# РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ

2022

УДК 622.45

# ОЦЕНКА ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ ГЛАВНЫХ ВЕНТИЛЯТОРНЫХ УСТАНОВОК ПОДЗЕМНЫХ РУДНИКОВ В УСЛОВИЯХ НЕОДНОЗНАЧНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЗОН ИХ ВЛИЯНИЯ

#### А. В. Кашников, Ю. В. Круглов

Горный институт УрО РАН,

E-mail: alexey.kashnikov@gmail.com, aerolog@list.ru, ул. Сибирская, 78-А, 614007, г. Пермь, Россия

Представлен алгоритм, в основе которого лежит автоматическое определение преимущественных зон влияния вентиляторов в условиях их динамического изменения. Использование аппарата нечеткой логики позволяет добиться стабилизации пересекающихся зон влияния вентиляторов, а также компенсировать невозможность их жесткого разграничения при определении самого труднопроветриваемого направления. Обеспечивается устойчивое и приближенное к оптимальному решение задачи оперативного управления воздухораспределением в рудничной вентиляционной сети. Практическая значимость предложенного алгоритма управления вентилятором и корректность расчетных формул подтверждается результатами имитационного моделирования работы системы автоматического управления проветриванием рудника 4РУ ОАО "Беларуськалий".

Система автоматического управления проветриванием, нечеткие множества второго порядка, главная вентиляторная установка, нечеткое управление, вентиляционный регулятор

DOI: 10.15372/FTPRPI20220408

Задача оперативного определения параметров работы вентиляционных устройств, обеспечивающих минимальное энергопотребление системы рудничной вентиляции, является ключевой при реализации энергосберегающих технологий проветривания. Наличие нескольких главных вентиляторных установок в вентиляционной сети рудника принципиально усложняет задачу поиска оптимального режима работы вентиляторов и средств отрицательного регулирования. Как и в случае одной главной вентиляторной установки, критерием минимизации потребляемой мощности является определение самого труднопроветриваемого направления, при этом в общем случае для каждого вентилятора такое направление должно определяться независимо от других.

Значительная доля затрат в энергопотреблении горнодобывающих предприятий приходится на подземную вентиляцию [1]. В этой связи растет популярность внедрения систем "вентиляция по требованию" (ventilation-on-demand) [2, 3], предполагающих регулирование режимов проветривания рабочих зон рудника в зависимости от текущей фактической потребности в воздухе. Реализация такого подхода требует обеспечения средств и алгоритмов оперативного управления воздушными потоками в шахте. Системы автоматического управления проветри-

№ 4

ванием (САУП) должны обеспечивать требуемую подачу воздуха главными вентиляторными установками (ГВУ) и его последующее перераспределение между сегментами вентиляционной сети с помощью вентиляционных регуляторов [4]. В случае, если рудники проветриваются одной ГВУ, задача управления вентилятором сводится к нахождению его оптимального режима работы (минимальной частоты вращения), при котором в шахту подается требуемый объем воздуха в единицу времени [5]. Проветривание рудников, характеризующихся значительными площадями шахтных полей, а также наличием большого количества горизонтов, обеспечивается несколькими ГВУ (ПАО "ГМК "Норильский никель" [6], ОАО "Беларуськалий" [7] и пр.). В этом случае задача оптимального управления вентиляторами дополнительно предполагает определение пропорции, в которой этот расход должен быть распределен между ГВУ с минимальным суммарным энергопотреблением [8].

Существуют следующие подходы к управлению проветриванием в случае одновременной работы нескольких ГВУ:

— управление ГВУ осуществляется независимо друг от друга;

— параметры работы ГВУ пересчитываются на модели вентиляционной сети;

— параметры работы ГВУ определяются на основе текущих показаний датчиков в ключевых точках рудника.

В первом случае параметры для каждого вентилятора определяются исходя из потребности проветриваемого участка, как, например, на руднике Coleman Mine (Vale, Kaнaдa) [9]. Очевидно, такой способ эффективен только в случае изолированных зон влияния вентиляторов.

При использовании расчетов на модели вентиляционной сети предполагается гибкое изменение режимов работы ГВУ в зависимости от совокупной потребности рудника в воздухе. Рассчитанные на модели параметры (частоты вращения) передаются на контроллеры системы управления. На руднике Totten Mine (Vale, Канада) проветривание происходит за счет четырех наземных вентиляторов (два на входящей и два на исходящей струе), которые управляются как единый модуль. Распределение воздуха по горизонтам осуществляется за счет регуляторов [10, 11]. Аналогичная реализация системы для рудника Nickel Rim South Mine (Glencore, Канада) описана в [12].

Поиск оптимальной конфигурации режимов работы вентиляторов на модели вентиляционной сети можно разделить на три направления [13]:

- методом линейного программирования;
- методом поиска критического пути;
- комбинацией метода критического пути и секущих множеств.

Возможность нахождения оптимального режима работы вентиляторов требует, однако, постоянного ручного обновления вентиляционной модели в силу непрерывного продвижения горных работ. Не учитываются также кратковременные изменения аэродинамических сопротивлений конкретных участков сети.

В случае реализации управления на основе показаний датчиков в ключевых точках рудника информация о топологии вентиляционной сети как таковой не используется, а параметры работы ГВУ корректируются итеративно в цикле управления, чтобы обеспечить заданные точки требуемым расходом. Данный вариант, с одной стороны, позволяет минимизировать влияние человеческого фактора, а также делает систему максимально ориентированной на фактическую картину проветривания, с другой — может не обеспечивать оптимальное энергопотребление.

Один из вариантов такого управления реализован на шахте Lappberget рудника Garpenberg (Boliden, Швеция), вентиляционная сеть которой включает в себя два поверхностных вентилятора на входящей струе и по паре вентиляторов на каждом горизонте (на входящей и исходящей струе). В основе управления лежит упрощенная модель, в которой векторы приращения расхода воздуха и депрессии (векторы состоят из измеренных значений в контролируемых точках сети) связаны с вектором приращения частоты вращения вентилятора матрицей коэффициентов, а вектор приращения потребляемой энергии аналогичным образом выражается через изменение частоты вращения вентилятора в кубе. Матрицы коэффициентов определяются либо историческими данными, либо калибровочными испытаниями, в ходе которых поочередно задаются изменения частот вентиляторов с некоторым шагом. На основе построенной модели при изменении заданных расходов воздуха система управления рассчитывает возможные наборы параметров работы вентиляторов и выбирает оптимальный вариант (с точки зрения минимизации потребляемой энергии) [14]. Недостатком данного подхода является зависимость эффективности управления от набора исходных данных для определения коэффициентов модели, который в общем случае может не охватывать все возможные варианты взаимного влияния вентиляторов. Кроме того, в описанном алгоритме не учитывается управление вентиляционными регуляторами в контексте решения задачи оптимизации.

Схожий вариант управления несколькими ГВУ на руднике 4РУ ОАО "Беларуськалия" основывается на матрицах влияния, где каждый элемент характеризует влияние приращения расхода на *i*-м вентиляторе на *j*-й регулятор [15]. Определяются пропорции изменения частоты ГВУ при недостатке/избытке воздуха на регуляторах. Принципиальным отличием является включение в контур управления самих регуляторов. Их положение выступает в качестве признака оптимального режима работы системы: требуемые расходы воздуха на регуляторах могут быть достигнуты множеством различных взаимных комбинаций. Однако минимизация потребляемой вентиляторами электроэнергии обеспечивается минимальным аэродинамическим сопротивлением вентиляционной сети [16]. Алгоритм управления в случае наличия одной ГВУ основывается на понятии самого труднопроветриваемого направления [17, 18], на котором регулятор должен быть полностью открыт, что и является критерием оптимальности работы системы управления в целом. В случае с несколькими ГВУ полностью открытых регуляторов в оптимальном режиме проветривания может оказаться несколько (очевидно, что в случае изолированных зон влияния у каждой ГВУ будет свой открытый регулятор).

Реализованный алгоритм имеет следующие недостатки:

— степень влияния вентилятора на вентиляционные регуляторы считается постоянной и не предполагает пересчета в цикле управления. Тем не менее изменение положения регулятора меняет аэродинамическое сопротивление конкретной ветви вентиляционной сети и может приводить к изменению соотношения расходов, обеспечиваемых различными вентиляторами за счет перераспределения потоков по остальным направлениям;

— зоны влияния вентиляторов, в рамках которых осуществляется поиск самого труднопроветриваемого направления, разграничиваются на основе предварительных расчетов. Пересекающиеся зоны влияния рассматриваются как одна, в рамках которой осуществляется нахождение одного полностью открытого регулятора, что может оказаться недостаточным для выполнения условия минимизации сопротивления всей сети.

Цель настоящей работы — разработка алгоритма оптимального управления вентиляторами в рудниках с несколькими ГВУ и автоматическими вентиляционными регуляторами в условиях пересекающихся зон влияния вентиляторов без необходимости предварительного разграничения таких зон.

### ПРОБЛЕМА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЗОН ВЛИЯНИЯ ВЕНТИЛЯТОРОВ

Рассмотрим работу описанного алгоритма управления на модели, построенной на основе упрощенной вентиляционной сети рудника 4РУ ОАО "Беларуськалий". Проветривание осуществляется за счет четырех ГВУ (Ствол № 4, Центр, Гор. 2 Запад и Гор. 2 Восток). Перераспределение воздуха между участками вентиляционной сети происходит с помощью восьми вентиляционных регуляторов — автоматических вентиляционных дверей (АВД), установленных на двух горизонтах (рис. 1).



Рис. 1. Вентиляционная сеть с несколькими вентиляторными установками

Диапазон изменения частоты вращения вентиляторов Центр и Ствол № 4 — от 0 до 490 об./мин, вентиляторов Гор. 2 Восток и Гор. 2 Запад — от 0 до 980 об./мин. Для регуляторов Гор. 3 Восток и Гор. 3 Восток А установлено значение требуемой скорости воздуха 4 м/с, для остальных — 2 м/с.

Вентиляторы Гор. 2 Восток и Гор. 2 Запад фактически оказывают влияние только на один регулятор (Гор. 2 Восток и Гор. 2 Запад соответственно), их влияние на остальные регуляторы в сети пренебрежимо мало. Напротив, вентиляторы Центр и Ствол № 4 совместно проветривают оставшиеся направления, на каждое из которых воздух поступает в общем случае от обеих ГВУ.

Нахождение точного решения задачи минимизации энергозатрат на проветривание требует разграничения зон преимущественного влияния вентиляторов, в том числе набора совместно проветриваемых направлений, на которые конкретный вентилятор оказывает наибольшее воздействие. Случай, когда один регулятор обеспечивается воздухом за счет нескольких вентиляторов примерно в равных долях, может приводить к периодическому перемещению регулятора

из одной зоны в другую в цикле управления. Если данный регулятор окажется единственным полностью открытым в преимущественной зоне конкретного вентилятора, его периодическое "блуждание" из зоны в зону приведет к циклическим колебаниям частоты вращения вентилятора, что недопустимо с точки зрения реализации системы управления.

С целью иллюстрации динамического изменения зон влияния ГВУ рассмотрим влияние вентиляторов на регуляторы Гор. 3 Восток А и Гор. 3 Запад А на двух последовательных итерациях цикла управления. Строки табл. 1. представляют собой отношение отклонения скорости воздуха на отдельном регуляторе к суммарному отклонению на всех регуляторах вследствие изменения частоты вращения конкретного вентилятора. Выделено максимальное значение в столбце, определяющее вентилятор, который оказывает преимущественное влияние на соответствующий регулятор.

	Регуляторы				
ГВУ	Гор. 3 Восток А		Гор. 3 Запад А		
	<i>і</i> -я итерация	<i>i</i> +1-я итерация	<i>і</i> -я итерация	<i>i</i> +1-я итерация	
Гор. 2. Восток	0.015	0.015	0.008	0.008	
Гор. 2 Запад	0.006	0.006	0.004	0.004	
Ствол №4	0.200	0.197	<u>0.117</u>	0.095	
Центр	0.222	0.154	0.100	0.095	

ТАБЛИЦА 1. Распределение абсолютного приращения скорости воздуха по вентиляционным регуляторам (в долях) на двух последовательных итерациях цикла управления

Для вентиляторов Ствол № 4 и Центр определить однозначно в цикле управления множество регуляторов, на которые каждый вентилятор оказывает преимущественное влияние, невозможно. При этом перемещение регулятора Гор. 3 Восток А, полностью открытого при оптимальном режиме проветривания, из зоны влияния вентилятора Центр в зону вентилятора Ствол № 4 и обратно приводит к колебательному циклу (рис. 2). У вентилятора Центр при уходе регулятора Гор. 3 Восток А из зоны его влияния не остается ни одного полностью открытого регулятора. Он должен снижать частоту вращения, что в свою очередь заставляет открываться оставшиеся регуляторы. После этого открытый регулятор Гор. 3 Восток А снова возвращается в зону влияния вентилятора Центр, а приоткрывшиеся регуляторы прикрываются.



Рис. 2. Колебания частоты вращения вентиляторов вблизи оптимального режима работы САУП: *1* — Центр; 2 — Ствол № 4

В результате в условиях, когда самое труднопроветриваемое направление для конкретного вентилятора не может быть определено однозначно, алгоритм управления САУП входит в бесконечный колебательный цикл режимов работы связанных вентиляторов и регуляторов. Исходя из проведенного анализа можно сделать следующие выводы:

— самое труднопроветриваемое направление необходимо определять для каждого вентилятора в отдельности;

— зоны влияния вентиляторов могут как пересекаться, так и быть изолированными;

— в пересекающиеся зоны преимущественного влияния вентиляторов могут попадать "блуждающие" регуляторы, принадлежность которых к той или иной зоне в цикле управления невозможно определить однозначно.

При разработке управляющих уравнений для расчета приращения частоты вентилятора необходимо принимать во внимание следующие факты:

— степень регулирования вентилятора в первую очередь определяется степенью его влияния на регулятор с максимальным отклонением фактической скорости воздуха от заданной;

— чем больше текущая частота вращения вентилятора, тем более энергозатратно ее дальнейшее увеличение;

— изменение частоты вращения различных вентиляторов по-разному влияет на изменение расхода воздуха на конкретном регуляторе, а также оказывает влияние друг на друга.

В [19] представлены алгоритмы управления элементами САУП на основе нечеткой логики в вентиляционных сетях с одной ГВУ. Результаты моделирования и шахтные испытания продемонстрировали устойчивость данных алгоритмов к возмущениям, а также более высокую скорость сходимости по сравнению с традиционным ПИД-регулированием. Алгоритм нечеткого управления вентилятором в статье обобщен на случай вентиляционных систем с несколькими ГВУ с учетом следующих положений:

— вместо расхода воздуха будет использоваться скорость, так как расход определяется умножением площади сечения выработки на усредненную скорость воздушного потока, рассчитываемую на основе одного или нескольких датчиков с корректирующим коэффициентом;

— управление вентиляционными регуляторами остается аналогичным случаю систем с одной ГВУ: изменение угла открытия регулятора зависит только от текущего отклонения фактического расхода воздуха от заданного, вызванного изменением частот вращения вентиляторов и взаимной конфигурацией положения всех регуляторов в сети;

— диапазон изменения положения регулятора  $0-90^{\circ}$ ,  $0^{\circ}$  соответствует полностью открытому регулятору (положению, при котором регулятор создает наименьшее дополнительное аэродинамическое сопротивление в выработке);

— диапазон изменения частоты вращения вентилятора — от 0 до максимально возможной, определяемой паспортными характеристиками вентилятора.

В целях устранения нежелательного эффекта "блуждающих" регуляторов введем нечеткое определение преимущественных зон влияния, а также используем нечеткие множества второго порядка интервального типа [20] для повышения точности нахождения оптимального решения в условиях пересекающихся зон влияния.

Пусть F — множество вентиляторов; D — множество вентиляционных регуляторов;  $\Delta v_D^F$  — изменение расхода воздуха на регуляторе  $D \in \mathbf{D}$ , вызванное изменением частоты вращения вентилятора  $F \in \mathbf{F}$  на текущем шаге управления;  $\Delta v_{\Sigma}^F$  — суммарное изменение скорости воздуха на регуляторах, вызванное изменением частоты вращения вентилятора F на текущем шаге управления, определяемое формулой

$$\Delta v_{\Sigma}^{F} = \sum_{D \in \mathbf{D}} |\Delta v_{D}^{F}|.$$

Для формализации нечеткого утверждения "регулятор  $D \in \mathbf{D}$  обеспечивается воздухом за счет вентилятора  $F \in \mathbf{F}$ " введем нечеткое отношение R:

$$R = \sum_{\mathbf{F} \times \mathbf{D}} \frac{\mu_R(F, D)}{(F, D)}.$$

где

$$\mu_R(F,D) = \frac{|\Delta v_D^F|}{\Delta v_{\Sigma}^F}.$$

Функция принадлежности  $\mu_R(F, D)$  определяет степень проветривания регулятора  $D \in \mathbf{D}$ вентилятором  $F \in \mathbf{F}$ . Под зоной влияния  $\mathbf{D}_F$  вентилятора  $F \in \mathbf{F}$  понимается нечеткое множество, состоящее из регуляторов, степень вхождения каждого из которых определяется отношением его степени проветривания вентилятором F к максимальной степени проветривания среди всех вентиляторов:

$$\mathbf{D}_F \equiv \sum_{D \in \mathbf{D}} \frac{\mu_F(D)}{D}, \qquad \mu_F(D) = \frac{\mu_R(F, D)}{\max \mu_R(F', D)}$$

Преимущественной зоной влияния степени  $\alpha$  будет называться множество  $\alpha$ -уровня нечеткого множества  $\mathbf{D}_F$  и обозначаться  $\mathbf{D}_F^{\alpha}$ . Очевидно, что преимущественная зона влияния вентилятора степени единица включает в себя регуляторы, на проветривание которых наибольшее влияние оказывает данный вентилятор на текущем шаге управления.

Для определения преимущественной зоны влияния необходимо после каждого изменения частоты вентилятора рассчитать, в каких пропорциях распределилось изменение расхода по всем регуляторам. Под целевым регулятором по скорости воздуха вентилятора  $F \in \mathbf{F}$  будем понимать регулятор  $\hat{D}^F \in \mathbf{D}_F^{\alpha}$ , на котором достигается максимальный недостаток (при общем недостатке) или минимальный перерасход (при общем избытке) воздуха в преимущественной зоне влияния вентилятора F.

Пусть  $\Delta v^F$  — общий недостаток / избыток расхода воздуха в преимущественной зоне влияния вентилятора  $F \in \mathbf{F}$ ;  $v_D^*$  — требуемая скорость воздуха на регуляторе  $D \in \mathbf{D}$ ;  $v_D$  — текущая скорость воздуха на регуляторе  $D \in \mathbf{D}$ .

Тогда

$$\begin{split} \hat{D}_{F} &= D \left| \Delta v_{D} = \begin{cases} \min_{D \in \mathbf{D}_{F}^{\alpha}} (v_{D} - v_{D}^{*}), \Delta v^{F} \geq 0, \\ \max_{D \in \mathbf{D}_{F}^{\alpha}} (v_{D}^{*} - v_{D}), \Delta v^{F} < 0, \end{cases} \\ \Delta v^{F} &= \min_{D \in \mathbf{D}_{F}^{\alpha}} (v_{D} - v_{D}^{*})^{+} - \max_{D \in \mathbf{D}_{F}^{\alpha}} (v_{D}^{*} - v_{D})^{+}, \\ (x)^{+} &= \begin{cases} 0, x < 0, \\ x, x \geq 0. \end{cases} \end{split}$$

Под целевым регулятором по минимальному углу открытия вентилятора  $F \in \mathbf{F}$  понимается любой из регуляторов  $\breve{D}^F \in \mathbf{D}_F^{\alpha}$ , угол открытия которых является минимальным среди всех регуляторов в преимущественной зоне влияния вентилятора *F*.

Пусть  $\phi_{\min}^{F}$  — минимальный угол открытия регуляторов в преимущественной зоне влияния вентилятора  $F \in \mathbf{F}$ ;  $\phi_{D}$  — текущий угол открытия регулятора  $D \in \mathbf{D}$ .

Тогда

$$\breve{D}^F = D | \phi_D = \phi_{\min}^F, \quad \phi_{\min}^F = \min_{D \in \mathbf{D}_{c}^{\alpha}} \phi_D.$$

Правила управления вентиляторами остаются аналогичными случаю с одной вентиляторной установкой в сети с тем отличием, что недостаток / перерасход воздуха и полностью открытый регулятор определяются на множестве регуляторов, входящих в преимущественную зону влияния конкретного вентилятора.

В качестве входных переменных для нечеткого регулятора будут использоваться нечеткие переменные  $\Delta v^F$ ,  $\phi_{\min}^F$ . Как нечеткую выходную переменную обозначим  $\Delta \omega^F$  — приращение частоты вращения рабочего колеса вентилятора.

Для нечетких переменных установим следующие терм-множества:

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

$$\phi^{F}_{\min} - \{Z, S, L\},$$
  

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

Здесь и далее  $N^*$ ,  $P^*$  соответствуют значениям "отрицательное" и "положительное"; \*Z, S, L — значениям "близкое к нулю" / "нулевое", "малое", "большое". Например, обозначение PZ соответствует терму "положительное, близкое к нулю".

В отличие от случая одного вентилятора в качестве значений входных переменных будем использовать нечеткие множества второго порядка интервального типа. Их верхняя и нижняя граница определяются смещением вершины графика базового нечеткого множества первого порядка по оси ординат, которое определяется формулой

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

где  $\overline{x}, \sigma$  — параметры, определяющие центр и ширину графика функции.

Правила для управления вентилятором можно сформулировать следующим образом:

— если в совокупности на регуляторах в преимущественной зоне влияния вентилятора наблюдается избыток воздуха, необходимо уменьшить частоту вращения;

— если в совокупности на регуляторах в преимущественной зоне влияния наблюдается недостаток воздуха и при этом хотя бы один из регуляторов полностью открыт, необходимо увеличить частоту вращения;

— если в совокупности на регуляторах в преимущественной зоне влияния наблюдается недостаток воздуха, при этом ни один регулятор полностью не открыт, частота вращения остается неизменной (в этом случае регуляторы должны изменить свое положение).

Соответствующая база правил для управления вентилятором представлена в табл. 2: первая строка — значения отклонения скорости воздуха, первый столбец — значения минимального угла открытия.

ТАБЛИЦА 2. База правил для управления вентилятором

	N	NZ	Ζ	PZ	Р
Ζ	Ν	NZ	Ζ	PZ	Р
S	NZ	NZ	NZ	Ζ	Ζ
L	Ν	N	N	Ζ	Ζ

Для определения текущей зоны влияния вентиляторов на каждой итерации цикла управления определяется распределение приращения скорости воздуха в сети, вызванной конкретным вентилятором, по всем вентиляционным регуляторам.

Пусть  $\omega_{\max}^{F}$  — максимально возможная частота вращения вентилятора  $F \in \mathbf{F}$ ;  $\mu_{A_{k}^{\Delta \nu}}, \mu_{A_{k}^{\phi_{\min}}}$  —

функции принадлежности базовых нечетких множеств первого порядка входных переменных из антецедента (левой части) *k*-го правила.

Верхняя функция принадлежности для множеств переменной отклонения скорости воздуха для вентилятора  $F \in \mathbf{F}$  вычисляется как

$$\overline{\mu}_{A_{\mu}^{\Delta\nu}}(\Delta v^F) = \mu_F(\widehat{D}_F) \,\mu_{A_{\mu}^{\Delta\nu}}(\Delta v^F) \,. \tag{1}$$

Нижняя функция принадлежности для множеств переменной отклонения скорости воздуха для вентилятора  $F \in \mathbf{F}$  находится следующим образом:

$$\underline{\mu}_{A_{k}^{\Delta \nu}}(\Delta \nu^{F}) = \frac{\frac{\omega^{F}}{\omega_{\max}^{F}}}{\max_{F' \in \mathbf{F}} \frac{\omega^{F'}}{\omega_{\max}^{F'}}} \ \mu_{F}(\widehat{D}_{F}) \ \mu_{A_{k}^{\Delta \nu}}(\Delta \nu^{F}) \ .$$

$$(2)$$

Данный способ определения границ нечетких множеств позволяет сбалансировать частоту вращения вентиляторов с пересекающимися зонами влияния и обеспечить минимальную частоту вращения таких вентиляторов в совокупности. В результате в приоритете оказывается степень влияния над частотой вращения.

Верхняя функция принадлежности для множеств переменной минимального угла открытия для вентилятора  $F \in \mathbf{F}$  будет совпадать с соответствующей функцией принадлежности нечет-кого множества:

$$\overline{\mu}_{A_{\mu}^{\phi_{\min}}}(\phi_{\min}^{F}) = \mu_{A_{\mu}^{\phi_{\min}}}(\phi_{\min}^{F}).$$
(3)

Нижняя функция принадлежности для множеств переменной минимального угла открытия для вентилятора  $F \in \mathbf{F}$  имеет вид

$$\underline{\mu}_{A_k^{\phi_{\min}}}(\phi_{\min}^F) = \mu_F(\breve{D}_F) \ \mu_{A_k^{\phi_{\min}}}(\phi_{\min}^F) \ . \tag{4}$$

Существуют различные методы вычисления результирующего значения выходного параметра в системах нечеткого управления второго порядка, например алгоритм Карника – Менделя [21]. В нашем случае в силу структуры множеств второго порядка для вычисления результата будут использованы следующие формулы:

$$\begin{split} \Delta \boldsymbol{\omega}^{F} &= \frac{1}{2} \left( \frac{\sum_{k} \Delta \overline{\boldsymbol{\omega}}_{k}^{F} \ \overline{\boldsymbol{\mu}}_{B_{k}} (\Delta \boldsymbol{\omega}^{F})}{\sum_{k} \overline{\boldsymbol{\mu}}_{B_{k}} (\Delta \boldsymbol{\omega}^{F})} + \frac{\sum_{k} \Delta \overline{\boldsymbol{\omega}}_{k}^{F} \ \underline{\boldsymbol{\mu}}_{B_{k}} (\Delta \boldsymbol{\omega}^{F})}{\sum_{k} \overline{\boldsymbol{\mu}}_{B_{k}} (\Delta \boldsymbol{\omega}^{F})} \right), \\ \overline{\boldsymbol{\mu}}_{B_{k}} (\Delta \boldsymbol{\omega}^{F}) &= \overline{\boldsymbol{\mu}}_{A_{k}^{\Delta \nu}} (\Delta \boldsymbol{v}^{F}) \ \overline{\boldsymbol{\mu}}_{A_{k}^{\phi_{\min}}} (\boldsymbol{\phi}_{\min}^{F}), \\ \underline{\boldsymbol{\mu}}_{B_{k}} (\Delta \boldsymbol{\omega}^{F}) &= \underline{\boldsymbol{\mu}}_{A_{k}^{\Delta \nu}} (\Delta \boldsymbol{v}^{F}) \ \underline{\boldsymbol{\mu}}_{A_{k}^{\phi_{\min}}} (\boldsymbol{\phi}_{\min}^{F}), \end{split}$$

где  $\bar{\mu}_{B_k}, \underline{\mu}_{B_k}$  — вычисленные верхняя и нижняя функции принадлежности нечеткого множества выходной переменной *k*-го правила.

## РЕАЛИЗАЦИЯ ПРЕДЛОЖЕННОГО АЛГОРИТМА

Для оценки эффективности управления рассмотрим результаты имитационного моделирования существующего и предлагаемого алгоритмов управления главными вентиляторными установками в сопоставлении с оптимальным режимом (комбинацией частот вентиляторов и положений регуляторов), рассчитанным на модели вентиляционной сети. При этом для существующего алгоритма предварительно выделим три зоны влияния вентиляторов: две изолированные (Гор. 2 Запад и Гор. 2 Восток) и зону совместного влияния для вентиляторов Ствол № 4 и Центр (в соответствии с текущей реализацией).

Теоретически оптимальный вариант работы вентиляторных установок может быть получен при непересекающихся преимущественных зонах влияния — степени единица (каждый вентиляционный регулятор принадлежит зоне влияния только одного вентилятора). Однако для исключения колебательного эффекта примем степень равной 0.5. С одной стороны, это обеспечивает устойчивую работу элементов системы управления, с другой — не гарантирует оптимальности полученной конфигурации. Один и тот же регулятор может одновременно принадлежать различным преимущественным зонам влияния. В установившемся состоянии количество полностью открытых регуляторов может оказаться меньше теоретически возможного при заданных расходах воздуха.

На рис. 3 приведены результаты моделирования работы вариантов алгоритма по вентилятору Ствол № 4 и регулятору Гор. 3 Восток (для остальных элементов САУП отличия незначительны). Графики иллюстрируют итеративный процесс выхода на оптимальный режим работы без учета переходных процессов (переходные процессы подробно рассмотрены в [22]).



Рис. 3. Результаты моделирования изменения частоты ГВУ Ствол № 4 (*a*) и угла открытия регулятора Гор. 3 Восток (*б*): *1* — существующий, *2* — предлагаемый алгоритмы управления

Сводные данные по параметрам работы вентиляторных установок и регуляторов приведены в табл. 3 (данные по потребляемой мощности указаны с учетом КПД вентиляторов).

Распределение регуляторов по стабилизировавшимся преимущественным зонам влияния вентиляторов в процессе управления приведено в табл. 4. Следует обратить внимание, что три регулятора (Гор. 3 Восток, Гор. 3 Восток А и Гор. 3 Запад А) попадают одновременно в зоны влияния двух вентиляторов.

На рис. 4 приведены напорные характеристики вентиляторов для установившегося режима работы предлагаемого алгоритма.

С одной стороны, использование нечеткого подхода к определению преимущественной зоны влияния позволяет обеспечить сбалансированное проветривание направлений за счет обоих вентиляторов и стабилизацию зон влияния. С другой стороны, с помощью алгоритма невозможно в полной мере достичь полностью открытого положения максимально возможного количества регуляторов. Данный недостаток компенсируется применением аппарата нечеткой логики второго порядка. В результате увеличивается степень открытия регуляторов, находящихся в общей зоне преимущественного влияния (Гор. 3 Восток). Наличие полностью открытого регулятора в преимущественной зоне влияния является критерием для остановки снижения частоты вентилятора, поэтому применение данного подхода позволяет затормозить процесс открытия целевого регулятора, предоставляя возможность другим регуляторам уменьшить создаваемое дополнительное сопротивление.

Оптимальный режи		ый режим	Существующий алгоритм		Предлагаемый алгоритм	
ГВУ	Частота вращения, об./мин	Мощность, кВт	Частота вращения, об./мин	Мощность, кВт	Частота вращения, об./мин	Мощность, кВт
Центр	182	202.5	184	210.2	184	209.8
Ствол № 4	160	143.5	210	326.6	166	160.5
Гор. 2 Восток	694	99.8	703	103.6	703	103.5
Гор. 2 Запад	342	14.1	347	14.7	347	14.7
Суммарная мощность		459.9		655.1		488.5
АВД			Угол откр	ытия, град		
Гор. 3 Б-2	55		55		55	
Гор. 3 Восток Б	51		51		51	
Гор. 3 Запад А	45		45		45	
Гор. 2 Восток	<u>0</u>		<u>0</u>		<u>0</u>	
Гор. 2 Запад	<u>0</u>		<u>0</u>		<u>0</u>	
Гор. 3 Восток	<u>0</u>		<u>43</u>		<u>21</u>	
Гор. 3 Восток А	<u>0</u>		<u>0</u>		<u>0</u>	
Гор. 3 Запад	30		53		40	

ТАБЛИЦА 3. Установившиеся параметры ГВУ	и АВД для вариантов алгоритма управления
вентиляторами	

ТАБЛИЦА 4. Зоны влияния вентиляторов

ГВУ	Регуляторы в зоне преимущественного влияния	Самое труднопроветриваемое направление
Центр	Гор. 3 Восток Гор. 3 Восток А Гор. 3 Восток Б Гор. 3 Запад А Гор. 3 Б-2	Гор. 3 Восток А
Ствол № 4	Гор. 3 Восток Гор. 3 Восток А Гор. 3 Запад Гор.3 Запад-А	Гор. 3 Восток А
Гор. 2 Восток	Гор. 2 Восток	Гор. 2. Восток
Гор. 2 Запад	Гор. 2 Запад	Гор. 2. Запад



Рис. 4. Напорные характеристики ГВУ в установившемся режиме проветривания: *1* — Ствол № 4; 2 — Центр; *3* — Гор. 2 Запад; *4* — Гор. 2 Восток

Результаты моделирования демонстрируют, что предложенный алгоритм способствует достижению устойчивой конфигурации параметров работы вентиляторных установок и регуляторов, при которой обеспечивается наиболее близкий к минимально возможному расход электроэнергии (106% от минимального) без необходимости предварительных расчетов на модели вентиляционной сети.

# выводы

Разработан алгоритм автоматического управления вентиляторами в вентиляционных сетях с несколькими ГВУ, который обеспечит устойчивое энергоэффективное управление в условиях пересекающихся динамически изменяющихся преимущественных зон влияния вентиляторов без необходимости предварительного разграничения таких зон:

— применение нечеткого определения преимущественной зоны влияния вентилятора стабилизирует работу алгоритма управления;

— использование нечеткой логики второго порядка для задания входных переменных алгоритма управления приведет к более точному решению задачи поиска режима минимального энергопотребления вентиляторов в условиях невозможности определения полного набора самых труднопроветриваемых направлений.

С практической точки зрения предложенный алгоритм позволяет обеспечивать эффективное управление проветриванием рудника в условиях динамически изменяющейся потребности в проветривании отдельных рабочих зон без перенастройки управляющих параметров.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Hardcastle S., Kocsis C., and Lacroix R. Strategic mine ventilation control: a source of potential energy savings. Proc. Montreal Energy Mines, Montreal, Canada, 2007. P. 255–263.
- 2. Acuña E., Alvarez R., and Hurtado J. Updated ventilation on demand review: implementation and savings achieved. Proc. 1<sup>st</sup> Int. Conf. Underground Min., Santiago, Chile, 2016. P. 606–617.
- **3.** Allen C. L. and Tran T. T. Ventilation-on-demand control system's impact on energy savings and air quality, Proc. CIM Canadian Inst. Min. Metall. Pet., Montreal, 2011. P. 1–9.
- **4.** Семин М. А., Гришин Е. Л., Левин Л. Ю., Зайцев А. В. Автоматизированное управление вентиляцией шахт и рудников. Проблемы, современный опыт, направления совершенствования // Зап. горн. ин-та. 2020. Т. 246. С. 623–632.
- 5. Semin M. A., Levin L.Y., and Maltsev S.V. Development of automated mine ventilation control systems for belarusian potash mines, Arch. Min. Sci., 2020, Vol. 65, No. 4. P. 803–820.

- 6. Поспелов Д. А., Зайцев А. В., Гришин Е. Л. Совершенствование системы вентиляции рудника "Северный" с учетом взаимовлияния главных вентиляторных установок // Актуальные проблемы повышения эффективности и безопасности эксплуатации горношахтного и нефтепромыслового оборудования. — 2018. — Т. 1. — С. 209–215.
- **7.** Гришин Е. Л., Накаряков Е. В., Трушкова Н. А., Саникович А. Н. Опыт внедрения систем динамического управления проветриванием рудников // Горн. журн. 2018. № 8. С. 103–108.
- 8. Круглов Ю. В., Семин М. А. Совершенствование алгоритма оптимального управления проветриванием вентиляционных сетей сложной топологии // Вестн. ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело. — 2013. — Т. 12. — № 9. — С. 106–115.
- **9.** Allen C. and Keen B. Ventilation on demand (VOD) project Vale Inco Ltd. Coleman Mine, Proc. 12<sup>th</sup> US North American Mine Ventilation Symposium, Reno, USA, 2009. P. 45–49.
- **10.** De Vilhena Costa L. and Margarida J. Cost-saving electrical energy consumption in underground ventilation by the use of ventilation on demand, Min. Technol., 2019, Vol. 129. P. 1–8.
- **11.** Acuña E. and Allen C. Ventilation control system implementation and energy consumption reduction at Totten Mine with Level 4 Tagging and future plans, Proc. 1<sup>st</sup> Int. Conf. Underground Min. Technol., Sudbury, Canada, 2017. P. 89–95.
- **12.** Bartsch E., Laine M., and Andersen M. The application and implementation of optimized mine ventilation on demand (OMVOD) at the Xstrata Nickel Rim South Mine, Sudbury, Ontario, Proc. 13<sup>th</sup> US Mine Ventilation Symposium, MIRARCO, Sudbury, Canada, 2010. P. 171–179.
- **13.** Acuña E. and Lowndes I. A Review of primary mine ventilation system optimization, Interfaces, 2014, Vol. 44. P. 163–175.
- Sjöström S., Klintenäs E., Johansson P., and Nyqvist J. Optimized model-based control of main mine ventilation air flows with minimized energy consumption, Int. J. Min. Sci. Technol., 2020. Vol. 30. P. 533-539.
- 15. Круглов Ю. В., Левин Л. Ю., Киряков А. С., Бутаков С. В., Шагбутдинов Р. И. Применение системы автоматического оптимального управления проветриванием в Березовском руднике ОАО "Беларуськалий" // Горн. журн. 2013. № 6. С. 61–64.
- **16.** Казаков Б. П., Шалимов А. В., Киряков А. С. К вопросу энергосбережения проветривания рудников // ФТПРПИ. — 2013. — № 3. — С. 139–147.
- 17. Круглов Ю. В., Семин М. А., Зайцев А. В. Математическое моделирование работы оптимальных систем автоматического управления проветриванием подземных рудников // Изв. ТГУ. Науки о Земле. 2011. № 2. С. 116–126.
- Levin L. Y. and Semin M. A. Conception of automated mine ventilation control system and its implementation on Belarussian potash mines, Proc. 16<sup>th</sup> North American Mine Ventilation Symposium, Colorado, USA, 2017. P. 1–8.
- **19. Kashnikov A. V. and Levin L. Y.** Fan and regulators fuzzy control in mine ventilation systems, Proc. 22<sup>nd</sup> Int. Conf. Soft Computing Measurements (SCM), St. Petersburg, Russia, 2019. P. 85–88.
- 20. Mendel J., John R., and Liu F. Interval type-2 fuzzy logic systems made simple, IEEE Trans. Fuzzy Systems, 2007, Vol. 14. P. 808–821.
- **21.** Karnik N. and Mendel J. Centroid of a type-2 fuzzy set, Inf. Sci., 2001, Vol. 132, No. 1–4. P. 195–220.
- 22. Круглов Ю. В., Левин Л. Ю., Зайцев А. В. Моделирование переходных процессов в вентиляционных сетях подземных рудников // ФТПРПИ. — 2011. — № 5. — С. 100–108.

Поступила в редакцию 20/IV 2022 После доработки 21/VI 2022 Принята к публикации 30/VI 2022