

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ АЛГОРИТМА ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОВЕТРИВАНИЕМ ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ СЕТЕЙ СЛОЖНОЙ ТОПОЛОГИИ

Ю.В. Круглов, М.А. Семин

Горный институт Уральского отделения Российской академии наук,
Пермь, Россия

Объем добычи руды постоянно увеличивается, и, как следствие, увеличивается потребность рабочих зон в свежем воздухе. Управление воздушораспределением в вентиляционных сетях крупных рудников становится сложной задачей, эффективное решение которой в рамках жестких требований к безопасности ведения горных работ трудно выполнимо без использования средств автоматического управления проветриванием.

Сложность задачи разработки эффективного алгоритма управления и его технической реализации приводит к тому, что средства автоматического управления проветриванием подземных рудников в настоящее время практически не используются. Задача алгоритма оптимального управления заключается в нахождении таких углов поворота жалюзийных регуляторов автоматических вентиляционных дверей (АВД) и частоты вращения рабочего колеса главного вентилятора, при которых вентилятор развивал бы минимальную мощность N и при этом не нарушались бы условия соблюдения минимальных расходов.

Эффективность алгоритма также во многом определяется его универсальностью, а универсальность алгоритма определяется в первую очередь структурой системы управления, выбором ее составных элементов. В данной работе в качестве структурной единицы системы управления проветриванием выбирается не отдельная АВД, а АВД-связка.

На базе введенной в данной работе теории АВД-связок строится универсальный алгоритм управления вентиляцией. Также предлагается уравнение управления частотой оборотов главной вентиляторной установки. Работоспособность построенного алгоритма управления проветриванием демонстрируется на модельной вентиляционной сети рудника БКПРУ-4.

Ключевые слова: вентиляция, система оптимального управления проветриванием, рециркуляция, автоматическая дверь, главная вентиляторная установка, расчетная вентиляционная сеть, теория автоматического управления, дифференциальное исчисление, расход электроэнергии, скорость воздуха, газовая обстановка, программно-вычислительный комплекс, депрессия, воздушно-депресссионная съемка, математическая модель.

IMPROVING THE ALGORITHM OF EFFECTIVE AIR MANAGEMENT IN VENTILATION SYSTEMS OF COMPLEX TOPOLOGY

Iu.V. Kruglov, M.A. Semin

Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
Perm, Russian Federation

As ore production volume constantly increases, a need for fresh air within the operational space grows. Air distribution in ventilation systems of large mines is challenging. At the time of strict requirements related to safe mining operations effective solutions should be drawn on automated air management. Challenges in developing effective management algorithms and its putting into practice lead to renunciation of automated air management in underground mines. Effective management algorithm implies finding such position of the lowered regulators of automated vent doors and rotary speed of the main fan impeller that the fan could function at minimal power N and the minimal flow requirements could be met.

An algorithm effectiveness also depends on its universal application, determined, first of all, by management system structure and its components selection. In the present study a structural unit is understood to be not a single vent door, but a system of doors.

The universal algorithm of air management based on the suggested theory of vent door system is described. Operability of the developed management algorithm is tested on the model ventilation system of the Fourth Berezniki Potassium Combine.

Keywords: ventilation, effective air management system, recirculation, automated vent door, main fan, design ventilation network, automation management theory, differential calculus, power consumption, air velocity, gas conditions, software computing system, depression, air ventilation survey, mathematical model.

Введение

Современный уровень развития горно-производства предъявляет достаточно высокие требования к технологическому процессу вентиляции шахт и рудников. Наиболее важными из них являются:

- 1) безопасность ведения горных работ;
- 2) экономическая эффективность;
- 3) отказоустойчивость и надежность [1].

Обеспечение безопасности ведения горных работ подразумевает быстрое реагирование системы управления на изменение каких-либо параметров рудничной атмосферы (концентрации горючих и токсичных газов, снижение количества свежего воздуха в рабочих зонах и пр.) и автоматический перевод ее в режим, позволяющий привести параметры системы вентиляции в допустимые рамки.

Экономическая эффективность системы обеспечивает работу вентиляционных устройств в режиме, позволяющем свести энергетические затраты на проветривание рудника к минимально возможным значениям.

Отказоустойчивость и надежность автоматической системы проветривания обеспечивает непрерывное, логически последовательное и удовлетворяющее предыдущим требованиям проветривание рудника как в случае выхода из строя отдельных компонентов системы, так и в аварийных ситуациях (например, при подземных пожарах).

В силу данных обстоятельств эффективное решение задач вентиляции современных подземных горнодобывающих предприятий чрезвычайно трудоёмко и невыполнимо без привлечения средств промышленной автоматизации, вычислительной техники и методов математического имитационного моделирования аэрогазодинамических процессов, происходящих в подземных рудниках.

Из-за трудоёмкости, как в плане разработки математического алгоритма, так и в плане его реализации, случаи использования средств автоматического управле-

ния проветриванием подземных рудников в настоящее время весьма редки [2–4].

В силу данных обстоятельств возникает необходимость разработки совокупности математических алгоритмов, программных средств и практических методов построения оптимальных систем автоматического управления проветриванием подземных рудников, позволяющих эффективно и в полном объеме решать поставленные задачи управления вентиляцией рудников [5, 6].

Задача построения эффективного алгоритма управления вентиляцией осложняется тем, что вентиляционные сети рудников являются в каждом случае индивидуальными, разработка конкретной оптимальной системы автоматического управления проветриванием требует решения комплекса задач, связанных с оптимальным выбором мест установки и типов регуляторов расхода воздуха, заданием способа регулирования производительности вентиляторных установок, определением динамических характеристик вентиляционной сети рудника, расчетом параметров рециркуляционных установок, оценкой экономической эффективности и целесообразности внедрения системы, расчетом ее надежностных характеристик, моделированием поведения системы в аварийных ситуациях и множеством других вопросов [2, 7, 8].

Целью настоящего исследования является разработка универсального алгоритма, применимого для вентиляционных сетей рудников и шахт различной топологии и размеров.

Задача оптимального управления

Перейдем к постановке задачи оптимального управления проветриванием вентиляционных сетей рудников. Пусть имеется вентиляционная рудничная сеть произвольной топологии с произвольным числом выработок (рис. 1).

Для ряда выработок, приоритетных в плане проветривания, вводим декларируемый расход Q^* (уставку) – минималь-

ный расход, обеспечивающий проветривание выработки и удаление из нее вредных газов или пыли.

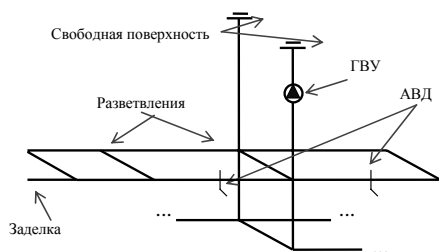


Рис. 1. Модель рудника

Тогда для достаточного проветривания рудничного пространства необходимо выполнение неравенств [2]

$$Q_i > Q_i^*, i \in A, \quad (1)$$

где A – множество индексов тех выработок, в которых декларируется заданный расход.

Если расход Q в данной выработке меньше минимально допустимого расхода Q^* , необходимо увеличить расход воздуха в данной выработке, что можно сделать 2 способами: увеличивая частоту вращения рабочего колеса n вентиляторной установки или изменяя аэродинамическое сопротивление, создаваемое автоматическими вентиляционными дверями (АВД), в соседних выработках, тем самым перераспределяя воздух между различными участками сети.

Задача оптимизации заключается в нахождении таких углов поворота жалюзийных регуляторов АВД и угловой частоты рабочего колеса главной вентиляторной установки (ГВУ), при которых вентилятор развивал бы минимальную мощность N , при этом не нарушая условий (1).

Концепция алгоритма САУП

То, какой вид примет разрабатываемый универсальный алгоритм управления и будет ли он существовать вообще, зависит в первую очередь от структуры

системы управления, ее составных элементов. Как правило, структурные единицы систем управления проветриванием – это отдельная АВД, характеризующаяся углом поворота створок, и отдельный вентилятор, характеризующийся частотой оборотов колеса [9, 10].

Создание универсального алгоритма управления для дверей и вентиляторов в этом случае сильно затруднено, если вообще возможно, что обусловлено тем, что АВД располагаются в различных местах рудника и играют существенно различную роль, которая не может быть описана в рамках какой-либо единообразной формулы для управления. В целом роль АВД одинакова – перераспределение расхода, идущего от ГВУ, однако различаться будут их конкретные действия по данному перераспределению.

По этой причине АВД как структурную единицу следует заменить на *АВД-связку* – связку нескольких дверей, находящихся в определенной зависимости друг от друга и выполняющих какую-то одну конкретную функцию.

Различные двери в пределах каждой из АВД-связок могут выполнять различные функции, однако при этом АВД-связка в целом несет единое функциональное назначение – перераспределение расхода через сопряжения горных выработок. Таким образом, АВД-связка как *минимальный структурный элемент системы управления* представляется еще и *минимальным функциональным элементом алгоритма управления*. В этом плане введение АВД-связок выглядит очень естественным.

В качестве АВД-связок могут выступать элементы, изображенные на рис. 2.

Можно ввести бесконечное множество различных комбинаций АВД, которые можно было бы брать в качестве структурных элементов для рудничной сети. Однако далеко не все из них будет целесообразно применять в практической задаче проветривания. Поскольку основное назначение АВД заключается в перераспределении расхода воздуха, создаваемого

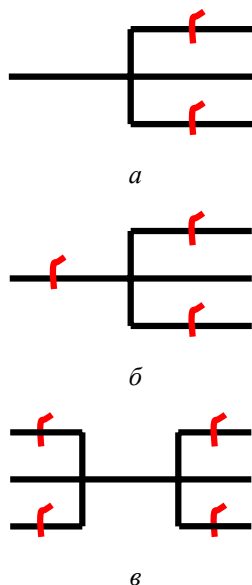


Рис. 2. Базовые типы АВД-связок (АВД обозначена красным цветом)

вентилятором, наиболее часто встречающимися будут АВД-связки, приведенные на рис. 2. Причем АВД-связки типа 1, а и 1, б по большому счету являются частными случаями АВД-связки типа 1, в.

Данная модификация, вводящая базовым элементом алгоритма АВД-связки, накладывает определенные ограничения на взаимное расположение АВД в руднике. Все двери в руднике должны быть расположены и скомбинированы таким образом, чтобы они все образовывали собой некоторое количество АВД-связок рассматриваемого типа.

При этом в руднике может встречаться не один тип АВД-связок, а множество. Для каждого типа по-своему вычисляются управляющие воздействия. В рамках одного типа процедура вычисления управляющих импульсов единообразна. Возможно взаимодействие связок при наличии у них общих АВД.

Будем называть 2 автоматические двери *последовательными*, если прикрытие жалюзиных регуляторов в любой из 2 данных АВД ведет к уменьшению расхода в обоих выработках. Будем на-

зывать 2 двери *параллельными*, если прикрытие жалюзиных регуляторов в одной из 2 данных АВД ведет к увеличению расхода в выработке, где установлена вторая АВД, и, наоборот, если прикрытие створок во второй АВД ведет к увеличению расхода в выработке, где установлена первая дверь. Случаи сложных диагональных соединений АВД в данной работе не рассматриваются.

Двери, входящие в одну связку, будем называть связанными друг с другом.

Примем упрощение: будем рассматривать систему управления, в которой встречаются АВД-связки только типа 1, в. В общем случае N дверей данная АВД-связка имеет вид, представленный на рис. 3.

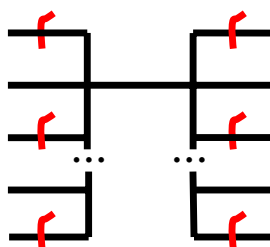


Рис. 3. Обобщенная АВД-связка

Представленная связка состоит из двух последовательно соединенных друг с другом параллелей. Каждая параллель представляет собой параллельно соединенные $N_{\text{АВД}}$ выработок с АВД и N_y выработок без АВД (например, выработки, через которые происходят утечки). При этом $N_{\text{АВД}}$ и N_y у двух параллелей могут не совпадать. $N_{\text{АВД}}$ и N_y для данной АВД-связки могут также равняться нулю, но не одновременно. Параллель, через которую воздух поступает в связку, будем называть входящей, а параллель, через которую воздух покидает связку, – исходящей.

Для построения алгоритма управления рудника с единственной ГВУ и произвольным количеством АВД-связок по типу, изображенному на рис. 3, примем следующий набор правил:

1. Правила управления АД:

1) данная автоматическая дверь будет открываться тогда, когда либо в ней самой, либо в какой-то из связанных с ней последовательных автоматических дверей расход будет меньше декларируемого;

2) данная автоматическая дверь будет закрываться, если хотя бы в одной связанной с ней параллельной ей автоматической двери будет недорасход;

3) если все автоматические двери, последовательные данной двери, имеют перерасход, и при этом в данной автоматической двери тоже имеет место перерасход, то прикрываем данную дверь.

2. Правила управления ГВУ:

1) если есть выработки, в которых расход меньше декларируемого, то вентилятор увеличивает частоту вращения;

2) если все автоматические двери прикрыты, то вентилятор уменьшает частоту вращения до тех пор, пока хотя бы одна автоматическая дверь не будет полностью открыта;

3) если во всех выработках есть перерасход, то вентилятор сбавляет частоту вращения.

Если записать данные 6 правил в форме математических уравнений, то получим следующее:

1. Формулы для управляющих импульсов АД

$$F_i = I_{\text{АВД}} \left(\Delta Q_i^+ - \sum_j \Delta Q_j^+ + \sum_{k \neq i} \Delta Q_k^- \right) + I_{\text{АВД}} \Delta Q_i^-$$

(все соседние ячейки имеют перерасход), где использованы следующие обобщенные функции:

$$\Delta Q^+ = \begin{cases} Q^* - Q, & \text{if } Q^* > Q, \\ 0, & \text{if } Q^* \leq Q, \end{cases}$$

$$\Delta Q^- = \begin{cases} 0, & \text{if } Q > Q^*, \\ Q^* - Q, & \text{if } Q \leq Q^*, \end{cases}$$

$$\Delta Q^+ + \Delta Q^- = \Delta Q = Q^* - Q,$$

и логическая функция [5]

$$[\text{condition}] = \begin{cases} 1, & \text{if condition} = \text{true}, \\ 0, & \text{if condition} = \text{false}. \end{cases}$$

Здесь $I_{\text{АВД}}$ – интенсивность регулирования АД. Как видим, силовой импульс F_i линеен относительно отклонения расхода от уставки ΔQ_i^+ . Линейная зависимость – один из возможных вариантов задания управляющих импульсов. Можно взять более сложные степенные зависимости $F_i(\Delta Q_i^+)$ или определять импульс F_i только исходя из знака ΔQ ($F_i = F_i(\text{sign } \Delta Q_j)$), однако это бы не дало какого-либо нового качественного поведения системы.

2. Формула для управляющего импульса ГВУ

$$G = I_{\text{ГВУ}} \left(\max_i \Delta Q_i^+ - \gamma \min_i \Delta Q_i^- \right) + A_{\text{ГВУ}} \min_i \varphi_i.$$

Здесь $I_{\text{ГВУ}}$ – интенсивность регулирования ГВУ; $A_{\text{ГВУ}}$ – интенсивность сопряжения ГВУ и АД; φ_i – угол поворота створок i -й АД.

Выражения управляющих импульсов используются для расчета приращения углов поворота АД и приращения частоты вращения ГВУ [11]:

$$\Delta n = G \Delta t, \tag{2}$$

$$\Delta \varphi_i = F_i \Delta t, \tag{3}$$

где Δn и $\Delta \varphi_i$ – приращение частоты вращения ГВУ и углов поворота жалюзийных створок АД; Δt – временной интервал реагирования контроллеров. Формулы (2) и (3) позволяют придать четкий физический смысл параметрам $I_{\text{АВД}}$, $I_{\text{ГВУ}}$ и $A_{\text{ГВУ}}$.

Интенсивность регулирования АД $I_{\text{АВД}}$ – силовой импульс, который при рассогласовании расходов ($Q^* - Q$), равном $1 \text{ м}^3/\text{с}$, за единицу времени при-

водит к повороту створок двери на угол, равный $I_{\text{АВД}}$ рад.

Интенсивность регулирования ГВУ $I_{\text{ГВУ}}$ – силовой импульс, который при рассогласовании расходов $(Q^* - Q)$, равном $1 \text{ м}^3/\text{с}$, за единицу времени приводит к увеличению частоты вращения ГВУ на $I_{\text{ГВУ}} \cdot n_0$ об/мин. Здесь n_0 – номинальная частота вращения.

Интенсивность сопряжения ГВУ и АВД $A_{\text{ГВУ}}$ – силовой импульс, который в случае прикрытия створок всех АВД более чем на 1 рад за единицу времени приводит к уменьшению частоты вращения ГВУ на $A_{\text{ГВУ}} \cdot n_0$ об/мин. Здесь n_0 – номинальная частота вращения.

Уравнение (3) можно также записать в следующем виде:

$$\Delta\varphi_i = \Delta t \int_{t-T}^t F_i \exp\mu(\tau-t) d\tau$$

и учесть тем самым фактор предыстории (здесь T – временной интервал усреднения; μ – фактор предыстории). Данное слагаемое позволяет обеспечить более высокую скорость сходимости.

Рециркуляция

В тех случаях, когда выдаваемый из рудника воздух содержит малое количество вредных веществ, часть его выгодно подмешивать к свежему воздуху и отправлять полученную смесь на вторичный обход по рециркуляционному контуру (общерудничному, по крылу, в пределах панели и т.д.) [12].

Для этого в рудник устанавливаются рециркуляционные вентиляторы уста-

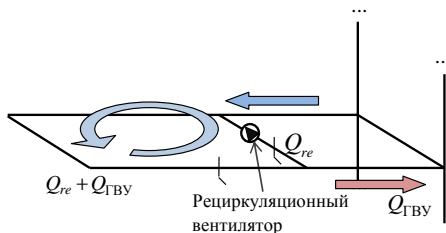


Рис. 4. Схема работы рециркуляции

новки. За счет установки маломощных рециркуляционных вентиляторов можно добиться снижения нагрузки, приходящейся на ГВУ, тем самым повысив экономичность эксплуатации рудника в целом [12, 13].

Контур, в котором имеет место рециркуляция, характеризуется коэффициентом рециркуляции

$$K = \frac{Q_{\text{re}}}{Q_{\text{re}} + Q_{\text{ГВУ}}}, \quad (4)$$

где Q_{re} – объем воздуха, отправляемый на вторичный обход (объем воздуха, проходящий через РВУ); $Q_{\text{ГВУ}}$ – объем воздуха, уходящий на ГВУ.

По своему смыслу коэффициент рециркуляции есть относительная объемная доля воздуха, отправляемого на вторичный обход, по отношению к суммарному объемному расходу в контуре.

Как правило, коэффициент рециркуляции не должен превышать определенного максимального значения K_{max} , чтобы вредные газы и пыль не циркулировали раз за разом по тому же самому контуру, а удалялись из рудничного пространства. Однако чем выше коэффициент рециркуляции, тем большую нагрузку мы перекладываем с ГВУ на рециркуляционные вентиляторные установки, а это всегда является более выгодным, так как снижает суммарную потребляемую мощность.

Поэтому возникает необходимость обеспечения таких расходов в вентиляционной сети, чтобы выполнялось строгое равенство

$$K = K_{\text{max}}. \quad (5)$$

Возникает естественный вопрос: как учесть этот фактор в модели управления (2)–(3)? Чтобы разобраться в этом, можно привести следующие рассуждения:

1. Очевидно, что основное назначение рециркуляции – снизить мощность $N_{\text{ГВУ}}$, т.е., в частности, снизить частоту вращения ГВУ $n_{\text{ГВУ}}$. Повышение коэффициента рециркуляции в контуре обеспечивает

в нем декларируемый расход Q^* с меньшей мощностью, затрачиваемой ГВУ. Отсюда на первый взгляд может показаться, что в управляющем уравнении (2) для $n_{ГВУ}$ необходимо учитывать коэффициент рециркуляции.

Однако это неверно. Несмотря на то, что повышение коэффициента рециркуляции K приводит к снижению частоты вращения $n_{ГВУ}$, их связь очень опосредована. Например, уменьшение частоты вращения $n_{ГВУ}$ приведет к изменению объемного расхода воздуха через ГВУ, данное изменение расхода спустя временной промежуток $t \approx 1$ мин приводит к изменению расхода в интересующем удаленном контуре, где имеет место рециркуляция. На такое уменьшение расхода реагирует автоматическая дверь: происходит уменьшение угла φ . В результате изменения угла поворота жалюзиных створок φ поток начинает иначе перераспределяться по выработкам и происходит изменение значения K .

Если необходимо регулировать какой-либо параметр x путем варьирования управляющего воздействия u , то управление будет тем успешней, чем более явная связь между x и u . Любая опосредованность их связи замедляет скорость управления. По этой причине в уравнение (2) не следует включать компонент с K .

2. Задача управления АД – обеспечить в данной выработке, где установлена данная АД, декларируемый расход Q^* . Если добавлять в эти уравнения новые компоненты, связанные с рециркуляцией, то функционально управление дверьми будет перегружено и это может повредить их основной функции – обеспечению декларируемого расхода Q^* .

3. Задача управления коэффициентами рециркуляции должна полностью ложиться на рециркуляционные вентиляторы, т.е. управляющее уравнение должно принять вид [2]

$$\frac{dn_{re}}{dt} = a(K_{max} - K), \quad (6)$$

т.е. при $K < K_{max}$ увеличивается частота оборотов, а значит, увеличивается текущий коэффициент рециркуляции K . Это продолжается до тех пор, пока K не достигнет K_{max} . Данное уравнение позволяет без учета мощности так установить частоты вращения рециркуляционных вентиляторов, чтобы они давали коэффициент рециркуляции, равный в точности K_{max} .

Этот вариант управляющих уравнений представляется наиболее простым: автоматические двери выполняют свою функцию, рециркуляционные вентиляторы – свою.

Для устойчивости в уравнение управления можно добавить интегральное звено [14]:

$$\frac{dn_{re}}{dt} = a(K_{max} - K) + b \int (K_{max} - K) dt, \quad (7)$$

где b – параметр управления рециркуляцией, имеющий смысл вязкости.

Практическое применение САУП

Разработанная модель управления проветриванием рудников была прежде всего апробирована и отлажена на простейших тестовых модельных вентиляционных сетях, состоящих из нескольких выработок.

В настоящее время, после успешной апробации и отладки, разработанная система оптимального управления проветриванием внедряется в рудник БКПРУ-4. Разработаны исходные данные для проектирования и проектная документация, включающая в себя математическое и программное обеспечение.

Для имитационного моделирования алгоритма оптимального управления была построена эквивалентная упрощенная сеть рудника БКПРУ-4, в которой были соблюдены все топологические особенности взаимного расположения автоматических дверей (рис. 5).

Системы параллельно идущих выработок с установленными на них автоматичес-

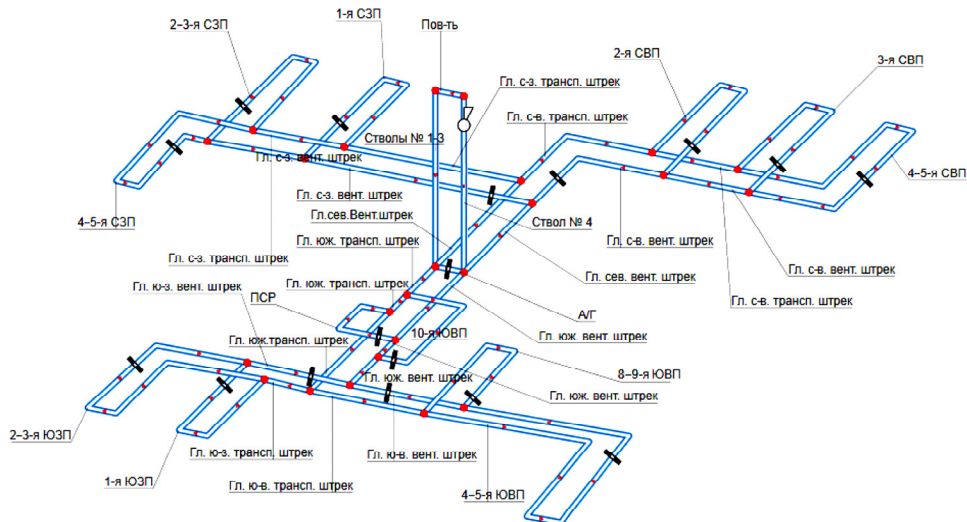


Рис. 5. Эквивалентная упрощенная сеть БКПРУ-4

кими дверьми (например, главный южный вентиляционный штрек, см. рис. 5) заменялись одной приведенной выработкой с одной приведенной автоматической дверью (рис. 6).

При этом было принято допущение о том, что АВД, работающие в «чистой» параллели, синхронизированы, т.е. в каждый момент времени имеют одинаковый угол поворота жалюзийных створок. В данном частном случае это допустимо, поскольку все автоматические двери выполняют одну и ту же функцию, а перераспределение воздуха между различными штреками здесь не представляет интереса.

На эквивалентной упрощенной сети рудника БКПРУ-4 было проведено компьютерное моделирование управления проветриванием в программном комплексе «АэроСеть».

В результате численного решения [11] задачи оптимального управления воздухораспределением были получены временные зависимости расходов в выработках, углов поворота жалюзийных створок АВД, частоты вращения ГВУ. На рис. 7 приведены результаты расчета воздухораспределения на панелях ЮЗП

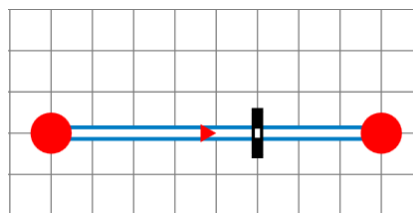
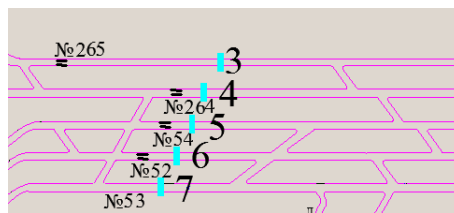


Рис. 6. Приведенные двери

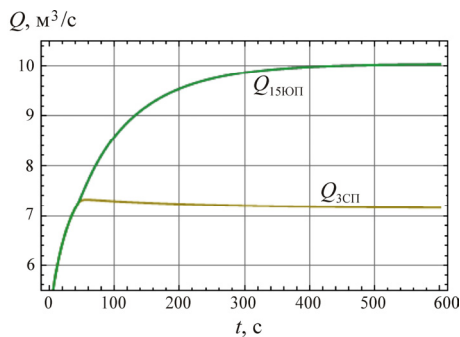


Рис. 7. Расходы. Западное направление

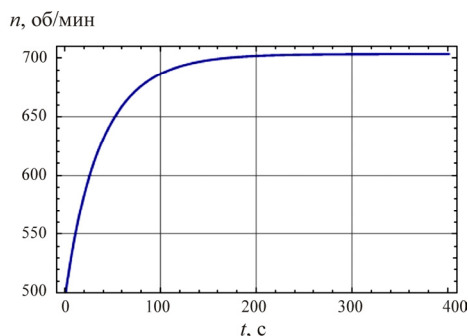


Рис. 8. Частота вращения ГВУ

и 2–ЗЮЗП, где были приняты уставки $Q_{1ЮЗП} = 10 \text{ м}^3/\text{с}$ и $Q_{2-ЗЮЗП} = 7,2 \text{ м}^3/\text{с}$ соответственно.

Временная диаграмма частоты регулирования ГВУ представлена на рис. 8.

Выводы

В данной работе была сформулирована концепция АД-связок построения алго-

ритмов оптимального управления проветриваниями вентиляционных сетей рудников. Была показана необходимость использования данной концепции для построения универсального алгоритма оптимального управления, в равной степени применимого для рудников различных топологий.

На базе сформулированной концепции АД-связок была построена математическая модель оптимального управления проветриванием рудников. В построенной математической модели совершается оптимизация проветривания по параметрам: углы поворота жалюзиных створок АД, частота вращения ГВУ и рециркуляционных ВУ.

Математическая модель была апробирована и отлажена на простейших модельных вентиляционных сетях, а также была использована в проектной документации на систему автоматического управления рудника БКПРУ-4.

Список литературы

1. Абрамов Ф.А., Бойко В.А. Автоматизация проветривания шахт. – Киев: Наук. думка, 1967. – 310 с.
2. Круглов Ю.В. Научно-технические основы построения оптимальных систем автоматического управления проветриванием подземных рудников // Стратегия и процессы освоения георесурсов: материалы ежегодн. науч. сессии Горн. ин-та УрО РАН по результатам НИР в 2010 г. – Пермь, 2011. – С. 100–102.
3. Цой С., Рязанцев Г.К. Принцип минимума и оптимальная политика управления вентиляционными и гидравлическими сетями. – Алма-Ата: Наука, 1968. – 258 с.
4. Huang Y.-P., Li H.-Sh. Solution of problems relevant to optimal control of mine ventilation network by nonlinear programming technique [J] // Journal of China Coal Society. – 1995. – Vol. 20 (1). – P. 14–20.
5. Грэхем Р., Кнут Д., Паташник О. Конкретная математика. Основание информатики: пер. с англ. – М.: Мир, 1998. – 703 с.
6. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Т. VI. Гидродинамика. – 4-е изд., стер. – М.: Наука, 1988. – 736 с.
7. Медведев И.И., Красноштейн А.Е. Аэрология калийных рудников. – Свердловск: Изд-во УрО АН СССР, 1990. – 252 с.
8. Скочинский А.А., Комаров В.Б. Рудничная вентиляция. – М.: Углетехиздат, 1959. – 634 с.
9. Cross H. Analysis of flow in networks of conduits or conductors // University of Illinois Bul. – 1936. – Vol. 34 (22). – P. 3–33.
10. Timko R.J., Kissel F.N. Trolley Wire Fire Hazards in Underground Coal Mine Haulage Entries // Journal of the Mine Ventilation Society of South Africa. – Vol. 47 (2). – P. 22–28.
11. Бахвалов Н.С., Лапин А.В., Чижонков Е.В. Численные методы в задачах и упражнениях: учеб. пособие. – М.: Высшая школа, 2000. – 190 с.
12. Файнбург Г.З., Фоминых В.И. О расчете проветривания вентиляционных сетей добычного участка в режиме рециркуляции // Разработка соляных месторождений. – Пермь, 1978. – С. 56–63.
13. Красноштейн А.Е., Файнбург Г.З. Организация проветривания добычных участков с использованием частичной рециркуляции // Вентиляция шахт и рудников. – Л., 1980. – Вып. 7. – С. 19–24.
14. Wu X.S., Topuz E. Analysis of mine ventilation systems using operations research methods // International Transactions in Operational Research. – 1998. – Vol. 5 (4). – P. 245–254.

References

1. Abramov F.A., Boiko V.A. Avtomatizatsiia provetrivaniia shakht [Automation of mine ventilation]. Kiev: Naukova dumka, 1967. 310 p.
2. Kruglov Iu.V. Nauchno-tekhnicheskie osnovy postroeniia optimal'nykh sistem avtomaticheskogo upravleniia provetrivaniem podzemnykh rudnikov [Scientific and technical basis for development of effective systems of automated air management in underground mines]. *Materialy ezhegodnoi nauchnoi Gornogo instituta Ural'skogo otdeleniia Rossiiskoi akademii nauk po rezul'tatam nauchno-issledovatel'skoi raboty v 2010 godu "Strategiia i protsessy osvoeniia georesursov"*, Perm', 2011, pp. 100–102.
3. Tsoi S., Riazantsev G.K. Printsip minimuma i optimal'naia politika upravleniia ventiliatsionnymi i gidravlichesкими setiami [Minimum principle and optimal management of ventilation systems and hydraulic circuits]. Alma-Ata: Nauka, 1968. 258 p.
4. Huang Y.-P., Li H.-Sh. Solution of problems relevant to optimal control of mine ventilation network by nonlinear programming technique [J]. *Journal of China Coal Society*, 1995, vol. 20(1), pp. 14–20.
5. Grekhem R., Knut D., Patashnik O. Konkretnaia matematika. Osnovanie informatiki [Concrete Mathematics: A Foundation for Computer Science]. Moscow: Mir, 1998. 703 p.
6. Landau L.D., Lifshits E.M. Teoreticheskaiia fizika. Gidrodinamika [Theoretical physics. Hydrodynamics]. 4th ed. Moscow: Nauka, 1988. 736 p.
7. Medvedev I.I., Krasnoshtein A.E. Aerologiiia kaliinykh rudnikov [Aerology of potassium mines]. Sverdlovsk: Ural'skoe otdelenie Akademii nauk SSSR, 1990. 252 p.
8. Skochinskii A.A., Komarov V.B. Rudnichnaia ventiliatsiia [Mine ventilation]. Moscow: Ugletekhizdat, 1959. 634 p.
9. Cross H. Analysis of flow in networks of conduits or conductors. *University of Illinois Bul.*, 1936, vol. 34(22), pp. 3–33.
10. Timko R.J., Kissel F.N. Trolley Wire Fire Hazards in Underground Coal Mine Haulage Entries. *Journal of the Mine Ventilation Society of South Africa*, vol. 47(2), pp. 22–28.
11. Bakhvalov N.S., Lapin A.V., Chizhonkov E.V. Chislennye metody v zadachakh i uprazhneniakh [Numerical methods in tasks and exercises]. Moscow: Vysshiaia shkola, 2000. 190 p.
12. Fainburg G.Z., Fominykh V.I. O raschete provetrivaniia ventiliatsionnykh setei dobychnogo uchastka v rezhime retsirkulatsii [On calculations of ventilation systems' flow management at production units in recirculation conditions]. *Razrabotka solianykh mestorozhdenii*. Perm', 1978, pp. 56–63.
13. Krasnoshtein A.E., Fainburg G.Z. Organizatsiia provetrivaniia dobychnykh uchastkov s ispol'zovaniem chastichnoi retsirkulatsii [Organization of air ventilation in production units by means of partial recirculation]. *Ventiliatsiia shakht i rudnikov*. Leningrad, 1980, vol. 7, pp. 19–24.
14. Wu X.S., Topuz E. Analysis of mine ventilation systems using operations research methods. *International Transactions in Operational Research*, 1998, vol. 5(4), pp. 245–254.

Об авторах

Круглов Юрий Владиславович (Пермь, Россия) – доктор технических наук, старший научный сотрудник лаборатории аэрологии и горной теплофизики Горного института Уральского отделения Российской академии наук (614000, г. Пермь, ул. Сибирская, 78а; e-mail: aerolog@list.ru).

Семин Михаил Александрович (Пермь, Россия) – аспирант, лаборатория аэрологии и горной теплофизики горного института Уральского отделения Российской академии наук (614000, г. Пермь, ул. Сибирская, 78а; e-mail: madmechanic@mail.ru).

About the authors

Iurii V. Kruglov (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher, Laboratory of Aerology and Mining Thermal Physics, Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (614000, Perm, Sibirskaia st., 78a; e-mail: aerolog@list.ru).

Mikhail A. Semin (Perm, Russian Federation) – Postgraduate Student, Laboratory of Aerology and Mining Thermal Physics, Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (614000, Perm, Sibirskaia st., 78a; e-mail: madmechanic@mail.ru).

Получено 6.11.2014