

ИЕРАРХИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФОРМАЛИЗАЦИИ НЕЧЕТКОГО ЛОГИЧЕСКОГО ВЫВОДА ДЛЯ ЦИФРОВЫХ СИСТЕМ ОЦЕНКИ УСТОЙЧИВОСТИ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК

¹Слащев А.И., ¹Слащев И.Н., ¹Осенняя Н.В., ¹Константинова И.Б.

¹Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины

ІЄРАРХІЧНА МОДЕЛЬ ФОРМАЛІЗАЦІЇ НЕЧІТКОГО ЛОГІЧНОГО ВИВОДУ ДЛЯ ЦИФРОВИХ СИСТЕМ ОЦІНКИ СТІЙКОСТІ ГІРНИЧИХ ВИРОБОК

¹Слащов А.І., ¹Слащов І.М., ¹Осіння Н.В., ¹Константинова І.Б.

¹Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України

THE HIERARCHICAL MODEL OF FUZZY LOGIC OUTPUT FORMALIZATION FOR DIGITAL SYSTEMS EVALUATING MINE WORKINGS STABILITY

¹Slashchov A.I., ¹Slashchov I.M., ¹Osinnya N.V., ¹Konstantynova I.B.

¹Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Poliakov NAS of Ukraine

Аннотация. Представлены результаты исследований по обоснованию алгоритмов логического вывода в иерархической модели нечеткой логики для цифровых систем безопасности горных работ. Методы исследований: математическая теория нечетких множеств и нечеткой логики; методы реализации алгоритмов нечеткой логики для преобразования входных и выходных сигналов, формирования экспертных правил; методы организации вычислительных процессов и построения программных моделей информационных систем. К числу сложных, слабо формализуемых объектов, которые функционируют в значительной степени в условиях неопределенности, следует отнести геотехническую систему. Решение задач интенсификации горных работ и безопасности связаны с неопределенностью поведения породного массива, для которого точные данные существуют только в аналитических выкладках. Поэтому для управления реальными процессами устойчивости горных выработок необходимо оперировать диапазонами значений параметров, границы которых могут быть определены, в том числе и аналитическими методами на основе различных моделей. Проведена систематизация исходных данных, которая позволила обосновать значимые факторы или наиболее релевантные причины, влияющие на устойчивость подземных горных выработок. Для предупреждения аварийных ситуаций, вызванных потерей равновесия геотехнической системы в обстановке неопределенности поведения породного массива, обоснованы методы фаззификации, инференции и дефаззификации данных. Обосновано применение методов обработки входных сигналов: метод логического умножения (пересечение нечетких-множеств), метод агрегации (объединение по принадлежности правилу); метод импликации; метод дефаззификации (гравитационный). Выработаны лингвистические правила и сформирован алгоритм нечеткого логического вывода для управления параметрами геотехнической системы. Нечетная симметричность матрицы сформулированных лингвистических правил определила характерную симметричную форму поверхности управления. Результаты исследований могут быть использованы в цифровых системах безопасности для оценки устойчивости горных выработок и предупреждения возможных аварийных ситуаций.

Ключевые слова: устойчивость горных выработок, безопасность работ, интеллектуальные алгоритмы, нечеткая логика.

Опыт создания и эксплуатации автоматизированных систем управления показал, что резерв повышения их эффективности заложен в переходе к интеллектуальным алгоритмам обработки данных, которые ориентированы на знания, представленные совокупностью сведений о свойствах объекта управления, закономерностями процессов и явлений, правилами для принятия решений [1]. На сегодняшний день геоинформационные технологии и системы искусственного интеллекта применяются во многих сферах, связанных с интерпретацией геологических данных, с научными исследованиями, а также

многими другими направлениями. Они являются составляющими одного из звеньев в структуре современных производственных автоматизированных систем управления [2]. Тем не менее, любая самая современная цифровая система безопасности требует обоснования математических моделей.

В настоящее время, в связи с интенсивным развитием вычислительной техники, появилась возможность технической реализации систем управления, воплощающих методы и алгоритмы интеллектуальных систем. В частности, разрабатываются и внедряются системы управления, содержащие, нейронные сети, элементы эволюционных моделей и фаззи-контроллеры, основанные на методах нечеткой логики [3, 4]. Методы нечеткой логики (fuzzy logic) для решения прикладных задач служат компромиссом между точными математическими моделями и опытом эксплуатации объекта. Термин нечеткая логика был предложен в теории нечетких множеств Лотфи Заде [3, 5]. Истинные значения параметров в нечеткой логике принадлежат диапазонам с присвоением определенных лингвистических переменных, которые могут управляться конкретными функциями. Под нечетким выводом понимается процесс, при котором из нечетких посылок получают некоторые следствия, возможно, тоже нечеткие, которые определяются композиционными правилами вывода,

В горнодобывающей и перерабатывающей промышленности подходы к разработке систем управления все еще остаются глубоко консервативными, что связано с необходимостью обеспечения безопасной и безаварийной работы технических систем в тяжелых условиях разработки месторождений в обстановке неопределенности поведения породного массива под нагрузкой, высокой опасности внезапных выбросов пород и газов, неравномерности и хаотичности распределения в пространстве свойств и структурных особенностей горных пород и т.п. Применяемые классические системы управления плохо работают в условиях неполной и/или искаженной информации. Поэтому задача формализации нечеткого логического вывода для цифровых систем оценки устойчивости горных выработок актуальна, а ее решение даст возможность повысить эффективность предупреждения потери устойчивости горных выработок.

На практике методы нечеткой логики впервые были использованы в Японии на высокоскоростных поездах, в результате чего были улучшены экономические показатели, комфорт и точность езды [6]. Дальнейшее развитие метод получил при использовании в распознании рукописных символов, контроле систем метрополитена (улучшены комфорт, точность остановки, энергетические параметры), в автоматическом контроле электродвигателей, в системе для раннего распознавания землетрясений Института сейсмологии Японии [7]. Методы нечеткой логики применяются для преодоления неопределенности тогда, когда системы слишком сложны, чтобы определить параметры дискретно или точно [8]. Рациональность и высокую эффективность использования алгоритмов на базе методов нечеткой логики объясняется большой сложностью и низкой предсказуемостью поведения геотехнической

системы «крепь-массив», необходимостью обобщить и упростить логику решения.

Имеется большое число программных средств, реализующих продукционный подход: «оболочки» или «пустые» экспертные системы – «EXSYS Professional», «Карра», «Эксперт», «ЭКО» и др.; системы с использованием унифицированной беспроводной сети «Cisco Unified Wireless Network» (например, в международной горнодобывающей компании Dundee Precious Metals в 2010 г. [9]) и др. Однако, полноценных систем с учетом геомеханических факторов разработано не было.

Для предупреждения аварийных ситуаций в горных выработках необходимо их поддержание в равновесном состоянии [10, 11]. В установившихся и в квазиустановившихся режимах работы можно уменьшить воздействие опасных факторов на человека, так как такие режимы обуславливают покой системы либо ее движение по предсказуемой траектории. Классические методы работают в тех случаях, когда присутствует точная математическая модель объекта управления. Вместе с тем, существует множество задач в горном производстве, при решении которых бывает достаточно незначительно изменить входные данные (например, физико-механические свойства пород при обводнении [12]), чтобы перейти от точно решаемой задачи к неопределенной или получить некоторую степень неопределенности. Это в большей мере относится к решениям задач поддержания устойчивости и безопасности горных выработок, для которых абсолютно точные данные существуют только в аналитических выкладках. В то же время, для управления реальными процессами приходится больше оперировать некоторыми диапазонами значений параметров, границы которых могут быть определены, в том числе и аналитическими методами, на основе различных моделей оценки состояния системы «крепь-массив».

В цифровых системах оценки устойчивости горных выработок реализуются алгоритмы анализа критериев оценки состояния системы «крепь-массив» с привлечением геомеханических моделей [13-15] и методов оценки сценариев развития ситуаций. Для анализа данных напряженно-деформированного состояния горных пород и устойчивости выработок, а также формирования своевременной реакции на изменения параметров горнотехнической системы «крепь-массив» предложен и разработан фаззи-контроллер, главной задачей которого является поддержание системы в состоянии равновесия. Для поддержания равновесного состояния контролируется величина отклонения параметров системы от точки равновесия (Del), а также скорость изменения этого отклонения ($dDel/dt$). На базе этих данных вырабатываются сигналы предупреждения персонала, дается рекомендация к применению непосредственно в производственном процессе ряда технических и технологических мероприятий, способствующих возвращению данного показателя в исходный диапазон.

При оценке состояния геологической среды, включающей горные выработки, и безопасности труда этот сигнал является одним из совокупности

критериев контроля. Он также может быть использован как добавочный к управляющим сигналам, генерируемым классическими системами управления [16, 17]. Например, сигнал фаззи-контроллера может быть применен для непосредственной коррекции величины задания скорости проходки для горного комбайна с целью предупреждения обвалов и выбросов, регулировки увеличения или уменьшения давления в гидравлических стойках крепи или выдачи вспомогательных рекомендаций, касающихся частоты установки дополнительного, например анкерного, крепления с целью предупреждения газодинамических явлений, внезапных подвижек кровли и почвы выработок и других опасных проявлений горного давления.

Для нечеткой модели проведена систематизация контролируемых и неконтролируемых значимых факторов или наиболее релевантных причин, наличие или изменение которых влияет на устойчивость горных выработок (табл. 1).

Таблица 1 – Контролируемые и неконтролируемые факторы в иерархической модели нечеткого логического вывода для цифровых систем контроля устойчивости выработок

Контролируемые и неконтролируемые факторы	Параметр учета	Ед. изм.
1	2	3
Горно-геологические исходные данные		
Глубина размещения выработки	H	м
Угол залегания породных и угольных слоев	α	град
Мощность каждого слоя пород кровли и почвы	m_i	м
Последовательность залегания породных слоев	h_i	м
Структурная нарушенность пород	k_{str}	
Ориентация доминирующей системы природной трещиноватости	α_{str}	град
Избыточное давление газа в породах и угле	p_{ga}	МПа
<i>Параметры исходного тектонического поля напряжений:</i>		
- коэффициент тектонической активности	k_{ta}	
- направление вектора главных напряжений	α_{ta}	град
<i>Физико-механические свойства пород:</i>		
- модуль упругости	E	МПа
- коэффициент Пуассона	ν	
- объемный вес	γ	кг/м ³
- сцепление	τ_0	МПа
- угол внутреннего трения	φ	град
- прочность на одноосное сжатие	$\sigma_{сж}$	МПа
- прочность на растяжение	σ_p	МПа
- прочность водонасыщенных пород	$\sigma_{сж}^w$	МПа
Горнотехнические исходные данные		
Форма выработки	k_b	
Площадь сечения выработки	S_b	м ²
Способ крепления выработки		
Способ охраны выработки		
Способ управления кровлей в лаве		

Продолжение табл. 1

1	2	3
Шаг обрушения непосредственной кровли	l_{nk}	м
Шаг посадки основной кровли	l_{ok}	м
Водоприток в выработку	Q	м ³ /час
<i>Параметры заложения подготовительной выработки:</i>		
- относительно пласта		
- относительно очистного забоя		
- относительно сопряженных и разгрузочных выработок		
<i>Характеристики средств крепления и поддержания:</i>		
Плотность установки рамной крепи	n_{kr}	рам/м
Конструктивный отпор рамной крепи	F_{kr}	Н
Конструктивная податливость рамной крепи	u_{kr}	м
Плотность установки дополнительного крепления в выработке	n_{kd}	шт/м
Место расположения охранных конструкций		
Конструктивная податливость охранных конструкций	u_{ko}	м
Конструктивный отпор охранных конструкций	F_{ko}	Н
Ширина зоны упрочнения	l_{upr}	м
Прогнозируемые базовые информативные параметры		
Узловые силы по осям x и y	F_x, F_y	МН
Узловые перемещения по осям x и y	u_x, u_y	м
Максимальные и минимальные главные напряжения	σ_1, σ_2	МПа
Текущие теоретические осевые напряжения	σ_x^T, σ_y^T	МПа
Касательные напряжения	τ_{xy}	МПа
Максимальные главные деформации	ε_1	м
Деформации элементов по осям x и y	$\varepsilon_x, \varepsilon_y$	м
Прогнозируемые интегральные информативные параметры		
Полные смещения узлов	u	м
Изменения значений σ_1	$\sigma_1^{j+1} - \sigma_1^j$	МПа
Неравнокомпонентность напряженного состояния	$\sigma_1 - \sigma_3$	МПа
Углы наклона площадок сдвига	β_1, β_2	град
Площадь зоны неупругих деформаций	$S_{знд}$	м ²
Изменение площади зоны неупругих деформаций	$S_{знд}^{j+1} - S_{знд}^j$	м ²
Площадь зоны разрыва сплошности	S_p	м ²

В режиме реального времени выполняются три этапа обработки данных: перевод точных значений входных сигналов в значение логико-лингвистических переменных (фазификация); умозаключение, формируемое экспертами в процессе интерпретации получаемых сообщений (инференция); преобразование нечеткого множества в четкое число для использования цифровыми системами (дефазификация). На этапе инференции экспертные знания, первоначально изложенные качественно в виде экспертных правил, преобразуются в закон управления, который реализуется программно-техническими средствами, если система настроена на выработку и передачу сигналов опасности, а также инициализацию создания руководящих

инструкций, регламентирующих выполнение технических мероприятий, что, в конечном итоге, обеспечивает восстановление работоспособности системы (например, приказ на установку дополнительного крепления в зонах геологических нарушений).

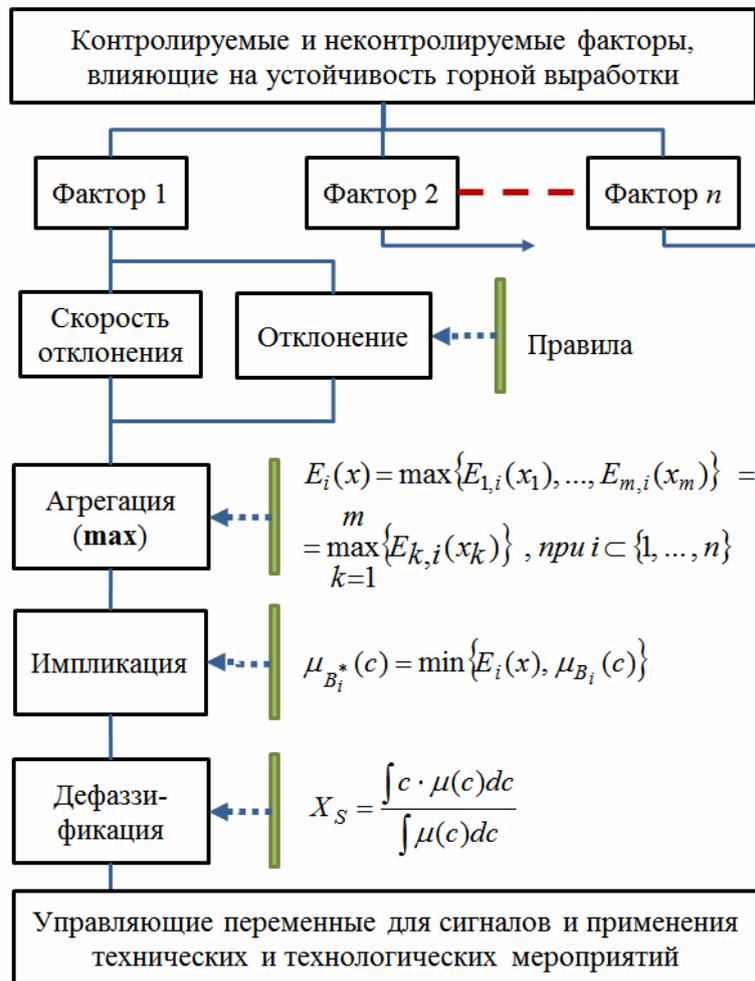


Рисунок 1 – Схема иерархической нечеткой модели контроля устойчивости горной выработки: $\mu_B(x)$ – степень принадлежности величины x нечеткому множеству B ; $E_i(x)$ – степень принадлежности, с которой элементарное выражение «Если»-части каждого активного фаззи-правила является истинным; $i \in \{1, \dots, n\}$ – порядковый номер фаззи-правила, общим числом n ; m – общее количество элементарных выражений для одного правила; B_i – определяемое при импликации фаззи-множество для каждого i -го правила; X_S – проекция центра масс функции принадлежности выходной величины на ось абсцисс.

В процессе фаззификации определяются значения всех функций принадлежности для текущих входных значений аргументов отклонения и производной отклонения. Интегральное значение всех функций принадлежности по одной входной переменной, независимо от текущего значения аргумента, равно единице, что является одним из преимуществ и, в данном случае, обусловило применение именно треугольных функций активации. Общая схема иерархической нечеткой модели контроля

устойчивости показана на рис. 1. Расчет параметров этапов инференции (пересечения, объединения, агрегации и импликации фаззи-множеств) проводится по известным соотношениям [18].

Для каждой из входных переменных ось абсцисс в пределах операционной зоны разбита на пять интервалов: «LN» – большое отрицательное значение аргумента, «N» – отрицательное значение аргумента, «Z» нулевое значение аргумента, «P» положительное значение, «LP» – большое положительное значение аргумента. Следует отметить, что в случае значительной сложности объекта контроля, что, безусловно, характерно для геотехнических систем, одним из элементов которых является породный массив, характеризующийся нелинейностью и неравномерностью распределения физических свойств, можно увеличить число интервалов разбиения оси ординат, добавив промежуточные, условно обозначаемые как «MN» – среднее отрицательное и «MP» – среднее положительное. Однако увеличение числа интервалов ведет к увеличению их пересечений на плоскости для двух аргументов в квадратной зависимости, что значительно усложняет формулировку экспертных правил. В результате фаззификации имеем, в общем случае, четыре ненулевых значения функций принадлежности (по два значения по каждой из двух входных осей), которые должны быть обработаны с использованием математического аппарата нечеткой логики.

Практическая реализация нечеткого вывода основана на нечетких продукционных правилах, которые позволяют представить процесс управления в виде предложений типа «Если – условие, то – действие». Под условием понимается предложение-образец, по которому осуществляется поиск в базе знаний, а под действием – действия, выполняемые при успешном поиске. Отличительной особенностью модели является способность осуществлять выбор правил из некоторого множества возможных в зависимости от установленных критериев. Поэтому рассмотрение формализма нечетких моделей адекватно отражают знания экспертов конкретной предметной области.

Лингвистические правила функционирования контроллера формулируются экспертом на основе его знаний о функционировании объекта и навыков управления объектом. Для предупреждения аварийных ситуаций, вызванных потерей равновесного состояния геотехнической системы «крепь-породный массив», предлагаются следующие правила:

$$\text{If } (Del \text{ is } LP) \text{ and } ((dDel / dt) \text{ is } LP) \text{ then } (Output \text{ is } LN); \quad (1)$$

$$\text{If } (Del \text{ is } LN) \text{ and } ((dDel / dt) \text{ is } LN) \text{ then } (Output \text{ is } LP); \quad (2)$$

$$\text{If } (Del \text{ is } LP) \text{ and } ((dDel / dt) \text{ is } LN) \text{ then } (Output \text{ is } Z); \quad (3)$$

$$\text{If } (Del \text{ is } P) \text{ and } ((dDel / dt) \text{ is } P) \text{ then } (Output \text{ is } N); \quad (4)$$

$$\text{If } (Del \text{ is } N) \text{ and } ((dDel / dt) \text{ is } N) \text{ then } (Output \text{ is } P); \quad (5)$$

$$\text{If } (Del \text{ is } LP) \text{ and } ((dDel / dt) \text{ is } P) \text{ then } (Output \text{ is } LN), k = 0,5; \quad (6)$$

$$\text{If } (Del \text{ is } LP) \text{ and } ((dDel / dt) \text{ is } P) \text{ then } (Output \text{ is } N), k = 0,5, \quad (7)$$

где k – весовой коэффициент для правила (сумма весовых коэффициентов для всех правил в пределах одной ячейки таблицы правил составляет единицу).

Сводная таблица сформулированных правил – это матрица, нечетно симметричная относительно обратной диагонали, что в результате определило характерную симметричную форму поверхности управления. Сама поверхность является статичной, неизменной при заданных алгоритмах обработки данных и экспертных правилах, и поэтому может быть задана в табличном виде и в технической реализации записывается в постоянную память цифровой системы.

Таким образом, для предупреждения аварийных ситуаций, вызванных потерей равновесия геотехнической системы в обстановке неопределенности поведения породного массива, обоснованы методы фаззификации, инференции и дефаззификации данных. Обосновано применение методов обработки входных сигналов: метод агрегации (объединение по принадлежности правилу); метод импликации; метод дефаззификации (гравитационный). Выработаны лингвистические правила и сформирован алгоритм нечеткого логического вывода для управления параметрами геотехнической системы. Нечетная симметричность матрицы сформулированных лингвистических правил определила характерную симметричную форму поверхности управления. Результаты исследований могут быть использованы в цифровых системах безопасности для оценки устойчивости горных выработок и предупреждения возможных аварийных ситуаций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Павлов С.Н. Системы искусственного интеллекта: учеб. пособие. Томск: Эль Контент, 2011. Ч.1. 176 с.
2. Г.І. Рудько та ін. Геоінформаційні технології в надрокористуванні (на прикладі ГІС K-MINE) : монографія К.: Академпрес, 2011. 335 с.
3. Zadeh, L.A. [and others] (1996), Fuzzy Sets, Fuzzy Logic, Fuzzy Systems, World Scientific Press, ISBN 9810224214.
4. Robert, V. Demicco (ed.) and George, J. Klir (ed.). Fuzzy Logic in Geology 1st Edition, London: Academic Press, 2003. UK, ISBN 9780080521893.
5. "Fuzzy Logic". Stanford Encyclopedia of Philosophy. Bryant University. 2006-07-23. Retrieved 2008-09-30.
6. Kosko, B (June 1, 1994). Fuzzy Thinking: The New Science of Fuzzy Logic. Hyperion.
7. Bansod, Nitin A., Marshall Kulkarni, and S.H. Patil (Bharati Vidyapeeth College of Engineering) "Soft Computing- A Fuzzy Logic Approach". Soft Computing (Allied Publishers 2005) (page 73)
8. Valiant, Leslie, (2013) Probably Approximately Correct: Nature's Algorithms for Learning and Prospering in a Complex World New York: Basic Books. ISBN 978-0465032716.
9. Обзор решения Cisco Unified Wireless Network [Эл. ресурс]. – Режим доступа: <http://www.cisco.com/global/RU/products/hw/wireless/cuwn.shtml>. – Загл. с экрана.
10. Slashchov I.M. Estimation of fracture systems parameters in rock massif by the finite element method. *E3S Web of Conferences*, 109 (2019).
11. O. Slashchova, I. Slashchov, I. Sapunova. Specific solution of problem of water filtering in the rocks by the finite element method. *E3S Web of Conferences*, 109 (2019).
12. O. Slashchova. Water effect on the rocks and mine roadways stability. *E3S Web of Conferences*, 109 (2019).
13. Булат А.Ф., Слащёв И.Н., Яланский Алекс.А., Слащев А.И. Обоснование методов и алгоритмов оценки геомеханической безопасности ведения горных работ / Геотехническая механика. Днепр: ИГТМ НАНУ, 2017. № 135. С. 16-31.
14. Slashchov I.M., Shevchenko V.G, Kurinnyi V.P., Slashchova O.A., and Yalanskyi O.A. (2019) Forecast of potentially dangerous rock pressure manifestations in the mine roadways by using information technology and radiometric control methods, *Mining of Mineral Deposits*, no. 13(4), 9-17.

15. Булат, А.Ф., Слащев, И.Н., Слащева, Е.А. Комплексование методов оценки геомеханических и газодинамических процессов в породном массиве для систем контроля производственной среды шахт / Геотехническая механика. Днепр : ИГТМ НАНУ, 2017. № 134. С. 3-21.
16. V. Shevchenko A. Slashchov. Justification of the basic algorithms of the mine safety information system. E3S Web of Conferences, 109 (2019).
17. A. Slashchov and O. Yalanskyi. Substantiation of fuzzy logic algorithms for control problems of a geotechnical systems. E3S Web of Conferences, 109 (2019).
18. Калашніков В.І., Паліс Ф., Лозинський О.Ю. Основи теорії фази-логіки та фази-регулювання. Донецьк, Магдебург, Львів. 2000. 69 с.

REFERENCES

- Pavlov, S.N. (2011), *Sistemy iskusstvennogo intellekta*, El Kontent, Tomsk, RU.
- Rudko, H.I. [and others] (2011), *Geoinformatsiyni tekhnologii v nadrokorystuvanni (na prykladi PS K-MINE)* [Geoinformation technologies in subsurface management (by the example of K-MINE geoinformation system)], Akadempress, Kyiv. ISBN 978-966-7541-12-5.
- Zadeh, L.A. [and others] (1996), *Fuzzy Sets, Fuzzy Logic, Fuzzy Systems*, World Scientific Press, ISBN 9810224214.
- Robert, V.Demicco (ed.) and George, J.Klir (ed.) (2003), *Fuzzy Logic in Geology 1st Edition*, Academic Press, London, UK, ISBN 9780080521893.
- "Fuzzy Logic". *Stanford Encyclopedia of Philosophy*. Bryant University. 2006-07-23. Retrieved 2008-09-30.
- Kosko, B (June 1, 1994), *Fuzzy Thinking: The New Science of Fuzzy Logic*, Hyperion.
- Bansod, Nitin A., Marshall Kulkarni, and S.H. Patil (Bharati Vidyapeeth College of Engineering) *Soft Computing- A Fuzzy Logic Approach*. Soft Computing (Allied Publishers 2005) (page 73)
- Valiant, Leslie (2013), *Probably Approximately Correct: Nature's Algorithms for Learning and Prospering in a Complex World*, New York: Basic Books. ISBN 978-0465032716.
- Cisco Unified Wireless Network (2016), Products & Services, available at: <http://www.cisco.com/global/RU/products/hw/wireless/cuwn.shtml>. (Accessed 17 January 2019)
- Slashchov I.M. (2019), "Estimation of fracture systems parameters in rock massif by the finite element method", *E3S Web of Conferences*, no. 109.
- O. Slashchova, I. Slashchov and I. Sapunova (2019), "Specific solution of problem of water filtering in the rocks by the finite element method", *E3S Web of Conferences*, no. 109.
- O. Slashchova (2019), "Water effect on the rocks and mine roadways stability", *E3S Web of Conferences*, no. 109.
- Bulat, A.F., Slashchov, I.N., Yalanskiy Aleks.A. and Slashchov A.I. (2017), "Validation of methods and algorithms for estimating geomechanical safety of mining operations", *Geotekh. meh.*, no. 135, pp. 16-31.
- Slashchov I.M., Shevchenko V.G, Kurinnyi V.P., Slashchova O.A., and Yalanskyi O.A. (2019) Forecast of potentially dangerous rock pressure manifestations in the mine roadways by using information technology and radiometric control methods, *Mining of Mineral Deposits*, no. 13(4), pp. 9-17.
- 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, *Geotekh. meh.*, no. 134, pp. 3-21.
- V. Shevchenko and A. Slashchov (2019), "Justification of the basic algorithms of the mine safety information system", *E3S Web of Conferences*, no. 109.
- A. Slashchov and O. Yalanskyi (2019), "Substantiation of fuzzy logic algorithms for control problems of a geotechnical systems", *E3S Web of Conferences*, no. 109.
- Kalashnikov, V.I. Palis, F. and Lozynskyy, O.YU. (2000), *Osnovy teoriiy fazy-lohiky ta fazy-rehulyuvannya* [Bases of theory to the phase-logic and phase-adjusting], Donetsk : Magdeburg : Lviv, UA.

Об авторах

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 НАНУ), Днепр, Украина, aislashchov@nas.gov.ua

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

Осенняя Наталья Владимировна, магистр, младший научный сотрудник отдела эластомерных конструкций горных машин, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАНУ), Днепр, Украина, vyosinniy@nas.gov.ua

Константинова Ирина Борисовна, магистр, ведущий инженер отдела проблем разработки месторождений на больших глубинах, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАНУ), Днепр, Украина, irakon2001@gmail.com

About the authors

Slashchov Anton Ihorovych, Candidate of Technical Sciences (Ph.D), Junior Researcher in Department of Geodynamic Systems and Vibration Technologies, Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Poljakov NAS of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepr, Ukraine, aislashchov@nas.gov.ua

Slashchov Ihor Mykolayovych, Candidate of Technical Sciences (Ph.D), Senior Researcher, Senior Researcher in Department of Mineral Mining at Great Depths, Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Poljakov NAS of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepr, Ukraine, imslashchov@nas.gov.ua

Osinnya Nataliya Volodymyrivna, Master of Science, Junior Researcher in Department of Elastomeric Component Mechanics in Mining Machine, Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Poljakov NAS of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepr, Ukraine, vyosinniy@nas.gov.ua

Konstantynova Iryna Borysivna, Master of Science, Lead Engineer in the Department of Mineral Mining at Great Depths, Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Poljakov NAS of Ukraine (IGTM, NAS of Ukraine), Dnipro, irakon2001@gmail.com

Анотація Представлені результати досліджень з обґрунтування алгоритмів логічного висновку в ієрархічній моделі нечіткої логіки для цифрових систем безпеки гірничих робіт. Методи досліджень: математична теорія нечітких множин та нечіткої логіки; методи реалізації алгоритмів нечіткої логіки для перетворення вхідних і вихідних сигналів, формування експертних правил; методи організації обчислювальних процесів і побудови програмних моделей інформаційних систем. До числа складних, слабо формалізованих об'єктів, які функціонують в значній мірі в умовах невизначеності, слід віднести геотехнічну систему. Рішення задач інтенсифікації гірничих робіт і безпеки пов'язані з невизначеністю поведінки породного масиву, для якого точні дані існують тільки в аналітичних викладах. Тому для управління реальними процесами стійкості гірничих виробок необхідно оперувати діапазонами значень параметрів, межі яких можуть бути визначені, в тому числі і аналітичними методами на основі різних моделей. Проведена систематизація вихідних даних, яка дозволила обґрунтувати значущі фактори або найбільш релевантні фактори, що впливають на стійкість підземних горних виробок. Для попередження аварійних ситуацій, що викликані втратою рівноваги геотехнічної системи в обстановці невизначеності поведінки породного масиву, обґрунтовані методи фазифікації, інференції і дефазифікації даних. Обґрунтовано застосування методів обробки вхідних сигналів: метод логічного множення (перетин нечітких-множин), метод агрегації (об'єднання за належністю до правила); метод імплікації; метод дефазифікації (гравітаційний). Вироблені лінгвістичні правила і сформований алгоритм нечіткого логічного висновку для управління параметрами геотехнічної системи. Непарна симетричність матриці сформульованих лінгвістичних правил визначила характерну симетричну форму поверхні управління. Результати досліджень можуть бути використані в цифрових системах безпеки для оцінки стійкості гірничих виробок і попередження можливих аварійних ситуацій.

Ключові слова: стійкість гірничих виробок, безпека робіт, інтелектуальні алгоритми, нечітка логіка.

Annotation. The article presents results of studies on substantiating logic output algorithms in the fuzzy logic hierarchical model for digital systems evaluating mining operation safety. Research methods: mathematical theory of fuzzy sets and fuzzy logic; methods of fuzzy logic algorithm implementation for converting input and output signals and creation of expert rules; methods of computational process organization and building of software models for information systems. In the number of complex, hardly formalized objects, which, mainly, operate in the conditions of uncertainty, one should include geotechnical system. Solution to the problems of intensification and safety of mining operations is associated with the uncertain behavior of rock massif, for which accurate data exist only in analytical calculations. Therefore, for controlling real processes of the mine working stability, it is necessary to operate with ranges of parameter values, boundaries of which can be determined by analytical methods as well, which are based on various model. In this research, the initial data were systematized, which made it possible to substantiate significant factors or the most relevant reasons affecting stability of the underground mine workings. In order to prevent emergency situations caused by the lost geotechnical system stability due to the uncertain behavior of the rock mass, methods of data fuzziness, inference and de-fuzziness were validated. Usability of the following methods of input signal processing was justified: method of logical multiplication (intersection of fuzzy sets), aggregation method (joining by belonging to the rule); implication method; and de-fuzziness method (gravitational). Linguistic rules were formulated, and fuzzy logical inference algorithm was designed in order to control parameters of geotechnical systems. Odd symmetry of matrix of the formulated linguistic rules determined a typical symmetric shape of the control surface. The findings can be used in digital safety systems for evaluating mine working stability and preventing possible emergency situations.

Keywords: mine workings stability, labor safety, intelligent algorithms, fuzzy logic.

Стаття надійшла до редакції 10.09. 2019

Рекомендовано до друку д-ром техн. наук А.О. Яланським