

Нечеткое управление главной вентиляторной установкой и автоматическими регуляторами в системах проветривания рудников

А. В. Кашников, Л. Ю. Левин
Горный институт Уральского отделения
Российской Академии наук
alexey.kashnikov@gmail.com

Аннотация. Оперативное управление проветриванием рудников позволяет существенно сократить эксплуатационные затраты горнодобывающего предприятия. Нелинейный характер зависимости воздухораспределения от работы вентиляторов и средств отрицательного регулирования обуславливает необходимость использования подходов нечеткой логики для реализации алгоритмов системы автоматического управления проветриванием. В статье рассматривается случай управления одной главной вентиляторной установкой и несколькими автоматическими регуляторами.

Ключевые слова: рудничная вентиляция; вентилятор; регулятор; нечеткое управление

I. ВВЕДЕНИЕ

Многочисленные исследования в области рудничной вентиляции указывают на существенную долю энергозатрат горнодобывающего предприятия, приходящихся на работу вентиляторных установок [1]. Разработка и внедрение систем автоматического управления проветриванием в комплексе с организационными решениями позволяет существенно снизить эксплуатационные затраты предприятия [4]. Применение традиционного ПИД-регулирования для управления элементами системы вентиляции не позволяет добиться требуемой скорости реакции системы, а также зачастую приводит к продолжительным колебаниям параметров устройств управления.

II. ОСОБЕННОСТИ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ПРОВЕТРИВАНИЕМ

В настоящее время в различных горнодобывающих компаниях внедряются системы автоматического управления проветриванием, построенные на принципах ПИД-регулирования. Реализация системы для рудника ЗРУ ОАО «Беларуськалий» описана в [2], [3]. При этом их эксплуатация демонстрирует определенные недостатки использования данного подхода, которые вызваны спецификой рудничных вентиляционных систем.

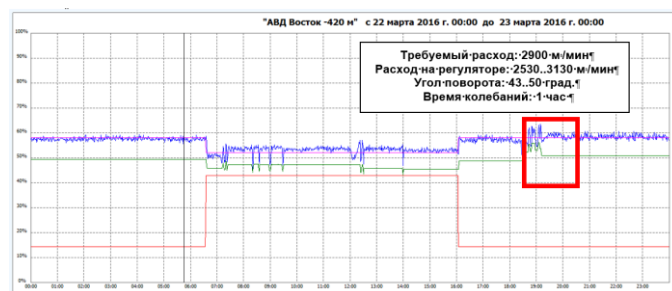


Рис. 1. Колебания положения регулятора в системе управления проветриванием рудника ЗРУ ОАО «Беларуськалий» (зеленый – угол открытия, синий – расход воздуха)

A. Особенности систем управления вентиляцией

При разработке алгоритма системы автоматического управления проветриванием необходимо принимать в расчет следующие особенности:

- нелинейный характер зависимости аэродинамического сопротивления регулятора от его угла открытия;
- значительное перераспределение заданного значения расхода воздуха между регуляторами в процессе эксплуатации системы;
- постоянная изменчивость вентиляционной сети, вызванная непрерывными горными работами;
- наличие динамических возмущений, вызванных перемещением людей и техники;
- влияние регуляторов друг на друга.

Данные факторы могут быть в полной мере учтены при использовании подходов нечеткого управления, поскольку они позволяют учесть нелинейные зависимости, а также предполагают алгоритмы автокоррекции в случае изменения условий работы оборудования.

В. Алгоритм ПИД-регулирования

Реализация системы автоматического управления проветриванием рудника на основе ПИД-регулирования основывается на следующих управляющих уравнениях [5]:

$$\begin{cases} \Delta\omega = \gamma \max_i(v_i^* - v_i)^+ - \gamma \min_i(v_i - v_i^*)^+ - \delta \min \phi_i \\ \Delta\phi_i = \lambda(v_i - v_i^*) \end{cases} \quad (1)$$

где

$\Delta\omega$ – приращение частоты вентилятора;

$\Delta\phi_i$ – приращение угла открытия регулятора;

v_i – текущая скорость воздуха на i -м регуляторе;

v_i^* – заданная скорость воздуха на i -м регуляторе;

ϕ_i – текущий угол открытия регулятора;

функция $(x)^+ = \begin{cases} 0, & x < 0; \\ x, & x \geq 0; \end{cases}$

γ, δ, λ – коэффициенты.

Коэффициенты определяются в каждом конкретном случае исходя из особенностей вентиляционной сети.

Фактически данные управляющие уравнения обеспечивают выполнение следующих правил [6]:

- на каждом регуляторе скорость воздуха должна быть не ниже заданной;
- по крайней мере один из регуляторов должен быть полностью открыт;
- по крайней мере на одном из регуляторов скорость воздуха должна соответствовать заданной.

III. АЛГОРИТМЫ НЕЧЕТКОГО УПРАВЛЕНИЯ

Указанные правила могут быть преобразованы в правила для нечеткого управления для регуляторов и вентилятора.

А. Управление вентилятором

Определим следующие нечеткие переменные в качестве входных параметров для определения приращения частоты вентилятора:

Δv – недостаток/перерасход воздуха, определяемый как разность между максимальным недостатком воздуха и минимальным перерасходом по всем регуляторам;

$$\Delta v = \max_i(v_i^* - v_i)^+ - \min_i(v_i - v_i^*)^+$$

ϕ_{min} – минимальный угол открытия среди всех регуляторов;

$$\phi_{min} = \min_i \phi_i$$

В качестве нечеткой выходной переменной определим следующую переменную:

$\Delta\omega$ – приращение частоты вращения рабочего колеса вентилятора.

Для нечетких переменных определим следующие терм-множества:

$$\Delta v - \{N, NZ, Z, PZ, P\}$$

$$\phi_{min} - \{Z, S, L\}$$

$$\Delta\omega - \{N, NZ, Z, PZ, P\}$$

Обозначения N^* , P^* соответствуют значениям «отрицательное» и «положительное», обозначения $*Z$, $*S$, $*M$, $*L$ соответствуют значениям «близкое к нулю» / «нулевое», «малое», «среднее», «большое». Например, обозначение PM соответствует терму «положительное среднее».

Нечеткие множества, составляющие терм-множества для нечетких переменных, определяются следующими функциями принадлежности:

$$\mu(x) = e^{-\left(\frac{x-\bar{x}}{\sigma}\right)^2}$$

где

$\bar{x}, \sigma$ – параметры, определяющие центр и ширину графика функции.

Представим первое управляющее уравнение из (1) в виде базы правил нечеткого вывода для определения требуемого приращения частоты вращения рабочего колеса вентилятора. Заголовки строк и столбцов соответствуют множествам входных переменных (Δv и ϕ_{min} соответственно), входящих в антецеденты правил, значения на пересечении строк и столбцов соответствуют множествам выходной переменной из консеквентов правил.

ТАБЛИЦА I БАЗА ПРАВИЛ ДЛЯ ВЕНТИЛЯТОРА

	N	NZ	Z	PZ	P
Z	P	PZ	Z	NZ	N
S	Z	Z	NZ	NZ	N
L	Z	Z	N	N	N

Выбор нечетких множеств для минимального угла открытия регуляторов обусловлен следующими соображениями.

Значение Z («нулевой») означает, что текущее положение регуляторов отвечает необходимому условию оптимальности работы системы управления полной открытости хотя бы одного из регуляторов. В этом случае регулирование распределения воздуха осуществляется за счет изменения частоты вращения рабочего колеса вентилятора.

В случае, если минимальный угол отличен от нуля и существует совокупный недостаток воздуха в системе, необходимо вначале отрегулировать положение регуляторов. Таким образом, значения выходной переменной Z в базе правил для вентилятора соответствуют передаче управления на регуляторы (при этом частота вращения остается неизменной).

Выделение малого и большого минимального угла открытия регулятора отражает нелинейную зависимость

аэродинамического сопротивления регулятора от угла его открытия – для большего угла необходимо большее значение приращения частоты вращения рабочего колеса вентилятора, чтобы изменить в ту или иную сторону расход воздуха на регуляторах.

Для вычисления степени истинности k -го правила используется следующая формула:

$$\mu_{B_k}(\Delta\omega) = \mu_{A_k^{\Delta v}}(\Delta v) \cdot \mu_{A_k^{\phi_{min}}}(\phi_{min}) \quad (2)$$

где

$\mu_{A_k^{\Delta v}}$, $\mu_{A_k^{\phi_{min}}}$ – функции принадлежности нечетких множеств входных переменных из антецедента k -го правила,

μ_{B_k} – функция принадлежности нечеткого множества выходной переменной из консеквента k -го правила.

Для вычисления результирующего значения выходной переменной используется следующая формула:

$$\Delta\omega = \frac{\sum_k \bar{\Delta\omega}_k \cdot \mu_{B_k}(\Delta\omega)}{\sum_k \mu_{B_k}(\Delta\omega)} \quad (3)$$

где $\bar{\Delta\omega}_k$ – центральное значение нечеткого множества выходной переменной k -го правила.

В. Управление регулятором

Определим следующие нечеткие переменные в качестве входных параметров для определения приращения угла открытия регулятора:

Δv – недостаток/перерасход воздуха на регуляторе, определяемый как разность между фактическим и требуемым расходом воздуха;

$$\Delta v = v_i - v_i^*$$

ϕ_i – текущий угол открытия регулятора.

В качестве нечеткой выходной переменной определим следующую переменную:

$\Delta\phi_i$ – приращение угла открытия регулятора.

Для нечетких переменных определим следующие терм-множества:

$$\begin{aligned} \Delta v &= \{N, NZ, Z, PZ, P\} \\ \phi_i &= \{S, L\} \\ \Delta\phi_i &= \{NL, NM, NS, Z, PS, PM, PL\} \end{aligned}$$

Обозначения нечетких множеств аналогичны термам переменных вентилятора.

Представим второе управляющее уравнение из (1) в виде базы правил нечеткого вывода для определения положения каждого из регуляторов.

ТАБЛИЦА II База правил для регулятора

	N	NZ	Z	PZ	P
S	NL	NM	Z	PM	PL
L	NM	NS	Z	PS	PM

Для вычисления значения выходной переменной используются формулы, аналогичные (2), (3).

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПИД-РЕГУЛИРОВАНИЯ И НЕЧЕТКОГО УПРАВЛЕНИЯ

Алгоритмы управления были смоделированы на тестовой вентиляционной сети в аналитическом комплексе «АэроСеть» (Рис. 2).

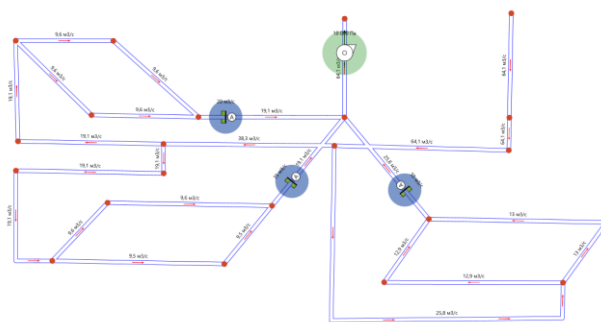


Рис. 2. Схема вентиляционной сети для тестирования алгоритмов управления

Результаты моделирования, приведенные на Рис. 3 и Рис. 4, наглядно демонстрируют преимущества нечеткого управления по сравнению с ПИД-регулированием:

- меньшая амплитуда колебаний при выходе на устойчивое положение;
- устойчивость к значительному перераспределению воздуха.

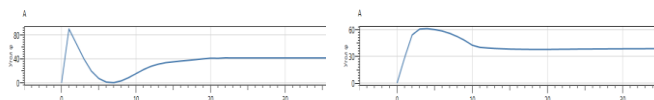


Рис. 3. Сравнение результатов моделирования работы ПИД-алгоритма(слева) и нечеткого алгоритма для регулятора после настройки ПИД-алгоритма для заданного воздухораспределения.

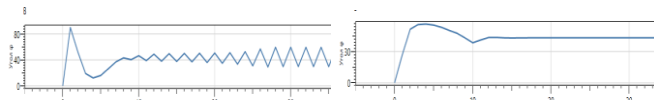


Рис. 4. Сравнение результатов моделирования работы ПИД-алгоритма (слева) и нечеткого алгоритма для регулятора после значительного перераспределения требуемых расходов воздуха в вентиляционной сети.

V. АВТОКОРРЕКЦИЯ ПАРАМЕТРОВ НЕЧЕТКОГО УПРАВЛЕНИЯ

В силу изменчивости вентиляционной сети параметры системы нечеткого управления со временем могут не обеспечивать заданный расход воздуха на всех регуляторах. Для этого необходимо обеспечить автокоррекцию системы на основе фактических данных по ее эксплуатации.

Предположим, что значение скорости воздуха на регуляторе D стабилизировалось на уровне большем или меньшем требуемого:

$$|v_D - v_D^*| > \varepsilon$$

Пусть в результате вычисления приращения частоты вентилятора на основе входных параметров мы получили значение $\Delta\omega$:

$$\Delta\omega = f(\Delta v, \phi_{\min})$$

Ввиду того, что полученное значение приращения частоты вентилятора не обеспечило заданное условие скорости воздуха, рассчитаем значение частоты ω' для вдвое большего значения скорости воздуха.

$$\Delta\omega' = f(2 \cdot \Delta v, \phi_{\min})$$

Полученное значение будем использовать в качестве эталонного выходного сигнала для коррекции параметров нечеткого управления. Скорректированы могут быть следующие параметры:

- центры нечетких множеств выходной переменной $\Delta\omega$;
- центры и ширина нечетких множеств входных переменных $\Delta v, \sigma_{\Delta v}, \phi_{\min}, \sigma_{\phi_{\min}}$.

Для коррекции воспользуемся методом градиентного спуска, заключающимся в уменьшении значения параметра на величину производной ошибки по этому параметру [7]. В качестве ошибки примем среднеквадратичное отклонение выходного сигнала от эталонного значения.

$$e = \frac{1}{2}(\Delta\omega - \Delta\omega')^2$$

На первом этапе производится коррекция центров нечетких множеств выходной переменной $\Delta\omega$.

$$\overline{\Delta\omega}_m(t+1) = \overline{\Delta\omega}_m(t) - \eta \frac{\partial e(t)}{\partial \overline{\Delta\omega}_m(t)} \quad (4)$$

На втором этапе корректируются параметры нечетких множеств входных переменных по формулам, аналогичным (4).

На Рис. 5 продемонстрирован результат автокоррекции параметров управления вентилятором, который позволил увеличить достигаемую частоту вращения при тех же заданных значениях входных параметров.

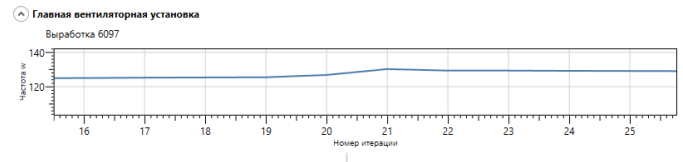


Рис. 5. Результат автокоррекции параметров нечеткого управления вентилятором, обеспечивающий выход на заданные значения расходов воздуха на регуляторах

VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение нечеткой логики в системах автоматического управления проветриванием приводит к следующим результатам:

- повышение скорости реакции системы;
- сокращение амплитуды колебаний параметров оборудования;
- повышение устойчивости работы системы при значительном перераспределении нагрузки между элементами управления;
- возможность автокоррекции системы в случае значительных изменений условий функционирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Hardcastle S. Strategic mine ventilation control: a source of potential energy savings / Hardcastle S., Kocsis C., Lacroix R. // Proceedings of Montreal Energy & Mines, Montreal, April 29- May 2, 2007, pp.255-263.
- [2] Kashnikov A., Levin L. Applying machine learning techniques to mine ventilation control systems. //Proceedings of 2017 XX IEEE International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM). Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI", St. Petersburg, Russia, 2017. <http://ieeexplore.ieee.org/document/7970595/>.
- [3] Levin L.Yu., Semin M. A. Conception of automated mine ventilation control system and its implementation on Belarussian potash mines // Proceedings of the 16th North American Mine Ventilation Symposium. – Colorado, 2017. P. 17.1–17.8
- [4] Кашников А.В. Динамический расчет количества воздуха в условиях применения систем автоматического управления проветриванием рудников. //Стратегия и процессы освоения георесурсов: сб. науч. тр. Вып. 14. Пермь, ГИ УрО РАН, 2016, с.259-260.
- [5] Круглов Ю.В., Левин Л.Ю. Основы построения оптимальных систем автоматического управления проветриванием подземных рудников //Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. №2. Тула, 2010, с. 104-109.
- [6] Круглов Ю.В., Семин М.А. Совершенствование алгоритма оптимального управления проветриванием вентиляционных сетей сложной топологии //Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело, 2013, № 9, с.106-115.
- [7] Рутковская Д., Пилиньский М., Рутковский Л. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы: Пер. с польского И.Д.Рудинского. М., Горячая линия – Телеком, 2006.