

НЕЛИНЕЙНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ВЕНТИЛЯЦИОННОЙ СЕТЬЮ УГОЛЬНОЙ ШАХТЫ

Филинов Н.Ю., студ.; Суков С.Ф., проф., к.т.н., доц.

(ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет», г. Донецк, ДНР)

Одной из основных проблем подземных угольных шахт является наличие ядовитых и взрывоопасных газов, таких как метан. Несчастные случаи забирают жизни шахтеров и по сей день.

Современные угольные шахты содержат сложные вентиляционные установки, которые позволяют регулировать концентрацию метана. В таких системах цель достигается не только лишь путем непосредственного контроля концентрации, а и путем контроля скорости воздуха через отдельные ветви вентиляционной сети.

Сеть шахтной вентиляции является объектом многомерного управления, т.е. управление в одной ветви может негативно отразиться на потоке в других. Поэтому шахтная вентиляция может быть смоделирована в виде многомерной модели потоков (подобно модели электрической сети).

Расчет воздухораспределения в рудничной вентиляционной сети сводится к применению законов, подобным законам Кирхгофа и закона для падения давления на участке сети [1,2,3] и последующему решению полученной системы уравнений. Если принять упрощения, такие как равная температура во всех ветвях и несжимаемый воздух, то систему вентиляции можно описать следующим образом:

$$\frac{dQ_j}{dt} + K_j R_j |Q_j| Q_j = K_j H_j, \quad (1)$$

где Q_j – величина потока воздуха через ветвь j ;

$R_j = r_j l_j$ – аэродинамическое сопротивление;

r_j – особое аэродинамическое сопротивление ветви;

l_j – длина ветви;

$H_j = p_{lj} - p_{lj0}$ – падение давления ветви;

p_{lj} – абсолютное давление в конце ветви;

p_{lj0} – абсолютное давление в начале ветви;

$K_j = S_j / \rho l_j$ – коэффициент инерции;

S_j – поперечное сечение ветви;

ρ – плотность воздуха.

Подобно электрической сети, сеть шахтной вентиляции должна удовлетворять уравнению, аналогичному первому закону Кирхгофа, т.е. воздушный поток, выходящий из узла равен воздушному потоку, входящему в этот узел. Математически, данный закон для рудничной вентиляционной сети можно изобразить в виде:

$$\sum_{j=1}^n E_{Q_{ij}} Q_j = 0, \quad i = 2, \dots, n_c - 1, \quad (2)$$

или

$$E_Q Q = 0, \quad (3)$$

где n_c – количество узлов в сети;

Q – вектор значений воздушного потока;

$E_Q = [E_{Q_{ij}}]$ – матрица подключений ветвей к узлам, i – номер узла.

Аналогичным образом вентиляционная сеть удовлетворяет второму закону Кирхгофа, т.е. сумма падений давления на элементах сети должна быть равна нулю, или математически:

$$\sum_{j=1}^n E_{H_{ij}} H_j = 0, \quad i = 1, \dots, l - k, \quad (4)$$

или

$$E_H H = 0, \quad (5)$$

где $l = n - n_c + 1$ – число каналов в сети;

$E_H = [E_{H_{ij}}]$ – матрица «направлений» подключения звеньев в сети;

k – число каналов, подключенных к ветви вентилятора.

Для того, чтобы получить уравнения состояния, необходимо найти независимые переменные состояний системы. Т.к. данные о сети и соединениях в них известны, первым шагом является описание рудничной вентиляционной сети с помощью значений воздушного потока в каналах ветвей и падеи давления в них:

$$Q = \begin{bmatrix} Q_c \\ Q_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_1 \\ \vdots \\ Q_{N-n_c+1} \\ Q_{N-n_c+2} \\ \vdots \\ Q_n \end{bmatrix}, \quad H = \begin{bmatrix} H_c \\ H_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_1 \\ \vdots \\ H_{N-n_c+1} \\ H_{N-n_c+2} \\ \vdots \\ H_n \end{bmatrix}, \quad (6)$$

где Q_c и H_c – матрицы, описывающие значения воздушного потока и падений давления, соответственно, в каналах;

Q_a и H_a – матрицы, описывающие их в ветвях, крове ветвей вентилятора.

С обозначением

$$Q_D^2 = \text{diag}(Q_1|Q_1|, \dots, Q_n|Q_n|), \quad K = \text{diag}(K_1, \dots, K_n) = \begin{bmatrix} K_c & 0 \\ 0 & K_a \end{bmatrix},$$

(1) может быть записан как

$$\dot{Q} = -K Q_D^2 R + K H.$$

Используя алгебраические преобразования и расчеты [4], получено, что существуют такие матрицы A , B , C , Y_{RQ} , Y_Q и Y_d и таких размерностей, что модель шахтной вентиляционной сети может быть выражена как:

$$\dot{Q} = A Q_D^2 R + B Q + C d, \quad (7)$$

$$H = Y_{RQ} Q_D^2 R + Y_Q Q + Y_d d, \quad (8)$$

где d обозначает эквивалентный перепад давления, создаваемый вентилятором.

В полученной системе уравнений Q – матрица состояний;

R и d – матрицы входа;

H – матрица выхода системы.

Имея уравнения состояния системы, был получен закон управления во всех ветвях вентиляционной сети шахты.

Управление происходит с помощью переменных R_c , R_a и d . Входы R_a и d являются вспомогательными [5]. Управление может проводится без них, однако, с их помощью эффективность управления увеличивается.

$$R_c = (K_c Q_{cD}^2)^{-1} (K_c H_{cr} + \lambda Q_{ce}), \quad (9)$$

$$R_a = (K_a Q_{aD}^2)^{-1} (K_a H_{ar} + \lambda Q_{ae}), \quad (10)$$

$$d = H_{mr} + R_m Q_m, \quad (11)$$

где H_{cr} , H_{ar} , и H_{mr} – заданные значения H_c , H_a , и H_m соответственно;

$$Q_{ce} = Q_c - Q_{cr}, \quad Q_{ae} = Q_a - Q_{ar},$$

в которых Q_{cr} и Q_{ar} – заданные значения Q_c и Q_a соответственно, а λ – коэффициент усиления. При этом, Q_r и H_r должны удовлетворять уравнениям (3) и (5).

Для системы, описываемой (7) и (8), в соответствии с законами управления (9)-(11) должны быть получены следующие результаты:

1. $H(t) \equiv H_r$,
2. $Q = Q_r$ и должен быть устойчив,
3. Если $Q_i(0) \geq 0, Q_{ir} > 0$ и $\lambda < \min K_i R_{ir} Q_{ir}$, то $R_{i(t)} > 0$ на всем временном промежутке, где $i=1, \dots, n$.

Для проверки работоспособности данной математической модели и корректности подбора закона управления, рассмотрим систему управления вентиляционной сетью шахты, которая состоит из 3 узлов, 3 ветвей и 1 ветви главного вентилятора, изображенной на рисунке 1.

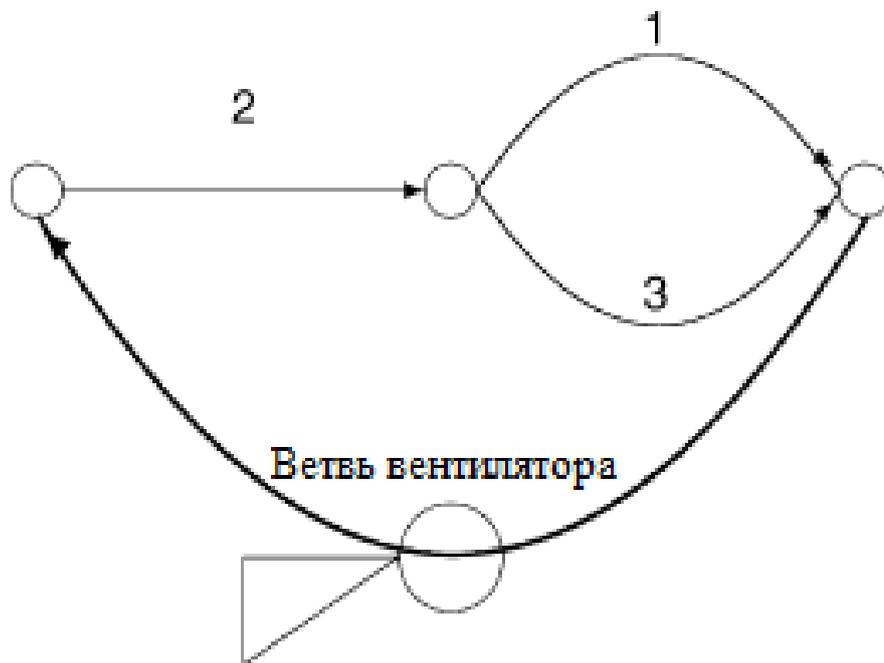


Рисунок 1 – Вентиляционная сеть шахты с 4 ветками

Параметры сети были выбраны следующие: $Q_r = [2; 1; 1]$, $H_r = 1.7$, $K_1 = 1/10$, $K_2 = 1/40$, $K_3 = 1/10$, $Q(0)=[1.1; 0.1; 1.0]$, коэффициент усиления $\lambda=0.043$. Реакция системы изображена на рисунке 2.

Как видно из графиков, значения потоков Q устанавливаются в заданных изначально значениях, управляющие воздействия приходят в установившийся режим за 50с, значение давления H является постоянным и находится на заданном уровне, что говорит об идеальности данной модели из-за принятых ранее упрощений.

Таким образом, данный метод управления позволяет контролировать значения воздушного потока и давления на участках вентиляционной сети шахты. Использование такого подхода на действующих выработках дает возможность повысить эффективность проветривания, а также дает прирост в коэффициенте производительности труда. Если же в состав системы контроля включить управляющую часть, содержащую управляемые регуляторы воздуха и регулируемые вентиляторы главного проветривания, то применение подобных систем автоматизированного управления проветриванием может дать более значимые показатели эффективности.

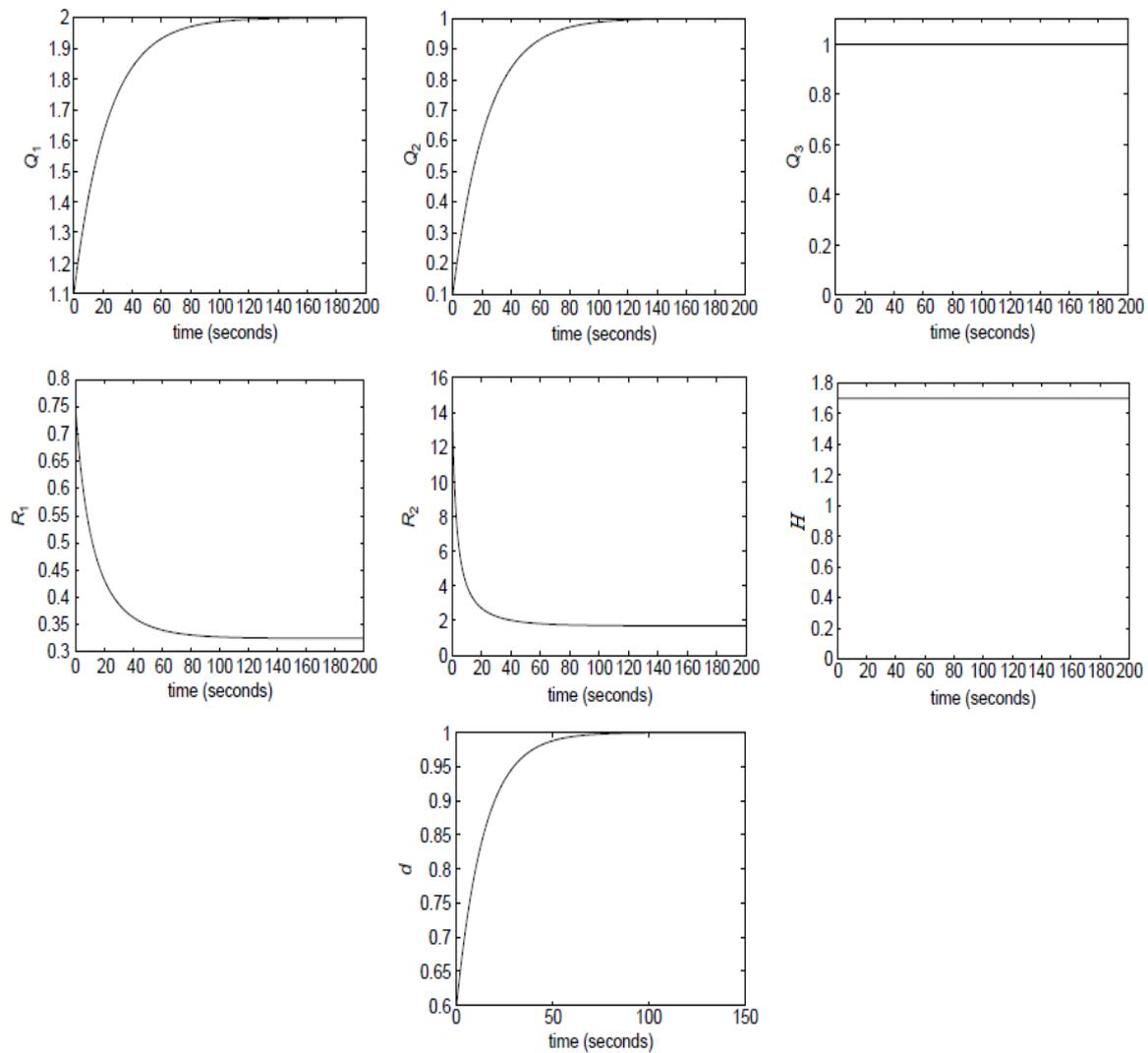


Рисунок 2 – Реакция системы на заданные воздействия

Перечень ссылок

1. Зайцев, А. В. Решение обратной задачи воздухораспределения в рудничной вентиляционной сети [Электронный ресурс] / А. В. Зайцев, П. С. Мальков, Д. С. Кормщиков. – Режим доступа : http://aerose.net/pub_ru/Inverse%20problem.pdf
2. Круглов, Ю. В. Моделирование систем оптимального управления воздухораспределением в вентиляционных сетях подземных рудников / Ю. В. Круглов : дисс. канд. техн. наук. — Пермь, 2006. — 170 с.
3. Осинцева, А. В. Оптимизация размещения регуляторов воздухораспределения в вентиляционной сети подземного рудника на основе анализа взаимосвязи параметров сети и применения генетического алгоритма / А. В. Осинцева : автореферат дисс... канд. техн. наук. — Апатиты, 2011. — 129 с.
4. Witrant, E. Mining ventilation control [Электронный ресурс] / E. Witrant. – Режим доступа : http://www.gipsa-lab.grenoble-inp.fr/~e.witrant/classes/13_MVC_Sogamoso.pdf
5. Koci,с, D. D. On the autonomy of local systems in mine ventilation control / D. D. Koci,с, // Second Mine Ventilation Congress. – Reno. - USA, 1979.