

Слащев А.И., аспирант
(ИГТМ НАН Украины)

**РАЗРАБОТКА ФАЗЗИ-КОНТРОЛЛЕРА ДЛЯ АНАЛИЗА ДАННЫХ
МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД И ВЫРАБОТОК**

Слащов А.І., аспірант
(ІГТМ НАН України)

**РОЗРОБКА ФАЗЗИ-КОНТРОЛЕРА ДЛЯ АНАЛІЗУ ДАНИХ
МОНИТОРИНГУ СТАНУ ГІРСЬКИХ ПОРІД І ВИРОБОК**

Slashchov A.I., Doctoral Student
(IGTM NAS of Ukraine)

**DEVELOPMENT OF FUZZY-CONTROLLER FOR DATA ANALYSIS OF
ROCKS AND MINE WORKINGS CONDITION MONITORING**

Аннотация. В статье представлены результаты исследований по разработке интеллектуальных алгоритмов на основе методов нечеткой логики для информационной системы обеспечения безопасности подземных горных работ с учетом комплексной оценки, оперативного прогнозирования и вероятных сценариев развития геомеханических процессов.

Для предупреждения аварийных ситуаций, вызванных потерей равновесия геотехнической системы в обстановке неопределенности поведения породного массива, разработан фаззи-контроллер, который формирует дополнительный управляющий сигнал. Для фаззи-контроллера обоснованы методы фаззификации, инференции и дефаззификации данных, разработаны лингвистические правила управления параметрами геотехнической системы. В Matlab разработана программная модель предложенной системы и выполнено моделирование ее работы с решением задачи Коши методом Рунге-Кутты 4-го порядка. Моделирование показало работоспособность и статическую устойчивость разработанных алгоритмов. Выходной сигнал фаззи-контроллера может быть использован как информационный для оценки степени опасности геотехнической системы и предупреждения возможных аварийных ситуаций, что обеспечит повышение безопасности труда на горных предприятиях.

Ключевые слова: геотехническая система, геомеханические процессы, безопасность труда, информационные технологии, интеллектуальные алгоритмы, нечеткая логика.

Одним из способов предупреждения аварийных ситуаций в геотехнических системах является удержание их в равновесном состоянии. В установившихся и в квазиустановившихся режимах работы можно исключить опасные и вредные факторы либо уменьшить их воздействие на человека, так как такие режимы обуславливают покой системы либо ее движение по легко предсказуемой траектории. Вместе с тем, разработка закона управления и синтез управляющей системы классическими методами невозможны или затруднены в тех случаях, когда отсутствует точная математическая модель объекта управления. Поэтому в настоящее время, в связи с интенсивным развитием вычислительной техники и микропроцессорных средств, появилась возможность технической реализации систем управления, воплощающих методы и алгоритмы интеллектуальных систем.

В частности, разрабатываются и внедряются системы управления, содержащие фаззи-контроллеры (основанные на методах нечеткой логики [1-5]), нейронные сети и элементы эволюционных моделей. К сожалению, 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 на больших глубинах в обстановке частичной 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, эффективные для управления строго детерминированными объектами, для которых получены высоко достоверные модели, как раз плохо работают именно в условиях неполной и/или искаженной информации. Поэтому задача построения интеллектуальных систем в дополнение к уже существующим системам безопасности актуальна, а ее решение даст возможность существенно повысить эффективность прогнозирования и предупреждения опасных ситуаций, вызванных геомеханическими факторами, надежно управлять работой оборудования, обеспечить безаварийность и безопасность труда.

Проектируемая информационная система обеспечения безопасности ведения подземных горных работ состоит из трех основных подсистем: подсистемы управления персоналом [6, 7], справочно-информационной подсистемы поддержки принятия решений и диалоговой подсистемы оценки безопасности горных работ по геомеханическому фактору, в которой реализуются алгоритмы анализа критериев оценки состояния породного массива и горных выработок с привлечением геомеханических моделей и методов оценки сценариев развития ситуаций. Для анализа поступающих данных напряженно-деформированного состояния горных пород и устойчивости выработок, а также формирования своевременной реакции на изменения параметров объекта управления (в нашем случае горнотехнической системы «крепь-массив») предложен и разработан фаззи-контроллер, главной задачей которого является поддержание системы в состоянии равновесия.

Независимо от физической природы объекта управления, для поддержания его равновесного состояния следует контролировать величину отклонения параметров системы от точки равновесия, а также скорость изменения этого отклонения. На базе этих данных необходимо определять корректирующий сигнал (на базе которого вырабатываются управляющие воздействия и сигналы предупреждения персонала), направленный на возврат системы в исходное равновесное состояние («толкающий» объект управления к точке равновесия). При получении оператором системы сигнала коррекции контролируемого параметра (либо поступлении сигнала непосредственно на вход манипулятора автоматизированной системы управления объектом), в зависимости от его назначения и значения, дается рекомендация к применению непосредственно в производственном процессе ряда технических и технологических мероприятий, способ-

ствующих возвращению данного показателя в исходный диапазон.

Таким образом, контроллер должен иметь два входа и один выход. Для двухкоординатного фаззи-контроллера предлагается использовать следующие входные координаты. Ось «Отклонение» (*Del*) характеризует степень отклонения управляемой величины от точки равновесия и может быть определена как разность текущего значения параметра, например координаты X_t , и параметра объекта в равновесном состоянии X_0 в относительных единицах:

$$Del = (X_t - X_0) / X_B, \quad (1)$$

где X_B – базовое значение управляемой величины.

Вторая ось «Производная отклонения» ($dDel/dt$) является производной величины *Del* по времени и характеризует скорость изменения отклонения от состояния равновесия. Для получения значения производной в структуру фаззи-контроллера введено дифференцирующее звено.

На выходе контроллера (выходная ось, обозначенная «Output») формируется управляющий сигнал, который, по сути, является корректирующим воздействием, вводимым в систему для удержания ее в состоянии равновесия (рис. 1). В предлагаемой нами комплексной системе обеспечения оценки состояния объекта управления (геологической среды, включающей горные выработки), непрерывности технологического процесса, безаварийности работы оборудования и безопасности труда этот сигнал является одним из совокупности критериев контроля. Он также может быть использован как корректирующий (добавочный) в дополнение к управляющим сигналам, генерируемым классическими системами управления. 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.

В процессе функционирования фаззи-контроллера в режиме реального времени выполняются три этапа обработки данных: фаззификация (перевод точных значений входных сигналов в значение логико-лингвистических переменных), инференция (умозаключение, формируемое экспертами в процессе интерпретации получаемых сообщений) и дефаззификация (преобразование нечеткого множества в четкое число, см. рис. 1). Причем на этапе инференции экспертные знания, первоначально изложенные качественно в виде экспертных правил, должны быть преобразованы в закон управления, который реализуется техническими средствами микропроцессорной техники в случае непосредственной прямой регулировки параметров оборудования, влияющего на объект управления. Закон управления может быть реализован 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).

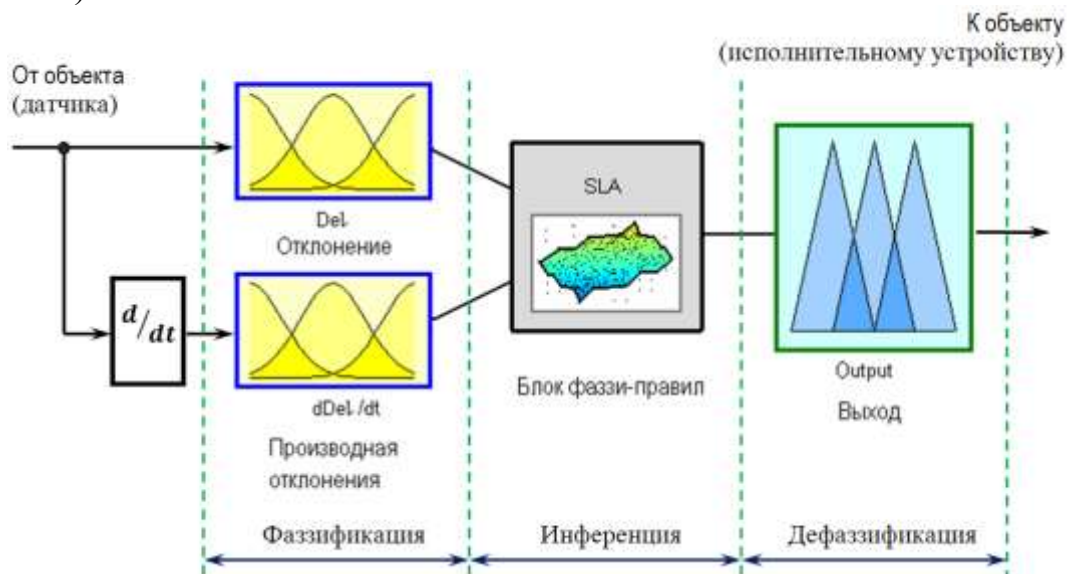
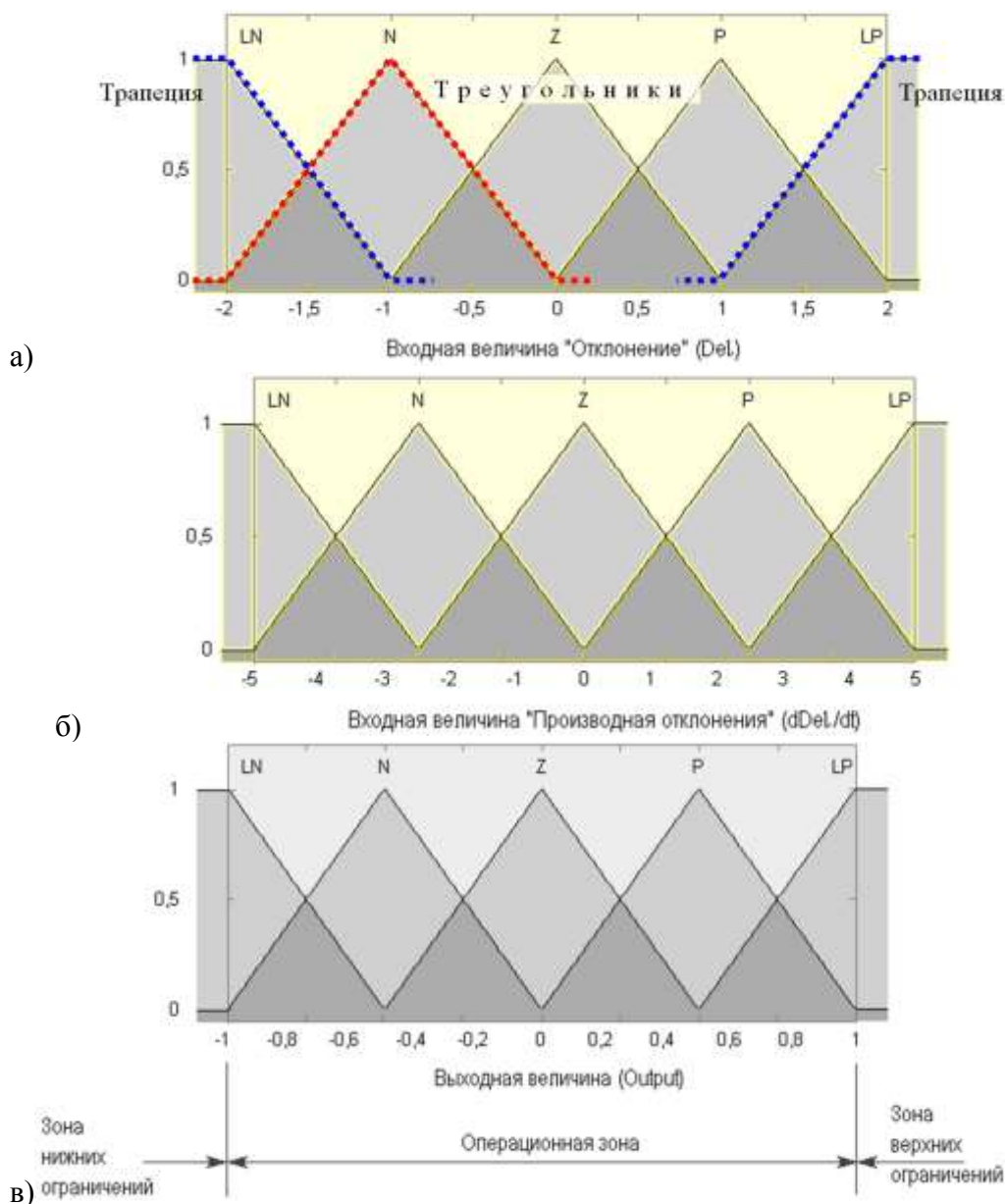


Рисунок 1 – Структурная схема фаззи-блока разрабатываемого контроллера

В процессе фаззификации определяются значения всех функций принадлежности для текущих входных значений аргументов отклонения и производной отклонения. Для принятого распределения интервалов и треугольных функций принадлежности в любой момент времени в операционной зоне только лишь для двух функций их значения будут отличаться от нуля и единицы, рис. 2. В точках разграничения интервалов, а также за пределами операционной зоны, в зонах верхнего и нижнего ограничений, значение лишь одной функции принадлежности будет равно единице, в то время как остальные примут значение «ноль». В общем случае 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.

Для каждой из входных переменных ось абсцисс в пределах операционной зоны разбита на пять интервалов, покрываемых «колоколами» функций активации, условно обозначенных согласно устоявшейся терминологии: «LN» или «Large Negative» – большое отрицательное значение аргумента, «N» или «Negative» – отрицательное значение аргумента, «Z» или «Zero» – нулевое значение аргумента, «P» или «Positive» – положительное значение, «LP» или «Large Positive» – 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 ор-

динат, добавив промежуточные, условно обозначаемые как «MN» или «Middle Negative» – среднее отрицательное и «MP» или «Middle Positive» – 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.



Обозначения интервалов для значений: «LN» – больших отрицательных, «N» – отрицательных, «Z» – нулевых, «P» – положительных, «LP» – больших положительных.

Рисунок 2 – Используемые функции принадлежности для входных величин (а, б) и выходной величины (в)

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. В разработанном устройстве выполняется максимум-агрегация этих значений (графическая интерпретация отдельных этапов инференции представлена на рис. 3).

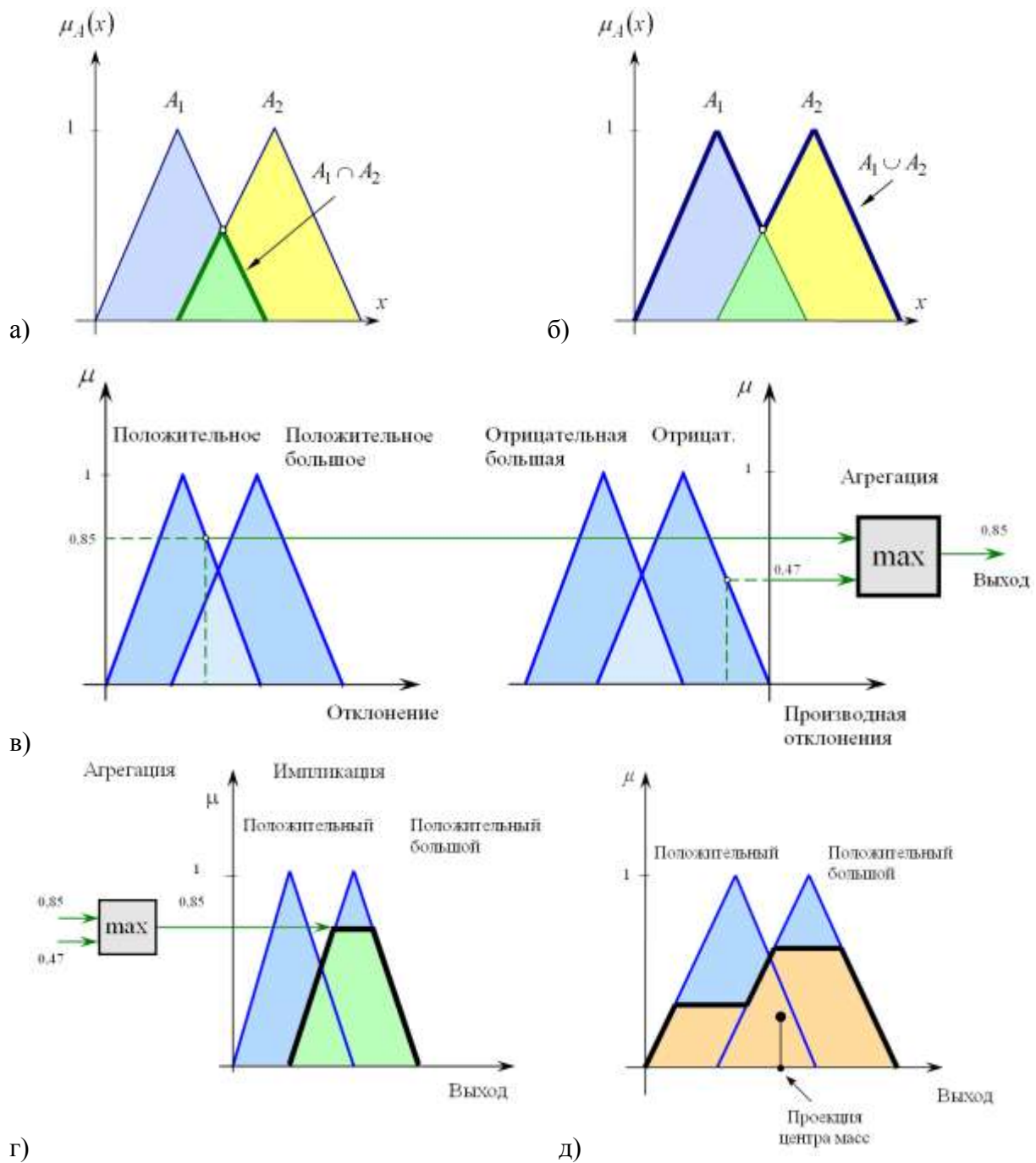


Рисунок 3 – Графическая интерпретация методов вычислений, использованных в фаззи-контроллере: пересечение (а) и объединение (б) нечетких множеств, процессы агрегации (в) и импликации (г), дефаззификация результата вычислений (д).

Расчет параметров этапов инференции (пересечения, объединения, агрегации и импликации фаззи-множеств) проводится по известным аналитическим соотношениям [1, 8]. Контроллер также реализует минимум (Mamdani)-импликацию для определения выходных фаззи-множеств для каждого из ак-

тивных правил. Представление принятых в контроллере методов обработки данных приведено в табл. 1.

Таблица 1 – Параметры исследуемого фаззи-контроллера для предупреждения аварийных ситуаций, вызванных потерей равновесия геотехнической системы

№ п/п	Параметр	Значение	Графическая интерпретация	Аналитическое выражение
1	Метод логического умножения (пересечение фаззи-множеств)	Min	Рис. 3, а	$\mu_{A_1 \cap A_2}(x) = \min\{\mu_{A_1}(x), \mu_{A_2}(x)\}$
2	Метод логического сложения (объединение фаззи-множеств)	Max	Рис. 3, б	$\mu_{A_1 \cup A_2}(x) = \max\{\mu_{A_1}(x), \mu_{A_2}(x)\}$
3	Метод агрегации	Max	Рис. 3, в	$E_i(x) = \max\{E_{1,i}(x_1), \dots, E_{m,i}(x_m)\} =$ $= \max_{k=1}^m \{E_{k,i}(x_k)\}$, при $i \in \{1, \dots, n\}$
4	Метод импликации	Min	Рис. 3, г	$\mu_{B_i^*}(c) = \min\{E_i(x), \mu_{B_i}(c)\}$
5	Метод дефаззификации	Гравитационный	Рис. 3, д	$X_S = \frac{\int c \cdot \mu(c) dc}{\int \mu(c) dc}$

Обозначения в таблице: A, A_1, A_2 – нечеткие множества; $\mu_A(x)$ – степень принадлежности величины x нечеткому множеству A ; $E_i(x)$ – степень принадлежности, с которой элементарное выражение «Если»-части каждого активного фаззи-правила является истинным, причем $i \in \{1, \dots, n\}$ – порядковый номер фаззи-правила, общим числом n , а m – общее количество элементарных выражений для одного правила; B_i – определяемое при импликации фаззи-множество для каждого i -го правила, в зависимости от степени принадлежности $E_i(x)$, с которой оно выполняется; X_S – проекция центра масс функции принадлежности выходной величины на ось абсцисс.

Лингвистические правила функционирования контроллера формулируются экспертом на основе его знаний о функционировании объекта и навыков управления объектом. Для фаззи-контроллера предупреждения аварийных ситуаций, вызванных потерей равновесного состояния геотехнической системы «крепь-породный массив», предлагаются следующие правила. Если величина «Отклонение» является большой положительной (LP) и скорость также является большой положительной (LP), то есть отклонение быстро увеличивается, необходимо приложить сильное компенсирующее отрицательное воздействие (LN):

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

В противоположном случае (если отклонение является большим отрицательным, и оно увеличивается по модулю), по аналогии следует приложить максимальное положительное корректирующее воздействие:

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

Если величина «Отклонение» является большой положительной (LP), а «Производная отклонения» является большой отрицательной (LN), то есть отклонение быстро уменьшается, необходимость во внешнем управляющем компенсирующем воздействии, по-видимому, отсутствует, поскольку система самостоятельно возвращается к точке равновесия под действием внутренних сил. Подача отрицательного корректирующего воздействия может привести к отрицательному перерегулированию (когда система «перескочит» точку равновесия), а положительная коррекция может напротив уменьшить скорость восстановления системы и замедлит ее возврат в равновесное состояние. Таким образом, можно сформулировать следующее правило:

$$\text{If } (Del \text{ is } LP) \text{ and } ((dDel / dt) \text{ is } LN) \text{ then } (Output \text{ is } Z). \quad (4)$$

Если величина «Отклонение» является положительной, и «Производная отклонения» также является величиной положительной (P), то есть отклонение возрастает, хотя и не слишком быстро, предлагается приложить отрицательное корректирующее воздействие (N):

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

В противоположном случае (при отрицательном отклонении и отрицательной скорости его изменения) следует приложить к объекту положительное воздействие (P), сгенерированное фаззи-контроллером:

$$\text{If } (Del \text{ is } N) \text{ and } ((dDel / dt) \text{ is } N) \text{ then } (Output \text{ is } P). \quad (6)$$

При некоторых условиях предлагается использовать по два правила, исполняющихся с весовыми коэффициентами 0,5. Так, если величина «Отклонение» является большой положительной (LP), а скорость является положительной (P), т.е. отклонение увеличивается, хотя и не слишком быстро, выходной сигнал контроллера вычисляется как результат композиции двух правил, формирующих большое отрицательное (LN) и отрицательное (N) значения корректирующего воздействия:

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

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

Сводная таблица сформулированных нами правил для разработанного фаззи-контроллера, приведена в табл. 2. Как видно, это матрица, нечетно симметричная относительно обратной диагонали, что в результате определило характерную симметричную форму поверхности управления, рис. 4. 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 контроллера записывается в постоянную память микропроцессорной системы. Очевидно, что характер поверхности определяется физическими свойствами контролируемого объекта, математическое описание которого хотя и точно не определено (точная математическая модель объекта отсутствует), но воплощено экспертом в виде лингвистических правил. Если при отрицательных смещениях система находится, к примеру, в состоянии безразличного равновесия, а при положительных – в состоянии неустойчивого равновесия, то поверхность управления уже не будет иметь выраженную симметричную форму.

Таблица 2 – Лингвистические правила, использованные в разработанном фаззи-контроллере

Входные координаты и диапазоны разбиения		Входная величина «Отклонение» (Del)				
		LN	N	Z	P	LP
Входная величина «Производная отклонения» (dDel/dt)	LN	LP	0,5 LP 0,5 P	P	0,5 P 0,5 Z	Z
	N	0,5 LP 0,5 P	P	0,5 P 0,5 Z	Z	0,5 Z 0,5 N
	Z	P	0,5 P 0,5 Z	Z	0,5 Z 0,5 N	N
	P	0,5 P 0,5 Z	Z	0,5 Z 0,5 N	N	0,5 N 0,5 LN
	LP	Z	0,5 Z 0,5 N	N	0,5 N 0,5 LN	LN

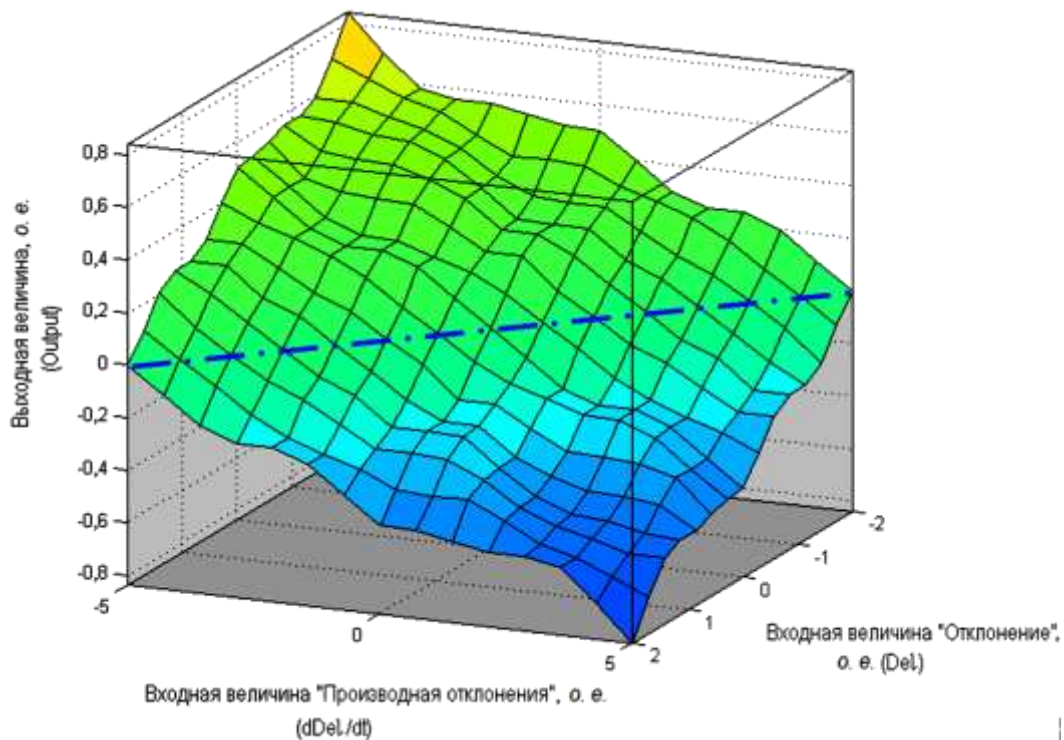


Рисунок 4 – Поверхность управления фаззи-контроллера (штрих-пунктирной линией обозначена ось симметрии, соответствующая обратной диагонали матрицы правил, с нулевым значением выходного сигнала)

Для проверки эффективности использованных решений в программной оболочке Simulink матричной лаборатории Matlab разработана программная модель предложенной системы и выполнено моделирование ее работы с решением задачи Коши методом Рунге-Кутты 4-го порядка. На рис. 5 показан один из моментов функционирования контроллера при значениях входных координат $Del = 0,485$ о.е. и $dDel/dt = 1,410$ о.е., при этом входная величина «Отклонение» принадлежит нечетким множествам «Zero» (Z) с коэффициентом принадлежности 0,515 и «Large Positive» (LP) – с коэффициентом 0,485, а входная величина «Производная отклонения» принадлежит множествам «Zero» с коэффициентом 0,436 и «Large Positive» – с коэффициентом 0,564, (сумма коэффициентов принадлежности по каждой из входных осей равна единице). Значение выходной величины $Out = -0,262$ определяется дефаззификацией гравитационным методом как проекция на ось абсцисс точки, соответствующей центру тяжести плоской фигуры, образованной выходными нечеткими множествами и ограниченной снизу осью абсцисс, а сверху – графиками функций принадлежности и параллельными горизонтальной оси линиями, отмечающими уровни принадлежности по тому или иному интервалу. В данном случае в формировании этой фигуры были задействованы выходные множества «Zero» (Z) и «Large Negative» (LN).

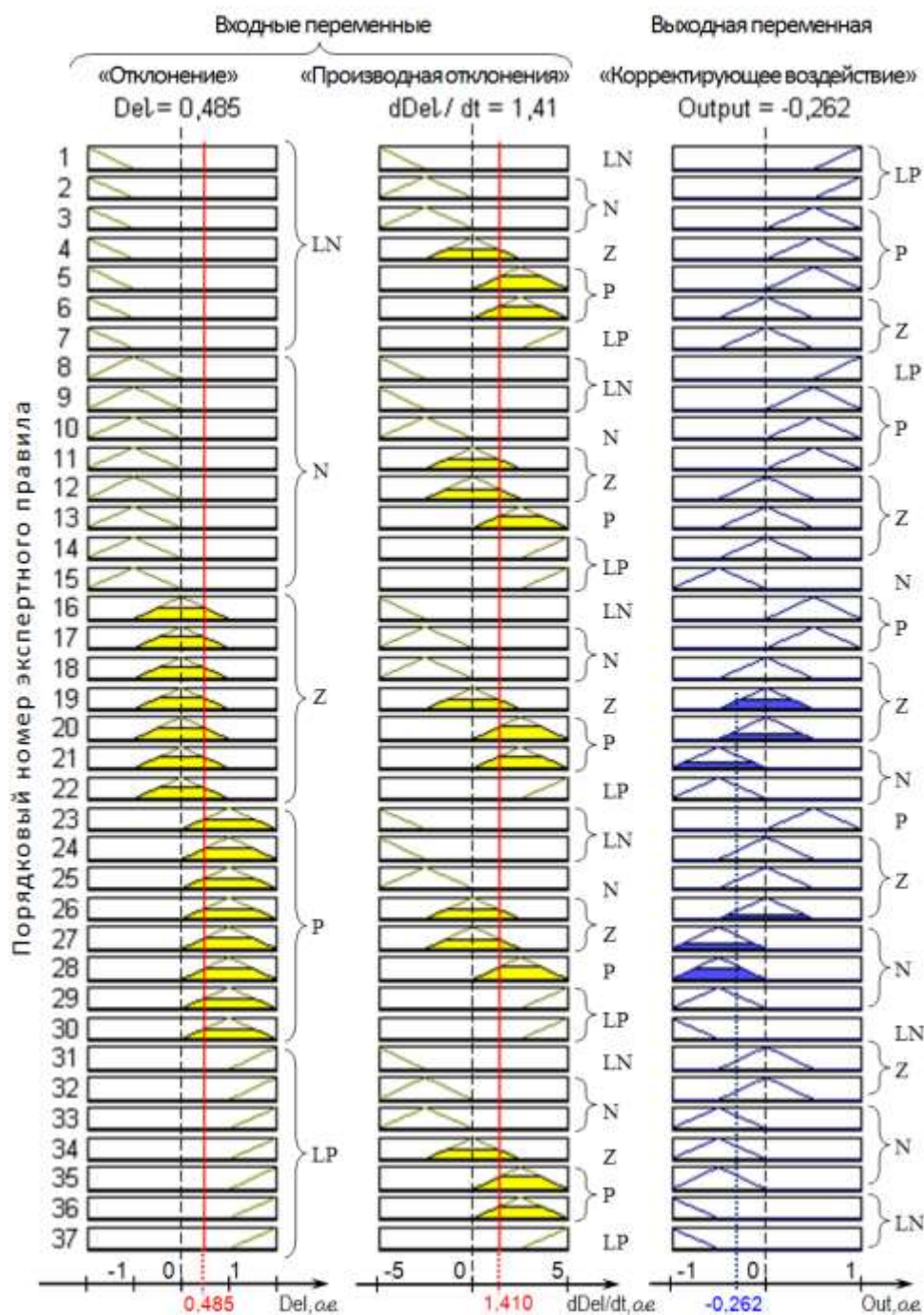


Рисунок 5 – Иллюстрация функционирования фаззи-контроллера при определенных значениях входных сигналов

Объект управления был представлен аperiodическим и колебательным звеньями с различными значениями коэффициентов пропорциональной части и постоянных времени в слагаемых, содержащих в качестве множителя оператор Лапласа. Во всех случаях применение фаззи-контроллера в качестве параллельного корректирующего регулятора улучшило качество управления: в частности, уменьшилось перерегулирование при запуске системы и при ударном набросе нагрузки, улучшилась статическая устойчивость системы, что, в свою очередь, уменьшает вероятность аварии, вызванной внезапной потерей устойчивости объекта управления.

Так, при начальном запуске системы с величиной сигнала задания 1 о.е. («А» на рис. 6), полученное соотношение максимальных амплитуд с фаззи-контроллером («Б») и без него, с использованием только стандартного управляющего устройства («В»), показывает уменьшение величины перерегулирования (превышения максимальной амплитуды над величиной задания) на $\approx 11\%$ от уровня задающего сигнала. Время колебательного переходного процесса («Т₀») при этом не изменяется, что в данном случае нельзя назвать отрицательным результатом вследствие ускорения переходного процесса форсированием системы, что приводит к увеличению динамических нагрузок и целесообразно (и допустимо), например, в станочном оборудовании, робототехнике, и др. системах, для которых быстроедействие является одним из ключевых предъявляемых требований, но не допустимо в геотехнических и, особенно, в геомеханических системах, для которых потеря устойчивости в результате роста динамических нагрузок может привести не только к поломкам и разрушению самой системы, но и к человеческим жертвам.

Аналогичные результаты получаем при ударном приложении нагрузки (графики получены при набросе нагрузки, равной половине от величины задания, рис. 6): использование фаззи-контроллера в качестве корректирующего устройства позволило уменьшить перерегулирование на $\approx 28\%$ («Д» – амплитуда импульса выходной регулируемой величины с фаззи-контроллером, «Е» – без него). Время переходного процесса («Т₁») не изменилось.

Астатизм системы управления (свойство системы приводить ошибку регулирования к нулю при постоянном внешнем воздействии), определяемый отклонением выходной величины от величины задания, улучшился, что практически не сказывается при работе системы без нагрузки («Г»), однако под нагрузкой величина рассогласования с применением фаззи-контроллера («Ж») уменьшается на $\approx 22\%$ по сравнению с рассогласованием, возникающим без корректирующего устройства («З»).

На рис. 6, б видно, что выходной сигнал фаззи-регулятора, во-первых, в некоторые моменты времени имеет знак, противоположный выходному сигналу традиционной системы управления, и таким образом компенсирует ее избыточное воздействие на объект, а во-вторых изменяется с большей частотой, чем выходной сигнал классического регулятора, благодаря чему время запаздывания реакции управляющей системы на внешние воздействия и изменения нагрузки уменьшается. Это стало возможным благодаря учету не просто уровня отклонения выходной величины от заданной, а контролю скорости изменения этого отклонения (см. рис. 6, а), в том числе и тогда, когда абсолютная величина самого отклонения по модулю незначительна или равна нулю и не является признаком предаварийной ситуации или признаком начала процесса потери устойчивости).

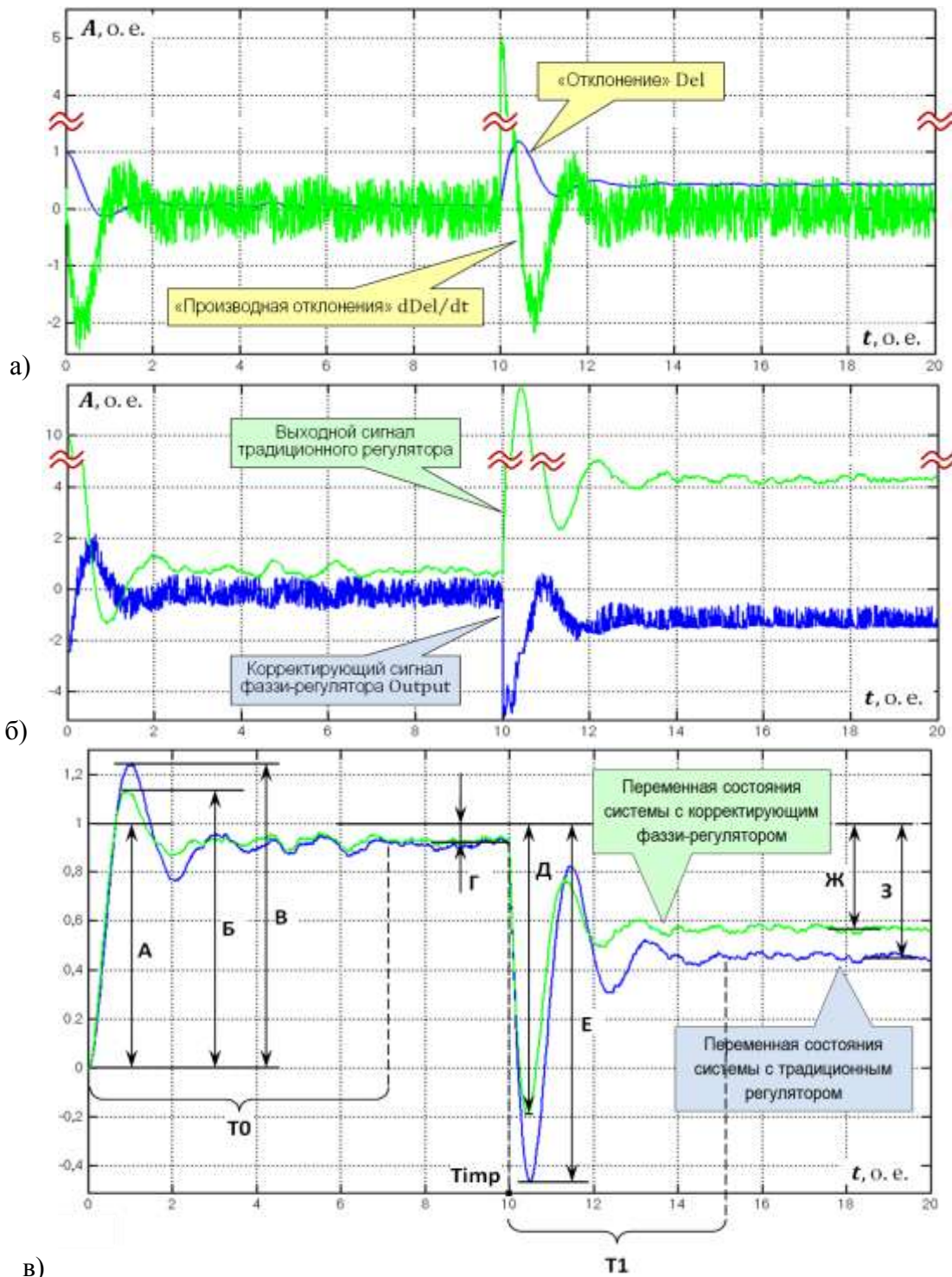


Рисунок 6 – Результаты моделирования работы системы: входные переменные (а) и выходные сигналы (б) фаззи-контроллера, переменная состояния системы (в).

Следует отметить, что в ряде случаев может отсутствовать техническая возможность реализовать некоторые сигналы управления, генерируемые разработанным фаззи-контроллером. Например, для противодействия горному давлению используют инженерные мероприятия и технические средства дискретного характера, в частности, арочные и анкерные крепи, органые крепи, деревянные и металлические стойки, тумбы и другие средства крепления. В то же вре-

мя фаззи-контроллер генерирует аналоговый сигнал. В этом случае выходной сигнал фаззи-контроллера используется как информационный, и служит для критериальной оценки степени опасности геотехнической системы и предупреждения возможной аварийной ситуации.

Таким образом, для предупреждения аварийных ситуаций, обусловленных геомеханическими факторами, в геотехнической системе предложен и апробирован фаззи-контроллер, который обеспечивает на базе методов и алгоритмов нечеткой логики анализ данных мониторинга напряженно-деформированного состояния горных пород и устойчивости подземных выработок. Закон управления может быть реализован как программно-техническими средствами, если система настроена на выработку и передачу сигналов опасности, так и на инициализацию создания руководящих инструкций, регламентирующих выполнение технических мероприятий, что, в конечном итоге, обеспечивает эффективность прогнозирования опасных ситуаций, восстановление работоспособности геотехнической системы и безопасность труда.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zadeh, L.A. et al. (1996), *Fuzzy Sets, Fuzzy Logic, Fuzzy Systems*, World Scientific Press, London, UK, ISBN 981-02-2421-4.
2. Zadeh, Lotfi Asker (1996), *Fuzzy Sets, Fuzzy Logic, and Fuzzy Systems: Selected Papers by Lofti A. Zadeh (Advances in Fuzzy Systems - Applications & Theory)*, in George J. Klir & Bo Yuan. (ed.), World Scientific Publishing Co Pte Ltd, London, UK.
3. Robert, V.Demicco (ed.) and George, J.Klir (ed.) (2003), *Fuzzy Logic in Geology 1st Edition*, Academic Press, London, UK, ISBN 9780080521893.
4. Montagna, F. (2001), "Three complexity problems in quantified fuzzy logic", *Studia Logica*, vol. 68, pp. 143-152.
5. Fermüller, C.G. (2003), "Theories of vagueness versus fuzzy logic: can logicians learn from philosophers?", *Neural Network World*, vol. 13, pp. 455-465.
6. Шевченко, В.Г. Разработка схем и алгоритма функционирования информационного комплекса управления персоналом на урановых шахтах / В.Г. Шевченко, А.И. Слащев // Геотехническая механика. – Днепропетровск : ИГТМ НАНУ, 2014. – Вып. 117. – С. 128-140.
7. Слащев, А.И. Разработка мобильной технологии управления персоналом на предприятиях горного профиля / А.И. Слащев // Геотехническая механика. – Днепропетровск, 2011. – Вып. 95. – С. 142-149.
8. Калашніков, В.І. Основи теорії фази-логіки та фази-регулювання / В.І. Калашніков, Ф. Паліс, О.Ю. Лозинський. – Донецьк, Магдебург, Львів. – 2000. – 69 с.

REFERENCES

1. Zadeh, L.A. et al. (1996), *Fuzzy Sets, Fuzzy Logic, Fuzzy Systems*, World Scientific Press, London, UK, ISBN 981-02-2421-4.
2. Zadeh, Lotfi Asker (1996), *Fuzzy Sets, Fuzzy Logic, and Fuzzy Systems: Selected Papers by Lofti A. Zadeh (Advances in Fuzzy Systems - Applications & Theory)*, in George J. Klir & Bo Yuan. (ed.), World Scientific Publishing Co Pte Ltd, London, UK.
3. Robert, V.Demicco (ed.) and George, J.Klir (ed.) (2003), *Fuzzy Logic in Geology 1st Edition*, Academic Press, London, UK, ISBN 9780080521893.
4. Montagna, F. (2001), "Three complexity problems in quantified fuzzy logic", *Studia Logica*, vol. 68, pp. 143-152.
5. Fermüller, C.G. (2003), "Theories of vagueness versus fuzzy logic: can logicians learn from philosophers?", *Neural Network World*, vol. 13, pp. 455-465.
6. Shevchenko, V.G. and Slashchov, A.I. (2014), "Development of schemes and algorithms of functioning information complex personnel management for uranium mines", *Geotekhnicheskaya Mekhanika [Geo-Technical Mechanics]*, no. 117, pp. 128-140, UA.
7. Slashchov, A.I. (2011), "Development of mobile technology for personnel management at enterprises

in the mining”, *Geotekhnicheskaya Mekhanika* [Geo-Technical Mechanics], no. 95, pp. 142-149, UA.

8. Kalashnikov, V.I. Palis, F. and Lozynskyy, O.YU. (2000), “Osnovy teoriiy fazy-lohiky ta fazy-rehulyuvannya”, Donetsk : Magdeburg : Lviv, UA.

Об авторе

Слащев Антон Игоревич, магистр, аспирант, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАН Украины), Днепропетровск, Украина, SlashovAnton@ya.ru

About the author

Slashchov Anton Igorevich, Master of Science, Doctoral Student, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Science of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepropetrovsk, Ukraine, SlashovAnton@ya.ru

Анотація. У статті представлені результати досліджень по розробці інтелектуальних алгоритмів на основі нечіткої логіки для інформаційної системи забезпечення безпеки підземних гірничих робіт з урахуванням комплексної оцінки, оперативного прогнозування і ймовірних сценаріїв розвитку геомеханічних процесів.

Для попередження аварійних ситуацій, викликаних втратою рівноваги геотехнічної системи в обстановці невизначеності поведінки породного масиву, був розроблений фази-контролер, який формує додатковий керуючий сигнал. Для фази-контролера обґрунтовані методи фазифікації, інференції і дефазифікації даних, вироблені лінгвістичні правила управління параметрами геотехнічної системи. У Matlab розроблена програмна модель запропонованої системи і виконано моделювання її роботи з рішенням задачі Коші методом Рунге-Кутта 4-го порядку. Моделювання показало працездатність і статичну стійкість розроблених алгоритмів. Вихідний сигнал фази-контролера може бути використаний як інформаційний для оцінки ступеня небезпеки геотехнічної системи і попередження можливих аварійних ситуацій, що забезпечить підвищення безпеки праці на гірничих підприємствах.

Ключові слова: Геотехнічна система, геомеханічні процеси, безпека праці, інформаційні технології, інтелектуальні алгоритми, нечітка логіка.

Abstract. The article presents results of study of intelligent fuzzy logic algorithms developed on the basis of fuzzy logic methods for information system of the mine safety system with taking into account total assessment, operational forecasting and possible scenarios of geomechanical development.

In order to prevent emergency situations caused by the lost geotechnical system stability due to the uncertain behavior of the rock mass, a new fuzzy controller was designed which could generate an additional control signal. For the fuzzy controller, methods of data fuzziness, inference and defuzziness were validate, and linguistic rules were designed in order to control parameters of the geotechnical system. With the help of the Cauchy problem solved by Runge-Kutta method of the 4th order, the Matlab designed a software model of the proposed system which simulated the system operation. The model has proved operability and static stability of the developed algorithms. Output signal of the fuzzy controller can be used as information for estimating risk for geotechnical systems, preventing possible emergency situations and, consequently, can improve job safety in the mines.

Keywords: geotechnical system, geomechanical processes, job safety, information technology, intelligent algorithms, fuzzy logic.

Статья поступила в редакцию 05.06.2015

Рекомендовано к печати д-ром техн. наук В.Г. Шевченко