

Исследование и синтез системы автоматического пылеподавления на апатит-нифелиновой шахте

И. М. Новожилов¹, Д. А. Первухин², А. В. Мартиросян²,
Ю. В. Ильюшин², Н. А. Таланов²✉, Д. Р. Смирнов²

¹ Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

² Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,
Санкт-Петербург, Россия

✉ s225027@srud.spmi.ru

Аннотация. В условиях интенсивной работы предприятий, связанных с добычей и переработкой материалов, проблема пылеобразования приобретает особую актуальность. Пыль негативно влияет на здоровье работников, снижает качество продукции и оборудование, а также наносит вред окружающей среде. Целью исследования служит создание эффективной автоматизированной системы пылеподавления, обеспечивающей минимизацию выбросов пыли в рабочей зоне и окружающую среду. В рамках статьи разработана концептуальная схема автоматизации, включающая в себя датчики концентрации пыли, систему управления и исполнительные устройства. Применены современные технологии программирования и системы управления для реализации автоматической системы мониторинга и управления процессом пылеподавления. В результате исследований предложен вариант реализации программно-аппаратного комплекса, способного контролировать уровень запыленности на апатит-нифелиновых шахтах, что позволит улучшить условия труда, повысить безопасность и сократить вредное воздействие на окружающую среду.

Ключевые слова: концептуальная схема автоматизации, управление процессом пылеподавления, экономическая эффективность горных предприятий, программно-аппаратный комплекс, пылеподавление

Для цитирования: Исследование и синтез системы автоматического пылеподавления на апатит-нифелиновой шахте / И. М. Новожилов, Д. А. Первухин, А. В. Мартиросян, Ю. В. Ильюшин, Н. А. Таланов, Д. Р. Смирнов // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2024. Т. 17, № 10. С. 80–88. doi: 10.32603/2071-8985-2024-17-10-80-88.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Original article

Research and Synthesis of an Automated Dust Suppression System for an Apatite-Nepheline Mine

I. M. Novozhilov¹, D. A. Pervukhin², A. V. Martirosyan²,
Yu. V. Ilyushin², N. A. Talanov²✉, D. R. Smirnov²

¹ Saint Petersburg Electrotechnical University, Saint Petersburg, Russia

² Saint Petersburg Mining University Empress Catherinell, Saint Petersburg, Russia

✉ s225027@srud.spmi.ru

Abstract. Intensification of work at enterprises associated with the extraction and processing of materials makes the problem of dust formation particularly relevant. Dust negatively affects the health of workers, reduces the quality of products and equipment, and damages the environment. The aim of this study was to create an effective automated dust suppression system to minimize dust emissions into the work area and the environment. An analysis of existing dust suppression methods was carried out; their advantages and disadvantages were consid-

ered. A conceptual automation scheme was developed, which includes dust concentration sensors, a control system, and actuators. Modern programming technologies and control systems were used to implement an automatic monitoring and control system for the dust suppression process. As a result, a software and hardware system capable of controlling the level of dust in apatite-nepheline mines is proposed. The proposed solution can be used to improve working conditions, increase safety, and reduce harmful effects on the environment.

Keywords: conceptual scheme of automation, dust suppression process control, economic efficiency of mining enterprises, software and hardware complex, dust suppression

For citation: Research and Synthesis of Automatic Dust Suppression System at Apatite-Nepheline Mine / I. M. Novozhilov, D. A. Pervukhin, A. V. Martirosyan, Yu. V. Ilyushin, N. A. Talanov, D. R. Smirnov // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2024. Vol. 17, no. 10. P. 80–88. doi: 10.32603/2071-8985-2024-17-10-80-88.

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Введение. При рассмотрении научных исследований последних лет в сферах геотехнологии и геомеханики остро стоит вопрос комплексного освоения подземных недр. Данные исследования направлены на разработку новых, более эффективных методик проектирования и строительства шахт, рудников и подземных сооружений. Вопрос повторного освоения подземного пространства – это также ключевая составляющая вышеуказанных исследований.

Современные научные исследования, предлагают применять для этого методы системного анализа. Однако применение таких методов приводит к необходимости глубокого анализа объекта исследования и построения уникальных для конкретного месторождения, моделей. Таким образом, разработка унифицированного метода поиска входных, выходных и результирующих факторов – одна из важнейших задач повышения стабильности функционирования технологического процесса.

Постановка задачи. В рамках данного исследования необходимо разработать унифицированную методику, обеспечивающую стабильный процесс пылеподавления в зоне ведения работ. В рамках данного исследования необходимо выполнить следующие задачи:

1. Проанализировать существующие технологические решения по организации пылеподавления в призабойной зоне. Выделить из них наиболее значимые.

2. Разработать концептуальную схему автоматизации, включающую в себя датчики концентрации пыли, систему управления и исполнительные устройства.

3. Применить современные технологии программирования и системы управления для реализации автоматической системы мониторинга и управления процессом пылеподавления.

Таким образом, реализация программно-аппаратного комплекса, способного контролировать уровень запыленности на апатит-нефелиновых шахтах, позволит улучшить условия труда, повысить безопасность и сократить вредное воздействие на окружающую среду.

Анализ технологических решений. Апатит-нефелиновая шахта представляет собой высокотехнологичный и многофункциональный промышленный комплекс, включающий в себя добычные, перерабатывающие и обслуживающие подразделения. Апатит-нефелиновая шахта сочетает в себе подземный и открытый способы добычи руды. Основные добычные работы ведутся на глубине от 200 до 1000 м. Для этого используются современные буровые установки, позволяющие бурить скважины глубиной до 30 м. Проходка осуществляется с помощью высокопроизводительных буровзрывных технологий. Подземные транспортные системы включают рельсовые пути и конвейерные ленты, обеспечивающие оперативную доставку руды на поверхность.

Апатит-нефелиновая шахта оснащена обогащательными фабриками, осуществляющими переработку руды с целью получения концентратов апатита и нефелина. Основные производственные мощности включают: дробильно-сортировочные комплексы, щековые дробилки, конусные дробилки. Шаровые и стержневые мельницы обеспечивают измельчение руды до необходимой степени крупности для последующей флотации. Производительность мельниц достигает 200 т/ч. Подземные выработки оснащены мощными вентиляционными системами, обеспечивающими подачу свежего воздуха и удаление вредных газов и пыли. Процесс вентиляции – неотъемлемая часть технологического цикла предприятия. Пылеподавление играет важную роль при обеспечении безопасности при ведении горных работ.

Автоматические системы пылеподавления представляют собой важнейший компонент современных промышленных объектов. Они играют ключевую роль в контроле уровня пыли и обеспечении безопасных условий труда.

Автоматизированные системы пылеподавления состоят из нескольких взаимосвязанных компонентов, которые обеспечивают комплексный подход к контролю и подавлению пыли:

- 1) датчики и сенсоры;
- 2) программируемые логические контроллеры (PLC);
- 3) системы визуализации и HMI (человеко-машинный интерфейс);
- 4) системы связи и сети передачи данных;
- 5) системы анализа данных и отчетности.

Датчики и сенсоры служат «глазами» системы, обеспечивая постоянный мониторинг уровня запыленности в реальном времени. Они измеряют концентрацию пыли в воздухе и передают данные на контроллеры для анализа.

В настоящее время внимание мировой общественности приковано к вопросам перехода горнодобывающих предприятий на путь устойчивого развития, что определяется их ролью в функционировании всех секторов экономики. В последние годы в мировой экономике наблюдается рост цен

на многие природные ресурсы. Очевидно, что происходит истощение природных ресурсов и ограничение их количества для потребления человеком. Поэтому на сегодняшний день как никогда остро стоит вопрос о повышении экономической эффективности горнодобывающей отрасли. Современные требования рынка на продукцию промышленных предприятий достаточно высоки, поэтому необходима разработка более инновационных и конкурентоспособных способов производства, которые приведут к получению более совершенной продукции [1]. Также необходимо заложить более современную методику мониторинга и оценки технического состояния подземных объектов, в основе которой заложены обеспечение стабильного режима производства и оперативное регулирование поведения окружающей среды массива пород по данным непрерывного контроля [2].

Методы систем с распределенными параметрами хорошо зарекомендовали себя при решении различных практических задач [3], в частности, задачи по разработке системы управления температурным полем насосно-компрессорной трубы в процессе добычи высокопарафинистой нефти. Как итог, была снижена итоговая стоимость эксплуатации и разработки месторождения [4]–[6].

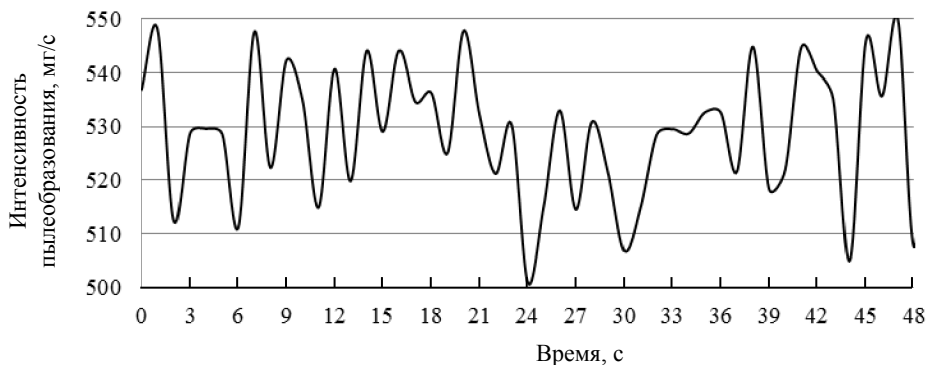


Рис. 1. Входные экспериментальные данные
Fig. 1. Input experimental data

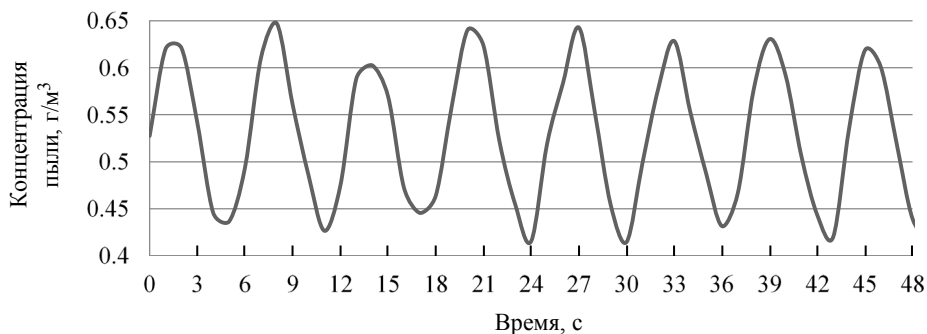


Рис. 2. Выходные экспериментальные данные
Fig. 2. Output experimental data

Показатели пылеподавления
 Dust suppression performance

Время, с	Концентрация пыли, г/м ³	Интенсивность пылеобразования, мг/с	Время, с	Концентрация пыли, г/м ³	Интенсивность пылеобразования, мг/с
0	0.527440675	536.7597011	26	0.583423509	533.0086769
1	0.619906567	548.1094273	27	0.642871039	514.5038804
2	0.621067911	512.4376572	28	0.553182995	530.9007714
3	0.54135616	528.8078667	29	0.454369709	521.438435
4	0.44550249	529.6020966	30	0.414424618	506.7737032
5	0.436402278	528.6125953	31	0.49830792	514.9141163
6	0.493937811	511.1540816	32	0.577950185	528.4982455
7	0.61028731	547.6374506	33	0.628412883	529.5436381
8	0.647118963	522.3562689	34	0.553847759	528.7162624
9	0.560383924	542.3204336	35	0.488063508	532.660041
10	0.485184141	534.9739638	36	0.431426901	532.6051635
11	0.426445725	514.8718475	37	0.466492887	521.5709218
12	0.474744936	540.689891	38	0.576824262	544.8273298
13	0.588296536	519.825287	39	0.630470554	518.3780935
14	0.602612538	544.0551599	40	0.592486711	521.7932463
15	0.569385249	529.0636436	41	0.505989331	544.5961678
16	0.472220588	544.0867681	42	0.443229405	540.3096995
17	0.445491243	534.6265795	43	0.419833799	535.1944292
18	0.463809113	536.262714	44	0.535108528	505.0113444
19	0.558488328	525.0662191	45	0.618622246	545.9741307
20	0.640225442	547.8041817	46	0.600697963	535.712065
21	0.623623492	532.19951	47	0.518803627	549.9423503
22	0.522188837	521.1927524	48	0.438945951	507.4724152
23	0.454404418	530.3196607	49	0.422810273	543.4063029
24	0.415355885	500.9596599	50	0.502272353	508.1246467
25	0.518760876	515.0787408	–	–	–

Идентификация системы управления. Использование автоматической системы подавления пыли в апатит-нефелиновой шахте обусловлено несколькими факторами, делающими ее идеальным решением. Эта система эффективно снижает уровень пыли, что важно для обеспечения безопасности и здоровья работников.

Для решения задачи были проведены эксперименты с системой управления пылеподавления. Глубина выборки 50 значений, период дискретизации равен 1 с. Концентрация пыли и интенсивность пылеобразования представлены в таблице. Показатели пылеподавления визуализированы на рис. 1, 2.

Исходя из графиков входных и выходных данных, можно сделать вывод о том, что процесс пылеобразования имеет циклический характер и имеет прямую зависимость от времени.

Построение математической модели. Программный модуль строит график переходного процесса и определяет передаточную функцию системы. В пакете Simulink™ создается схема нашей системы автоматического пылеподавления в шахте (рис. 3). Simulink™ – это инструмент для моделирования и симуляции динамических систем, в том числе для моделирования систем управления.

Данная модель состоит из передаточной функции концентрации пыли в шахте, которая служит регулирующим параметром. Simulink – модель состоит из следующих основных блоков:

- заданное значение концентрации пыли на производственном объекте;
- PID(s), необходимый для реализации устойчивого состояния управляемого объекта;

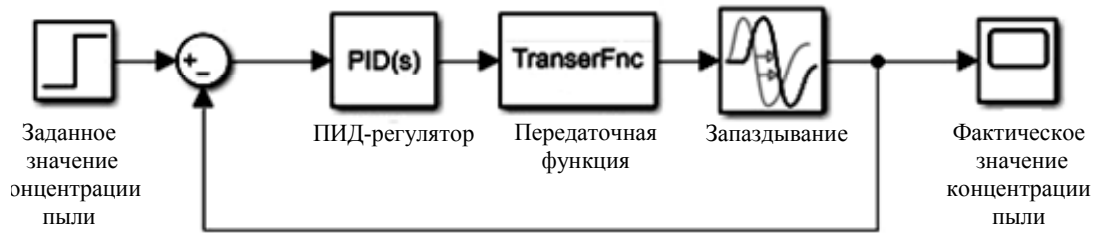


Рис. 3. Алгоритмическая структура математической модели процесса пылеподавления
Fig. 3. Algorithmic structure of the mathematical model

– «передаточная функция» – это объект управления концентрацией пыли, реализованный блоком TransferFunction;

– «запаздывание». Обозначим запаздывание для объекта в 1 с;

– фактическое значение концентрации пыли на производственном объекте.

График переходного процесса до синтеза и внедрения регулятора представлен на рис. 4.

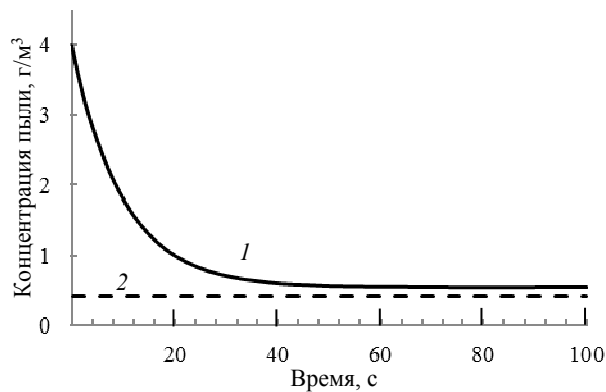


Рис. 4. График переходного процесса пылеподавления:
1 – концентрация пыли до синтеза ПИД-регулятора;
2 – заданная концентрация пыли

Fig. 4. Graph of the transient process of dust suppression:
1 – dust concentration before PID controller synthesis;
2 – set dust concentration

Синтез регулятора. В проектируемой системе ставится задача удержания концентрации пыли на заданном уровне. В качестве алгоритма регулирования используется ПИД-регулятор.

Подача свежего воздуха в подземный комплекс выработок осуществляется при помощи шахтного вентилятора. Для поддержания концентрации пыли на заданном уровне необходимо использовать систему автоматического управления, которая будет корректировать скорость вращения вентилятора. Одним из подходов может быть использование ПИД-регулятора.

ПИД-регулятор (пропорционально-интегрально-дифференциальный регулятор) – это устройство автоматического управления, широко используемое в системах управления для поддержания определенного параметра на заданном уровне.

ПИД-регулятор корректирует отклонение контролируемой величины (например, концентрации пыли в шахте) от заданного значения с помощью трех компонентов: пропорционального, интегрального и дифференциального.

Воспользуемся встроенным функционалом PID-Tuner MatLab™, позволяющим автоматически подобрать коэффициенты ПИД-регулятора для достижения высоких показателей качества системы (рис. 5):

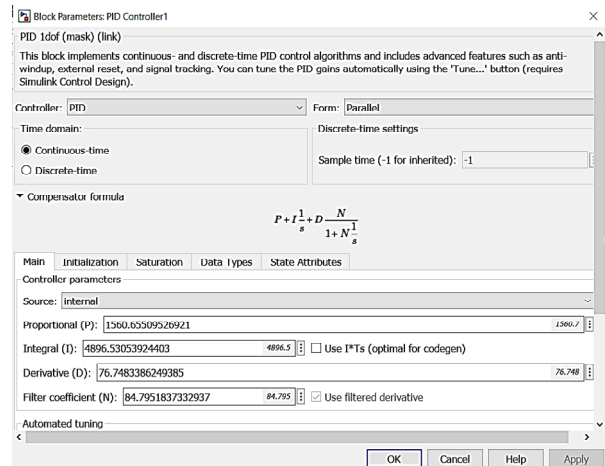


Рис. 5. Подбор коэффициентов ПИД-регулятора
Fig. 5. Selection of PID controller coefficients

Реализация системы осуществляется при помощи средств и библиотек языка программирования Python. Далее представлена часть структуры программного кода:

```
import numpy as np
from scipy.integrate import odeint
import matplotlib.pyplot as plt
# Определение модели системы
def dust_system(P, t, k, V):
    dPdt = k * V + q(t)
    return dPdt
# Источник пыли
def q(t):
    return 0.2 + 0.1 * np.sin(0.1 * t)
# Определение ПИД-регулятора
def PID_controller(e, Kp, Ki, Kd, integral, dt):
    derivative = (e - prev_e[0]) / dt
```

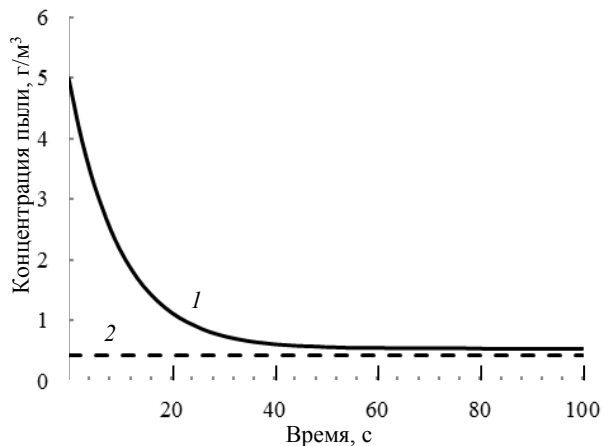


Рис. 6. Переходная характеристика с ПИД-регулятором при повышенной концентрации пыли 5 мг/м³:

1 – фактическая концентрация пыли;

2 – заданная концентрация пыли

Fig. 6. Transient response with PID controller at elevated dust concentration of 5 mg/m³:

1 – actual dust concentration; 2 – specified dust concentration

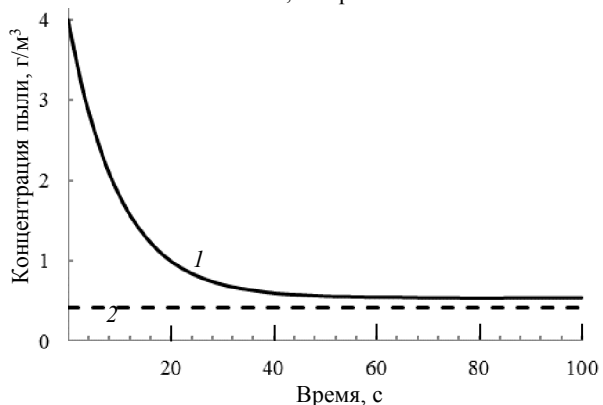


Рис. 7. Переходная характеристика с ПИД-регулятором при повышенной концентрации пыли 4 мг/м³:

1 – фактическая концентрация пыли;

2 – заданная концентрация пыли

Fig. 7. Transient response with PID controller at elevated dust concentration of 4 mg/m³: 1 – actual dust concentration;

2 – specified dust concentration

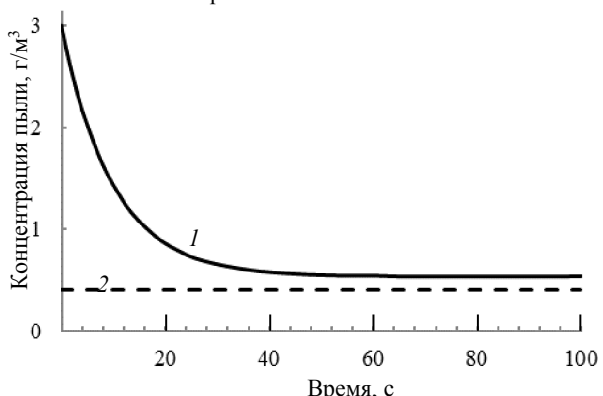


Рис. 8. Переходная характеристика с ПИД-регулятором при повышенной концентрации пыли 3 мг/м³:

1 – фактическая концентрация пыли;

2 – заданная концентрация пыли

Fig. 8. Transient response with PID controller at elevated dust concentration of 3 mg/m³:

1 – actual dust concentration; 2 – specified dust concentration

$$\text{integral} += e * dt$$

$$U = K_p * e + K_i * \text{integral} + K_d * \text{derivative}$$

$$\text{prev}_e[0] = e \quad \# \text{ Обновление значения}$$

предыдущей ошибки

$$\text{return } U, \text{ integral}$$

Для того чтобы четко отследить реагирование на изменение интенсивности пылеобразования, необходимо построить графики переходных процессов при различных заданных концентрациях пыли (рис. 6–8).

Исходя из построенных графиков можно сделать вывод о том, что ПИД-регулятор способен эффективно управлять концентрацией пыли в шахте, обеспечивая быстрое реагирование на изменения интенсивности пылеобразования и поддержание заданного уровня запыленности.

Оценка качества регулирования. Для оценки качества регулирования системы с ПИД-регулятором, нужно рассчитать основные параметры переходного процесса: общее время переходного процесса τ_p , заданное значение T_y и перерегулирование σ . Рассчитаем эти параметры на основе данных системы.

Время регулирования τ_p – минимальное время, по завершении которого переходная характеристика будет близкой к установившемуся значению с требуемой точностью.

Перерегулирование σ – это максимальное отклонение заданной характеристики от установившегося значения, выраженное в ОЕ (относительных единицах) или процентах.

T_y – заданная концентрация пыли в рудничной атмосфере.

ΔT_{\max} – установившееся значение концентрации пыли в рудничной атмосфере.

Параметры переходного процесса при использовании ПИД-регулятора, внедренного программно:

$$\Delta T_{\max} = 0.05 \text{ г/м}^3;$$

$$T_y = 0.4 \text{ г/м}^3;$$

$$\tau_p = 700 \text{ с};$$

$$\sigma = \frac{\Delta T_{\max}}{T_y} \cdot 100 \% = \frac{0.05}{0.4} \cdot 100 \% = 12.5 \%$$

Система с ПИД-регулятором показывает следующие результаты: перерегулирование составляет 12.5 %, а время стабилизации – 700 с. Эти показатели указывают на то, что система достигает заданного уровня концентрации пыли (0.4 г/м³) с относительно высоким уровнем перерегулирования и

умеренным временем стабилизации. Это подтверждает, что внедренный ПИД-регулятор способен поддерживать стабильный уровень концентрации пыли в шахте, хотя, возможно, потребуются дальнейшая настройка параметров ПИД-регулятора для уменьшения перерегулирования и улучшения точности регулирования.

Вывод. В результате проведенного исследования и синтеза системы автоматического пылеподавления на апатит-нефелиновой шахте были достигнуты следующие ключевые результаты.

Проведен детальный анализ существующих систем автоматизированного пылеподавления на предприятиях, выявлены их технологические и экономические преимущества и недостатки. Оценены возможности и ограничения текущих реше-

ний, что позволило обоснованно выбрать методы и инструменты для разработки новой системы.

Сформулирована задача разработки системы управления пылеподавлением на шахте. Проведено моделирование процессов управления, что помогло определить ключевые параметры системы и создать ее архитектуру.

Разработанная система автоматического пылеподавления на основе современных датчиков и программируемых логических контроллеров обладает высокой точностью, автономностью и надежностью. Ее внедрение повышает безопасность и эффективность горнодобывающих процессов. Статья имеет важное практическое значение для горнодобывающей отрасли, способствуя ее модернизации и устойчивому развитию.

Список литературы

1. Антонов М. А., Оганесян Н. К., Агафонов В. В. Адаптация методов оптимизации многофакторных задач и специальных методов оптимизации сложных систем к технологическим схемам угольных шахт // ГИАБ. Горный информ.-аналит. бюл. 2014. № 11. С. 367–371.

2. Дуарте А. Т., Мануэль Ф. Системный анализ и управление рисками горно-геологических программ изучения и освоения алмазоносных месторождений // Горный информ.-аналит. бюл. 2014. № 5. С. 417–423.

3. Соколов М. В., Простов С. М. Моделирование геомеханических процессов при неравномерном оседании оснований сооружений // Вестн. Кузбасского гос. техн. ун-та. 2017. № 1. С. 15–25.

4. Алексеева Л. Б., Уваров В. П. Виртуальное моделирование непрерывных технологических процессов при решении задач управления // Горный информ.-аналит. бюл. 2014. № 4. С. 298–302.

5. Демин В. Ф., Демина Т. В. Оценка параметров дефектности подготовительных выработок в зависимости от горно-технологических условий эксплуатации // Горный информ.-аналит. бюл. 2014. № 1. С. 5–11.

6. Влияние напряжений на устойчивость при сопряжении выработок в зависимости от горнотехнологических параметров разработки / В. Ф. Демин, А. Е. Судариков, Т. В. Демина, Ю. Ю. Стефлюк, В. В. Демин // ГИАБ. Горный информ.-аналит. бюл. 2014. № 8. С. 5–14.

Информация об авторах

Новожилов Игорь Михайлович – канд. техн. наук, доцент кафедры автоматизации и процессов управления СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: novozhilovim@list.ru

<https://orcid.org/0000-0002-2056-3930>

Первухин Дмитрий Анатольевич – д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой системного анализа и управления Санкт-Петербургского горного университета, 21-я линия, д. 2, В. О., Санкт-Петербург, Россия.

E-mail: pervukhin_da@pers.spmi.ru

<https://orcid.org/0000-0003-3547-2932>

Мартirosян Александр Витальевич – канд. техн. наук, Санкт-Петербургский горный университет, 21-я линия, д. 2, В. О., Санкт-Петербург, 199106, Россия.

E-mail: Martirosyan_AV@pers.spmi.ru

<https://orcid.org/0000-0002-1455-0930>

Ильюшин Юрий Валерьевич – д-р техн. наук, Санкт-Петербургский горный университет, 21-я линия, д. 2, В. О., Санкт-Петербург, 199106, Россия.

E-mail: ilyushin_yuv@pers.spmi.ru

<https://orcid.org/0000-0002-9175-8751>

Таланов Николай Александрович – аспирант кафедры системного анализа и управления Санкт-Петербургского горного университета, 21-я линия, д. 2, В. О., Санкт-Петербург, Россия.

E-mail: s225027@srud.spmi.ru

Смирнов Данила Романович – студент группы ИТУ-20 кафедры системного анализа и управления Санкт-Петербургского горного университета, 21-я линия, д. 2, В. О., Санкт-Петербург, Россия.

Вклад авторов:

Новожилов И. М. – общее руководство.

Первухин Д. А. – заключение.

Мартirosян А. В. – выводы.

Ильюшин Ю. В. – концептуальные исследования.

Смирнов Д. Р. – экспериментальные исследования.

Таланов Н. А. – методология исследования.

References

1. Antonov M. A., Oganessian N. K., Agafonov V. V. Adaptacija metodov optimizacii mnogofaktornyh zadach i special'nyh metodov optimizacii slozhnyh sistem k tehnologicheskim shemam ugol'nyh shaft // GIAB. Gornyj inform.-analit. bjul. 2014. № 11. S. 367–371. (In Russ.).

2. Duarte A. T., Manujel' F. Sistemnyj analiz i upravlenie riskami gorno-geologicheskikh programm izuchenija i osvoenija almazonosnyh mestorozhdenij // Gornyj inform.-analit. bjul. 2014. № 5. S. 417–423. (In Russ.).

3. Sokolov M. V., Prostov S. M. Modelirovanie geometricheskikh processov pri neravnomernom osedanii osnovanij sooruzhenij // Vestn. Kuzbasskogo gos. tehn. un-ta. 2017. № 1. S. 15–25. (In Russ.).

4. Alekseeva L. B., Uvarov V. P. Virtual'noe modelirovanie nepreryvnyh tehnologicheskikh processov pri reshenii zadach upravlenija // Gornyj inform.-analit. bjul. 2014. № 4. S. 298–302. (In Russ.).

5. Demin V. F., Demina T. V. Ocenka parametrov defektnosti podgotovitel'nyh vyrabotok v zavisimosti ot gorno-tehnologicheskikh uslovij jekspluatacii // Gornyj inform.-analit. bjul. 2014. № 1. S. 5–11. (In Russ.).

6. Vlijanie naprjazhenij na ustojchivost' pri so-prjazhenii vyrabotok v zavisimosti ot gornotehnologicheskikh parametrov razrabotki / V. F. Demin, A. E. Sudarikov, T. V. Demina, Ju. Ju. Stefljuk, V. V. Demin // GIAB. Gornyj inform.-analit. bjul. 2014. № 8. S. 5–14 (In Russ.).

Information about the authors

Igor M. Novozhilov – Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor of the Department of Automation and Control Processes of Saint Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: novozhilovim@list.ru

<https://orcid.org/0000-0002-2056-3930>

Dmitry A. Pervukhin – Dr Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of System Analysis and Management of Saint Petersburg Mining University, 21st line, 2, Vasilievsky Island, Saint Petersburg, 199106, Russia.

E-mail: pervukhin_da@pers.spmi.ru

<https://orcid.org/0000-0003-3547-2932>

Aleksandr V. Martirosyan – Cand. Sci. (Eng.), Saint Petersburg Mining University, 21st Line, 2, Vasilievsky Island, Saint Petersburg, 199106, Russia.

E-mail: Martirosyan_AV@pers.spmi.ru

<https://orcid.org/0000-0002-1455-0930>

Yuri V. Ilyushin – Dr Sci. (Eng.), Saint Petersburg Mining University, 21st Line, Bldg. 2, Vasilievsky Island, Saint Petersburg, 199106, Russia.

E-mail: ilyushin_yuv@pers.spmi.ru

<https://orcid.org/0000-0002-9175-8751>

Nikolay A. Talanov – postgraduate student of the Department of System Analysis and Management of Saint Petersburg Mining University, 21st line, 2, Vasilievsky Island, Saint Petersburg, 199106, Russia.

E-mail: s225027@srud.spmi.ru

Danila R. Smirnov – student of ITU-20 group of the Department of System Analysis and Management, St. Petersburg Mining University, 21st line, 2, Vasilievsky Island, St. Petersburg, Russia.

Author contribution statement:

Novozhilov I. M. – general management.

Pervukhin D. A. – conclusion.

Martirosyan A. V. – findings.

Плущин Ю. В. – conceptual research.

Smirnov D. R. – experimental research.

Talanov N. A. – research methodology.

Статья поступила в редакцию 03.10.2024; принята к публикации после рецензирования 31.10.2024; опубликована онлайн 25.12.2024.

Submitted 03.10.2024; accepted 31.10.2024; published online 25.12.2024.
