

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

кандидата технических наук, доцента Майстренко Андрея Васильевича
на диссертацию Закамалдина Андрея Андреевича

«Оптимальное управление процессом измельчения в шаровой мельнице с применением прогнозирующей модели», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.3.3 – «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами»

1. Актуальность темы исследования

Шаровые мельницы широко распространены в процессах обогащения полезных ископаемых. Размер частиц, получаемых после измельчения в мельнице, существенно влияет на количество и качество извлечения полезного минерала. Также контуры измельчения составляют весомую долю от общего потребления электроэнергии обогатительной фабрики. Повышение эффективности передела измельчения руды является одним из приоритетов в развитии многих стран мира. Достижение максимально эффективной работы шаровой мельницы возможно в случаях оптимизации конструкции применяемого оборудования, оптимизации технологической схемы и режимов измельчения, а также при оптимальном управлении технологическим процессом.

Один из важнейших параметров технологического процесса измельчения является объемное заполнение мельницы измельчаемым материалом. Известно, что для максимальной эффективности следует поддерживать данный параметр на оптимальном уровне. Однако из-за имеющихся нелинейностей и значительных корреляций между переменными процесса на практике оптимальное и при этом надежное управление этим параметром составляет сложную задачу. Поэтому разработка системы автоматического управления заполнением мельницей, учитывая ограничения и нестабильные режимы эксплуатации, считается актуальной проблемой, решение которой способно улучшить энергетические и качественные показатели при измельчении руды.

2. Краткий обзор содержания диссертационной работы

Диссертационная работа включает введение, три главы, заключение, список литературы и 4 приложения.

Во введении представлено обоснование актуальности диссертационной работы, обозначены цель и задачи исследования, показана научная новизна, практическая и теоретическая ценность, представлены положения, выносимые на защиту. Целью работы является повышение производительности мельницы по руде, не допуская перегрузки мельницы и учитывая влияние внешних возмущений на процесс измельчения.

В первой главе рассмотрены различные современные технологии для управления технологическим процессом измельчения апатито-нефелиновых руд, выделены существующие способы решения актуальных проблем эффективности управления циклом помола. Приводится подробное описание применения метода управления с прогнозирующей моделью (MPC) в решениях аналогичных задач, а также обзор основных периодов в истории развития MPC. Показано, что для решения выделенных проблем управления загрузкой мельницы и контроля за перегрузом, существующих на отечественных горно-обогатительных комбинатах, необходима разработка системы

управления на основе успешных мировых практик MPC. Обоснована актуальность применимости MPC в промышленности РФ.

Во второй главе автором рассмотрены основные особенности технологии измельчения апатито-нефелиновых руд в шаровых мельницах. Приняты упрощения, которыми можно пренебречь при математическом описании технологического процесса измельчения. Построена имитационная модель замкнутого цикла измельчения в мельнице барабанного типа с разгрузкой через торцевую решетку в программной среде Matlab. Модель разбита на структурные элементы: модели отдельных технологических агрегатов, интегральную вероятностную модель гранулометрического состава измельчаемого продукта, нейросетевая модель вибрации мельницы, модель параметров нестационарности оборудования (износ футеровки и шаров). Адекватность моделирования проверена на данных, снятых с реального объекта. В конце главы сделаны выводы и приведены оценки состоятельности разработанной модели.

В третьей главе предложена новая САУ плотности на классификацию и уровня в зумпфе слива мельницы, где в качестве альтернативы ПИД-регуляторам применен подход многопараметрического и адаптивного MPC. Получены переходные процессы по каналам управления и возмущения для пяти рассматриваемых стратегий управления. Выполнен анализ, на основании которого стратегия с многопараметрическим адаптивным MPC показала лучшее качество регулирования, уменьшив интегральную ошибку более чем в 2 раза. Предложена новая САУ внутримельничным заполнением материалом шаровой мельницы с применением MPC и наблюдателя возмущающих воздействий (MPC-DOB). Проведено тестирование системы управления на лабораторной установке, где в качестве объекта выступала модель мельницы в Simulink, а система управления была реализована на ПЛК. MPC-DOB показал эффективность по отношению к ПИД и MPC при синусоидальных и ступенчатых возмущениях сократив относительное среднеквадратическое отклонение на 4-7%. Совместное применение MPC-DOB и виртуального анализатора веса материала в мельнице позволило повысить производительность измельчения на 1% и улучшить качество стабилизации вибрации мельницы в режиме функциональной неустойчивости. Разработано алгоритмическое и программное обеспечение регулятора MPC-DOB.

В заключении представлены основные результаты и выводы по диссертации.

Приложения содержат листинг кода Matlab, примененного для линеаризации прогнозирующей модели MPC регулятора, проект программного обеспечения регулятора MPC с наблюдателем возмущений для ПЛК на языках стандарта МЭК 61131-3, а также акты внедрения научной работы на ООО «НПО ВЭСТ» и в учебный процесс Национального исследовательского Томского политехнического университета.

3. Научная новизна полученных результатов

Соискателем определены следующие формулировки научной новизны:

- 1) предложена новая математическая модель замкнутого цикла мокрого измельчения в мельнице барабанного типа с разгрузкой через торцевую решетку. Модель предназначена для разработки новых систем автоматического регулирования плотностью пульпы на классификацию и автоматического управления загрузкой мельницы и их отладки на режимах работы мельницы близких к перегрузу. Модель отличается использованием нейросетевой модели вибрации разгрузочной цапфы

мельницы и позволяет осуществлять контроль перегруза мельницы рудой по расчетному параметру массы материала в мельнице;

- 2) предложена новая концепция управления для повышения производительности мельницы по руде, снижения колебаний управляемых параметров, экономии электроэнергии, избегая перегрузки мельницы, и отличающаяся от систем усовершенствованного управления значительно более низкой стоимостью;
- 3) предложены новые решения для АСУТП измельчения, отличающиеся от традиционных АСУТП применением на уровне ПЛК регуляторов с диспешной прогнозирующей моделью и наблюдателем возмущений.

4. Практическая значимость результатов работы

Полученные результаты исследований имеют несомненную практическую значимость, которая обусловлена тем, что разработанный функциональный блок регулятора с прогнозирующей моделью применим в типовых промышленных ПЛК, о чем свидетельствует свидетельство о регистрации программы для ЭВМ. Полученные решения для систем автоматического управления и регулирования могут быть применены с целью повышения производительности и устойчивости технологического процесса измельчения в шаровой мельнице. Свидетельством практической значимости проведенных соискателем исследований является акт о внедрении, полученный от компании ООО «НПО ВЭСТ» и приложенный к диссертации.

5. Достоверность полученных результатов

Достоверность полученных результатов и выводов обеспечена корректностью постановки задачи, полнотой исходных данных, строгостью выполнения используемых методов моделирования в программной среде Matlab, тестированием алгоритмов на типовом промышленном программируемом логическом контроллере, непротиворечивостью результатов моделирования с данными, снятыми с реального технологического процесса, и результатами и выводами других аналогичных исследований.

6. Соответствие диссертации представленной специальности

Объектом исследования диссертации Закамалдина Андрея Андреевича является технологический процесс измельчения в шаровой барабанной мельнице с разгрузкой через торцевую решетку, проходимый по замкнутому циклу. Диссертация соответствует п. 9 и 18 паспорта специальности 2.3.3 «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами». В работе представлено математическое обеспечение и программная реализация системы управления мельницей на языках стандарта МЭК 61131-3 (п. 9). В ходе проведения исследований была разработана модель мельницы для синтеза оптимальной системы стабилизации объемного заполнения мельницы измельчаемым материалом, что соответствует п. 18 паспорта специальности.

7. Подтверждение опубликования основных результатов диссертации

Основные результаты, полученные в диссертационной работе, опубликованы в 8 печатных работах, 2 из которых опубликованы в изданиях, входящих в международную базу тестирования Scopus, 2 – в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК, 3 – в тезисах докладов, получено 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Считаю, что основное содержание диссертации, ее основные научные положения и практические результаты достаточно полно отражены в публикациях автора.

8. По диссертационной работе имеются следующие замечания.

- 1) Хотелось бы увидеть в работе важную на мой взгляд оценку влияния предложенного способа управления мельницей на качество измельчения. В работе имеется модель гранулометрического распределения измельчаемого материала, следовало привести результаты сравнения рассмотренных способов управления, например, по содержанию характерного класса крупности на выходе из мельницы, используя вышеупомянутую модель. Это бы улучшило качество оценки результатов.
- 2) Применение виртуального анализатора веса материала в мельнице представляется интересным, однако существуют и методы прямого измерения веса мельницы тензометрическими датчиками, установленными в составе коренных подшипников мельницы. Желательно было бы показать в работе в каких случаях следует применить виртуальный анализатор, а в каких лучше ограничиться датчиком.
- 3) Для разработанных систем управления САР и САУ с прогнозирующим регулятором возникнут сложности при настройке и эксплуатации на практике из-за большого количества коэффициентов и настроек (стр. 99, 101, 102, 111). Обычно к таким системам уместна методика настройки параметров, которая в диссертации четко не выделяется.
- 4) Проблема недостатка производительности ПЛК для решения задачи оптимизации регулятора MPC в реальном масштабе времени, как говорится на стр. 117, актуальна, но тем не менее задача решена на ПЛК. В таком случае не хватает выводов по требованиям к производительности ПЛК для данного решения.

9. Заключение

Отмеченные недостатки не снижают качество исследования и не влияют на полученные конечные результаты диссертационной работы. Диссертация Закамалдина Андрея Андреевича представляет собой законченную квалификационную работу, в которой достигнуты важные научные и практические результаты.

Диссертационная работа соответствует требованиям п.9 «Положение о присуждении ученых степеней», предъявляемых к кандидатским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.3.3 «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами».

Официальный оппонент, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры компьютерных систем в управлении и проектировании Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники

Майстренко Андрей Васильевич

« 21 » ноября 2022 г.

Почтовый адрес: 634050, г. Томск, ул. Ленинградская, 40

Телефон: 8(471)258-71-05

Электронная почта: andrei.v.maistrenko@tsur.ru



Подпись *Майстренко А.В.*
УДОСТОВЕРЯЮ
ученый секретарь
Е.В. Прокопчук