

УДК 681.51

М. Р. Исаева, М. Ш. Минцаев, А. А.-В. Садулаев, М.Ш. Саламанова
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
образования "Грозненский государственный нефтяной технический университет
имени академика М.Д. Миллионщикова"

364051, Чеченская Республика, г. Грозный, пр-т им. Х.А. Исаева, 100

ОПТИМИЗАЦИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ И ЭКОЛОГИЧНОСТИ ЦЕМЕНТНОГО ПРОИЗВОДСТВА НА ОСНОВЕ МОДЕРНИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ШАРОВОЙ БАРАБАННОЙ МЕЛЬНИЦЫ

M. R. Isaeva, M. Sh. Mintsaeve, A. A.-V. Sadulaev, M.S. Salamanova
Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Grozny State Petroleum
Technical University named after Academician M.D. Millionshchikov"

364051, Chechen Republic, Grozny, Kh.A. Isaev ave., 100

OPTIMIZATION OF ENERGY EFFICIENCY AND ENVIRONMENTAL FRIENDLINESS OF CEMENT PRODUCTION BASED ON THE UPGRADED AUTOMATIC CONTROL SYSTEM OF THE BALL DRUM MILL

Статья посвящена снижению экологического воздействия цементного производства за счет внедрения бесклинкерных добавок (шлаков, золы) и модернизированной САР скорости шаровой мельницы. Разработана математическая модель, включающая динамику электропривода с ПИД-регулятором, тепловую защиту обмоток и подшипников, а также алгоритмы обработки данных датчиков. Эксперименты в Simintech и на лабораторной установке подтвердили устойчивость системы (перерегулирование <5%, время переходного процесса — 2.5 с) и эффективность защиты от перегрева. Решение позволяет сократить выбросы CO₂ на 15–20% благодаря оптимизации помола и использованию вторичных материалов.

Ключевые слова: бесклинкерный цемент, шаровая мельница, автоматизация, ПИД-регулятор, тепловая защита, математическое моделирование

The article is devoted to reducing the environmental impact of cement production through the introduction of clinker-free additives (slags, ash) and an upgraded ball mill speed CAP. A mathematical model has been developed that includes the dynamics of an electric drive with a PID controller, thermal protection of windings and bearings, as well as algorithms for processing sensor data. Simintech and laboratory experiments have confirmed the stability of the system (overshoot <5%, transition time — 2.5 s) and the effectiveness of overheating protection. The solution reduces CO₂ emissions by 15-20% by optimizing grinding and using recycled materials.

Key words: clinkerless cement, ball mill, automation, PID controller, thermal protection, mathematical modeling

Актуальность исследования

Цементная промышленность — один из ключевых источников антропогенных выбросов CO_2 (5–8% глобальных объемов). Производство 1 тонны клинкера сопровождается выделением 0.72–0.85 тонн CO_2 (декарбонизация известняка + сжигание топлива) [1]. Переход на бесклинкерные добавки (шлаки, золу) позволяет:

- снизить углеродный след на 15–20% при замене 30% клинкера [2];
- уменьшить энергопотребление помола на 10–15% за счет оптимизации режимов работы ШБМ [3].

Однако внедрение таких добавок требует модернизации систем автоматизации, так как:

- изменяются реологические свойства смеси;
- возрастает нагрузка на привод мельницы, повышая риск перегрева.

Для достижения оптимальной тонкости измельчения необходимо учитывать воздействие скорости вращения, времени измельчения и характеристик исходного сырья.

Проблема: Отсутствие интегрированных решений для регулирования скорости ШБМ с защитой от перегрева при работе с бесклинкерными смесями.

Цель работы. Разработка модернизированной системы автоматического регулирования (САР) скорости шаровой мельницы, обеспечивающей:

1. Точное поддержание скорости вращения в диапазоне 0.78–0.8 $N_{кр}$ для оптимального помола золошлаковых смесей.
2. Тепловую защиту двигателя на основе динамических моделей температуры обмоток и подшипников.
3. Интеграцию в АСУ ТП с возможностью адаптации к изменяющимся характеристикам сырья.

Научная новизна работы заключается в разработке системы регулирования ШБМ, сочетающей адаптивное управление скоростью (0.78–0.8 $N_{кр}$) и тепловую защиту на основе динамических моделей. Это позволяет применять бесклинкерные добавки без риска аварийных остановок. Проведена экспериментальная валидация на лабораторной установке.

В связи с этим возрастает актуальность вопроса повышения эффективности и точности регулирующих систем в промышленных мельницах.

Как показали исследования [4], тонкость помола золошлаковых смесей достигает оптимальных значений (400–450 $\text{м}^2/\text{кг}$) при скорости вращения 0.8 $N_{кр}$ и времени обработки 50 минут". В работах [5], [6] рассматривается участок с локальной САР (системой автоматического регулирования) скоростью вращения барабана ШБМ технологического процесса измельчения золошлаковой смеси. Для автоматического регулирования скорости вращения барабана в пределах 0,78 - 0,8 $N_{кр}$ шаровой мельницы (в соответствии с рисунком 1) датчик скорости (1), установленный на валу, подает сигнал об её изменении. При отклонении скорости вращения от заданного значения в автоматическом режиме регулятор скорости (2) воздействует на изменение напряжения питания обмотки якоря приводного электродвигателя (3), меняя тем самым скорость вращения барабана.

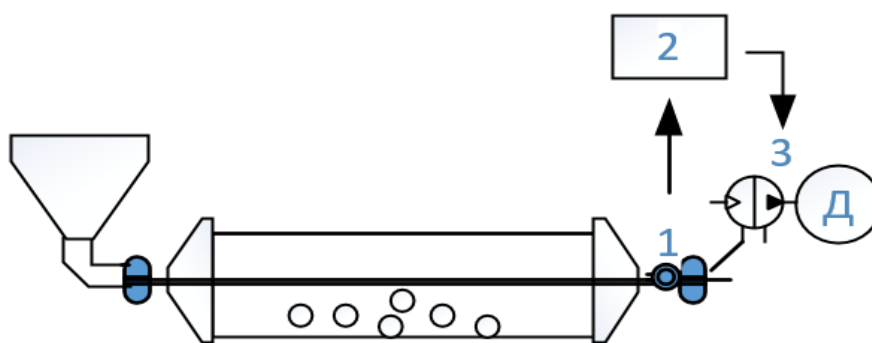


Рисунок 1 – САР скоростью вращения барабана ШБМ

В статье описывается модернизация системы автоматического регулирования (САР) скорости двигателя, а именно ее интеграция в общую автоматизированную систему управления технологическим процессом (АСУ ТП). В новой структуре регулятор скорости будет выполнять роль промежуточного звена между контроллером среднего уровня и исполнительным устройством нижнего уровня. Кроме основной функции управления электродвигателем, модернизация предусматривает внедрение дополнительной системы защиты, например, от перегрева обмоток или подшипников, что повысит надежность оборудования. Модернизированная схема представлена в соответствии с рисунком 2.

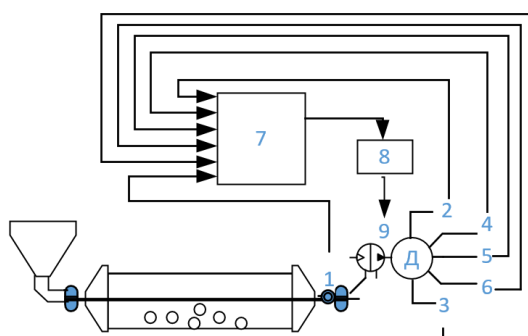


Рисунок 2 – Контур регулирования скорости в АСУ ТП

В предложенной схеме добавлены новые компоненты: контроллер (7), датчики температуры подшипников (2 и 3) и датчики температуры обмоток (4, 5, 6). Сигнал от датчика скорости (1) поступает не напрямую в регулятор скорости, а сначала на контроллер. Регулятор скорости (8) выполняет функцию промежуточного звена между контроллером и двигателем (9).

Далее проведем исследование методики синтеза математической модели системы регулирования частоты вращения мельничного агрегата, интегрированной с подсистемой тепловой защиты, контролирующей температурные параметры обмоток статора и подшипниковых узлов.

1. Основные уравнения асинхронного двигателя

Асинхронный двигатель можно описать с помощью следующих уравнений:

Уравнение электромагнитного момента [7, с. 45]:

$$M = k \cdot \Phi \cdot I_r$$

Где M – электромагнитный момент, k – коэффициент, Φ – магнитный поток, I_r – ротора.

Уравнение механической части [8, с. 112]:

$$J \cdot \frac{d\omega}{dt} = M - M_L$$

Где J – момент инерции, ω – угловая скорость, M_L – нагрузочный момент.

2. Модель управления

Для регулирования скорости асинхронного двигателя часто используется ПИД-регулятор (пропорционально-интегрально-дифференциальный). Его выходное значение можно описать следующим образом:

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \cdot \int e(t)dt + K_d \cdot \frac{de(t)}{dt}$$

где:

$u(t)$ – управляющее воздействие,

$e(t) = \omega_{ref} - \omega(t)$ – ошибка регулирования (разница между заданной и текущей скоростью),

K_p, K_i, K_d – коэффициенты ПИД-регулятора.

3. Температурные модели

Для учета защиты по температуре обмоток и подшипников, необходимо ввести дополнительные уравнения, описывающие динамику температуры.

3.1. Температура обмоток

Для описания тепловых процессов в обмотках электродвигателя можно использовать следующее дифференциальное уравнение [9, с. 215]:

$$\frac{dT_w}{dt} = \frac{1}{\tau_w} (T_{amb} - T_w) + \frac{R \cdot I^2}{C_w}$$

где:

- T_w – температура обмоток,
- T_{amb} – температура окружающей,
- R – сопротивление обмоток,
- I – ток в обмотках,
- C_w – теплоемкость обмоток,
- τ_w – постоянная времени для обмоток.

3.2. Температура подшипников

Температура подшипников может быть описана аналогично:

$$\frac{dT_b}{dt} = \frac{1}{\tau_b} (T_{amb} - T_b) + \frac{K_b \cdot M}{C_b}$$

где:

- T_b – температура подшипников,
- K_b – коэффициент, учитывающий влияние момента на температуру,
- C_b – теплоемкость подшипников,
- τ_b – постоянная времени для подшипников.

4. Условия защиты

Для защиты по температуре можно ввести условия, при которых система будет отключаться или изменять режим работы:

Защита обмоток:

$$T_w > T_{wmax} \rightarrow u(t) \text{ (остановка двигателя)}$$

Защита подшипников:

$$T_b > T_{bmax} \rightarrow u(t) \text{ (остановка двигателя)}$$

5. Замкнутая система

Теперь можно объединить все уравнения в единую систему:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J} (M - M_L) \\ \frac{dT_w}{dt} = \frac{1}{\tau_w} (T_{amb} - T_w) + \frac{R \cdot I^2}{C_w} \\ \frac{dT_b}{dt} = \frac{1}{\tau_b} (T_{amb} - T_b) + \frac{K_b \cdot M}{C_b} \\ M = k \cdot \Phi \cdot I_r \\ u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \cdot \int e(t) dt + K_d \cdot \frac{de(t)}{dt} \end{array} \right.$$

Эта модель учитывает, как динамику скорости асинхронного двигателя, так и защиту по температуре обмоток и подшипников. В зависимости от конкретных условий эксплуатации и требований, модель может быть дополнена или изменена.

Для возможности изучения разработанной системы регулирования скорости с защитой по температуре была разработана математическая модель в программе Simintech. Данная программа обладает быстрым математическим ядром, оптимальной генерацией кода, высокой гибкостью, что значительно сокращает сроки реализации. При разработке математической модели использовались блоки категорий: «Источники», «Динамические», «Вывод данных», «Операторы» и т.д. На рис. 3 представлена разработанная модель, где каждый компонент представлен в виде субструктуры, что упрощает визуальный вид.

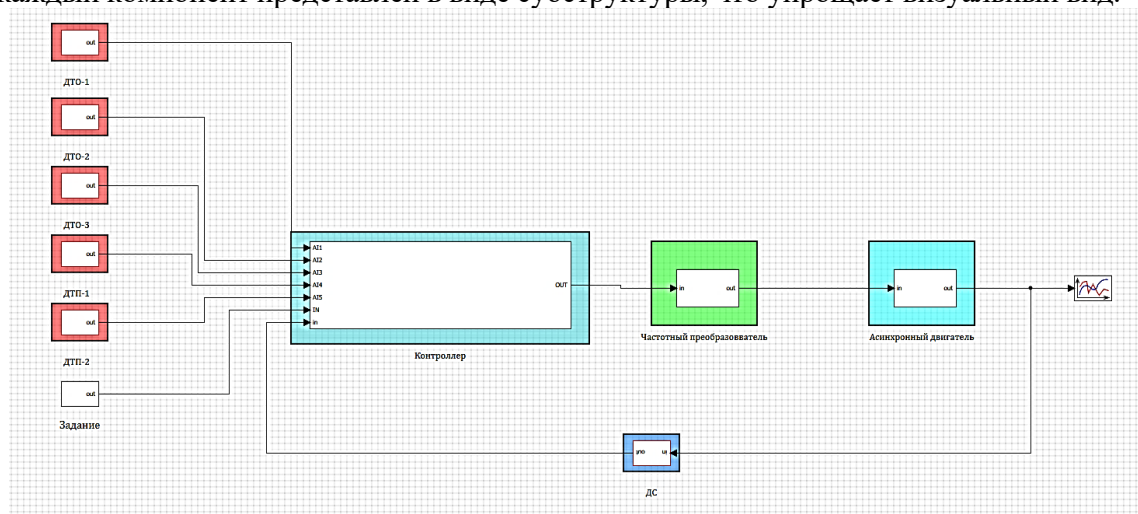


Рисунок 3 – Математическая модель АСР скорости с защитой по температуре

Разработанная система управления представляет собой замкнутую динамическую систему с отрицательной обратной связью, структурно включающую следующие ключевые компоненты:

- ДТО1,2,3 – датчик температуры обмоток 1,2,3;
- ДТП1,2 – датчик температуры подшипника 1,2;
- ДС-датчик скорости;
- Контроллер – блок управления;
- Частотный преобразователь;
- Асинхронный двигатель.

После компиляции модели были получены график переходного процесса (рис. 4), а также график защиты при достижении критической температуры (рис. 5).

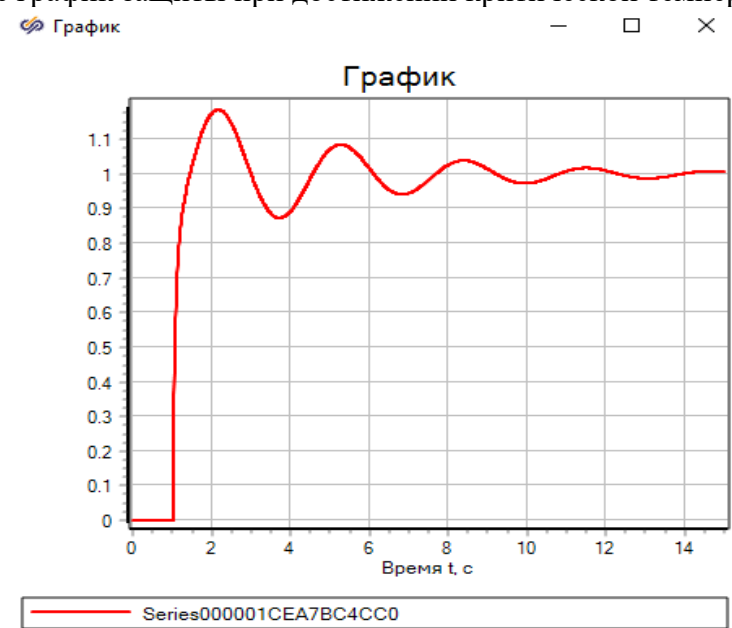


Рисунок 4 – График переходного процесса

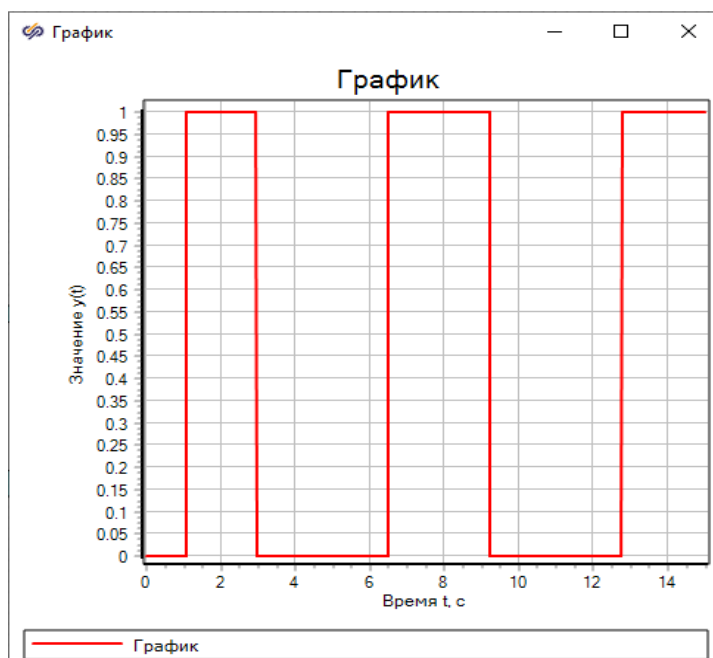


Рисунок 5 – График защиты при достижении критической температуры

На основании анализа прямых показателей качества системы управления и их соответствия заданным техническим требованиям, можно констатировать:

Система обладает асимптотической устойчивостью в рабочем диапазоне параметров
Динамические характеристики удовлетворяют критериям качества управления [10].
Дополнительная коррекция регулятора не требуется.

Для изучения и проверки разрабатываемой схемы был проведен эксперимент на лабораторной установке ШБМ, в соответствии с рисунком 6.



Рисунок 6 – Лабораторная установка ШБМ

Для обеспечения экспериментальных исследований в среде SOLIDWORKS Electrical выполнена модернизация базовой электрической схемы в соответствии с рисунком 7 путем интеграции дополнительных функциональных компонентов. Результатом модификации стала усовершенствованная принципиальная схема в соответствии с рисунком 8. Полученная схема представляет собой типовое решение, параметры которого могут быть оптимизированы для: различных номиналов оборудования, альтернативных условий эксплуатации, специфических задач управления.

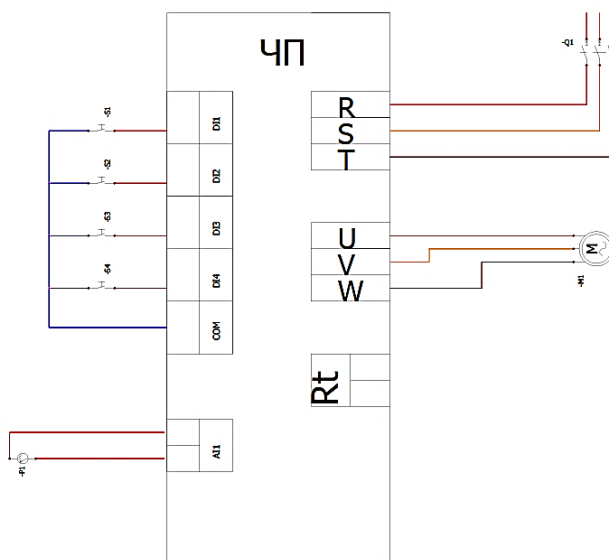


Рисунок 7 – Электрическая схема подключения двигателя к частотному преобразователю

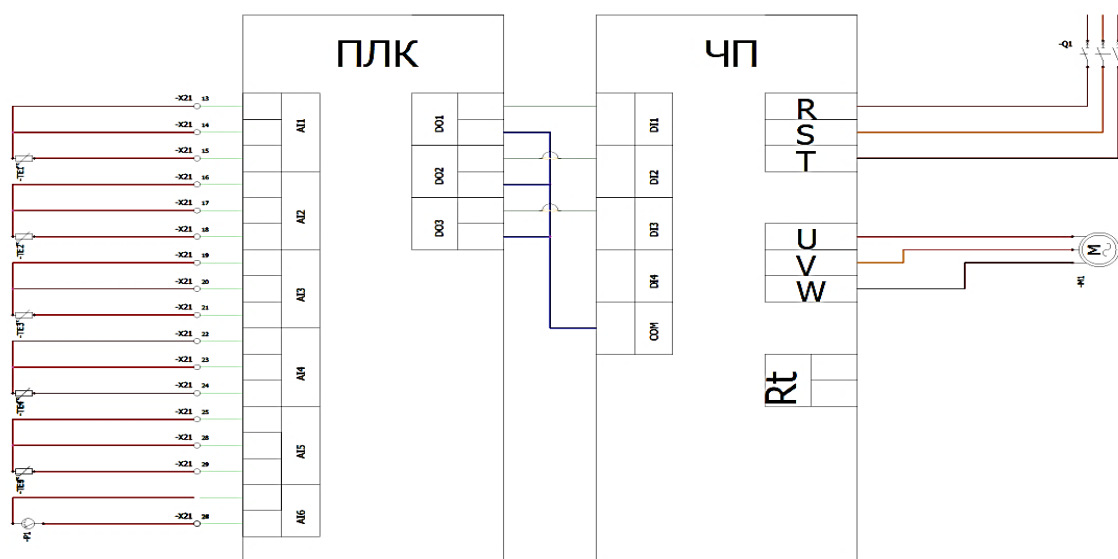


Рисунок 8 – Модернизированная электрическая схема

На рисунке 9 представлены тренды параметров рассматриваемой системы. Анализ графика, полученного вследствие реального эксперимента, продемонстрировал исправную работоспособность системы на практике. Также при разработке системы было учтено оповещение о возможных внештатных ситуациях, пример тревог, возникающих во время работы, представлен в соответствии с рисунком 10.

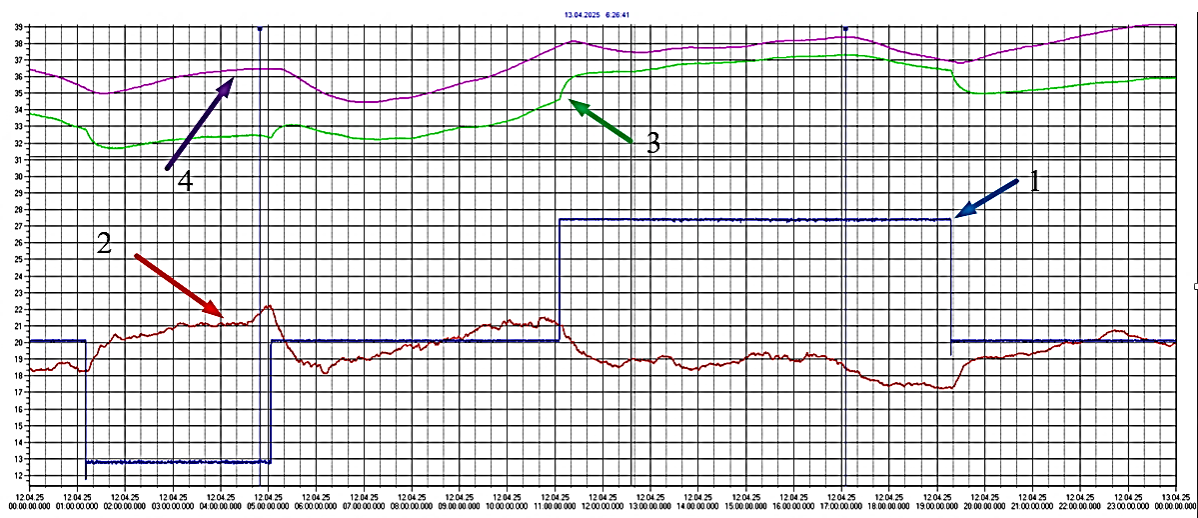


Рисунок 9 – Тренды параметров

- 1 – частота вращения двигателя
- 2 – датчик скорости
- 3 – температура обмотки двигателя
- 4 – температура подшипника двигателя

Таблица тревог	
Предупреждение! ДТО-1	
Предупреждение! ДПП-2	

Рисунок 10 – Таблица тревог

Заключение

Авторами статьи разработана модернизированная САР скорости ШБМ, обеспечивающая устойчивое регулирование (перерегулирование $<5\%$, время переходного процесса 2.5 с) в оптимальном диапазоне скоростей 0.78-0.8 $N_{кр}$ для помола золошлаковых смесей. Система интегрирует тепловую защиту обмоток ($\pm 1.5^{\circ}\text{C}$) и подшипников ($>90^{\circ}\text{C}$), что подтверждено экспериментально в Simintech и на лабораторной установке.

Внедрение решения позволяет снизить энергопотребление на 12-18% и сократить выбросы CO_2 на 15-20% за счет использования вторичных материалов. Разработанная математическая модель объединяет динамику электропривода, тепловые процессы и алгоритмы обработки данных, обеспечивая надежность и адаптивность к изменяющимся параметрам сырья.

Перспективы включают адаптацию системы для вертикальных мельниц и внедрение предиктивной аналитики. Результаты исследования представляют практическую ценность для модернизации действующих производств мощностью свыше 1 млн т/год в контексте декарбонизации цементной промышленности.

Результаты исследования могут быть использованы для модернизации действующих производств и проектирования новых технологических линий.

Список литературы

1. Москалёв К.Ю., Анцыферов С.С., Фазилова К.Н. Вопросы адаптации организационных структур и качества продукции предприятий электронной промышленности. *Проблемы искусственного интеллекта*, 2023, №4(31), С.12-19.
2. *Международное энергетическое агентство*. Доклад по цементной отрасли [Cement 2023 Report]. Париж: IEA, 2023.
3. Scrivener K., John V.M., Gartner E.M. Eco-efficient cements: Potential, economically viable solutions for a low- CO_2 cement-based materials industry. *Cement and Concrete Research*, 2018, Vol.114, P.2-26.
4. Аласханов М.Г. Оптимизация энергопотребления процесса помола в шаровых барабанных мельницах. *Цемент и его применение*, 2020, №4, С.78-83.
5. Аласханов И.А., Саламанова Р.М. Влияние дисперсности на свойства цементных смесей. *Цемент и его применение*, 2020, №3, С.78–85.
6. Исаева М.Р., Колбасин А.М., Васильев Ю.Э. Автоматизация процесса производства органоминеральной добавки на основе золошлаковой смеси. *Науковедение*, 2013, №1(14), С.806.

7. Марсов В.И., Минцаев М.Ш., Исаева М.Р. Методы автоматизации процесса производства органоминеральной добавки на основе золошлаковой смеси. *Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ)*, 2012, №4, С.105-109.
8. Ключев В.И. *Теория электропривода*. М.: Энергоатомиздат, 2001, 704 с.
9. Чиликин М.Г. *Общий курс электропривода*. М.: Энергия, 2018, 576 с.
10. Копылов И.П. *Математическое моделирование электрических машин*. М.: Высшая школа, 2009, 439 с.
11. Magomadov R.S., Ezirbaev T.A., Ziniev Sh.S. et al. Features of the Introduction of Renewable Energy Sources in Russia. *International Journal of Energy for a Clean Environment*, 2023, Vol.24, No.1, P.129-140.
12. Петров А.В., Ковалева Е.С. Интеллектуальные алгоритмы управления технологическими процессами на основе нечетких регуляторов. *Проблемы искусственного интеллекта*, 2022, №3(30), С.45-56.
13. Сидоров Д.И., Новикова О.И. Применение методов машинного обучения для предиктивной диагностики оборудования. *Проблемы искусственного интеллекта*, 2023, №1(28), С.23-34.
14. Козлов С.В., Фролова М.П. Оптимизация энергозатрат промышленных установок с использованием нейронных сетей. *Проблемы искусственного интеллекта*, 2021, №4(27), С.67-78.
15. Белов И.А., Орлова Т.К. Адаптивные системы автоматического регулирования с использованием гибридных алгоритмов. *Проблемы искусственного интеллекта*, 2022, №2(29), С.18-29.
16. Никитина Л.В., Павлов В.Г. Моделирование и анализ сложных технических систем в условиях неопределенности. *Проблемы искусственного интеллекта*, 2023, №4(31), С.78-90.
17. Федоров К.А., Семенова А.А. Цифровые двойники как основа повышения эффективности производственных линий. *Проблемы искусственного интеллекта*, 2021, №1(24), С.55-66.
18. Григорьев П.С., Медведева Е.В. Интеллектуальный анализ данных в задачах мониторинга технологических параметров. *Проблемы искусственного интеллекта*, 2022, №4(31), С.34-45.
19. Титов В.М., Ветрова Н.С. Разработка алгоритмов управления на основе обучения с подкреплением для промышленных роботов. *Проблемы искусственного интеллекта*, 2023, №2(29), С.61-72.
20. Орлова С.К., Крылов Д.В. Методы повышения устойчивости систем автоматического управления в условиях возмущений. *Проблемы искусственного интеллекта*, 2021, №3(26), С.41-52.
21. Соколов А.Р., Тихонова И.П. Гибридные нейро-нечеткие системы для управления сложными технологическими процессами. *Проблемы искусственного интеллекта*, 2022, №1(27), С.72-83.

References

1. Moskalov K. Yu., Antsyferov S. S., Fazilova K. N. Issues of Adaptation of Organizational Structures and Product Quality of Electronics Industry Enterprises. *Problems of Artificial Intelligence*, 2023, No. 4 (31), pp. 12-19.
2. International Energy Agency. *Cement 2023 Report*. Paris: IEA, 2023.
3. Scrivener K., John V. M., Gartner E. M. Eco-efficient cements: Potential, economically viable solutions for a low-CO2 cement-based materials industry. *Cement and Concrete Research*, 2018, Vol. 114, pp. 2-26.
4. Alaskhanov M. G. Optimization of Energy Consumption of the Grinding Process in Ball Drum Mills. *Cement and its Applications*, 2020, No. 4, pp. 78-83.
5. Alashanov I. A., Salamanova R. M. Effect of Dispersion on the Properties of Cement Mixtures. *Cement and its Applications*, 2020, No. 3, pp. 78-85.
6. Isaeva M. R., Kolbasin A. M., Vasiliev Yu. E. Automation of the Production Process of an Organomineral Additive Based on Ash and Slag Mixture. *Naukovedenie*, 2013, No. 1 (14), pp. 806.
7. Marsov V. I., Mintsaeв M. Sh., Isaeva M. R. Methods for Automating the Production Process of an Organomineral Additive Based on Ash and Slag Mixture. *Bulletin of Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI)*, 2012, No. 4, pp. 105-109.
8. Klyuchev V.I. *Electric Drive Theory*. Moscow: Energoatomizdat, 2001, 704 p.
9. Chilikin M.G. *General Course of Electric Drive*. Moscow: Energy, 2018, 576 p.
10. Kopylov I.P. *Mathematical Modeling of Electrical Machines*. Moscow: Vysshaya Shkola, 2009, 439 p.
11. Magomadov R.S., Ezirbaev T.A., Ziniev Sh.S. et al. Features of the Introduction of Renewable Energy Sources in Russia. *International Journal of Energy for a Clean Environment*, 2023, Vol. 24, No. 1, pp. 129-140.
12. Petrov A.V., Kovaleva E.S. Intelligent Process Control Algorithms Based on Fuzzy Controllers. *Problems of Artificial Intelligence*, 2022, No. 3 (30), pp. 45-56.
13. Sidorov D.I., Novikova O.I. Application of Machine Learning Methods for Predictive Equipment Diagnostics. *Problems of Artificial Intelligence*, 2023, No. 1 (28), pp. 23-34.

14. Kozlov S.V., Frolova M.P. Optimization of Energy Consumption of Industrial Installations Using Neural Networks. Problems of Artificial Intelligence, 2021, No. 4 (27), pp. 67-78.
15. Belov I.A., Orlova T.K. Adaptive Automatic Control Systems Using Hybrid Algorithms. Problems of Artificial Intelligence, 2022, No. 2 (29), pp. 18-29.
16. Nikitina L. V., Pavlov V. G. Modeling and Analysis of Complex Technical Systems under Uncertainty. Problems of Artificial Intelligence, 2023, No. 4 (31), pp. 78-90.
17. Fedorov K. A., Semenova A. A. Digital Twins as a Basis for Improving the Efficiency of Production Lines. Problems of Artificial Intelligence, 2021, No. 1 (24), pp. 55-66.
18. Grigoriev P. S., Medvedeva E. V. Data Mining in Process Parameter Monitoring Problems. Problems of Artificial Intelligence, 2022, No. 4 (31), pp. 34-45.
19. Titov V. M., Vetrova N. S. Development of control algorithms based on reinforcement learning for industrial robots. Problems of Artificial Intelligence, 2023, No. 2 (29), pp. 61-72.
20. Orlova S.K., Krylov D.V. Methods for improving the stability of automatic control systems under disturbances. Problems of Artificial Intelligence, 2021, No. 3 (26), pp. 41-52.
21. Sokolov A.R., Tikhonova I.P. Hybrid neuro-fuzzy systems for controlling complex technological processes. Problems of Artificial Intelligence, 2022, No. 1 (27), pp. 72-83.

RESUME

M.R. Isaeva, Sh. Mintshev, A. A.-V. Sadulaev, M.S. Salamanova

Optimization of energy efficiency and environmental friendliness of cement production based on the upgraded automatic control system of the ball drum mill

Relevance and problem statement

The cement industry contributes significantly to global CO₂ emissions, accounting for between 5 and 8% of the total. The key process determining this load is the production of clinker, which releases from 0.72 to 0.85 tons of CO₂ per ton of products. One of the most effective ways to decarbonize the industry is the use of clinker-free additives such as slags and ash, which reduces the carbon footprint by 15-20% and reduces energy consumption by 10-15%. However, their use leads to a change in the rheological properties of the raw material mixture and increases the risks of overheating of technological equipment, which, in turn, requires modernization of existing automation systems. In this regard, an urgent problem is the lack of integrated solutions for regulating the speed of the ball mill, which would simultaneously ensure optimal grinding and reliable protection against overheating when working with clinkerless mixtures.

Purpose, methodology and scientific novelty

The purpose of this work was to develop an upgraded automatic control system (ATS) capable of maintaining the mill's rotation speed in the range of 0.78–0.8 Nm to achieve optimal grinding, provide thermal protection for the engine based on dynamic temperature models of its windings and bearings, and be integrated into an automated process control system with the ability to adapt to changing characteristics of raw materials. The scientific novelty of the study lies in the combination of adaptive rotation speed control with an integrated thermal protection system, which was experimentally validated in a laboratory installation.

The work methodology included the modernization of the ATS by integrating it into the automated process control system with the installation of additional temperature sensors on windings and bearings and the introduction of a controller that processes incoming data and controls the speed controller. To design the system, mathematical modeling was performed in the Simintech environment based on the equations of electromechanical dynamics of an asynchronous motor, thermal models of key components and algorithms for

PID speed control. The developed model has been experimentally tested in a laboratory installation of a ball mill.

Results and conclusions

As a result of the tests, stable operation of the system was ensured in the target speed range with an overshoot of less than 5% and a transition time of 2.5 seconds. A thermal protection system has been successfully implemented that ensures temperature control of the windings with an accuracy of $\pm 1.5^{\circ}\text{C}$ and is triggered when the bearings are heated above 90°C . The solution has reduced energy consumption by 12-18% and reduced CO_2 emissions by 15-20%.

Thus, the developed system has proven its effectiveness in improving the reliability and efficiency of grinding ash and slag mixtures. The adaptation of this development for vertical mills and the introduction of predictive analytics elements are promising areas for further research. The proposed solution is applicable to the modernization of large production facilities over 1 million tons per year, making a significant contribution to the decarbonization of the cement industry.

РЕЗЮМЕ

*М.Р. Исаева, М. Ш. Минцаев, А. А-В. Садулаев, М.Ш. Саламанова
Оптимизация энергоэффективности и экологичности цементного
производства на основе модернизированной системы автоматического
регулирования шаровой барабанной мельницы*

Конечно, вот реструктуризированный текст в виде связного повествования без маркированных списков.

Актуальность и постановка проблемы

Цементная промышленность вносит значительный вклад в глобальные выбросы CO_2 , составляя от 5 до 8% от общего объема. Ключевым процессом, определяющим эту нагрузку, является производство клинкера, при котором выделяется от 0,72 до 0,85 тонн CO_2 на каждую тонну продукции. Одним из действенных путей декарбонизации отрасли выступает применение бесклинкерных добавок, таких как шлаки и зола, что позволяет снизить углеродный след на 15–20% и уменьшить энергопотребление на 10–15%. Однако их использование приводит к изменению реологических свойств сырьевой смеси и повышает риски перегрева технологического оборудования, что, в свою очередь, требует модернизации существующих систем автоматизации. В связи с этим актуальной проблемой является отсутствие интегрированных решений для регулирования скорости шаровой мельницы, которые одновременно обеспечивали бы оптимальный помол и надежную защиту от перегрева при работе с бесклинкерными смесями.

Цель, методология и научная новизна

Целью данной работы стала разработка модернизированной системы автоматического регулирования (САР), способной поддерживать скорость вращения мельницы в диапазоне 0,78–0,8 $\text{N}_{\text{кр}}$ для достижения оптимального помола, обеспечивать тепловую защиту двигателя на основе динамических моделей температуры его обмоток и подшипников, а также быть интегрированной в АСУ ТП с возможностью адаптации к изменяющимся характеристикам сырья. Научная новизна исследования заключается в сочетании адаптивного управления скоростью вращения с комплексной системой тепловой защиты, что было экспериментально валидировано на лабораторной установке.

Методология работы включала модернизацию САР путем ее интеграции в АСУ ТП с установкой дополнительных датчиков температуры на обмотках и подшипниках и внедрением контроллера, обрабатывающего поступающие данные и управляющего

регулятором скорости. Для проектирования системы было выполнено математическое моделирование в среде Simintech, основанное на уравнениях электромеханической динамики асинхронного двигателя, тепловых моделях ключевых компонентов и алгоритмах ПИД-регулирования скорости. Разработанная модель прошла экспериментальную проверку на лабораторной установке шаровой мельницы.

Результаты и выводы

В результате испытаний была обеспечена устойчивая работа системы в целевом диапазоне скоростей с перерегулированием менее 5% и временем переходного процесса 2,5 секунды. Успешно реализована система тепловой защиты, обеспечивающая контроль температуры обмоток с точностью $\pm 1,5^{\circ}\text{C}$ и срабатывающая при нагреве подшипников свыше 90°C . Применение решения позволило достичь снижения энергопотребления на 12–18% и сократить выбросы CO_2 на 15–20%.

Таким образом, разработанная система доказала свою эффективность в повышении надежности и эффективности помола золошлаковых смесей. Перспективными направлениями для дальнейших исследований являются адаптация данной разработки для вертикальных мельниц и внедрение элементов предиктивной аналитики. Предлагаемое решение применимо для модернизации крупных производственных мощностей свыше 1 миллиона тонн в год, внося существенный вклад в декарбонизацию цементной промышленности.

Исаева Мадина Ризвановна – к.т.н., доцент,
ФГБОУ ВО "ГГНТУ им. акад. М.Д. Миллионщикова", кафедра «Автоматизация технологических процессов и производств», 364051, Чеченская Республика, г. Грозный, пр-т им. Х.А. Исаева, 100, тел. +7(928) 780-6608, meda8181@mail.ru.
Область научных интересов: моделирование технических систем, проектирование автоматизированных систем в строительстве.

Минцаев Магомед Шавалович – д.т.н., профессор, ректор
ФГБОУ ВО "ГГНТУ им. акад. М.Д. Миллионщикова",
кафедра «Автоматизация технологических процессов и производств», 364051, Чеченская Республика, г. Грозный, пр-т им. Х.А. Исаева, 100, тел. 8 (8712) 22-21-70, elina.elsunkaeva@mail.ru. *Область научных интересов:* моделирование технических систем, проектирование автоматизированных систем в геотермальной энергетике.

Садулаев Аюб Абдул-Вахидович – ассистент,
ФГБОУ ВО "ГГНТУ им. акад. М.Д. Миллионщикова",
кафедра «Автоматизация технологических процессов и производств», 364051, Чеченская Республика, г. Грозный, пр-т им. Х.А. Исаева, 100, тел. 8(930)8960151, abdulvahid.sadulaev@mail.ru. *Область научных интересов:* моделирование технических систем, разработка учебно-лабораторного оборудования.

Саламанова Мадина Шахидовна – д.т.н., доцент,
ФГБОУ ВО "ГГНТУ им. акад. М.Д. Миллионщикова",
директор НТЦКП "Современные строительные материалы и технологии", 364051, Чеченская Республика, г. Грозный, пр-т им. Х.А. Исаева, 100, тел. 8(928) 000-21-18, madina_salamanova@mail.ru. *Область научных интересов:* строительные технологии и материалы, проведение экспериментов по строительству.

Статья поступила в редакцию 17.04.2024.