ISSN 1816-4528 (Print) **ISSN 2949-0634 (Online)**

Научная статья

УДК 622.445 : 621.34-52
DOI: 10.26730/1816-4528-2026-4-52-61

Руднев Петр Викторович[1,2], Маслов Иван Петрович[1,3], Шаулева Надежда Михайловна[1*]

[1] Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева
[2] ООО «Девис Дерби Сибирь»
[3] ООО «Современные технические решения»

[*] для корреспонденции: shnm.eav@kuzstu.ru

АНАЛИЗ ПУТЕЙ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ ПРОВЕТРИВАНИЯ ШАХТ И РУДНИКОВ

Аннотация.
В настоящее время добыча полезных ископаемых подземным способом сопровождается усложнением топологии горных выработок за счет увеличения глубины ведения очистных и подготовительных работ. Это приводит к увеличению протяженности вентиляционных сетей, что в свою очередь требует повышения надежности. Существующие вентиляционные системы, работающие на основе жестко заданных алгоритмов со статическими параметрами, не обеспечивают эффективность эксплуатации. Статья представляет собой обзор эксплуатационного состояния подземных рудников и оценку эффективности их автоматизации в условиях высокой динамики горнотехнических факторов. Проанализированы особенности состояния ключевых подземных горнодобывающих предприятий РФ (объектов ПАО «ГМК Норильский никель», ПАО «Уралкалий», АК «АЛРОСА».) Авторами обосновывается, что существующий дефицит высокоточного контроля воздушных потоков на технологической периферии шахтных полей и высокая инерционность систем аварийного реверсирования приводят к перерасходу электроэнергии от 30 до 50% и риску хаотического опрокидывания струй при пожарах. Выявлена нелинейность вентиляционной сети как объекта управления со случайно изменяющимися параметрами. Предложена концепция системы автоматизации, основанная на адаптивном методе по отношению к электротехническим комплексам. Представлены доводы о необходимости модернизации пассивных вентиляционных сооружений в активные регулируемые исполнительные механизмы. Отмечается, что координированное управление частотно-регулируемых приводов вентиляторов, автоматизированных шлюзов и заслонок позволяет локально компенсировать аэродинамические возмущения. Предлагаемый подход позволит обеспечить изоляцию местных вентиляционных систем подготовительных выработок, минимизирует энергопотребление электрических машин, а также должен повысить надежность жизнеобеспечения персонала при реализации планов ликвидации аварий.

CC BY

Информация о статье
Поступила:
17 июня 2026 г.

Одобрена после рецензирования:
01 сентября 2026 г.

Принята к печати:
15 сентября 2026 г.

Ключевые слова:
вентиляционная сеть рудника, адаптивное управление, частотно-регулируемый электропривод, вентиляционное сооружение, исполнительный механизм, план ликвидации аварий, подготовительная выработка, энергоэффективность

Для цитирования: Руднев П.В., Маслов И.П., Шаулева Н.М. Анализ путей повышения эффективности систем проветривания шахт и рудников // Горное оборудование и электромеханика. 2026. № 4 (186). С. 52-61. DOI: 10.26730/1816-4528-2026-4-52-61, EDN: DBLBRI

Введение

Развитие добычи полезных ископаемых подземным способом на современном этапе сопровождается усложнением пространственной топологии горных выработок, увеличением глубины ведения очистных и подготовительных работ и ростом протяженности вентиляционных сетей [1–3]. Данные тенденции обусловливают усиление влияния горнотехнических факторов на системы проветривания шахт и рудников. Случайное изменение аэродинамического сопротивления при продвижении забоев, технологическая конвергенция поперечного сечения выработок под действием горного давления, циклический характер перемещения крупнога-

баритной самоходной техники и интенсивные утечки воздуха через выработанное пространство превращают вентиляционную сеть в нелинейный объект с распределенными параметрами.

В сформировавшихся условиях детерминированные автоматизированные вентиляционные системы, функционирующие на основе жестко заданных алгоритмов со статическими параметрами (преимущественно ПИД-регуляторов), теряют свою эффективность [4–6]. Несогласованность между требуемым и фактическим распределением расхода воздуха приводит к образованию застойных зон, нерациональному расходу электроэнергии главными вентиляционными установками (ГВУ) и снижению общего уровня промышленной безопасности предприятия. Анализ эксплуатационного состояния ключевых подземных горнодобывающих предприятий Российской Федерации – включая рудники Норильского промышленного района ПАО «ГМК Норильский никель» («Таймырский», «Октябрьский», «Комсомольский»), объекты АК «АЛРОСА» и ПАО «Уралкалий» – выявил системное технико-экономическое противоречие [17–21]. Переход горных работ на глубокие горизонты (более 1000–1500 метров) сопровождается консервативными подходами к автоматизации. На долю ГВУ и систем местного проветривания на данных объектах стабильно приходится от 30 до 50% совокупного электропотребления подземного комплекса. Это делает вентиляционные сети наиболее энергоемким объектом шахты.

Вентиляционная система рудника представляет собой сложный взаимосвязанный электроаэродинамический комплекс, включающий приводные синхронные и асинхронные двигатели ГВУ, вентиляторы местного проветривания (ВМП) и исполнительные устройства вентиляционных сооружений (шахтных дверей, шлюзов, заслонок). Опыт обследования рудников Урала указывает на критический дефицит контроля воздушных потоков на технологической периферии шахтных полей. Использование преимущественно очагового или дискретного мониторинга скорости воздуха (на базе переносных анемометров или редких стационарных датчиков типа СДСВ) создает «слепые зоны» в подготовительных и тупиковых выработках. С точки зрения теории автоматического управления это означает разрыв контура обратной связи: управляющий контроллер функционирует на основе устаревших или расчетных данных [7–9, 25, 26]. Возникающие в сложных вентиляционных контурах взаимные аэродинамические влияния вызывают непредусмотренные изменения нагрузки на валах приводных машин, ухудшают качество электроэнергии в локальной сети и приводят к перегреву обмоток электродвигателей по причине работы в нерасчетных токовых режимах.

Информационно-аналитическую базу настоящего исследования составил системный и компаративный анализ профильной литературы, патентов и нормативно-технических документов из баз данных Scopus, Web of Science, ВАК за последние 10 лет. Систематизация материала реализована путем декомпозиции вентиляционной сети на три иерархических уровня единого электротехнического комплекса: макроуровень (высоковольтные ЧРП ГВУ), мезоуровень (автоматизированные вентиляционные сооружения) и микроуровень (электроприводы ВМП подготовительных выработок). В рамках микроуровня особое внимание уделено отечественному опыту моделирования переходных аэрологических процессов в тупиковых забоях при различных способах пуска вентиляторных установок. Целью статьи является проведение системно-аналитического обзора научно-технических достижений для выявления дефицитов в системах контроля воздушных потоков, обоснования трансформации вентиляционных сооружений в активные электромеханические узлы и формирования требований к перспективным адаптивным электротехническим комплексам интеллектуального управления режимами проветривания.

Результаты

Исходя из анализа текущего состояния схем проветривания шахт и рудников, структурная схема существующей системы управления представлена на Рис. 1.

Автоматизация процесса заключается в непрерывном контроле SCADA-системой параметров системы вентиляции с отображением и архивированием данных на автоматизированном рабочем месте АРМ диспетчера или оператора. Решение и управляющее воздействие осуществляется в ручном режиме ответственным специалистом. При такой структуре исполнительные, силовые и измерительные элементы функционируют независимо друг от друга. Все взаимосвязи и корректировки осуществляет человек.

Схема вентиляции условного рудника представлена на Рис. 2.

С огромным массивом данных сложно справляться даже специалисту в условно установившемся режиме проветривания при небольших локальных изменениях, а в случае аварийных переходных процессов оператор выполняет команды по модели вентиляции месячной и более давности.

Исходя из представленных данных, можно предположить возможные ошибочные действия персонала, высокую степень риска в переходных режимах и потенциально избыточное проветривание в установившемся режиме из-за отсутствия оперативного регулирования.

Для обоснования предлагаемых технических решений рассмотрим каждый уровень электротехнического комплекса вентиляционной системы более детально.

Модернизация макроуровня

В аварийных режимах (при пожарах), согласно Федеральным нормам и правилам в области промышленной безопасности, регламентировано немедленное изменение схемы проветривания – полное или частичное реверсирование струи с крыльев и горизонтов рудников [10–12]. Механический реверс, реализуемый с помощью переключения обходных каналов, ляд и шиберов главной вентиляторной установки (ГВУ) (например, на установках

типа ВОД-30 или ВОД-40), характеризуется критически высокой инерционностью, составляющей от 10 до 20 минут. За это время токсичные продукты горения достигают путей эвакуации, тогда как резкое механическое перекрытие воздушных каналов провоцирует мощные гидравлические удары, разрушающие элементы изоляционных перемычек и дестабилизирующие вентиляторы.

В качестве альтернативы рассматривается вариант электрического реверсирования приводных двигателей ГВУ посредством высоковольтных преобразователей частоты. Данный подход сокращает время реверса на несколько минут, но сталкивается со специфическими физическими факторами аварийного режима. В условиях пожара в горных выработках возникает термическая депрессия (мощный тепловой напор), действующая встречно или попутно нагнетаемому потоку воздуха [31–32]. В отсутствие адаптивных контуров управления преобразователь частоты не способен компенсировать эту динамическую депрессию. Встречный тепловой поток создает избыточный статический момент сопротивления на валу, что затягивает переходные процессы в электроприводе, вызывает тяжелые токовые перегрузки.

Жестко заданные алгоритмы управления при аварийных, переходных процессах являются неэффективными и порой разрушительными. Необходима гибкая интеграция исполнительных и силовых устройств с отработкой максимально эффективного алгоритма.

Для решения этой проблемы предлагается внедрение адаптивных алгоритмов управления с референтной моделью (MRAC) совместно с аппаратом нечеткой логики (Fuzzy Logic) в контурах управления шахтными ЧРП [6–37]. При возникновении аварийного возмущения, имеющего случайный характер, интеллектуальная система на основе нечетких правил в реальном времени идентифицирует изменившуюся матрицу взаимных сопротивлений

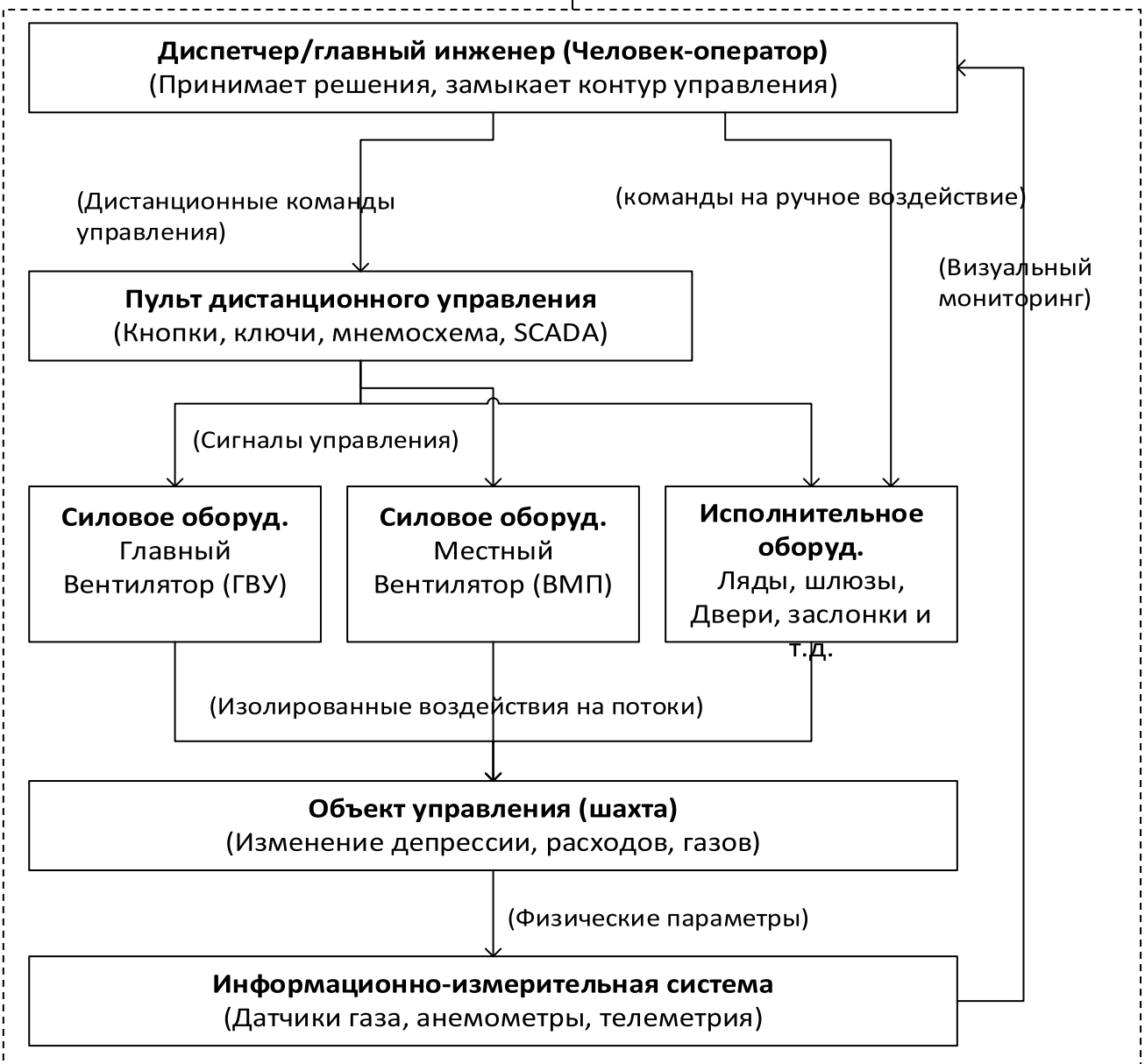

Рис. 1. Структурная схема существующей системы автоматизированного управления проветриванием
Fig. 1. Structural diagram of the existing automated ventilation control system

вентиляционной сети. Управляющий контроллер динамически формирует уставки по частоте и напряжению для форсирования электромагнитного момента приводных двигателей ГВУ, обеспечивая компенсацию термической депрессии, и одновременно корректирует углы поворота регулирующих заслонок и прочих вентиляционных сооружений для управления потоком продуктов горения или загазирования.

Модернизация мезоуровня

Основным барьером на пути к эффективному управлению вентиляционной сетью остается изолированное рассмотрение работы вентиляционных установок и вентиляционных сооружений (ВС) [17–19]. В действующей практике автоматизации шахтные двери, шлюзы и регулируемые заслонки интерпретируются как пассивные элементы топологии, управляемые дискретно по принципу «открыто – закрыто» исключительно для пропуска технологического транспорта.

При дискретном переключении одной вентиляционной двери скачкообразно меняется эквивалентное аэродинамическое сопротивление всей ветви. В распределенной вентиляционной сети это может генерировать нескомпенсированные волновые возмущения (гидравлические удары). Данная волна давления передается по сопряженным выработкам.

В качестве технического решения предлагается кардинальная смена модели управления: трансформация вентиляционных сооружений в активные регулируемые исполнительные механизмы единого электротехнического комплекса рудника. Автоматизированные вентиляционные сооружения (АВС) должны быть интегрированы в сквозную цифровую шину управления и оснащены следящим электромеханическим или электропневматическим приводом с непрерывным регулированием угла раскрытия створок [21–22, 33]. В такой конфигурации АВС становятся управляемыми аэродинамическими сопротивлениями [34–35]. При изменении режимов работы ГВУ приводы АВС плавно изменяют положение створок, локально дросселируя или перенаправляя воздушные потоки. Это позволяет компенсировать динамические возмущения горнотехнических факторов непосредственно в местах их возникновения, не перегружая вентиляторные установки и стабилизируя общую аэродинамическую структуру шахты.

Модернизация микроуровня

Режимы работы вентиляторов местного проветривания (ВМП), обеспечивающих подачу воздуха в тупиковые и подготовительные выработки, характеризуются высокой динамичностью и нестационарным характером выделения вредных газов. Отраслевой научно-исследовательский опыт проектирования систем вентиляции угольных шахт и рудников показывает, что пусковые и переходные режимы асинхронных электроприводов ВМП существенно влияют на стабильность газовой обстановки. При отсутствии адаптивного частотного регулирования стандартный прямой пуск или ступенчатое изменение скорости ВМП вызывают резкие колебания давления в тупиковой зоне. Это может приводить к колебанию метановыделения и создавать угрозу загазирования.

Для ликвидации этого дефицита предлагается связать алгоритмы ЧРП ВМП с непрерывным мониторингом состава рудничной атмосферы и текущим аэродинамическим сопротивлением вентиляционного става. Координированное плавное регулирование частоты вращения ВМП на основе интеллектуальных алгоритмов позволяет изолировать местные вентиляционные системы подготовительных выработок от колебаний общешахтной депрессии. Это обеспечит стабильные параметры аэрогазового контроля в забое и общее метановыделение на участке при уменьшении энергопотребления

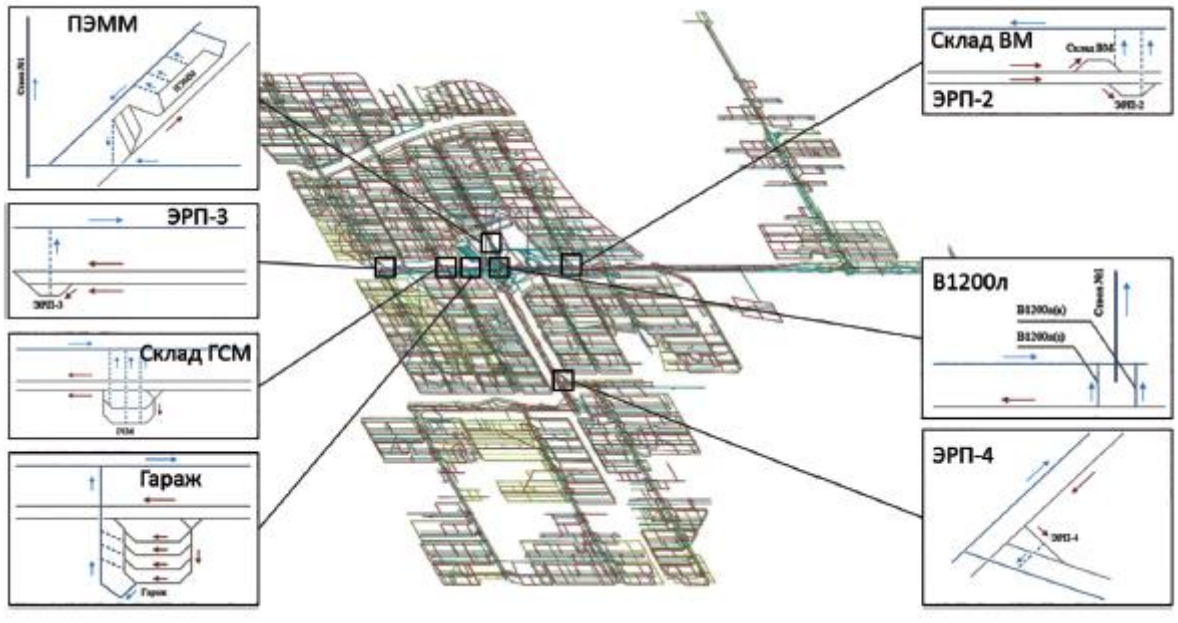

Рис. 2. Схема вентиляции условного рудника
Fig. 2. Ventilation scheme of a conditional mine

ВМП [26, 41].

Синхронизация с цифровым двойником рудника

Практическая реализация предложенного координированного управления по принципу «ЧРП вентилятора – электропривод АВС» требует сквозной синхронизации физического электротехнического комплекса с его цифровым двойником в SCADA-системе [38–40]. Цифровой двойник, непрерывно калибруемый по данным телеметрии со стационарных датчиков расхода воздуха и давления, моделирует последствия управляющих воздействий до их физической отработки приводами. Это полностью исключает риски возникновения автоколебательных процессов в вентиляционной сети и предотвращает аварийные перегрузки ЧРП, обеспечивая комплексный эффект снижения динамических нагрузок на механические узлы установок.

Таким образом, предлагаемая система управления электротехническим комплексом проветривания шахт и рудников будет иметь сложную многоуровневую структуру, представленную на Рис. 3.

Выводы

На основании выполненного исследования и обоснования перспективных направлений развития электротехнических комплексов шахт и рудников получены следующие результаты:

1. Выявлены технико-экономические противоречия современных детерминированных систем автоматизации вентиляции на глубоких горизонтах (более 1000 – 1500 м) горнодобывающих предприятий РФ (объектов ПАО «ГМК Норильский никель», ПАО «Уралкалий», АК «АЛРОСА»). Установлено, что жестко заданные статические алгоритмы управления и разрыв контуров обратной связи из-за дефицита контроля потоков на периферии шахтных полей приводят к необоснованному перерасходу электроэнергии от 30 до 50% [5, 17–21].

2. Доказана критическая инерционность механических систем реверсирования главных вентиляторных установок (ГВУ типа ВОД-30 и ВОД-40), составляющая от 10 до 20 минут. Показано, что отсутствие адаптивных контуров управления высоковольтными преобразователями частоты в условиях возникновения термической депрессии при пожарах затягивает переходные процессы в электроприводе, вызывая тяжелые токовые перегрузки и риски хаотического опрокидывания струй [5, 19, 21].

3. Обоснована необходимость смены подхода к управлению элементами вентиляционной сети: трансформация пассивных вентиляционных сооружений в активные регулируемые исполнительные механизмы единого электротехнического комплекса рудника. Интеграция АВС со следящим электроприводом в сквозную цифровую шину позволяет локально компенсировать аэродинамические возмущения непосредственно в местах их возникновения [21, 22, 33].

4. Сформирована многоуровневая концепция перспективного координированного управления по принципу «ЧРП вентилятора – электропривод АВС». Внедрение аппарата нечеткой логики и адаптивных алгоритмов с референтной моделью на макро-, мезо- и микроуровнях сети обеспечивает изоляцию местных вентиляционных систем, минимизирует энергопотребление электрических машин и повышает надежность жизнеобеспечения персо-

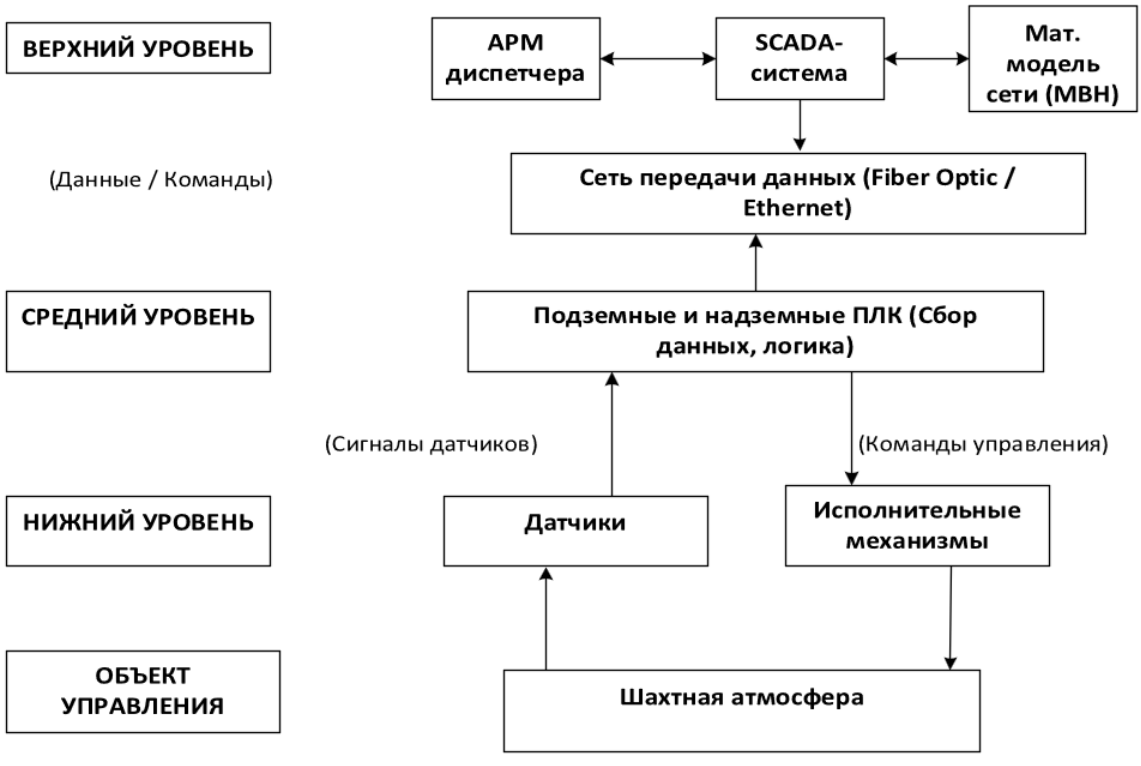

Рис. 3. Структурная схема предлагаемой многоуровневой системы координированного управления
Fig. 3. Structural diagram of the proposed multilevel system coordinated management

нала при реализации планов ликвидации аварий [38–40].

5. Определено, что для практической реализации предложенного интеллектуального управления необходима разработка комплексной математической модели нелинейной вентиляционной сети, синхронизированной с электротехническими параметрами ЧРП и электроприводов АВС. Это позволит осуществлять предварительное моделирование управляющих воздействий в SCADA-системе (на уровне цифрового двойника), что исключит возникновение автоколебательных процессов и предотвратит аварийные перегрузки электротехнического комплекса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Антипин Ю. Г., Смирнов А. А., Никитин И. В. Прогноз развития подземной геотехнологии при освоении глубокозалегающих рудных месторождений на период до 2030 года // Проблемы недропользования. 2021. № 4(31). С. 74–86.

2. Исаченко А. А. Анализ особенностей подземной угледобычи на современном этапе разработки месторождений Кузбасса // Вестник НЦ ВостНИИ. 2024. № 3. С. 5–17.

3. Айнбиндер И. И., Пацкевич П. Г. Концепция построения горнотехнических систем при переходе к роботизированным подземным геотехнологиям // Горная Промышленность. 2025. № 5S. С. 14–19.

4. Казаков Б. П., Круглов Ю. В., Исаевич А. Г., Левин Л. Ю. Разработка программно-вычислительного комплекса «Аэросеть» для расчета вентиляционных сетей шахт и рудников // ГИАБ. 2006. № 3. С. 21–33.

5. Стадник Д. А., Стадник Н. М., Лопушняк Е. В. [и др.] Методические принципы оптимального управления воздухораспределением подземного рудника в системах «вентиляция по требованию» // Известия ТулГУ. Науки о Земле. 2022. № 1. С. 457–466.

6. Семин М. А. Определение мест размещения отрицательных регуляторов при реализации систем динамического управления проветриванием рудников сложной топологии // Вестник Пермского федерального исследовательского центра. 2023. Вып. 3. С. 134–141.

7. Фащиленко В. Н. Регулируемый электропривод насосных и вентиляторных установок горных предприятий. М. : Горная книга, 2011. 260 с.

8. Круглов Ю. В., Левин Л. Ю. Основы построения оптимальных систем автоматического управления проветриванием подземных рудников // Известия ТулГУ. Науки о Земле. 2010. № 2. С. 104–109.

9. Семин М. А., Гришин Е. Л., Левин Л. Ю. и др. Автоматизированное управление вентиляцией шахт и рудников. Проблемы, современный опыт, направления совершенствования // Записки Горного института. 2020. Т. 246. С. 623–632.

10. Левин Л. Ю., Семин М. А., Клюкин Ю. А. Экспериментальное исследование изменения воздухораспределения на калийных рудниках при реверсировании главной вентиляторной установки // Недропользование. 2015. № 17. С. 89–97.

11. Семин М. А., Левин Л. Ю. Разработка методики моделирования аэрологических процессов в рудничных вентиляционных сетях при реверсировании главных вентиляторных установок // Проблемы недропользования. 2017. № 1(12). С. 138–144.

12. Николаев А. В., Лялькина Г. Б. Управление системой проветривания подземных горнодобывающих предприятий в аварийных ситуациях // Вестник КузГТУ. 2019. № 5(135). С. 37–46.

13. Казаков Б. П., Шалимов А. В., Гришин Е. Л. Моделирование нестационарных процессов движения воздуха и переноса тепла и примесей по выработкам рудничных вентиляционных сетей в программном комплексе «АэроСеть» // Известия ТулГУ. Науки о Земле. 2010. № 2. С. 64–69.

14. Kuyuk A. F., Ghoreishi-Madiseh S. A., Hassani F. P. Closed-loop bulk air conditioning: A renewable energy-based system for deep mines in arctic regions // International Journal of Mining Science and Technology. 2020. Vol. 30(4). Pp. 509–515.

15. Kumar M., Maity T., Kirar M. K. Energy savings by optimizing the speed of the primary ventilation fans in Indian underground coal mines based on VOD and TOU tariffs // Energy Efficiency. 2024. Vol. 17. P. 105.

16. Muratbakeev E., Kozhubaev Y., Cheng H. [et al.] Intelligent Mine Ventilation Systems // Symmetry. 2026. Vol. 18(2). P. 311.

17. Козырев С. А., Осинцева А. В., Амосов П. В. Управление вентиляционными потоками в горных выработках подземных рудников на основе математического моделирования аэродинамических процессов. Апатиты : КНЦ РАН, 2019. 114 с.

18. Мальцев С. В. Исследование и разработка способов определения аэродинамических параметров сложных вентиляционных систем подземных рудников: дис. ... канд. техн. наук. Пермь, 2019. 148 с.

19. Махмудов А. М., Мусурманов Э. Ш. Факторы, влияющие на вентиляционные системы глубоких горизонтов рудных шахт и их анализ управления // ТЕСНника. 2020. № 1. С. 6–10.

20. Паршаков О. С. Результаты исследования шахтной вентиляционной сети рудника Норильского промышленного района // Вестник Пермского федерального исследовательского центра. 2021. № 4. С. 23.

21. Александрова М. А., Кузьминых Е. Г., Мальцев С. В. [и др.] Сравнительный анализ способов повышения энергоэффективности системы вентиляции рудников на этапе проектирования // Известия ТулГУ. Науки о Земле. 2024. № 4. С. 652–665.

22. Николаев А. В. Научное обоснование и разработка технических и технологических решений по обеспечению безопасности труда на подземных горнодобывающих предприятиях средствами энергоэффективной вентиляции: дис. ... д-ра техн. наук. Кемерово, 2020. 298 с.

23. Молдованова О. В. Способы организации параллельных вычислений в задачах математиче-

ского моделирования шахтных вентиляционных сетей: дис. ... канд. техн. наук. Донецк, 2008. 204 с.

24. Kolesov E., Semin M. Sparse Flow Sensor-Based Reconstruction of Airflow Distribution in Mine Ventilation Network Using Tikhonov Regularization // Mining, Metallurgy & Exploration. 2026. Vol. 43. Pp. 2607–2616.

25. Баловцев С. В. Оценка схем вентиляции с учетом горногеологических и горнотехнологических условий отработки угольных пластов // ГИАБ. 2019. № 6. С. 173–183.

26. Пинскер О. В., Мухортиков С. Г., Квитков В. В. [и др.] Оценка эффективности регулирования частоты вращения вентиляторов местного проветривания угольных шахт // Горное оборудование и электромеханика. 2024. № 4(174). С. 27–36.

27. Гришин Е. Л. Научное обоснование способов повышения надежности вентиляционных сетей подземных рудников: дис. ... канд. техн. наук. Пермь, 2013. 133 с.

28. Коренной К. Н. Оптимизация параметров систем управления проветриванием рудных шахт в условиях аварийных ситуаций: дис. ... канд. техн. наук. Екатеринбург, 2009. 143 с.

29. Кобылкин С. С. Методологические основы системного проектирования вентиляции шахт: дис. ... д-ра техн. наук. Москва, 2018. 322 с.

30. Козярук А. Е. Энергоэффективные электромеханические комплексы горнодобывающих и транспортных машин // Записки Горного института. 2016. Т. 219. С. 261–269.

31. Левин Л. Ю., Палеев Д. Ю., Семин М. А. Расчет устойчивости воздушных потоков в выработках шахтных вентиляционных сетей по фактору тепловой депрессии // Вестник Научного центра. 2020. № 1. С. 81–85.

32. Попов М. Д. Расчет воздухораспределения в рудничных вентиляционных сетях с учетом тепловой депрессии в наклонных горных выработках: автореферат дис. ... канд. техн. наук. Пермь, 2024. 25 с.

33. Николаев А. В. Научное обоснование и разработка технических и технологических решений по обеспечению безопасности труда на подземных горнодобывающих предприятиях средствами энергоэффективной вентиляции: дис. ... д-ра техн. наук. Кемерово, 2020. 298 с

34. Николаев А. В., Кычкин А. В. Разработка и интеграция имитационной модели процесса проветривания подземного горнодобывающего предприятия в сервис управления спросом на электроэнергию // Записки Горного института. 2025. Т. 275. С. 18–29.

35. Chinyadza C., Risso N., Aramayo A., et al. Integrating Artificial Intelligence into Ventilation on Demand: Current Practice and Future Promises // Sensors. 2026. Vol. 26(3). P. 1042.

36. Hwang Y. R., Shen Y. D., Jen K. K. Fuzzy MRAC controller design for vane-type air motor systems // Journal of Mechanical Science and Technology. 2008. Vol. 22. Pp. 497–505.

37. 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.

38. Yang X., Li H. Digital twin-driven deep learning prediction and adaptive control for coal mine ventilation systems // Scientific Reports. 2026. Vol. 16. P. 940.

39. Kychkin A., Nikolaev A. IoT-based Mine Ventilation Control System Architecture with Digital Twin // 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). 2020. Pp. 1–5.

40. Kychkin A., 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(3). Pp. 115–123.

41. Маслов И. П., Семыкина И. Ю. Математическое моделирование различных способов пуска вентилятора местного проветривания с электрическим приводом // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. 2014. № 2. С. 67–73.

© 2026 Авторы. Эта статья доступна по лицензии CreativeCommons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Об авторах:

Руднев Петр Викторович, генеральный директор ООО «Девис Дерби Сибирь», аспирант кафедры электропривода и автоматизации, Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева (650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28), e-mail: rudnevpv@dds-nk.ru

Маслов Иван Петрович, руководитель сервисной службы ООО «Современные технические решения», кандидат техн. наук, доцент, Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева (650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28), e-mail: maslovip@kuzstu.ru

Шаулева Надежда Михайловна, кандидат техн. наук, доцент, Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева (650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28), e-mail: shnm.eav@kuzstu.ru

Заявленный вклад авторов:

Руднев Петр Викторович – сбор и анализ данных, обзор соответствующей литературы, концептуализация исследования; написание текста; выводы.

Маслов Иван Петрович – постановка исследовательской задачи, научный менеджмент, концептуализация исследования, выводы.
Шаулева Надежда Михайловна – постановка исследовательской задачи; научный менеджмент

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Original article

DOI: 10.26730/1816-4528-2026-4-52-61

Peter V. Rudnev[1,2], Ivan P. Maslov [1,3], Nadezda M. Shauleva[1*],

[1] T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University
[2] LLC «Davis Derby Siberia»
[3] LLC «Sovremennye Tekhnicheskie Resheniya»

***** for correspondence: shnm.eav@kuzstu.ru

ANALYSIS OF WAYS TO IMPROVE THE EFFICIENCY OF MINE VENTILATION SYSTEMS

Abstract.
Currently, underground mining is accompanied by the complication of mine workings topology due to the increase in the depth of the cleaning and preparation works. This leads to an increase in the length of ventilation networks, which in turn requires an increase in reliability. The existing ventilation systems, operating on the basis of rigidly set algorithms with static parameters, do not provide the efficiency of operation. The article provides a review of the operational state of underground mines and evaluates the efficiency of their automation under conditions of high dynamics of mining and technical factors. The features of the condition of key underground mining enterprises in the Russian Federation (facilities of PJSC MMC Norilsk Nickel, PJSC Uralkali, and ALROSA) are analyzed. The authors substantiate that the existing deficit of high-precision airflow control at the technological periphery of mine fields and the high inertia of emergency reversal systems lead to an excess consumption of up to 50% of electricity and the risk of chaotic flow flipping during fires. The non-linearity of the ventilation network as a control object with stochastically changing parameters is proven. As a principal solution, a shift in the automation paradigm based on the transition to adaptive electrical engineering complexes is proposed. The need to transform passive ventilation structures into active adjustable actuators with a distributed electrical drive is argued. It is noted that coordinated control based on the principle of synchronization of variable frequency drives of fans and automated regulators allows local compensation of aerodynamic disturbances. The proposed approach ensures the isolation of local ventilation systems in developmental workings, minimizes the energy consumption of electrical machines, and guarantees the reliability of personnel life support during the implementation of mine emergency response plans.

CC BY

Article info
Received:
17 June 2026

Accepted for publication:
01 September 2026

Accepted:
15 September 2026

Keywords: *mine ventilation network, adaptive control, variable frequency drive, ventilation structure, actuator, mine emergency response plan, developmental working, energy efficiency*

For citation: Rudnev P.V., Maslov I.P., Shauleva N.M. Analysis of ways to improve the efficiency of mine ventilation systems. Mining Equipment and Electromechanics, 2026; 4(186):52-61 (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1816-4528-2026-4-52-61, EDN: DBLBRI

REFERENCES

1. Antipin Yu.G., Smirnov A.A., Nikitin I.V. Forecast of the development of underground geotechnology in the development of deep-lying ore deposits for the period up to 2030. *Problems of subsoil use.* 2021; 4(31):74-86.

2. Isachenko A.A. Analysis of the features of underground coal mining at the current stage of development of Kuzbass deposits. *Bulletin of the Scientific Research Center VostNII.* 2024; 3:5-17.

3. Einbinder I.I., Patskevich P.G. The concept of building mining engineering systems during the transi-

tion to robotic underground geotechnologies. *Mining Industry.* 2025; 5S:14-19.

4. Kazakov B.P., Kruglov Yu.V., Isaevich A.G., Levin L.Yu. Development of the Aeroset software and computing complex for calculating ventilation networks in mines and mines. *GIAB.* 2006; 3:21-33.

5. Stadnik D.A., Stadnik N.M., Lopushnyak E.V. et al. Methodological principles of optimal control of the air distribution of an underground mine in "ventilation on demand" systems. *Izvestiya TulSU. Earth Sciences.* 2022; 1:457-466.

6. Semin M.A. Determining the locations of negative regulators in the implementation of dynamic ventilation control systems for mines of complex topology. *Bulletin of the Perm Federal Research Center*. 2023; 3:134-141.

7. Faschilenko V.N. Adjustable electric drive of pumping and fan installations of mining enterprises. Moscow: Gornaya kniga, 2011. 260 p.

8. Kruglov Yu.V., Levin L.Yu. Fundamentals of building optimal automatic ventilation control systems for underground mines. *Izvestiya TulSU. Earth Sciences.* 2010; 2:104-109.

9. Semin M.A., Grishin E.L., Levin L.Yu. [et al.] Automated ventilation control of mines and mines. Problems, modern experience, and areas of improvement. *Notes of the Mining Institute.* 2020; 246:623-632.

10. Levin L.Yu., Semin M.A., Klyukin Yu.A. Experimental study of air distribution changes in potash mines during the reversal of the main fan unit. *Subsurface use.* 2015; 17:89-97.

11. Semin M.A., Levin L.Y. Development of a methodology for modeling aerological processes in primary ventilation networks during the reversal of main fan installations. *Problems of subsoil use.* 2017; 1(12):138-144.

12. Nikolaev A.V., Lyalkina G.B. Management of the ventilation system of underground mining enterprises in emergency situations. *Bulletin of KuzSTU.* 2019; 5(135):37-46.

13. Kazakov B.P., Shalimov A.V., Grishin E.L. Modeling of non-stationary processes of air movement and heat and impurities transfer by mining ventilation networks in the "Aeroset" software package. *Izvestiya TulSU. Earth Sciences.* 2010; 2:64-69.

14. Kuyuk A.F., Ghoreishi-Madiseh S.A., Hassani F.P. Closed-loop bulk air conditioning: A renewable energy-based system for deep mines in Arctic regions. *International Journal of Mining Science and Technology.* 2020; 30(4):509-515.

15. Kumar M., Maity T., Kirar M.K. Energy savings by optimizing the speed of the primary ventilation fans in Indian underground coal mines based on VOD and TOU tariffs. *Energy Efficiency.* 2024; 17:105.

16. Muratbakeev E., Kozhubaev Y., Cheng H. [et al.] Intelligent Mine Ventilation Systems. *Symmetry.* 2026; 18(2):311.

17. Kozyrev S.A., Osintseva A.V., Amosov P.V. Control of ventilation flows in mining operations of underground mines based on mathematical modeling of aerodynamic processes. Archives: KSC RAS; 2019. 114 p.

18. Maltsev S.V. Research and development of methods for determining the aerodynamic parameters of complex ventilation systems of underground mines: dissertation of the Candidate of Technical Sciences. Perm, 2019. 148 p.

19. Makhmudov A.M., Musurmanov E.Sh. Factors influencing ventilation systems of deep horizons of ore mines and their management analysis. *TECHnic.* 2020; 1:6-10.

20. Parshakov O.S. Results of a study of the mine ventilation network of the mine of the Norilsk industrial district. *Bulletin of the Perm Federal Research Center.* 2021; 4:23.

21. Alexandrova M.A., Kuzminykh E.G., Maltsev S.V. [et al.] Comparative analysis of ways to increase the energy efficiency of mine ventilation systems at the design stage. *News of TulSU. Earth Sciences.* 2024; 4:652-665.

22. Nikolaev A.V. Scientific substantiation and development of technical and technological solutions to ensure labor safety at underground mining enterprises by means of energy-efficient ventilation: dissertation of the Doctor of Technical Sciences. Kemerovo, 2020. 298 p.

23. Moldovanova O.V. Methods of organizing parallel computing in the problems of mathematical modeling of shaft ventilation networks: dissertation of the Candidate of Technical Sciences. Donetsk, 2008. 204 p.

24. Kolesov E., Semin M. Sparse Flow Sensor-Based Reconstruction of Airflow Distribution in Mine Ventila-tion Network Using Tikhonov Regularization. *Mining, Metallurgy & Exploration.* 2026; 43:2607-2616.

25. Balovtsev S.V. Evaluation of ventilation schemes taking into account mining geological and mining technological conditions of coal seam mining. *GIAB.* 2019; 6:173-183.

26. Pinsker O.V., Mukhortikov S.G., Kvitkov V.V. [et al.] Evaluation of the effectiveness of regulating the frequency of rotation of fans of local ventilation of coal mines. *Mining equipment and electromechanics.* 2024; 4(174):27-36.

27. Grishin E.L. Scientific substantiation of ways to increase the reliability of ventilation networks of underground mines: dissertation of the Candidate of Technical Sciences. Perm, 2013. 133 p.

28. Korennoy K.N. Optimization of parameters of control systems for ventilation of ore mines in emergency situations: dissertation of the Candidate of Technical Sciences. Yekaterinburg, 2009. 143 p.

29. Kobylkin S.S. Methodological foundations of mine ventilation system design: dissertation of Doctor of Technical Sciences. Moscow, 2018. 322 p.

30. Kozyaruk A.E. Energy-efficient electromechanical complexes of mining and transport machinery. *Notes of the Mining Institute.* 2016; 219:261-269.

31. Levin L.Yu., Paleev D.Yu., Semin M.A. Calculation of the stability of air flows in the workings of mine ventilation networks by the factor of thermal depression. *Bulletin of the Scientific Center.* 2020; 1:81-85.

32. Popov M.D. Calculation of air distribution in mine ventilation networks, taking into account thermal depression in inclined mine workings: abstract of the dissertation of the Candidate of Technical Sciences. Perm, 2024. 25 p.

33. Nikolaev A.V. Scientific substantiation and development of technical and technological solutions for ensuring labor safety at underground mining enterprises by means of energy-efficient ventilation: dissertation of the Doctor of Technical Sciences. Kemerovo, 2020. 298 p.

34. Nikolaev A.V., Kychkin A.V. Development and integration of a simulation model of the ventilation process of an underground mining enterprise into an electricity demand management service. *Notes of the Mining Institute.* 2025; 275:18-29.

35. Chinyadza C., Risso N., Aramayo A. [et al.] Integrating Artificial Intelligence into Ventilation on Demand: Current Practice and Future Promises. *Sensors.* 2026; 26(3):1042.

36. Hwang Y.R., Shen Y.D., Jen K.K. Fuzzy MRAC controller design for vane-type air motor systems. *Journal of Mechanical Science and Technology.* 2008; 22:497-505.

37. Kashnikov A.V., Kruglov Yu.V. A strategy for controlling mine ventilation in optimal mode using a fuzzy logic apparatus. *Notes of the Mining Institute.* 2023; 262:594-605.

38. Yang X., Li H. Digital twin-driven deep learning prediction and adaptive control for coal mine ventilation systems. *Scientific Reports.* 2026; 16:940.

39. Kychkin A., Nikolaev A. IoT-based Mine Ventilation Control System Architecture with Digital Twin. *2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM).* 2020. Pp. 1-5.

40. Kychkin A., 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; 22(3):115-123.

41. Maslov I.P., Semykina I.Y. Mathematical modeling of various ways of starting a local ventilation fan with an electric drive. *Bulletin of the Scientific Center for safety of work in the coal industry.* 2014; 2:67-73.

© 2026 The Authors. This is an open access article under the CC BY license (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

The authors declare no conflict of interest.

About the author:

Peter V. Rudnev, General Director of Davis Derby Siberia LLC, graduate student, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University (650000, The Russian Federation, Kemerovo, Vesennaya str., 28), e-mail: rudnevpv@dds-nk.ru

Ivan P. Maslov, Head of the Service Department, Sovremennye Tekhnicheskie Resheniya LLC, C. Sc. in Engineering, Associate Professor, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University (650000, The Russian Federation, Kemerovo, Vesennaya str., 28), e-mail: maslovip@kuzstu.ru

Nadezda M. Shauleva, C. Sc. in Engineering, Associate Professor, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University (650000, The Russian Federation, Kemerovo, Vesennaya str., 28), e-mail: shnm.eav@kuzstu.ru

Contribution of the authors:

Peter V. Rudnev – data collection; data analysis; reviewing the relevant literature; conceptualization of research; writing the text; drawing the conclusions.

Ivan P. Maslov – research problem statement; scientific management; conceptualization of research; drawing the conclusions.

Nadezda M. Shauleva – research problem statement; scientific management.

Authors have read and approved the final manuscript.