разрушений шахтными геофизическими методами и др.); компьютерного моделирования состояния массива пород и прогнозирования развития предаварийных ситуаций; автоматизированных систем контроля, табл. 1. Вместе с тем, далеко не каждый параметр имеет большое влияние на уровень безопасности ведения горных работ. Поэтому сначала необходимо выбрать наиболее эффективные методы и параметры мониторинга, а затем определить диапазоны и границы значений параметров, при которых могут возникать аварийные ситуации.

Основные задачи предварительных наблюдений состоят в оценке внешних повреждений выработок, вывалов пород, предварительном определении границ контролируемых зон, определении возможности использования различных методов контроля, уточнении необходимости соблюдения особых требований, касающихся техники безопасности.

Оперативная информация о состоянии крепи и вмещающих выработку пород может быть получена инструментальными методами путем контроля параметров, определяющих устойчивость горных выработок. На практике применяется большое число методов натуральных измерений, в результате которых определяется один или несколько параметров контроля состояния объекта управления. К данным параметрам относятся трещины и расслоения прилегающего породного массива, смещения кровли, почвы и боков выработок.

Таблица 1 – Параметры контроля состояния массива горных пород и выработок инструментальными и аналитическими методами

Методы контроля	Средства	Контролируемые процессы	Параметр контроля
<u>Визуальные, инструментальные и геофизические методы шахтного контроля</u>			
1. Наблюдение за состоянием крепи	Рулетка	Внешние повреждения	u_1 – смещения контура в месте повреждения крепи
2. Наблюдение за обнажением	Рулетка	Вывалы пород	h_2 – глубина вывала; V_2 – объем вывала
3. Засечки на рамах арочной крепи	Рулетка	Деформации арочной крепи	u_3 – смещения контура крепи; v_3 – скорость смещений крепи
4. Контурные реперы	Реперы, рулетка	Смещения и конвергенция пород	u_4 – смещения контура пород; ΔA_4 – конвергенция кровли-почвы; ΔB_4 – конвергенция боков; v_4 – скорость смещений контура
5. Глубинные реперы	Глубинные реперы	Относительные расширения участков массива	Δh_5 – величина расширения пород в кровле, почве и боках выработки
6. Маркшейдерская нивелировка	Нивелир и рейки	Смещения пород выработки	u_6 – смещения контура пород по длине выработки
7. Виброакустический контроль по контуру выработки	Прибор ИСК-1Ш	Границы отслоений	h_7 – глубина отслоения; A_7, B_7 – продольный и поперечный размеры отслоения
8. Электропрофилирование вдоль выработки	Прибор ШИИС-3М	Границы зон неупругих деформаций	h_8 – глубина границы зоны неупругих деформаций
9. ВЭЗ опасных участков	Прибор ШИИС	Границы зон неупругих деформаций	h_9 – глубина границы зоны неупругих деформаций на опасных участках
<u>Аналитические методы прогноза состояния горных пород и устойчивости выработок</u>			
10. Прогноз распространенности зон неупругих деформаций (ЗНД) и разрыва сплошности	Программа «GEO-RS»	Разрушение пород	V_{idz} – объем ЗНД; V_{ten} – объем зон разрывных нарушений; ΔV^t – изменение объемов ЗНД; h_{idz} – расстояние от контура выработки до границ ЗНД
11. Напряжения в массиве и оперативный прогноз его состояния	Программа «GEO-RS»	Нагрузки в породном массиве	σ_1 – максимальные главные напряжения; $\Delta \sigma_1^t$ – скорость изменения главных напряжений
12. Смещения контура горных выработок	Программа «GEO-RS»	Деформации контура выработок	u^{xy} – полные смещения кровли, почвы и боков выработки; du^{xy}/dt – скорость изменения полных узловых смещений
<u>Методы, используемые автоматизированными системами контроля массива и выработок</u>			
Акустические и сейсмоакустические методы, методы аэрогазового контроля	АПСС-1 ЗУА-98 УТАС	Энергетическая активность массива пород, газовыделение в выработки	частоты максимальных амплитуд, амплитуды составляющих сигналов, интенсивность сейсмоакустической эмиссии, концентрации и расходы газов

В задачи натуральных исследований входят: контроль смещений контура обнажений, конвергенции боков и кровли-почвы выработок с помощью засечек на рамах арочной крепи и установки контурных реперов; замеры смещений пород кровли и почвы выработок с помощью глубинных реперов; оценка смещений пород по длине выработок маркшейдерской нивелировкой. Мониторинг производится на этапах проведения выработок и всего последующего срока их эксплуатации.

Недостаточный объем и качество получаемых данных, необходимых для текущей оценки состояния выработок, является предпосылкой для выполнения геофизического контроля [5, 6]. Шахтный геофизический контроль эффективен, поскольку происходящие в породном массиве изменения фиксируются геофизическими методами значительно раньше, чем проявляются визуально. Электрометрический метод используется для оценки трещиноватости и обводненности породного массива вокруг горных выработок.

Методы натуральных исследований различаются физическими принципами, применяемой аппаратурой, точностью и надежностью получаемых результатов. Виброакустический метод (используется прибор ИСК-1Ш разработки ИГТМ НАНУ) позволяет определить опасные геомеханические процессы путем контроля сплошности и оценки отслоений в приконтурном массиве горных пород (выявления границ включений, каверн, расслоений, трещин и др.), изучения кинетики разрушения. Метод основан на регистрации упругих колебаний, возбужденных в контролируемой конструкции (в данном случае возбуждаются ударом по породе). Регистрируется частота, амплитуда и время колебаний. Оценка результатов производится по наибольшей из амплитуд колебаний в частотных полосах, отображаемого индикатором спектра. Так как разбитый трещинами массив осадочных горных пород, чаще всего является плоскопараллельной структурой, то в замкнутой системе (при $\lambda < 2a/n$, где λ – длина волны, м; n – номер моды; a – ширина волновода, м) возникают резонансные колебания. Поэтому можно определять глубины границ зон трещинообразования по критическим частотам первых резонансных мод однородных нормальных волн, которые возникают при ударном воздействии на отслоившийся породный массив [6]:

$$a = v_s \cdot n / 2 f_r, \quad (4)$$

где a – глубина отслоения, м; v_s – скорость сдвиговых волн, м/с; f_r – резонансная частота, Гц.

Из электрометрических методов для получения первичных данных возможно использование продольного симметричного профилирования и вертикального электрического зондирования (ВЭЗ) на переменном токе низкой частоты [5, 6]. Электрическое сопротивление горных пород зависит от пористости и трещиноватости пород, которое с увеличением пористости и трещиноватости уменьшаются (за исключением случая, когда трещины заполнены воздухом, что приводит к увеличению сопротивления). Для

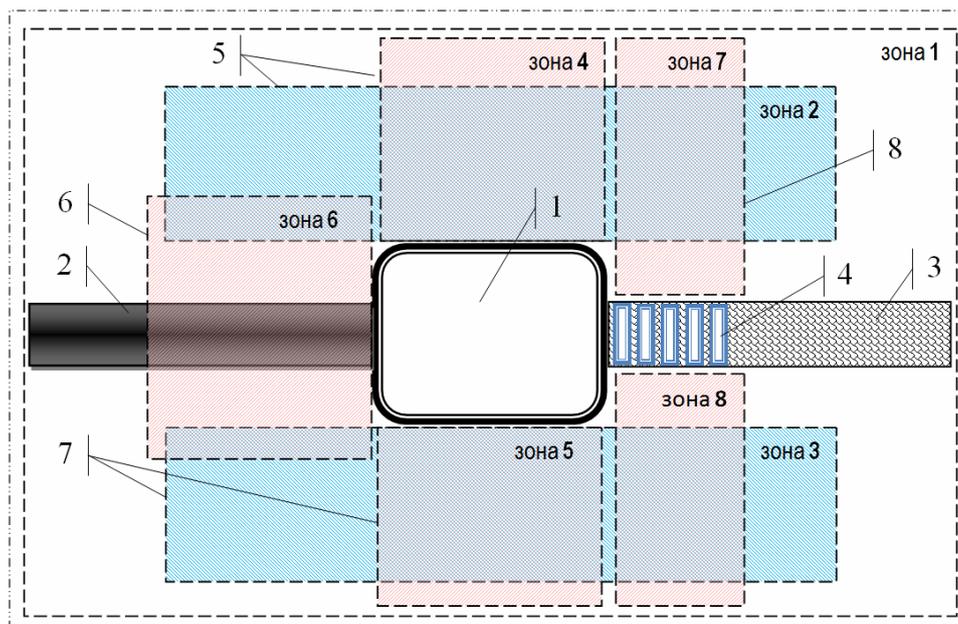
выполнения электрометрии применяется портативная аппаратура ШИИС-3М1 (разработка ИГТМ НАНУ).

Таким образом, шахтный оперативный контроль предусматривает получение данных измерением смещений пород на контуре выработок, деформаций крепи, расслоений вмещающих пород и определение границ опасных зон (отслоений, тектонических нарушений).

Оценка состояния массива пород и горных выработок наиболее эффективна при сочетании визуального, инструментального и геофизического контроля с численным анализом напряженно-деформированного состояния пород методом конечных элементов [7, 8]. Такой подход позволяет, с одной стороны, проверить достоверность вычислений, установить стадию деформационного процесса и совместить объективные данные инструментальных наблюдений с данными, полученными в результате расчета моделей состояний пород. С другой стороны, моделирование аналитическими методами позволяет получить ряд текущих и прогнозируемых параметров, которые методами натуральных исследований получить невозможно или крайне затруднительно. К таким параметрам, прежде всего, относятся: зоны неупругих деформаций и разрыва сплошности (распространенность, объемы, границы, скорость изменения, прогноз, см. табл. 1); напряжения в массиве (максимальные главные напряжения, скорость изменения, прогноз); смещения и формы деформаций контура горных выработок (смещения кровли, почвы, боков, скорость их изменения, прогноз). При этом геомеханические состояния породного массива (в том числе представляющие опасность для персонала) по указанным параметрам оцениваются зонально: в кровле выработок (рис. 1, зоны 2, 4, 7) для предупреждения вывалов, высыпаний, завалов; в почве выработок (рис. 1, зоны 3, 5, 8) для предупреждения внезапных поднятий пород и борьбы с пучением; в боках выработок (рис. 1, зона 6) для предупреждения выдавливания и внезапных деформаций пород; в зоне влияния средств охраны выработок (рис. 1, зоны 7, 8).

Оценка напряженно-деформированного состояния массива пород производится путем численной реализации конечноэлементного решения геомеханической задачи с помощью комплекса программного обеспечения «GEO-RS» [9, 10].

Наиболее информативными для оперативной оценки геотехнической обстановки являются автоматизированные системы контроля массива пород и горных выработок. В частности, акустические и сейсмоакустические методы, используемые автоматизированными системами (например, АПСС-1, ЗУА-98) позволяют в режиме реального времени фиксировать амплитуды составляющих сигналов, частоты максимальных амплитуд, интенсивность сейсмоакустической эмиссии. Определяется энергетическая активность массива пород и параметризация расслоений кровли. Для реализации способа контроля применяется звукоулавливающая аппаратура.



1 – горная выработка; 2 – угольный пласт; 3 – выработанное пространство; 4 – средства охраны выработки; 5, 6, 7 – зоны контроля состояния породного массива в кровле (зоны 2, 4), боках (зона 6) и почве (зоны 3, 5) выработки, соответственно; 8 – контроль в зоне влияния средств охраны (зоны 7, 8)

Рисунок 1 – Зоны контроля состояния породного массива вокруг горной выработки аналитическими и натурными методами

Присутствие в акустической эмиссии нескольких периодических составляющих свидетельствует о расслоениях пород и различном шаге осадки каждой из составляющих частей кровли. Активность сейсмоакустической эмиссии является параметром, позволяющим оценить процессы трещинообразования. В настоящее время разработаны и применяются на шахтах два способа. Первый – основан на использовании только одного параметра – количества импульсов в единицу времени. Второй – определение спектральной составляющей акустической эмиссии с периодом 21 суток. Превышение значения этой составляющей порогового уровня характеризуется как аномалия. Одной из задач, решаемых этим методом, является контроль напряженного состояния массива пород, осадок кровли, оценки мощности отслоившихся пород.

Алгоритмы оценки состояния горнотехнической системы включают отсеивание ложных значений, фильтрацию и анализ входных сигналов систем мониторинга, анализ взаимосвязей между параметрами связанных процессов, алгоритмы обработки событий, вычисление интегральных параметров и других индикаторов безопасности системы «крепь-массив» (см. табл. 1, критерии (2),(3)). Программные алгоритмы могут быть настроены на выработку и передачу сигналов опасности, а также на инициализацию создания руководящих инструкций, регламентирующих выполнение технических

мероприятий, что помогает обеспечить работоспособность геотехнической системы и безопасность труда.

Ложные значения при работе автоматизированных систем появляются вследствие ошибок в датчиках сбора и системах обработки информации, сбоях в аналого-цифровых преобразователях, зашумления сигналов в линиях связи и др. Известны следующие основные способы отсева грубых погрешностей: фильтрация, усреднение (сглаживание), отсев значений, доверительная вероятность которых меньше допустимой, либо не попадающих в определенный доверительный интервал. Применение цифровой фильтрации целесообразно в системах реального времени в тех случаях, когда частотные области спектра помех относительно постоянны и не пересекаются с частотными областями спектра полезного сигнала, например при отфильтровывании помех, наводимых силовыми линиями промышленной частоты или высокочастотных шумов. Отсев ложных значений из числа многих входных параметров контролируемой системы может быть произведен поочередным выявлением взаимозависимых и наиболее изменяющихся параметров путем автоматизированной статистической обработки последовательно по два значения массива контролируемых параметров. Для этого рационально использовать способ, основанный на сравнении величины изменения исследуемого параметра x за время шага выборки Δt с максимальным значением модуля темпа изменения параметра V_{max} . Значение x_i параметра считается истинным, если выполняются условия

$$\left\{ \begin{array}{l} x_{min} \leq x_i \leq x_{max} \\ \left| \frac{x_i - x_{i-1}}{\Delta t} \right| \leq \left| \frac{dx}{dt} \right| = V_{max} \end{array} \right. , \quad (5)$$

где x_{min} и x_{max} - минимально и максимально возможные значения параметра; x_i - значение параметра x в момент времени t_i , $i=1 \dots n$; n - объем выборки.

Ложные значения параметра не удовлетворяющие условию (5) заменяются аппроксимирующим значением $x_i = x_{i-1} \pm V_{max} \cdot \Delta t$. После отсева информативные параметры используются в дальнейшем для критериальной оценки устойчивости системы или объекта.

В алгоритмах цифровой обработки сигналов систем автоматизированного контроля состояния породного массива и горных выработок, как правило, используют фильтрацию и спектральный анализ. При этом исследуют сигналы $\varphi(t)$, которые, во-первых, удовлетворяют условиям Дирихле, и, во-вторых, обладают ограниченной энергией. Для функций, определяющих такие сигналы, существуют прямое и обратное преобразования Фурье, следовательно, возможно определение их спектра. Однако для автоматизации контроля состояния породного массива чаще всего используется не непосредственно спектр, а его производные параметры, например, такие как: отношение амплитуд или энергий сигнала в двух определенных частотных полосах, коэффициент затухания конкретных гармонических составляющих и др. Это

связано в первую очередь с тем, что размер вектора коэффициентов дискретного преобразования Фурье (ПФ) совпадает с размером вектора мгновенных значений анализируемого сигнала. Для автоматизированных систем удаленного контроля безопасности необходимы методы и алгоритмы цифрового преобразования сигналов из временной области в частотную, обеспечивающие уменьшение их размеров и повышение надежности фиксации горнотехнической обстановки. Компактность вектора коэффициентов такого преобразования упрощает выбор параметров и критериев контроля и оценку сигнала на соответствие этим критериям. Учет особенностей импульсных акустических сигналов повышает точность и информативность получаемой информации.

Затухающий аperiodический сигнал $\varphi(t)$ представим как суперпозицию произведений периодических сигналов $\varphi_{pi}(t)$ на единичные прямоугольные импульсы $\Pi_i(t_i, T_{u_i})$, рис. 2:

$$\varphi(t) = \sum_i \varphi_{pi}(t) \cdot \Pi_i(t_i, T_{u_i}) , \quad (6)$$

где t_i – момент времени, соответствующий середине i -го прямоугольного импульса, T_{u_i} – его длительность.

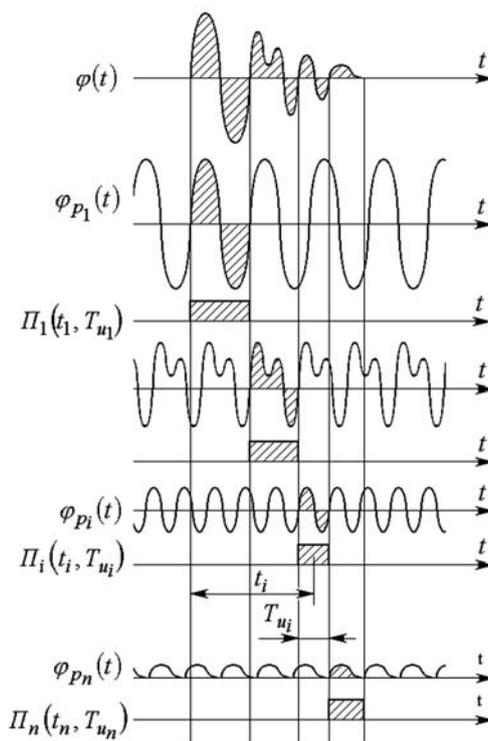


Рисунок 2 – Разбиения аperiodического сигнала на временные интервалы точками пересечения с осью абсцисс

Так как преобразование Фурье является линейным преобразованием, то ПФ линейной комбинации некоторых функций $\varphi_i(t)$ равняется аналогичной линейной комбинации ПФ этих функций:

$$\text{если } \varphi_i(t) \leftrightarrow \Phi_i(f), \text{ то } \sum_{i=1}^n a_i \varphi_i(t) \leftrightarrow \sum_{i=1}^n a_i \Phi_i(f), \quad (7)$$

где $\varphi_i(t)$ – функция, удовлетворяющая условиям Дирихле, $\Phi_i(f)$ – ее преобразование Фурье, a_i – постоянный коэффициент.

В соответствии с (7) для формулы (6) справедливо выражение:

$$\varphi(t) \leftrightarrow \Phi(f) = \sum_i \Phi_{(p.\Pi)_i}(f), \quad (8)$$

где $\Phi_{(p.\Pi)_i}$ – преобразование Фурье произведения, стоящего под знаком суммы в (6) i -й периодической функции, умноженной на прямоугольный импульс:

$$\varphi_{p_i}(t) \cdot \Pi_i(t_i, T_{u_i}) \leftrightarrow \Phi_{(p.\Pi)_i}(f).$$

Известно свойство преобразования Фурье, согласно которому ПФ произведения двух функций $\varphi_1(t) \cdot \varphi_2(t)$ равняется свертке их ПФ:

$$\varphi_1(t) \cdot \varphi_2(t) \leftrightarrow \int_{-\infty}^{\infty} \Phi_1(f') \Phi_2(f - f') df' = \Phi_1(f) * \Phi_2(f). \quad (9)$$

Если $\varphi_{p_i}(t) \leftrightarrow \Phi_{p_i}(f)$, $\Pi_i(t_i, T_{u_i}) \leftrightarrow \Phi_{\Pi_i}(f)$, то в соответствии с (6) и (9) формулу (8) можно переписать в виде:

$$\varphi(t) \leftrightarrow \Phi(f) = \sum_i \Phi_{(p.\Pi)_i}(f) = \sum_i \Phi_{p_i}(f) * \Phi_{\Pi_i}(f). \quad (10)$$

Так как для каждого i -го прямоугольного импульса $\Pi_i(t_i, T_{u_i})$ справедливо выражение

$$\Phi_{\Pi_i}(f) = \int_{-\infty}^{\infty} \Pi_i(t_i, T_{u_i}) e^{-j2\pi ft} dt = \int_{-\frac{T_{u_i}}{2} - t_i}^{\frac{T_{u_i}}{2} - t_i} e^{-j2\pi ft} dt = e^{j2\pi ft_i} \frac{\pi T_{u_i}}{\pi f},$$

то формулу (10) можно переписать в виде:

$$\varphi(t) \leftrightarrow \Phi(f) = \sum_i \Phi_{(p.\Pi)_i}(f) = \sum_i \Phi_{p_i}(f) * e^{j2\pi ft_i} \frac{\pi T_{u_i}}{\pi f}. \quad (11)$$

Таким образом, показано, что спектр исходного аperiodического сигнала однозначно связан со спектрами мнимых периодических колебаний $\varphi_{p_i}(t)$. Поэтому спектр импульсного сигнала от контролируемого геомеханического объекта является суммой конечного числа сверток прямых преобразований

Фурье мнимых периодических сигналов и смещенных единичных прямоугольных импульсов, что позволяет автоматизировать контроль объекта в режиме реального времени на основе спектров выделенных периодических сигналов.

Для разбиения сигнала на участки и выделения мнимых периодических составляющих предложено сравнивать текущее мгновенное значение сигнала с пограничными значениями зоны нечувствительности $a_0 - \Delta TG$ (нижняя граница) и $a_0 + \Delta TG$ (верхняя граница), где a_0 – постоянная составляющая оцифрованного сигнала (как правило, равная величине смещения аналого-цифрового преобразователя), $2TG$ – ширина зоны нечувствительности.

Пусть имеется аппаратный либо программный компаратор $TH1$, устанавливающийся в единичное состояние в случае, если цифровой код, соответствующий текущему значению входного сигнала, больше верхней границы: $u_k > a_0 + \Delta TG$. Компаратор $TH2$ устанавливается в единичное состояние, если значение цифрового кода меньше нижней границы: $u_k < a_0 - \Delta TG$, рис. 3. Если выходы компараторов подключаются соответственно к входам установки (S) и сброса (R) аппаратного либо программного RS -триггера, тогда начало каждого нового i -го интервала, определится фронтом выходного сигнала RS -триггера.

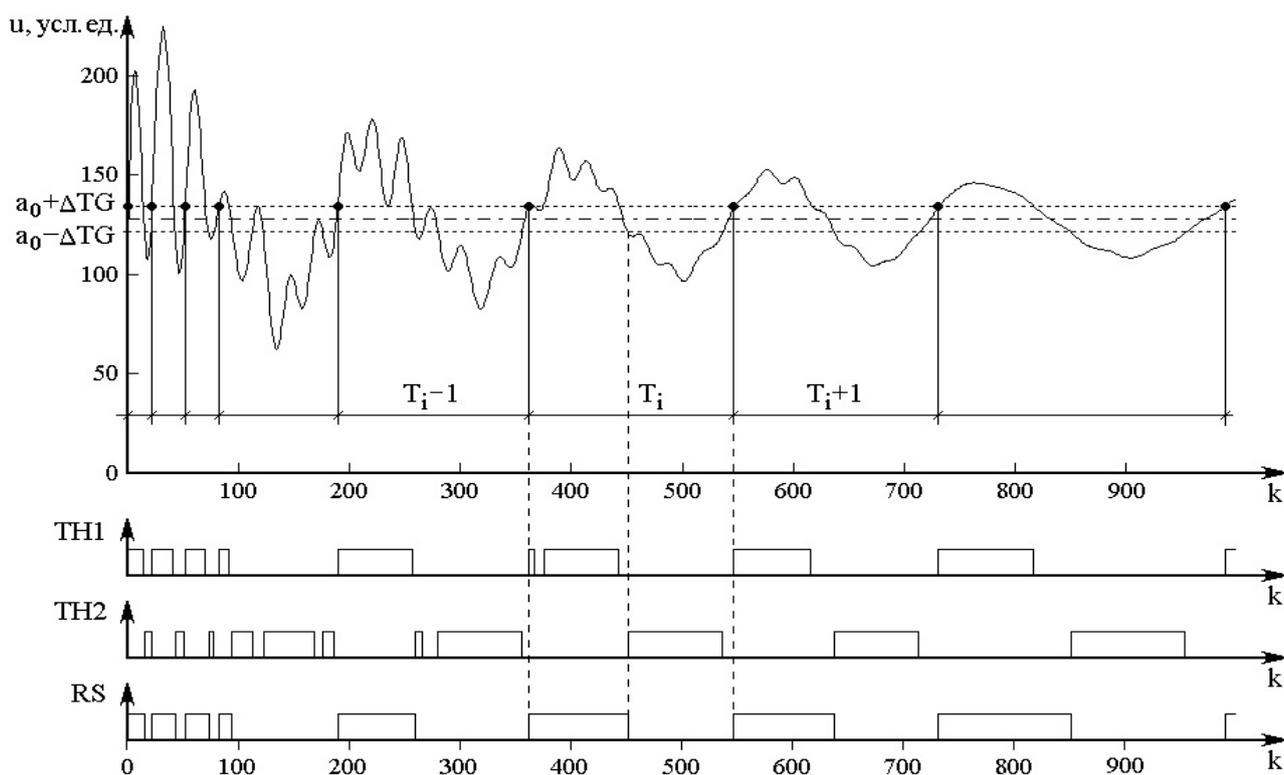


Рисунок 3 – Разбиение аperiodического сигнала на временные интервалы на основе алгоритма работы двух элементов сравнения $TH1$, $TH2$ и RS -триггера

Таким образом, для автоматизированных систем удаленного контроля безопасности шахт обоснованы методы мониторинга и усовершенствованы алгоритмы оценки состояний массива пород и горных выработок. Дальнейшее

развитие получил метод оценки геомеханической безопасности ведения горных работ, отличающийся учетом потенциальных рисков и критериев оценки возникновения аварийных ситуаций от факторов, влияющих на устойчивость системы «крепь-массив».

Усовершенствованы информационные и цифровые аппаратные технологии, предложены алгоритмы отсева ложных значений и цифрового преобразования сигналов автоматизированных систем из временной области в частотную, обеспечивающие повышение надежности и уменьшение размеров передаваемой геотехнической информации. Методы и алгоритмы могут быть использованы при совершенствовании существующих и разработке новых систем безопасности горных работ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Обзор решения Cisco Unified Wireless Network [Эл. ресурс]. – Режим доступа: <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/enterprise/design-zone-industry-solutions/index.html>. – Загл. с экрана.
2. Слащев, И.Н. Оптимизация информационной системы оперативного прогноза геомеханических процессов для поддержки принятия решений по безопасности шахт / И.Н. Слащев, В.Г Шевченко, А.И. Слащев // Геотехническая механика. – Днепропетровск : ИГТМ НАНУ, 2013. – Вып. 112. – С. 129-144.
3. Шевченко, В.Г. Обоснование параметров и разработка информационной системы безопасности ведения подземных горных работ с учетом геомеханических факторов / В.Г. Шевченко, А.И. Слащев / Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. тр. / ИГТМ НАН Украины. – Днепр, 2016. – Вып. 128. – С. 70-78. (на англ.)
4. Колмогоров, А.Н. Теория вероятностей и математическая статистика / А.Н. Колмогоров. – М.: Наука, 1986. 534 с.
5. Геомеханічний моніторинг підземних геотехнічних систем : монографія / Відповід. ред. А.Ф. Булат / А.В. Анциферов, С.І. Скіпочка, А.О. Яланський [та ін.]. – Донецьк: «Ноулідж», 2010. – 253 с. Іл. 64. Табл. 27. Бібл. 335.
6. Глушко, В.Т. Геофизический контроль в шахтах и тоннелях / В.Т. Глушко, В.С. Ямщиков, А.А. Яланский. – М.: Недра, 1987.
7. Слащева, Е.А. Особенности решения геомеханических задач для условий обводненного газонасыщенного массива горных пород / Е.А. Слащева, И.Н. Слащев, А.А. Яланский // Геотехническая механика. – Днепропетровск : ИГТМ НАНУ, 2014. – Вып. 115. – С. 232-244.
8. Математическое моделирование в задачах оценки эффективности и безопасности горных работ: монография / М.Ю. Иконников, Ю.Р. Иконников, Е.А. Слащева, И.Н. Слащев, А.А. Яланский ; М-во образования и науки Украины, ДВНЗ «Національний гірничий ун-т» та ІГТМ НАН України. – Днепропетровск: НГУ, 2015. – 215 с.
9. Слащев, И.Н. Применение информационных технологий для повышения эффективности и безопасности горных работ / И.Н. Слащев // Уголь Украины. – 2013. – № 2. – С. 40-43.
10. Булат, А.Ф. Комплексирование методов оценки геомеханических и газодинамических процессов в породном массиве для систем контроля производственной среды шахт / А.Ф. Булат, И.Н. Слащев, Е.А. Слащева // Геотехническая механика. – Днепр : ИГТМ НАНУ, 2017. – Вып. 134. – С. 3-21.

REFERENCES

1. Solution Overview Cisco Unified Wireless Network , available at: <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/enterprise/design-zone-industry-solutions/index.html>. (Accessed 7 January 2017).
2. Slashchov, I.N., Shevchenko, V.G. and Slashchov, A.I. (2013), “Optimized information system for on-line predicting of geomechanical process behavior and ensuring proper decision-making on the mine safety”, *Geo-Technical Mechanics*, no. 112, pp. 129-144, UA.
3. Shevchenko, V.G. and Slashchov, A.I. (2016), “Validation of parameters and design of information system on the underground mining job safety with taking into account geomechanical factors”, *Geo-Technical Mechanics*, no. 128, pp. 70-78, UA.

4. Kolmogorov, A.N. (1986), *Teoriya veroyatnostey i matematicheskaya statistika* [Theory of Probability and Mathematical Statistics], Nauka, Moscow, RU.
5. Anciferov, A.V., Skipochka, S.I., Yalanskiy, A.A. [et al.], answers. ed. A.F. Bulat (2010), *Heomekhanichnyy monitorynh pidzemnykh heotekhnichnykh system* [Geomechanical underground geotechnical monitoring systems], Noulidzh, Donetsk, UA.
6. Glushko, V.T., Yamshchikov, V.S. and Yalanskiy, A.A. (1987), *Geofizicheskiy kontrol v shakhtakh i tonnellyakh* [Geophysical control in mines and tunnels], Nedra, Moscow, RU.
7. Slashchova, O.A., Slashchov, I.N. and Yalanskiy, A.A. (2014), “Features solutions for problems of geomechanical watery gas-saturated rock massif”, *Geo-Technical Mechanics*, no. 115, pp. 232-244, UA.
8. Ikonnikov, M.YU., Ikonnikov, YU.R., Slashcheva, Ye.A., Slashchov, I.N. and Yalanskiy, A.A. (2015), *Matematicheskoye modelirovaniye v zadachakh otsenki effektivnosti i bezopasnosti gornyykh robot* [Mathematical modeling in solving problems of evaluating the efficacy and safety of mining operations], Natsionalnyy gornyy universitet and IGTM NAS of Ukraine, Dnipropetrovsk, UA.
9. Slashchov, I.N. (2013), “The use of information technology to increase the efficiency and safety of mining operations”, *Coal of Ukraine*, no. 2, pp. 40-43.
10. Bulat, A.F., Slashchov, I.N. and Slashchova O.A. (2017), “Evaluation methods of interconnected geomechanical and gas dynamic processes in the rock massif for the systems of working medium control in the mines”, *GeoTechnical Mechanics*, no. 134, pp. 3-21, UA.

Об авторах

Буллат Анатолий Федорович, Академик Национальной академии наук Украины, доктор технических наук, профессор, директор института, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАНУ), Днепр, Украина, gtm.bulat@gmail.com

Слащев Игорь Николаевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, старший научный сотрудник отдела Проблем разработки месторождений на больших глубинах, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАНУ), Днепр, Украина, IMSlashchov@nas.gov.ua

Яланский Алексей Анатольевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры электропривода, Государственное высшее учебное заведение «Национальный горный университет» (ГВУЗ «НГУ»), г. Днепр, Украина, yalanskiy.o.a@gmail.com.

Слащев Антон Игоревич, кандидат технических наук, младший научный сотрудник отдела геодинамических систем и вибрационных технологий, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАН Украины), г. Днепр, Украина, AISlashchov@nas.gov.ua

About the authors

Bulat Anatoly Fedorovich, Academician of the National Academy of Science of Ukraine, Doctor of Technical Sciences (D. Sc), Professor, Director of the Institute, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics, National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepr, Ukraine, gtm.bulat@gmail.com

Slashchov Igor Nikolaevich, Candidate of Technical Sciences (Ph.D), Senior Researcher, Senior Researcher in Department of Mineral Mining at Great Depths, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepr, Ukraine, IMSlashchov@nas.gov.ua

Yalanskiy Aleksey Anatolyevich, Candidate of Technical Sciences (Ph.D), Associate Professor, Associate Professor in Department of Electric Drive, State High Educational Institution “National Mining University” (SHEI “NMU”), Dnepr, Ukraine, yalanskiy.o.a@gmail.com.

Slashchov Anton Igorevich, Candidate of Technical Sciences (Ph.D), Junior Researcher in Department of Geodynamic Systems and Vibration Technologies, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepr, Ukraine, AISlashchov@nas.gov.ua

Анотація. У статті вирішена актуальна задача з обґрунтування методів моніторингу та вдосконалення алгоритмів оцінки станів масиву порід і гірничих виробок для використання в автоматизованих системах безпеки шахт.

Подальший розвиток отримав метод оцінки геомеханічної безпеки ведення гірничих робіт, який відрізняється урахуванням потенційних ризиків виникнення аварійних ситуацій від факторів, що впливають на стійкість системи «кріплення-масив». Критерії оцінки рівня геомеханічної безпеки засновані на статистиці минулих спостережень, шахтному інструментальному та автоматизованому моніторингу масиву порід і гірничих виробок, результатах комп'ютерного моделювання розвитку передаварійних ситуацій. Для автоматизованих систем віддаленого контролю безпеки вдосконалені інформаційні та цифрові апаратні технології. Запропоновано алгоритми відсіву помилкових значень і цифрового перетворення сигналів з тимчасової області в частотну, що забезпечує підвищення надійності і зменшення розмірів переданої геотехнічної інформації. Методи і алгоритми можуть бути використані при вдосконаленні існуючих та розробці нових систем безпеки гірничих робіт.

Ключові слова: безпека гірничих робіт, автоматизовані системи, дистанційний контроль масиву порід, математичне моделювання, геомеханічні процеси.

Annotation. In the article, solution of the pressing task - validation of methods for monitoring and improving algorithms for estimating states of the rock massif and mine workings and their use in the automated mine-safety systems – is presented.

The method for estimating geomechanical safety of mining operations was further developed, which now takes into account potential risks of occurrence of emergencies due to the factors that affect stability of the “support-rocks” system. Criteria for estimating level of geomechanical safety are based on statistics of previous observations, data of instrumental and automated monitoring of the rock massif and mine workings and results of computer simulation of the pre-emergency situation dynamics. Information and digital hardware technologies were improved to be used in automated remote security-monitoring system. New algorithms are proposed, which reject false values, convert digital signals from the time domain into the frequency domain, and improve reliability of and reduce volume of geotechnical information transmitted. The methods and the algorithms can be used for improving existing and developing new mine-safety systems.

Keywords: mine safety, automated systems, remote rock-massif control, simulation, geomechanics.

Стаття поступила в редакцію 25.07.2017

Рекомендовано к печати д-ром техн. наук А.А. Яланским