АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ РУДЫ В МЕЛЬНИЦАХ МОКРОГО САМОИЗМЕЛЬЧЕНИЯ

Боева Оқила Ҳусановна

Навоийский государственный горно-технологический университет, доцент кафедры "Автоматизация и управление", (PhD)

E-mail: boyeva-oqila@mail.ru

Бабахонова Умида Абсоломовна

Навоий давлат кончилик ва технологиялар университети, "Автоматлаштириш ва бошқарув" кафедраси ассистенти

E-mail: umidababaxanova98@gmail.com

Аннотация: В статье рассмотрены вопросы разработки и исследования автоматизированной системы управления технологическим процессом измельчения руды в мельницах мокрого самоизмельчения, работающих в замкнутом цикле со спиральным классификатором. Показано, что рост стоимости энергоресурсов и высокая энергоёмкость процесса измельчения обусловливают необходимость оптимизации режимов работы комплекса «мельница–классификатор» с целью повышения производительности и снижения удельного расхода электроэнергии. На основе анализа статических характеристик установлено, что максимальная технологическая и энергетическая эффективность достигается при работе вблизи критического запаса материала в мельнице, однако данный режим связан с повышенным риском перегрузки оборудования. Предложен подход к построению адаптивной системы стабилизации режима измельчения, основанный на идентификации объекта управления по данным нормального функционирования без проведения активных экспериментов. Разработана математическая модель подсистемы загрузки с учётом влияния возмущений и измерительных помех, а также предложена корректированная оценка параметров объекта. Проведён сравнительный анализ систем управления на базе регулятора состояния и классического ПИД-регулятора, который показал преимущества предложенного подхода по быстродействию, качеству переходных процессов и эффективности подавления возмущений. Полученные результаты подтверждают целесообразность применения адаптивных и модельно-ориентированных методов управления для повышения надёжности и энергоэффективности процесса измельчения руды.

Ключевые слова: автоматизированная система управления, мельница мокрого самоизмельчения, комплекс мельница–классификатор, оптимизация режимов измельчения, адаптивное управление, идентификация объекта управления.

ISSN 3030-3907

Annotatsiya. Maqolada spiral klassifikator bilan yopiq siklda ishlaydigan ho‘l o‘z-o‘zini yanchish tegirmonlarida rudani yanchish texnologik jarayonini avtomatlashtirilgan boshqarish tizimini ishlab chiqish va tadqiq etish masalalari ko‘rib chiqilgan. Energiya resurslari narxining oshib borishi va yanchish jarayonining yuqori energiya sig‘imliligi “tegirmon–klassifikator” majmuasining ish rejimlarini optimallashtirishni, ya’ni unumdorlikni oshirish va elektr energiyasining solishtirma sarfini kamaytirishni dolzarb vazifaga aylantiradi. Statik xarakteristikalarni tahlil qilish asosida tegirmondagi materialning kritik zaxirasiga yaqin rejimda ishlash maksimal texnologik va energetik samaradorlikni ta’minlashi aniqlangan, biroq bunday rejim uskunaning ortiqcha yuklanish xavfi bilan bog‘liq. Maqolada faol tajribalar o‘tkazmasdan, faqat normal ishlash rejimi ma’lumotlari asosida boshqariladigan obyektni identifikatsiyalashga tayangan holda yanchish rejimini barqarorlashtiruvchi adaptiv boshqaruv tizimini qurish yondashuvi taklif etilgan. Yuklash quyi tizimi uchun tashqi bezovtaliklar va o‘lchash xatoliklari ta’sirini hisobga oluvchi matematik model ishlab chiqilgan hamda obyekt parametrlarini tuzatib baholash usuli taklif qilingan. Holat regulyatori asosidagi boshqaruv tizimi bilan klassik PID-regulyator asosidagi tizimni solishtirma modellashtirish natijalari taklif etilgan yechimning o‘tish jarayonlari sifati, tezkorligi bo‘yicha ustunligini ko‘rsatdi. Olingan natijalar rudani yanchish jarayonining ishonchliligi va energiya samaradorligini oshirishda adaptiv va modelga asoslangan boshqaruv usullarini qo‘llash maqsadga muvofiqligini tasdiqlaydi.

Kalit so‘zlar: avtomatlashtirilgan boshqaruv tizimi, suvli o‘z-o‘zini yanchish tegirmoni, tegirmon-klassifikator majmuasi, yanchish rejimlarini optimallashtirish, adaptiv boshqaruv, boshqariladigan obyektni identifikatsiyalash.

Abstract. The article addresses the development and investigation of an automated control system for the ore grinding process in wet autogenous grinding mills operating in a closed circuit with a spiral classifier. It is shown that the rising cost of energy resources and the high energy intensity of the grinding process make it necessary to optimize the operating modes of the “mill–classifier” complex in order to increase productivity and reduce the specific consumption of electrical energy. Based on an analysis of static characteristics, it is established that maximum technological and energy efficiency is achieved when operating near the critical material hold-up in the mill; however, this operating mode is associated with an increased risk of equipment overload. An approach to the design of an adaptive grinding mode stabilization system is proposed, based on identification of the control object using data from normal operation without conducting active experiments. A mathematical model of the loading subsystem is developed taking into account the effects of disturbances and measurement noise, and a corrected

ISSN 3030-3907

parameter estimation method is proposed. A comparative simulation analysis of a control system based on a state controller and a classical PID controller demonstrates the advantages of the proposed approach in terms of transient response quality, dynamic performance, and disturbance rejection efficiency. The obtained results confirm the feasibility of applying adaptive and model-based control methods to improve the reliability and energy efficiency of the ore grinding process.

Keywords: automated control system, wet autogenous grinding mill, mill-classifier complex, optimization of grinding modes, adaptive control, control object identification.

Введение

Производство черных металлов занимает важное место в экономике страны. Добыча и первичная переработка железистых руд производится на горно-обогатительных комбинатах и является одной из важных ступеней в получении высококачественной продукции в металлургическом производстве. В обогатительном производстве широкое применение получили энергоемкие энергетические установки, наиболее мощными из которых являются мельницы мокрого самоизмельчения, работающие в замкнутом цикле со спиральным классификатором. В настоящее время наблюдается опережающий рост стоимости энергоресурсов по сравнению с ценами на металлопродукцию, что делает особо актуальными задачи максимальной производительности и более эффективного использования ресурсов, в частности электроэнергии. Комплекс «мельница-классификатор» – это достаточно сложный, динамический объект, выход которого зависит от большого числа внешних условий. Выполнение требований к процессу измельчения в целом затруднено действием неконтролируемых возмущений, другим осложняющим фактором является возможность перегруза измельчительного агрегата. Проведённый анализ современного состояния вопроса автоматизации процесса измельчения показывает, что резервы максимизации производительности и минимизации затрат электроэнергии ещё не исчерпаны. Таким образом, прослеживается тенденция к возможности оптимизации процесса измельчения [1-5].

МЕТОДЫ

В этой статье использованы методы системного анализа, математической статистики, математического моделирования, теории принятия решений, методы современной теории систем автоматического управления, численные методы оптимизации подшипников мельницы. Комплекс «мельница - классификатор» - достаточно сложный динамический объект, выход которого зависит от большого числа внешних условий,

ISSN 3030-3907

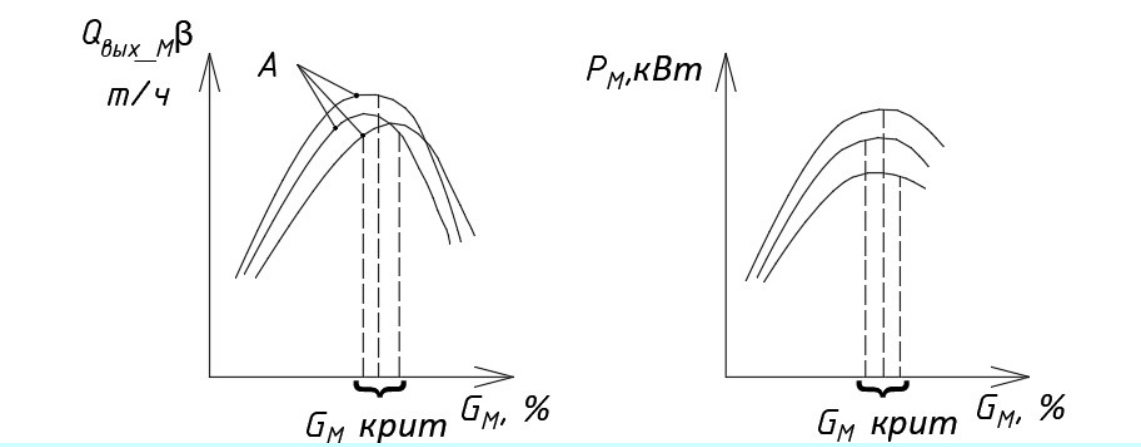
которые могут изменяться произвольным образом, вызывая нежелательные отклонения хода процесса. Выполнение общих требований к процессу измельчения в целом затруднено действием неконтролируемых возмущений. Так как данный объект очень энергоёмкий, то проблемам оптимизации в последние годы уделяется существенное внимание:

- Существуют работы, в которых оптимизация режима измельчения сводится к обеспечению максимальной производительности мельницы и классификатора по готовому классу ($Q_{\text{вых_}}\text{м}\beta_{\text{м}} \rightarrow max, Q_{\text{вых_}}k\beta_k \rightarrow \max$);

- Существуют работы, в которых оптимизация сводится к снижению удельного расхода электроэнергии *(Руд_м —> min).*

Подробный анализ показывает, что фактически это один и тот же режим, потому что, именно режим, в котором наблюдается максимальная производительности по готовому классу является и наиболее энерго-экономным. Производительность мельницы по вновь образованному готовому классу $Q_{\text{вых_}}\text{м}\beta_{\text{м}}$ имеет экстремальную зависимость от запаса материала GM в мельнице (1-рисунок) [6-7].

Такой же вид имеет и характеристика активной мощности привода мельницы $P_м$ от запаса материала G_M (1-рисунок).



1-рисунок. Статические характеристики комплекса «мельница-классификатор»

В данных условиях велика вероятность перегруза комплекса «мельница - классификатор», то есть существует возможность перехода рабочей точки на ниспадающую ветвь статической характеристики. Происходящие по данным причинам серьёзные аварии вызывают длительные простои технологического оборудования, доля которых в общем объёме простоев весьма значительна.

Проблемы поддержания оптимального режима измельчения:

1.Отсутствие метода прямого контроля запаса материала в мельнице, таким образом, ранняя диагностика перегруза невозможна. Существующие косвенные методы противоречивы.

ISSN 3030-3907

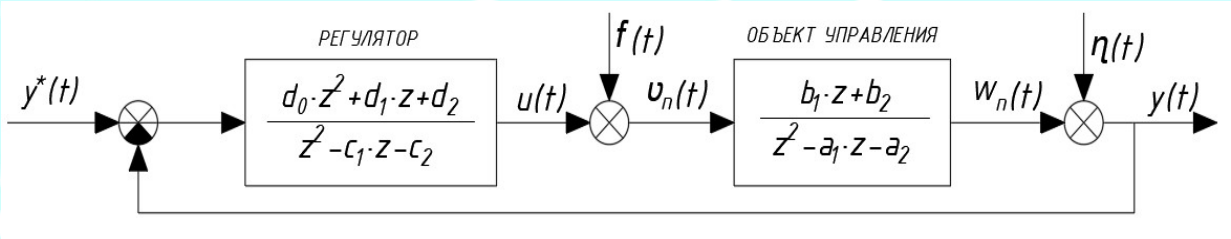
2.Существующая система стабилизации режима измельчения на основе ПИД - регулятора, не позволяет постоянно удерживать режим на подъёмной ветви статической характеристики.

3.Дрейф статических характеристик ввиду изменчивости свойств руды, условий работы измельчительного агрегата, износ футеровки и т.д.

При разработке адаптивной системы стабилизации режима измельчения были решены следующие задачи:

1. Произведена разработка подсистемы идентификации ОУ (объект управления) по данным нормального функционирования в замкнутом контуре регулирования подсистемы загрузки комплекса «мельница-классификатор».

Проведение активных экспериментов для идентификации ОУ, в условиях непрерывного производства не представляется возможным, поэтому идентификация будет производиться только по данным нормального функционирования. Анализ особенностей работы комплекса мельница-классификатор позволил произвести построение структурной схемы подсистемы загрузки (2-рисунок).



2-рисунок. Структурная схема контура загрузки: *f и ή*-возмущающее воздействие и погрешность измерения выхода; *u* и *y*-управляющее воздействие, и результат измерения выхода; a_b b_j - неизвестные параметры объекта.

Уравнение ОУ(объект управления) в матричном виде имеет вид:

$$Y = HA + E + \psi A \qquad (1)$$

где: Y - вектор выхода ОУ; *H*- матрица экспериментальных данных; A - вектор параметров ОУ; E — вектор погрешности измерения; ψ - матрица возмущения и погрешности измерения.

Режим нормального функционирования замкнутой системы управления имеет ряд характерных признаков, существенно усложняющих процедуру идентификации:

- В режиме нормального функционирования задание y изменяется,

как правило, в достаточно узких пределах, а управляющее воздействие и направлено, в основном, на подавление возмущения ***f***. Поэтому диапазон изменения и соизмерим с величиной неконтролируемого возмущения ***f***;

ISSN 3030-3907

- Наличие обратной связи приводит к тому, что сигналы ***u*** и ***y*** связаны не только оператором объекта, но и оператором регулятора, что необходимо учитывать в процедуре идентификации. Такая зависимость может вообще приводить к неидентифицируемому объекту;

- Действие регулятора вызывает корреляцию сигнала ***u*** с возмущением ***f*** и погрешностью измерения ***ή***, а динамика объекта - корреляцию у с предысторией процесса ***f***, что нарушает предпосылки получения несмещенных, состоятельных МНК - оценок параметров объекта в процессе идентификации.

Поэтому МНК оценка:

$$A = (\frac{1}{N} H^T H \acute{} + K)^{-1} \frac{1}{N} H^T Y \quad (2)$$

где: *N* - количество экспериментальных данных; *K*- матрица коррекции МНК оценок, определяется на основе вероятностных характеристик возмущения ***f*** и помехи ***ή***. Характеристики возмущения ***f*** - определены на основе лабораторного анализа твёрдости поступающей на фабрику руды, ***f*** - представляет собой стационарный случайный процесс с известной автокорреляционной функцией; Характеристики помехи ***ή*** - определены на основе паспортных данных измерительного прибора, ***ή***- является последовательностью некоррелированных случайных величин.

Полученную модель ОУ подсистемы загрузки комплекса решено считать пригодной для построения системы стабилизации режима измельчения:

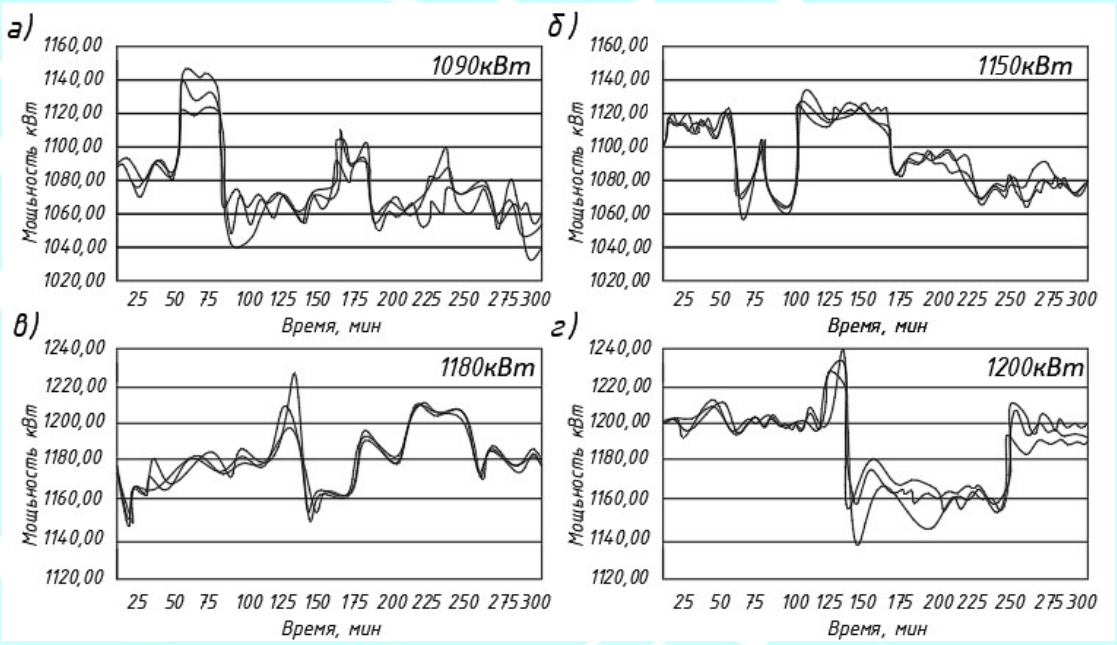
- переходные характеристики модельного процесса **Y_мод** обеспечили достаточно точную аппроксимацию реального процесса **У** (3-рисунок);

- величина среднеквадратичной ошибки регулирования F_1 в десятки раз больше чем величина среднеквадратичной ошибки идентификации F_2:

$$F_1 = \sum_{i=1}^{N} (Y[i] - Y^*)^2 \quad (3)$$

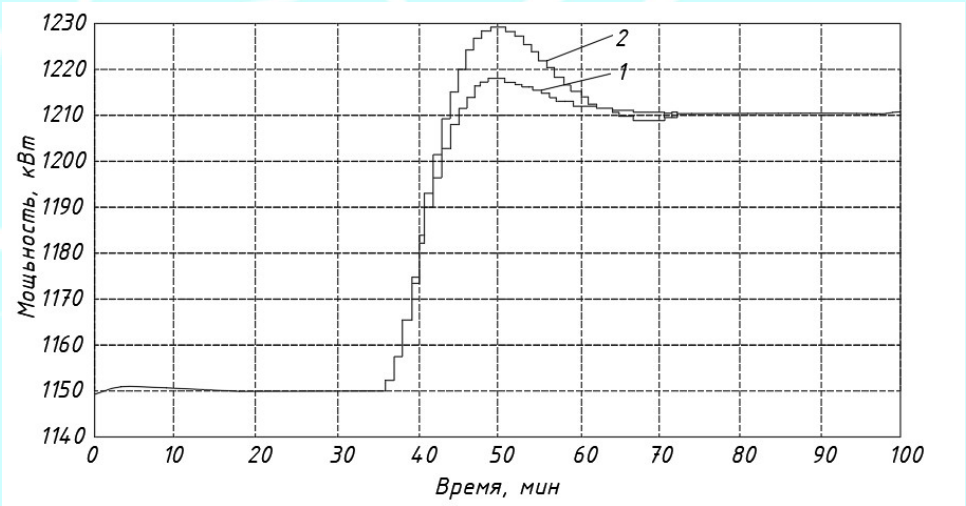
$$F_2 = \sum_{i=1}^{N} (Y[i] - Y_{MOD}[i])^2 \quad (4)$$

ISSN 3030-3907



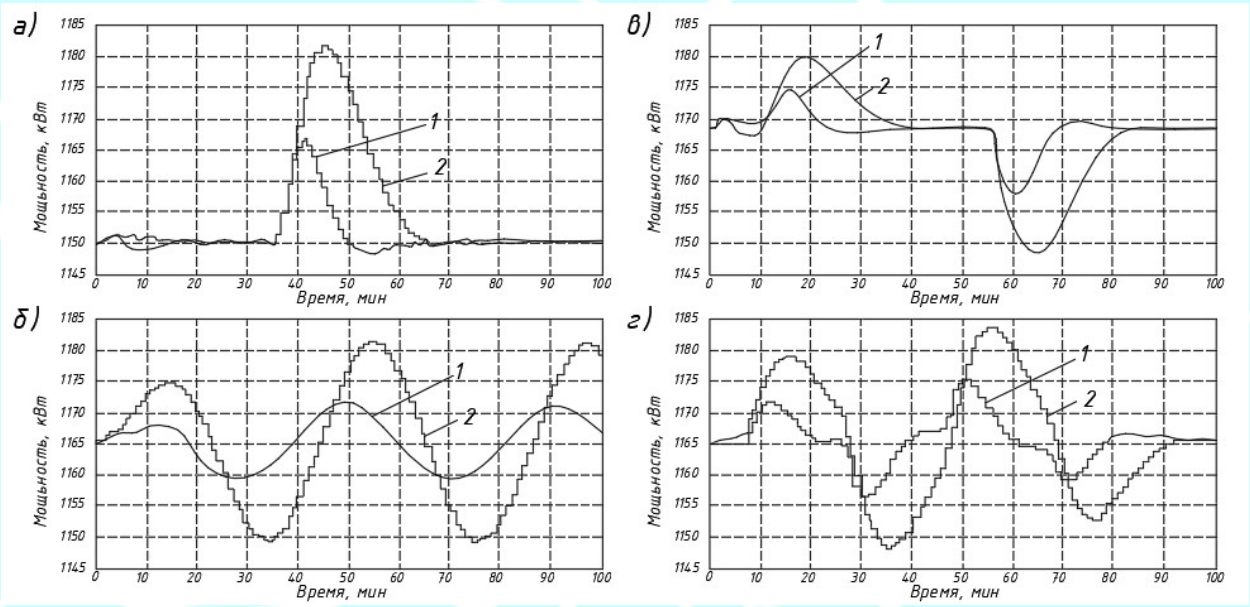
3-рисунок. Графики реальных (Y), модельных (Y_mod), модельных с коррекцией параметров (Y_mod_korr) значений выхода объекта

Проведен сравнительный анализ результатов моделирования разработанной подсистемы на базе регулятора состояния с вариантом подсистемы, построенной на базе классического ПИД-регулятора(4-5-рисунок).



4-рисунок. Переходные характеристики активной мощности системы-загрузки с регулятором состояния (1) и классическим ПИ- регулятором (2) в режиме ступенчатого изменения задания

ISSN 3030-3907



5-рисунок. Переходные характеристики активной мощности системы загрузки с регулятором состояния (1) и классическим ПИД-регулятором (2) в режимах подавлений возмущений: а) №1 при $\acute{\eta} \neq 0$; в) №2 при $\acute{\eta} \neq 0$; г) №3 при $\acute{\eta} \neq 0$; д) №4 при $\acute{\eta} \neq 0$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведённого исследования разработан и обоснован научно-практический подход к повышению эффективности автоматизированного управления процессом измельчения руды в мельницах мокрого самоизмельчения, работающих в замкнутом цикле с классификатором. Установлено, что традиционные системы регулирования, основанные на классических ПИД-регуляторах, не обеспечивают устойчивого удержания оптимального режима работы вблизи критического запаса материала в мельнице, что приводит либо к снижению производительности, либо к повышенному риску перегрузки оборудования. Показано, что максимальная технологическая и энергетическая эффективность процесса достигается при работе на подъёмной ветви статической характеристики комплекса «мельница–классификатор», где обеспечивается минимальный удельный расход электроэнергии при максимальной производительности по готовому классу. Вместе с тем доказано, что эксплуатация в данной области требует применения более совершенных алгоритмов управления и диагностики, способных учитывать изменчивость свойств руды, внешние возмущения и дрейф параметров объекта. Разработанная методика идентификации объекта управления по данным нормального функционирования без проведения активных экспериментов является научно обоснованным и практически реализуемым решением для условий непрерывного промышленного производства. Полученная математическая модель адекватно описывает динамику

ISSN 3030-3907

подсистемы загрузки и может быть использована для синтеза современных систем управления. Результаты сравнительного моделирования показали, что применение регулятора состояния обеспечивает существенное улучшение качества переходных процессов, повышение устойчивости к возмущениям и снижение вероятности перегрузочных режимов по сравнению с классическим ПИД-регулированием. Это подтверждает целесообразность внедрения адаптивных и модельно-ориентированных методов управления в системах автоматизации измельчительных комплексов. В целом, полученные в работе результаты имеют значимую научную новизну и практическую ценность, могут быть использованы при модернизации действующих систем управления на горно-обогатительных предприятиях и служат основой для дальнейших исследований в области интеллектуального и прогнозирующего управления энергоёмкими технологическими процессами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУР.

1. Wills, B. A., & Finch, J. (2015). *Wills' Mineral Processing Technology: An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery.*8th ed., Butterworth-Heinemann..
2. Mukhitdinov, D., Kadirov, Y., Boybutayev, S., Boeva, O., & Babakhonova, U. (2024, February). Simulation and control of ball mills under uncertainty conditions. In Journal of Physics: Conference Series (Vol. 2697, No. 1, p. 012041). IOP Publishing.
3. Mukhitdinov, D., Boybutayev, S., Goziev, O., & Qudratov, J. (2023). Construction of continuous and discrete non-linear prognostic models of the control system for the process of grinding ore materials. In E3S Web of Conferences (Vol. 417, p. 05009). EDP Sciences.
4. Klimpel, R. R. (2017).Automation and optimization of grinding circuits.Minerals Engineering, 109, 104–113.
5. Wei, D., & Craig, I. K. (2018).*Grinding circuit optimization with model predictive control. Control Engineering Practice*, 80, 1–13.
6. Napier-Munn, T. J. (2020).A review of modeling and control strategies for wet grinding circuits.Minerals, 10(2), 110.
7. Ismoilov, M. T., & Rahimov, A. K. (2024).O‘lchash natijalarini signal tebranishlarini LabView dasturi yordamida simulyatsiya qilish. Journal of Advances in Engineering Technology, (4), 90–94.
8. Yuan, Y., Liu, Z., & Chen, Y. (2021). Development of intelligent control system for grinding processes using vibration analysis. International Journal of Mineral Processing, 204, 105384.
9. Baqoyev H. et al. (2023). Automated Algorithmic Systems: Organization and Implementation Guidelines.

ISSN 3030-3907

10. Sbarbaro, D., & Rodríguez, A. (2016).*Advanced control and supervision of mineral grinding circuits.* Springer.

ISSN 3030-3907