

их функционирования, чем обеспечивается универсальность алгоритмов расчета.

1. Меренков А.П., Хасилев В.Я. Теория гидравлических цепей. – М.: Наука, 1985. – 280 с.
2. Некрасов Б.Б. Гидравлика и ее применение на летательных аппаратах. – М.: Машиностроение, 1967. – 352 с.
3. Идельчик И.Е. Гидравлические сопротивления. – М.: Машиностроение, 1975. – 559 с.
4. Кондращенко В. Я., Винничук С. Д., Федоров М.Ю. Моделирование газовых и жидкостных распределительных систем - Киев: Наукова думка, 1990 - 184 с.
5. Винничук С. Д. Методы и алгоритмы решения задач анализа, проектирования и управления распределением потоков в гидравлических распределительных системах. Дисс... д-ра техн. наук: 01.05.02. – Ин-т проблем моделирования в энергетике АН Украины, Киев, 2006. – 315 с.
6. Абрамович Н.Г. Прикладная газовая динамика. – М.: Наука, 1969. – 824 с.
7. Винничук С. Д. Особенности формирования уравнений второго закона Кирхгофа для задач расчета потокораспределения в распределительных системах сжимаемой жидкости. // Электронное моделирование - т.30, №6 – 2008. С. 49-58

*Поступила 13.10.2016р.*

УДК 004.032.26

Е.Е. Федоров, Ю.Л. Дикова, г. Покровск

## **МУЛЬТИАГЕНТНАЯ СИСТЕМА ПРОГНОЗА СОСТОЯНИЯ РУДНИЧНОЙ АТМОСФЕРЫ**

**Abstract** .The article is considered a centralized multi-agent system prediction of mine atmosphere, consisting of a main agent and a set of subordinate agents, the interaction between them is based on the FIPA-Subscribe Protocol. The basis of the main agent is an ANN of high order, the basis of subordinate agents is ANN NARMA. The proposed approach to the construction of multi-agent systems will increase the accuracy of the forecast of the mine atmosphere characteristic values by 10%, and the probability of the mine atmosphere condition forecast by 7%.

**Постановка проблемы.** В настоящее время одной из важнейших проблем, существующих в горной промышленности, является повышение производственной безопасности. Современные компьютерные системы аэрогазового контроля [1 – 2], используемые на шахтах, не предусматривают возможность прогноза содержания взрывоопасных газов. Это приводит к тому, что мероприятия, направленные на недопущение аварий или снижение их последствий, могут быть проведены слишком поздно. Поэтому разработка способов прогноза содержания взрывоопасных газов в горных выработках,

используемых для повышения качества оценки аэрогазовой ситуации, является актуальной.

**Анализ исследований.** На сегодняшний день в качестве инструмента для прогноза широко применяются следующие методы: регрессионные и авторегрессионные методы прогнозирования; методы, основанные на экспоненциальном сглаживании; методы на базе цепей Маркова; на базе классификационно-регрессионных деревьев; искусственные нейронные сети (ИНС). В работе [3] приведена сравнительная характеристика перечисленных способов. Поскольку использование ИНС [4-6] при прогнозировании дает ощутимое преимущество, которое заключается в том, что: взаимосвязи между факторами исследуются на готовых моделях; не требуются никакие предположения относительно распределения факторов; априорная информация о факторах может отсутствовать; исходные данные могут сильно коррелировать, быть неполными или зашумленными; возможен анализ систем с высокой степенью не линейности; быстрая разработка модели; высокая адаптивность; возможен анализ систем с большим количеством факторов; не требуется полный перебор всех возможных моделей; возможен анализ систем с неоднородными факторами, в статье будет использоваться нейросетевой способ прогноза.

Архитектурно-структурная организация программной компоненты на основе мультиагентной системы [7-10] обеспечивает параллелизм обработки информации. Таким образом, использование мультиагентной системы позволяет повысить скорость прогноза состояния рудничной атмосферы за счет распараллеливания процессов прогноза значений ее характеристик.

**Постановка задачи исследования.** Целью работы является разработка мультиагентной системы прогноза состояния рудничной атмосферы. Для достижения цели были поставлены и решены следующие задачи:

- определить структуру мультиагентной системы и поведение ее агентов;

- определить структуру ИНС прогноза для каждого агента;

- выбрать критерий оценки качества ИНС прогноза;

- обучить ИНС прогноза для каждого агента;

- выполнить численные исследования.

**Результаты разработки и исследований.** В статье предлагается централизованная мультиагентная система прогноза состояния рудничной атмосферы, состоящая из главного агента  $A$  и набора подчиненных независимых друг от друга агентов  $A_i$ . Взаимодействие между главным и подчиненными агентами осуществляется на основе протокола FIPA-Subscribe. Каждый подчиненный агент  $A_i$  прогнозирует значение одного из 21 следующих признаков (характеристик) рудничной атмосферы: давление, температура, скорость движения и влагосодержание атмосферного воздуха, концентрация в атмосферном воздухе метана ( $CH_4$ ), этана ( $C_2H_6$ ),

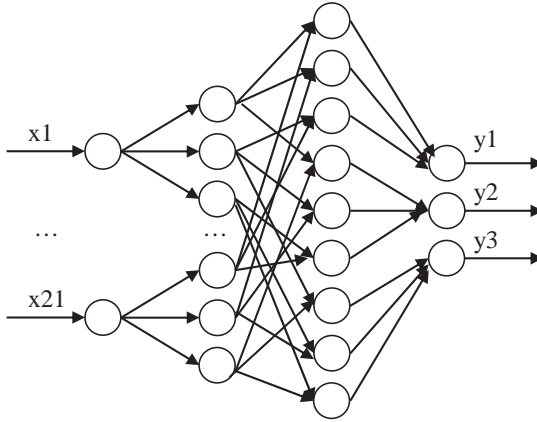
пропана (C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>), бутана (C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>), этилена (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>), ацетилена (C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>), водорода (H<sub>2</sub>), сероводорода (H<sub>2</sub>S), оксида углерода (CO), диоксида углерода (CO<sub>2</sub>), оксида азота (NO), диоксида азота (NO<sub>2</sub>), тетраоксида диазота (N<sub>2</sub>O<sub>4</sub>), пентаоксида диазота (N<sub>2</sub>O<sub>5</sub>), диоксида серы (SO<sub>2</sub>), кислорода (O<sub>2</sub>), пыли.

БД главного агента  $A$  хранит вектор последних спрогнозированных состояний рудничной атмосферы. БЗ главного агента  $A$  хранит набор ассоциативных правил ИНС. БД каждого подчиненного агента  $A_i$  хранит вектор последних измеренных значений  $i$ -го признака и соответствующий ему вектор последних спрогнозированных значений  $i$ -го признака. БЗ каждого подчиненного агента  $A_i$  хранит набор ассоциативных правил для  $i$ -й ИНС.

Алгоритм работы главного агента  $A$  заключается в следующем: агент  $A$  запускает всех подчиненных агентов  $A_i$ , затем посылает им запрос о подписке на получение спрогнозированных значений признаков и ожидает от каждого подчиненного агента ответ-подтверждение. Далее главный агент сообщает оператору результат ответов. В случае успешного подтверждения главный агент производит сбор прогнозируемых значений признаков  $y_i(n+1)$  от подчиненных агентов и выполняет прогноз состояния рудничной атмосферы  $z(n+1) = F(y_1(n+1), \dots, y_{21}(n+1))$ , используя предложенную в работе ИНС. Конечный результат прогноза  $z(n+1)$  агент  $A$  отправляет оператору.

Алгоритм работы каждого подчиненного агента  $A_i$  заключается в следующем: агент  $A_i$  ожидает, пока не получит запрос на подписку от главного агента и посылает в ответ согласие на подписку. Далее агент  $A_i$  ожидает заданный шаг квантования по времени  $\Delta t$  и с помощью соответствующего датчика получает измеренное значение признака  $u_i(n)$ . Если модуль разности между измеренным значением признака  $u_i(n)$  и спрогнозированным ранее значением признака  $y_i(n)$  превышает заданный порог, то агент  $A_i$  сообщает главному агенту  $A$  о сбое в подписке. В случае корректной работы агент  $A_i$  выполняет прогноз значения признака  $y_i(n+1) = F_i(u_i(n), \dots, u_i(n-M), y_i(n), \dots, y_i(n-M))$ , используя  $i$ -ю ИНС. Спрогнозированное значение признака  $y_i(n+1)$  посылается главному агенту.

Поскольку в основе работы главного агента лежит комплексный прогноз состояния рудничной атмосферы, было принято решение использовать авторскую ИНС высоких порядков, структурная схема которой приведена на рис 1.



слой 0    слой 1    слой 2    слой 3  
 Рис. 1. ИНС высоких порядков главного агента

Модель данной ИНС представлена в виде:

$$y_j^{(1)} = \begin{cases} \frac{1}{1 + \exp(b_{1j} - a_{1ij} x_i)} & j = (i-1)N^{(3)} + 1 \\ \frac{1}{1 + \exp(b_{2j} - a_{2ij} x_i)} + \frac{1}{1 + \exp(d_{2j} - c_{2ij} x_i)} & j = (i-1)N^{(3)} + 2, \\ \frac{1}{1 + \exp(b_{3j} - a_{3ij} x_i)} & j = (i-1)N^{(3)} + 3 \end{cases}$$

где  $j \in 1, N^{(1)}$ ,  $i \in 1, N^{(0)}$ .

$$y_j^{(2)} = f^{(2)}(s_j^{(2)}) = s_j^{(2)}, j \in 1, N^{(2)},$$

$$s_j^{(2)} = b_j^{(2)} + \sum_{i_1=1}^{N^{(1)}} \dots \sum_{i_{N^{(0)}}=1}^{N^{(1)}} w_{i_1 \dots i_{N^{(0)}} j} y_{i_1}^{(1)} * \dots * y_{i_{N^{(0)}}}^{(1)},$$

$$y_j^{(3)} = f^{(3)}(s_j^{(3)}) = s_j^{(3)}, j \in 1, N^{(3)},$$

$$s_j^{(3)} = b_j^{(3)} + \sum_{i_1=1}^{N^{(2)}} w_{i_1 j}^{(3)} y_{i_1}^{(2)} + \sum_{i_1=1}^{N^{(2)}} \dots \sum_{i_k=1}^{N^{(2)}} w_{i_1 \dots i_k j}^{(3)} y_{i_1}^{(2)} * \dots * y_{i_k}^{(2)} + \dots$$

$$\dots + \sum_{i_1=1}^{N^{(2)}} \dots \sum_{i_{N^{(2)}}=1}^{N^{(2)}} w_{i_1 \dots i_{N^{(2)}} j}^{(3)} y_{i_1}^{(2)} * \dots * y_{i_{N^{(2)}}}^{(2)}.$$

где  $w_{ij}^{(m)}$  - весовые коэффициенты в слое  $m$ ,  $m = 1, 2, 3$ ;

$c_{pij}$ ,  $a_{pij}$  - весовые коэффициенты ИНС для определения значения функции активации  $y_j^{(1)}$  в первом слое;

$d_{2j}$ ,  $d_{2j}$  - пороги смещения ИНС для определения значения функции активации  $y_j^{(1)}$  в первом слое.

Для работы подчиненных агентов была выбрана ИНС NARMA [4], поскольку она дает более точный прогноз по сравнению с остальными ИНС [5]. Модель данной сети представлена в виде:

$$y_j^{(1)}(n) = f^{(1)}(s_j^{(1)}(n)), \quad j \in 1, N^{(1)},$$

$$s_j^{(1)}(n) = b^{(1)} + \sum_{l=1}^{M^{(0)}} w_{ij}^{(1)} y_i^{(0)}(n-l) +$$

$$+ \sum_{l=M^{(0)}+1}^{M^{(0)}+M^{(2)}} w_{ij}^{(1)} (y_i^{(0)}(n-(l-M^{(0)})) - y_i^{(2)}(n-(l-M^{(0)}))).$$

$$y^{(2)}(n) = f^{(2)}(b^{(2)} + \sum_{i=1}^{N^{(1)}} w_i^{(2)} y_i^{(1)}(n)).$$

Для оценки качества прогноза ИНС высоких порядков выбран критерий адекватности модели, который означает выбор таких значений параметров  $w_i^{(2)}$ ,  $w_i^{(3)}$ ,  $a_{ij}$ ,  $b_{ij}$ ,  $c_{ij}$ ,  $d_{ij}$ , которые дают минимум среднеквадратичной ошибки (разности выхода по модели и желаемого выхода):

$$F = \frac{1}{P} \sum_{p=1}^P (y_p - d_p)^2 \rightarrow \min_{w_i^{(2)}, w_i^{(3)}, b_{ij}, a_{ij}, c_{ij}, d_{ij}}, \quad (3)$$

где  $P$  - количество тестовых реализаций;  $y_p$  - прогноз, полученный по модели;  $d_p$  - желаемый прогноз.

Аналогичный критерий был выбран для оценки качества прогноза ИНС NARMA.

### Численные исследования.

Для оценки точности прогноза ИНС NARMA были проведены эксперименты, для которых в качестве исходных данных была взята выборка показаний датчика метана объемом в 1000 значений, снятых с интервалом в 10 секунд. Для сравнения точности прогноза, полученного ИНС NARMA,

аналогичные эксперименты были проведены с использованием ИНС ARMA и Вольтерри. Результат прогноза приведен на рис. 2.

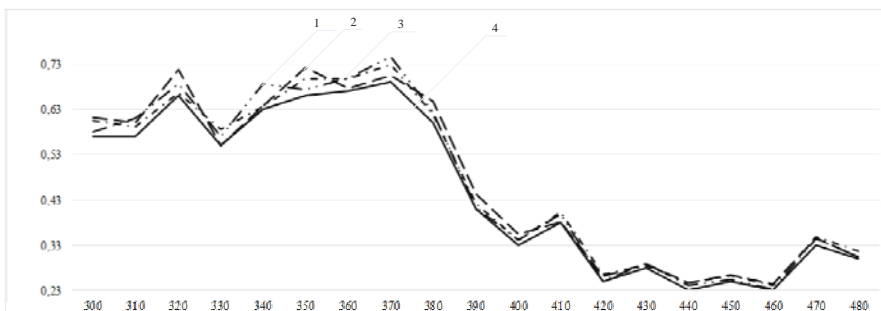


Рис. 2 – Результаты экспериментов для 1 – ИНС Вольтерри, 2 – ИНС ARMA, 3 – ИНС NARMA, 4- исходные данные.

Из рисунка 2 видно, что выбранная ИНС NARMA дает прогноз с погрешностью 7%, ARMA – 10% и Вольтерри – 9%.

Для обучения ИНС главного агента использовались метаэвристики [5-6], а для обучения ИНС подчиненных агентов использовался алгоритм обратного распространения ошибки (BackPropogation) с учителем.

Результаты обучения представлены в табл. 1.

Предложенная мультиагентная система была реализована в программной среде JADE.

**Выводы.** Предложенная мультиагентная система прогноза состояния рудничной атмосферы обладает следующими достоинствами:

- упрощено разделение задач между подчиненными агентами;
- подчиненные агенты для решения своих задач обладают необходимой информацией о текущем состоянии рудничной атмосферы;
- подчиненные агенты не мешают друг другу во время решения своих задач;
- подчиненным агентам не нужно явно общаться между собой во время решения своих задач;
- подчиненные агенты не дублируют действия друг друга.

На основе численного исследования структуры ИНС NARMA, используемой для прогноза значений признаков подчиненными агентами, были выбраны функции активации, определено количество нейронов в скрытом слое и величина задержки, что позволило ускорить процедуру обучения.

Предложенная ИНС высоких порядков, используемая для прогноза состояния главным агентом, обладает следующими достоинствами:

– возможность использования в одном слое разных функций активации, что позволяет учесть особенности признаков (характеристик) рудничной атмосферы;

– отсутствие необходимости определения количества скрытых слоев и количества нейронов в этих слоях, что упрощает адаптацию структуры ИНС;

– универсальность и расширяемость для любого необходимого количества признаков (характеристик) рудничной атмосферы.

Адаптация параметров предложенных ИНС выполнялась с помощью комбинации локального и случайного поиска, вероятность выполнения которых зависела от номера итерации. Это позволило увеличить точность прогноза значений признаков (характеристик) рудничной атмосферы на 10%, а вероятность прогноза состояния рудничной атмосферы на 7%.

Предложенный подход к построению мультиагентных систем может быть использован для компьютерных систем прогноза общего и специального назначения.

1. Федоров Е.Е. Разработка способа комплексного контроля концентрации вредных газов / Е.Е.Федоров, Ю.Л. Дикова // Известия донецкого горного института, 2015. – №1. с. 30-34.
2. Айруни А. Прогнозирование и предотвращение газодинамических явлений в угольных шахтах / А. Айруни. – М., Наука, 1987. – 310 с.
3. Чучуева И.А. Модель прогнозирования временных рядов по выборке максимального подобию: дис. ... кандидата технических наук: 05.13.18 – математическое моделирование, численные методы и комплексы программ / Чучуева Ирина Александровна. – Москва, 2012. – 153 с.
4. Haykin S. Neural networks / S. Haykin. – NY: Pearson Education, 1999. – p.823.
5. Осовский С. Нейронные сети для обработки информации / С. Осовский. – Пер. с польского И.Д. Рудинского. - М.: Финансы и статистика – 2002. – 344 с.
6. Скобцов Ю.А. Метаэвристики: монография / Ю.А. Скобцов, Е.Е. Федоров. – Донецк: Ноулидж, 2013. – 426 с.
7. Городецкий В.И. Многоагентные системы (обзор) / В.И. Городецкий, М.С. Грушинский, А.В. Хабалов // Новости искусственного интеллекта. – 1997. – № 1. – С. 12-47.
8. Bellifemine F. Developing multi-agent systems with JADE / F. Bellifemine, G. Caire, D. Greenwood. – Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2007. –286 p.
9. Wooldridge M. An Introduction to MultiAgent Systems / M. Wooldridge. – Chichester: John Wiley & Sons, Inc., 2002. – 348 p.
10. Федоров Е.Е. Методология создания мультиагентной системы речевого управления: монография / Е.Е. Федоров. – Донецк: изд-во «Ноулидж», 2011. – 356 с.

*Поступила 20.10.2016р.*