

На правах рукописи

Малькова Яна Михайловна



**АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД
ШАРОВОЙ МЕЛЬНИЦЫ С ИНТЕГРИРОВАННЫМ
МОНИТОРИНГОМ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА
ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ**

***Специальность 2.4.2. Электротехнические комплексы
и системы***

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Санкт-Петербург – 2025

Диссертация выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II».

Научный руководитель:

доктор технических наук, доцент

Жуковский Юрий Леонидович

Официальные оппоненты:

Самохвалов Дмитрий Вадимович

кандидат технических наук, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)», кафедра робототехники и автоматизации производственных систем, доцент;

Шишлянников Дмитрий Игоревич

доктор технических наук, доцент, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», кафедра «Горная электромеханика», профессор.

Ведущая организация – акционерное общество «Союзцветметавтоматика им. Топчаева В.П.», г. Москва.

Защита диссертации состоится **25 сентября 2025 г. в 13:30** на заседании диссертационного совета ГУ.6 Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д.2, **аудитория № 3321**.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 25 июля 2025 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



УСТИНОВ
Денис Анатольевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Измельчение руды в шаровых мельницах характеризуется большой установленной мощностью приводных машин, высокой энергоемкостью и низкой энергоэффективностью процесса измельчения. Более 50% энергозатрат горно-обогатительных комбинатов приходится на процесс измельчения. Процесс измельчения определяет пропускную способность комбината, эффективность последующих процессов обогащения и качество концентрата. Для горнодобывающих предприятий можно выделить следующие особенности: увеличение производительности фабрик, снижение содержания полезных компонентов в руде и увеличение вариативности ее свойств. Для первой стадии процесса измельчения в шаровых мельницах характерен низкий уровень автоматизации, в том числе, ввиду сложных условий эксплуатации агрегатов. Отсутствует возможность непрерывного мониторинга количества готового класса в продукте измельчения с помощью контрольно-измерительных приборов и автоматики. Это не позволяет организовать обратную связь и, как следствие, обеспечить эффективное принятие управленческих решений. Шаровая загрузка является важным параметром для обеспечения необходимого количества готового класса в продукте измельчения. Возникает необходимость в учете актуального диаметра барабана мельницы в свету, определяемого износом футеровки барабана, для корректной дозагрузки шаров. Существующие системы мониторинга износа футеровки предполагают установку систем измерения на корпус барабана, что определяет потенциал в развитии бесконтактных методов измерения на основе аналитических модулей, способных учитывать свойства измельчаемой руды.

Отечественные системы электроприводов строятся, как правило, на основе нерегулируемых электродвигателей, что приводит к неэффективному использованию электроэнергии.

Учитывая указанные особенности, актуальной научной задачей является комплексное повышение энергоэффективности процесса измельчения, для решения которой требуется разработка новых технических решений на основе систем комплектного электропривода, адаптированных под технологический процесс за счет интеграции системы мониторинга параметров процесса измельчения.

Степень разработанности темы исследования

Значительный вклад в решение вопросов энергоэффективности процесса измельчения внесли как отечественные, так и зарубежные ученые. Вклад в исследование вопросов энергоэффективного управления процессом измельчения внесли: И.И. Белоглазов, К.Я. Улитенко, О.А. Леттиев, J.A. Herbst, M. Hadizadeh.

Существенный вклад в разработку методик оценки энергопотребления, в том числе, на основе моделирования процесса измельчения внесли: Т.Н. Александрова, Л.С. Читалов, В.А. Олевский, О.Н. Тихонов, Е.Е. Андреев, Н.О. Тихонов, P.W. Cleary, M.S. Powell, F.P. Bond, R.K. Rajamani.

Подходы к мониторингу электротехнических комплексов на основе анализа токовых характеристик электродвигателей рассмотрены в работах Б.Н. Абрамовича, Ю.Л. Жуковского, Н.А. Королева.

Подходы к разработке электротехнических комплексов шаровых мельниц, комплектных электроприводов и к разработке способов мониторинга параметров процесса измельчения на основе анализа электромеханических параметров изложены в трудах А.Е. Козярука, М.В. Пронина, А.Б. Виноградова, J. Rodriguez, P.M. Esteves, Castro Palavicino P., M.A. Valenzuela, P. Bortnowski.

Однако в настоящее время недостаточно исследований, которые бы рассматривали возможность управления процессом

измельчения в шаровой мельнице на основе автоматизированного электропривода с учетом мониторинга количества готового класса и износа футеровки барабана.

Объект исследования – автоматизированный электропривод шаровой мельницы.

Предмет исследования – алгоритм управления электроприводом на основе мониторинга параметров процесса измельчения по току статора приводного двигателя шаровой мельницы.

Цель работы – повышение энергоэффективности процесса измельчения в шаровых мельницах, используемых на железорудных горно-обогатительных комбинатах.

Идея заключается в создании интегрированного в технологическую систему управления автоматизированным электроприводом шаровой мельницы алгоритма управления скоростью вращения барабана, обеспечивающего автоматическую адаптацию к изменениям свойств руды, параметрам шаровой загрузки и износа футеровки барабана.

Поставленная в диссертационной работе цель достигается путем решения следующих **задач**:

1. Анализ научно-технических проблем энергоэффективного управления процессом измельчения в шаровых мельницах. Определение основных параметров процесса измельчения в шаровых мельницах, мониторинг которых затруднен в сложных условиях работы на горнообогатительных комбинатах. Обоснование необходимости управления процессом измельчения с помощью автоматизированного электропривода.

2. Разработать комплексную имитационную модель электропривода шаровой мельницы, позволяющую установить взаимосвязь между износом футеровки барабана и изменением спектра тока двигателя.

3. Разработать динамическую модель процесса измельчения, параметры которой отличаются в зависимости от

свойств перерабатываемой руды, и установить зависимости влияния параметров шаровой мельницы на количество готового класса в продукте измельчения.

4. Разработать алгоритм вычисления оптимальной частоты вращения электродвигателя шаровой мельницы на основе динамической модели процесса измельчения.

5. Оценить технико-экономические показатели эффективности применения автоматизированного электропривода шаровой мельницы с интегрированным мониторингом параметров процесса измельчения.

Научная новизна работы:

1. Установлена зависимость спектра тока статора приводного двигателя электропривода шаровой мельницы от изменения степени износа футеровки барабана.

2. Разработана динамическая модель процесса измельчения с адаптивными параметрами под кластер измельчаемой руды, позволяющая реализовать систему непрерывного мониторинга количества готового класса в продукте измельчения.

3. Разработан алгоритм вычисления оптимальной частоты вращения электродвигателя шаровой мельницы в технологической системе управления электроприводом шаровой мельницы на основе динамической модели процесса измельчения.

Соответствие паспорту специальности

Полученные научные результаты соответствуют паспорту специальности 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы:

п.1 Развитие общей теории электротехнических комплексов и систем, анализ системных свойств и связей, физическое, математическое, имитационное и компьютерное моделирование компонентов электротехнических комплексов и

систем, включая электромеханические, электромагнитные преобразователи энергии и электрические аппараты, системы электропривода, электроснабжения и электрооборудования.

п. 3 Разработка, структурный и параметрический синтез, оптимизация электротехнических комплексов, систем и их компонентов, разработка алгоритмов эффективного управления.

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Предложен алгоритм мониторинга износа футеровки барабана на основе анализа спектра тока статора приводного двигателя электропривода шаровой мельницы.

2. Разработан алгоритм вычисления оптимальной частоты вращения электродвигателя шаровой мельницы на основе динамической модели процесса измельчения, интегрированный в технологическую систему управления электропривода шаровой мельницы.

3. Предложена структура автоматизированного электропривода шаровой мельницы в составе с каскадным преобразователем частоты и с интеллектуальной системой управления измельчением.

4. Методика мониторинга процесса измельчения по характеристикам электропривода внедрена в производственный процесс ООО «Лаборатория инжиниринга» (акт внедрения от 14.04.2025 г.).

Методология и методы исследования. Результаты диссертационной работы получены с помощью статистических методов обработки данных, численного анализа, теории обобщенной электрической машины, теории электропривода, моделирования в среде Rocky DEM, моделирования в среде Matlab Simulink, методов машинного обучения, методов теории оптимизации, программирования на языке Python.

Положения, выносимые на защиту:

1. Разработанный алгоритм мониторинга износа футеровки барабана мельницы на основе спектра тока приводного

двигателя шаровой мельницы, вычисленный с помощью комплексной имитационной модели электродвигателя шаровой мельницы, позволяет идентифицировать степень износа футеровки барабана.

2. Разработанный алгоритм вычисления оптимальной частоты вращения электродвигателя шаровой мельницы с интегрированной системой мониторинга параметров процесса измельчения позволяет обеспечить необходимое количество готового класса в продукте измельчения и снижение удельных затрат электроэнергии в пределах 16% с учетом компенсации динамики изменения диаметра и шаровой загрузки барабана.

Степень достоверности результатов исследования основывается на корректном использовании стандартных теорий, методов и адекватных математических моделей комплексных систем автоматизированного электропривода шаровых мельницы, имитационном, динамическом и численном моделировании на базе образовательного центра цифровых технологий Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II.

Апробация результатов диссертации проведена на 5 международных научно-практических мероприятиях с докладами. За последние 3 года принято участие в 3 международных научно-практических мероприятиях с докладами:

XVII Международный форум-конкурс студентов и молодых ученых «Topical issues of rational use of natural resources» (июнь 2021 года, г. Санкт-Петербург, «Санкт-Петербургский горный университет»); Международный форум «Нефть и газ 2022» (апрель 2022 года, г. Москва, «РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина»); Международная горнопромышленная конференция «Баренц-арктическое экономическое партнерство» (ноябрь 2022 года, г. Апатиты, «ФИЦ КНЦ РАН»); Международный научный симпозиум «Неделя горняка – 2023» (январь 2023 года, 9 г. Москва, «НИТУ МИСИС»); XII Международный научно-

практический форум «Инновационные направления в проектировании горнодобывающих предприятий. Безопасное и эффективное освоение месторождений полезных ископаемых» (май 2025 года, г. Санкт-Петербург, «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II»).

Личный вклад автора заключается в постановке цели и задач диссертационного исследования; анализе зарубежной и отечественной научной литературы; разработке комплексной имитационной модели электропривода, на основе которой проведены исследования; разработке динамической модели процесса измельчения на основе экспериментальных данных; разработке алгоритма вычисления оптимальной частоты вращения шаровой мельницы; в оценке технико-экономических показателей эффективности применения автоматизированного электропривода с интегрированным мониторингом параметров процесса измельчения.

Публикации. 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.

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

Благодарности. Автор выражает глубокую благодарность и искреннюю признательность научному руководителю заведующему кафедрой электроэнергетики и электромеханики

Жуковскому Юрию Леонидовичу и доценту кафедры электро-энергетики и электромеханики Васильеву Богдану Юрьевичу за поддержку и вклад в проведении научных исследований по диссертации.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы работы, сформулированы цель, задачи работы и научная новизна, раскрыты теоретическая и практическая значимости исследования и изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проанализированы научно-технические проблемы в области энергоэффективного управления процессом измельчения. Рассмотрены основные способы управления процессом измельчения и основные факторы, препятствующие достижению его энергоэффективности. Обосновано применение автоматизированного электропривода (АЭП) для повышения энергоэффективности процесса измельчения.

Во второй главе выполнена разработка комплексной имитационной модели электродвигателя шаровой мельницы, на основе которой установлена взаимосвязь между спектральным составом тока двигателя и степенью износа футеровки барабана мельницы.

Во третьей главе на основе экспериментальных данных выполнена разработка динамической модели измельчения, параметры которой адаптируются под свойства измельчаемой руды. На основе динамической модели, позволяющей осуществлять непрерывный мониторинг количества готового класса в продукте измельчения, разработан алгоритм вычисления оптимальной частоты вращения двигателя шаровой мельницы.

В четвертой главе предложена структура АЭП для управления процессом измельчения на основе каскадного преобразователя частоты и интеллектуальной системы управления измельчением.

В пятой главе выполнен расчет технико-экономических показателей эффективности применения технических решений на основе АЭП.

Заключение отражает обобщенные выводы по результатам исследований в соответствии с целью и решенными задачами.

Основные результаты отражены в следующих защищаемых положениях:

1. Разработанный алгоритм мониторинга износа футеровки барабана мельницы на основе спектра тока приводного двигателя шаровой мельницы, вычисленный с помощью комплексной имитационной модели электродвигателя шаровой мельницы, позволяет идентифицировать степень износа футеровки барабана.

Шаровая загрузка является основным технологическим параметром для управления процессом измельчения в шаровых мельницах. В процессе измельчения происходит износ футеровки, что приводит к увеличению диаметра барабана мельницы в свету и, как следствие, требует проведения корректировки задания на количество шаровой загрузки. Для обеспечения непрерывного мониторинга износа футеровки предложен способ мониторинга на основе спектра тока статора приводного двигателя шаровой мельницы.

С целью проверки гипотезы о возможности износа футеровки барабана по спектру тока статора приводного двигателя электропривода шаровой мельницы разработана комплексная имитационная модель электродвигателя шаровой мельницы. Комплексная имитационная модель объединяет модель электродвигателя и исполнительного механизма, связанных между собой за счет нагрузочного момента внутримельничной загрузки шаровой мельницы.

Структурная схема исследования представлена на рисунке 1. Исследование проводилось в два основных этапа. На

первом этапе выполнена проверка функциональной связи между износом футеровки и спектром момента внутримельничной загрузки. Функциональная связь получена на основе численных экспериментов с помощью моделирования динамики процесса измельчения средствами пакета Rocky DEM при изменении износа футеровки. Оценка функциональной связи выполнена на основе XGBoost-аппроксиматора с помощью коэффициента детерминации (R^2), значение которого составило 0,84.

Установлено, что для исследуемой шаровой мельницы характерен устойчивый набор гармонических составляющих, проявляющихся в спектре внутримельничного момента при износе футеровки.

Второй этап исследования выполнен на основе данных внутримельничного момента при изменении износа футеровки. В модели электродвигателя в Matlab Simulink реализована передача сигнала внутримельничного момента на электродвигатель шаровой мельницы с последующим анализом тока статора для оценки износа футеровки мельницы.

Алгоритм мониторинга износа футеровки шаровой мельницы состоит из трех основных этапов: расчет усредненного спектра тока двигателя, идентификация характерных гармоник и расчет коэффициента гармоник (рисунок 2).

Первым этапом выполняется расчет усредненного спектра тока двигателя. Входной сигнал тока разделяется на блоки. Количество блоков определяется длиной сигнала и размером быстрого преобразования Фурье. Для каждого блока выполняется быстрое преобразование Фурье и последующее накопление амплитуд спектра в логарифмической шкале. Далее, выполняется расчет усредненного спектра.

На втором этапе выполняется идентификация характерных гармоник на основе фильтрации спектра. Далее, осуществляется поиск частот, на которых зафиксированы соответствующие гармоники. Формируется характеристический вектор из

спектральных компонент, отражающий степень износа футеровки барабана мельницы.

Третьим этапом выполняется расчет коэффициента гармоник, на основании которого осуществляется оценка степени износа футеровки барабана (1):

$$K = \frac{\sqrt{A(f_2)^2 + A(f_3)^2}}{A(f_1)}, \quad (1)$$

где $A(f_1)$ – основная амплитуда спектра на частоте 0 Гц, дБ; $A(f_2)^2$ и $A(f_3)$ – амплитуды спектра, возникающие при износе футеровки на частотах 200,2 Гц и 400,4 Гц, соответственно, дБ.

По результатам проведенных исследований установлено, что коэффициент гармоник позволяет определить степень износа футеровки барабана мельницы. На рисунке 3 приведена зависимость степени износа футеровки от коэффициента гармоник.

2. Разработанный алгоритм вычисления оптимальной частоты вращения электродвигателя шаровой мельницы с интегрированной системой мониторинга параметров процесса измельчения позволяет обеспечить необходимое количество готового класса в продукте измельчения и снижение удельных затрат электроэнергии в пределах 16% с учетом компенсации динамики изменения диаметра и шаровой загрузки барабана.

Готовый класс в продукте измельчения является целевой функцией, согласно которой необходимо управлять процессом измельчения. Управление целевой функцией процесса измельчения предлагается осуществлять с помощью АЭП шаровой мельницы за счет регулирования частоты вращения.

Существующие средства контрольно-измерительных приборов и автоматики не обеспечивают возможность непрерывного мониторинга количества готового класса в продукте измельчения на первой стадии измельчения ввиду особенностей технологического процесса.

Измерение количества готового класса предлагается осуществлять на основе программно-управляемого датчика (ГОСТ Р ИСО 15746-1), выходные данные которого получают на основе динамической математической модели, адаптивной под свойства руды.

Блок-схема разработанного алгоритма вычисления оптимальной частоты вращения двигателя мельницы представлена на рисунке 4. Алгоритм строится на основе программно-управляемого датчика для вычисления количества готового класса. Алгоритм состоит из трех основных этапов: определение кластера руды; выбор параметров динамической модели измельчения и функции задания уставки по количеству готового класса; расчет оптимальной частоты вращения мельницы.

На первом этапе осуществляется выбор кластера руды на основе данных по руде Q . Для рассматриваемого железорудного месторождения определено три кластера $i = 3$ по критерию содержания легкообогащаемой руды на основе 29 валидных комплексных опробований.

Вторым этапом выполняется выбор параметров динамической модели измельчения и функции задания уставки по количеству готового класса. Динамическая модель процесса измельчения разработана для мельницы МШЦ 4,5х6,0 на основе модели популяционного баланса (2):

$$p_i^p = \frac{p_i^f + \tau \sum_{j=1}^{i-1} b_{ij} k_j p_j^p}{1 + \tau k_i}, \quad (2)$$

где p_i^p – массовая доля готового продукта в классе крупности i , %; p_i^f – доля исходного продукта в классе крупности i (питание мельницы), %; $\tau_{\text{ср}}$ – среднее время нахождения материала в мельнице; b_{ij} – приращение функции разрушения, о.е.; p_j^p – доля готового продукта в родительском классе крупности j ; k_i и k_j – функция селективности для классов i и j , мин⁻¹. Предварительно решена задача оптимизации динамической модели на основе

метода Нелдера-Мида, в соответствии с которой под каждый кластер руды определены множества оптимальных параметров модели $\{K_i\}$, где i – номер кластера. Критерием оптимизации является минимальное евклидово расстояние между векторами предсказанного и реального распределения готового продукта измельчения. Ошибка модели составляет до 8,6%. Для каждого кластера руды установлена функциональная зависимость количества готового класса от содержания железа в концентрате. На основании кластера осуществляется выбор функциональной зависимости и расчет уставки по количеству готового класса.

На третьем этапе выполняется расчет оптимальной частоты вращения мельницы с помощью алгоритма Нелдера-Мида. Расчет выполняется согласно критерию оптимизации – минимальное рассогласование между вычисляемым количеством готового класса и его уставкой.

Результат работы алгоритма представлен в виде поверхностей в трехмерном пространстве для каждого кластера руды (рисунок 5). Параметр скорости (φ) по оси Z осуществляет коррекцию при динамическом изменении параметров диаметра мельницы (D_m) и шаровой загрузки (J) для достижения соответствующей целевой функций по количеству готового класса.

Предлагаемая структура АЭП шаровой мельницы представлена на рисунке 6. Структура основывается на применении каскадного преобразователя частоты и интеллектуальной системы управления измельчением.

Эффект от представленных технических решений заключается в снижении удельных затрат электроэнергии, требуемых для производства концентрата. Снижение удельных энергозатрат достигается за счет регулирования частоты вращения мельницы в оптимальном скоростном диапазоне, который определяется кластером руды, с помощью АЭП. Внедрение АЭП

позволяет увеличить количество концентрата при одновременном снижении затрат электроэнергии, требуемых на его производство (рисунок 7).

Оценка экономической эффективности предлагаемых решений проведена на основе сравнения количества концентрата, которое можно реализовать до и после внедрения АЭП.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационном исследовании представлено новое решение актуальной научно-технической задачи повышения энергоэффективности процесса измельчения в шаровых мельницах, используемых на железорудных горно-обогатительных комбинатах, 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. В результате анализа научно-технических проблем в области энергоэффективного управления процессом измельчения в шаровых мельницах выявлено отсутствие инструментов гибкого управления на основе непрерывного мониторинга и контроля основных параметров процесса, среди которых износ футеровки и количество готового класса в продукте измельчения. Повышение энергоэффективности процесса измельчения можно обеспечить за счет развития систем на основе комплектного электропривода шаровых мельницы, адаптированного под технологический процесс.

2. 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, возникающих на 200,2 Гц и 400,4 Гц.

3. На основе экспериментальных данных ВШС и ККС предприятия для мельницы МШЦ 4,5х6,0 разработана динамическая модель процесса измельчения. Ошибка модели между предсказанными и реальными гранулометрическими распределениями составляет не более 8,6%. Разработанная модель позволяет осуществлять непрерывный мониторинг количества готового класса и является основной для программно-управляемого датчика в составе комплектного электропривода шаровой мельницы. Установлено, что регулирование частоты вращения барабана мельницы в диапазоне от 45% до 80% от критической скорости позволяет осуществлять: управление процессом измельчения от 16,7% до 21,1% по готовому классу для мельницы МШЦ 4,5х6,0; компенсировать изменение таких параметров, как износ футеровки барабана и объемное заполнение шаровой загрузки, оказывающих влияние на помол.

4. Разработан алгоритм вычисления оптимальной частоты вращения электродвигателя шаровой мельницы на основе динамической модели процесса измельчения. Алгоритм позволяет поддерживать уставку по готовому классу в продукте измельчения независимо от измельчаемой руды за счет оптимальной частоты вращения.

5. Применение автоматизированного электропривода шаровой мельницы в составе с каскадным преобразователем частоты и интеллектуальной системой управления измельчением позволяет снизить удельные затраты электроэнергии на производство 1 т концентрата в пределах 16% за счет поддержания качества концентрата согласно заданной уставке. Срок окупаемости составил 4 года 9 месяцев, ЧПС через 25 лет – 27 млн руб. Представленные технические решения в диссертационном исследовании имеют практическое применение в производственной деятельности и могут быть адаптированы при разработке комплектных электроприводов других шаровых мельниц, отличных от приведенного в данной работе.

Перспективным направлением развития темы исследования является изучение вопроса влияния скоростных режимов работы АЭП на параметры износа футеровки барабана и шаровой загрузки мельницы. Учет данных взаимосвязей в работе алгоритма расчета оптимальной скорости потенциально позволит продлить срок службы футеровки и снизить удельные затраты шаровой загрузки и, как следствие, увеличить эффективность процесса измельчения.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК:

1. Жуковский, Ю. Л. Классификация способов повышения эффективности процесса измельчения и реализация энергоэффективных алгоритмов управления двухдвигательным электроприводом мельницы / Ю. Л. Жуковский, Я. М. Малькова // Горное оборудование и электромеханика. – 2022. – №. 4. – С. 20-35.

2. Королев, Н. А. Влияние отклонений индуктивности цепи намагничивания на характеристики электропривода со скалярной системой управления / Н. А. Королев, М. С. Ковальчук, Я. М. Малькова // Горное оборудование и электромеханика. – 2024. – №. 4. – С. 13-26.

Публикации в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus:

3. Vasilev, B. U. Control System of a Complete Electric Drive of a Mill for Grinding Gold-containing Ores / B. U. Vasilev, Y. M. Malkova, D. V. Mardashov // 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus). – IEEE, 2020. – P. 936-941.

4. Zhukovskiy, Y. L. Monitoring of grinding condition in drum mills based on resulting shaft torque / Y.L. Zhukovskiy, N. A. Korolev, Y. M. Malkova // Journal of Mining Institute. – 2022. – T. 256. – P. 686-700. DOI: 10.31897/PMI.2022.91.

5. Zhukovskiy, Yu. L. Analysis of the behavior of asynchronous electric drive with a closed scalar control system when changing the inductance of the magnetizing circuit / Yu. L. Zhukovskiy, B. Y. Vasilev, N. A. Korolev, Y. M. Malkova // Indonesian Journal of Science and Technology. – 2023. – Т. 8. – №. 1. – P. 65-78. DOI: 10.17509/ijost.v8i1.51983.

Публикации в прочих изданиях:

6. Малькова, Я. М. Многофакторная технология управления измельчением в мельницах при обогащении золотосодержащих руд / Я. М. Малькова, Б. Ю. Васильев // Неделя науки СПбПУ: Материалы научной конференции с международным участием, Санкт-Петербург, 19–23 ноября 2019 года / Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2019. – Санкт-Петербург: Изд. СПбПУ, – 2019. – С. 18-20.

7. Malkova, Y. M. Control system for electric drive of a ball mill rotation mechanism / Y. M. Malkova, B. U. Vasilev // Topical Issues of Rational Use of Natural Resources: Scientific Conference Abstracts XVI International Forum-Contest of Students and Young Researchers. St. Petersburg, 17-19 June 2020 / St. Petersburg Mining University, 2020. – St. Petersburg: Pub. St. Petersburg Mining University, – 2020. – P. 232-233.

8. Малькова, Я. М. Система управления высоковольтного двухдвигательного электропривода с модульным многоуровневым преобразователем (ММП) / Я. М. Малькова, А.И. Данцевич // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: Тезисы докладов конференции XXVI Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов, Москва, 12-13 марта 2020 года / Московский энергетический университет, 2020. – Москва: Изд. Радуга, 2020. – С. 438.

9. Малькова, Я. М. Система управления двухдвигательным электроприводом шаровой мельницы // Актуальные проблемы недропользования. XVIII Всероссийская конференция-

конкурс студентов и аспирантов: тезисы докладов. Санкт-Петербург, 15–17 апреля 2020 года / Санкт-Петербургский горный университет, 2020. – СПб: Изд. СПбГУ, 2020. – С. 328-329.

10. Malkova, Y. M. Development of a complete automated electric drive for a ball mill with increased technological and energy efficiency / Y. M. Malkova, Yu. L. Zhukovskiy // Topical Issues of Rational Use of Natural Resources: XVII International Forum-Contest of Students and Young Researchers. Scientific conference abstracts. St. Petersburg, 31 May – 6 June 2021 / St. Petersburg Mining University, 2021. – St. Petersburg: Pub. St. Petersburg Mining University, 2021. – PP. 157-158.

11. Королев, Н. А. Совершенствование методики идентификации неисправности асинхронного привода по потребляемому току / Н. А. Королев, Я. М. Малькова // Нефть и газ – 2022: Тезисы докладов 76-ой Международной молодежной научной конференции. Том 2. Москва, 25-29 апреля 2022 года / РГУ нефти и газа им. Губкина, 2022. – Москва: Изд. РГУ нефти и газа им. Губкина, 2022. – С. 284-285.

Патент:

12. Патент № 2806426 Российская Федерация, МПК В02С 25/00 (2006.01); СПК В02С 25/00 (2023.08). Способ мониторинга процесса измельчения в барабанных мельницах. Заявка № 2023110519: заявл. 25.04.2023: опубл. 31.10.2023 / Ю. Л. Жуковский, Н. А. Королев, Я. М. Малькова; заявитель/патентообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет». – 15 с.

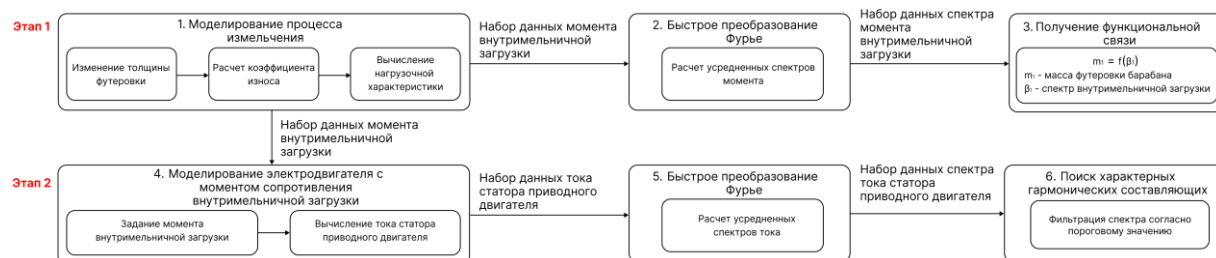


Рисунок 1 – Структурная схема исследования влияния износа футеровки барабана на спектр приводного двигателя

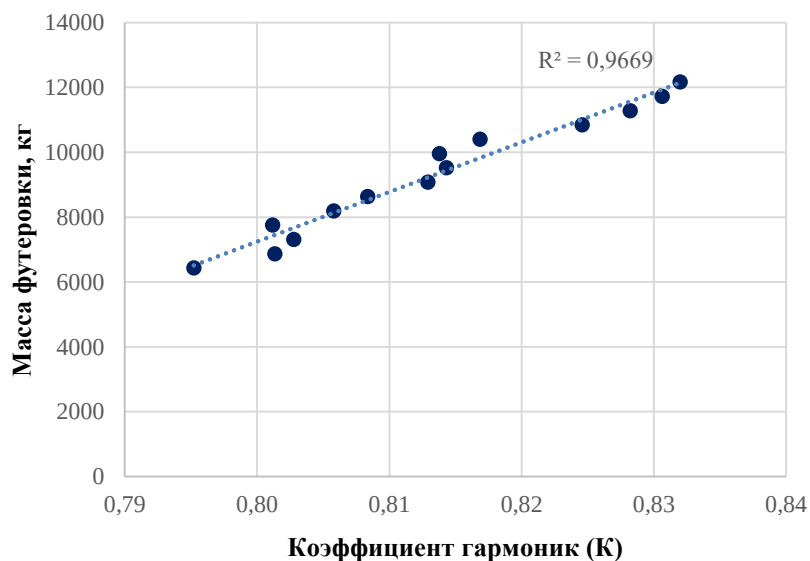


Рисунок 3 – Зависимость степени износа футеровки барабана от коэффициента гармоник

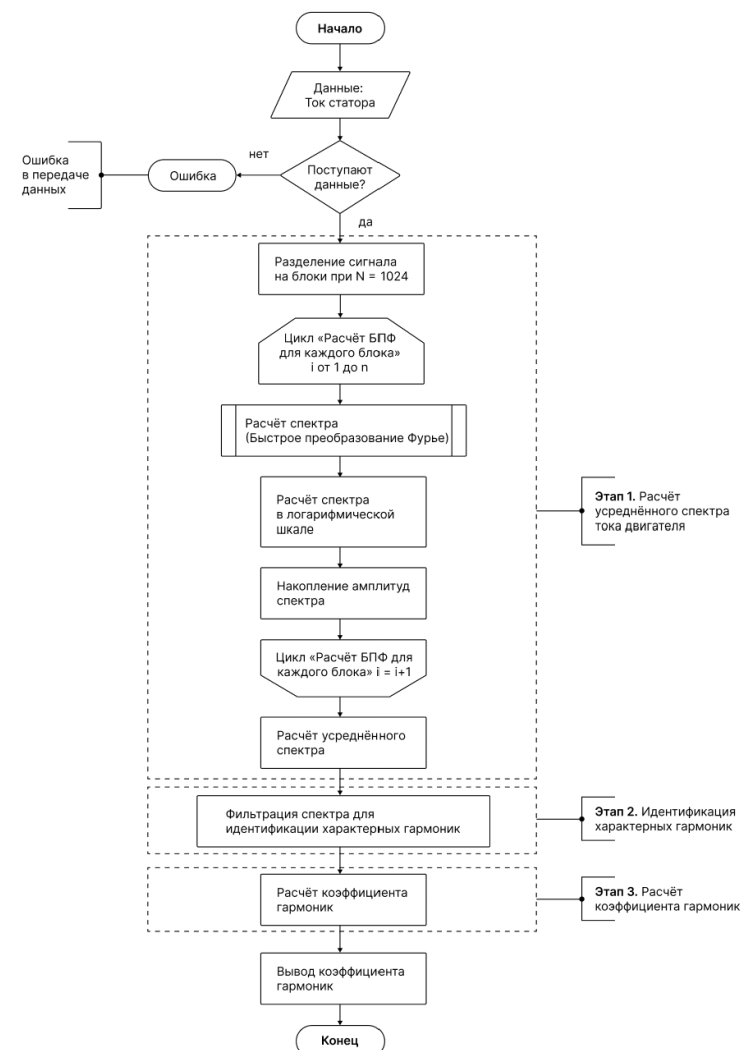


Рисунок 2 – Блок-схема алгоритма мониторинга износа футеровки барабана шаровой мельницы

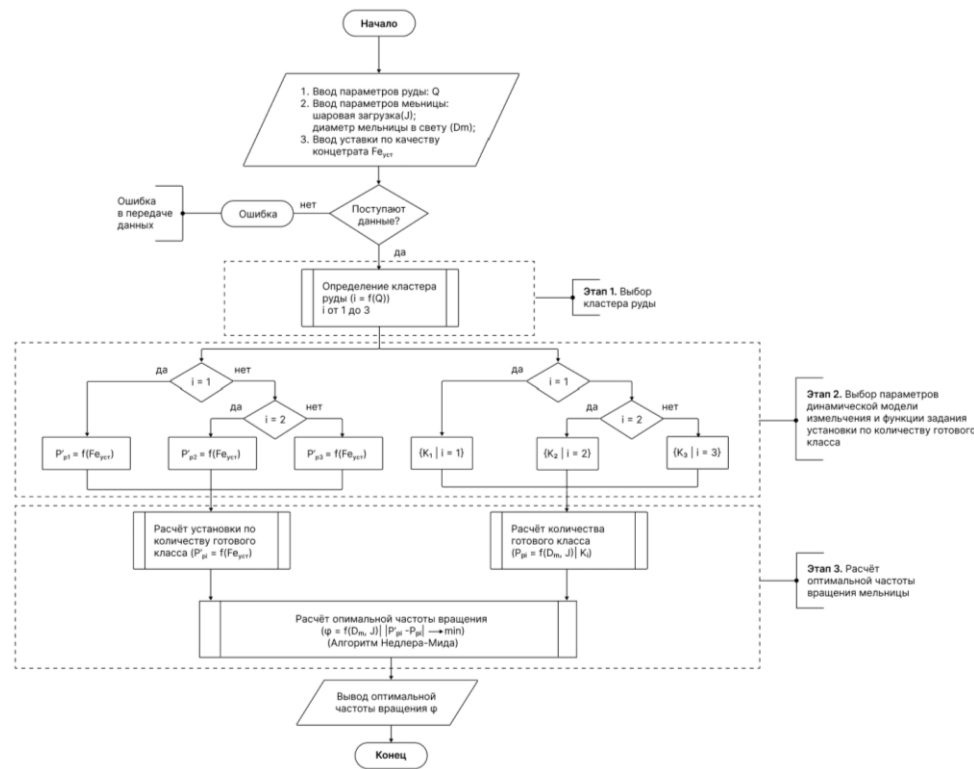


Рисунок 4 – Блок-схема алгоритма вычисления оптимальной частоты вращения барабана мельницы

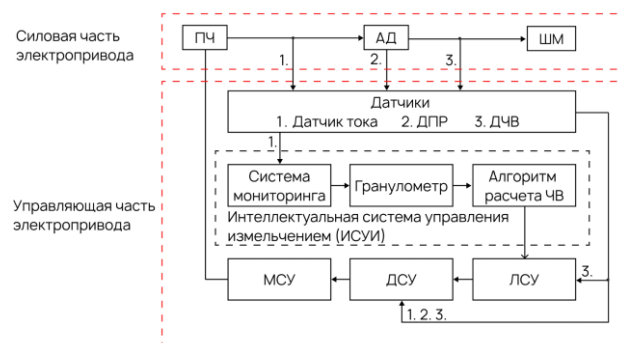


Рисунок 6 – Предлагаемая структура АЭП шаровой мельницы

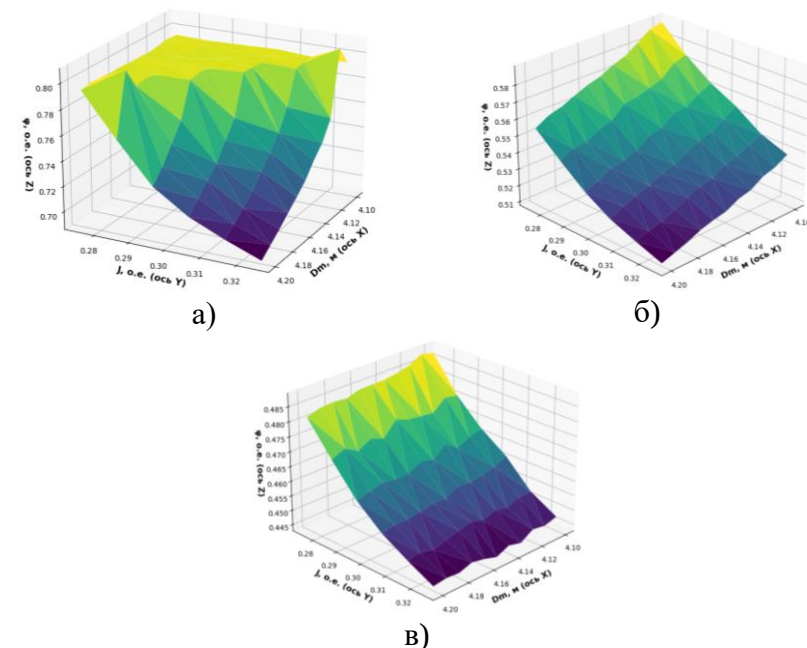


Рисунок 5 – Результат работы алгоритма вычисления оптимальной частоты вращения барабана мельницы:
а) Кластер 1; б) Кластер 2; в) Кластер 3

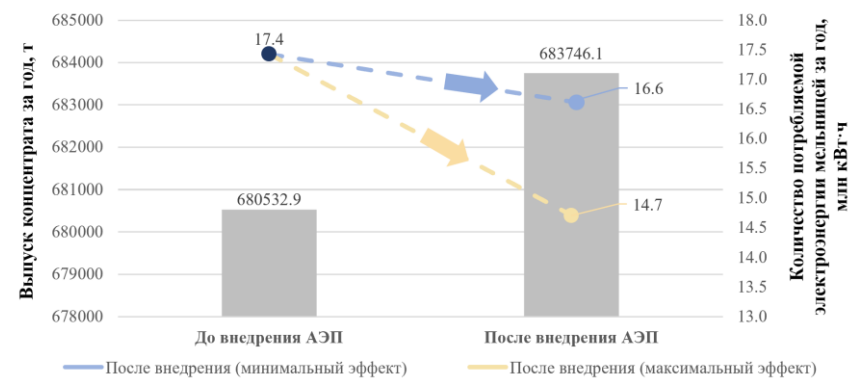


Рисунок 7 – Показатели энергоэффективности до и после внедрения АЭП шаровой мельницы