



АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
«Союзцветметавтоматика им. Топчаева В.П.»

От 26.08.2025г. № 20/350

на письмо проректора СПбГ
Н.В. Пашкевича от 08 июля 2025 г.

127410, г. Москва, ш. Алтуфьевское, д. 79А, стр. 2.

Тел.: (499) 489-10-85;

E-mail: scma@scma.ru

Адрес в интернет: <http://www.scma.ru>

ОГРН 1037700048561

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор,
кандидат технических наук

Дёмин А. В.

«26» 08 2025 г.

О Т З Ы В

**Ведущей организации на диссертацию *Мальковой Яны Михайловны* на тему:
«Автоматизированный электропривод шаровой мельницы
с интегрированным мониторингом параметров процесса измельчения»,
представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 2.4.2. «Электротехнические комплексы и системы»**

На отзыв представлена работа Мальковой Я. М. состоящая из: введения, анализа ключевых направлений технологического развития горнодобывающих предприятий, поиска методов бесконтактного мониторинга износа футеровки барабана шаровой мельницы. А также, разработки динамической модели процесса измельчения, разработки структуры автоматизированного электропривода для управления процессом измельчения, дополненных расчетом технико-экономических эффектов от применения автоматизированного электропривода шаровой мельницы.

Диссертация состоит из оглавления, введения, пяти глав с выводами по каждой из них, заключения, списка литературы, включающего 130 наименований и 2 приложений. Диссертация изложена на 153 страницах машинописного текста, содержит 61 рисунок и 32 таблицы.

1. Актуальность темы диссертации

Во введении отражена актуальность темы исследования. Измельчение руды в шаровых мельницах характеризуется высокой энергоемкостью процесса измельчения. При этом процесс измельчения в значительной степени определяет эффективность последующих процессов обогащения и качество концентрата.

Тенденция к снижению содержания полезных компонентов в руде и увеличение вариативности ее свойств, предопределяет необходимость разработки структур автоматизации управления измельчительным оборудованием с опорой на непрерывный мониторинг основных технологических параметров.

Для процесса измельчения в шаровых мельницах таковыми являются шаровая загрузка, обеспечивающая необходимое качество продукта измельчения в аспекте содержания готового класса и износ футеровки барабана мельницы, определяющего необходимость корректировки дозагрузки шаров.

Данные параметры во многом определяются режимом работы электропривода измельчительных агрегатов. Отечественные системы электроприводов строятся, как правило,

ВХ. № 9-21 ОТ 03.09.25
АУ УС

на основе нерегулируемых электродвигателей, что не позволяет подстраивать режим работы измельчительного оборудования (мельниц) под текущую технологическую ситуацию процесса измельчения.

В представленной первой главе проведен анализ ключевых направлений технологического развития горнодобывающих предприятий. Особое внимание уделено процессу измельчения в шаровых мельницах как наиболее энергоемкому производственному процессу, обладающему высоким потенциалом в повышении энергоэффективности на горно-обогатительных комбинатах. Определены основные параметры процесса измельчения и способы их мониторинга.

Рассмотрены основные схемы основных типов приводных систем. Сделан вывод о целесообразности разработки систем электропривода на основе АДКР (электропривод с асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором), обеспечивающего энергетическую и технологическую эффективность процесса измельчения в шаровой мельнице.

Показано, что повышение эффективности процесса измельчения в шаровой мельнице может быть достигнуто за счет применения автоматизированного электропривода, управление которым должно осуществляться на основе трех основных технологических составляющих:

- учета свойств перерабатываемой руды;
- контроля шарового заполнения и степени износа футеровки;
- оценки процентного содержания готового класса в продукте измельчения.

Учитывая указанные особенности, работа Мальковой Я.М. направлена на повышение энергоэффективности процесса измельчения с помощью новых технических решений управления электроприводом измельчительного оборудования на основе систем управления комплектными электроприводами, адаптированными под технологический процесс за счет интеграции в них системы мониторинга параметров процесса измельчения.

2. Научная новизна диссертации

Новизна основных научных результатов и их значимость для науки и производства.

В диссертационном исследовании представлено новое решение актуальной научно-технической задачи повышения энергоэффективности процесса измельчения в шаровых мельницах за счет вычисления оптимальной частоты вращения двигателя мельницы на основе мониторинга параметров процесса измельчения по току статора и ее обеспечения с помощью преобразователя частоты.

По результатам выполнения диссертационной работы сделаны следующие выводы и рекомендации:

1. Разработана комплексная имитационная модель электропривода шаровой мельницы, на основе которой установлена взаимосвязь между спектральным составом тока двигателя и степенью износа футеровки барабана за счет изменения характерных гармонических составляющих.

2. Разработанная динамическая модель процесса измельчения позволяет осуществлять непрерывный мониторинг процентного содержания готового класса и является основной для программно-управляемого датчика в составе комплектного электропривода шаровой мельницы.

3. Повышение энергоэффективности процесса измельчения можно обеспечить за счет развития систем на основе комплектного электропривода шаровых мельницы, адаптированного под технологический процесс.

3. Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендаций

Обоснованность и достоверность полученных результатов исследования, научных положений, выводов и рекомендаций, изложенных в диссертации, основывается на корректном использовании стандартных теорий, методов и адекватных математических моделей комплексных систем автоматизированного электропривода шаровых мельницы, имитационном, динамическом и численном моделировании.

4. Научные результаты, их ценность

Основные научные результаты исследования представлены в главах 2-5. Во второй главе, при рассмотрении методов исследования, предложен способ мониторинга полагающий, что степень износа футеровки барабана мельницы можно оценить по изменению спектрального состава тока, потребляемого приводным двигателем. Такой подход позволил реализовать имитационную модель работы шаровой мельницы, учитывающую физические процессы разрушения руды при оценке потребляемого тока приводного двигателя.

В процессе исследования разработана комплексная имитационная модель электродвигателя шаровой мельницы, объединяющая механическую систему барабана, динамику внутримельничной загрузки и электромагнитные процессы, протекающие в электродвигателе.

На основе комплексной модели электродвигателя выявлено, что изменения в динамике шаровой загрузки, вызванные износом футеровки, приводят к формированию характерных гармонических составляющих в спектре тока на частотах 200,2 Гц и 400,4 Гц, а также на частотах 100 Гц и 300 Гц, которые формируются при значительном износе лифтеров.

По результатам исследования разработан алгоритм, основанный на использовании комплексной имитационной модели электродвигателя, который позволяет установить взаимосвязь износа футеровки барабана мельницы и изменения спектра тока потребляемого электродвигателя.

Третья глава посвящена разработке динамической модели процесса измельчения, параметры которой изменяются в зависимости от свойств перерабатываемой руды, что позволяет осуществлять расчет оптимальной частоты вращения барабана мельницы, обеспечивающей достижение необходимого количества готового класса в продукте измельчения с учетом компенсации динамики изменения диаметра мельницы и объемного заполнения шаровой загрузки.

Для определения оптимальных параметров модели входная руда условно разделена на 3 кластера по процентному содержанию легкообогатимой руды и параметры динамической модели процесса измельчения оптимизированы под каждый кластер руды. При этом идентификация параметров модели мельницы под каждый кластер руды выполнялась согласно экспериментальным данным водно-шламовых и количественно-качественных схем железорудного комбината.

Результатом исследования является разработка алгоритма вычисления оптимальной частоты вращения электропривода шаровой мельницы, основанном на динамической модели процесса измельчения. Алгоритм позволяет поддерживать требуемое качество измельчения по содержанию готового класса в продукте измельчения независимо от характеристик измельчаемой руды по обогатимости за счет оптимизации частоты вращения барабана мельницы.

В четвертой главе рассмотрена структура автоматизированного комплектного электропривода (АЭП) шаровой мельницы, состоящая из силовой части на основе каскадного преобразователя частоты и управляющей части, реализованной на основе интеллектуальной системы управления измельчением (ИСУИ).

Выбор каскадного преобразователя частоты обеспечивает широкий диапазон регулирования частоты вращения барабана с высокой точностью регулирования и с поддержанием полного момента на низких скоростях.

Интеллектуальная система управления процессом измельчения реализована на основе системы мониторинга износа футеровки барабана, программно-управляемого датчика (гранулометра), обеспечивающего вычисление гранулометрической характеристики продукта измельчения на сливе мельницы и алгоритма вычисления оптимальной частоты вращения барабана мельницы.

В процессе исследования использованы результаты имитационного моделирования автоматизированного электропривода шаровой мельницы с каскадным инвертором напряжения в программной среде Matlab Simulink.

В пятой главе проведен анализ рынка отечественных производителей железорудного сырья. Показано, что более половины анализируемого периода времени работы железорудного комбината характеризуется неэффективным производством концентрата, критерием которой является несоответствие качества производимой продукции заданным требованиям. Режим работы комбината характеризуется чередованием выпуска концентрата с завышенным содержанием железа и производством продукции с низким содержанием железа.

Подтверждено расчетами технико-экономических эффектов, что реализация АЭП в составе с каскадным преобразователем частоты и с ИСУИ обеспечивает поддержание заданной уставки по качеству производимого концентрата за счет оптимизации частоты вращения барабана мельницы, обеспечивающей адаптацию к изменениям свойств руды.

Оценка энергетического эффекта, выполненная по критерию удельных затрат электроэнергии на тонну производимого концентрата, показывает, что предлагаемая концепция управления АЭП позволяет снизить количество потребляемой энергии, требуемой для измельчения руды, при одновременном увеличении количества производимой продукции.

Ценность научных результатов подтверждается неоднократным обсуждением на научных конференциях и форумах различного уровня, где получили положительную оценку от ведущих специалистов.

Результаты диссертационного исследования в достаточной степени освещены в 11 печатных работах, в том числе в 2 статьях – в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (далее – Перечень ВАК), в 3 статьях – в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus. Получен 1 патент на изобретение.

5. Теоретическая и практическая значимость результатов диссертации

- Разработан алгоритм мониторинга износа футеровки шаровой мельницы.
- Разработан алгоритм управления частотой вращения электродвигателя шаровой мельницы на основе динамической модели процесса измельчения.
- Предложена структура автоматизированного электропривода шаровой мельницы.
- Методика мониторинга процесса измельчения по характеристикам электропривода внедрена в производственный процесс ООО «Лаборатория инжиниринга».

6. Рекомендации по использованию результатов работы

Представленные в диссертационном исследовании технические решения рекомендуются для практического применения и использования на горно-обогатительных предприятиях.

Результаты теоретического исследования темы диссертации могут быть использованы в аналогичных работах, связанных с разработкой комплектных электроприводов мельниц, адаптированных под технологический процесс.

7. Замечания и вопросы по работе

При прочтении и обсуждении диссертационной работы возникли следующие замечания и вопросы:

1. Трудно согласится с тем, что на отечественных предприятиях существует низкий уровень автоматизации и отсутствуют контрольно-измерительные приборы для непрерывного мониторинга технологической нагрузки мельницы и оценки качества измельчения. Необходимо отметить, что кроме упоминаемого анализатора ВАЗМ-1М, разработки АО «СоюзЦМА», имеют широкое внедрение и другие приборы, например, гранулометр ПИК-074П, обеспечивающий оценку содержания готового класса в сливе, радиоизотопный преобразователь РП-24 в функции бесконтактного плотномера и другие приборы. Имеются широкий класс аналогичных приборов и других российских и зарубежных фирм.

2. В силу этого следовало бы провести сравнительный анализ эффективности инструментальных и математических методов оценки технологических параметров процесса измельчения.

3. В главе *Тенденции в развитии современных горнодобывающих предприятий* уделено много внимания аспектам, не связанным с темой исследования (геологоразведка, буровзрывные работы, добыча и транспортировка и др.), что отвлекает внимание от основной темы.

4. В работе применяется в качестве характеристики процесса понятие *количество готового класса*. В технологии принято оперировать понятием содержание готового класса, что и определяет соотношение массы заданного класса крупности к общей (100%) массе материала.

В качестве рекомендаций по продолжению исследования можно предложить следующие направления:

1. Рассмотреть возможность распространения результатов исследования на оценку работы мельниц другого типа, в частности, стержневых мельниц и мельниц самоизмельчения, которые в наибольшей степени используются именно в первой (головной) стадии измельчительных переделов.

2. Представляет интерес также рассмотрение возможности использования АЭП в комплекте с ИСУИ для управления работой мельниц доизмельчения с учетом влияния на процесс возвратного продукта (песков) после классификации.

Указанные замечания не снижают ценность полученных результатов и положительного впечатления от работы. Исследование выполнено на высоком научном и техническом уровне, представляет интерес для продолжения развития темы диссертации.

8. Заключение по диссертации

Диссертация **«Автоматизированный электропривод шаровой мельницы с интегрированным мониторингом параметров процесса измельчения»**, представленная на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.2. «Электротехнические комплексы и системы», полностью отвечает требованиям раздела 2 «Положения о присуждении ученых степеней» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II», утвержденного приказом ректора Горного университета от 20.05.2021 № 953 адм, а ее автор, **Малькова Яна Михайловна**, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.2. «Электротехнические комплексы и системы».

Результаты исследования были обсуждены в лаборатории № 34 «Автоматизация горно-обогачительных производств» АО «Союзцветметавтоматика им. Топчаева В.П. и одобрены на заседании НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОГО СОВЕТА АО «Союзцветметавтоматика им. Топчаева В.П.» 20 августа 2025 года.

Заместитель генерального директора по научной работе,
доктор технических наук, профессор



Морозов В.В.
«26» 08 2025 г.