УДК 681.5:622.4

Косыгина Анастасия Анатольевна, студентка бакалавриата
(ДВФУ, г. Владивосток)
Коробейников Илья Алексеевич, магистрант
(ДВФУ, г. Владивосток)
Anastasia A. Kosygina, undergraduate student
(FEFU, Vladivostok)
Ilya A. Korobeinikov, Master's student
(FEFU, Vladivostok)

АВТОМАТИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ ПРОВЕТРИВАНИЕМ ШАХТЫ НА БАЗЕ ПЛК С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ ВЕНТИЛЯЦИОННОЙ СЕТИ

AUTOMATION OF MINE VENTILATION CONTROL BASED ON PLC USING A DIGITAL MODEL OF THE VENTILATION NETWORK

Аннотация. Предложена структура управления проветриванием шахты, в которой ПЛК реализует нижние контуры регулирования, а упрощённая цифровая модель сети рассчитывает уставки. Приведены уравнения потокораспределения, критерий оптимизации, таблицы уровней, сигналов и алгоритма; энергетический эффект оценён имитационно.

Abstract. A mine ventilation control structure is proposed in which a PLC implements lower control loops and a simplified digital network model calculates setpoints. Flow-distribution equations, an optimization criterion, tables of levels, signals and algorithm are given; the energy effect is estimated by simulation.

Введение

Вентиляционный режим шахты изменяется вслед за развитием горных работ, перемещением забоев, установкой перемычек и сезонной регулировкой. Фиксированная настройка вентилятора при этом способна приводить как к недостаточной подаче воздуха в отдельных ветвях, так и к избыточному расходованию электроэнергии. Системное регулирование, опирающееся на измерения и модель сети, рассматривается в работах [1–3]. Такой режим удобен при стабильной сети, но плохо работает, когда топология меняется чаще, чем проект успевает обновляться. Отсюда и интерес к схемам, где уставки пересчитываются по модели, а не задаются один раз.

Цель исследования - формализовать структуру автоматизации проветривания, в которой нижний уровень ПЛК стабилизирует исполнительные механизмы, а верхний уровень по модели распределения воздуха

пересчитывает уставки. Описаны потоки данных, ограничения безопасности и результаты имитационного сравнения двух режимов.

1. Подходы и критерии выбора

Сравнение удобно вести по двум признакам: учитывает ли подход распределение воздуха по ветвям и какие ресурсы нужны для его внедрения.

Таблица 1 - Сопоставление решений управления проветриванием

Подход	Регулируемые величины	Учет ветвей сети	Условие применимости
Двухконтурная автоматика	Газовый показатель и частота привода	Нет явного расчёта распределения	Локальный контур; риск неучтённых ветвей
Модельно-ориентированное управление [1, 2]	Расходы по участкам, скорость вентиляторов	Да	Нужны измерения и достоверная модель
Предлагаемая схема	ПЛК - исполнительные контуры; модель - уставки	Да, в квазистационарном приближении	Реализация при ограниченных ресурсах моделирования

Из таблицы видно, что модельно-ориентированные схемы выигрывают по качеству, но проигрывают по требованиям к инфраструктуре. Предлагаемая схема занимает промежуточное положение: модель есть, но упрощённая.

2. Математическая модель и обозначения

Сеть удобно описывать в терминах матрицы инцидентности, тк тогда баланс расходов во всех узлах записывается одним уравнением, а не системой уравнений.

$$AQ = 0 \qquad (1)$$

где A- матрица инцидентности; Q- вектор объёмных расходов, м³/с. Баланс расходов для внутренних узлов [3].

$$\Delta p_i = R_i Q_i \mid Q_i \mid \qquad (2)$$

где Δp_i- перепад давления на i-й ветви, Па; R_i- аэродинамическое сопротивление, Па·с²/м⁶; Q_i- расход, м³/с.

$$C\left(\Delta p - p_f\right) = 0 \qquad (3)$$

где C- матрица независимых контуров; p_f- вектор напоров, создаваемых вентиляторами, Па;

$$Q_f \sim n,\ p_f \sim n^2,\ P_f \sim n^3 \qquad (4)$$

где Q_f- подача вентилятора; n- частота вращения; зависимости соответствуют законам подобия при сопоставимых режимах.

$$P_f = \frac{p_f Q_f}{\eta_f},\ E_\Sigma = \int_0^T (P_f + P_{\text{reg}})\, dt \qquad (5)$$

где P_f, P_{reg}- мощность вентилятора и регуляторов, Вт; η_f- КПД; E_Σ- энергия за интервал T(Дж, при соответствующих единицах).

Критерий минимума энергопотребления имеет смысл только вместе с ограничениями по газовому составу и допустимым положениям регуляторов - иначе оптимум сместится в область, недопустимую по условиям безопасности.

$$\begin{cases} \min E_\Sigma, \\ Q_i^{\min} \le Q_i \le Q_i^{\max}, \\ c_j \le c_j^{\max}, \\ u_k^{\min} \le u_k \le u_k^{\max}, \end{cases} \qquad (6)$$

где u- положения регулирующих органов; c_j- концентрации контролируемых примесей; дополнительно соблюдаются баланс (1)–(3) и ограничения приводов.

$$R_i^{k+1} = R_i^k + \lambda\, \frac{\Delta p_i^{\text{obs}} - R_i^k Q_i^2}{Q_i^2 + \varepsilon} \qquad (7)$$

где R_i^{k+1}- итеративное уточнение сопротивления по измерению; λ- коэффициент коррекции; $\varepsilon > 0$- регуляризатор;

$$|\ Q_i^{\text{obs}} - Q_i^{\text{model}}\ | > \delta_i \qquad (8)$$

где δ_i- допустимое расхождение расхода; наблюдение obs и расчёт model сравниваются в одной точке.

Таблица 2 - Основные переменные и размерности

Символ	**Физический смысл**	**Единица**
Q_i	Расход воздуха в ветви i	м³/с
R_i	Аэродинамическое сопротивление ветви	Па·с²/м⁶
Δp_i; p_f	Потеря давления; напор вентилятора	Па

Символ	Физический смысл	Единица
n	Частота вращения вентилятора	об/мин
P_f; P_{reg}	Мощность вентилятора; регулирующих устройств	Вт или кВт
E_Σ	Суммарная потреблённая энергия	Дж или кВт·ч
c_j	Концентрация контролируемого газа	% об. либо мг/м³
δ_i	Порог расхождения расходов	м³/с

3. Уровни системы и информационный обмен

Таблица 3 - Функциональная архитектура

Уровень	Средство	Вход / функция	Результат
Нижний	ПЛК Siemens S7-1500; датчики; частотные преобразователи	Сбор расхода, газа и положения регуляторов; стабилизация	Измерения и выполнение команд
Верхний	Промышленный ПК и квазистационарная модель	Расчет (1)–(3), оптимизация (6), обновление R_i (7)	Новые уставки
Обмен [4]	OPC UA	Публикация сигналов и приём управляющих значений	Цикл модели 30–60 с

Таблица 4 - Параметры информационных каналов

Сигнал	Источник → получатель	Интервал	Назначение
Q_i	Расходомеры → ПЛК → модель	1–5 с	Поточечное распределение
CH_4, CO и др.	Газовые датчики → ПЛК → модель	1–5 с	Контроль ограничений
Положение регулятора	Датчик положения → ПЛК → модель	1–5 с	Уточнение сопротивления
nзад	Модель → ПЛК	30–60 с	Уставка вентилятора
uзад	Модель → ПЛК	30–60 с	Уставка регуляторов

4. Алгоритм и оценка

Алгоритм строится в виде цикла: измерения → расчёт → проверка ограничений → уставки → оценка отклонения. Шаги 7 и 8 выполняются не всегда, а только когда расхождение превышает допуск.

Таблица 5 - Порядок адаптивного регулирования

№	Операция	Вход	Выход / правило
1	Снять и проверить измерения	Расход, газ, положения	Вектор наблюдений
2	Выполнить расчёт сети	Топология, R_i, показания	Qmodel; (1)–(3)
3	Проверить технологические пределы	Qmodel, c_j	Признак допустимости; (6)
4	Рассчитать допустимые уставки	Режим, пределы приводов	nзад, uзад; (6)
5	Передать команды через OPC UA	Команды верхнего уровня	Задания ПЛК
6	Отработать команды	Привод вентилятора и регуляторов	Изменение расходов
7	Оценить отклонение	Qobs, Qmodel	Критерий (8)
8	Уточнить сопротивления	Δpobs, Qobs	R_i на следующем цикле; (7)

Таблица 6 - Результаты имитационного сопоставления

Показатель	Статический режим	Адаптивный режим
Частота вентилятора	Постоянная	Изменяемая
Положения регуляторов	Проектные	Адаптируемые
Энергопотребление за цикл	100 % (база)	78–82 % от базового
Концентрации в контрольных точках	В пределах заданных пределов	В пределах заданных пределов

Разница между режимами проявляется обычно в моменты, когда газовыделение в одном из забоев падает, ведь тогда статическая схема продолжает подавать воздух по проекту, а адаптивная перераспределяет его в другие выработки. Именно на этих интервалах и накапливается экономия.

$$\eta_E = \frac{E_{\text{stat}} - E_{\text{adapt}}}{E_{\text{stat}}} \cdot 100\,\% = 18 - 22\,\% \qquad (9)$$

где E_{stat}и E_{adapt}- энергопотребление двух режимов на сопоставимом интервале; 18–22 % — результат имитационного моделирования, требующий натурной проверки.

Таблица 7 - Ограничения предложенной схемы

Ограничение	**Методологическое следствие**	**Необходимая проверка**
Квазистационарность	Внезапное газовыделение моделью не воспроизводится	Динамическая модель и аварийный аэрогазовый контроль
Неточная идентификация R_i [3]	Отклонение расчетных расходов от фактических	Полевые замеры и анализ неопределённости
Период пересчёта 30–60 с	Ограниченная скорость адаптации	Испытание при изменяющейся нагрузке
Натурный эксперимент не проводился	Энергетический эффект остаётся расчетным	Промышленная апробация [1, 2]

Заключение

Разработана функциональная схема управления проветриванием с разделением задач между ПЛК и моделью сети. Взаимосвязи потоков, ограничений безопасности, энергопотребления и коррекции сопротивлений представлены системой формул (1)–(9). Имитационная оценка показывает снижение затрат энергии на 18–22 % относительно статического режима. Для подтверждения эффекта необходимы натурные измерения, проверка аэродинамических сопротивлений и испытание системы при нестационарных возмущениях.

Список литературы

1. 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, No. 4. P. 533–539. DOI: 10.1016/j.ijmst.2020.05.016. https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2020.05.016
2. Николаев А. В., Кычкин А. В. Разработка и интеграция имитационной модели процесса проветривания подземного горно-добывающего предприятия в сервис управления спросом на электроэнергию // Записки Горного института. 2025. Т. 275. https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/16568
3. Cao P., Liu J., Wang H. et al. Uncertainty analysis of digital twin model of mine ventilation system // Scientific Reports. 2024. Vol. 14. Art. 26558. DOI: 10.1038/s41598-024-77978-3. https://doi.org/10.1038/s41598-024-77978-3

4. OPC Foundation. OPC Unified Architecture - Part 1: Overview and Concepts. Specification OPC-10000-1, v1.05.06. https://reference.opcfoundation.org/specs/OPC-10000-1/full