

## ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

доктора технических наук, профессора

Бобырь Максима Владимировича

на диссертационную работу Закамалдина Андрея Андреевича «Оптимальное управление процессом измельчения в шаровой мельнице с применением прогнозирующей модели» по специальности 2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами

### Актуальность темы диссертации

В горно-обогатительной отрасли распространены процедуры дробления руды до размеров определенной крупности. В зависимости от стадии дробления применяются соответствующие агрегаты, так, для конечной стадии дробления – измельчения, применимы шаровые мельницы. При измельчении мокрым способом, чтобы получить максимальную эффективность следует поддерживать заполнение мельницы измельчаемым материалом на оптимальном уровне. Задача поддержания этого оптимального уровня настолько сложна, что приходится отступать от оптимума из-за влияния неконтролируемых изменений параметров сырья. Это может привести к перегрузке мельницы и остановке технологической цепочки. Поэтому чтобы мельница не перегружалась эксплуатация ведется не на максимальной производительности по руде. Применяемые в настоящее время методы управления мельницей на основе экспертных оценок, ПИД-законов регулирования и др. не позволяют существенно улучшить результаты. В этом смысле задача оптимального управления шаровой мельницей остается важной и открытой.

Целью работы является повышение производительности мельницы по руде, не допуская перегрузки мельницы и учитывая влияние внешних возмущений на процесс измельчения.

Объектом исследования диссертации Закамалдина Андрея Андреевича является технологический процесс измельчения в шаровой барабанной мельнице с разгрузкой через торцевую решетку, проходимый по замкнутому циклу.

### Новые научные положения, сформированные в диссертации:

1. Использование предложенной математической модели технологического процесса измельчения в замкнутом цикле с применением нейронных сетей и принятых допущений позволяет достичь повторение

поведения реального процесса с точностью более 70 % по критерию на основе нормированной среднеквадратичной ошибки.

2. Применение предложенной структуры АСУТП на базе регуляторов с прогнозирующей моделью для управления комплексом измельчения в шаровой мельнице с разгрузкой через решетку, которая включает в себя новые САУ уровня пульпы в зумпфе (емкости) слива мельницы и плотности пульпы на классификацию, САУ внутримельничным заполнением материалом с возможностью контроля за перегрузом мельницы рудой, позволяет достичь повышения производительности передела измельчения по руде до 3 %.

3. Алгоритмическое и программное обеспечение многопараметрического регулятора с прогнозирующей моделью и наблюдателем возмущений для реализации САУ и САР на типовом ПЛК АСУТП секции измельчения позволяют снизить колебания управляемых параметров, уменьшив интегральную ошибку регулирования более чем в 2 раза, сократить относительное среднеквадратическое отклонение (RSD) на 4-7 % при синусоидальных и постоянных внешних возмущениях по отношению к типовым каскадным контурам ПИД-регулирования.

#### Практическая значимость результатов работы

В приложении диссертации имеется акт о внедрении результатов работы в ПЛК, серийно выпускаемый в компании ООО «НПО ВЭСТ», поэтому практическая значимость результатов работы не вызывает сомнения. Разработанный программный код регулятора с прогнозирующей моделью применим в микропроцессорных системах, о чем свидетельствуют свидетельства о регистрации программы. Также разработанные решения имеют перспективу дальнейшего масштабирования на производствах, где актуальна задача управления шаровой мельницей, для повышения производительности и устойчивости технологического процесса измельчения и уменьшения затрат электроэнергии.

#### Достоверность полученных результатов

Достоверность полученных результатов обеспечена строгостью выполнения используемых методов моделирования в программном пакете Matlab и на специально разработанном экспериментальном стенде, непротиворечивостью с данными, полученными с реального оборудования, результатами и выводами других аналогичных исследований.

## Содержание диссертационной работы

В состав диссертации входят введение, три главы, заключение и список литературы из 134 наименований. Полный объем диссертации составляет 179 страниц, включая 50 рисунков, 18 таблиц и 4 приложения.

**Во введении** обоснована актуальность диссертационной работы, сформулирована цель, поставлены задачи исследования, показана научная новизна и практическая ценность, выполненных исследований, представлены основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** рассмотрены современные технологии АСУТП в горно-обогатительной промышленности, проанализированы актуальные проблемы АСУТП секций измельчения апатито-нефелиновых обогатительных фабрик и недостатки существующих методов их решения. Приведен содержательный обзор технологии управления с прогнозирующей моделью (МРС), которая будет использована в работе для усовершенствования АСУТП измельчения. Рассмотрены основные периоды в истории теоретического и практического развития МРС. В конце главы показана целесообразность и необходимость внедрения методов МРС в промышленности РФ и поставлены задачи, которые диссертант планирует решить.

**Во второй главе** рассматриваются особенности технологического процесса измельчения апатито-нефелиновых руд и математическое моделирование процесса в целом и структурных элементов по отдельности. Отдельно проводится проверка модели вибрации мельницы, построенной с помощью нейронной сети, на данных снятых с промышленного объекта. Системная модель замкнутого цикла мокрого измельчения в мельнице барабанного типа с разгрузкой через торцевую решетку протестирована методом имитационного моделирования в среде Matlab. Результаты имитационного моделирования сравниваются с данными, снятыми с объекта, который является прототипом в работе. В конце главы сделаны выводы и приведены оценки состоятельности разработанной модели.

**В третьей главе** предложено новое решение для САР стабилизации параметров уровня и плотности на классификацию в задачах измельчения. Далее получено графическое и статистическое сравнение, которое показывает, что решение САР с применением МРС превосходит стандартное ПИД-регулирование. Разработана новая САУ внутримельничным заполнением шаровой мельницы, отличающаяся использованием МРС с наблюдателем возмущений (DOB), виртуального анализатора (ВА), который позволяет

прогнозировать вес материала в мельнице, контролировать перегруз и формировать ограничения для MPC. Тестирование САУ проведено с использованием ПЛК Schneider Electric в реальном времени в контуре с Simulink-моделью. Проведено моделирование работы САУ в режиме близкому к перегрузу. Показано, что применение MPC-DOB+VA позволило повысить на 1 % среднюю производительность. Показано, что метод реализуем на ПЛК. Разработано алгоритмическое и программное обеспечение для регулятора MPC-DOB, разработана функциональная блок-схема алгоритма для реализации на ПЛК, программный код на языках программирования МЭК 61131-3. В конце главы представлены результаты проведенного исследования оптимального управления шаровой мельницей.

#### Подтверждение опубликования основных результатов диссертации

Основные результаты, полученные в диссертационной работе, опубликованы в 8 печатных работах, из них 2 в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК, 2 публикации проиндексированы в базе Scopus и WoS; 3 публикаций в тезисах докладов; 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

#### Замечания по диссертационной работе:

1. В тексте диссертации встречаются неудачные выражения и формулировки, пунктуационные ошибки. На рисунке 3.1 изображен блок линейной оптимизации, а в описании речь о квадратичном программировании. На рисунке 3.12 желательна расшифровка  $R(k)$ ,  $U_{MPC}(k)$ ,  $U(k)$ ,  $Y(k)$ ,  $G_L(k)$ ,  $G_R(k)$ ,  $k$ . В формуле 3.45 желательна расшифровка  $G_n(s)$ ,  $g_n(s)$ .
2. В формуле 3.30 в первой переменной индекс "i" лишний, т.к. интегрирование по непрерывной переменной  $y(t)$ , а вторая переменная - установленный (постоянный) параметр, должна быть без (t). Для формулы 3.31 переменная  $y$  - дискретна, поэтому должна быть с индексом, но без (t).
3. Автором при анализе существующих технологий управления с прогнозирующей моделью (стр. 36) говорится о том, что уже есть реализации MPC на ПЛК. В чем принципиальное отличие и ценность полученной автором реализации в диссертации не сказано.
4. Предложенная структура (рис. 3.4, 3.5, 3.11) управления подойдет только для мельницы с тем же набором оборудования и КИПиА, что и рассмотрены в работе, что ограничивает полезность данного решения для применения на других схемах измельчения.

Работа отвечает требованиям п. 9-11, 13, 14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 № 842 (ред. от 26.09.2022), предъявляемых к кандидатским диссертациям по специальности 2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами, а её автор, Закамалдин Андрей Андреевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук.

Официальный оппонент  
доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры вычислительной техники  
ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет»

Максим Владимирович Бобырь

« 02 » ноября 2022 г.



Подпись  
устанавливаю  
Специалист по кадрам

Бобырь М.В.

И. В. Шоломостова

Контактные данные:

ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет».

Адрес: 305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94.

Тел.: (4712) 58-71-05.

E-mail: max\_bobyry@mail.ru

Научная специальность – 05.13.06 Автоматизация и управление технологическими процессами и производства (технические науки)