

А. В. Кычкин, канд. техн. наук, доц., avkychkin@hse.ru,

НИУ Высшая школа экономики, филиал в г. Пермь,

А. В. Николаев, канд. техн. наук, доц., nikolaev0811@mail.ru,

Пермский национальный исследовательский политехнический университет

Архитектура киберфизической системы управления проветриванием подземного горнодобывающего предприятия на базе платформы Интернета вещей¹

Рассматривается архитектура системы управления процессом проветривания подземных горнодобывающих предприятий (на примере калийного рудника), оснащенной цифровым двойником с онлайн функциями имитационного моделирования и предиктивной аналитики. Система ориентирована на реализацию управления главной вентиляционной установкой с учетом изменяющихся параметров наружного воздуха, подаваемого в шахтные стволы.

В отличие от существующих предложенный способ управления учитывает влияние параметров наружного воздуха на изменение общерудничной естественной тяги, от которой зависит общий объем воздуха, подаваемого в рудник. Известно, что системы проветривания таких предприятий потребляют от 30 до 50 % всей затрачиваемой на процесс добычи полезного ископаемого электроэнергии. В связи с этим разрабатываемая система, способная к анализу изменений общерудничной естественной воздушной тяги и, как следствие, объемов подачи воздуха, сможет работать в энергосберегающем режиме.

Предложенный способ управления включает в себя алгоритм расчета взаимосвязей физических параметров общерудничной естественной тяги, действующей между стволами; алгоритм расчета значения общерудничной естественной тяги; алгоритм расчета производительности и выбора требуемого режима работы ГВУ.

Для реализации способа предложена архитектура киберфизической системы (CPS) проветривания на базе платформы Интернета вещей (IoT) InfluxData стека TICK. Предложенная архитектура CPS состоит из четырех подсистем: подсистемы физического объекта, сетевой и вычислительной инфраструктур IoT, цифрового двойника, интерфейса пользователя.

Цифровой двойник системы проветривания выполнен с использованием базы данных временных рядов и базы данных атрибутов, хранящих сведения об изменении параметров оборудования во времени, показателях воздуха, индикаторах эффективности, статистике по авариям и наработке вентиляторов, характеристиках CPS и др. CPS данной архитектуры подразумевает подключение дополнительных источников данных, обеспечение расчетов рациональных объемов подачи воздуха с учетом правил безопасности и требований энергоэффективности.

Ключевые слова: киберфизическая система, Интернет вещей, цифровой двойник, система мониторинга и управления, системная архитектура, рудник, процесс проветривания, энергосбережение

Введение

В целях повышения рентабельности производства подземные горнодобывающие предприятия с каждым годом активно увеличивают объем добычи полезного ископаемого. В результате этого возрастает число проходимых горных выработок и добычных участков, в которые необходимо постоянно подавать свежий воздух.

Также увеличивается расстояние от воздухоподающих стволов до мест ведения горных работ, что приводит к необходимости увеличения объема подаваемого в рудник (шахту) воздуха [1–4]. На процесс проветривания подземных горнодобывающих предприятий расходуется от 30 до 50 % всей затрачиваемой на предприятии электроэнергии, а это десятки ГВт·ч за год.

Основной причиной огромного расхода электроэнергии является парадигма проветривания, основанная на наращивании объемов подаваемого в шахту (рудник) свежего воздуха, поддержания во всем этом объеме тепловых параметров, значения которых заведомо превышают (для надежности в условиях неуправ-

¹Исследование выполнено при финансовой поддержке правительства Пермского края в рамках проекта Международной исследовательской группы "Разработка цифровой модели прогнозирования и ценозависимого управления спросом на электроэнергию, потребляемую подземными горнодобывающими предприятиями", 2020 г.

ляемого процесса) требуемые по критериям безопасности.

Методы управления воздухоподготовкой и проветриванием в настоящее время заключаются в поддержании заданного оператором главной вентиляционной установки (ГВУ) объемного расхода воздуха с использованием SCADA-приложений. Регулирование и оптимизация работы оборудования по критерию энергоэффективности не проводятся как в нормальном режиме проветривания, так и в режиме воздухоподготовки.

В связи с этим представляется актуальным создание архитектуры киберфизической системы (КФС, англ. CPS), способной интегрировать информационную и технологическую инфраструктуру системы вентиляции шахты (рудника) таким образом, чтобы все активные компоненты взаимодействовали друг с другом с помощью открытых интерфейсов и сетевых протоколов на основе технологий промышленного Интернета вещей (IoT), реализуя обработку больших объемов данных, визуализацию в режиме реального времени, прогнозную аналитику и динамическое управление [5–9].

Подземные горнодобывающие предприятия отличаются друг от друга по многим параметрам: глубине залегания полезного ископаемого, газоносности горных пород, мощности пласта и т.д. Поэтому для каждого типа и, иногда, для каждого конкретного подземного горнодобывающего предприятия необходимо разрабатывать системы управления с учетом специфических особенностей отдельной шахты (рудника).

Основная задача настоящей работы — предложить принцип построения киберфизической системы проветривания без привязки к конкретным подземным горнодобывающим предприятиям и их особенностям. Поэтому в работе реализация алгоритма проведена на примере калийного рудника с рядом допущений, которые в дальнейшем могут быть добавлены в модель при известных значениях упрощенных параметров.

Метод расчета естественной тяги между шахтными стволами

Для упрощения расчетов приняты следующие допущения:

1) плотность воздуха зависит от его температуры и давления, которые можно измерить

с помощью датчиков, для ее расчета также используется ряд коэффициентов [10, 11];

2) температура воздуха в околоствольном дворе вентиляционного ствола зависит от глубины рудника и практически не меняется с течением времени;

3) устья шахтных стволов находятся на одной высотной отметке;

4) число шахтных стволов на подземных горнодобывающих предприятиях может быть различным, поэтому значение объемного расхода воздуха для проветривания рудника определяется на этапе расчета требуемого режима проветривания. Контролируется это значение с помощью датчиков расхода воздуха, обязательно присутствующих в вентиляционном стволе и в каналах ГВУ;

5) значение аэродинамического сопротивления рудника изменяется в течение длительного отрезка времени, поэтому для определения его значения путем измерений можно выбрать интервал, например, раз в год. Если требуется точное его значение, то можно воспользоваться методикой расчета аэродинамического сопротивления рудника, описанной в работе [12];

6) не учитываются поверхностные утечки воздуха, возникающие при работе ГВУ;

7) воздухоподготовка (нагрев или охлаждение) поступающего в воздухоподающие стволы воздуха не проводится;

8) естественная тяга действует между сообщающимися выработками, в частности, между шахтными стволами (рис. 1) и может быть рассчитана по следующему алгоритму:

- при известных параметрах шахтных стволов их аэродинамическое сопротивление находится по формуле [11]

$$R_1 = \alpha_1 (KH_{ais}/S^{2,5}), \quad (1)$$

где $\alpha_1 = 0,096138$; H_{ais} — высота сообщающихся стволов, м; K — коэффициент, равный 3,28 для клетевых стволов, для скиповых и грузопассажирских — 3,93; S — сечение ствола, м²;

- по формуле (1) определяется аэродинамическое сопротивление всех стволов рудника;
- значение аэродинамического сопротивления подземной части рудника согласно работе [13] определяется по формуле

$$R_i = \frac{\Delta P_i N}{9,81 Q_i^2}, \quad (2)$$

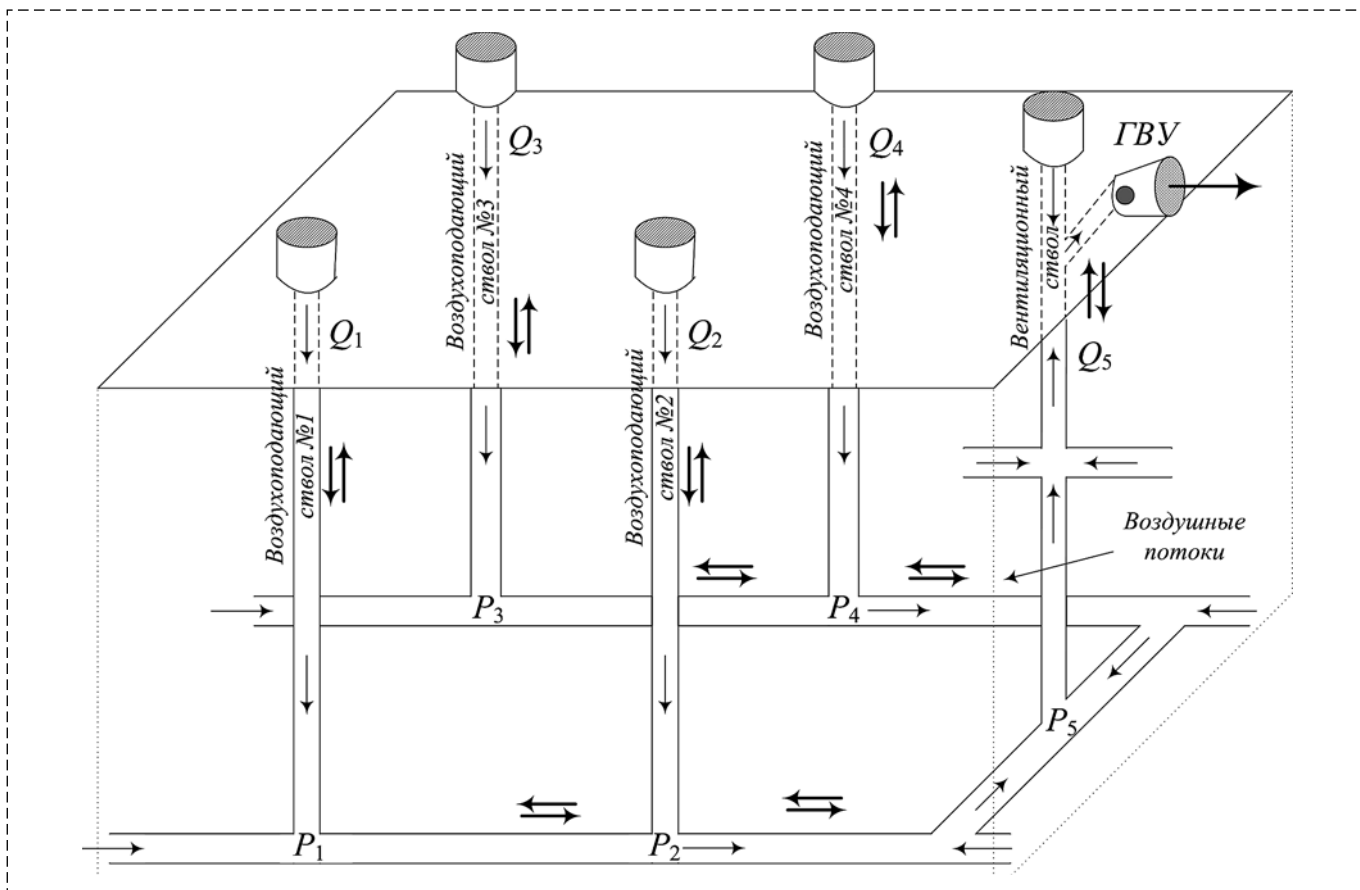


Рис. 1. Упрощенная схема воздухораспределения между шахтными стволами
Fig. 1. Simplified air distribution scheme between shafts

где ΔP_i — разность давлений между околоствольными дворами шахтных стволов, мм рт. ст.; N — коэффициент пересчета давления из мм рт. ст. в Па; Q_i — объемный расход воздуха, проходящего между стволами, м³/с;

- после этого рассчитывается средняя плотность воздуха (кг/м³) в воздухоподающих стволах [11]:

$$\rho_1 = \frac{\alpha_2 [P_a(\alpha_3 + 2t_a - K_n H_{ais})] - \alpha_5 R_1 Q_1^2 (\tau + t_a)}{(\tau + t_a)[\tau + t_a + H_{ais}(K_n - \alpha_4)]}, \quad (3)$$

где $\alpha_2 = 0,2325$; $\alpha_3 = 546,3$; $\alpha_4 = 0,01705$; $\alpha_5 = 0,0075$; $\tau = 273,15$; P_a — атмосферное давление наружного воздуха, мм рт. ст.; t_a — температура воздуха, поступающего в ствол, °C; K_n — температурный градиент, равный 0,00767 °C/м [11]; R_1 — аэродинамическое сопротивление ствола, (Н·с²)/м⁸; Q_1 — объемный расход воздуха, поступающего в ствол, м³/с;

- далее определяется средняя плотность воздуха в вентиляционном стволе [11]:

$$\rho_2 = A_1 [A_2 + A_3], \quad (4)$$

где

$$A_1 = \frac{\alpha_6(\tau + t_c - H_{ais}(\alpha_3 - K_B))}{\tau + t_c - K_B H_{ais}};$$

$$A_2 = \frac{P_a + \alpha_3 \rho_1 H_{ais} - \alpha_4(R_1 + R_2)Q_B^2}{\tau + t_c};$$

$$A_3 = \frac{P_a + \alpha_3 \rho_1 H_{ais} - \alpha_4(R_1 + R_2 + R_3)Q_B^2}{\tau + t_c - K_B H_{ais}};$$

$\alpha_6 = 0,0735$; t_c — температура воздуха в околоствольном дворе ствола, °C; R_2 — аэродинамическое сопротивление подземной части рудника, (Н·с²)/м⁸; R_3 — аэродинамическое сопротивление вентиляционного ствола, (Н·с²)/м⁸; K_B — температурный коэффициент, равный 0,00923 °C/м; Q_B — объемный расход воздуха, исходящий из ствола, м³/с.

При известных значениях средних плотностей воздуха в стволах определяется значение естественной тяги $h_{e,i}$ между i -й парой стволов (например, между воздухоподающим и вентиляционным) [4]:

$$h_{e,i} = 9,81(\rho_1 - \rho_2)gH_{ais}, \text{ Па.} \quad (5)$$

Метод расчета общерудничной естественной тяги

На работу ГВУ оказывает влияние именно общерудничная естественная тяга. В работе [13] установлено, что значение общерудничной естественной тяги определяется как сумма естественных тяг, действующих между каждой парой стволов:

$$h_e = \sum_{i=1}^n \text{sign}(h_{ei}), \quad (6)$$

где sign — знак, определяющий направление естественной тяги, действующей между i -й парой шахтных стволов, определяемый разностью значений ρ_1 и ρ_2 ; n — число пар сообщающихся шахтных стволов.

Значение общерудничной естественной тяги находится как алгебраическая сумма всех рассчитанных естественных тяг, действующих между каждой i -й парой сообщающихся стволов. После того, как становится известно значение и направление общерудничной естественной тяги, можно определить степень ее влияния на работу ГВУ.

Метод расчета производительности и выбор требуемого режима работы ГВУ

Давление, развиваемое ГВУ, можно найти по формуле [10]

$$h_{\text{ГВУ}} = A + BQ_{\text{ГВУ}} + CQ_{\text{ГВУ}}^2, \quad (7)$$

где $Q_{\text{ГВУ}}$ — производительность ГВУ, $\text{м}^3/\text{с}$; A , B , C — коэффициенты, описывающие аэродинамическую характеристику ГВУ (находятся при расчете кривой характеристики по методу наименьших квадратов) [10, 11].

Ввиду того, что согласно ранее принятым допущениям поверхностные утечки воздуха не учитываются, здесь принимаем $Q_{\text{ГВУ}} = Q_{\text{В}}$.

Работая совместно с общерудничной естественной тягой, ГВУ создаст давление и разовьет производительность согласно зависимости

$$h_{\text{ГВУ}} + h_e = RQ_{\text{ГВУ}}^2 \text{ или} \\ A + BQ_{\text{ГВУ}} + CQ_{\text{ГВУ}}^2 + h_e = RQ_{\text{ГВУ}}^2.$$

Обозначив $A_1 = C - R_{\text{руд}}$; $C_1 = A + h_e$; $a = B/A_1$; $b = C_1/A_1$, определим производительность ГВУ с учетом действия общерудничной естественной тяги:

$$Q_{\text{ГВУ}} = -\frac{a}{2} + \sqrt{\left(\frac{a}{2}\right)^2 - b}. \quad (8)$$

Если тяга действует против направления движения воздуха, создаваемого ГВУ, то необходимо увеличивать ее производительность на величину h_e , если же общерудничная естественная тяга направлена согласно требуемому направлению движения воздуха, т. е. способствует проветриванию, то можно снизить производительность вентилятора на ее величину, уменьшив тем самым затраты электроэнергии на проветривание.

Значения коэффициентов A , B , C зависят от типа вентилятора ГВУ и его аэродинамических характеристик. Эти параметры практически неизменны, поэтому их значения заносятся в память системы управления. Каждому режиму вентилятора соответствует свое значение коэффициентов A , B , C .

При изменении общерудничной естественной тяги h_e программой пересчитывается требуемая производительность ГВУ с учетом ее действия (формула (8)). После этого режим работы ГВУ может быть изменен.

Синтез архитектуры CPS проветривания шахты (рудника) на базе платформы Интернета вещей InfluxData стека TICK

Данный стек предлагает разрабатывать различные IoT-приложения с помощью инструментов: T — Telegram, I — InfluxDB, C — Chronograf, K — Karpasitor. Комбинация инструментов TICK формирует платформу InfluxData как информационный агрегатор, которую можно дополнять приложениями и сервисами через подключения по открытым интерфейсам и протоколам.

Базовая функциональность InfluxData недостаточна для реализации функции управления, поэтому ее можно использовать лишь в качестве дополнения к существующей SCADA системе. Кроме этого, платформа не специализируется на управлении промышленным оборудованием в CPS подземных горнодобывающих предприятий, таком как вентиляторы и калориферные установки (нагреватели). Поэтому необходимо развитие CPS за счет цифрового двойника по аналогии с работой [14]. Упрощенная архитектура CPS проветривания рудника представлена на рис. 2.

CPS состоит из четырех подсистем: системы физического объекта, сетевой и вычислительной инфраструктур, цифрового двойника и человеко-машинного интерфейса. Базовым принципом построения целевой системы является понятие киберфизического управления, которое строится сетцентрически с центральным звеном накопления данных, анализа и управления [15, 16]. Центральное звено взаимодействует с интеллектуальными узлами оперативного управления на базе SCADA или интеллектуальными узлами циклического управления с помощью OPC-интерфейса или Modbus RTU.

Реализация приведенных алгоритмов в системе проветривания подземных горнодобывающих предприятий во многом пересекается с задачей поддержания неравновесной конфигурации температурного поля в системе сообщающихся друг с другом помещений (камер) с минимальными затратами энергии [17, 18]. Для построения таких тепловых моделей, так же как и для моделирования системы управления, часто используется пакет MATLAB [19, 20], который в условиях высокой интероперабельности компонентов CPS целесообразнее заменить на пакет OpenModelica.

Переход к открытым интерфейсам связи, протоколам IoT, например MQTT, и центральному звену, реализующему облачные вычисления, способствует снижению затрат на

вающих предприятий во многом пересекается с задачей поддержания неравновесной конфигурации температурного поля в системе сообщающихся друг с другом помещений (камер) с минимальными затратами энергии [17, 18]. Для построения таких тепловых моделей, так же как и для моделирования системы управления, часто используется пакет MATLAB [19, 20], который в условиях высокой интероперабельности компонентов CPS целесообразнее заменить на пакет OpenModelica.

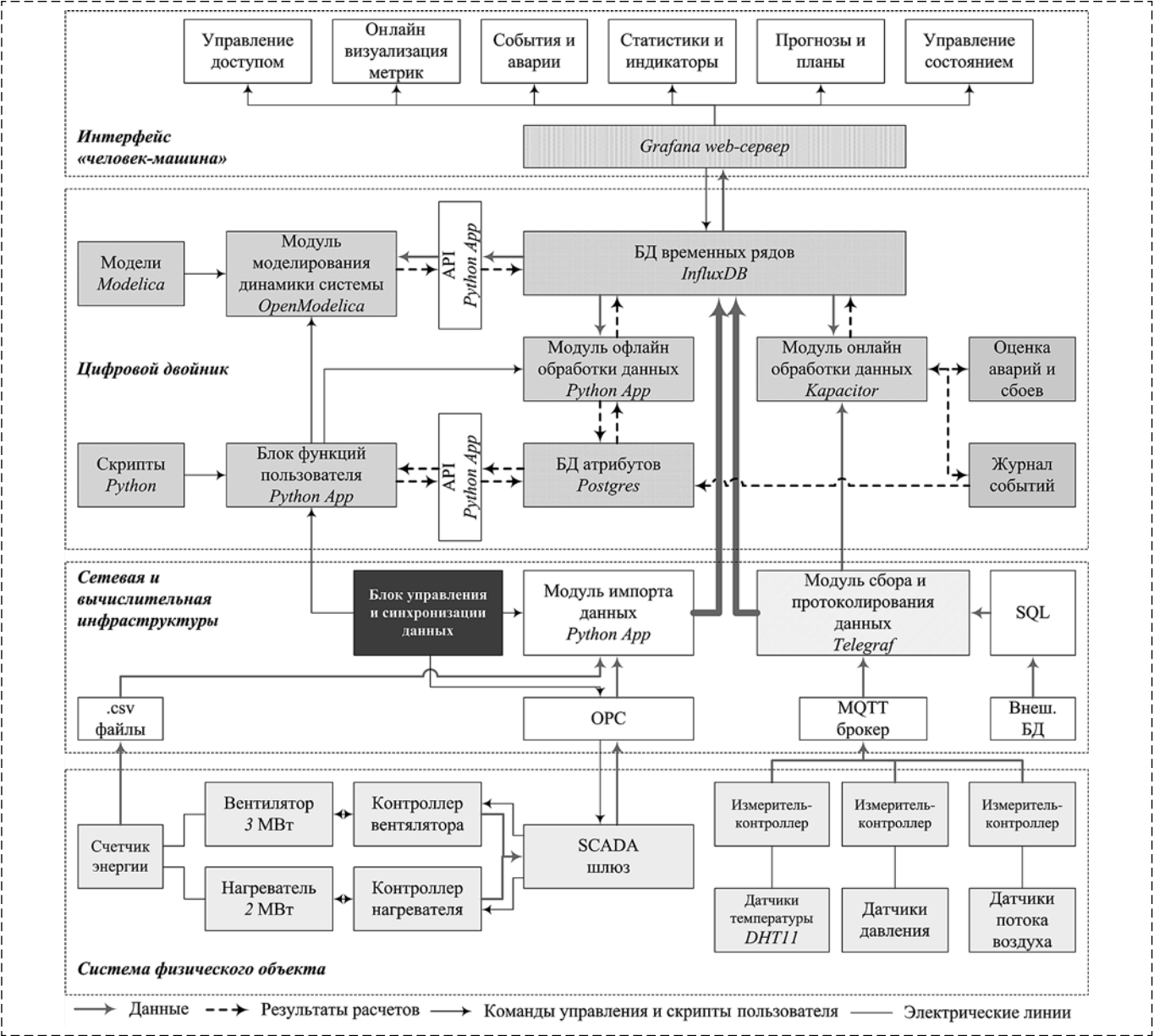


Рис. 2. Упрощенная архитектура CPS управления проветриванием рудника
Fig. 2. Simplified CPS architecture for mine ventilation control

проектирование, моделирование, внедрение и эксплуатацию технических объектов [9, 21]. В этом случае для решения задач энергосбережения могут быть использованы механизмы предиктивной аналитики [22], с реализацией на популярных Python-библиотеках Keras, TensorFlow и Padasip. Точный прогноз изменений параметров можно использовать для непрерывного регулирования технологического параметра по классическому алгоритму регулирования по обратной связи в дополнение к целевой функции энергопотребления [23, 24].

Сигналы управления для исполнительных контроллеров ГВУ можно формировать с помощью блока программного управления, в том числе с учетом команд оператора, как показано, например, в работе [25]. Определение переходных функций соответствующих каналов объекта управления целесообразно реализовать при идентификации реакции температурных показателей в руднике при ступенчатом воздействии на канал [26–28], по историческим данным в базе данных InfluxDB и журналу событий в Postgres.

Экспериментальное взаимодействие элементов цифрового двойника архитектуры CPS проветривания шахты (рудника)

Каждый рудник и шахта имеют свои особенности, и для управления проветриванием на этих предприятиях уже нельзя будет пользоваться допущениями, приведенными выше. Для того чтобы оценить, насколько согласуются известные и доказанные теории, описывающие динамику изменения параметров воздуха при его прохождении по стволам и горным выработкам подземных горнодобывающих предприятий, с данными, полученными в программе OpenModelica, была построена имитационная модель по упрощенной схеме проветривания калийного рудника (т.е. с вышеприведенными допущениями), приведенная на рис. 3 (см. вторую сторону обложки).

Параметры рудника приняты следующими: высота каждого из воздухоподающих стволов и вентиляционного ствола 400 м; диаметр всех вертикальных стволов 7 м; температура окружающей среды 20 °С; протяженность горизонтального ствола 1 — 50 м, горизонтального ствола 2 — 10 км; диаметр горизонтальных стволов 5 м; производительность ГВУ изменяется от 200 до 400 кг/с в момент времени $t = 600$ с.

В работе [10] доказано, что если устья стволов находятся на одной отметке и имеют одинаковую глубину, то между ними естественная тяга возникнуть не может. Однако, если принудительно (за счет ГВУ) начать закачку более теплого (легкого) воздуха в воздухоподающие стволы, а выкачивать более холодный (тяжелый) воздух по вентиляционному стволу, то между стволами возникнет общерудничная естественная тяга, зависящая от разности этих температур в стволах. Поэтому в модели, представленной на рис. 3 (см. вторую сторону обложки), определить общерудничную естественную тягу можно только при включенной ГВУ, а изменение воздухораспределения между стволами — при резком (скачкообразном) изменении режима работы ГВУ.

В работах [11, 29] установлено, что по мере движения воздуха по воздухоподающему стволу его температура за счет барометрического сжатия увеличивается каждые 100 м примерно на 1 °С. Результаты имитационного моделирования схемы, представленной на рис. 3, показывают, что за 400 м температура воздуха поднялась примерно на 3,5 °С, что близко к истинным значениям воздуха. Объяснить некоторое различие между полученными значениями можно несоответствием параметров реальных шахтных стволов (наличие в них расстрелов, подъемных сосудов и т.д.) представленным в модели трубам. Однако общая картина изменения температуры воздуха в стволах является адекватной.

Также в работе [30] установлено, что при изменении параметров ГВУ воздухораспределение между стволами меняется лишь через некоторое время. Связано это с инерционностью процесса проветривания: ввиду большой протяженности горных выработок от воздухоподающих стволов до вентиляционного ствола объемный расход воздуха в них изменится лишь спустя некоторое время (для каждого рудника разное) после изменения производительности ГВУ. Эту картину модель, показанная на рис. 3 (см. вторую сторону обложки), также успешно воспроизводит: при скачкообразном изменении производительности ГВУ объемный расход в воздухоподающих стволах изменяется плавно в течение некоторого времени.

В связи с этим можно сказать, что модель адекватно описывает происходящие в руднике процессы изменения воздухораспределения и параметров воздуха при регулировании режима работы ГВУ. При введении в модель допущений, устраненных ранее для упрощенной модели,

в дальнейшем для каждого конкретного подземного горнодобывающего предприятия будет возможно составлять адекватные модели, позволяющие моделировать процесс управления проветриванием при внесении правок в саму модель.

В качестве вычислительного эксперимента была решена задача прогнозирования профиля электрической мощности P на сутки вперед для системы вентиляции помещения с использованием входных данных от имитационной модели в программе OpenModelica. Для этого было реализовано информационное взаимодействие OpenModelica, расчетных моделей Python (библиотека Keras), базы данных InfluxDB и среды визуализации метрик Grafana. В ходе решения получена обучаемая прогностическая модель потребления электроэнергии, которая комбинирует классические модели путем адаптации их весов с помощью многослойного перцептрона. На рис. 4 (см. вторую сторону обложки) приведены результаты экспериментальных расчетов за неделю в период с 22 по 29 января 2020 г. В число комбинируемых моделей входят простые модели на основе усреднения, сглаживающие модели, а также модели, учитывающие сезонность. Мерой оценки точности прогноза E является среднеквадратичная ошибка.

Используя предложенный в работе алгоритм расчета общерудничной естественной тяги с учетом изменяющихся и прогнозируемых ее значений по аналогии с предлагаемой экспериментальной методикой, можно управлять работой ГВУ в энергосберегающем режиме.

Заключение

Накапливаемая в InfluxDB информация об объекте за весь период эксплуатации используется для уточнения расчета общерудничной естественной тяги и регулирования производительности ГВУ в OpenModelica путем использования в модели экзогенных данных о прогнозе изменений параметров эксплуатации шахты (рудника) и параметров наружного воздуха. Таким образом, платформа представленной архитектуры позволит обеспечить предиктивное управление по заранее прогнозируемым параметрам, действующим на объекте, и компенсировать их в условиях инерционности процесса проветривания. Постоянная адаптация расчетов команд управления к реальности и прогнозу позволит непрерывно оптимизиро-

вать настройки алгоритма регулирования воздухообеспечением подземных выработок, гарантируя энергоэффективную работу локальных контуров регулирования вентиляторов.

Таким образом, для эффективной и безопасной работы системы проветривания в оптимальном режиме систему управления технологическими процессами на подземных горнодобывающих предприятиях можно рассматривать как CPS, реализующую передачу данных от уровня SCADA до уровня платформы Интернета вещей, их обработку и анализ с использованием предиктивных аналитик, а также выдачу управляющих сигналов на исполнительные механизмы (либо оператору ГВУ) с учетом имитационного моделирования динамических процессов воздухораспределения между горными выработками.

Список литературы

1. Lyalkina G. B., Nikolaev A. V., Makarychev N. S. Creation of the Information System Based on Experimental Data for Control of the MMF Operating Modes to Improve the Efficiency of Ventilation in Mines // Journal of Physics: Conference Series. 2018. Vol. 1059 Art. 012013. 8 p.
2. Алыменко Н. И., Николаев А. В., Каменских А. А., Петров А. И. Результаты математического моделирования смешивания холодного и теплого потоков воздуха в воздухоподающем стволе рудника // Горное оборудование и электромеханика. 2014. № 12. С. 31–33.
3. Aitao Z., Wang K. Role of gas ventilation pressure on the stability of airway airflow in underground ventilation // Journal of Mining Science. January 2018. Vol. 54, Iss. 1. P. 111–119.
4. Lyalkina G. B., Nikolaev A. V., Makarychev N. S. Factors influencing strength and direction of natural ventilation pressure in general mines to control mine airing // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 795. 5 p.
5. Bin Xu et al. Analysis and Design of Real-time Micro-environment Parameter Monitoring System Based on Internet of Things // IEEE International Conference on Internet of Things (iThings) and IEEE Green Computing and Communications (GreenCom) and IEEE Cyber, Physical and Social Computing (CPSCom) and IEEE Smart Data (SmartData). 2016. P. 368–371.
6. Gubbi J. et al. Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions // Future generation computer systems. 2013. Vol. 29, N.7. P. 1645–1660.
7. Jell T. et al. BIG IoT — Interconnecting IoT Platforms from different domains // International Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE/ITMC). 2017. P. 86–88.
8. Mijić D., Varga E. Unified IoT Platform Architecture Platforms as Major IoT Building Blocks // 2018 International Conference on Computing and Network Communications (CoCoNet). 2018. P. 6–13.
9. Кычкин А. В., Артемов С. А., Белоногов А. В. Распределенная система энергомониторинга реального времени на основе технологии IoT // Датчики и системы. 2017. № 8–9. С. 49–55.
10. Alymenko N. I., Nikolaev A. V. Influence of mutual alignment of mine shafts on thermal drop of ventilation pressure between the shafts // Journal of Mining Science. 2011. Vol. 47, N 5. P. 636–642.
11. Мохирев Н. Н., Радько В. В. Инженерные расчеты вентиляции шахт. Строительство. Реконструкция. Эксплуатация. М.: ООО Недра-Бизнесцентр, 2007. 324 с.

12. **Lyal'kina G. B., Nikolaev A. V.** Natural draught and its direction in a mine at the preset confidence coefficient // *Journal of Mining Science*, 2015. Vol. 51, № 2. P. 342–34.
13. **Алыменко Н. И., Николаев А. В.** Расчет эквивалентного аэродинамического сопротивления подземной части проектируемого рудника для определения естественной тяги, действующей между стволами // *Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений*. 2010. № 12. С. 68–69.
14. **Ajay Chhokra et. al.** Diagnostics and Prognostics Using Temporal Causal Models for Cyber Physical Energy Systems // 2017 ACM/IEEE 8th International Conference on Cyber-Physical Systems (ICCPs). DOI: 10.1145/3055004.3064843
15. **Кудж С. А., Цветков В. Я.** Сетецентрическое управление и киберфизические системы // *Образовательные ресурсы и технологии*. 2017. 2(19). С. 86–91.
16. **Цветков В. Я.** Распределенное интеллектуальное управление // *Государственный советник*. 2017. № 1. С. 16–22.
17. **Кузьмин В. А.** Оптимальное отопление: поддержание неравновесного поля температур в многокамерной системе с минимумом затрат энергии // *Программные системы: теория и приложения*. 2018. Т. 9, № 3(38). С. 29–47.
18. **Пуговкин А. В., Купреков С. В., Абушкин Д. В. и др.** Математическая модель теплоснабжения помещений для АСУ энергосбережения // *Доклады ТУСУРа*. 2010. № 2 (22). Ч. 1. С. 293–298.
19. **Панферов В. И., Анисимова Е. Ю., Нагорная А. Н.** К теории математического моделирования теплового режима зданий // *Вестник ЮУрГУ*. 2006. № 14. С. 128–131.
20. **Кычкин А. В., Даденков Д. А., Билалов А. Б.** Автоматизированная информационная система полунатурного моделирования статической нагрузки электроприводов // *Вестник ПНИПУ. Электротехника, информационные технологии, системы управления*. 2013. № 8. С. 73–83.
21. **Hou L., Zhao S., Xiong X., Zheng K., Chatzimisios P., Hossain M. S., Xiang W.** Internet of Things Cloud: Architecture and Implementation // *IEEE Communications Magazine*. 2016. Vol. 45 (12). P. 32–39. DOI: 10.1109/MCOM.2016.1600398CM.
22. **Tao F. et al.** IoT-based intelligent perception and access of manufacturing resource toward cloud manufacturing // *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2014. Vol. 10, N. 2. P. 1547–1557.
23. **Кычкин А. В., Микрюков Г. П.** Метод обработки результатов мониторинга группы энергопотребителей // *Энергобезопасность и энергосбережение*. 2016. № 6. С. 9–14.
24. **Kelly S. D.T., Suryadevara N. K., Mukhopadhyay S. C.** Towards the implementation of IoT for environmental condition monitoring in homes // *IEEE Sensors Journal*. 2013. Vol. 13, № 10. P. 3846–3853.
25. **Guan L.** Preparation of future weather data to study the impact of climate change on buildings // *Building and Environment*. 2009. Vol. 44, N 4. P. 793–800.
26. **Ицкович Э. Л.** Современные алгоритмы автоматического регулирования и их использование на предприятиях // *Автоматизация в промышленности*. 2007. № 6. С. 39–44.
27. **Ротац В. Я.** Об адаптивных системах управления с текущей идентификацией // *Автоматизация в промышленности*. 2004. № 6. С. 3–6.
28. **Waczowicz S., Klaiber S., Bretschneider P., Konotop I., Westermann D., Reischl M., Mikut R.** Data mining to analyse the effects of price signals on household electricity customers // *Automatisierungstechnik*. 2014. Vol. 62. P. 740–752.
29. **Nikolaev A. V., Alymenko N. I., Kamenskikh A. A., Nikolaev V. A., Alymenko D. N., Petrov A. I.** Factors defining value and direction of thermal drop between mine shafts and impact of general mine natural draft on ventilation process of underground mining companies // *Actual Issues of Mechanical Engineering (AIME 2017): Proceedings of the Intern. Conf. Tomsk Polytechnic University*. Paris; Amsterdam; Hong Kong: Atlantis Press, 2017. P. 561–566.
30. **Nikolaev A., Alymenko N., Kamenskikh A., Nikolaev V.** The results of air treatment process modeling at the location of the air curtain in the air suppliers and ventilation shafts // *E3S Web of Conferences*. 2017. Vol. 15: The 1st Scientific Practical Conference International Innovative Mining Symposium (in memory of Prof. Vladimir Pronoza): proceedings. 7 p.

Architecture of a Cyber-Physical System for the Mining Enterprise Ventilation Control Based on the Internet of Things Platform

A. V. Kychkin, avkychkin@hse.ru,

Department of Information Technologies in Business, National Research University Higher School of Economics, Perm, Russia, 614070, Russian Federation,

A. V. Nikolaev, nikolaev0811@mail.ru,

Department of Mining Electromechanics, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation, 614900, Russian Federation

Corresponding author: Kychkin A. V., PhD, Associate Professor, Department of Information Technologies in Business, National Research University Higher School of Economics, Perm, Russia, 614070, Russian Federation, e-mail: avkychkin@hse.ru

Accepted on December 03, 2020

The article considers the architecture of the ventilation control system for underground mining enterprises, equipped with a digital twin with online functions such as simulation modeling and predictive analytics. The system is focused on the main fan unit (MFU) control taking into account changing parameters of external air supplied to mine shafts. In contrast to the existing ones, the proposed method of control takes into account the influence of these parameters on changes in the total volume of natural draught, on which the total volume of air supplied to the mine (mine) depends. It is known that ventilation systems of such enterprises consume from 30 to 50 % of all electricity consumed for the mining process. In this regard, the proposed control models can be used to optimize energy costs and energy savings in ventilation. The Internet of things (IoT) InfluxData of stack TICK is offered for the realization. The offered architecture of cyber-physical system (CPS) consists of four subsystems: physical object subsystem, network and computing infrastructure IoT, digital twin, user interface. Architecture of CPS provides data processing from energy meters, control controllers and sensors of air environment parameters, implemented in blocks of on-line and off-line calculations. The digital twin of the ventilation system is made with the use of a time series database and a database of attributes that store information on changes in equipment

parameters by time, air indicators, performance indicators, statistics on accidents and fan runtime, CPS characteristics, etc. CPS of the given architecture means connection of additional data sources, providing calculations of rational volumes of air delivery taking into account safety norms and requirements of energy efficiency.

Keywords: cyber-physical system, Internet of Things, Digital Twin, monitoring and control system, system architecture, mine, ventilation, energy saving

Acknowledgements: The analysis has been carried out within the priority area of scientific development established by the National Research University Higher School of Economics in Perm — "Research on control methods in Cyber-Physical Systems".

For citation:

Kychkin A. V., Nikolaev A. V. Architecture of a Cyber-Physical System for the Mining Enterprise Ventilation Control Based on the Internet of Things Platform, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2021, vol. 22, no. 3, pp. 115–123.

DOI: 10.17587/mau.22.115-123

References

1. Lyalkina G. B., Nikolaev A. V., Makarychev N. S. Creation of the Information System Based on Experimental Data for Control of the MMF Operating Modes to Improve the Efficiency of Ventilation in Mines, *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, vol. 1059, Art. 012013, pp. 1–8.
2. Alymenko N. I., Nikolaev A. V., Kamenskikh A. A., Petrov A. I. Results of the mathematical modeling of the cold and warm air flows mixing in the air supply shaft of the mine, *Gornoe Oborudovanie i Elektromekhanika*, 2014, no. 12, pp. 31–33 (in Russian).
3. Aitao Z., Wang K. Role of gas ventilation pressure on the stability of airway airflow in underground ventilation, *Journal of Mining Science*, 2018, vol. 54, iss. 1, pp. 111–119.
4. Lyalkina G. B., Nikolaev A. V., Makarychev N. S. Factors influencing strength and direction of natural ventilation pressure in general mines to control mine airing, *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2020, vol. 795, 5 p.
5. Xu Bin, Zheng Jianying, Wang Qing. Analysis and Design of Real-time Micro-environment Parameter Monitoring System Based on Internet of Things, *IEEE International Conference on Internet of Things (iThings) and IEEE Green Computing and Communications (GreenCom) and IEEE Cyber, Physical and Social Computing (CPSCom) and IEEE Smart Data (SmartData)*, 2016, pp. 368–371.
6. Gubbi J., Buyya R., Marusic S., Palaniswami M. Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions, *Future generation computer systems*, 2013, vol. 29, no. 7, pp. 1645–1660.
7. Jell T., Bröring A., Mitic J. BIG IoT — Interconnecting IoT Platforms from different domains, *International Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE/ITMC)*, 2017, pp. 86–88.
8. Mijić D., Varga E. Unified IoT Platform Architecture Platforms as Major IoT Building Blocks, *2018 International Conference on Computing and Network Communications (CoCoNet)*, 2018, pp. 6–13.
9. Kychkin A. V., Artemov S. A., Belonogov A. V. The distributed power monitoring system of a real time on the basis of IoT technology, *Datchiki i Sistemy*, 2017, no. 8–9, pp. 49–55 (in Russian).
10. Alymenko N. I., Nikolaev A. V. Influence of mutual alignment of mine shafts on thermal drop of ventilation pressure between the shafts, *Journal of Mining Science*, 2011, vol. 47, no. 5, pp. 636–642.
11. Mohirev N. N., Radko V. V. Engineering Calculations of Mine Ventilation. Construction. Reconstruction. Exploitation, Moscow, Nedra-Business Center, 2007, 324 p. (in Russian).
12. Lyalkina G. B., Nikolaev A. V. Natural draught and its direction in a mine at the preset confidence coefficient, *Journal of Mining Science*, 2015, vol. 51, no. 2, pp. 342–346.
13. Alymenko N. I., Nikolaev A. V. Calculation of the equivalent aerodynamic resistance of an underground part of the projected mine for determination of the natural thrust against the shafts, *Geologiya, Geofizika i Razrabotka Neftyanyh i Gazovyh Mestorozhdenij*, 2010, no. 12, pp. 68–69 (in Russian).
14. Chhokra A., Hasan S., Dubey A., Mahadevan N., Karsai G. WiP Abstract: Diagnostics and Prognostics Using Temporal Causal Models for Cyber Physical Energy Systems, *2017 ACM/IEEE 8th International Conference on Cyber-Physical Systems (ICCPs)*, 2017, pp. 87–88.
15. Kuzh S. A., Tsvetkov V. Ya. Network centric control and the cyberphysical systems, *Obrazovatel'nye Resursy i Tekhnologii*, 2017, no. 2(19), pp. 86–91 (in Russian).
16. Tsvetkov V. Ya. Distributed intellectual management, *Gosudarstvennyj Sovetnik*, 2017, no. 1, pp. 16–22 (in Russian).
17. Kuz'min V. A. Optimal heating: maintenance of the non-equilibrium temperature field in the multichamber system with minimum energy consumption, *Programmnye Sistemy: Teoriya i Prilozheniya*, 2018, vol. 9, no. 3(38), pp. 29–47 (in Russian).
18. Pugovkin A. V., Kuprekov S. V., Abushkin D. V., Zarechnaya I. A., Muslimova N. I. Mathematical model of a space heat supply for the energy-saving ACS, *Doklady TUSUR*, 2010, no. 2 (22), part 1, pp. 293–298 (in Russian).
19. Panferov V. I., Anisimova E. Yu., Nagornaya A. N. To theory of a mathematical modeling of the building thermal mode, *Vestnik YUUrGU*, 2006, no. 14, pp. 128–131 (in Russian).
20. Kychkin A. V., Dadenkov D. A., Bilalov A. B. Automated information system of the semi-nature modeling of the electric drive static load, *Vestnik PNIPU. Elektrotehnika, Informacionnye Tekhnologii, Sistemy Upravleniya*, 2013, no. 8, pp. 73–83 (in Russian).
21. Hou L., Zhao S., Xiong X., Zheng K., Chatzimisios P., Hossain M. S., Xiang W. Internet of Things Cloud: Architecture and Implementation, *IEEE Communications Magazine*, 2016, vol. 45 (12), pp. 32–39.
22. Tao F., Zuo Y., Xu L., Zhang L. IoT-based intelligent perception and access of manufacturing resource toward cloud manufacturing, *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2014, vol. 10, no. 2, pp. 1547–1557.
23. Kychkin A. V., Mikriukov G. P. Processing method for the monitoring results processing of the energy consumer group, *Energo-bezopasnost' i Energobezopasnost'*, 2016, no. 6, pp. 9–14 (in Russian).
24. Kelly S. D.T., Suryadevara N. K., Mukhopadhyay S. C. Towards the implementation of IoT for environmental condition monitoring in homes, *IEEE Sensors Journal*, 2013, vol. 13, no. 10, pp. 3846–3853.
25. Guan L. Preparation of future weather data to study the impact of climate change on buildings, *Building and Environment*, 2009, vol. 44, no. 4, pp. 793–800.
26. Itskovich E. L. Modern algorithms of the automatic regulation and their use at the enterprises, *Avtomatizatsiya v Promyshlennosti*, 2007, no. 6, pp. 39–44 (in Russian).
27. Rotach V. Y. About adaptive control systems with current identification, *Avtomatizatsiya v Promyshlennosti*, 2004, no. 6, pp. 3–6.
28. Waczowicz S., Klaiber S., Bretschneider P., Konotop I., Westermann D., Reischl M., Mikut R. Data mining to analyse the effects of price signals on household electricity customers, *Automatisierungstechnik*, 2014, 62, pp. 740–752.
29. Nikolaev A. V., Alymenko N. I., Kamenskikh A. A., Nikolaev V. A., Alymenko D. N., Petrov A. I. Factors defining value and direction of thermal drop between mine shafts and impact of general mine natural draft on ventilation process of underground mining companies, *Actual Issues of Mechanical Engineering (AIME 2017): proceedings of the International Conference*, 2017, pp. 561–566.
30. Nikolaev A., Alymenko N., Kamenskikh A., Nikolaev V. The results of air treatment process modeling at the location of the air curtain in the air suppliers and ventilation shafts, *The 1st Scientific Practical Conference International Innovative Mining Symposium (in memory of Prof. Vladimir Pronoza)*, 2017, vol. 15, p. 7.