

ВОПРОСЫ АНАЛИЗА УСТОЙЧИВОСТИ, УПРАВЛЯЕМОСТИ И НАБЛЮДАЕМОСТИ ТОНКОГО ПОМОЛА В ПЛАНЕТАРНОЙ МЕЛЬНИЦЕ

БИГАЛИЕВА А.З. 

Бигалиева Альфия Замировна – PhD, и.о. доцента, Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, г. Караганда, Казахстан

E-mail: bigalievaalfija@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-0136-5402>

Аннотация. Целью данной научной работы является проверка адекватности математической модели проектируемой системы управления по отношению к физическим характеристикам управляемого объекта, а именно процесса тонкого помола в планетарной мельнице. Достоверная модель является основой для разработки эффективной системы автоматического регулирования, способной обеспечить высокую точность и стабильность технологического процесса.

В исследовании проводится анализ таких ключевых свойств, как управляемость и наблюдаемость, которые определяют потенциальные возможности системы управления в заданных условиях эксплуатации. Эти характеристики тесно связаны с устойчивостью и предсказуемостью динамики, что имеет принципиальное значение при работе с техногенным сырьём, например со шлаками медеплавильного производства. Для проведения анализа использованы методы наблюдения, теоретического анализа и синтеза, а также средства математического моделирования MATLAB и Simulink, что позволяет воспроизводить и исследовать поведение системы в различных режимах.

Особое внимание уделено поведению системы при изменении характеристик управляемого процесса - в частности, при варьировании крупности размолотых частиц на выходе. В ходе экспериментов были определены оптимальные параметры, обеспечивающие устойчивую и предсказуемую реакцию системы на внешние возмущения. Это подтверждает практическую применимость модели для построения современных автоматизированных систем управления процессами измельчения.

Полученные результаты обладают не только теоретической, но и прикладной значимостью. Они могут быть использованы для совершенствования алгоритмов управления, повышения надёжности функционирования оборудования, снижения энергозатрат и повышения извлекаемости полезных компонентов из техногенного сырья. Таким образом, представленное исследование закладывает основу для дальнейших разработок в области интеллектуальных систем управления и устойчивого ресурсопользования.

Ключевые слова: система автоматического управления, управляемость, наблюдаемость, устойчивость системы, адекватность модели, моделирование технологического процесса

Введение

В условиях стремительного развития технологий информационные системы становятся неотъемлемой частью процессов управления и повышения эффективности деятельности практически всех отраслей промышленности [1]. Их применение обеспечивает возможность комплексного анализа факторов, влияющих на исследуемый процесс, и выделения среди них ключевых, оказывающих решающее воздействие на конечный результат, что особенно важно для построения интеллектуальных систем управления [2].

Одной из актуальных задач в данной области является оптимизация процессов измельчения техногенного сырья. В настоящей работе в качестве объекта исследования рассматривается промышленный турбулентный измельчитель МПП-04, установленный в г. Караганде (Казахстан) и эксплуатируемый ТОО «КМЗ им. Пархоменко». Данное оборудование широко используется для решения практических задач, связанных с переработкой отходов медеплавильного производства с целью выделения металлической меди, что определяет его высокую значимость для металлургической отрасли.

Согласно исследованиям, проведённым в Испытательной лаборатории инженерного профиля «Комплексное освоение ресурсов минерального сырья» [3], максимальная степень

извлечения металлов из шлаков достигается при тонкости помола в пределах 80...125 мкм. Для обеспечения стабильности процесса измельчения мельница оснащена прибором-гранулометром, предназначенным для непрерывного автоматического контроля гранулометрического состава шлака непосредственно в потоке. Такая система позволяет определять процентное содержание частиц различных классов крупности в реальном времени, отображать данные на дисплее и передавать соответствующие сигналы на регулирующие устройства через каналы связи, что повышает точность и надёжность управления.

В работе [4] представлены результаты серии экспериментов, позволивших определить оптимальные размеры частиц, при которых обеспечивается наиболее эффективное выделение конкреций металлической меди из минеральной части шлаков. На основе математической обработки полученных экспериментальных данных было получено уравнение регрессии, анализ которого позволил установить оптимальные параметры процесса измельчения. Кроме того, исследования показали, что использование объемной деформации минеральной составляющей шлаков и пластической деформации металлических конкреций позволяет практически полностью извлекать металл как из шлаков медеплавильного, так и литейного производств.

Таким образом, актуальность работы определяется необходимостью разработки и совершенствования интеллектуальных систем управления процессом измельчения техногенного сырья, обеспечивающих повышение эффективности переработки и максимальное извлечение ценных компонентов.

Материалы и методы исследования

Одним из ключевых инструментов для исследования и моделирования технологических процессов является математический пакет MATLAB, сформированный как интерактивная вычислительная среда, в основе которой лежит матричный способ представления данных (matrix laboratory - MATLAB). Такая ориентация делает систему особенно удобной для решения прикладных задач, связанных с использованием матричных методов. На сегодняшний день MATLAB активно применяется в промышленности как эффективный инструмент для высокопроизводительных исследований, анализа, разработки и моделирования сложных систем [5].

Благодаря своей структуре MATLAB играет особую роль для специалистов, работающих в области анализа и синтеза динамических объектов, решения задач управления, а также обработки сигналов. Пакет включает широкий спектр встроенных базовых и дополнительных функций, охватывающих ключевые направления современного математического моделирования и инженерных расчетов.

Особое значение в арсенале MATLAB имеет специализированный пакет ****Simulink****, предназначенный для моделирования динамических объектов. Данный инструмент функционирует в непосредственной интеграции с основной частью MATLAB и предоставляет исследователю широкие возможности для построения компьютерных моделей динамических систем. Используя библиотеку стандартных блоков, можно формировать модель исследуемого процесса, проводить поиск положений равновесия и выполнять линеаризацию уравнений относительно этих положений. Simulink обеспечивает проведение имитационного моделирования динамических процессов, визуализацию результатов в графическом виде и передачу вычисленных данных в рабочую среду MATLAB для их дальнейшей обработки и анализа.

Таким образом, связка MATLAB и Simulink представляет собой мощный комплекс инструментов, позволяющий исследовать динамику технологических систем, анализировать их поведение в различных режимах работы и разрабатывать интеллектуальные методы управления.

Результаты и их обсуждение

Анализ устойчивости, управляемости и наблюдаемости системы

Для формализованного представления турбулентного измельчителя как объекта управления необходимо построить его математическую модель. Многочисленные эксперименты [3, 4, 6, 7] показывают, что решение практических задач по управлению качеством помола может быть осуществлено с использованием достаточно грубых моделей, базирующихся на линейном представлении процесса.

В работе [7] представлен процесс построения математической модели для объекта исследования данного проекта, которая имеет следующий вид:

$$H(s) = \frac{141.0s^2 - 1.500s + 2.400}{s^3 + 8.500s^2 + 0.5500s + 0.02600}. \quad (1)$$

Передаточная функция (1) принимается далее в качестве характеристики математической модели в tf-форме:

$$y = H(s)u \quad (2)$$

рассматриваемого объекта управления.

Для подтверждения состоятельности построенной модели (1), (2), прежде всего, найдем корни ее характеристического полинома:

$$s_1 = -8.435, s_{2,3} = -0.03240 \pm j0.04510.$$

Поскольку все три корня находятся в открытой левой полуплоскости, объект управления является асимптотически устойчивым.

Построим переходную характеристику для найденной модели и сравним ее с переходной характеристикой, полученной экспериментально (рисунок 1).

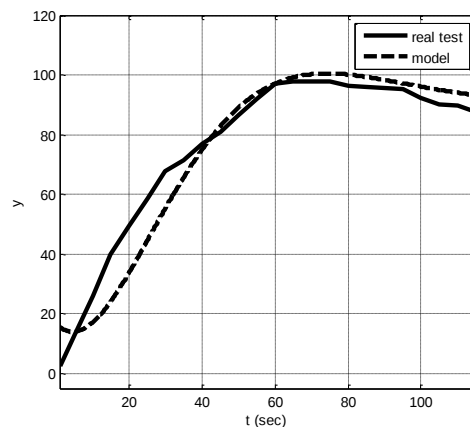


Рисунок 1 – Графики переходных характеристик для эксперимента и для найденной модели (1), (2)

Сравнение свидетельствуют о вполне приемлемом качестве идентификации.

Таким образом, динамика идентифицированной модели (1), (2) в достаточной мере приближена к поведению объекта, наблюдаемого в ходе эксперимента.

С целью проверки модели адекватности по отношению к физической реальности, произведем анализ свойств управляемости и наблюдаемости, характеризующие потенциальные возможности проектируемой системы управления по отношению к объекту управления [8].

Прежде всего находим годограф Найквиста, соответствующая кривая на комплексной

площади показана на рисунке 2.

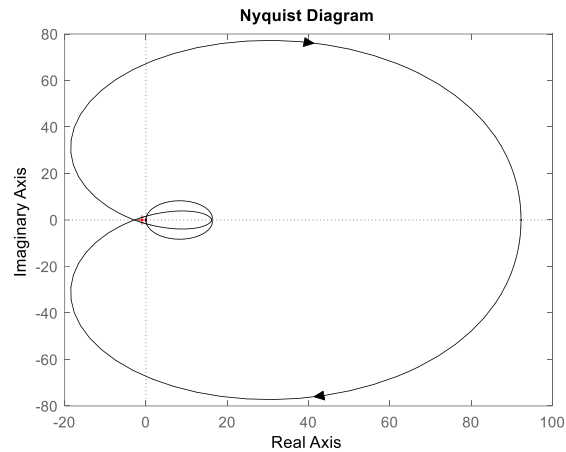


Рисунок 2 – Годограф Найквиста для найденной модели (1), (2)

Далее построим амплитудно-частотную и фазово-частотную характеристики этой системы, а также диаграмму Боде (рисунки 3-5).

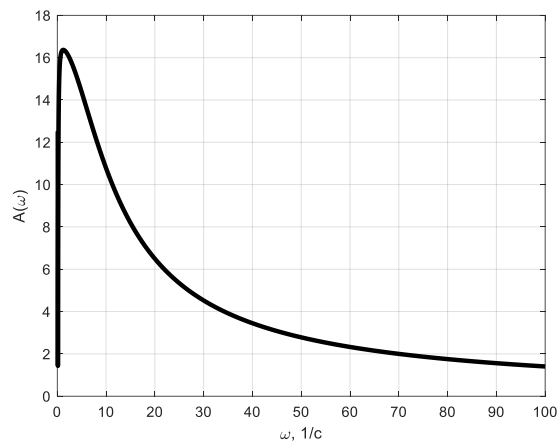


Рисунок 3 – Амплитудно-частотная характеристика для найденной модели (1), (2)

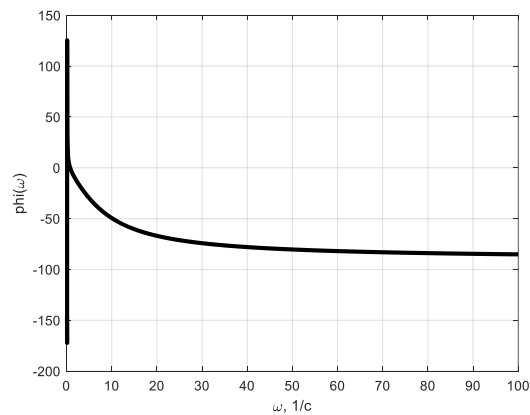


Рисунок 4 – Фазово-частотная характеристика для найденной модели (1), (2)

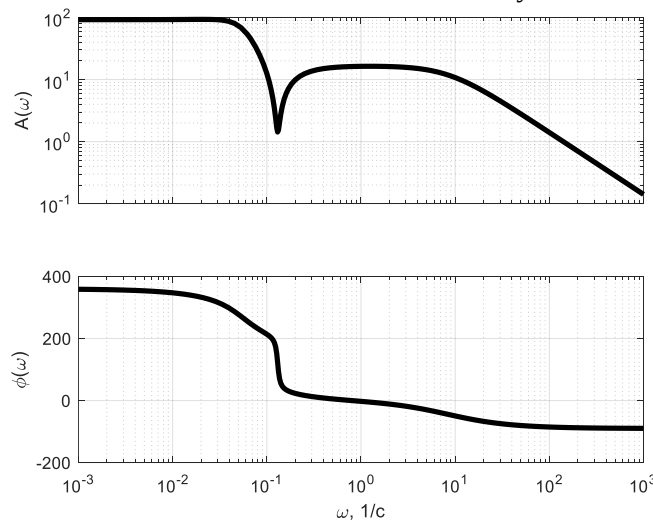


Рисунок 5 – Диаграмма Боде

Система, при изменении частоты ω от $-\infty$ до $+\infty$, не охватывает точку с координатами $(-1, i=0)$.

Полученные результаты позволяют говорить об устойчивости замкнутой системы по амплитудно-фазовой частотной характеристике (АФЧХ).

Все указанные характеристики принято называть характеристиками ЛТИ-системы в частотной области (frequency responses).

Свойства управляемости и наблюдаемости исключительно важны для субъекта управления, поскольку их анализ позволяет оценивать возможность решать обратные задачи динамики для заданного объекта.

Следуя знаменитой теореме Р. Калмана, матрица управляемости равна:

$$\mathbf{Q}_u = \begin{pmatrix} 16 & -0.1360 & 1.1472 \\ 0 & 0.016 & -0.1360 \\ 0 & 0 & 0.0020 \end{pmatrix}$$

$\text{rank } \mathbf{Q}_u = 3$, что говорит об устойчивости системы.

Следуя определению наблюдаемости, матрица наблюдаемости равна:

$$\mathbf{Q}_y = \begin{pmatrix} 8.8125 & -0.0938 & 1.2000 \\ -75.000 & -4.6969 & -1.8330 \\ 632.8031 & 41.0209 & 15.600 \end{pmatrix},$$

$\text{rank } \mathbf{Q}_y = 3$, матрица имеет полный ранг, следовательно, система полностью наблюдаема.

Заключение

Анализ модели показал соответствие условиям и требованиям к характеру функционирования её в заданном режиме. Экспериментально установлены наилучшие параметры устойчивой реакции системы на изменение крупности размолотых частиц на выходе, при возмущении ступенчатыми изменениями неоднородности качества измельчаемого шлака.

Список литературы

1. Душин С.Е., Зотов Н.С., Имаев Д.Х. и др. Теория автоматического управления. – Изд. 2-е, перер. – М.: Высшая школа, 2005. – 567 с.
2. Лазарева О.В., Подкаменный Ю.А. Автоматизированный способ управления комплексом измельчения и классификации алмазосодержащих руд. // Вестник ИрГТУ. – 2014. – №4(87). – С. 128-132.
3. Газалиев А.М., Апачиди Н.К., Федорченко В.И. Разработка технологии и комплекса технических средств извлечения металла из техногенного сырья: отчет о НИР (заключительный). – Караганда: КарГТУ, 2015. – 70 с. – Инв. №0213РК00332.
4. Атанов С.К., Бигалиева А.З. Применение компьютерных технологий для расчёта степени помола сырья на примере планетарной мельницы // Тр. университета. – 2018. – №4. – С. 139-144.
5. Дьяконов В.П. MATLAB. Полный самоучитель. – М.: ДМК Пресс, 2017. – 768 с.
6. Атанов С.К., Бигалиева А.З. Математическая модель процесса помола в планетарной мельнице // Тр. университета. – 2020. – №1. – С. 148-153.
7. Атанов С.К., Бигалиева А.З., Апачиди Н.К., Русак А.В. Вопросы управления процессом тонкого помола в планетарной мельнице // Вестник Санкт-Петербургского университета. – 2020. – Т. 16, №3. – С. 277-292.
8. Веремей Е.И. Среднеквадратичная многоцелевая оптимизация. – СПб.: СПбГУ, 2016. – 407 с.

References

1. Dushin S.E., Zotov N.S., Imaev D.H. i dr. Teoriya avtomaticheskogo upravleniya. – Izd. 2-e, perer. – M.: Vysshaya shkola, 2005. – 567 s.
2. Lazareva O.V., Podkamennyj YU.A. Avtomatizirovannyj sposob upravleniya kompleksom izmel'cheniya i klassifikacii almazosoderzhashchih rud. // Vestnik IrGTU. – 2014. – №4(87). – S. 128-132.
3. Gazaliev A.M., Apachidi N.K., Fedorchenko V.I. Razrabotka tekhnologii i kompleksa tekhnicheskikh sredstv izvlecheniya metalla iz tekhnogennoy syr'ya: otchet o NIR (zaklyuchitel'nyj). – Karaganda: KarGTU, 2015. – 70 s. – Inv. №0213RK00332.
4. Atanov S.K., Bigaliev A.Z. Primenenie komp'yuternykh tekhnologij dlya raschyota stepeni pomola syr'ya na primere planetarnoy mel'nicy // Tr. universiteta. – 2018. – №4. – S. 139-144.
5. D'yakonov V.P. MATLAB. Polnyj samouchitel'. – M.: DMK Press, 2017. – 768 s.
6. Atanov S.K., Bigaliev A.Z. Matematicheskaya model' processa pomola v planetarnoy mel'nice // Tr. universiteta. – 2020. – №1. – S. 148-153.
7. Atanov S.K., Bigaliev A.Z., Apachidi N.K., Rusak A.V. Voprosy upravleniya processom tonkogo pomola v planetarnoy mel'nice // Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. – 2020. – T. 16, №3. – S. 277-292.
8. Veremey E.I. Srednekvadratichnaya mnogocелеvaya optimizaciya. – SPb.: SPbGU, 2016. – 407 s.

ПЛАНЕТАРЛЫҚ ДИРМЕНДЕГІ ҰСАҚ ҰНТАҚТАУДЫҢ ТҰРАҚТЫЛЫҒЫН, БАСҚАРЫЛУЫН ЖӘНЕ БАЙҚАЛУЫН ТАЛДАУ МӘСЕЛЕЛЕРІ

БИГАЛИЕВА А.З. 

Бигалиева Альфия Замировна – PhD, доцент м.а., Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қарағанды қ., Қазақстан

E-mail: bigalievaaalfija@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-0136-5402>

Аңдатпа. Бұл ғылыми жұмыстың мақсаты – жобаланған басқару жүйесінің математикалық моделінің басқарылатын объектінің физикалық сипаттамаларына, атап айтқанда планетарлық диірмендегі майдалау процесіне сәйкестігін тексеру. Сенімді модель технологиялық процестің жоғары дәлдігі мен тұрақтылығын қамтамасыз ете алатын тиімді автоматты реттеу жүйесін құрудың негізі болып табылады.

Зерттеуде басқарылғыштық пен бақыланғыштық сияқты негізгі қасиеттерге талдау жүргізіледі. Олар берілген пайдалану шарттарында басқару жүйесінің әлеуетті мүмкіндіктерін анықтайды. Бұл сипаттамалар жүйе динамикасының тұрақтылығы мен болжамдылығымен тығыз байланысты, ал бұл техногендік шикізатпен, мысалы, мыс қорыту шлактарымен жұмыс істегенде ерекше маңызды. Талдау жүргізу үшін бақылау әдістері, теориялық талдау мен синтез тәсілдері, сондай-ақ MATLAB және Simulink математикалық модельдеу құралдары пайдаланылды, бұл жүйенің түрлі режимдердегі мінез-құлқын қайта жасап, зерттеуге мүмкіндік берді.

Зерттеуде басқарылатын процестің сипаттамалары өзгергендегі жүйенің әрекетіне ерекше назар аударылды – атап айтқанда, шығыстағы ұнтақталған бөлшектердің ірілігі өзгерген кезде. Эксперименттер барысында сыртқы әсерлерге жүйенің тұрақты әрі болжамды реакциясын қамтамасыз ететін оңтайлы параметрлер анықталды. Бұл модельдің заманауи автоматтандырылған майдалау процестерін басқару жүйелерін құруға практикалық тұрғыдан қолдануға болатындығын дәлелдейді.

Алынған нәтижелер тек теориялық емес, сонымен қатар қолданбалы маңызға ие. Олар басқару алгоритмдерін жетілдіруге, жабдық жұмысының сенімділігін арттыруға, энергия шығындарын азайтуға және техногендік шикізаттан пайдалы компоненттердің алынуын жақсартуға мүмкіндік береді. Осылайша, ұсынылған зерттеу интеллектуалды басқару жүйелері мен орнықты ресурс пайдалану саласында әрі қарайғы әзірлемелерге негіз қалайды.

Түйін сөздер: автоматты басқару жүйесі, басқару, бақылау, жүйенің тұрақтылығы, модельдің сәйкестігі, технологиялық процесті модельдеу

ISSUES OF STABILITY ANALYSIS, CONTROLLABILITY AND OBSERVABILITY OF FINE GRINDING IN A PLANETARY MILL

BIGALIEVA A.Z. 

Bigaliev Alfiya Zamirovna – PhD, acting associate professor, Abylkas Saginov Karaganda technical university, Karaganda, Kazakhstan

E-mail: bigalievaaalfija@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-0136-5402>

Abstract. The aim of this scientific work is to verify the adequacy of the mathematical model of the designed control system in relation to the physical characteristics of the controlled object, namely the process of fine grinding in a planetary mill. A reliable model serves as the foundation for the development of an effective automatic control system capable of ensuring high accuracy and stability of the technological process.

The study analyzes such key properties as controllability and observability, which determine the potential capabilities of the control system under given operating conditions. These characteristics are closely related to the stability and predictability of system dynamics, which is of fundamental importance when working with technogenic raw materials, such as copper-smelting slags. For the analysis, observation methods, theoretical analysis and synthesis, as well as MATLAB and Simulink mathematical modeling tools were used, allowing the reproduction and study of system behavior in various modes.

Special attention is paid to the behavior of the system under changes in the characteristics of the controlled process-in particular, when varying the particle size of the ground material at the output. During the experiments, optimal parameters were determined that ensure stable and predictable system response to external disturbances. This confirms the practical applicability of the model for building modern automated grinding process control systems.

The obtained results have not only theoretical but also practical significance. They can be used to improve control algorithms, increase the reliability of equipment operation, reduce energy consumption, and enhance the recovery of valuable components from technogenic raw materials. Thus, the presented research lays the foundation for further developments in the field of intelligent control systems and sustainable resource management.

Key words: automatic control system, controllability, observability, system stability, model adequacy, process modeling