ISSN 2411-3336; e-ISSN 2541-9404

ЗАПИСКИ ГОРНОГО ИНСТИТУТА
Journal of Mining Institute
Сайт журнала: pmi.spmi.ru



Научная статья

Стратегия управления проветриванием рудника в оптимальном режиме с использованием аппарата нечеткой логики

А.В.КАШНИКОВ ✉, **Ю.В.КРУГЛОВ**
Горный институт Уральского отделения РАН, Пермь, Россия

Как цитировать эту статью: Кашников А.В., Круглов Ю.В. Стратегия управления проветриванием рудника в оптимальном режиме с использованием аппарата нечеткой логики // Записки Горного института. 2023. Т. 262. С. 594-605. EDN BGJLGA. DOI: 10.31897/PMI.2022.75

Аннотация. Рассматриваются вопросы, которые связаны с повышением эффективности систем автоматического управления проветриванием рудников, обеспечивающих регулирование подачи воздуха в шахту в соответствии с потребностью. В ходе испытаний такой системы в руднике 3РУ ОАО «Беларуськалий» выявлены недостатки ее существующей реализации, связанные с некорректным выбором самого труднопроветриваемого направления. Продемонстрированы возможности реализации стратегии управления, при которой система автоматически определяет оптимальную конфигурацию режимов работы вентиляторов и регуляторов. В качестве альтернативы реализованным алгоритмам предлагается использование аппарата нечеткого управления для учета нелинейности зависимости входных и выходных параметров вентиляционного оборудования и задания условий оптимального режима работы системы в декларативной форме. Для оценки эффективности предлагаемого подхода проанализированы данные имитационного моделирования текущего режима проветривания и перехода из одного режима проветривания в другой с сопоставлением с фактическими данными работы системы. Результаты моделирования показывают, что применение модернизированной схемы управления вентилятором главного проветривания на основе нечеткой логики в рамках реализации систем автоматического управления проветриванием позволяет исключить возможность дефицита свежего воздуха на регулируемых направлениях его движения, а также избыточное энергопотребление вентилятора главного проветривания.

Ключевые слова: система автоматического управления проветриванием; нечеткое управление; ПИД-регулирование; главная вентиляторная установка; аэродинамическое сопротивление; воздушно-депрессионная съемка; рудник

Благодарность. Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и образования РФ в рамках соглашения по Государственному заданию № 075-03-2021-374 от 29 декабря 2020 г. (№ 1021062110595-3-1.5.7).

Поступила: 21.01.2022 ***Принята: 21.07.2022*** ***Онлайн: 16.03.2023*** ***Опубликована: 28.08.2023***

Введение. Подход к вентиляции подземных рудников (вентиляция по требованию – ventilation-on-demand) [1-3] предполагает построение систем автоматического управления проветриванием (САУП). Системы позволяют регулировать объем подаваемого в шахту воздуха в зависимости от текущих потребностей и, как следствие, снижать энергопотребление вентиляторов [4, 5]. К САУП предъявляются следующие требования [6]:

• обеспечивать требуемые расходы воздуха в заданных точках распределенной вентиляционной сети в соответствии с технологическим регламентом по проветриванию подземных горных выработок горнодобывающего предприятия;

• обеспечивать минимально возможное для обеспечения заданных условий проветривания энергопотребление главной вентиляторной установки (ГВУ);

• не допускать колебаний параметров работы оборудования во время переходных процессов;

• продолжительность смены режимов проветривания не должна превышать интервал изменения потребности в проветривании.

Модель вентиляционной сети рудника представляет собой ориентированный граф, каждая ветвь которого характеризуется аэродинамическим сопротивлением. В случае установки в ветви

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

EDN BGJLGA
DOI: 10.31897/PMI.2022.75

Записки Горного института. 2023. Т. 262. С. 594-605
© А.В.Кашников, Ю.В.Круглов, 2023

вентиляционного регулятора (например, автоматической вентиляционной двери – АВД) создается дополнительное сопротивление. В ветвях могут находиться источники тяги – вентиляционные установки, создающие перепад давления.

Критерий оптимальности проветривания можно сформулировать следующим образом:

$$\begin{cases} Q_i = Q_i^{\text{тр}} \; \forall i = 1 \ldots K; \\ N_{\text{ГВУ}}\left(\omega, \phi_1, \ldots, \phi_K\right) \to \min \text{ при } \omega \to \omega^{\text{опт}}, \phi_i \to \phi_i^{\text{опт}} \; \forall i = 1 \ldots K, \end{cases} \quad (1)$$

где Q_i, $Q_i^{\text{тр}}$ – фактический и требуемый расход воздуха на i-м вентиляционном регуляторе соответственно; $N_{\text{ГВУ}}$ – потребляемая мощность ГВУ; ω – частота вращения ГВУ; ϕ_i – угол открытия вентиляционного регулятора; $\omega^{\text{опт}}, \phi_i^{\text{опт}}$ – оптимальные значения частоты вращения ГВУ и угла открытия вентиляционных регуляторов для заданных условий; K – количество вентиляционных регуляторов.

Первое условие в (1) означает соответствие фактического воздушного потока в регулируемых участках вентиляционной сети нормативным требованиям, обеспечивающим безопасные и комфортные условия труда. Второе условие указывает на зависимость энергопотребления вентилятора не только от его собственных параметров работы (частоты вращения), но и от положения вентиляционных регуляторов. Один и тот же расход воздуха на проветриваемых участках рудника может обеспечиваться множеством комбинаций их углов открытия, каждая из которых приводит к разному потреблению энергии вентилятором.

Задача поиска оптимального режима проветривания заключается в нахождении таких углов открытия АВД и частоты вращения ГВУ, при которых требуемые расходы воздуха на вентиляционных регуляторах будут обеспечиваться, а энергопотребление вентилятора будет минимальным. Вентиляционные регуляторы (АВД) должны создавать минимально возможное дополнительное аэродинамическое сопротивление в выработках, в которых они установлены, при обеспечении требуемого воздухораспределения в руднике.

Подход, который основан на модели вентиляционной сети рудника, представляемой ориентированным графом, является наиболее общим к решению задачи оптимизации. Данные с датчиков текущего расхода воздуха в контрольных точках вентиляционной сети передаются в компьютерную модель вентиляционной сети рудника. Если между требуемыми и фактическими значениями расхода воздуха обнаружено отклонение, с помощью модели вентиляционной сети рассчитывается воздухораспределение для определения новых параметров работы средств регулирования. Определенные в результате решения задачи воздухораспределения параметры передаются в систему управления, которая устанавливает вычисленные значения частоты вращения ГВУ и положений АВД. Процесс повторяется каждый раз при рассогласовании заданных и фактических расходов воздуха в контрольных точках.

В реальных условиях эксплуатации рудников данный подход обладает рядом недостатков. Во-первых, он требует установки большого количества датчиков расхода воздуха, достаточного для калибровки модели, что для подземной сети выработок требует значительных затрат на обустройство линий связи и последующее техническое обслуживание. Во-вторых, ввиду постоянного развития горных работ модель вентиляционной сети требует постоянного обновления в ручном режиме (изменяется протяженность существующих горных выработок, выводятся из эксплуатации отработанные участки, вводятся новые) [7]. Такая актуализация требует регулярных замеров специалистами рудника и отражения всех изменений в модели, что увеличивает влияние человеческого фактора на качество управления.

Существующие реализации систем управления вентиляционным оборудованием в рамках проектов вентиляции по требованию (Garpenberg, Boliden, Швеция [8]; рудники ЮАР [9]; El Teniente, Чили [10]; Totten Mine, Vale Inco Ltd, Канада [11] и др.) отличаются относительной компактностью рудников, отрабатывающих полиметаллические и железорудные месторождения. Однако для рудников на территории ЕАЭС (в частности, для калийных месторождений) характерны бóльшие площади

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

EDN BGJLGA
DOI: 10.31897/PMI.2022.75

шахтных полей (более 100 км^2), объемы подаваемого в шахту воздуха (более 50 000 м^3/мин) и значительное количество одновременно действующих рабочих зон (добычных участков), сильно удаленных друг от друга. При этом высокая интенсивность горных работ, сопряженная с большой производительностью рудников (до 20 млн т руды в год), приводит к постоянному изменению конфигурации выработок рудника и, соответственно, вентиляционной сети. Данные особенности усложняют задачу оперативного перераспределения воздуха при минимизации энергопотребления вентилятора главного проветривания.

В подходе к построению систем оптимального управления проветриванием [12-14], разработанном в ГИ УрО РАН, исключается трансляция оперативных данных о фактическом воздухораспределении в модель вентиляционной сети. При этом управляющий алгоритм системы корректирует задания средствам регулирования на основе данных о текущих расходах воздуха непосредственно на АВД и ГВУ без необходимости пересчета общего воздухораспределения в руднике на модели топологии вентиляционной сети [15]. Установлено, что необходимым условием оптимального режима проветривания является наличие хотя бы одного вентиляционного регулятора в полностью открытом состоянии (т.е. положении, при котором дополнительное сопротивление в соответствующей горной выработке равно нулю). Текущие реализации систем построены на основе управления вентиляционным оборудованием (АВД и ГВУ) при помощи ПИД-регулирования [16]. Широкое распространение в различных областях промышленности получило использование нечетких контроллеров [17].

Традиционное применение аппарата нечеткой логики при реализации систем автоматического управления сводится к решению задачи нелинейного преобразования входных сигналов в выходной при следующих условиях: зависимость выходных параметров от входных является неизвестной либо сложновычислимой; существуют значительные динамические возмущения и зашумленность измерений; постоянная изменчивость самой системы, из-за чего необходима постоянная коррекция параметров управления.

Нечеткие множества первого порядка [18] позволяют учесть нелинейность взаимосвязи параметров, а нечеткие множества второго порядка [19, 20] – преодолеть проблемы, связанные с неопределенностью измерений входных параметров, а также параметров модели. Использование нечетких контроллеров призвано уменьшить продолжительность выхода системы в требуемое устойчивое состояние. Независимые от конкретной задачи алгоритмы настройки нечетких контроллеров [21-23] позволяют корректировать параметры нечеткого управления вслед за изменениями управляемой системы. База правил для нечеткого регулятора может быть как тривиальной (например, малой ошибке управления соответствует малая реакция системы), так и содержать более сложную логику управления, задаваемую экспертом. Существуют методы автоматической коррекции базы правил, позволяющие добиться желаемых характеристик работы оборудования [24]. Одним из применений нечеткого управления является определение коэффициентов для ПИД-регулятора [25, 26]. Нечеткие контроллеры применяются в широком круге областей, в том числе при реализации управления в гидравлических системах [27, 28] и системах управления вентиляцией (поддержание требуемых параметров воздуха в теплицах [29] и реанимациях [30], проветривание промышленных помещений [31]).

Цель статьи – реализация стратегии управления САУП, предполагающей обеспечение требуемых расходов воздуха на вентиляционных регуляторах при минимизации энергопотребления главной вентиляторной установки на основе задания условий оптимальности непосредственно в базе правил нечеткого регулятора.

Методология. Для анализа работы существующей реализации системы автоматического управления проветриванием проведен ряд испытаний в условиях рудника 3РУ ОАО «Беларуськалий» [32, 33]. Это позволяет оценить скорость перехода системы из одного режима проветривания в другой, ее реакцию на возмущения, устойчивость работы оборудования и эффективность ее функционирования.

САУП рудника состоит из одной поверхностной ГВУ, включающей основной и резервный вентиляторы, и шести автоматических регуляторов жалюзийного типа (АВД), установленных на каждом из главных направлений («Север», «Восток», «Юг») отрабатываемых горизонтов (–420 и –620 м) [34] (рис.1).

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

EDN BGJLGA
DOI: 10.31897/PMI.2022.75

Записки Горного института. 2023. Т. 262. С. 594-605
© А.В.Кашников, Ю.В.Круглов, 2023

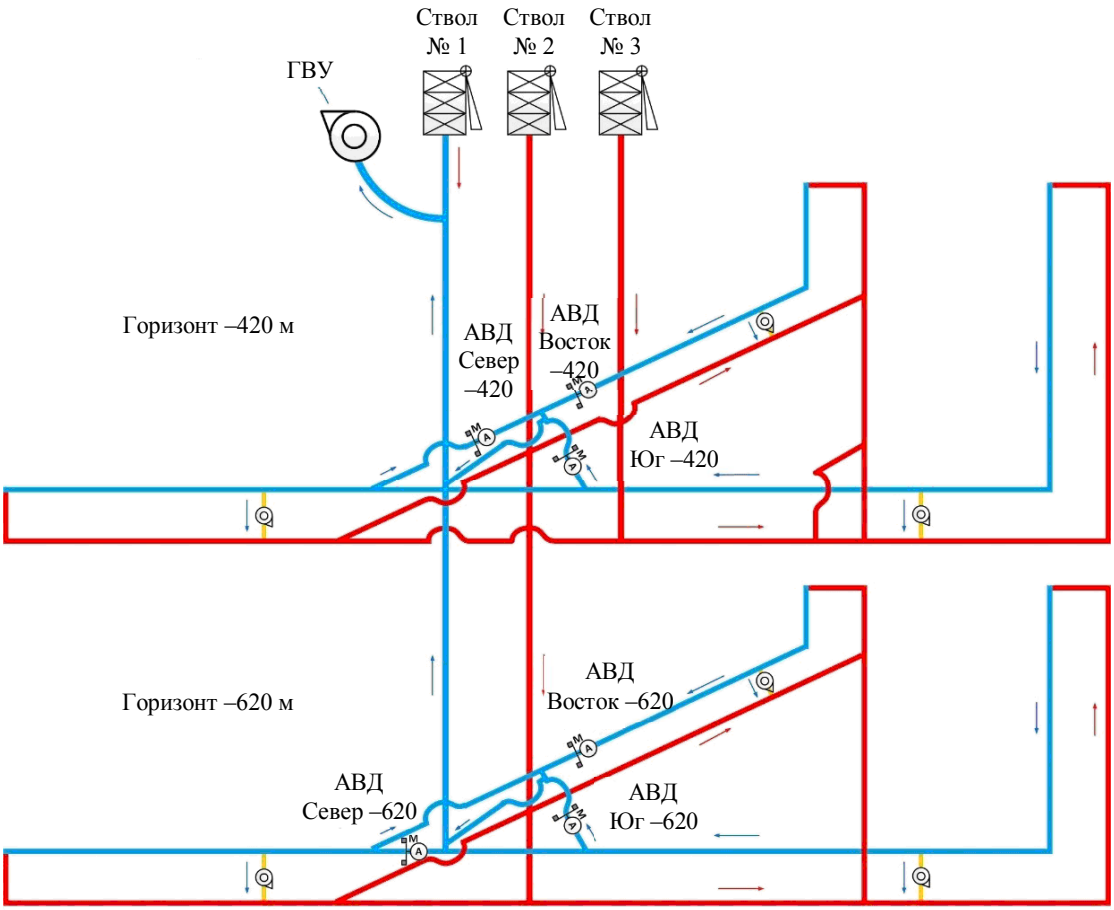


Рис.1. Принципиальная схема проветривания рудника ЗРУ ОАО «Беларуськалий» с указанием расположения ГВУ и АВД

	ДОБЫЧА						РЕМОНТ					
	ШВУ вкл.			ШВУ выкл.			ШВУ вкл.			ШВУ выкл.		
	АВД, м³/мин	ШВУ, м³/мин	Коэффициент рециркуляции, %	АВД, м³/мин	ШВУ, м³/мин	Удаленная панель, м³/мин	АВД, м³/мин	ШВУ, м³/мин	Коэффициент рециркуляции, %	АВД, м³/мин	ШВУ, м³/мин	Удаленная панель, м³/мин
–420 м												
Север	**500**	**500**	**0.00**	**3480**	**500**	**0**	**500**	**500**	**0.00**	**2650**	**500**	**1000**
Восток	**500**	**500**	**0.00**	**1740**	**500**	**0**	**500**	**500**	**0.00**	**1420**	**500**	**270**
Юг	**4480**	**1500**	**0.00**	**6000**	**500**	**0**	**2630**	**1500**	**0.00**	**4640**	**500**	**668**
–620 м												
Север	**5040**	**1600**	**0.00**	**4750**	**500**	**0**	**4770**	**1500**	**0.00**	**3550**	**500**	**1000**
Восток	**1920**	**1700**	**0.00**	**4030**	**500**	**0**	**700**	**1710**	**0.43**	**2560**	**500**	**900**
Юг	**4380**	**1800**	**0.00**	**6000**	**500**	**0**	**2650**	**1800**	**0.00**	**5150**	**500**	**900**

Рис.2. Фрагмент видеограммы интерфейса диспетчера для управления режимами работы САУП

Управление проветриванием рудника состоит в изменении углов поворота жалюзийных регуляторов в зависимости от отклонения заданного расхода воздуха от фактического (если расход воздуха больше требуемого, то регулятор прикрывается, увеличивая аэродинамическое сопротивление выработки, в которой он установлен, и наоборот), а также изменении производительности ГВУ (за счет изменения частоты вращения рабочего колеса). Для разных режимов работы рудника для каждого регулятора задается требуемый расход воздуха (рис.2). Диспетчер в начале каждой

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

EDN BGJLGA
DOI: 10.31897/PMI.2022.75

смены выбирает необходимый режим для каждой АВД в зависимости от того, ведутся на направлении добычные работы (большой расход воздуха) или ремонтные.

Требуемая подача вентилятора главного проветривания, регулируемая частотой вращения ω, определяется как сумма заданных расходов по всем регуляторам $Q_{\Sigma}^{\text{тр}}$ и установленной величины внешних утечек $Q^{\text{ут}}$ (коэффициент утечек рассчитывается регулярными замерами службой вентиляции). Рассчитанная подача вентилятора корректируется на величину недостатка/избытка воздуха $\Delta Q_{\text{гл}}$ на «главном» направлении, на котором значение угла открытия фиксируется в соответствии с предустановленным значением $\phi_{\text{гл}}$ (рис.3).

При оптимальном режиме проветривания «главное» направление соответствует самому труднопроветриваемому направлению, на котором регулятор должен находиться в полностью открытом положении. Однако в силу того, что каждый регулятор самостоятельно определяет степень своего открытия в зависимости от заданной установки расхода воздуха, а также технической сложностью определения аэродинамического сопротивления соответствующей выработки в текущий момент времени, «главное» направление определяется из максимального значения требуемого расхода воздуха либо задается оператором вручную. Неправильно выбранное «главное» направление приводит к одной из ситуаций: вентилятор главного проветривания потребляет излишнюю электроэнергию, так как общая конфигурация положения регуляторов создает избыточное сопротивление в вентиляционной сети; на одном из направлений (не «главном») возникает недостаток воздуха, когда соответствующий регулятор находится в полностью открытом положении.

С целью определения возможностей для усовершенствования схемы управления САУП проведены испытания, позволяющие оценить возможность автоматического определения наиболее труднопроветриваемого направления в цикле управления САУП. На рис.4 представлены характеристики ГВУ и АВД, установленные в исследуемом руднике.

В рамках проведения испытаний регулирование производительности вентилятора главного проветривания осуществлялось в ручном режиме с помощью ступенчатого изменения частоты вращения рабочего колеса ГВУ, приводящего к перераспределению воздуха в шахте и автоматическому открытию регулятора на самом труднопроветриваемом направлении. В начале испытаний в качестве «главного» направления выбрано «–620 Юг» (что соответствовало самому труднопроветриваемому направлению для текущего режима проветривания согласно результатам моделирования), для которого заданный расход воздуха был изменен с 4620 до 2770 м^3/мин.

Последовательное снижение частоты вращения ГВУ (рис.5) приводило к перенастройке положения дверей, что увеличивало фактическую подачу ГВУ на каждом отрезке фиксированного значения частоты вращения (за счет снижения аэродинамического сопротивления сети).

Динамика положения АВД демонстрирует сначала их прикрытие (когда фактический расход на вентиляторе был избыточным), затем в процессе снижения частоты вращения вентилятора, приводящего к недостатку воздуха на некоторых направлениях, постепенное открытие до уровня, соответствующего оптимальному положению. Колебания регулятора «АВД –620 Юг» обусловлены запаздывающим влиянием изменения режима работы вентилятора на удаленные точки вентиляционной сети (т.е. регулятор успевает отработать изменение уставки самостоятельно, прежде чем окажет влияние вентилятор). В результате самым труднопроветриваемым направлением стало «–420 Юг», автоматический регулятор на котором перешел в полностью открытое (технически возможное) положение.

По результатам испытаний можно сделать вывод, что система автоматического управления проветриванием может самостоятельно определить самое труднопроветриваемое направление, т.е. направление с наибольшим аэродинамическим сопротивлением, на котором регулятор будет находиться в максимально открытом состоянии. В случае недостатка воздуха в вентиляционной сети увеличение подаваемого в рудник расхода воздуха может быть достигнуто только за счет изменения положения регуляторов без увеличения частоты вращения вентилятора, если ни один из регуляторов не находится в полностью открытом положении.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

EDN BGJLGA
DOI: 10.31897/PMI.2022.75

Записки Горного института. 2023. Т. 262. С. 594-605
© А.В.Кашников, Ю.В.Круглов, 2023

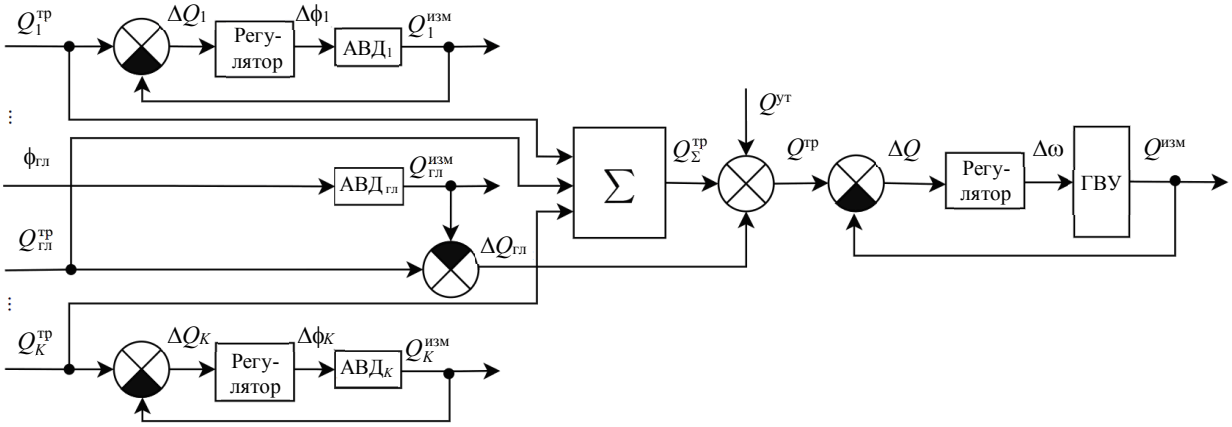


Рис.3. Информационная структура существующей САУП

$Q_i^{изм}$, $Q^{изм}$ – измеренный (фактический) расход воздуха на *i*-й АВД и ГВУ; $Q_i^{тр}$, $Q^{тр}$ – требуемый (заданный) расход воздуха на *i*-й АВД и ГВУ; ΔQ_i, ΔQ – отклонение расхода воздуха на *i*-й АВД и ГВУ; $Q_{гл}^{изм}$, $Q_{гл}$ – измеренный (фактический) расход воздуха и его отклонение на АВД «главного» направления; $\Delta\phi_i$ – вычисленное приращение угла *i*-й АВД; $\Delta\omega$ – вычисленное приращение частоты вращения ГВУ

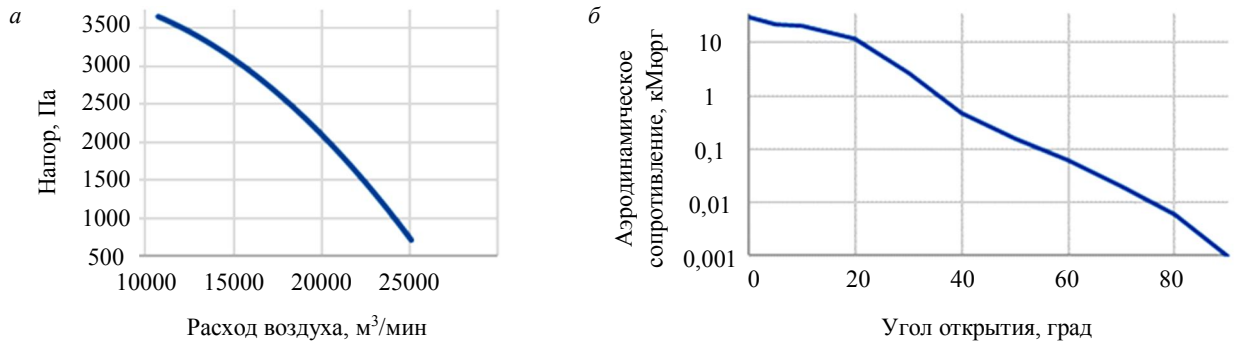


Рис.4. Зависимость напора от расхода воздуха ГВУ (*а*) и аэродинамического сопротивления регулятора от угла его открытия (*б*)

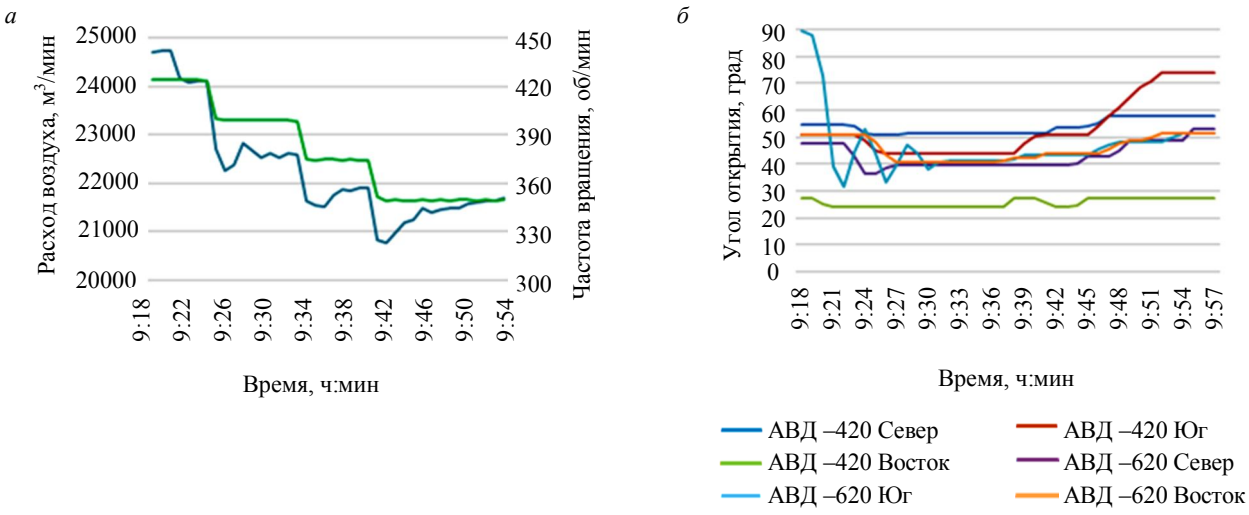


Рис.5. Расход воздуха на ГВУ (*а*) при одновременном изменении углов открытия АВД (*б*)

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2023. Т. 262. С. 594-605
EDN BGJLGA
DOI: 10.31897/PMI.2022.75
© А.В.Кашников, Ю.В.Круглов, 2023

Для реализации стратегии управления, позволяющей компенсировать побочные эффекты исключения предопределения самого труднопроветриваемого направления, целесообразно применить аппарат нечеткого управления ввиду следующих обстоятельств:

• изменение положения регулятора на самом труднопроветриваемом направлении приводит к изменению аэродинамического сопротивления вентиляционной сети, которое нелинейным образом влияет на расход воздуха, обеспечиваемый вентилятором;

• использование лингвистических переменных и базы продукционных правил, определяемых в терминах предметной области, позволяет отразить критерии выбора самого труднопроветриваемого направления.

Рассмотрим математическое описание модели управления вентилятором на основе нечеткой логики. Необходимо установить нечеткие переменные ΔQ и $\phi_{\max}$ в качестве входных параметров для определения приращения частоты вентилятора:

$$\Delta Q = \min_{i=1\ldots K}\left(Q_i^{\text{r}} - Q_i\right)^+ - \max_{i=1\ldots K}\left(Q_i^{\text{r}} - Q_i\right)^+; \tag{2}$$

$$\left(x\right)^+ = \begin{cases} 0, & x < 0 \\ x, & x \ge 0 \end{cases},$$

где ΔQ – недостаток/перерасход воздуха, определяемый как разность между минимальным перерасходом и максимальным недостатком воздуха по всем регуляторам.

Выбор максимального недостатка и минимального избытка расхода по всем регуляторам в выражении (2) обусловлен необходимостью обеспечить фактический расход не менее заданного, так как соблюдение нормативных требований является приоритетной задачей управления;

$$\phi_{\max} = \max_{i=1\ldots K} \phi_i, \tag{3}$$

где $\phi_{\max}$ – максимальный угол открытия среди всех регуляторов.

Для нечетких переменных определим следующие терм-множества:

$$\Delta Q - \{NL,\ NS,\ Z,\ PS,\ PL\};$$

$$\phi_{\max} - \{S, M, L\};$$

$$\Delta\omega - \{NL, NS, Z, PS, PL\},$$

где $\Delta\omega$ – приращение частоты вращения рабочего колеса вентилятора; N, P – «отрицательное» и «положительное», Z, S, M, L – «нулевое», «малое», «среднее», «большое». Например, обозначение NL соответствует терму «отрицательное большое».

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

$$\mu\left(x\right) = e^{-\left(\frac{x-\bar{x}}{\sigma}\right)^2}, \tag{4}$$

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

При наличии одного вентилятора главного проветривания правила выбора оптимального режима проветривания для заданных расходов воздуха можно сформулировать следующим образом: на каждом регуляторе должен обеспечиваться заданный расход воздуха; хотя бы один из регуляторов должен быть полностью открыт (т.е. не создавать дополнительное аэродинамическое сопротивление).

Правила для управления вентилятором можно сформулировать следующим образом:

• если в совокупности на регуляторах наблюдается избыток воздуха, необходимо уменьшить частоту вращения;

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

EDN BGJLGA
DOI: 10.31897/PMI.2022.75

Записки Горного института. 2023. Т. 262. С. 594-605
© А.В.Кашников, Ю.В.Круглов, 2023

• если наблюдается недостаток воздуха, при этом хотя бы один из регуляторов полностью открыт, необходимо увеличить частоту вращения;

• если наблюдается недостаток воздуха и при этом ни один регулятор полностью не открыт, частота вращения остается неизменной.

Если в системе наблюдается недостаток воздуха, но при этом ни один из регуляторов полностью не открыт, регуляторы изменяют свое положение при постоянной частоте вращения вентилятора. В ходе испытаний продемонстрировано, что в этом случае общий расход воздуха, подаваемого в шахту, увеличивается. Такую передачу управления с вентилятора на регуляторы можно отразить в логике базы правил.

Рассмотрим базы правил нечеткого вывода для определения требуемого приращения частоты вращения рабочего колеса вентилятора (табл.1) [35]. Заголовки строк и столбцов соответствуют множествам входных переменных (ΔQ и $\phi_{\max}$), входящих в антецеденты правил, значения на пересечении строк и столбцов соответствуют множествам выходной переменной из консеквента правил.

Таблица 1

Базы правил для управления вентилятором

	NL	***NS***	***Z***	***PS***	***PL***
L	*NL*	*NS*	*Z*	*PS*	*PL*
M	*NS*	*NS*	*NS*	*Z*	*Z*
S	*NL*	*NL*	*NL*	*Z*	*Z*

Правило, соответствующее первым строке и столбцу, выглядит следующим образом: если ΔQ – отрицательное большое, $\phi_{\max}$ – большой, то $\Delta\omega$ – отрицательное большое.

Выделенные красным цветом ячейки соответствуют ситуации, когда ни один из регуляторов полностью не открыт, при этом в системе наблюдается совокупный недостаток воздуха. В этом случае сигналы управления передаются на регуляторы: частота вентилятора остается неизменной, а регуляторы должны перестроиться таким образом, чтобы снизить общее сопротивление сети для увеличения общего расхода подаваемого в шахту воздуха при той же частоте вращения вентилятора.

Степень истинности k-го правила вычисляется по формуле

$$\mu_{B_k}(\Delta\omega) = \mu_{A_k^{\Delta Q}}(\Delta Q)\mu_{A_k^{\phi_{\max}}}(\phi_{\max}), \tag{5}$$

где $\mu_{A_k^{\Delta Q}}$, $\mu_{A_k^{\phi_{\max}}}$ – функции принадлежности нечетких множеств входных переменных; μ_{B_k} – функция принадлежности нечеткого множества выходной переменной.

Для вычисления результирующего значения выходной переменной используется формула

$$\Delta\omega = \frac{\sum_k \overline{\Delta\omega}_k \mu_{B_k}(\Delta\omega)}{\sum_k \mu_{B_k}(\Delta\omega)}, \tag{6}$$

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

Формулы (5) и (6) представляют собой один из вариантов реализации нечеткого логического вывода, не зависящего от решения конкретной задачи, в котором для вычисления функций принадлежности каждого правила используется операция произведения. Результирующее значение выходной переменной определяется как средневзвешенное значение степеней принадлежности всех правил.

На рис.6 показана модернизированная схема управления САУП: сначала АВД изменяют угол открытия в соответствии с текущим рассогласованием расхода воздуха ΔQ_i, затем ГВУ изменяет частоту вращения в соответствии с приведенной моделью нечеткого управления. Измеренные в результате совокупного изменения угла открытия каждой АВД и частоты вращения ГВУ значения

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2023. Т. 262. С. 594-605
EDN BGJLGA
DOI: 10.31897/PMI.2022.75
© А.В.Кашников, Ю.В.Круглов, 2023

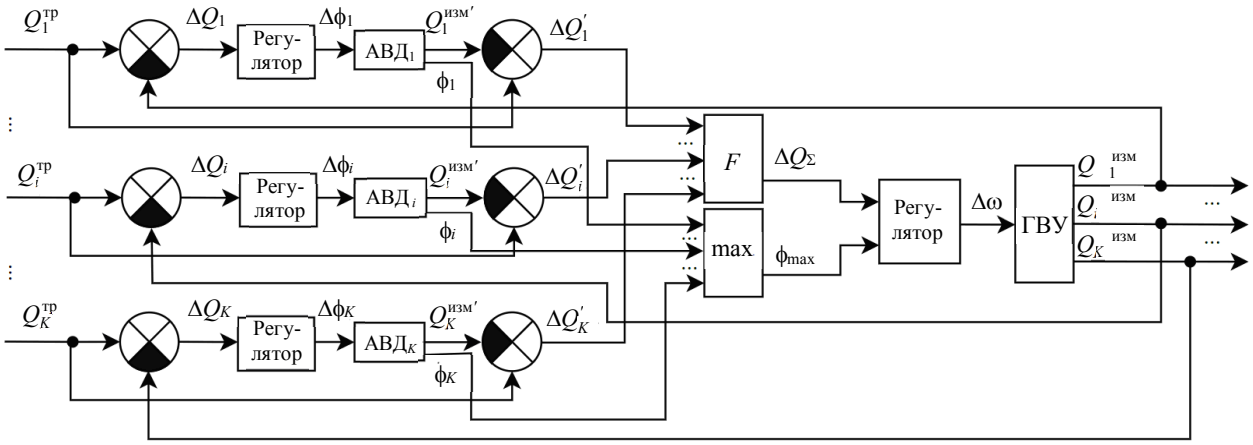


Рис.6. Схема управления САУП с автоматическим выходом на оптимальный режим проветривания
$\Delta Q_i'$ – отклонение расхода воздуха на *i*-й АВД (до изменения частоты ГВУ); $Q_i^{\text{изм}'}$, $Q_i^{\text{изм}}$ – измеренный (фактический) расход воздуха на *i*-й АВД (до изменения частоты ГВУ)

расхода воздуха $Q_i^{\text{изм}}$ используются для расчета ошибки управления на АВД. В схеме исключается предварительный выбор самого труднопроветриваемого направления, на котором, согласно логике регулятора ГВУ (табл.1), соответствующая АВД автоматически перейдет в полностью открытое состояние. Функция F определяется в соответствии с формулой (2) и рассчитывает суммарное отклонение ΔQ_Σ по всем АВД.

Обсуждение. Для оценки эффективности предлагаемых алгоритмов смоделирована работа САУП в разработанном модуле для аналитического комплекса «АэроСеть» на вентиляционной сети рудника, построенной по результатам воздушно-депрессионной съемки, и результаты моделирования сопоставлены с фактическими данными работы оборудования в следующих ситуациях: текущий режим проветривания с заданными расходами воздуха; переход из одного режима проветривания в другой, сопровождающийся изменением заданных расходов воздуха на вентиляционных регуляторах.

Для моделирования текущего режима проветривания использовались данные работы САУП за 18 декабря 2019 г.

Таблица 2

Фактические и модельные расходы воздуха для текущего режима проветривания

АВД	Заданный расход, м³/мин	Фактический расход, м³/мин	Отклонение от заданного расхода, %	Модельный расход, м³/мин	Отклонение от заданного расхода, %
–420 Восток	1420	1190	**–16,2**	1421	0,07
–420 Север	1830	1790	–2,19	1830	0,0
–420 Юг	4590	5439	**18,5**	4596	0,13
–620 Восток	3300	3259	–1,24	3112	–5,7
–620 Север	3200	3078	–3,81	3202	0,06
–620 Юг	3520	4021	**14,23**	3401	–3,38

Примечание. Красным выделен существенный недостаток воздуха, зеленым – избыток.

Сравнение фактических и заданных расходов (табл.2) показывает, что по главным направлениям отклонения расхода воздуха находятся в пределах 10 %, но по отдельным направлениям наблюдается значительный перерасход или дефицит воздуха.

В установившейся конфигурации параметров элементов САУП по результатам моделирования расход воздуха на вентиляторе составляет 19997 м³/мин при 352 об/мин, тогда как фактическая производительность вентилятора составляет 19292 м³/мин при 373 об/мин.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

EDN BGJLGA
DOI: 10.31897/PMI.2022.75

Записки Горного института. 2023. Т. 262. С. 594-605
© А.В.Кашников, Ю.В.Круглов, 2023

Сравнение положения автоматических вентиляционных дверей на расчетной модели и в системе управления (табл.3) показывает, что конфигурация положения дверей в САУП установлена неоптимальным образом.

Таблица 3

Фактические и модельные углы открытия регуляторов для текущего режима проветривания

АВД	Угол открытия фактический, град	Угол открытия модельный, град	АВД	Угол открытия фактический, град	Угол открытия модельный, град
–420 Восток	24	35	–620 Восток	47	**90***
–420 Север	45	37	–620 Север	40	62
–420 Юг	**77***	78	–620 Юг	44	**90***

* Регуляторы с максимальным углом открытия.

В качестве «главного» направления в САУП выбрано направление «–420 Юг» (самое большое значение требуемого расхода воздуха), что приводит к неоптимальной работе вентилятора для обеспечения заданных расходов. Исходя из результатов моделирования, самым труднопроветриваемым направлением является «–620 Восток» или «–620 Юг».

Для моделирования изменения режима проветривания использовались данные работы САУП за 26 февраля 2019 г. В течение дня требуемый расход воздуха изменен на нескольких регуляторах, что привело к существенному перераспределению воздуха по руднику (табл.4).

Таблица 4

Фактические и модельные расходы воздуха при изменении режима проветривания

АВД	Начальный заданный расход, м^3/мин	Конечный заданный расход, м^3/мин	Конечный фактический расход, м^3/мин	Отклонение от заданного расхода, %	Конечный модельный расход, м^3/мин	Отклонение от заданного расхода, %
–420 Восток	1400	1400	1420	1,4	1411	0,8
–420 Север	2510	2810	2812	0,0	2817	0,2
–420 Юг	4290	2880	3006	4,3	2884	0,1
–620 Восток	2890	2890	2954	2,2	2955	2,2
–620 Север	2620	2620	2592	–1,1	2624	0,2
–620 Юг	5310	3800	3929	3,4	3609	–5,0

Применение алгоритмов на основе нечеткого управления позволяет ГВУ быстрее выйти на заданный режим проветривания (рис.7). Существенное проседание частоты вращения, как и угла открытия регулятора на самом труднопроветриваемом направлении «–620 Юг», обусловлено значительным снижением требуемого расхода на этом регуляторе и отработкой данной уставки АВД до снижения фактического расхода на ГВУ, что является оправданным с точки зрения устойчивости управления. Возврат регулятора «АВД –620 Юг» в полностью открытое состояние подтверждает способность системы самой определять самое труднопроветриваемое направление.

В данной ситуации «главное» направление в САУП установлено корректно и соответствует условию самого большого расхода воздуха. Установившиеся расходы воздуха в случае фактических и модельных данных находятся в допустимом 5 %-ном интервале отклонений.

Заключение. Проведенные исследования показали, что при реализации САУП предварительный выбор самого труднопроветриваемого направления на основе самого большого расхода воздуха (либо на усмотрение оператора) может приводить к необеспечению заданных расходов на направлениях и перерасходу электроэнергии вентилятором.

Предложенный подход к формированию базы правил нечеткого регулятора позволяет реализовать возможность автоматического выбора самого труднопроветриваемого направления, обеспечивается выход САУП на оптимальный режим проветривания, минимизирующий энергопотребление ГВУ.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

EDN BGJLGA
DOI: 10.31897/PMI.2022.75

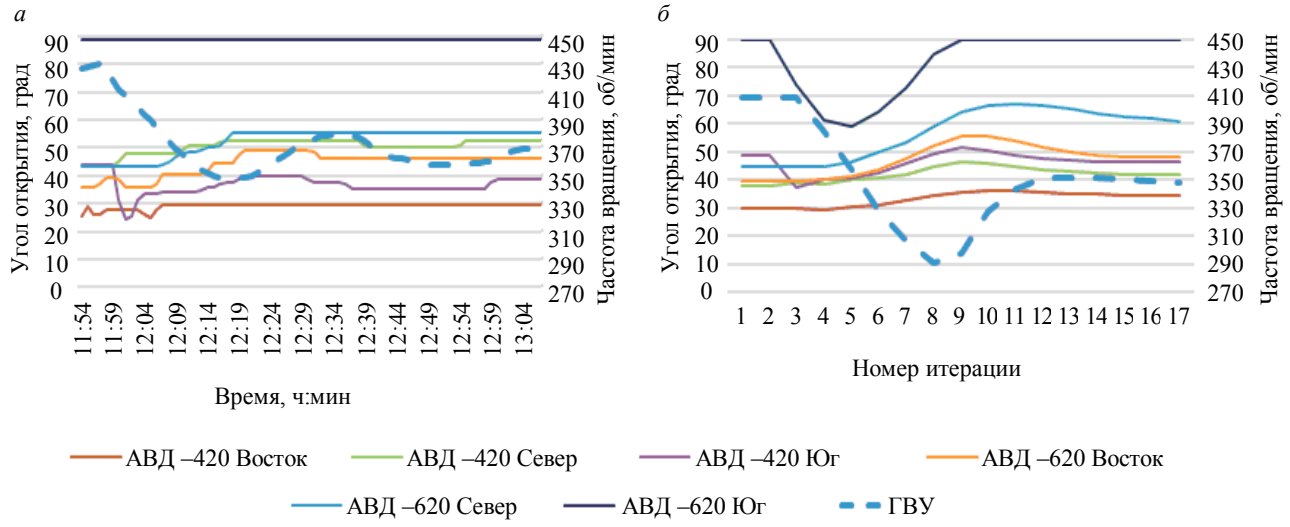


Рис.7. Изменение углов открытия регуляторов и частоты вращения ГВУ при переходе из одного режима проветривания в другой: ГВУ и АВД данные САУП (*а*), результаты моделирования (*б*)

Модернизированная схема управления протестирована на актуальной модели вентиляционной сети рудника 3РУ ОАО «Беларуськалий», при этом результаты модельных расчетов сопоставлены с фактическими данными САУП за конкретные временные интервалы ее работы.

Предложенная стратегия управления проветриванием исключает недостаток воздуха на регулируемых направлениях без необходимости внешнего контроля.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Acuña E., Alvarez R., Hurtado J.* Updated Ventilation on Demand review: implementation and savings achieved // Proceedings of the 1st International Conference of Underground Mining, 19-21 October 2016, Chile, Santiago. 2016. P. 606-617.

2. *De Vilhena Costa L., Margarida da Silva J.* Cost-saving electrical energy consumption in underground ventilation by the use of ventilation on demand // Mining Technology. 2019. Vol. 129. Iss. 1. P. 1-8. DOI: 10.1080/25726668.2019.1651581

3. *Chatterjee A., Zhang L., Xia X.* Optimization of mine ventilation fan speeds according to ventilation on demand and time of use tariff // Applied Energy. 2015. Vol. 146. P. 65-73. DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.01.134

4. *Hardcastle S., Kocsis C., Lacroix R.* Strategic mine ventilation control: a source of potential energy savings // Proceedings of Montreal Energy & Mines, Montreal, Canada. 2007. P. 255-263.

5. *Moreau K., Laamanen C., Bose R. et al.* Environmental impact improvements due to introducing automation into underground copper mines // International Journal of Mining Science and Technology. 2021. Vol. 31. № 6. P. 1159-1167. DOI: 10.1016/j.ijmst.2021.11.009

6. *Kazakov B.P., Shalimov A.V., Kiryakov A.S.* Energy-saving mine ventilation // Journal of Mining Science. 2013. Vol. 49. № 3. P. 475-481. DOI: 10.1134/S1062739149030155

7. *Семин М.А., Гришин Е.Л., Левин Л.Ю., Зайцев А.В.* Автоматизированное управление вентиляцией шахт и рудников. Проблемы, современный опыт, направления совершенствования // Записки Горного института. 2020. Т. 246. С. 623-632. DOI: 10.31897/PMI.2020.6.4

8. *Sjöström S., Klintenäs E., Johansson P., Nyqvist J.* Optimized model-based control of main mine ventilation air flows with minimized energy consumption // International Journal of Mining Science and Technology. 2020. Vol. 30. № 4. P. 533-539. DOI: 10.1016/j.ijmst.2020.05.016

9. *Nel A.J.H., Arndt C., Vosloo J.C., Mathews M.J.* Achieving energy efficiency with medium voltage variable speed drives for ventilation-on-demand in South African mines // Journal of Cleaner Production. 2019. Vol. 232. P. 379-390. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.05.376

10. *Acuña E., Felií A.* Considering ventilation on demand for the developments of the New Level Mine Project, El Teniente // Deep Mining 2014: Proceedings of the Seventh International Conference on Deep and High Stress Mining, Australian Centre for Geomechanics, Perth, Australia. 2014. P. 813-821. DOI: 36487/ACG_rep/1410_59_Acuna

11. *Acuña E., Allen C.* Ventilation control system implementation and energy consumption reduction at Totten Mine with Level 4 Tagging and future plans // Proceedings of the First International Conference on Underground Mining, Technology, Canada, Sudbury. 2017. P. 89-95. DOI: 10.36487/ACG rep/1710 06 Acuna

12. *Семин М.А., Круглов Ю.В.* Динамические граничные условия типа вентилятор в нестационарных задачах рудничной вентиляции // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2012. № 5. С. 259-263.

13. *Kruglov Y.V., Levin L.Y., Zaitsev A.V.* Calculation method for the unsteady air supply in mine ventilation networks // Journal of Mining Science. 2011. Vol. 47. № 5. P. 651-659. DOI: 10.1134/S1062739147050145

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2023. Т. 262. С. 594-605
© А.В.Кашников, Ю.В.Круглов, 2023

14. *Мальцев С.В., Казаков Б.П., Семин М.А.* Разработка способов повышения эффективности проветривания рудников со сложными системами вентиляции // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2019. № 4. С. 283-291.

15. *Круглов Ю.В., Семин М.А., Зайцев А.В.* Математическое моделирование работы оптимальных систем автоматического управления проветриванием подземных рудников // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2011. № 2. С. 116-126.

16. *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. Т. 12. № 9. С. 106-115.

17. *Precup R.-E., Hellendoorn H.* A survey on industrial applications of fuzzy control // Computers in Industry. 2011. Vol. 62. Iss. 3. P. 213-226. DOI: 10.1016/j.compind.2010.10.001

18. *Pal S.K., Mandal D.P.* Fuzzy Logic and Approximate Reasoning: An Overview // IETE Journal of Research. 1991. Vol. 37. Iss. 5-6. P. 548-560.

19. *Tai K., El-Sayed A.-R., Biglarbegian M. et al.* Review of recent type-2 fuzzy controller applications // Algorithms. 2016. Vol. 9. Iss. 2. № 39. DOI: 10.3390/a9020039

20. *Rojas J.D., Salazar O., Serrano H.* Nie-Tan Method and its Improved Version: A Counterexample // Ingeniería. 2016. Vol. 21. № 2. P. 138-153. DOI: 10.14483/udistrital.jour.reving.2016.2.a02

21. *García P., García C.A., Fernández L.M. et al.* ANFIS Based Control of a Grid-Connected Hybrid System Integrating Renewable Energies, Hydrogen and Batteries // IEEE Transactions on Industrial Informatics. 2014. Vol. 10. № 2. P. 1107-1117. DOI: 10.1109/TII.2013.2290069

22. *Pratihar D.K., Hui N.* Evolution of Fuzzy Controllers and Applications // Studies in Computational Intelligence. 2007. P. 47-69. DOI: 10.1007/978-3-540-72377-6_3

23. *Duy-Trung Nguyen, Ngoc-Khoat Nguyen, Hung-Lan Le, Van-Tiem Nguyen.* Designing PSO-Based PI-type Fuzzy Logic Controllers: A Typical Application to Load-Frequency Control Strategy of an Interconnected Hydropower System // Proceedings of the 2019 3rd International Conference on Automation, Control and Robots, 11-13 October 2019, Prague, Czech Pepublic. China University of Geosciences, 2019. P. 61-66. DOI: 10.1145/3365265.3365278

24. *Kondratenko Y., Kondratenko G., Sidenko I.* Two-stage method of fuzzy rule base correction for variable structure of input vector // Proceedings of 2017 IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON), 29 May – 02 June 2017, Kiev, Ukraine. IEEE, 2017. P. 1043-1049. DOI: 10.1109/UKRCON.2017.8100409

25. *Bejarbaneh E., Bagheri A., Bejarbaneh B. et al.* A new adjusting technique for PID type fuzzy logic controller using PSOSCALF optimization algorithm // Applied Soft Computing. 2019. Vol. 85. DOI: 10.1016/j.asoc.2019.105822

26. *Kirui G., Wang J.* Design of a Fuzzy FOPID Controller for Power Level Control of a Pressurized Water Reactor // Proceedings of the 2020 12th International Conference on Machine Learning and Computing (ICMLC 2020), 15-17 February 2020, Shenzhen, China. Association for Computing Machinery, 2020. P. 549-553. DOI: 10.1145/3383972.3384004

27. *Ksantini M., Ellouze A., Delmotte F.* Control of a hydraulic system by means of a fuzzy approach // An International Journal of Optimization and Control: Theories & Applications. 2013. Vol. 3. № 2. P. 121-131. DOI: 10.11121/ijocta.01.2013.00153

28. *Tamilselvan G.M., Aarthy P.* Online tuning of fuzzy logic controller using Kalman algorithm for conical tank system // Journal of Applied Research and Technology. 2017. Vol. 15. P. 492-503. DOI: 10.1016/j.jart.2017.05.004

29. *Hameed I.A.* Simplified architecture of a type-2 fuzzy controller using four embedded type-1 fuzzy controllers and its application to a greenhouse climate control system // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part I: Journal of Systems and Control Engineering. 2009. Vol. 223. № 5. P. 619-631. DOI: 10.1243/09596518JSCE708

30. *Saritas I., Etik N., Allahverdi N., Sert I.* Fuzzy expert system design for operating room air-condition control systems // Expert Systems With Applications. 2007. Vol. 36. Iss. 6. P. 23-30. DOI: 10.1016/j.eswa.2009.02.028

31. *Фащиленко В.Н., Варфоломеев С.В.* Система управления электроприводами приточно-вытяжной вентиляции обогатительных фабрик // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2015. № 2. С. 182-188.

32. *Гришин Е.Л., Накаряков Е.В., Трушкова Н.А., Саникович А.Н.* Опыт внедрения систем динамического управления проветриванием рудников // Горный журнал. 2018. № 8. С. 103-108. DOI: 10.17580/gzh.2018.08.15

33. *Semin M.A., Levin L.Y., Maltsev S.V.* Development of automated mine ventilation control systems for belarusian potash mines // Archives of Mining Sciences. 2020. Vol. 65. № 4. P. 803-820. DOI: 10.24425/ams.2020.135178

34. *Kashnikov A.V., Levin L.Y.* Applying machine learning techniques to mine ventilation control systems // Proceedings of 2017 XX IEEE International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM), 24-26 May 2017, St. Petersburg, Russia. IEEE, 2017. P. 391-393. DOI: 10.1109/SCM.2017.7970595

35. *Kashnikov A.V., Levin L.Y.* Fan and Regulators Fuzzy Control in Mine Ventilation Systems // Proceedings of 2019 XXII International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM), 23-25 May 2019, St. Petersburg, Russia. IEEE, 2019. P. 85-88. DOI: 10.1109/SCM.2019.8903698

***Авторы*: А.В.Кашников,** *младший научный сотрудник, alexey.kashnikov@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-3872-5862* (*Горный институт Уральского отделения РАН, Пермь, Россия*), **Ю.В.Круглов,** *д-р техн. наук, руководитель проектно-инновационного центра, https://orcid.org/0000-0003-0977-7484* (*Горный институт Уральского отделения РАН, Пермь, Россия*).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0