

«УТВЕРЖДАЮ»

Ректор ФГБОУ ВО «Кузбасский

государственный технический  
университет имени Т.Ф. Горбачёва»,

кандидат физико-математических  
наук, доцент

Яковлев А.Н.

«15/11» ноября 2022 г.

## О Т З Ы В

ведущей организации – ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева» на диссертационную работу Закамалдина Андрея Андреевича «Оптимальное управление процессом измельчения в шаровой мельнице с применением прогнозирующей модели», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности по специальности 2.3.3 – «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами»

### I. Актуальность темы диссертации

Передел измельчения в схемах обогащения полезных ископаемых является наиболее энергоемким. Перспектива сделать производство более энергоэффективным всегда считалась актуальной. Ко всему прочему, из-за особенностей мокрого измельчения в барабанных мельницах энергоэффективность достигается повышением производительности по руде. Зачастую именно повышение производительности является приоритетной целью. Данные цели достижимы в режиме эксплуатации мельницы, когда ее заполнение материалом поддерживается на оптимальном уровне. Также отмечается, что оптимальное управление позволяет продлить срок службы футеровки мельницы. Однако такое управление считается сложной задачей из-за проблемы контроля параметра заполнения мельницей и проблемы управления этим параметром в режиме высокой производительности мельницы из-за возможной ее перегрузки.

Применение современных систем усовершенствованного управления (АРС) позволяет решить проблему управления мельницей в режимах функциональной неустойчивости, не допуская перегрузки. Так же не менее важным считается устойчивость таких систем к внешним изменениям влажности руды. Системы АРС отличаются высокой стоимостью и сложностью в эксплуатации, так как требуют особых знаний от персонала. Вендоры АРС - это мировые лидеры на рынке промышленной автоматизации, что еще более усложняет их потенциальное применение в настоящее время в отечественной промышленности.

Также остро стоит решение проблемы контроля параметра внутримельничного заполнения, поскольку продукты, предлагаемые российским производителем, на рынке ещё себя не зарекомендовали. Поэтому решения этой проблемы тоже следует прорабатывать.

Богатство территории РФ минеральными ископаемыми определяет ценность и перспективы исследования в области оптимального управления мельницей.

## II. Научная новизна и основные результаты исследований

Научная новизна диссертации заключается в следующем:

1. Разработана математическая модель замкнутого цикла измельчения в шаровой мельнице, отличающаяся использованием нейросетевой модели вибрации разгрузочной цапфы мельницы и позволяющая осуществлять контроль перегруза мельницы рудой по расчетному параметру массы материала в мельнице;
2. Предложена концепция управления для повышения производительности мельницы по руде, избегая перегрузки мельницы, отличающаяся от аналогичных систем управления значительно более низкой стоимостью;
3. Предложены новые решения для АСУТП измельчения, отличающиеся от традиционных АСУТП применением на уровне ПЛК регуляторов с линейной прогнозирующей моделью и наблюдателем возмущений.

В целом научную новизну рецензируемой диссертации составляют следующие положения.

1. Математическая модель технологического процесса измельчения в замкнутом цикле с применением нейронных сетей позволяет достичь повторение поведения реального процесса с точностью более 70 %.
2. Структура АСУТП на базе регуляторов с прогнозирующей моделью для управления комплексом измельчения в шаровой мельнице, которая включает в себя новые САР уровня пульпы в зумпфе слива мельницы и плотности пульпы на классификацию, САУ объемным заполнением материалом с возможностью контроля за перегрузом мельницы рудой, позволяет достичь повышения производительности передела измельчения по руде до 3 %.
3. Алгоритмы и программное обеспечение многопараметрического регулятора с прогнозирующей моделью и наблюдателем возмущений для типового ПЛК, которые позволяют снизить колебания управляемых параметров, уменьшив интегральную ошибку регулирования по отношению к типовым ПИД-регуляторам.

## III. Практическая ценность результатов исследований

Практическая ценность результатов диссертационной работы заключается в возможности использовать математическую модель для понимания динамического взаимодействия

внутренних и внешних переменных замкнутого контура измельчения, а также реализовывать алгоритмы прогнозирующего управления на ПЛК в актуальных задачах управления уровнем в зумпфе слива мельницы, плотностью пульпы на классификатор, объемным заполнением мельницы в условиях изменения влажности исходной руды и в режимах управления с высокой производительностью по руде.

#### IV. Достоверность и обоснованность основных результатов исследований

Основные положения, выводы и рекомендации, полученные в диссертации, обоснованы и аргументированы. Сформулированная в диссертации проблема была исследована и решена на основе корректного использования принципов и подходов, используемых в системном анализе, общей теории линейных систем управления многомерным объектом, методов программирования алгоритмов управления на ПЛК.

Достоверность основных выводов и результатов диссертации подтверждается:

- математическим обоснованием разработанных моделей и методов оценки адекватности математической модели; корректной постановкой экспериментов и обработкой экспериментальных данных; соответствием теоретических положений и результатов экспериментов, апробацией основных результатов диссертации в печатных трудах, докладах на конференциях и научно-технических семинарах;
- проверкой состоятельности построенных моделей на данных, снятых с реального производства;
- моделированием в математических пакетах MATLAB, а также разработкой программного обеспечения в среде программирования ПЛК Schneider Electric – Unity Pro XL;
- согласованностью результатов, с данными, полученными как самим автором, так и другими исследователями в результате имитационного моделирования и реальных экспериментов;
- результатами успешного внедрения, полученных в диссертации прикладных решений в виде функционального блока регулятора MPC, на ПЛК, который серийно выпускается на базе производства ООО «НПО ВЭСТ».

#### V. Апробация и публикации

Результаты исследований автора прошли апробацию на международных, всероссийских, региональных научно-практических конференциях и технических семинарах.

По тематике диссертации автором опубликованы 8 научных работ, из них 2 статьи 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.

Диссертационная работа в целом имеет законченный характер, достаточно подробно проиллюстрирована. Автореферат диссертации в целом отражает ее содержание.

Тема диссертации соответствует паспорту специальности 2.3.3 – «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами».

Пункт 5. (Научные основы, модели и методы идентификации производственных процессов, комплексов и интегрированных систем управления) – В работе используются методы нейросетевой идентификации производственных процессов. Выполнен анализ применимости данного метода для построения математической модели мельницы.

Пункт 9. (Методы синтеза специального математического обеспечения, пакетов прикладных программ и типовых модулей функциональных и обеспечивающих подсистему АСУТП, АСУП, АСТПП и др.) – Предложен новый функциональный блок регулятора MPC размерностью 4x4 с наблюдателем возмущений для ПЛК на языках стандарта МЭК 61131-3.

Пункт 18. (Математическое моделирование, оптимизация и оптимальное управление техническими системами, технологическими процессами и производствами в промышленности) – Разработана новая математическая модель мельницы, которая используется для синтеза оптимальной системы стабилизации объемного заполнения мельницы измельчаемым материалом.

Пункт 20. (Имитационное моделирование функционирования промышленных систем автоматизации.) – Проведено имитационное моделирование работоспособности синтезированной оптимальной системы управления мельницей при условиях выполнения разработанного программного кода алгоритма управления на ПЛК в реальном времени и в контуре с Simulink-моделью мельницы.

#### VI. Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации

Основные результаты диссертационной работы внедрены в виде новых функциональных блоков библиотеки ПЛК, который серийно выпускается на базе производства ООО «НПО ВЭСТ», что подтверждается соответствующим актом. Программное обеспечение регулятора с прогнозирующей моделью с размерностью 4x4 может быть применено в системах управления на базе других ПЛК. Полученные в работе результаты синтеза системы автоматического управления с прогнозирующей моделью для стабилизации плотности и уровня могут быть применимы для других процессов перемешивания в горно-обогатительном оборудовании. Использование результатов разработки системы управления мельницей будет максимально полезно для реальных промышленных решений в случае дальнейшего развития работы в вопросе оптимальных способов контроля параметра объемного заполнения, управлению которым в основном посвящена настоящая диссертационная работа Закамалдина А.А.

## VII. Недостатки диссертации

1. В приведенной работе при аргументации критики виброакустического анализатора загрузки мельницы (ВАЗМ) отсутствуют числовые показатели (стр. 5, 25), что затрудняет понимание принципиального преимущества предложенного автором подхода для оценки заполнения мельницы перед ВАЗМом.

2. В разделе 2.3.2 приняты допущения при моделировании мельницы с решеткой без достаточных обоснований об их допустимости. Следовало бы эти обоснования указать более обстоятельно.

3. На рисунке 2.16 полученная кривая выхода модели вибрации мельницы и кривая данных с реального объекта практически накладываются друг на друга, что не может соответствовать всего 72 % точности модели, при этом не удалось найти пояснения к этому несоответствию в диссертации при анализе адекватности математической модели вибрации.

4. В решении использовался наблюдатель возмущений с передаточной функцией (формула 3.51) и наблюдатель состояний с применением фильтрации Калмана, но конкретных данных об оценке возмущений, информации о методе настройки параметров наблюдателей в работе недостаточно.

Перечисленные замечания и недостатки не влияют на общую положительную оценку работы и могут рассматриваться в качестве конструктивных предложений по направлениям дальнейших исследований по проблематике диссертационной работы.

## VIII. Выводы

В целом диссертационная работа Закамалдина Андрея Андреевича представляет собой законченную научно-исследовательскую работу, выполненную на актуальную тему, отличается научной новизной и практической значимостью полученных результатов.

Автором диссертации сформулирована и решена *научно-техническая задача оптимального управления шаровой мельницей и реализации разработанных методов, алгоритмов и функциональных блоков.*

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

Отзыв заслушан, обсуждён и одобрен на заседании кафедры электропривода и автоматизации ФГБОУ ВО «КузГТУ» (протокол № 3 от 25 октября 2022 г.)

Отзыв составил :

Пачкин С.Г. кандидат технических наук  
по специальности 05.13.06 – Автоматизация  
и управление технологическими процессами  
и производствами, доцент

Шаулева Н.М. кандидат технических наук,  
доцент, заведующий кафедрой электропривода  
и автоматизации ФГБОУ ВО «КузГТУ»

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачёва» (ФГБОУ ВО «КузГТУ»). Почтовый адрес: 650000 Кемеровская область, г. Кемерово, ул. Весенняя, д. 28. Тел.: +7(3842)396960. Факс: +7(3842)396960. E-mail: rector@kuzstu.ru. Телефон кафедры: +7 (3842) 39-63-54.

Подпись Пачкина С.Г., Шаулевой Н.М.

**ЗАВЕРЯЮ**  
ученый секретарь совета

**Э.В. Хейминк**  
«21» 11 2022

