

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.2.415.02,
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
БЮДЖЕТНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО
ОБРАЗОВАНИЯ «ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ» (ТУСУР)
МИНИСТЕРСТВА НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ
ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ
КАНДИДАТА НАУК**

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 22 декабря 2022 г. № 13

О присуждении Закамалдину Андрею Андреевичу, гражданину Российской Федерации, учёной степени кандидата технических наук.

Диссертация «Оптимальное управление процессом измельчения в шаровой мельнице с применением прогнозирующей модели» по специальности 2.3.3 – «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами» принята к защите 14 октября 2022 г. (протокол № 8) диссертационным советом 24.2.415.02, созданным на базе ТУСУРа (634050, г. Томск, пр. Ленина, 40; приказ № 561/нк от 03.06.2021 г.).

Соискатель Закамалдин Андрей Андреевич 26.03.1993 года рождения в 2016 г. окончил «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (НИ ТПУ), а в 2020 г. – аспирантуру НИ ТПУ, работает главным специалистом по автоматизации ООО «Электра +», г. Санкт-Петербург.

Диссертация выполнена в отделении электроэнергетики и электротехники (ОЭЭ) инженерной школы энергетики (ИШЭ) НИ ТПУ. **Научный руководитель – Шилин Александр Анатольевич**, д.т.н., доцент, профессор ОЭЭ ИШЭ НИ ТПУ.

Официальные оппоненты: Бобырь Максим Владимирович, д.т.н., проф., профессор кафедры вычислительной техники Юго-Западного государственного университета, г. Курск; **Майстренко Андрей Васильевич**, к.т.н, доц., доцент кафедры компьютерных систем в управлении и проектировании ТУСУРа.

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное обра-

зовательное учреждение высшего образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева», г. Кемерово, в своем положительном отзыве, подписанном к.т.н. доц. Пачкиным С.Г., доцентом кафедры электропривода и автоматизации систем, и к.т.н. доц. Шаулевой Н.М., зав. кафедрой электропривода и автоматизации, утвержденном ректором к.ф.-м.н. Яковлевым А.Н., указала, что диссертация Закамалдина А.А. является завершённой научно-квалификационной работой, в которой на основании проведённых автором исследований представлен актуальный новый подход оптимального управления процессом измельчения в шаровой мельнице, основанный на применении методов управления с прогнозирующей моделью.

Соискатель имеет 9 опубликованных работ, в том числе 8 по теме диссертации, из них в рецензируемых научных изданиях из списка ВАК опубликовано 2 работы, 2 публикации, индексируемые в базе данных Scopus, 3 статьи в научно-технических сборниках. Получено 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Наиболее значимые работы по теме диссертации:

1. Закамалдин, А. А. Моделирование замкнутого цикла измельчения в шаровой барабанной мельнице с разгрузкой через торцевую решетку / А. А. Закамалдин, А. А. Шилин // Технология машиностроения. – 2021. – № 8. – С. 12-20.

2. Закамалдин, А. А. Построение системы автоматического управления с прогнозирующей моделью для стабилизации плотности и уровня при перемешивании пульпы в горно-обогательном оборудовании / А. А. Закамалдин, А. А. Шилин // Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета). – 2021. – № 58. – С. 77-83.

3. Zakamaldin A. A., Andyk V. S. Parametric Identification of Control Systems Using Artificial Neural Networks //MATEC Web of Conferences. – EDP Sciences, 2015. – Т. 37. – С. 01064.

4. Zakamaldin A. A. Neural simulation of ball mill grinding process / Zakamaldin A. A., Shilin A. A. // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. – 2020. – Т. 795. – №. 012010. – С. 1–7.

На диссертацию и автореферат поступило 7 положительных отзывов.

Отзывы предоставили: **Муравьёва Е.А.**, д.т.н, проф., заведующий кафедрой автоматизированных технологических и информационных систем филиала Уфимского государственного нефтяного технического университета в г. Стерлитамак; **Сазыкин Г.П.**, к.т.н., доц., директор по обогащению углей ООО «Горный институт по проектированию угольных предприятий», г. Новосибирск; **Орешенко Т.Г.**, к.т.н., доц., доцент кафедры «Системы автоматического управления» Сибирского государственного университета науки и технологий имени М. Ф. Решетнёва, г. Красноярск; **Каледин В.О.**, д.т.н., проф., заведующий научно-исследовательской лабораторией математического моделирования Кузбасского государственного университета, г. Кемерово; **Перепёлкин Е.А.**, д.т.н., проф., профессор кафедры прикладной математики Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения; **Хакимьянов М.И.**, д.т.н., доц., заведующий кафедрой электротехники и электрооборудования Уфимского государственного нефтяного технического университета; **Мышляев Л.П.**, д.т.н., проф., директор, **Макаров Г.В.**, главный инженер проектов ООО «Научно-исследовательский центр систем управления», г. Новокузнецк.

В отзывах на диссертацию и автореферат указаны следующие основные замечания: не указаны допустимые значения погрешностей датчиков; следовало привести оценку влияния предложенного способа управления мельницей на качество измельчения по содержанию характерного класса крупности, обоснования допущений при моделировании мельницы указать более обстоятельно; на рис. 2.16 кривая выхода модели вибрации мельницы и кривая данных с реального объекта практически накладываются друг на друга, что не может соответствовать 72 % точности модели, при этом не удалось найти пояснения к этому несоответствию в диссертации; не указано принципиальное отличие и ценность полученной автором реализации регулятора с прогнозирующей моделью (model predictive control – MPC) на программируемых логических контроллерах (ПЛК); не хватает выводов по требованиям к производительности ПЛК для предложенного решения; следовало подробнее описать топологию нейронной сети и методику ее обучения, вопрос адаптации модели регулятора MPC при

изменении параметров объекта управления, оценку возмущений, метод настройки параметров наблюдателей, преимущества предложенного автором подхода для оценки заполнения мельницы перед виброакустическим анализатором загрузки мельницы (ВАЗМ), уточнить какой именно параметр вибрации используется в моделях (виброскорость, виброускорение), уточнить закон распределения вероятности в модели гранулометрического состава; алгоритмы управления разрабатываются для отдельных элементов схемы без указания условий правомерности такой декомпозиции; нет объяснений, почему первая часть прогнозирующей модели представлена операторной зависимостью, а вторая – в пространстве состояний (стр. 15 автореферата); во второй части модели не учтены контролируемые и неконтролируемые воздействия; непонятен выбор периода дискретизации прогнозирующей модели – 1 с (стр. 15 автореферата) ввиду необходимости обеспечения соответствующих частотных характеристик модели.

Выбор официальных оппонентов обосновывается тем, что д.т.н. проф. Бобырь М.В. является признанным специалистом в области автоматизации технологических процессов, применения современных информационно-моделирующих систем управления, а также их идентификации и моделирования; к.т.н. доц. Майстренко А.В. является специалистом в области автоматизации технологических процессов, а также исследования методов автоматического регулирования. У оппонентов имеются публикации, близкие по тематике с тематикой диссертации.

Выбор Кузбасского государственного технического университета имени Т.Ф. Горбачева в качестве ведущей организации обоснован тем, что в нем имеются квалифицированные специалисты в области автоматизации управления и моделирования технологических процессов добычи полезных ископаемых и их обработки. Высокий квалификационный уровень сотрудников университета подтверждается научными публикациями в отечественных и зарубежных изданиях.

Официальные оппоненты и сотрудники ведущей организации имеют достаточный объем публикаций по тематике диссертации в ведущих изданиях и способны аргументировано оценить и обосновать научную и практическую

значимость диссертационной работы.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

– **разработана** концепция управления мельницей барабанного типа с разгрузкой через торцевую решетку с применением прогнозирующих моделей вместе с методикой реализации на ПЛК, позволяющая понизить себестоимость и расширить возможности использования более доступных контроллеров, включая отечественные;

– **предложен** подход к построению нейросетевой модели вибрации разгрузочной цапфы, позволяющий оценить степень перегруза мельницы;

– **доказана** перспективность использования предложенного алгоритмического и программного обеспечения, что подтверждается повышением производительности измельчения руды до 3 % и уменьшением интегральной ошибки регулирования загрузки мельницы в 2 раза по сравнению с каскадными контурами ПИД регулирования;

– **введены** принципы реализации предложенных подходов на разных платформах ПЛК, включая контроллеры с традиционными средствами программирования стандарта IEC 61131-3.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

– **применительно** к проблематике диссертации **результативно использованы** комплекс существующих методов идентификации на основе искусственных нейронных сетей для получения модели вибрации мельницы, метод модельно-ориентированного проектирования, подход управления с прогнозирующей моделью, виртуальным анализатором и наблюдателем возмущений;

– **раскрыты** причины неоптимальной работы системы загрузки мельницы на основе каскадного ПИД регулирования по сигналу вибрации разгрузочной цапфы в режимах близких к перегрузке мельницы;

– **проведена модернизация** математической модели технологического процесса измельчения в шаровой мельнице, обеспечивающая возможность раз-

работки новых систем автоматического управления процессом и их отладки на режимах работы мельницы близких к перегрузу.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

- **разработаны и внедрены** алгоритмы и программы на языках MatLab-code и ST в ПЛК ВЭСТ-03, позволяющие выполнять задачу импортозамещения аналогичных систем управления на основе подхода с прогнозирующей моделью, которые использованы ООО «НПО ВЭСТ» (г. Томск) при выполнении проектно-изыскательских работ по созданию технологического процесса измельчения щебня Туганского горно-обогатительного комбината. Разработанные алгоритмы и программы используются также в учебном процессе ОЭЭ ИШЭ НИ ТПУ в методических материалах для дисциплин «Электрический привод», «Системы автоматического управления» и при подготовке магистерских диссертаций;

- **создан** функциональный блок многопараметрического регулятора с прогнозирующей моделью и наблюдателем возмущений для ПЛК на языках программирования МЭК 61131-3;

- **представлены** рекомендации для реализации подхода управления с линейной прогнозирующей моделью в системе управления мельницей доступного для реализации на отечественных ПЛК, позволяющие повысить уровень импортозамещения в технологическом процессе.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

- **для экспериментальных работ** использовались программные и измерительные средства сертифицированного ПЛК «Schneider Electric Modicon M340»;

- **теоретические исследования** построены на известных трудах и согласуются с опубликованными экспериментальными данными по теме диссертации;

- **использованы** данные измерений приборов контроля параметров действующего технологического процесса при проверке адекватности предложенных математических моделей.

Личный вклад соискателя состоит в выполнении теоретических изысканий, моделировании, разработке алгоритмов и программного обеспечения. Постановка цели и задач исследования осуществлялась автором лично под руководством научного руководителя Шилина А.А. Экспериментальные исследования и внедрение систем управления, а также анализ и оформление результатов диссертационной работы в виде научных публикаций и докладов на научных конференциях осуществлялось автором лично.

В ходе защиты диссертации были высказаны следующие критические замечания:

1. Имеется неоднозначность в формулировке критерия оптимальности системы управления мельницей: в цели работы отмечается производительность по руде и энергоэффективность агрегата измельчения, однако связь между этими критериями не исследована.

2. В работе получена модель вибрации мельницы с точностью 72 %, это невысокий показатель, используя такую модель для управления можно не зафиксировать аварийную вибрацию агрегата измельчения.

3. В системе управления мельницей не учтены параметры выходной продукции измельчения, а именно отсутствуют ограничения по выходу зерен готового продукта необходимого диаметра.

4. Не приведены статистические показатели при оценке адекватности виртуального анализатора веса материала в мельнице.

5. В связи с высокой точностью нейросетевой модели вибрации мельницы, полученной при обучении (95-97 %), и ее невысокой точностью на тестовых выборках (72 %), возникает замечание о том, что нейросетевая модель переобучена.

Соискатель Закамалдин А.А. ответил на задаваемые ему в ходе заседания вопросы и привел собственную аргументацию:

1. Повышение производительности до оптимальной приводит также и к уменьшению затрат электроэнергии главным приводом мельницы из-за особенностей рассмотренного процесса измельчения в шаровой мельнице. Поэтому критерий оптимизации по максимизации производительности одновременно

максимизирует энергоэффективность.

2. Модель вибрации мельницы использовалась в системной модели для отладки контуров автоматического регулирования (САР) и управления (САУ) мельницей, но не использовалась непосредственно в качестве модели для регуляторов с прогнозирующей моделью. Полученной в работе точности было достаточно для косвенной оценки загрузки мельницы при настройке систем САР и САУ.

3. В работе для моделирования гранулометрического состава выходной продукции измельчения разработана отдельная вероятностная модель, и ограничения по выходу зерен продукта необходимого диаметра можно было учесть в ограничениях, но для рассматриваемого режима работы выход продукта необходимого класса обеспечивается агрегатом классификации.

С замечаниями 4 и 5 согласился.

На заседании 22 декабря 2022 г. диссертационный совет принял решение: за решение научно-технической задачи развития методов управления процессом измельчения в шаровой мельнице с применением прогнозирующей модели присудить Закамалдину Андрею Андреевичу ученую степень кандидата технических наук по специальности 2.3.3 – «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (промышленность)».

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 16 человек, из них 8 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из 21 человека, входящего в состав совета, проголосовали: за – 16, против – нет, недействительных бюллетеней – нет.

Председатель
диссертационного совета

 Шурыгин Юрий Алексеевич

Ученый секретарь
диссертационного совета

 Зайченко Татьяна Николаевна

23 декабря 2022 г.