

# НЕЙРОМЕРЕЖЕВЕ УПРАВЛІННЯ ДІЛЬНИЦЕЮ ШАХТНОЇ ВЕНТИЛЯЦІЙНОЇ МЕРЕЖІ

Турченко І.В., Кочан В.В., Саченко А.О.

Науково-дослідний інститут інтелектуальних комп'ютерних систем  
Тернопільський національний економічний університет  
пл. Перемоги, 3, 46004, Тернопіль, Україна  
e-mail: {itu, vk, as}@tanet.edu.te.ua

## **Abstract**

*Turchenko I.V., Kochan V.V., Sachenko A.O. Neural-based Control of Section of Mine Ventilation Network. A simulation model of a section of mine ventilation network is adapted for modelling sequential neural-based control scheme of mine airflow. The techniques of appropriate training set of neural network, its structure and training algorithm are described. The results of simulation modelling of this approach are presented.*

## **1. Вступ**

Проблема контролю допустимої концентрації небезпечних газів, таких як метан  $CH_4$  та чадний газ  $CO$ , є надзвичайно актуальною в гірничодобувних шахтах. Гірничодобувна промисловість є найбільш небезпечною галуззю в будь-якій країні. Наприклад, статистичний аналіз показав [1], що для найбільших країн, які добувають вугілля, в 2001 році кількість нещасних випадків на мільйон тон добутого вугілля складає 6.63 для Китаю, 0.83 для Росії, 0.48 для Індії та 0.02 для Австралії. Тому розробка автоматизованих систем управління (АСУ) аеро-газовою атмосферою шахти все ще залишається актуальною задачею. При цьому доцільно забезпечити адаптивне управління [2] процесом провітрювання для економічно вигідної та швидкої реакції системи в усіх можливих ситуаціях.

Доцільність застосування методів адаптивного управління зумовлена стохастичним характером аерогазових процесів у шахтних вентиляційних мережах (ШВМ), зміною топології ШВМ, значною розподіленістю системи управління та великим числом сенсорів вимірювальної підсистеми [3]. Аерогазодинамічні процеси ШВМ як правило розглядаються як об'єкти з розподіленими параметрами, в яких динаміка зміни розходу повітря описується системою диференціальних рівнянь в часткових похідних [4-5]. Рішення такої системи рівнянь для реальних об'єктів вимагає участі висококваліфікованого фахівця і значних обчислювальних ресурсів.

Особливістю використання адаптивних методів управління є можливість забезпечення кращого управління при зменшенні складності математичного опису процесу управління [2, 6]. Як правило при адаптивному управлінні математична модель об'єкту управління описує його фізичну природу. На основі математичної моделі визначається закон управління, спрямований на досягнення певної цілі управління і тому математична модель розглядається як аналог реальної системи.

Аналіз відомих теоретичних та інженерних підходів до управління складними об'єктами показав [7], що найбільш доцільною на сьогодні є технологія „інтелектуального” управління, де АСУ наслідує інтелектуальні функції людини при управлінні певним об'єктом, тобто має здатність до імітації мислення та навчання по відношенню до об'єкту управління, впливу навколишнього середовища та умов свого функціонування. З інженерної точки зору інтелектуальне управління повинно мати наступні властивості: здатність до навчання та адаптивність, живучість, простий алгоритм керування, дружній по відношенню до користувача людино-машинний інтерфейс, здатність до включення нових компонентів, що забезпечують кращі рішення в умовах обмежень, що накладаються технічними засобами. Найкраще цим умовам відповідають нейромеревеві методи управління завдяки властивостям адаптації та узагальнення [6].

Метою даної статті є оцінка застосування нейромережевого методу управління розходом повітря на дільниці ШВМ на основі її імітаційної моделі.

## **2. Імітаційна модель дільниці ШВМ**

Для побудови імітаційної моделі ШВМ у динамічному режимі доцільно розглянути одну із найбільш розповсюджених схем провітрювання видобувної дільниці [4] з трьохстороннім приляганням виробленого простору (з прямим ходом видобутку) до відкатного штреку, лави та вентиляційного штреку (рис. 1).

Видобувна дільниця як об'єкт керування в цілому описується диференціальним рівнянням [4] перехідного аеродинамічного процесу формування потоку повітря  $Q$  на вході відкатного штреку під дією депресії  $H$ , що створюється вентиляторами головного провітрювання та аеродинамічними опорами власне дільниці  $R$  та заслінки  $RR$ , яка регулює відтік повітря з вентиляційного штреку (див. рис. 1)

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{1}{k} (H - R \cdot Q \cdot |Q| - RR \cdot Q \cdot |Q|), \quad (1)$$

де  $k = \frac{\rho \cdot l}{S}$  - коефіцієнт інерційності, який в свою чергу визначається густиною повітря  $\rho$ , довжиною дільниці  $l$  та еквівалентним перерізом дільниці  $S$ .

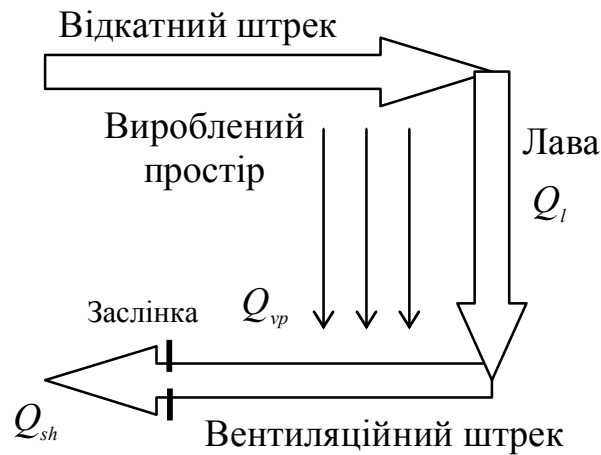


Рис. 1. Схема провітрювання видобувної дільниці з тристороннім приляганням виробленого простору

Небезпечну концентрацію метану у атмосфері видобувної дільниці створюють дебети метану окремих компонентів дільниці: виробленого простору, лави та вентиляційного штреку. Однак процес провітрювання змінює концентрації метану в цих компонентах. Тому для створення імітаційної моделі дільниці ШВМ необхідно створити імітаційні моделі, які описують динаміку дебету та розходу метану в кожному компоненті.

Модель аерогазового середовища виробленого простору повинна описувати перехідні аеродинамічні процеси, що відбуваються в просторі, який залишається після добування вугільних пластів і, таким чином, перетворюється у фільтраційне середовище. Фільтрація повітряного потоку виникає внаслідок просторово розподіленої різниці тисків між штреками, а також присутнім нелінійним аеродинамічним опором виробленого простору. Динаміка дебету метану  $Q_m$  із виробленого простору описується моделлю [4]

$$T_m \frac{dQ_m}{dt} + Q_m = Q_{0m} + \beta \frac{dQ^2}{dt}, \quad (2)$$

де  $T_m$  - постійна часу,  $Q_{0m}$  - початковий об'єм метану у виробленому просторі,  $\beta$  - питомий аеродинамічний опір виробленого простору.

Однак залежність (2) через наявність останнього члена є незручною для побудови імітаційної моделі і тому доцільно буде проінтегрувати обидві частини і позбавитись диференціалу при  $Q^2$

$$Q_m = \frac{1}{T_m} \int (Q_{0m} - Q_m) dt + \frac{\beta}{T_m} Q^2. \quad (3)$$

Метан, що виходить з джерел у виробленому просторі, змішується з повітряними потоками, що приводить до утворення на всій довжині вентиляційного штреку притоку повітряно-метанової суміші  $Q_{vp}$  з концентрацією метану  $C_{vp}$ . Динаміка цього процесу описується диференціальним рівнянням [4]

$$\frac{dC_{vp}}{dt} = \frac{1}{V_{vp}} (Q_m - (Q_m + Q_{vp}) \cdot C_{vp}), \quad (4)$$

де  $V_{vp}$  - об'єм виробленого простору.

Лави представляє собою місце безпосереднього добування вугілля. Кут нахилу лави відповідає куту залягання пласту вугілля. Модель аерогазового середовища лави повинна враховувати нестационарність процесу насичення атмосфери лави метаном і може бути представлена наступним диференціальним рівнянням [4]

$$\frac{dC_l}{dt} = \frac{1}{V_l} (Q_{ml} - (Q_l + Q_{ml}) \cdot C_l), \quad (5)$$

де  $V_l$  - об'єм лави,  $Q_{ml}$  - об'єм метану в лаві,  $Q_l$  - об'єм повітря в лаві,  $C_l$  - концентрація метану в атмосфері лави.

Притік повітряно-метанових сумішей  $Q_{vp}$  з виробленого простору та  $Q_l + Q_{ml}$  з лави викликає у вентиляційному штреку формування результуючого потоку повітряно-метанової суміші  $Q_{sh}$  з концентрацією метану  $C_{sh}$ . Модель аерогазового середовища вентиляційного штреку може бути описана наступним диференціальним рівнянням [4]

$$\frac{dC_{sh}}{dt} = \frac{1}{V_{sh}} (Q_{md} + Q_{mld} - (Q + Q_{mld} + Q_{md}) \cdot C_{sh}), \quad (6)$$

де  $Q_{md}$  - об'єм метану, що поступає з виробленого простору,  $Q_{mld}$  - об'єм метану, що поступає з лави,  $V_{sh}$  - об'єм вентиляційного штреку.

Використаємо цю імітаційно модель для дослідження нейромережевої системи управління, описаної в наступному пункті.

### 3. Нейромережева модель управління розходом повітря

Попередній аналіз показав [6-7], що послідовна схема нейромережевого управління (рис. 2) може забезпечити достатню ефективність через відсутність додаткових ланок управління, таких як додаткові контролери. В режимі навчання нейронної мережі (НМ) на її вхід подається навчальна вибірка, яка складається з ряду кривих, що описують динаміку аерогазового середовища видобувної дільниці. Ці криві отримано шляхом виконання імітаційної моделі (1)-(6) в середовищі MATLAB/Simulink. Структура навчального вектора НМ наведена в таблиці 1.

Таблиця 1. Структура вектора навчання НМ

Вхідні значення НМ							Вихідне значення НМ
$C_{vp}(t)$	$C_l(t)$	$C_{sh}(t)$	$\Delta C_{vp}(t)$	$\Delta C_l(t)$	$\Delta C_{sh}(t)$	$t$	$Q(t)$
%	%	%	%	%	%	Секунди	м <sup>3</sup> /секунду

Метою навчання є зниження відповідних концентрацій  $C_{vp}, C_l, C_{sh}$  в компонентах видобувної дільниці шляхом зміни розходу повітря  $Q(t)$  до безпечного рівня без викидів концентрацій метану, які викликані різкими змінами розходу повітря  $Q(t)$  при управлінні та перевищують гранично допустимі концентрації. На рис. 2 процес навчання, що характеризується ітераційним процесом налаштування вагових коефіцієнтів та порогів нейронів, зображено штриховою стрілкою.

В режимі управління НМ відтворює бажану криву розходу повітря  $Q(t)$  при відповідних значеннях вхідних концентрацій  $C_{vp}, C_l, C_{sh}$  та їх відхилень  $\Delta C_{vp}, \Delta C_l, \Delta C_{sh}$ . При цьому вагові коефіцієнти і порогови нейронів відповідають тим значенням, що були отримані при навчанні, тобто штрихова стрілка на рис. 2 не діє.

### 4. Математична модель нейронної мережі

Багаторівневий персептрон з нелінійними функціями активації нейронів може бути використаний як модель нейромережевого контролера, тому що ця архітектура є простою, добре вивченою та широко використовуваною для задач управління [6-7].

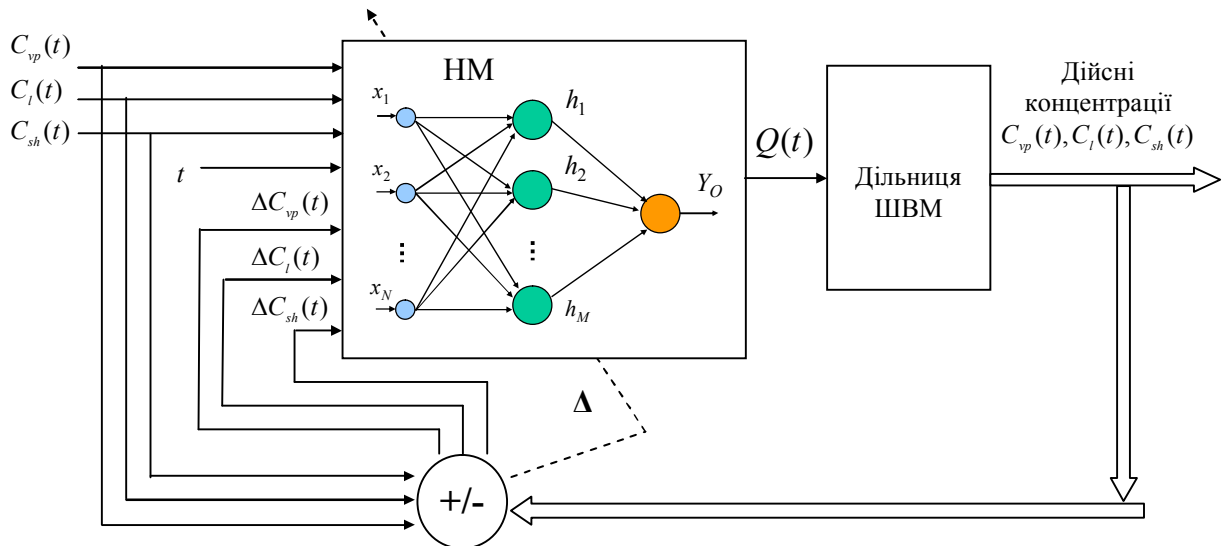


Рис. 2. Структура нейрмережевої системи управління провітрюванням

Вихідне значення трьох-рівневого перцептрону (рис. 3)

$$y = F_3 \left( \sum_{i=1}^N w_{i3} h_i - T \right),$$

де  $N$  - кількість нейронів схованого рівня,  $w_{i3}$  - ваговий коефіцієнт від  $i$ -го нейрону схованого рівня до вихідного нейрону,  $h_i$  - вихідне значення  $i$ -го нейрону схованого рівня,  $T$  - поріг вихідного нейрону,  $F_3$  - функція активації вихідного нейрону [8].

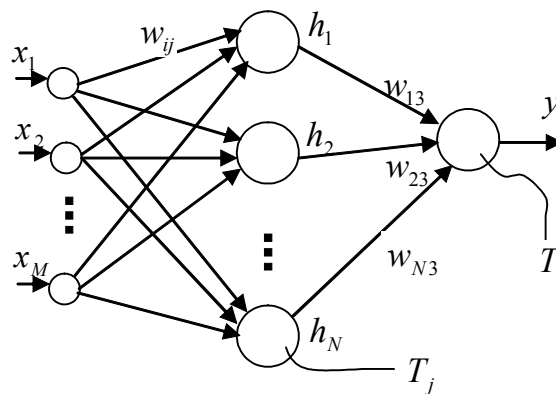


Рис. 3. Структура нейронної мережі

Вихідне значення  $j$ -го нейрону схованого рівня

$$h_j = F_2 \left( \sum_{i=1}^M w_{ij} x_i - T_j \right),$$

де  $w_{ij}$  - вагові коефіцієнти від вхідних нейронів до  $j$ -го нейрону схованого рівня,  $x_i$  - вхідні значення,  $T_j$  - поріг  $j$ -го нейрона. Для нейронів схованого рівня використана нелінійна сигмоїдна функція активації

$$F(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}},$$

а для нейрону вихідного рівня - лінійна функція активації

$$F(x) = kx,$$

де  $k$  - коефіцієнт нахилу прямої функції активації.

Алгоритм зворотнього поширення помилки [6-8] використано для навчання НМ. Він базується на методі градієнтного спуску і забезпечує ітераційну процедуру модифікації вагових коефіцієнтів та порогів НМ для кожного навчального вектора  $p$  з вибірки навчання:

$$\Delta w_{ij}(t) = -\alpha \frac{\partial E^p(t)}{\partial w_{ij}(t)}, \quad \Delta T_j(t) = -\alpha \frac{\partial E^p(t)}{\partial T_j(t)},$$

де  $\alpha$  - крок навчання,  $\frac{\partial E^p(t)}{\partial w_{ij}(t)}$  і  $\frac{\partial E^p(t)}{\partial T_j(t)}$  - градієнти функції помилки на кожній ітерації  $t$  для навчального вектора  $p$ ,  $p \in \{1, \dots, P\}$ , де  $P$  - розмір вибірки навчання.

Середньоквадратична помилка навчання на кожній ітерації навчання  $t$  обчислюється як

$$E^p(t) = \frac{1}{2} (y^p(t) - d^p(t))^2,$$

де  $y^p(t)$  вихідне значення НМ на ітерації навчання  $t$ ,  $d^p(t)$  - бажане значення НМ на ітерації навчання  $t$  для кожного навчального вектора  $p$ . Загальна помилка навчання обчислюється як

$$E(t) = \sum_{p=1}^P E^p(t).$$

## 5. Результати імітаційного моделювання

Відповідь об'єкту (зміни концентрацій метану  $C_{vp}, C_l, C_{sh}$ ), викликані ступінчатою зміною розходу повітря при позиційному управлінні наведено на рис. 4. Як видно, позиційний закон управління не відповідає потребам системи управління провітрюванням видобувної дільниці. При різкій зміні розходу повітря у виробленому просторі та вентиляційному штреку спостерігаються значні викиди концентрації метану (до 11% у виробленому просторі та до 3,5% у вентиляційному штреку). Це пов'язано з скупченням метану у місцях зі слабою циркуляцією повітря та його видуванням при різких змінах розходу повітря в дільниці [4].

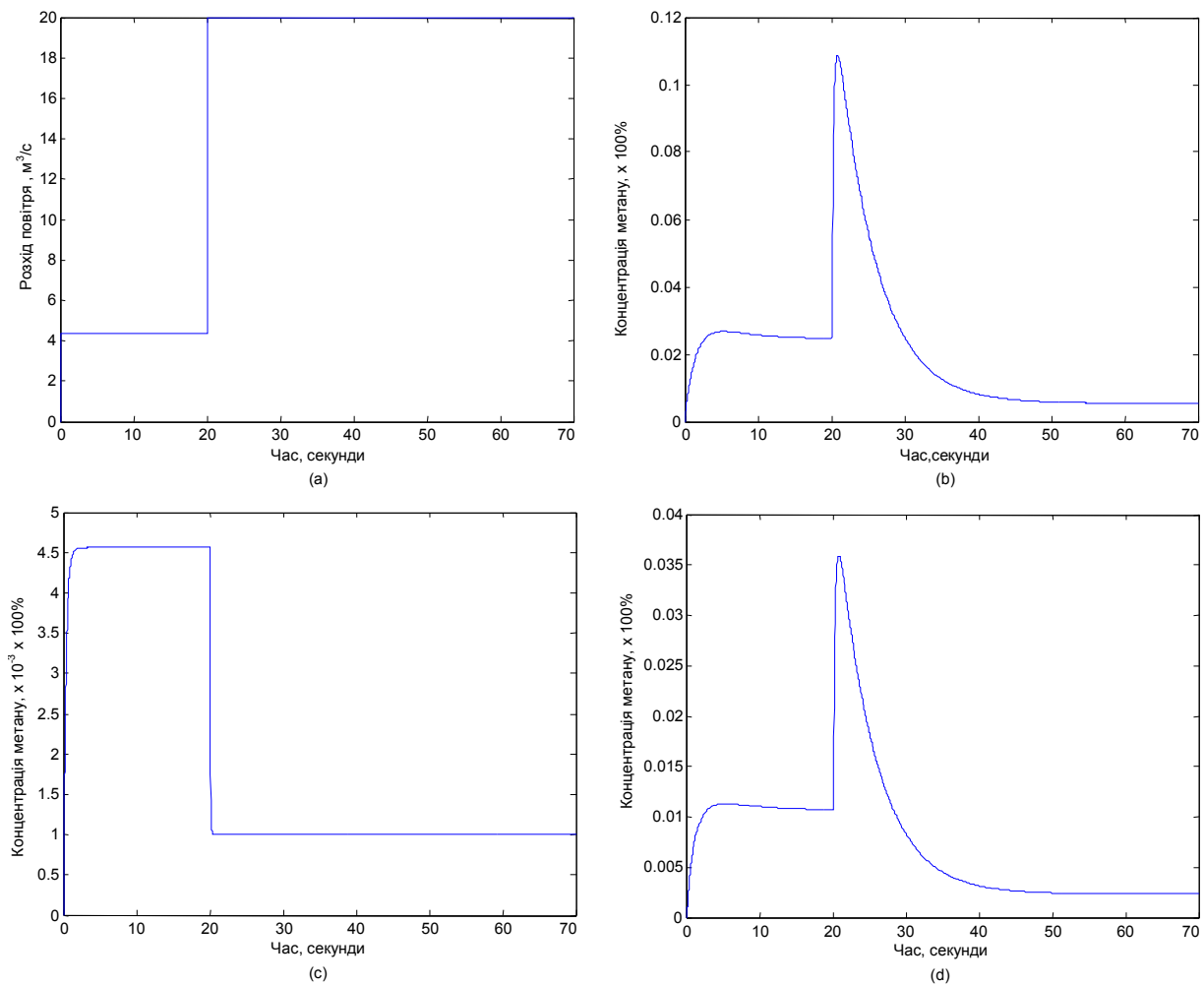


Рис. 4. Зміни концентрацій метану виробленого простору (b), лави (c) та вентиляційного штреку (d) при позиційному управлінні розходом повітря (a)



При використанні нейромережевої системи управління відповідь об'єкту не містить викидів концентрації метану (рис. 5). Це пояснюється нелінійною зміною розходу повітря, що забезпечується нелінійним характером зв'язків НМ. Використання НМ забезпечує необхідну динаміку розходу повітря при різних концентраціях метану  $C_{vp}$ ,  $C_l$ ,  $C_{sh}$  та їх відхилень  $\Delta C_{vp}$ ,  $\Delta C_l$ ,  $\Delta C_{sh}$ .

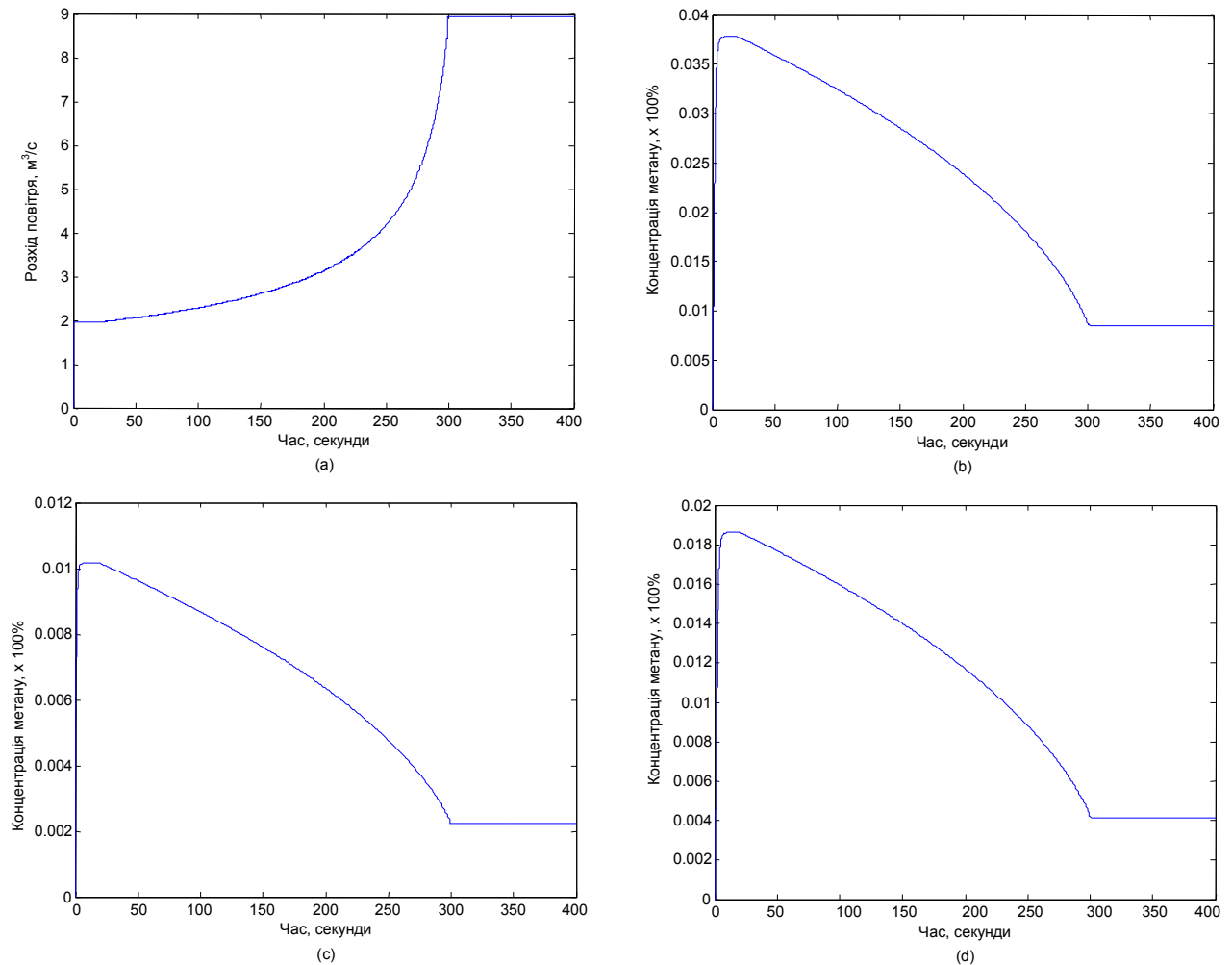


Рис. 5. Зміни концентрацій метану виробленого простору (b), лави (c) та вентиляційного штреку (d) при нейромережевому управлінні розходом повітря (a)

## Висновки

Для проведення імітаційного моделювання нейромережевої системи управління розходом повітря використано імітаційну модель дільниці шахтної вентиляційної мережі, що адекватно відображає динаміку аерогазових процесів дільниці [4]. Результати імітаційного моделювання показали кращі параметри управління порівняно з широко вживаною

позиційною системою управління. Однак нейромережева модель управління показала значне збільшення часу перехідного процесу. Тому наступні дослідження доцільно провести по оптимізації нейромережевої системи управління щодо вказаного параметру.

### ***Література***

1. <http://www.sinomedia.net/eurobiz/v200402/regional0402.html>
2. White D., Sofge D. Handbook of Intelligent Control. - New York: Van Nostrand Reinhold, 1992.
3. Святный В.А., Ефремов С.С. Разработка структуры и операционных алгоритмов микропроцессорной системы безопасного управления проветриванием шахты // Механизация и автоматизация управления. – 1983. - № 4. - С. 31–34.
4. Абрамов Ф.А., Фельдман Л.П., Святный В.А. Моделирование динамических процессов рудничной аэрологии. – К.: Наукова думка, 1981. - 284 с.
5. Hu Y., Koroleva O., Krstic M. Nonlinear control of mine ventilation networks // Systems and Control Letters. – 2003. – Vol. 49 (4). - P. 239-254.
6. Werbos P.J. Overview of Design and Capabilities in Neural Networks for Control. - Cambridge (MA): MIT Press, 1990. - P. 59-65.
7. Омату С., Халид М., Юсоф Р. Нейроуправление и его приложения. Пер. с англ. Н.В. Батина; Под. Ред. А.И. Галушкина, В.А. Птичкина. – М.: ИПРЖР, 2000. – 272 с.
8. Головкин В.А. Нейронные сети: обучение, модели и применение. – М.: Радиотехника, 2001. – 256 с.

---

Дата надходження до редакції 27.10.2006 р.