



АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ РУДЫ В МЕЛЬНИЦАХ МОКРОГО САМОИЗМЕЛЬЧЕНИЯ

Babaxonova Umida 1[0009-0001-9230-6925], **G'oziyev Olmosjon** 2[0009-0001-5488-4716],
Annaqulov Sherzod 3[0009-0007-9700-7506], **Siddiqova Gulsanam** [0009-0000-5523-4363]

¹Navoiy davlat konchilik va texnologiyalar universiteti, Avtomatlashtirish va boshqaruv kafedrasи
magistranti, E-mail: umidababaxanova98@gmail.com

²Navoiy davlat konchilik va texnologiyalar universiteti, Avtomatlashtirish va boshqaruv kafedrasи
assistenti, E-mail: olmosgoziev@gmail.com

³Navoiy davlat konchilik va texnologiyalar universiteti, Avtomatlashtirish va boshqaruv kafedrasи
katta o'qituvchisi, E-mail: sherzodannaqulov13@gmail.com

³Navoiy davlat konchilik va texnologiyalar universiteti, Avtomatlashtirish va boshqaruv kafedrasи
talabasi

Annotatsiya. Ushbu maqolada ho'l o'z-o'zini maydalash sharoitida ishvlovchi "tegirmon-klassifikator" kompleksining avtomatlashtirilgan boshqaruv tizimini ishlab chiqish va joriy etish masalasi ko'rib chiqiladi. Asosiy e'tibor temir tarkibli rudalarni maydalash jarayonida ishlab chiqarish unumdorligini oshirish hamda elektr energiyasining bir birlik mahsulotga sarfini kamaytirishga qaratilgan. Mualliflar tegirmon to'ldirilish darajasini rulmanlarning tebranish xususiyatlari orqali bilvosita baholashga asoslangan yondashuvni va holat kuzatuvchisiga ega bo'lgan Luenberger kuzatuvchisi bilan birgalikda holat reguluatorini qo'llashni taklif qiladilar. Maqolada boshqaruv tizimining strukturaviy sxemasi, obyektni identifikatsiyalash usullari va maydalash rejimini moslashtiruvchi barqarorlashtirish algoritmlari bayon etilgan. Taqqoslovchi modellashtirish natijalari taklif etilgan tizimning klassik PID boshqaruviga nisbatan samaradorligini tasdiqlaydi. Ishlab chiqilgan tizim jarayonni optimal rejim yaqinida barqaror yuritishga, ortiqcha yuklanish xavfini kamaytirishga va maksimal energiya samaradorligini ta'minlashga imkon beradi.

Kalit so'zlar: maydalashni avtomatlashtirish, ho'l o'z-o'zini maydalash, tegirmon-klassifikator, Luenberger kuzatuvchisi.

Аннотация. В статье рассматривается разработка и реализация автоматизированной системы управления комплексом «мельница-классификатор», функционирующем в условиях мокрого самоизмельчения. Основное внимание уделено проблемам повышения производительности и снижения удельного расхода электроэнергии при измельчении железосодержащих руд. Авторы предлагают подход, основанный на использовании метода косвенной оценки степени заполнения мельницы по вибрационным характеристикам подшипников и применении регулятора состояния с наблюдателем Луенбергера. Представлена структурная схема системы управления, методы идентификации объекта и алгоритмы адаптивной стабилизации режима измельчения. Проведено сравнительное моделирование, подтверждающее эффективность предложенной системы по сравнению с классическим ПИД-регулированием. Разработанная система позволяет обеспечить устойчивое ведение процесса вблизи оптимального режима с минимальным риском перегруза и максимальной энергетической эффективностью.

Ключевые слова: автоматизация измельчения, мокрое самоизмельчение, мельница-классификатор, наблюдатель Луенбергера.

Abstract. This article addresses the development and implementation of an automated control system for the "mill-classifier" complex operating under conditions of wet autogenous grinding. The main focus is on improving productivity and reducing the specific energy consumption during the grinding of iron-containing ores. The authors propose an approach based on indirect estimation of the mill's filling level using vibration characteristics of the bearings, combined with the application of a state regulator with a Luenberger observer. The article presents the control system's structural diagram, object identification methods, and adaptive stabilization algorithms for the grinding process. A comparative simulation study confirms the effectiveness of the proposed system compared to classical PID control. The developed system enables stable operation near the optimal mode with minimal overload risk and maximum energy efficiency.

Keywords: grinding automation, wet autogenous grinding, mill-classifier, Luenberger observer.



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 [1]. 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.

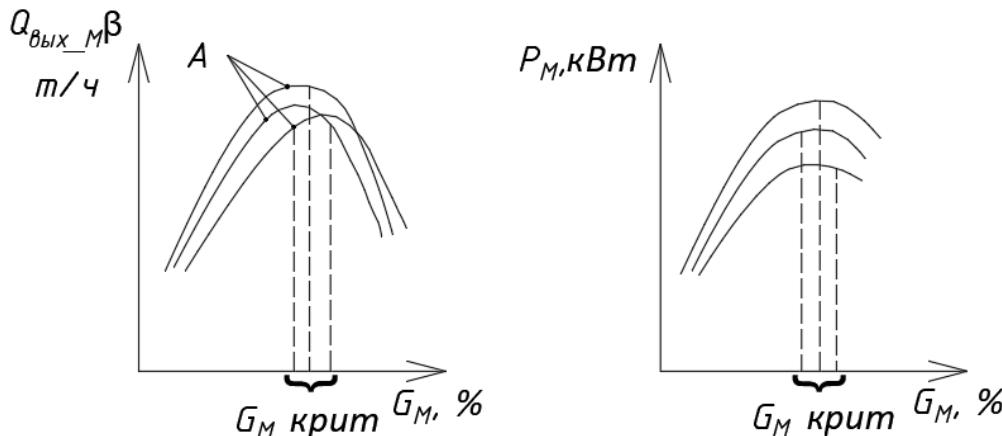
Методы

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, 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 ($Q_{\text{вых_м}} \beta_m \rightarrow \max, Q_{\text{вых_к}} \beta_k \rightarrow \max$) [2];
- существуют работы, в которых оптимизация сводится к снижению удельного расхода электроэнергии ($P_m \rightarrow \min$) [3].

Подробный анализ показывает, что фактически это один и тот же режим, потому что, именно режим, в котором наблюдается максимальная производительность по готовому классу является и наиболее энерго-экономным. Производительность мельницы по вновь образованному готовому классу $Q_{\text{вых_м}} \beta_m$ имеет экстремальную зависимость от запаса материала G_m в мельнице (1-рисунок).

Такой же вид имеет и характеристика активной мощности привода мельницы P_m от запаса материала G_m (1-рисунок) [4].



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 [5]:

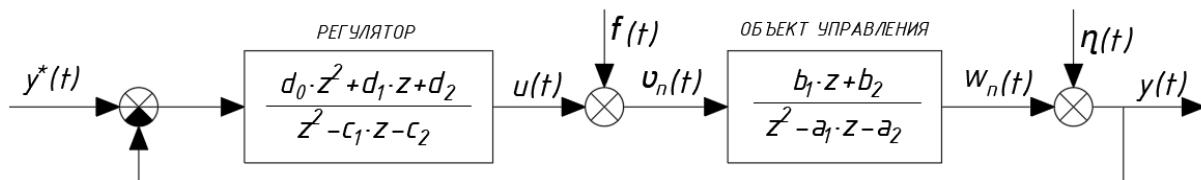
- 1.Отсутствие метода прямого контроля запаса материала в мельнице, таким образом, ранняя диагностика перегруза невозможна. Существующие косвенные методы противоречивы;
- 2.Существующая система стабилизации режима измельчения на основе ПИД - регулятора, не позволяет постоянно удерживать режим на подъёмной 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 [6]:

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 η - возмущающее действие и погрешность измерения выхода; u и y -управляющее воздействие, и результат измерения выхода; a_i , b_j - неизвестные параметры объекта.

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



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

где: Y - вектор выхода ОУ; H - матрица экспериментальных данных; A - вектор параметров ОУ; E - вектор погрешности измерения; ψ - матрица возмущения и погрешности измерения [7].

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

- в режиме нормального функционирования задание у 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 ;
- 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 ϵ , а динамика объекта - корреляцию y с предысторией процесса f , что нарушает предпосылки получения несмещенных, состоятельных МНК - оценок параметров объекта в процессе идентификации.

Поэтому МНК оценка:

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

где: N - количество экспериментальных данных; K - матрица коррекции МНК оценок, определяется на основе вероятностных характеристик возмущения f и помехи ϵ . 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 ϵ - определены на основе паспортных данных измерительного прибора, ϵ - является последовательностью некоррелированных случайных величин [8].

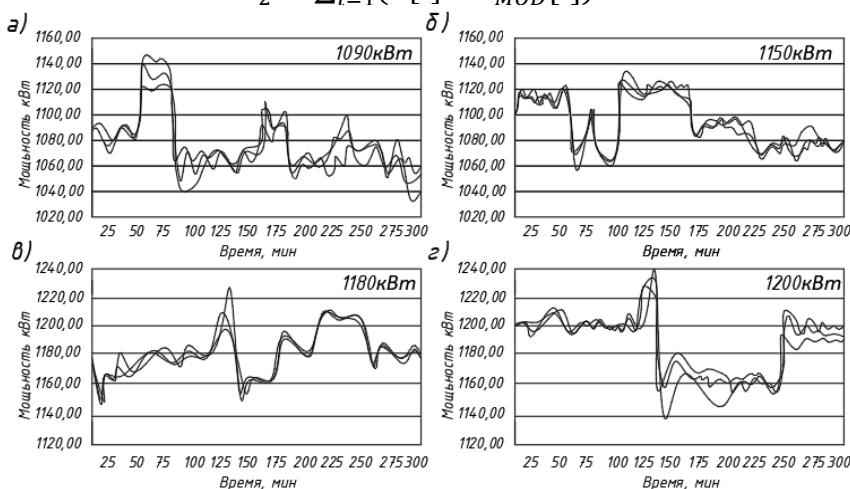
Полученную модель ОУ подсистемы загрузки комплекса решено считать пригодной для построения системы стабилизации режима измельчения [9]:

- переходные характеристики модельного процесса Y_{MOD} обеспечили достаточно точную аппроксимацию реального процесса Y (3-рисунок);

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

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

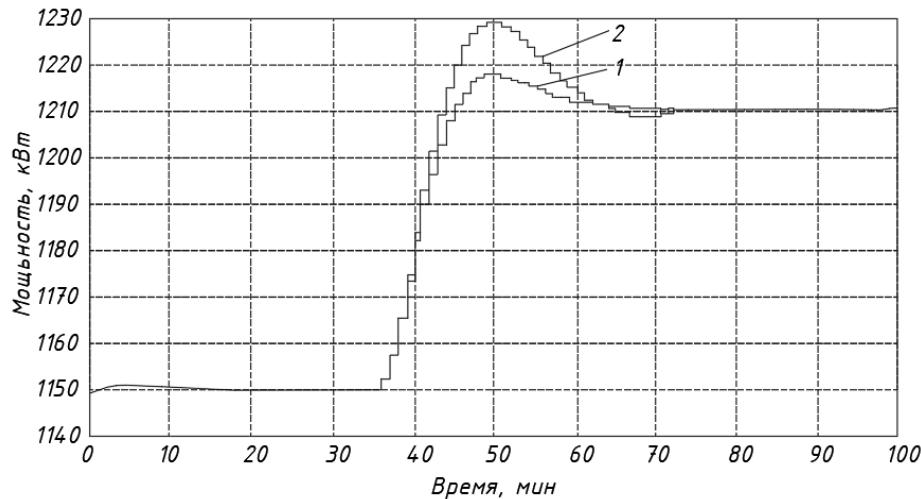
$$F_2 = \sum_{i=1}^N (Y[i] - Y_{MOD}[i])^2 \quad (4)$$



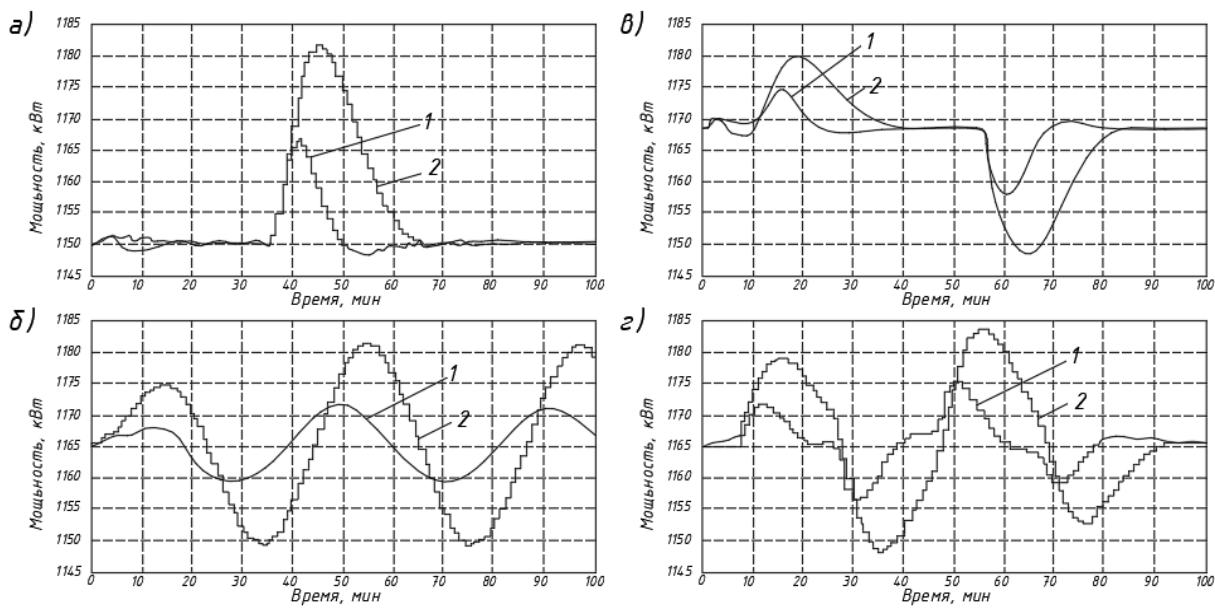
3-рисунок. Графики реальных (Y), модельных (Y_{MOD}), модельных с коррекцией параметров (Y_{mod_corr}) значений выхода объекта



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.



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

Заключения

Решена научно-техническая задача разработки автоматизированной системы управления комплексом «мельница-классификатор», позволяющая с использованием регулирования на основе измерения координат состояния объекта и метода косвенной оценки величины внутри мельничного заполнения на основе вибрации подшипников, максимизировать производительность по готовому классу и минимизировать удельный расход электроэнергии. Основные результаты:



разработан алгоритм идентификации объекта управления подсистемы загрузки комплекса «мельница - классификатор», позволяющий получить несмещённые оценки его параметров. Проведённые исследования показали состоятельность и высокую эффективность полученных оценок;

разработано наблюдаемое устройство, отличающееся от классического варианта наблюдателя Луенбергера возможностью оценки не только координат состояния объекта управления, но и низкочастотной составляющей возмущения;

предложен подход стабилизации режима измельчения комплекса «мельница - классификатор» по активной мощности на основе регулятора состояния с наблюдателем Луенбергера;

разработана адаптивная система стабилизации режима, обеспечивающая максимальную эффективность процесса измельчения;

предложен метод измерения величины внутри мельничного заполнения по сигналу вибрации подшипников для мельницы мокрого самоизмельчения ММС.

Список литератур.

- [1]. Wills B. A., Finch J. Wills' mineral processing technology: an introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery. Butterworth-heinemann, 2015.
- [2]. Mukhitdinov D. et al. Simulation and control of ball mills under uncertainty conditions //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2024. – Т. 2697. – №. 1. – С. 012041.
- [3]. Mukhitdinov D. et al. Construction of continuous and discrete non-linear prognostic models of the control system for the process of grinding ore materials //E3S Web of Conferences. – EDP Sciences, 2023. – Т. 417. – С. 05009.
- [4]. Kliment, 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]. Garcia E. M. P., García E. M. P. Dynamic simulation of industrial grinding circuits: mineral liberation, advanced process control, and real-time optimisation: дис. – Université Laval, 2020.
- [7]. Ismoilov M.T., Rahimov A.K. O'lchash natijalarini signal tebranishlarini Lab View dasturi yordamida simulyatsiya qilishni tahlil qilish //Journal of Advances in Engineering Technology. – 2024. – №. 4. – С. 90-94.
- [8]. Baqoyev H. et al. (2023). Automated Algorithmic Systems: Organization and Implementation Guidelines
- [9]. Sbarbaro, D., & Rodríguez, A. (2016). *Advanced control and supervision of mineral grinding circuits*. Springer.