

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II»

На правах рукописи

Малькова Яна Михайловна



АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД ШАРОВОЙ МЕЛЬНИЦЫ С
ИНТЕГРИРОВАННЫМ МОНИТОРИНГОМ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА
ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ

Специальность 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, доцент
Жуковский Ю.Л.

Санкт-Петербург – 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1 НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ЭФФЕКТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ В ШАРОВЫХ МЕЛЬНИЦАХ.....	10
1.1 Тенденции в развитии современных горнодобывающих предприятий.....	10
1.2 Основные факторы, препятствующие эффективному управлению производственными процессами горно-обогатительного комплекса	12
1.3 Характеристика процесса измельчения	14
1.4 Управление процессом измельчения.....	18
1.5 Мониторинг параметров процесса измельчения.....	21
1.5.1 Определение шаровой загрузки мельницы по формуле Бонда	23
1.5.2 Определение шаровой загрузки мельницы по потребляемой мощности электропривода ...	30
1.5.3 Определение шаровой загрузки на основе тензометрических систем.....	31
1.5.4 Определение шаровой загрузки на основе системы вибромониторинга.....	32
1.6 Высоковольтный электропривод барабанных мельниц	33
1.6.1 Механические структуры электропривода мельниц	34
1.6.2 Силовая часть электропривода мельниц.....	35
1.7 Выводы по главе 1	37
ГЛАВА 2 МОНИТОРИНГ ИЗНОСА ФУТЕРОВКИ БАРАБАНА НА ОСНОВЕ СПЕКТРА ТОКА ПРИВОДНОГО ДВИГАТЕЛЯ ШАРОВОЙ МЕЛЬНИЦЫ.....	39
2.1 Методика исследований	39
2.2 Исследование влияния изменения степени износа футеровки барабана на момент внутримельничной загрузки.....	40
2.2.1 Исходные данные и условия для моделирования процесса измельчения.....	40
2.2.2 Выбор моделей процесса измельчения в шаровой мельнице	42
2.2.3 Моделирование износа футеровки барабана.....	43
2.2.4 Моделирование процесса измельчения.....	46
2.2.5 Установление функциональной связи износа футеровки от спектров момента внутримельничной загрузки.....	54

2.3 Исследование влияния изменения степени износа футеровки на ток приводного двигателя шаровой мельницы.....	56
2.3.1 Исходные данные для моделирования электропривода шаровой мельницы.....	56
2.3.2 Математическое описание асинхронного электродвигателя шаровой мельницы.....	57
2.3.3 Определение износа футеровки барабана с помощью анализа спектра потребляемого тока приводного двигателя шаровой мельницы.....	59
2.4 Выводы по главе 2.....	65
ГЛАВА 3 РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА УПРАВЛЕНИЯ СКОРОСТЬЮ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ШАРОВОЙ МЕЛЬНИЦЫ.....	67
3.1 Математическое описание процесса измельчения в шаровой мельнице	67
3.2 Исходные данные для моделирования процесса измельчения.....	71
3.3 Оптимизация динамической модели шаровой мельницы.....	72
3.3.1 Кластеризация исходных данных и постановка задачи оптимизации.....	72
3.3.2 Алгоритм оптимизации	74
3.3.3 Результаты оптимизации динамической модели шаровой мельницы	77
3.4 Алгоритм управления электродвигателем шаровой мельницы.....	79
3.4.1 Выбор целевой функции для кластеров руды	79
3.4.2 Влияние параметров шаровых мельниц на процесс измельчения	82
3.4.3 Алгоритм вычисления оптимальной частоты вращения электродвигателя шаровой мельницы	84
3.5 Выводы по главе 3.....	88
ГЛАВА 4 АВТОМТИЗИРОВАННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД ШАРОВОЙ МЕЛЬНИЦЫ.....	89
4.1 Структура автоматизированного электропривода шаровой мельницы.....	89
4.2 Реализация высоковольтногоавтоматизированного электропривода мельницы.....	93
4.2.1 Топологии высоковольтных преобразователей частоты.....	95
4.2.2 Двухуровневый инвертор напряжения	96
4.2.3 Многоуровневые инверторы напряжения	98
4.2.4 Каскадный преобразователь частоты.....	101
4.2.5 Выбор топологии преобразователя частоты.....	103

4.3 Моделирование высоковольтного автоматизированного электропривода шаровой мельницы	104
4.3.1 Математическое описание автоматизированного электропривода шаровой мельницы	104
4.3.2 Результаты моделирования автоматизированного электропривода шаровой мельницы ...	110
4.4 Моделирование корректирующих алгоритмов в составе векторной системы управления высоковольтного электропривода шаровой мельницы	118
4.4.1 Моделирование двухдвигательного электропривода без корректирующих алгоритмов ...	120
4.4.2 Моделирование двухдвигательного электропривода с корректировкой задания на момент	121
4.4.3 Моделирование двухдвигательного электропривода с корректировкой задания на момент и на потокосцепление	122
4.5 Выводы по главе 4.....	123
ГЛАВА 5 ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ШАРОВОЙ МЕЛЬНИЦЫ.....	125
5.1 Рынок железорудного концентрата	125
5.2 Расчет технологического эффекта от применения автоматизированного электропривода шаровой мельницы.....	127
5.3 Расчет энергоэффективности от применения автоматизированного электропривода шаровой мельницы	130
5.4 Экономическое обоснование внедрения АЭП шаровой мельницы с интегрированной системой мониторинга параметров шаровой мельницы	133
5.5 Выводы по главе 5.....	136
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	138
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	140
ПРИЛОЖЕНИЕ А Акт о внедрении результатов исследования	152
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Патент на изобретение	153

ВВЕДЕНИЕ

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 вклад как отечественные, так и зарубежные ученые. Вклад в исследование вопросов энергоэффективного управления процессом измельчения внесли: *И.И. Белоглазов, К.Я. Улитенко, О.А. Лемтнев, 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 горно-обогатительных 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., Приложение А).

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,

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 (пункты списка литературы №17, 24, 25, 27, 28, 29, 101, 102, 124, 129, 130), 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 (Приложение Б).

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

ГЛАВА 1 НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ЭФФЕКТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ В ШАРОВЫХ МЕЛЬНИЦАХ

В представленной 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. Рассмотрены способы их мониторинга. Приведены решения на основе электроприводов шаровых мельницы для повышения энергоэффективности процесса измельчения.

1.1 Тенденции в развитии современных горнодобывающих предприятий

На сегодняшний день развитие горнодобывающей промышленности сопровождается реализацией цифровых проектов.

Среди наиболее эффективных технологий, которые внедряют мировые лидеры, можно выделить следующие [65, 71]:

- автономные беспилотные комплексы;
- интегрированные удаленные центры управления;
- цифровые двойники производственных процессов.

В приоритете оказываются технологии, которые обеспечивают управление всей цепочкой создания ценности через сквозное сопровождение производственных процессов. Такой подход возможен только при высоком уровне автоматизации и интеллектуализации предприятия.

Предпосылками к внедрению цифровых технологий, прежде всего, являются увеличение переработки руды и снижение содержания полезных компонентов со временем отработки месторождения. На примере железорудного комбината показано, как данные факторы изменяются с течением времени (рисунки 1.1-1.2).

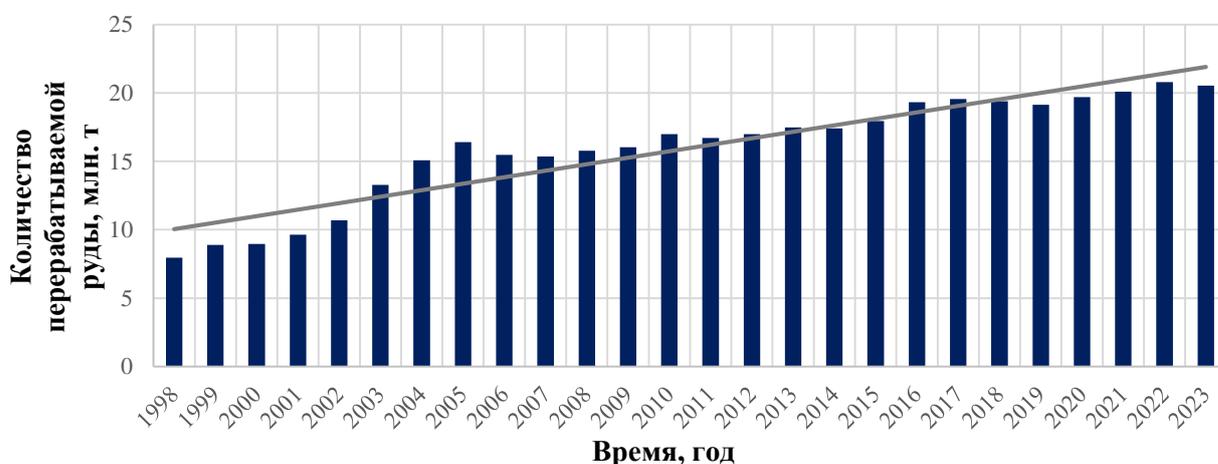


Рисунок 1.1 – Рост количества перерабатываемой руды в период с 1998 по 2023 гг. (составлено автором)

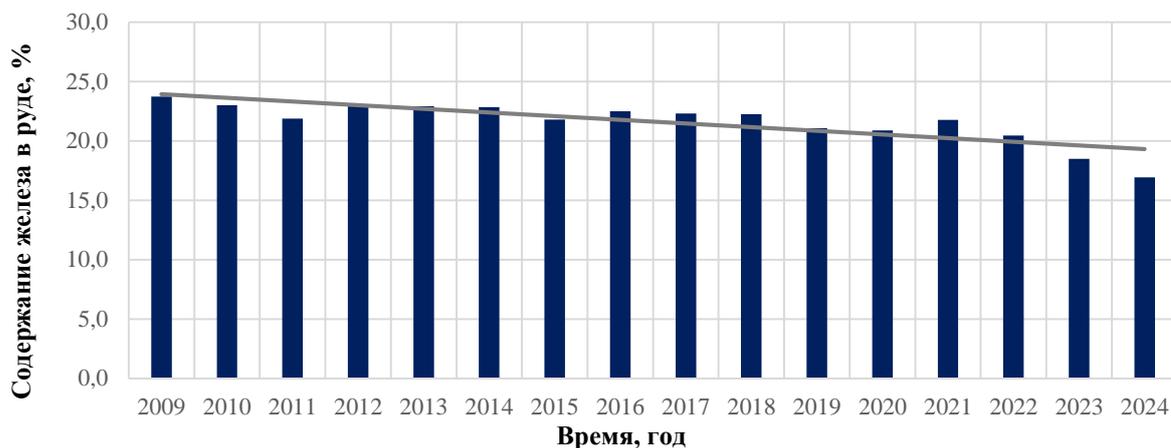


Рисунок 1.2 – Снижение содержания железа в руде в период с 2009 по 2024 гг. (составлено автором)

Представленные факторы усиливают друг друга и требуют пересмотра регламента ведения технологических процессов. Данной тенденции наиболее подвержены горнодобывающие предприятия, которые ведут отработку месторождений более 40-50 лет. Ситуация усугубляется, если научно-технический переход на предприятии не осуществлялся по мере развития технологий. Это проявляется в виде отсутствия базовой автоматизации и низкой готовности к внедрению усовершенствованных систем управления, что в результате приводит к снижению количества готовой продукции и к нерациональному использованию ресурсов.

Производственная цепочка горнодобывающей компании охватывает полный цикл производства продукции – концентрата, окатышей, сплава доре и т.п. Производственная цепочка включает ключевые технологические этапы: геологоразведку, буровзрывные работы (БВР), добычу, транспортировку руды, дробление и обогащение [3]. Хотя дробление и измельчение относятся к стадии подготовки руды к обогащению, этап дробления, как правило, реализуется в виде отдельного комплекса на производственной площадке. Это связано с необходимостью проведения усреднительных операций шихты после транспортировки руды, что обусловило выделение данного процесса на схеме.

На этапе геологоразведки осуществляется формирование базы данных и информационных моделей рудного тела или пласта. С помощью геологического или блочного моделирования осуществляется подсчет запасов с учетом:

- морфологии рудных тел и пластов;
- особенностей распределения полезных компонентов в руде;
- типов и сортов руд.

Планирование горных работ выполняется с использованием количественно-качественных характеристик руды, предоставляемых геологической службой, с обязательным учётом

производственных требований со стороны обогащения – как по объёму переработки, так и по выходу и качеству готового продукта.

При проведении буровзрывных работ формируется развал горной массы, в ходе которого происходит не только физическое дробление породы, но и нарушение естественного залегания рудных тел. Это приводит к смещению первоначальных рудных контуров и интенсивному перемешиванию рудной массы различных литологических типов. В результате снижается однородность добываемого сырья, что в дальнейшем осложняет прогнозирование технологических свойств руды на стадиях её переработки и обогащения.

Добытая руда транспортируется на площадку горно-обогатительного комбината. Как правило, добытую руду делят на две категории: богатые и бедные руды. Перед поступлением на обогащение руды, добытые с разных участков месторождения, направляются на промежуточные склады, где их перемешивают (шихтуют) для усреднения содержания полезного компонента. В результате формируется штабель усреднённой руды, согласно параметрам которого настраивается работа горно-обогатительного комплекса.

1.2 Основные факторы, препятствующие эффективному управлению производственными процессами горно-обогатительного комплекса

Существующий подход в организации управления технологическим переделом обогащения основывается на стабилизации параметров в допустимом диапазоне. Производственные параметры фабрики устанавливаются на определенном уровне с целью обеспечения необходимых плотностных режимов работы технологических агрегатов.

Такое управление обогатительными процессами предполагает единожды проведенную настройку работы всех производственных процессов под одну и ту же руду. Это справедливо при неизменной морфологии руды (обогатимость) и одинаковых физико-механических свойствах (крепость и твердость руды). Фактическая изменчивость исходной руды не позволяет работать фабрике в одном и том же режиме для достижения целевого количества концентрата заданного качества. Как видно из рисунка 1.3, технологические свойства железной руды, поступающей на обогащение, демонстрируют значительную динамику изменений в течение годового цикла работы горно-обогатительного комбината. На рассматриваемом предприятии принята классификация руды по степени обогатимости: легкообогатимая и труднообогатимая. Подача этих типов руд на переработку осуществляется в регламентированном процентном соотношении. Однако анализ представленных данных показывает, что фактические характеристики руды существенно отклоняются от установленных регламентных норм, демонстрируя широкий разброс значений. Такая вариативность сырьевых характеристик обуславливает необходимость внедрения адаптивной системы управления технологическим процессом.

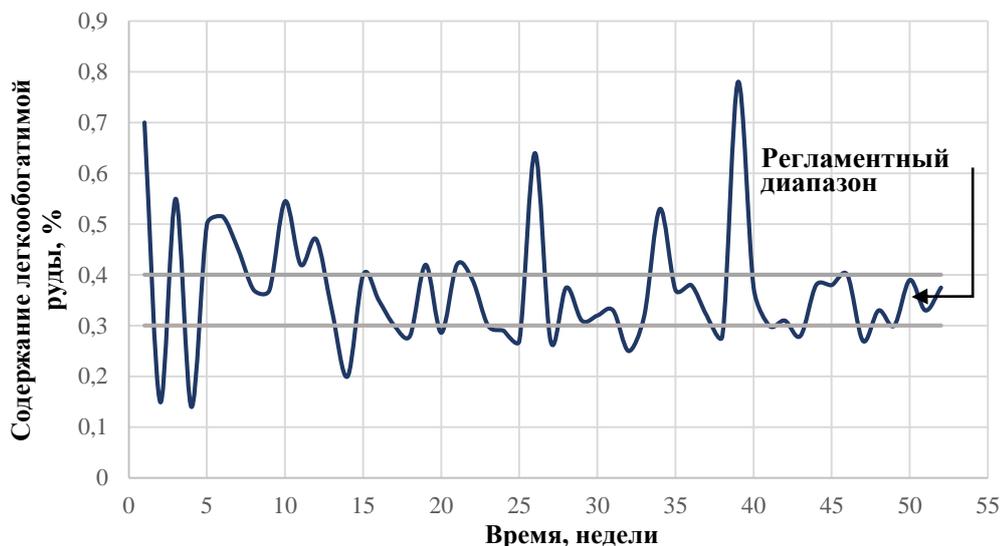


Рисунок 1.3 – Вариативность свойств обогащаемой железной руды в течение года (составлено автором)

В режиме реальной эксплуатации объектов горно-обогатительного комплекса управление агрегатами переводится в ручной режим и эмпирическим путем осуществляется подбор оптимальных параметров производственных процессов под обогащаемую руду. Производство, осуществляющее работу в ручном режиме, нельзя назвать эффективным [30]. В ручном режиме не представляется возможным учесть все взаимосвязи технологических операций, что не позволяет следовать стратегии достижения целевых показателей предприятия при минимизации затрат и ресурсов на производство продукции. В данном случае эффективность ведения горно-обогатительных процессов определяется временем принятия решения оперативным персоналом.

Для повышения эффективности управления технологическими процессами горно-обогатительного комплекса целесообразно определить граничные условия – минимальные и максимальные значения, в рамках которых могут изменяться ключевые производственные параметры. Такие ограничения позволяют обеспечить устойчивость технологического процесса, исключить выход оборудования за пределы безопасной эксплуатации и минимизировать риски возникновения аварийных ситуаций.

На основе установленных границ необходимо разработать и внедрить аналитический модуль, предназначенный для вычисления оптимальных управляющих воздействий. Данный модуль должен использовать данные, поступающие от технологического оборудования и систем контроля, а также учитывать текущее состояние сырьевой базы, параметры износа оборудования и внешние производственные факторы. Оптимизация управляющих воздействий позволит не только поддерживать заданные технологические режимы, но и оперативно адаптироваться к изменяющимся условиям работы.

Реализация такого подхода возможна лишь при наличии подготовленной информационной инфраструктуры предприятия, включающей системы сбора и передачи данных (АСУ ТП), средства мониторинга состояния оборудования и параметров технологического процесса. Также необходимым условием является наличие возможностей дистанционного управления исполнительными механизмами и технологическими агрегатами, что позволяет оперативно корректировать режимы их работы в автоматическом режиме.

Таким образом, внедрение аналитического модуля в составе автоматизированной системы управления открывает возможности для перехода от эмпирического управления к более точному, основанному на математических моделях и реальных данных о состоянии производственных процессов.

Однако, повышение эффективности горнопромышленных процессов затруднено техническими проблемами при развертывании инфраструктуры, вызванными тяжелыми условиями работы техники и контрольно-измерительных устройств. Частым случаем является оценка работы производства по уже готовому продукту без возможности отслеживания процесса обогащения по технологическим операциям производственной цепочки.

Другой причиной, препятствующей достижению эффективности, является инерционность контроля процессов. Несмотря на поддержание необходимых производственных параметров, состояние технологического процесса может подтвердить только лаборатория предприятия. Подготовка, расчет количественно-качественных и водно-шламовых схем и контроль поступающей руды и готового продукта требуют человеческих ресурсов и времени. Анализ свойств руды осуществляется химическими, геофизическими, спектральными и другими методами. Так, в зависимости от способов обогащения руды может пройти несколько производственных циклов перед тем, как будет получено подтверждение о производстве бракованной продукции.

1.3 Характеристика процесса измельчения

Процесс измельчения – процесс подготовки сырья к обогащению за счет уменьшения размеров руды под действием внешних сил, которые преодолевают внутренние силы сцепления, связывающие между собой частицы твердого вещества [2]. Подготовка руды с помощью измельчения заключается в обеспечении необходимого гранулометрического состава (необходимой тонины помола) для раскрытия зерен полезного компонента.

Для процесса измельчения можно выделить следующую целевую задачу – обеспечение оптимального количества готового класса в продукте измельчения.

Применение барабанных мельниц получило широкое распространение на горно-обогатительных комбинатах по всему миру. На сегодняшний день лидером в производстве

измельчительных агрегатов в России является АО «Тяжмаш». Их продукция составляет 55 основных типоразмеров мельниц и включает следующие виды агрегатов [64]:

- мельницы мокрого самоизмельчения (ММС);
- мельницы мокрого полусамоизмельчения (ММПС);
- мельницы шаровые с разгрузкой через решетку (МШР);
- мельницы стержневые с центральной разгрузкой (МСЦ);
- мельницы шаровые с центральной разгрузкой (МШЦ).

Проблематика процесса измельчения обоснована следующими основными особенностями [42]:

- процесс измельчения определяет эффективность последующих процессов обогащения и качество концентрата;
- процесс измельчения является самым энергоемким процессом на горно-обогатительном комбинате и обладает низким КПД;
- процесс измельчения определяет пропускную способность комбината и является основным «узким местом» на предприятии;
- высокие удельные расходы на мелющие тела и футеровку;
- процесс скрыт от наблюдателя;
- техническая сложность в установке приборов мониторинга параметров процесса измельчения.

Опираясь на особенности процесса, целесообразно рассмотреть способы повышения эффективности процесса измельчения, так как это позволит получить мультипликативный эффект для всего технологического передела.

В контексте настоящей работы процесс измельчения рассматривался на железорудном горно-обогатительном комбинате. Для измельчения железных руд актуально рассматривать повышение энергоэффективности процесса измельчения в шаровой мельнице. При обогащении железных руд магнитными способами критически важно не переизмельчить зерна магнетита. Так же, как и при недоизмельчении, полезный компонент может оказаться в хвостах. Переизмельчение характерно для шаровых мельниц, что обусловлено большей площадью контакта, оказываемой мелющими телами на измельчаемую среду.

Большое количество зарубежных и отечественных научных трудов [1, 34, 72, 78, 79] сосредоточено на исследованиях оптимальных режимов измельчения за счет оптимизации плотностных режимов, шаровой загрузки для соответствующих мельниц, а также на выборе геометрии футеровок. С развитием компьютерных мощностей открылись возможности численного моделирования с применением методов дискретных элементов для моделирования поведения сыпучих сред. В.К. Mishra и Raj K. Rajamani были первыми, кто применили метод

дискретных элементов для моделирования шаровых мельниц и оптимизации внутримельничной загрузки [104].

Во многом эффективность процесса измельчения определяется стратегией управления и организацией соответствующих контуров регулирования. В теории управления процессом измельчения до сих пор актуальной задачей является определение объемного заполнения мельницы [30, 40]. Дополнительно, до сих пор отсутствует аппаратная возможность для мониторинга качества процесса измельчения в режиме реального времени для мельниц первой стадии. Это связано с тем, что любое средство КИПиА стремительно изнашивается под действием крупных частиц (+ 2 мм), которые присутствуют в сливе мельницы [30]. В условиях, когда прямое измерение параметров не представляется возможным, многие разработчики стали внедрять подход управления, основанный на математических моделях технологических агрегатов – цифровых двойниках.

Другой задачей, исследованию которой посвящено большое количество работ, является организация системы управления по свойствам измельчаемой руды [31, 41]. Исследователи разработали подход и алгоритмы к управлению параметрами измельчения и флотации на основе непрерывного анализа сортности руды. С учетом дополнительных технологических параметров процессов обогащения осуществляется математическое моделирование рудоподготовки и флотации. По результатам моделирования выполняется расчет уставок на исполнительные механизмы для управления производственными процессами обогащения.

Классический подход в условиях эксплуатации основывается на стабилизации контуров регулирования и не учитывает свойства руды [30].

Для получения стабильных показателей комбината рекомендуется выдерживать состав подаваемой шихты на обогащение в соответствии с композитом. С учетом вариативности руды и большой потребляемой мощности приводных машин целесообразно рассмотреть возможность не только плавного пуска, но и изменения скорости во время процесса измельчения [74].

Алгоритмы управления скоростью вращения барабана шаровой мельницы должны учитывать конструктивные особенности оборудования, стадию измельчения, а также физико-механические свойства перерабатываемой руды. В зависимости от типа полезного ископаемого целевые параметры процесса измельчения различаются, что обусловлено спецификой требований к гранулометрическому составу готового продукта.

Для железосодержащих руд ключевым технологическим показателем является обеспечение оптимального содержания готового класса с минимальным переизмельчением зерен полезного компонента.

Таким образом, функция управления скоростью вращения барабана должна быть адаптирована к текущему качественному составу руды и предусматривать поддержание баланса между степенью разрушения материала и предотвращением излишнего помола.

Среди примеров промышленной эксплуатации регулируемых электроприводов для управления процессом измельчения можно выделить:

- месторождение Тасиаст в Мавритании, Kinross Gold [51];
- месторождение Торомочо в Перу, Minera Chinalco Peru [52];
- месторождение Mount Milligan в Канаде, Thompson Creek Metals [54];
- месторождение в пустыне Атакама в Чили, Sierra Gorda SCM [55];
- Быстринское месторождение в России, ПАО «ГМК «Норильский никель».

Мировые лидеры по производству приводов профилируются на разработке специализированных решений для мельниц, которые включают решения по вычислению оптимальной скорости [50, 57, 61, 63]. Подобные исследования и разработки являются ноу-хау и не раскрываются научному сообществу.

Исследование, по результатам которого написана данная работа, основывается на разработке контура регулирования процессом измельчения на основе применения автоматизированного электропривода и включает три основных аспекта:

1. Учет свойств перерабатываемой руды при формировании управляющих воздействий. Обогащаемость оказывают существенное влияние на динамику процесса измельчения. Для обеспечения устойчивой и эффективной работы системы управления необходимо адаптировать параметры регулирования под изменяющиеся свойства сырья. Это позволяет минимизировать отклонения от заданных технологических режимов и повысить стабильность выходных показателей процесса.

2. Обеспечение оптимального содержания готового класса в продукте измельчения. Целью управления процессом измельчения является получение максимального количества материала в требуемом гранулометрическом составе – так называемом «готовом классе». Контроль за этим параметром необходим для обеспечения высокой эффективности последующих операций обогащения таких, как магнитная или флотационная сепарация. Следовательно, алгоритмы управления должны быть ориентированы на поддержание заданного уровня содержания готового класса с минимальными колебаниями во времени.

3. Мониторинг состояния футеровки барабана. Текущее количество шаровой загрузки и степень износа футеровки непосредственно влияют на энергоэффективность и производительность мельницы [32]. Корректная дозагрузка шаров, в том числе, определяется состоянием футеровки барабана мельницы. Оценка состояния футеровки мельницы осуществляется посредством измерения ее остаточной толщины. Данный параметр определяется

при внутреннем осмотре мельницы путем замера ее текущего диаметра. Прямое измерение толщины футеровки в условиях эксплуатации затруднено. Предложен подход к ее оценке по косвенным характеристикам электропривода, в частности – по спектру тока статора двигателя. Интеграция данных о состоянии внутримельничной среды в систему управления позволяет повысить точность формирования управляющих воздействий и продлить срок службы оборудования.

Реализация данного подхода открывает возможность повышения энергоэффективности, снижения удельных затрат и увеличения выхода целевого продукта на горно-обогатительных комбинатах.

1.4 Управление процессом измельчения

Управление процессом измельчения осуществляется с помощью отдельной локальной автоматизированной системы управления (ЛАСУ). Управление процессом измельчения строится по принципу обеспечения готового класса в заданном количестве. Без учета контуров управления системой смазки и контроля за работой механических узлов контуры управления процессом измельчения организуются согласно основным параметрам данного процесса (таблица 1.1) [30]:

- количество подаваемой руды в мельницу;
- количество подаваемой воды в мельницу;
- регулирование подаваемой воды в зумпф насос-гидроциклонной установки (при работе мельницы в замкнутом цикле);
- количество подаваемых шаров в мельницу.

Регулирование подаваемой руды в мельницу. Расчет плановой производительности фабрики осуществляется согласно технологическому регламенту предприятия для переработки руды, актуальным количественно-качественным характеристикам руды и заданной производительности технологических агрегатов. Увеличение производительности по исходной руде является распространенной тенденцией для горно-обогатительных комбинатов. В первую очередь, узким местом для увеличения производительности фабрики являются измельчительные агрегаты.

Максимальная производительность мельницы регламентируется количеством готового класса в сливе мельницы, необходимого для обеспечения извлечения полезных компонентов на определенном уровне.

Регулирование производительностью осуществляется по принципу стабилизации максимально возможного количества перерабатываемой руды заданного качества в соответствии с содержанием готового класса в продукте измельчения. Завышение производительности приводит к загрублению слива мельницы и к уменьшению содержания в нем готового класса,

поэтому недопустимо с точки зрения качества. Работа каждого измельчительного агрегата характеризуется индивидуальной эмпирической зависимостью количества готового класса в продукте измельчения от производительности по исходной руде (рисунок 1.4).

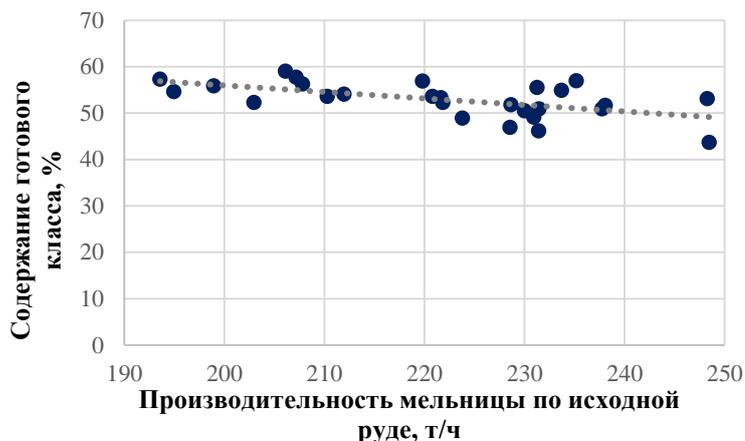


Рисунок 1.4 – Зависимость содержания готового класса в продукте измельчения от производительности по исходной руде на примере шаровой мельницы 2 стадии измельчения железной руды (составлено автором)

Регулирование подаваемой воды в мельницу. Регулирование воды в мельницу необходимо для поддержания необходимого плотностного режима. Для мельниц с центральной разгрузкой плотность пульпы определяет длительность процесса измельчения и позволяет регулировать скорость прохождения материала через агрегат. Повышенная плотность относительно номинальной приводит к переизмельчению руды ввиду увеличения времени измельчения руды. Увеличение времени измельчения обусловлено длительным присутствием материала в мельнице. Уменьшение плотности относительно номинальной приводит к недоизмельчению. Переизмельчение и недоизмельчение приводят либо к браку продукции, либо снижают эффективность обогащения и приводят к росту удельных показателей.

Регулирование подаваемой воды в зумпф насос-гидроциклонной установки. Мельницы второй и третьей стадий измельчения, как правило, работают в замкнутом контуре с насос-гидроциклонными установками (НГЦУ). За счет регулирования плотности питания НГЦУ осуществляется управление циркуляционными нагрузками, что позволяет загружать готовый класс или делать его тоньше, и, как следствие, увеличивать или уменьшать количество подаваемой руды в мельницу.

Регулирование шарового заполнения мельницы. Измельчение руды в барабанных мельницах осуществляется под действием разных механизмов разрушения и за счет следующих пар столкновений в барабане мельницы:

- частица-частица;
- частица-мельющее тело;
- частица-футеровка барабана мельницы.

Основная часть разрушений осуществляется под действием мелющих тел. Пульпа заполняет пространство между мелющими телами. При снижении зазора между измельчающими телами в продукте измельчения преобладают мелкие фракции [2]. В случае применения шаровых мельниц для достижения оптимального помола, как правило, мелющую загрузку комбинируют из шаров разного диаметра. Для шаров величина зазора между мелющими телами меньше, чем для стержней. Это может привести к переизмельчению руды, если не осуществлять управление по руде и мониторинг актуальной шаровой загрузки.

В процессе измельчения шаровая загрузка подвергается износу, поэтому необходимо осуществлять дозагрузку шаров для поддержания разрушения и качества продукта. По мере износа футеровки мельницы необходимо увеличивать количество шаров в соответствии с увеличением рабочего объема. Управление шаровой загрузкой необходимо для стабилизации уровня заполнения шаров, при котором осуществляется максимальное разрушение руды и стабилизация количества готового класса.

Дозагрузка шаров производится в загрузочный бункер регулярно один раз в сутки без останова мельницы. Дозагрузка может осуществляться ручным и автоматизированным способами. Ручной способ осуществляется с помощью кубеля, который переносится к мельнице краном, и с помощью автоматизированного способа – с помощью шароагрегатной машины [2, 32].

Необходимое количество догружаемых шаров определяется ежесуточным расчетным согласно классической теории износа шаров [32]. Исходными данными для расчета являются количество переработанной руды и удельная норма количества шаров на одну тонну перерабатываемой руды.

Замер уровня мелющих тел в мельнице производится около двух раз в месяц согласно шаблону. Далее, количество мелющих тел в барабане мельницы определяется по формуле Бонда.

Данный подход не позволяет определить фактический уровень заполнения мельницы мелющими телами по следующим причинам:

- вариативность физико-механических свойств руды – удельная норма шаров на одну тонну перерабатываемой руды не постоянна;
- низкая дискретность измерения шаровой загрузки – ограниченное время и количество простоев измельчительных агрегатов;
- высокая погрешность измерений – человеческий фактор, который обусловлен ручным способом измерения уровня заполнения с помощью лазерной рулетки и шаблона.

Стабилизация определенного количества готового класса при заданной производительности не может быть достигнута на протяжении всего процесса измельчения, так

как нет фактического понимания и информации об актуальном уровне шаровой загрузки в мельнице и состояния ее футеровки.

Дополнительное косвенное регулирование. В процессе обогащения руда на фабрику подается с разных участков месторождения, что приводит не только к высокой вариативности содержания полезных компонентов, но и к высокой изменчивости физико-механических свойств перерабатываемых руд. Преимущественно это влияет на параметр измельчаемости и, как следствие, на количество готового класса и на извлечение полезных компонентов. Для исключения данного фактора дополнительно осуществляется управление крупностью подаваемой шихты на фабрику. Регулирование крупности осуществляется в операции дробления: при переработки более крепких руд уменьшается щелевой зазор дробилок. Данный способ управления позволяет до определенной степени нивелировать вариативность свойств руды, но приводит к снижению производительности дробильного комплекса. Требуется определенный запас шихты на промежуточных усреднительных складах фабрики. Данный способ управления является вспомогательным, как правило, шихтование осуществляется по содержанию извлекаемых полезных компонентов [2].

Таблица 1.1 – Контуры управления ЛАСУ шаровой мельницы (составлено автором на основе [30])

Контур управления	Первичные измерительные приборы	Исполнительный механизм	Задача регулирования
Стабилизация подачи руды в мельницу	Конвейерные весы, датчик скорости	Частотно-регулируемый электропривод конвейера	Управление производительностью мельницы
Стабилизация подачи воды в мельницу по руде («руда-вода»)	Конвейерные весы, датчик скорости, расходомер воды	Управляемый клапанный регулятор расхода воды	Управление плотностными режимами в мельнице
Стабилизация шаровой загрузки	Измерители мощности, вибромониторинг, акустика, тензодатчики, датчики давления в смазочной системе, шаблонный замер	Ручная загрузка с помощью кубеля, шароzaгрузочная машина	Поддержание заданного шарового заполнения
Стабилизация плотности питания гидроциклонной установки	Расходомер воды, уровень в зумпфе	Частотно-регулируемый электропривод НГЦУ	Управление циркуляционной нагрузкой

1.5 Мониторинг параметров процесса измельчения

Эффективность работы шаровых мельниц определяется максимальным количеством готового класса, которое можно получить при измельчении руды. Основным параметром, по

которому осуществляется управление процессом измельчения, является объемное заполнение барабана мельницы. Ключевой проблемой управления измельчением является невозможность прямого измерения объемного заполнения стандартными средствами КИПиА. Среди применяемых способов мониторинга объемного заполнения можно выделить следующие [84]:

1. вибромониторинг;
2. акустический мониторинг;
3. мониторинг по энергетическим характеристикам;
4. использование тензометрических систем на барабанах мельниц;
5. оценка давления масла в смазочной системе коренных подшипников мельницы.

В совокупности с технологическими параметрами, которые поступают в системы АСУ ТП предприятия представленные способы позволяют осуществлять мониторинг шаровой загрузки.

В рамках диссертационного исследования подробно рассмотрены и проанализированы существующие методы мониторинга, предназначенные для оценки количества шаровой загрузки в шаровой мельнице. Данные методы получили широкое применение в промышленности благодаря своей практической реализуемости и возможности интеграции в системы автоматизированного управления технологическим процессом.

Одним из важных этапов функционирования систем мониторинга является их калибровка, которая осуществляется с использованием ручных замеров. Ручной способ измерения шаровой загрузки заключается в непосредственном определении уровня заполнения барабана при остановленной мельнице с применением специальных шаблонов или лазерных измерительных устройств. В условиях отсутствия автоматизированных систем мониторинга ручной замер используется в качестве основного метода контроля за состоянием внутримельничной загрузки [32].

Вместе с тем ручной способ обладает рядом существенных ограничений, таких как дискретность измерений, зависимость от человеческого фактора и необходимость остановки оборудования, что снижает оперативность получения данных. В связи с этим, в работе рассматриваются более эффективные и перспективные методы, позволяющие осуществлять непрерывный мониторинг параметров шаровой загрузки: вибромониторинг; мониторинг по энергетическим характеристикам; тензометрические системы [16, 38, 39, 35, 41, 48, 88].

Сравнение рассматриваемых способов мониторинга приведено в таблице 1.2. Несмотря на то, что рассматриваемые системы мониторинга позволяют определять объемное заполнение шаровой загрузки, требуется система, которая позволит осуществлять учет износа футеровки и позволит обеспечить синхронизацию с технологическими параметрами процесса измельчения.

Таблица 1.2 – Сравнение способов оценки шаровой загрузки (составлено автором на основе [6, 38, 39, 35, 41, 48, 88])

Критерии сравнения/ Способ мониторинга	Ручной замер	Энергетические характеристики	Вибро-мониторинг	Тензометрические системы
Тип мониторинга	Требует останов	Непрерывный	Непрерывный	Непрерывный
Измеряемый параметр	Линейные замеры	Потребляемая активная мощность электропривода	Вибрация	Деформация
Особенности	Требует проведения множества замеров	Низкая чувствительность к изменению измеряемого параметра	Влияние вибрации соседних агрегатов на измерения	Требует частого технического обслуживания, сложность системы, высокая стоимость
Способ оценки	Расчет по формуле Бонда	Анализ потребляемой мощности	Определение характерных гармоник	Определение нижнего и верхнего положений загрузки

1.5.1 Определение шаровой загрузки мельницы по формуле Бонда

Шаровая загрузка – общее количество или вся масса шаров, находящихся в мельнице в данный момент времени. По мере износа шаров в процессе измельчения руды осуществляется дозагрузка шаров. Дозагрузка – регулярная добавка шаров в мельницу с целью компенсации их износа.

Общий вес шаровой загрузки в мельнице $G_{ш}$, (т) вычисляется согласно рабочему полезному объему мельницы V , (m^3), коэффициенту заполнения φ , (%) и объемному весу шаров в насыпе $\gamma_{ш}$, (t/m^3) (формула 1.1) [32].

$$G_{ш} = \frac{\varphi}{100} V \gamma_{ш} \quad (1.1)$$

Вычисление полезного объема мельницы осуществляется согласно формуле объема цилиндра.

Согласно обобщенной формуле Разумова К.А. [32] скорость износа шаров пропорциональна их весу или диаметру в степени n (формула 1.2).

$$\frac{dG_{ш}}{dt} = -K_{из} D_{ш}^n, \quad (1.2)$$

где $K_{из}$ – коэффициент износа;

$D_{ш}$ – диаметр шара, мм;

n – эмпирический показатель, который зависит от скоростного режима мельницы, от качества металла и т.д.

Формула, предложенная Разумовым К.А., может соответствовать как «объемно-весовой» гипотезе износа шаров (гипотезе Девиса при $n = 3$), так и гипотезе, при которой скорость износа

пропорциональна их поверхности (гипотезе Мартселла-Прентиса при $n = 2$). Соответствие первой или второй гипотезе определяется эмпирическим показателем n .

Основной гипотезой износа шаров принято считать объемно-весовую гипотезу Девиса.

Коэффициент заполнения характеризует степень заполненности барабана мельницы шарами относительно полезного объема. Коэффициент заполнения является одним из основных параметров при управлении процессом измельчения, так как производительность мельницы по исходной руде пропорциональна данному коэффициенту, возведенному в степень (формула 1.3) [32].

$$Q = K\varphi^n, \quad (1.3)$$

где Q – производительность мельницы по исходной руде, т/ч;

K – коэффициент пропорциональности;

n – эмпирический коэффициент ($n = 0,6-1$).

Коэффициент заполнения для каждой конкретной мельницы выбирается эмпирическим путем и в процессе эксплуатации измельчительного агрегата отстраивается под конкретную руду. В общем случае выбор данного коэффициента осуществляется в диапазоне от 30% до 45%.

Вес догружаемых шаров устанавливается на основании опытных данных о расходе шаровой стали, необходимом для измельчения данной руды в заданных условиях (мельница данного размера и принятый режим работы мельницы). Вес дозагрузки определяется двумя способами:

1. Дозагрузка шаров определяется с помощью удельного расхода стали на одну тонну перерабатываемой руды.

2. Дозагрузка шаров определяется с помощью коэффициента $K_{из}$. Коэффициент определяет относительную потерю веса шаров в единицу времени на одну тонну загружаемых шаров в барабан мельницы.

На практике количество дозагрузки более удобно определять с помощью удельного расхода стали на одну тонну перерабатываемой руды.

Актуальной задачей является определение коэффициента заполнения шаровой загрузки в процессе эксплуатации мельниц. При снижении коэффициента заполнения относительно номинального значения гранулометрические характеристики продукта измельчения ухудшаются. Это приводит к снижению качества продукции и к снижению энергоэффективности процесса измельчения.

На предприятиях, где наблюдается низкий уровень автоматизации, замеры шаровой загрузки осуществляются ручным способом. Количество замеров снижается до минимально достаточного согласно действующим регламентам с целью снижения времени простоев. Обычно минимально достаточное количество замеров составляет 2 раза в месяц. Еще один фактор,

который необходимо учитывать при проведении замеров шаровой загрузки – износ футеровки. Износ футеровки осуществляется неравномерно по длине барабана мельницы, что снижает точность проведения замеров. Соответственно, по мере износа футеровки увеличивается как рабочий объем мельницы, так и вес шаров для поддержания заданного коэффициента заполнения мельницы.

Разница веса шаровой загрузки при новой и при изношенной футеровке может составлять до 10 т.

Согласно формуле Бонда, коэффициент заполнения (φ) вычисляется следующим образом (рисунок 1.5) (формула 1.4).

$$\varphi = 50 - 127 \frac{b}{D}, \quad (1.4)$$

где b – расстояние от центра барабана до поверхности шаров, м;

D – диаметр мельницы в свету, м.

Расстояние от центра барабана до поверхности шаров (b) вычисляется по формуле 1.5.

$$b = a - R, \quad (1.5)$$

где a – высота по вертикали от поверхности шаров до поверхности барабана мельницы, м;

R – радиус барабана мельницы, м.

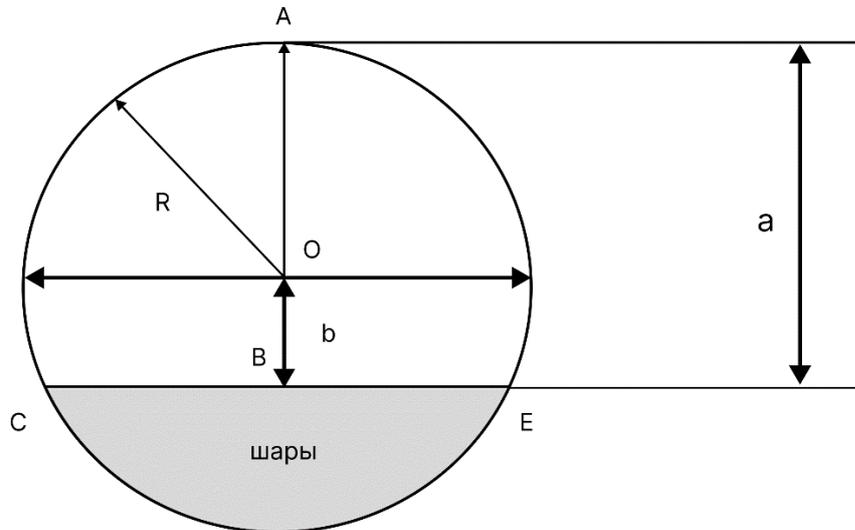


Рисунок 1.5 – Определение коэффициента заполнения [32]

Согласно изложенной методике выполнены экспериментальные исследования по определению шаровой загрузки. Оценка шаровой загрузки осуществлялась для мельниц одинакового типоразмера (МШЦ 4,5х6), установленных на параллельных секциях обогащения. Устанавливать регулярный контроль за шаровой загрузкой конкретной мельницы с помощью ручного замера затруднительно, так как останов мельниц согласуется в соответствии с планами по переработке руды ГОКа и с планами планово-предупредительных работ по обслуживанию

мельничных агрегатов. Перед проведением ручных замеров шаровой загрузки мельницы необходимо остановить подачу руды и дождаться полной разгрузки мельницы.

По длине барабана мельницы осуществлялись геометрические измерения по три замера с помощью лазерной рулетки:

- диаметра мельницы (D) в пяти точках;
- высоты по вертикали от поверхности шаров до поверхности барабана мельницы (a)

в трех точках с помощью специального шаблона (рисунок 1.5).

В результате проведенных замеров по всем точкам выполнены расчеты средних значений данных параметров.

В таблицах 1.3-1.4 представлены результаты замеров, расчетов коэффициента заполнения и шаровой загрузки на основе средних значений диаметра мельницы и высоты по вертикали от поверхности шаров до поверхности барабана мельницы по формулам 1.1 и 1.4-1.5 при насыпном удельном весе шаров $\gamma_{ш} = 4,76 \text{ т/м}^3$. Полезный объем мельницы вычисляется согласно формуле объема цилиндра.

Для выбранных мельниц (МШЦ №1 – МШЦ №4) шаровая загрузка регламентируется в соответствии с коэффициентом заполнения $\varphi = 30\text{-}33\%$. Расчет шаровой загрузки осуществлялся на сопоставимом промежутке времени.

Согласно расчетам, для всех мельниц коэффициент шарового заполнения не всегда соответствует установленному диапазону:

- для мельницы МШЦ №1 одно из шести полученных значений шаровой загрузки выходит за установленный диапазон коэффициента заполнения;
- для мельницы МШЦ №2 два из шести полученных значений шаровой загрузки выходит за установленный диапазон коэффициента заполнения;
- для мельницы МШЦ №3 три из шести полученных значений шаровой загрузки выходит за установленный диапазон коэффициента заполнения;
- для мельницы МШЦ №4 пять из шести полученных значений шаровой загрузки выходит за установленный диапазон коэффициента заполнения.

По результатам измерений установлено, что диаметр мельницы может изменяться в диапазоне от 4,14 м до 4,22 м на рассматриваемом временном интервале. При этом согласно формулам 1.1 и 1.4-1.5 можно построить зависимость изменения шаровой загрузки от диаметра мельницы (рисунок 1.6). Результаты вычислений показывают, что величина максимального абсолютного отклонения шаровой загрузки мельницы составляет 10,8 тонн при изменении её диаметра в заданных пределах. Таким образом, неверное определение диаметра мельницы приводит к некорректной дозагрузке шаров и, как следствие, к нарушению гранулометрии продукта измельчения и росту удельного расхода мелющих тел.

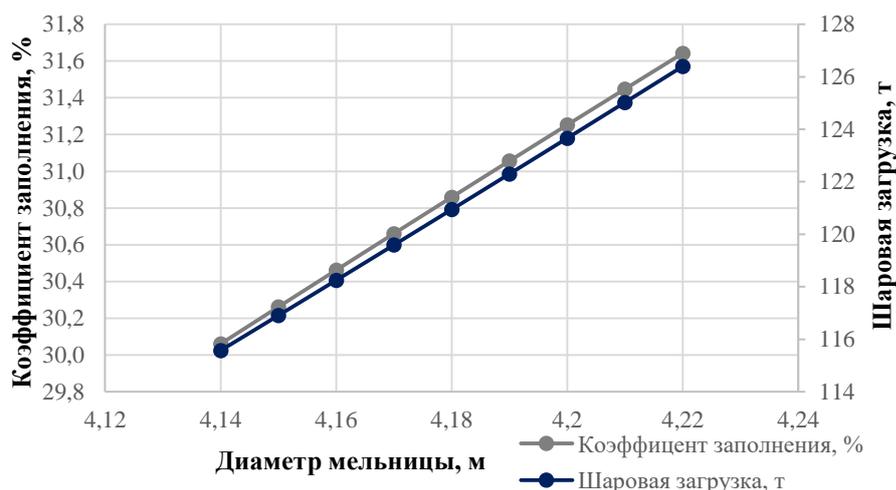


Рисунок 1.6 – Зависимость изменения шаровой загрузки от диаметра мельницы (составлено автором)

Проведенные исследования показали, что метод определения шаровой загрузки по формуле Бонда характеризуется следующими особенностями:

1. Нельзя достигнуть высокой точности определения шаровой загрузки из-за: высокого человеческого фактора при проведении измерений; неравномерного износа футеровки; неровности шаровой поверхности и условий проведения замеров.
2. Нельзя обеспечить непрерывный мониторинг шаровой загрузки.
3. Осуществляются дополнительные потери производительности по исходной руде из-за вынужденных остановов для проведения измерений.
4. Необходимо осуществлять подсчет количества перерабатываемой руды, относительно которой осуществляется расчет расхода шаровой стали. С учетом изменчивости физико-механических свойств руды расчет требуемого количества шаровой дозагрузки необъективно определять только по количеству.
5. Отсутствует понимание об актуальном количестве шаровой загрузки.

Обозначенные недостатки рассматриваемого способа подкрепляются фактором высокой инерционности в выявлении первопричины отклонения качества продукта измельчения. Если причиной отклонения является недостаточное количество шаровой загрузки, это займет определенное время для проведения опробований, подготовки ВШС и определения актуального шарового заполнения. Ложное определение первопричины может способствовать снижению нагрузки на секцию.

Таблица 1.3 – Расчет шаровой загрузки по формуле Бонда для мельниц 1 и 2 (составлено автором)

Параметр	Точка замера	МШЦ 4,5х6 (1)						МШЦ 4,5х6 (2)					
		Дата						Дата					
		25.11. 22	11.12. 22	20.12. 22	04.01. 23	23.07. 23	31.07. 23	30.11. 22	08.12. 22	09.01. 23	15.03. 23	28.07. 23	05.08. 23
Диаметр (D), м	D_1	4,2	4,2	4,19	4,19	4,2	4,2	4,16	4,18	4,16	4,13	4,18	4,19
		4,2	4,2	4,19	4,19	4,21	4,21	4,17	4,18	4,17	4,14	4,18	4,19
		4,2	4,2	4,19	4,19	4,22	4,21	4,17	4,18	4,18	4,15	4,18	4,19
	D_2	4,2	4,2	4,2	4,2	4,2	4,21	4,18	4,18	4,18	4,16	4,19	4,19
		4,2	4,2	4,2	4,2	4,2	4,21	4,17	4,18	4,18	4,14	4,2	4,19
		4,21	4,19	4,2	4,2	4,2	4,21	4,18	4,18	4,18	4,15	4,19	4,19
	D_3	4,2	4,17	4,19	4,2	4,23	4,2	4,17	4,18	4,17	4,14	4,18	4,19
		4,2	4,16	4,19	4,2	4,24	4,2	4,17	4,18	4,18	4,14	4,18	4,18
		4,2	4,17	4,18	4,2	4,24	4,21	4,17	4,18	4,17	4,14	4,19	4,2
	D_4	4,21	4,17	4,2	4,2	4,215	4,23	4,17	4,19	4,17	4,14	4,18	4,19
		4,21	4,17	4,2	4,21	4,215	4,23	4,17	4,18	4,17	4,15	4,19	4,18
		4,21	4,17	4,19	4,21	4,215	4,23	4,18	4,18	4,18	4,15	4,19	4,19
	D_5	4,21	4,19	4,18	4,19	4,215	4,23	4,16	4,18	4,16	4,15	4,19	4,2
		4,21	4,18	4,18	4,2	4,215	4,23	4,17	4,18	4,17	4,15	4,19	4,2
		4,22	4,18	4,17	4,2	4,215	4,24	4,17	4,18	4,17	4,14	4,19	4,18
Высота (a), м	a_1	2,75	2,62	2,75	2,78	2,72	2,71	2,8	2,72	2,78	2,72	2,71	2,69
		2,75	2,62	2,74	2,76	2,72	2,71	2,79	2,72	2,76	2,7	2,71	2,71
		2,75	2,62	2,73	2,75	2,72	2,71	2,78	2,72	2,76	2,7	2,71	2,68
	a_2	2,73	2,62	2,68	2,73	2,7	2,69	2,73	2,7	2,73	2,69	2,69	2,68
		2,75	2,59	2,69	2,72	2,69	2,69	2,75	2,7	2,73	2,7	2,69	2,68
		2,75	2,64	2,68	2,71	2,69	2,67	2,76	2,71	2,72	2,69	2,69	2,69
	a_3	2,73	2,66	2,73	2,76	2,72	2,72	2,79	2,74	2,78	2,73	2,71	2,7
		2,73	2,67	2,72	2,76	2,71	2,7	2,77	2,74	2,75	2,71	2,71	2,7
		2,73	2,66	2,72	2,74	2,72	2,71	2,76	2,74	2,77	2,72	2,71	2,7
Средние значения, м	D_{cp}	4,21	4,18	4,19	4,20	4,22	4,22	4,17	4,18	4,17	4,14	4,19	4,19
	a_{cp}	2,74	2,63	2,72	2,75	2,71	2,70	2,77	2,72	2,75	2,71	2,70	2,69
	b_{cp}	0,64	0,54	0,62	0,65	0,60	0,59	0,68	0,63	0,67	0,63	0,61	0,60
Коэфф-т заполнения, %	φ	30,7	33,6	31,2	30,5	31,9	32,1	29,2	30,8	29,7	30,6	31,5	31,9
Шаровая загрузка, т	$G_{ш}$	125,9	136,1	126,9	124,4	131,2	132,5	118,0	124,9	119,8	121,7	127,9	129,8

Таблица 1.4 – Расчет шаровой загрузки по формуле Бонда для мельниц 3 и 4 (составлено автором)

Параметр	Точка замера	МШЦ 4,5х6 (3)						МШЦ 4,5х6 (4)					
		Дата						Дата					
		04.12. 22	10.12. 22	01.01. 23	14.03. 23	26.07. 23	05.08. 23	01.12. 22	06.12. 22	15.12. 22	27.02. 23	26.07. 23	04.08. 23
Диаметр (D), м	D ₁	4,21	4,18	4,17	4,16	4,19	4,19	4,2	4,18	4,17	4,19	4,21	4,23
		4,19	4,18	4,18	4,17	4,19	4,19	4,2	4,18	4,18	4,2	4,21	4,21
		4,19	4,18	4,18	4,16	4,18	4,19	4,2	4,19	4,19	4,2	4,21	4,22
	D ₂	4,17	4,17	4,18	4,16	4,18	4,2	4,2	4,18	4,2	4,2	4,21	4,21
		4,18	4,17	4,18	4,16	4,18	4,19	4,2	4,19	4,2	4,2	4,2	4,23
		4,17	4,15	4,18	4,16	4,18	4,2	4,2	4,19	4,2	4,2	4,2	4,22
	D ₃	4,17	4,17	4,19	4,15	4,18	4,2	4,2	4,19	4,2	4,2	4,2	4,21
		4,18	4,17	4,19	4,15	4,17	4,2	4,2	4,18	4,21	4,2	4,21	4,2
		4,18	4,17	4,19	4,16	4,18	4,21	4,2	4,19	4,2	4,2	4,2	4,22
	D ₄	4,18	4,16	4,18	4,16	4,18	4,2	4,2	4,2	4,21	4,19	4,21	4,23
		4,18	4,17	4,18	4,16	4,18	4,2	4,2	4,2	4,21	4,2	4,2	4,22
		4,19	4,16	4,18	4,16	4,18	4,2	4,2	4,2	4,22	4,2	4,21	4,21
	D ₅	4,18	4,18	4,17	4,15	4,19	4,19	4,2	4,18	4,21	4,2	4,2	4,2
		4,17	4,18	4,17	4,16	4,19	4,19	4,2	4,18	4,19	4,2	4,21	4,22
		4,18	4,18	4,17	4,17	4,19	4,2	4,2	4,17	4,18	4,2	4,21	4,21
Высота (a), м	a ₁	2,75	2,66	2,8	2,71	2,64	2,77	2,76	2,82	2,92	2,65	2,8	2,69
		2,75	2,65	2,8	2,68	2,64	2,74	2,77	2,8	2,85	2,64	2,79	2,71
		2,75	2,65	2,8	2,69	2,64	2,76	2,75	2,76	2,88	2,64	2,78	2,68
	a ₂	2,74	2,63	2,74	2,68	2,6	2,76	2,74	2,75	2,87	2,61	2,77	2,68
		2,73	2,64	2,73	2,68	2,6	2,75	2,77	2,75	2,85	2,6	2,76	2,68
		2,72	2,63	2,74	2,68	2,6	2,75	2,76	2,74	2,82	2,61	2,78	2,69
	a ₃	2,74	2,67	2,78	2,73	2,61	2,77	2,76	2,79	2,85	2,65	2,78	2,7
		2,77	2,67	2,78	2,71	2,61	2,74	2,76	2,79	2,85	2,63	2,78	2,7
		2,79	2,66	2,78	2,71	2,61	2,76	2,76	2,79	2,84	2,64	2,78	2,7
Средние значения, м	D _{ср}	4,18	4,17	4,18	4,16	4,18	4,20	4,20	4,19	4,20	4,20	4,21	4,22
	a _{ср}	2,75	2,65	2,77	2,70	2,62	2,64	2,76	2,76	2,78	2,86	2,63	2,78
	b _{ср}	0,66	0,57	0,68	0,62	0,53	0,54	0,66	0,67	0,68	0,76	0,53	0,67
Коэфф-т заполнения, %	φ	30,0	32,8	29,3	31,2	34,0	33,5	30,2	29,8	29,5	27,0	34,1	29,8
Шаровая загрузка, т	G _ш	121,6	132,2	118,4	124,9	138,0	136,9	123,4	121,1	120,5	110,4	139,7	122,6

1.5.2 Определение шаровой загрузки мельницы по потребляемой мощности электропривода

На горно-обогатительных фабриках показатель мощности мельницы часто используется как индикатор степени заполнения шаров [40, 84]. Данный показатель стараются поддерживать на максимальном уровне. Потребляемая мощность мельницы зависит от других производственных параметров таких, как плотность пульпы и конфигурация футеровки.

Показатель потребляемой мощности мельницы характеризуется нелинейной зависимостью относительно уровня шаровой загрузки [78]. Потребляемая мощность достигает насыщения при определенных уровнях шаровой загрузки, как правило, начиная с 40% заполнения мельницы (конкретное значение зависит от типа оборудования).

В работе [101] отмечается, что сигнал потребляемой мощности имеет низкую чувствительность к изменениям количества измельчаемого материала. Данное явление объясняется тем, что основную массу загрузки мельницы составляют мелющие шары, вследствие чего большая доля потребляемой энергии расходуется на их подъем внутри вращающегося барабана. В условиях недостаточного или избыточного заполнения мощность мельницы может изменяться незначительно. При этом относительно небольшое изменение мощности может быть причиной увеличения шаровой загрузки более, чем на 1% [78].

Данная особенность в работе агрегата требует более сложной и точной отстройки системы мониторинга по потребляемой мощности для исключения перегрузки или недогрузки измельчительного агрегата, а также учета плотности пульпы и износа футеровки.

На примере мельницы МШЦ 4,5х6 продемонстрировано изменение потребляемой активной мощности электропривода при дозагрузке шаров (рисунок 1.7). Изменение потребляемой мощности рассматривается в течение трех смен:

- 1 смена: 03.01.2024 20:00 – 04.01.2024 08:00;
- 2 смена: 04.01.2024 08:00 – 04.01.2024 20:00;
- 3 смена: 04.01.2024 20:00 – 05.01.2024 08:00.

Дозагрузка мелющих шаров производится в течение первой и третьей смен. После проведения дозагрузки в первую смену зафиксирован средний рост потребляемой мощности на 2,7%, тогда как в третьей смене увеличение составило 1,7%. При этом объем шаровой дозагрузки оставался одинаковым для обоих случаев.

Данное отличие может быть связано с рядом факторов, включая изменение количественных и качественных характеристик перерабатываемой руды, а также степень износа футеровки.

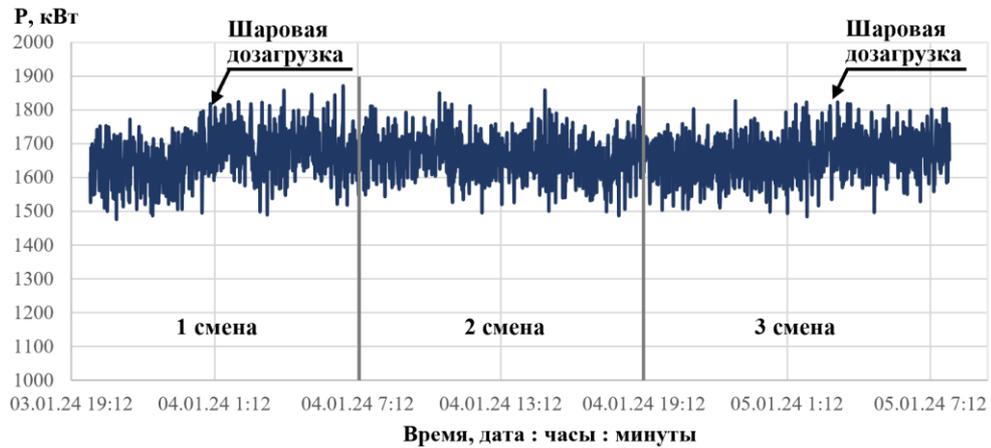


Рисунок 1.7 – Изменение потребляемой активной мощности электропривода при дозагрузке шаров в мельницу (составлено автором)

1.5.3 Определение шаровой загрузки на основе тензометрических систем

На рисунке 1.8 представлена система определения шаровой загрузки на основе тензометрического модуля.

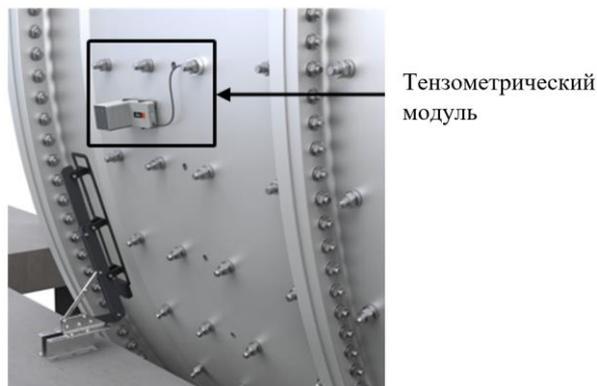


Рисунок 1.8 – Тензометрический модуль для измерения шаровой загрузки, установленный на корпусе барабана мельницы [48]

Система состоит из следующих основных элементов:

- тензометрический датчик;
- передатчик в сборе;
- приемник;
- зарядная станция.

Система позволяет осуществлять мониторинг состояния загрузки в мельнице. Это предполагает, что она обладает адаптивностью под различные технологические задачи, позволяя оценивать как шаровую загрузку, так и общий объем загрузки. Методика основана на определении крайних положений (нижнего и верхнего) загрузки внутри мельницы. Кроме того, система обеспечивает расчет степени износа футеровки мельницы путем анализа количества ударных воздействий критической силы на внутреннюю поверхность барабана.

Система осуществляет измерения с помощью тензодатчика, установленного на болте крепления футеровки между корпусом мельницы и гайкой. Полученные данные по результатам измерений передаются с помощью передатчика в составе тензометрического модуля на приемник по беспроводной связи. Тензометрический модуль получает питание через систему беспроводной зарядки, работающей на основе электромагнитной индукции [48].

Система измерения шаровой загрузки на основе тензометрического модуля характеризуется следующими особенностями:

1. Крепление измерительных устройств на барабан.
2. Работа датчика под предварительным натягом.
3. Беспроводная система передачи электроэнергии.

В результате указанные особенности способствуют возникновению соответствующих технических рисков:

1. Поломка оборудования при перефутеровке.
2. Регулярное обслуживание для корректности измерений.
3. Перебои в передаче энергии при смещении передатчика электроэнергии.

Обозначенные технические риски обусловлены контактным методом измерения шаровой загрузки, требующим монтажа измерительного устройства непосредственно на барабан мельницы.

1.5.4 Определение шаровой загрузки на основе системы вибромониторинга

Способ определения шаровой загрузки посредством вибромониторинга нашел широкое применение как в российской, так и в зарубежной промышленности [38, 84]. При этом возможно использование различных систем: основанных на анализе сигналов виброускорения либо применяющих комплексный анализ нескольких параметров. Примером комплексной системы является отечественный виброакустический анализатор загрузки мельницы ВА3М-1М [37, 38]. Для рассматриваемого анализатора реализован метод контроля внутримельничной загрузки мельницы на основе определения корреляционной связи между параметрами загрузки мельницы (исходное сырье, мелящие тела, вода и возвратный продукт) и уровнем ее шумового поля.

Система является адаптивной для определения как шаровой загрузки, так и комплексной технологической загрузки, включающей пульпу и мелющие тела. Метод сочетает использование вибродатчика и микрофонного устройства. Монтаж вибродатчика осуществляется на цапфе мельницы со стороны загрузки.

Несмотря на универсальность системы, устройство особенно эффективно для оценки комплексной технологической загрузки мельницы. Оценка данного технологического параметра осуществляется по интегральной амплитуде спектра виброакустического шума.

Дополнительно можно отметить работы [16, 35], в которых рассматривается аналогичная методика для определения общей внутрельничной загрузки на основе спектра сигнала виброускорения.

Метод вибромониторинга демонстрирует эффективность при отсутствии влияния соседнего оборудования на мельницу, параметры загрузки которой измеряются. Однако на ряде обогатительных фабрик, где осуществляется переработка руды на нескольких технологических секциях и подготовка руды подразумевает многостадийное измельчение, отмечается близкое расположение мельничных агрегатов друг к другу.

1.6 Высоковольтный электропривод барабанных мельниц

Измельчительные агрегаты, мощностью от 630 кВт, приводятся в движение от высоковольтных электроприводов (рисунок 1.9).

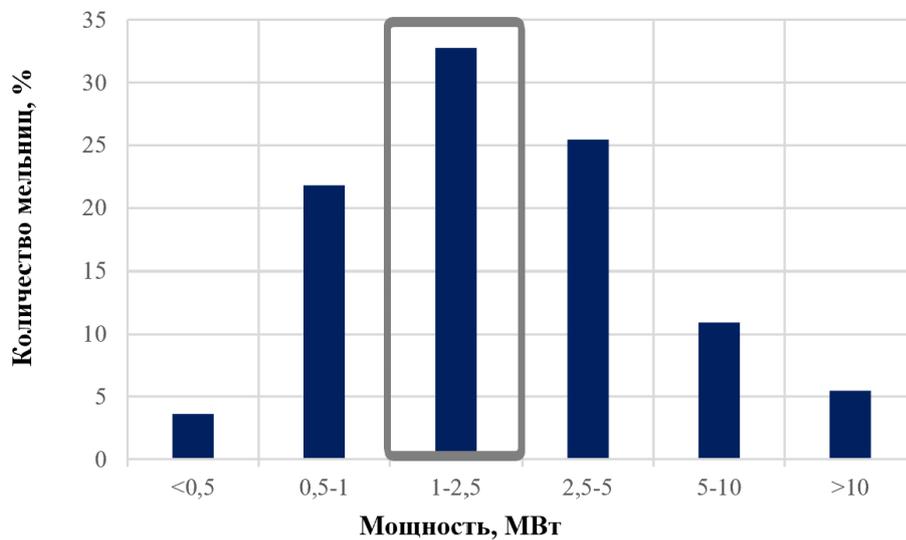


Рисунок 1.9 – Распределение мельниц АО «Тяжмаш» по мощности (составлено автором на основе [64])

Мельницы, мощностью 1-2,5 МВт, получили массовое использование на горно-обогатительных комплексах России и являются наиболее популярным типоразмером по мощности среди продукции АО «Тяжмаш». Поэтому в данной работе технические решения на основе системы электропривода разрабатывались для мельниц из указанного диапазона мощности.

Модификация механической, электрической и управляющей частей электропривода барабанных мельниц всегда осуществлялась согласно тенденциям в развитии измельчительных агрегатов. Наибольшее влияние на развитие электропривода оказало увеличение мощности измельчительных агрегатов [91]. Подобная практика повлияла и на распределительные сети, главным образом из-за потенциального негативного воздействия мощного оборудования на параметры работы других устройств, подключенных к той же электрической сети. С целью

минимизации отрицательных воздействий со стороны электропривода стали формироваться более строгие требования к их разработке. Повышение эффективности работы электроприводов связано напрямую с усовершенствованием их силовой и управляющей частей [103]. Среди основных эффектов можно выделить следующие: снижение пусковых токов; повышение уровня электромагнитной и электромеханической совместимости; поддержание наработки на отказ электродвигателей; высокие энергетические и механические параметры электроприводов.

Высоковольтные электроприводы шаровых мельниц, в составе которых есть преобразователи частоты обладают значительными преимуществами по сравнению с нерегулируемыми приводами. Преимущества достигаются благодаря алгоритмам управления, с помощью которых можно обеспечить высокие энергетические и механические характеристики, гибкость в управлении технологическими процессами и плавные пуски.

Управление высоковольтным электроприводом в общем случае должно осуществляться, исходя из следующих факторов:

- свойства исходной руды;
- актуальный гранулометрический состав руды;
- актуальный уровень заполнения мельницы мелющими телами;
- актуальный уровень заполнения мельницы рудой;
- актуальное состояние футеровки мельницы.

В качестве условий изменения скорости можно выделить следующие:

- изменение свойств руды (потенциальный эффект: достижение целевого количества готового класса; оптимизация энергетических характеристик и затрат на мелющие тел);
- снижение уровня заполнения мелющих тел (потенциальный эффект: компенсация сокращения ударных воздействий и поддержание уровня разрушения руды).

1.6.1 Механические структуры электропривода мельниц

В зависимости от мощности измельчительного агрегата рассматриваются разные конфигурации механических структур электроприводов мельниц.

Актуальны следующие механические структуры электроприводов согласно мощности [104] (рисунок 1.10):

- электропривод с одной приводной шестерней;
- электропривод с двумя приводными шестернями;
- электропривод на основе кольцевого электродвигателя.

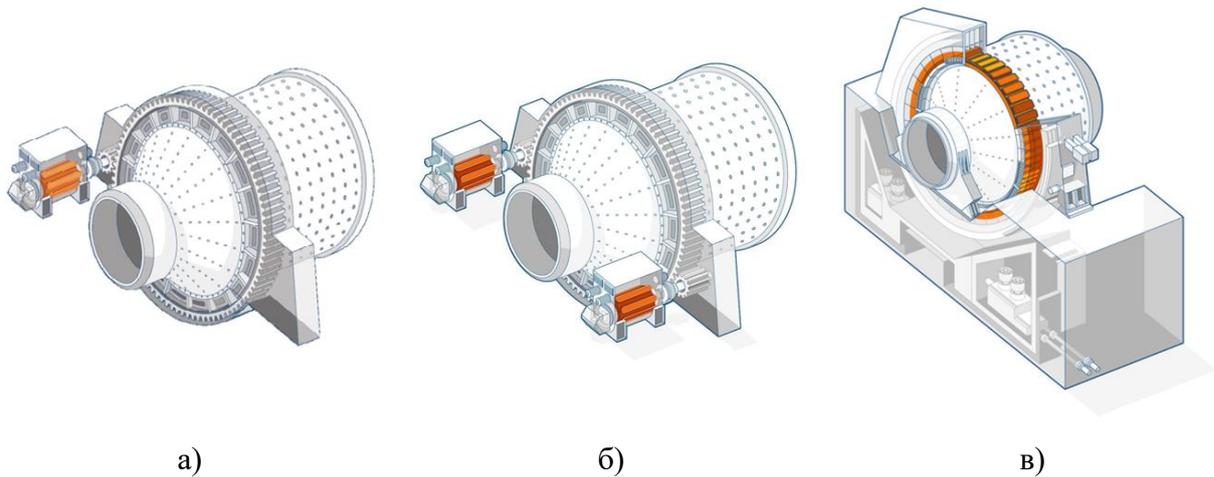


Рисунок 1.10 – Механические структуры электроприводов мельниц барабанного типа: а) с одной приводной шестерней; б) с двумя приводными шестернями; в) на основе кольцевого электродвигателя [53]

Механическая структура определяется максимальным механическим моментом, который можно передать через приводную шестерню мельницы. Для электропривода с одной шестерней максимальная мощность, при которой использование данной структуры возможно, составляет около 9 МВт. Для электропривода свыше 9 МВт требуется механическая структура с двумя приводными шестернями. Соответственно, при мощности свыше 18 МВт измельчительные агрегаты могут быть приведены в движение только с помощью электропривода на базе кольцевого электродвигателя [59]. При кольцевом электроприводе механическая передача исключается и момент передается напрямую через воздушный зазор электродвигателя. В качестве ротора кольцевого электропривода используется мельница, статор надстраивается вокруг корпуса мельницы.

1.6.2 Силовая часть электропривода мельниц

С развитием систем электропривода барабанных мельниц можно выделить пять основных типов приводных систем [85, 86, 115]:

1. Электропривод с асинхронным двигателем с фазным ротором (АДФР) и жидкостным реостатом.
2. Электропривод со синхронным двигателем и пневматической муфтой.
3. Электропривод со синхронным двигателем, пневматической муфтой и плавным пуском.
4. Электропривод с асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором (АДКР) и преобразователем частоты.
5. Электропривод со синхронного-асинхронным двигателем с жидкостным реостатом и системой возбуждения постоянного тока.

При этом не все указанные системы сохраняют оптимальную эффективность в современных условиях эксплуатации, однако на различных исторических этапах их они демонстрировали подтвержденную эффективность своей работы.

В работе [85] отмечается, что система электропривода на основе синхронного двигателя с пневматической муфтой и устройством плавного пуска характеризуется наиболее высокими капитальными затратами при внедрении. При этом наименьшие капитальные затраты на внедрение составляют для системы электропривода с АДФР и жидкостным реостатом.

На сегодняшний день жидкостные реостаты уступают место современным полупроводниковым технологиям управления электроприводом, поскольку развитие преобразовательной техники и её внедрение обеспечивают большую эффективность в эксплуатации систем электропривода. Эксплуатация данной системы сопряжена с дополнительными расходами на обслуживание реостата и щеточного узла, а также требует установки компенсирующих устройств для коррекции коэффициента мощности.

Пуск синхронного двигателя с пневматической муфтой осуществляется без нагрузки. После выхода двигателя на номинальную частоту вращения пневматическая муфта выполняет соединение синхронного двигателя с нагрузкой. Для данной системы электропривода характерно иметь два существенных минуса: высокие пусковые токи и ударные нагрузки при соединении вала двигателя с вал-шестерней мельницы с помощью муфты.

Гибридные синхронно-асинхронные двигатели с жидкостным реостатом и системой возбуждения постоянного тока встречаются крайне редко, что объясняется их конструктивной сложностью.

Электропривод с АДКР и преобразователем частоты позволяет компенсировать отмеченные недостатки приведенных систем и обеспечить управление процессом измельчения [22].

В российской промышленной практике для привода мельниц преимущественно используются: синхронные двигатели с системой возбуждения и АДФР. Отсутствие широкого распространения частотно-регулируемых приводов мельниц в отечественной горно-обогатительной отрасли приводит к преобладанию АДФР, в которых функции плавного пуска реализованы через реостатные системы [36].

Учитывая преимущества АДКР перед другими двигателями, их применение в составе электропривода шаровых мельниц представляется наиболее целесообразным. Среди ключевых преимуществ АДКР можно выделить [105]:

1. Высокая надёжность и простота конструкции. Асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором не имеют скользящих контактов (щеток и коллектора), что снижает

риск отказов и уменьшает затраты на техническое обслуживание. Это особенно важно в условиях высокой запылённости и вибрации, характерных для горно-обогатительных комбинатов.

2. Широкая распространённость и доступность. АДКР получили широкое распространение в промышленности, что определяет простоту их интеграции с существующей инфраструктурой предприятий. Их эксплуатационные характеристики и режимы работы хорошо изучены, что упрощает проектирование и настройку систем управления.

3. Возможность работы с преобразователями частоты. АДКР позволяет реализовать гибкое управление скоростью вращения барабана мельницы с помощью частотно-регулируемых приводов. Это обеспечивает точную адаптацию к изменяющимся технологическим условиям (например, свойствам руды и степени износа футеровки), что невозможно при использовании нерегулируемых электроприводов.

4. Энергоэффективность в условиях переменной нагрузки. АДКР демонстрирует стабильные энергетические характеристики при работе с переменными нагрузками, характерными для процесса измельчения. Это снижает пиковые нагрузки на сеть и минимизирует энергопотребление, что соответствует цели повышения энергоэффективности.

5. Соответствие требованиям к высоковольтным системам. АДКР хорошо адаптированы к работе в высоковольтных сетях и совместимы с современными преобразователями частоты, обеспечивающими плавный пуск и регулирование скорости.

6. Экономическая целесообразность. Стоимость асинхронных двигателей и связанных с ними преобразователей частоты ниже, чем у альтернативных решений на основе синхронного двигателя. Это делает их более доступными для внедрения на отечественных предприятиях, где важна рентабельность инвестиций в модернизацию оборудования.

1.7 Выводы по главе 1

1. В технологической цепочке горно-обогатительного производства процесс измельчения представляет собой ключевое звено с максимальным потенциалом повышения эффективности обогатительных процессов. Кроме того, этот этап характеризуется наибольшими удельными энергозатратами (более 50% от общего потребления на предприятии), что делает его приоритетным объектом для повышения энергоэффективности и снижения производственных издержек.

2. Для обеспечения устойчивого функционирования процесса измельчения необходимы инструменты гибкого управления, позволяющие адаптировать режимы работы оборудования под изменяющиеся условия технологического процесса. Традиционные подходы к управлению, основанные на фиксированных параметрах, не обеспечивают достаточной точности и оперативности реакции на внешние возмущения. Это требует внедрения систем

автоматизации, способных учитывать текущее состояние объекта управления и корректировать управляющие воздействия в реальном времени

3. Шаровая мельница выступает центральным технологическим агрегатом в цепочке измельчения железной руды. Её эффективная эксплуатация играет решающую роль в достижении целевых показателей по выходу и качеству готового класса – ключевого параметра, определяющего эффективность последующих операций обогащения, таких как магнитная сепарация или флотация. При этом работа мельницы должна быть организована таким образом, чтобы минимизировать переизмельчение полезного компонента, которое затрудняет его извлечение, и недоизмельчение, приводящее к потере ценной части сырья.

4. Повышение эффективности процесса измельчения в шаровой мельнице может быть достигнуто за счет автоматизированного электропривода, управление которым должно осуществляться на основе трех основных составляющих:

- Учет свойств перерабатываемой руды – обогатимость оказывают существенное влияние на динамику процесса и должна учитываться при формировании управляющих воздействий.

- Контроль шарового заполнения и степени износа футеровки барабана – данные параметры определяют объемную загрузку мельницы и энергию взаимодействия между мелющими телами и рудой. Их отклонение от оптимальных значений приводит к снижению эффективности измельчения и увеличению энергопотребления.

- Оценка эффективности процесса измельчения – заключается в анализе количества готового класса в продукте измельчения, что позволяет судить о соответствии текущего режима заданным технологическим требованиям и принимать решения по его корректировке.

5. Для автоматизированного электропривода шаровых мельниц целесообразно использовать АДКР. Электропривод на основе АДКР обеспечивает энергетическую и технологическую эффективность процесса измельчения в шаровой мельнице. Данный выбор подкреплен следующими основными преимуществами:

- высокой надежностью и простотой конструкции;
- высокими энергетическими характеристиками при реализации в составе с преобразователем частоты;
- экономической эффективностью;
- простотой в интеграции АДКР с существующей инфраструктурой предприятия.

ГЛАВА 2 МОНИТОРИНГ ИЗНОСА ФУТЕРОВКИ БАРАБАНА НА ОСНОВЕ СПЕКТРА ТОКА ПРИВОДНОГО ДВИГАТЕЛЯ ШАРОВОЙ МЕЛЬНИЦЫ

Одной из актуальных задач реализации систем автоматизированного электропривода процесса измельчения является обеспечение оперативного контроля за состоянием внутренней полости шаровой мельницы. К числу наиболее значимых параметров, влияющих на эффективность работы оборудования и качество продукта измельчения, относятся: количество шаровой загрузки, распределение массы внутри барабана, а также степень износа футеровки. Однако непосредственный доступ к этим параметрам ограничен вследствие конструктивных особенностей мельницы и сложных условий эксплуатации.

Состояние футеровки барабана напрямую влияет на энергоэффективность, производительность мельницы и качество готового продукта. С увеличением степени износа футеровки снижается интенсивность взаимодействия между мелющими телами и рудой, что приводит к ухудшению качества помола и повышенному энергопотреблению. Кроме того, износ футеровки может стать причиной аварийных ситуаций, связанных с разрушением болтовых соединений и деформацией корпуса барабана. Таким образом, её регулярный контроль играет важную роль в обеспечении надежности и долговечности оборудования.

Вместе с тем, существующие методы оценки износа футеровки имеют ряд ограничений: контактные измерения трудоемки и требуют остановки мельницы, а установка дополнительных датчиков – дорогостояща и технически сложна. Это делает перспективным развитие бесконтактных способов мониторинга параметров процесса, основанных на анализе доступных технологических сигналов.

Особый интерес представляет использование спектральных характеристик тока статора электродвигателя, которые могут служить косвенными диагностическими признаками изменения внутримельничных условий. Изменение жёсткости ударного воздействия шаровой загрузки на внутреннюю поверхность барабана, связанное с износом футеровки, отражается в виде модификаций амплитуд гармоник в спектре тока. Это позволяет использовать электропривод не только как исполнительный механизм, но и как источник информации о состоянии внутреннего пространства мельницы.

Поэтому актуальным является исследование возможности мониторинга степени износа футеровки барабана шаровой мельницы по изменению спектра потребляемого тока приводного двигателя, что в свою очередь требует разработки комплексной имитационной модели, объединяющей механическую систему мельницы и электромагнитные процессы в двигателе.

2.1 Методика исследований

Предложенный способ мониторинга предполагает, что степень износа футеровки барабана можно оценить по изменению потребляемого тока двигателя шаровой мельницы.

Целью исследования является установление функциональной связи между износом футеровки барабана и спектральным составом потребляемого тока приводным двигателем [130].

Исследование проводилось в два основных этапа (рисунок 2.1). На первом этапе выполнялась проверка наличия функциональной связи между износом футеровки барабана и спектром момента сопротивления внутримельничной загрузки мельницы. Проверка осуществлялась на основе численных экспериментов с помощью моделирования динамики процесса измельчения средствами пакета Rocky DEM при изменении износа футеровки барабана. Диапазон изменения износа футеровки барабана задавался согласно установленному технологическому регламенту для рассматриваемой футеровки.



Рисунок 2.1 – Методика проведения исследования (составлено автором)

На втором этапе была подтверждена функциональная связь между износом футеровки барабана и спектром потребляемого тока электродвигателя на основе характерных гармонических составляющих. Для достижения цели выполнялись эксперименты на основе имитационного моделирования высоковольтного электродвигателя мельницы в программной среде Matlab Simulink. Моделирование электродвигателя осуществлялось на основе нагрузочных характеристик внутримельничной загрузки, полученных на первом этапе исследования. Такой подход позволил реализовать имитационную модель работы шаровой мельницы, учитывающую физические процессы разрушения руды при оценке потребляемого тока приводного двигателя.

На основе проведенного исследования разработан алгоритм, который позволяет установить взаимосвязь износа футеровки и изменения спектра потребляемого тока электродвигателя.

2.2 Исследование влияния изменения степени износа футеровки барабана на момент внутримельничной загрузки

2.2.1 Исходные данные и условия для моделирования процесса измельчения

Моделирование процесса измельчения осуществлялось на примере мельницы шарового измельчения. Диаметр мельницы составляет 11 м. Моделирование мельницы шарового измельчения осуществлялось методом дискретных элементов в среде Rocky DEM. Целями данного этапа являются формирование нагрузочных моментов для моделирования

электродвигателя мельницы и предварительное установление функциональной зависимости спектра момента внутримельничной загрузки от износа футеровки барабана.

Для моделирования процесса измельчения принята упрощенная модель, которая позволяет отразить физику процесса дезинтеграции руды, и проверить связь между нагрузочным моментом и износом футеровки. Был принят ряд допущений, основная часть которых направлена на сокращение времени моделирования процесса:

- Моделирование процесса осуществлялось для участка барабанной мельницы длиной 1,8 м.
- Форма частиц руды представлена сферами.
- Минимальный размер частиц руды в модели составляет 0,2 м.
- Осуществляется моделирование только твердой фазы.
- В модели рассматривается один тип измельчаемого материала.

Исходные данные для моделирования процесса измельчения представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Исходные данные для моделирования процесса измельчения в шаровой мельнице (составлено автором)

Параметр	Величина	Единица измерения
Ширина расчетной зоны	1,8	м
Диаметр шаров	0,35	м
Общая масса шаров (номинальная)	8,5	т
Плотность измельчающих тел	7800	кг/м ³
Общая масса материала	34	т
Насыпная плотность железной руды	2800	кг/м ³
Скорость вращения барабана	10	об/мин

Коэффициенты взаимодействия контактных пар, принятые в модели, приведены в таблице 2.2 [73, 97].

Таблица 2.2 – Коэффициенты взаимодействия материалов (составлено автором)

Контактная пара:	Коэффициент восстановления	Коэффициент трения	
		Статический	Динамический
Руда-руда	0,5	0,8	0,5
Руда-сталь	0,5	0,5	0,4
Сталь-сталь	0,7	0,3	0,3

Геометрия моделируемой мельницы с размерами приведена на рисунке 2.2.

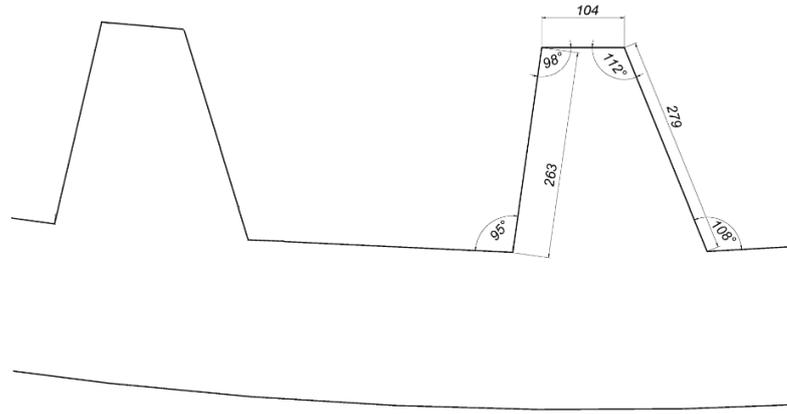


Рисунок 2.2 – Сечение футеровки цилиндрической части барабана (составлено автором)

2.2.2 Выбор моделей процесса измельчения в шаровой мельнице

Алгоритмы DEM-моделирования строятся на вычислении нормальной и тангенциальной составляющих сил взаимодействия пар: частица-частица и частица-граница объекта симуляции [100]. Стандартная методика DEM-моделирования предполагает применение линейных пружинно-демпферных моделей для описания динамики столкновений частиц [77, 122].

В качестве модели нормальных контактов выбрана линейная пружинно-демпферная модель (Linear Spring-Dashpot) (2.1).

$$F_n = k_n \delta_n + c_n \dot{\delta}_n, \quad (2.1)$$

где F_n – нормальная контактная сила (Н);

k_n – жёсткость пружины в нормальном направлении (Н/м);

δ_n – перекрытие (деформация) частиц (м);

c_n – коэффициент демпфирования [Н·с/м];

$\dot{\delta}_n$ – скорость изменения перекрытия (м/с).

Для модели тангенциальных контактов выбрана линейная пружинно-демпферная модель с кулоновским трением (Linear Spring-Dashpot Coulomb Limit) (2.2).

$$F_t = \begin{cases} k_t \delta_t, & \text{если } |k_t \delta_t| < \mu F_n \text{ (упругая фаза)} \\ \mu F_n \cdot \text{sign}(\dot{\delta}_t), & \text{иначе (проскальзывание)} \end{cases} \quad (2.2)$$

где F_t – тангенциальная контактная сила (Н);

k_t – тангенциальная жёсткость (Н/м);

δ_t – тангенциальное смещение (м);

μ – коэффициент трения;

F_n – нормальная силы (Н).

Модель сочетает линейную упругую реакцию с предельным условием трения Кулона и применяется с выбранной моделью нормальных контактов.

Так как моделируемые частицы, находящиеся внутри мельницы, имеют сферическую форму, используется модель сопротивления частиц качению – модель типа С: линейная пружинная модель с ограничением качения (Type C: linear spring rolling limit) (2.3) [96].

$$M_r = \begin{cases} k_r \theta, & \text{если } |k_r \theta| < \mu_r F_n R \text{ (упругая фаза)} \\ \mu_r F_n R \cdot \text{sign}(\dot{\theta}), & \text{иначе (проскальзывание качения)} \end{cases} \quad (2.3)$$

где M_r – момент сопротивления качению (Н·м);

k_r – жесткость при качении (Н·м/рад);

θ – угол относительного поворота (рад);

μ_r – коэффициент сопротивления качению;

F_n – нормальная сила (Н);

R – характерный радиус контакта (м);

$\dot{\theta}$ – угловая скорость качения (рад/с).

2.2.3 Моделирование износа футеровки барабана

В зависимости от режима измельчения наблюдается абразивный, ударно-абразивный и усталостный вид изнашивания футеровки барабана. Среди основных факторов, оказывающих влияние на износ футеровки, отмечаются как технологические, так и конструкторские: тип измельчаемой руды; частота вращения мельницы; твердость футеровки [112].

В работах [34, 72, 112] отмечается, что мере износа футеровки уменьшается производительность мельницы и увеличивается износ футеровки. Это объясняется изменением геометрического профиля футеровки относительно первоначального и, как следствие, способностью поднимать загружаемый материал на определенную высоту. При снижении высоты подъема снижается энергия, необходимая для разрушения перерабатываемого сырья.

В качестве материала, из которого изготавливаются футеровки, в основном применяются [79]:

- металлические (высокомарганцовистая сталь, хромистая сталь);
- резиновые;
- комбинированные (металл и резина);
- керамические.

В исследовании рассматривалась высокомарганцовистая стальная броня с ходимостью полгода. На практике предельное состояние для рассматриваемой футеровки мельницы наступает при уменьшении ее толщины до 40% от исходной [117]. Достижение предельного состояния футеровки исключает возможность ее дальнейшей эксплуатации и требует установки новой. При заданной толщине футеровки в 90 мм, предельной состояние соответствует 36 мм,

что соответствует высоте головки крепежного болта. Таким образом, толщина футеровки определяет ее степень износа.

В обобщённом виде формула (2.4) определяет прямолинейную зависимость массы футеровки от ее толщины.

$$m = \rho \cdot S \cdot h, \quad (2.4)$$

где m – масса футеровки (кг);

ρ – плотность материала (кг/м³);

h – толщина футеровки (м).

В работе влияние износа футеровки показано через изменение ее массы. Для исследования влияния износа футеровки на механические и электрические характеристики в программной среде Rocky DEM использовалась модель абразивного износа – модель Арчарда [80]. Модель показывает объем материала, изношенного за время моделирования (формула 2.5).

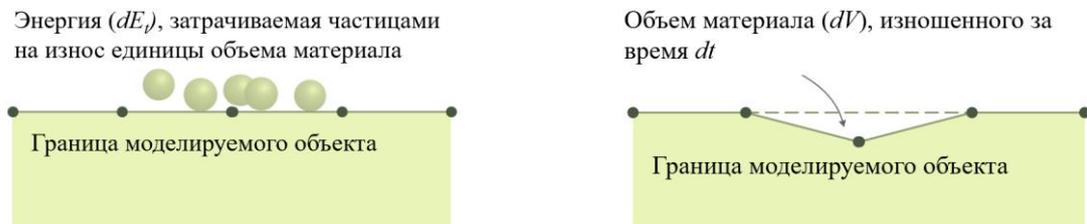
$$dV = K \cdot dE_t, \quad (2.5)$$

где dV – объем материала, изношенного за время моделирования;

K – коэффициент износа, м³/Дж;

E_t – тангенциальная энергия, затрачиваемая на износ единицы объема материала в течение времени моделирования, Дж.

На рисунке 2.3 представлено как осуществляется износ футеровки мельницы в Rocky DEM согласно уравнению 2.5.



а) Поверхность футеровки мельницы в момент времени t

б) Поверхность футеровки мельницы в момент времени $t + \Delta t$

Рисунок 2.3 – Процесс износа в ПО Rocky DEM согласно модели Арчарда [80]

Все геометрические поверхности в ПО Rocky DEM разбиваются на треугольные участки – фасеты (рисунок 2.3 а). В процессе расчета износа согласно уравнению 2.5 часть изношенного материала dV образуется за счет смещения вершин фасетов вовнутрь. Модель Арчарда представляет собой зависимость потери объема от энергии контакта частиц. Износ, полученный в результате расчета по формуле 2.5, приводит к перестроению сетки геометрии футеровки в местах контакта частиц с поверхностью футеровки мельницы (рисунок 2.3 б).

Для модели Арчарда справедливы следующие допущения [68]:

1. Контакт частиц с поверхностью осуществляется через дискретные неровности (аспергиты). Вся нагрузка распределяется по вершинам аспергитов.

2. Износ происходит за счет пластической деформации при адгезионном и абразивном износе.

3. Коэффициент K считается постоянным.

В Rocky DEM для расчета износа футеровки задается коэффициент K . Расчет коэффициента K осуществляется следующим образом (2.6):

$$K = \frac{m_1 - m_2}{\rho \cdot P_t \cdot t}, \quad (2.6)$$

где m_1 – масса футеровки до износа (кг);

m_2 – масса футеровки после износа (кг);

ρ – плотность высокомарганцовистой стальной брони;

P_t – тангенциальная мощность износа, Вт;

t – время моделирования (задано 30 с), с.

Тангенциальная мощность износа соответствует мощности, которую внутримельничная загрузка передает барабану мельницы при столкновении с ним за счет тангенциальных контактов. Для оценки тангенциальной мощности проводилось DEM-моделирование согласно параметрам из таблицы 2.1 и выполнялся анализ энергетических спектров с помощью соответствующего модуля энергетических спектров в Rocky DEM. Модуль энергетических спектров собирает энергию для нормальных и тангенциальных столкновений для каждого типа частиц за шаг времени и для каждого типа столкновения, учитывая все комбинации столкновений частица–частица и частица–граница. Анализ мощности соударений выполняется через гистограммный анализ, позволяющий количественно оценить распределение энергетических воздействий в результате соударений [100, 117]. В результате полученного распределения выполнен расчет средней тангенциальной мощности для моделируемого участка мельницы, которая составила 209,4 Вт (рисунок 2.4).

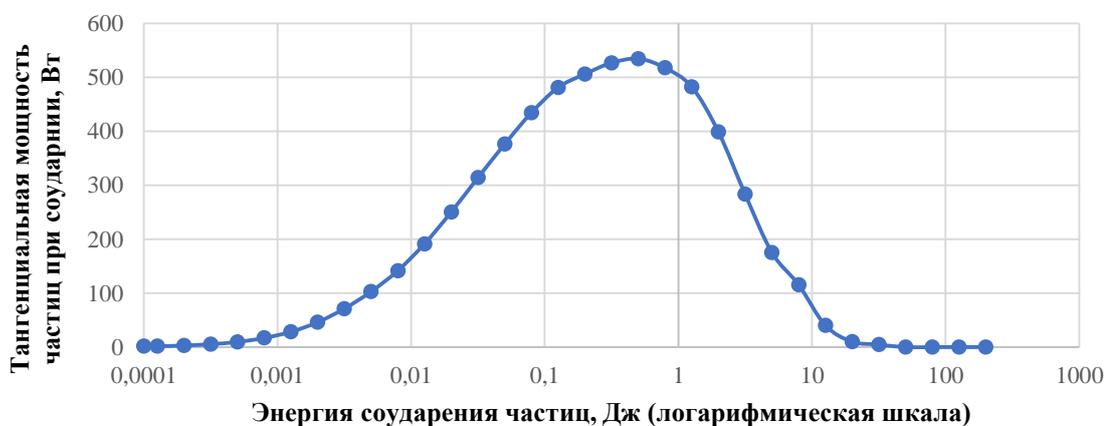


Рисунок 2.4 – Распределение тангенциальной мощности частиц в зависимости от энергии соударения за время моделирования 30 с (составлено автором)

Данные для расчета коэффициента износа приведены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Расчет коэффициента износа (составлено автором)

m_1 , кг	ρ , кг/м ³	P_t , Вт	t , с
12612	7800	209,403	30 с

Расчет коэффициента износа проводился до достижения массы футеровки после износа при $0,51m_1$. Шаг расчета составил 3,5%. Для сопоставления реального износа с моделируемым при расчете K используется время моделирования t , равное 30 с. Это позволяет к концу времени моделирования получить задаваемый износ согласно массе футеровки m_2 .

Результат вычисления коэффициента износа приведен в таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Результат вычисления коэффициента износа (составлено автором)

Степень износа, %	Масса футеровки до износа (m_1), кг	Масса футеровки после износа (m_2), кг	Коэффициент износа (K), м ³ /Дж
0	12612	12612	0
3,5		12170,6	$9,01 \cdot 10^{-6}$
7		11729,2	$1,80 \cdot 10^{-5}$
10,5		11287,7	$2,70 \cdot 10^{-5}$
14		10846,3	$3,60 \cdot 10^{-5}$
17,5		10404,9	$4,50 \cdot 10^{-5}$
21		9963,5	$5,41 \cdot 10^{-5}$
24,5		9522,1	$6,31 \cdot 10^{-5}$
28		9080,6	$7,21 \cdot 10^{-5}$
31,5		8639,2	$8,11 \cdot 10^{-5}$
35		8197,8	$9,01 \cdot 10^{-5}$
38,5		7756,4	$9,91 \cdot 10^{-5}$
42		7315,0	$1,08 \cdot 10^{-4}$
45,5		6873,5	$1,17 \cdot 10^{-4}$
49		6432,1	$1,26 \cdot 10^{-4}$

2.2.4 Моделирование процесса измельчения

Алгоритм моделирования в Rocky DEM представлен следующими основными шагами [80]:

1. Настройка: импорт геометрии мельницы, настройка групп частиц и определение пар взаимодействия между частицами и импортированной геометрией.
2. Расчет: для каждой отдельной частицы определяются все соседние частицы и границы, с которыми частица вступит в контакт. Вычисляется сумма всех сил и моментов, действующих на частицу.
3. Перемещение: ПО использует информацию о текущем положении частицы, скорости и временном шаге, чтобы переместить частицу в ее следующее местоположение в процессе моделирования.

Шаги 2 и 3 выполняются до конца времени моделирования при нахождении частиц в зоне расчета.

Процесс измельчения относится к категории медленно протекающих механических процессов, характеризующихся низкой динамикой как самой внутримельничной загрузки, так и взаимодействия её компонентов. Время полного оборота барабана и цикла падения шаровой загрузки находится в пределах нескольких секунд, поэтому 30-секундный интервал позволяет охватить достаточное количество циклов движения материала для получения репрезентативной статистики нагрузочных характеристик. Кроме того, выбранный временной промежуток обеспечивает выход процесса на стационарный режим, что позволяет исключить влияние начальных условий и получить устойчивые значения моментных и силовых характеристик, используемых при дальнейшем анализе спектра тока электродвигателя. При моделировании взаимодействия сыпучих сред методом дискретных элементов особое внимание уделяется выбору временного шага, поскольку он напрямую влияет на точность и устойчивость вычислений. Согласно рекомендациям, применяемым в практике DEM-моделирования, временной шаг должен быть достаточно малым для адекватного отражения динамики контактов между частицами. Как правило, рекомендуется использовать шаг времени не более 10% от среднего размера частиц [80]. В данной работе средний размер частиц в модели составляет 0,275 м, соответственно, временной шаг моделирования был установлен равным 0,025 с, что соответствует указанному критерию. Такой выбор обеспечивает баланс между точностью расчетов и вычислительной эффективностью моделирования.

При исследовании механических сигналов процесса измельчения в частотной области характерные спектральные составляющие проявляются в диапазоне до 500 Гц. Анализ сигналов по спектральным компонентам осуществлялся с помощью функции быстрого преобразования Фурье (БПФ). В соответствии с теоремой Котельникова для исследования спектров в частотном диапазоне до 500 Гц шаг времени моделирования выбран 0,001 с, а число точек БПФ соответствует 1024.

Динамика процесса измельчения на примере исследуемой модели мельницы приведена на рисунке 2.5.

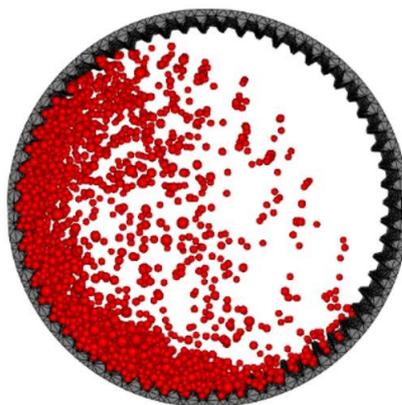


Рисунок 2.5 – Динамика процесса измельчения (составлено автором)

Анализ моментов внутримельничной загрузки осуществлялся в установившемся режиме работы мельницы, то есть на временном отрезке с 20 по 30 с. Установившейся режим работы мельницы можно принять достигнутым при условии, что средние координаты всех частиц по вертикальной и горизонтальной осям приходят к условно неизменным значениям ($\pm 0,2$ м) (рисунок 2.6) [100].

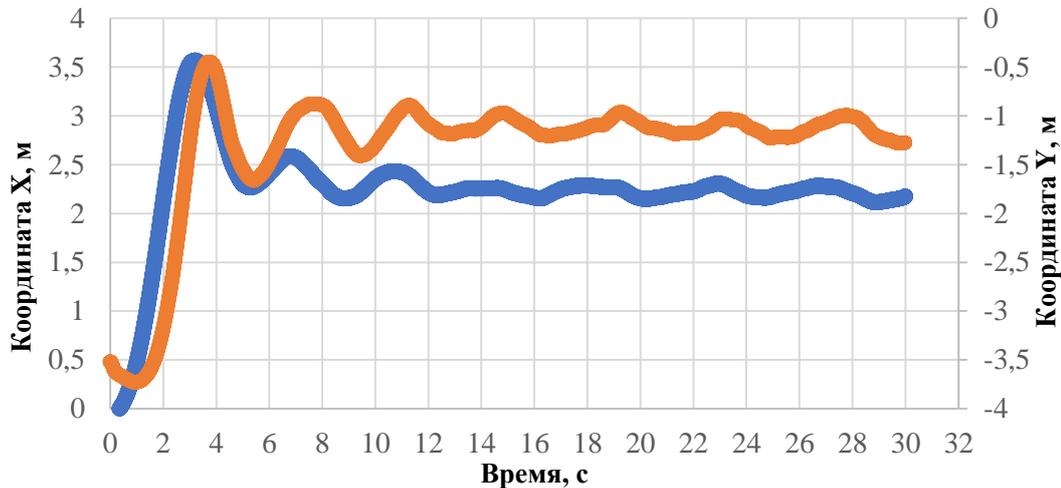


Рисунок 2.6 – График выхода мельницы в установившийся режим работы (составлено автором)

Моделирование осуществлялось с учетом изменяющихся факторов взаимодействия шаров и руды. Для каждого шаг изменения износа футеровки проводилось по 3 эксперимента с разными коэффициентами восстановления: сталь-сталь и руда-сталь (таблица 2.5). Рассматриваемые факторы оказывают влияние на чувствительность исследуемых характеристик к шуму, который может возникать в процессе измельчения руды. Коэффициент восстановления характеризует изменение кинетической энергии после соударения частиц, что позволяет рассмотреть изменение ударных воздействий на корпус барабана мельницы и учесть их при анализе сигналов момента. Изменение коэффициентов восстановления задавалось, исходя из вариативности свойств рассматриваемой руды и измельчающего материала [70, 96, 97].

Таблица 2.5 – Принятые коэффициенты восстановления (составлено автором)

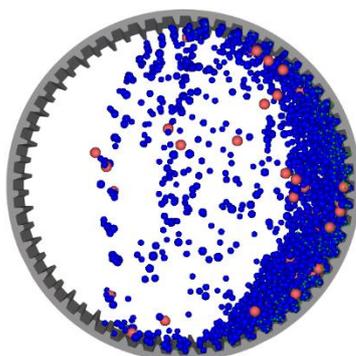
Рассматриваемые коэффициенты восстановления		
Параметры N1	Параметры N2	Параметры N3
Сталь-сталь: 0,7	Сталь-сталь: 0,78	Сталь-сталь: 0,7
Руда-сталь: 0,5	Руда-сталь: 0,5	Руда-сталь: 0,58

По результатам моделирования процесса измельчения при изменении износа футеровки барабана сформирован набор данных, состоящий из нагрузочных моментов внутримельничной загрузки мельницы.

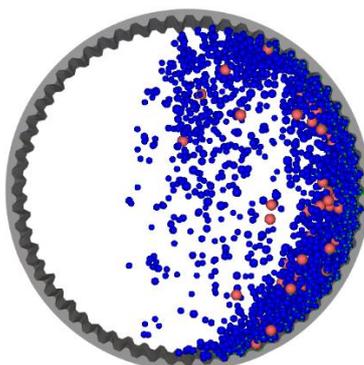
В [72] представлены исследования DEM-моделирования влияния высоты лифтеров на момент внутримельничной загрузки, прикладываемый к барабану мельницы, в зависимости от частоты вращения мельницы. Согласно результатам исследования изменение износа лифтеров оказывает нелинейное влияние на момент, прикладываемый к барабану мельницы. Такое

изменение момента вызвано изменением характера движения внутримельничной загрузки мельницы. Для возможности выявления взаимосвязи между износом футеровки и моментом внутримельничной загрузки мельницы проведен анализ момента в частотной области с помощью функции БПФ.

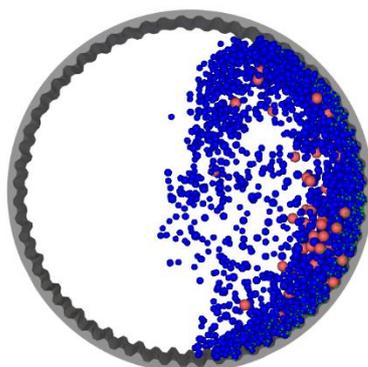
На рисунке 2.7 представлены примеры расчетов футеровки мельницы в Rocky DEM при соответствующих значениях износа: а) Износ 0% при $K = 0 \text{ м}^3/\text{Дж}$; б) Износ 24,5% при $K = 6,31 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{Дж}$; в) Износ 49% при $K = 1,26 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{Дж}$.



а)



б)

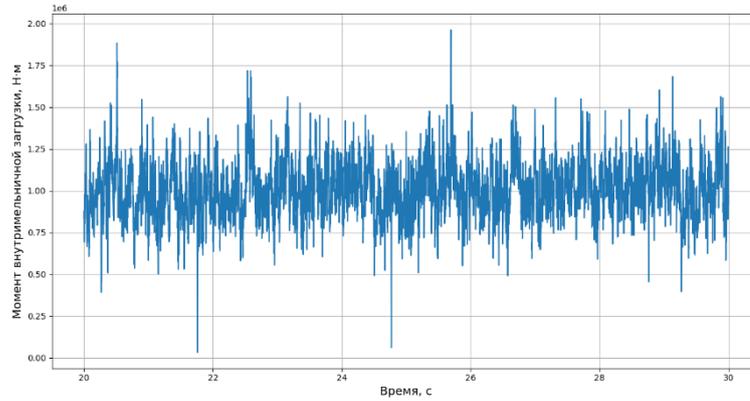


в)

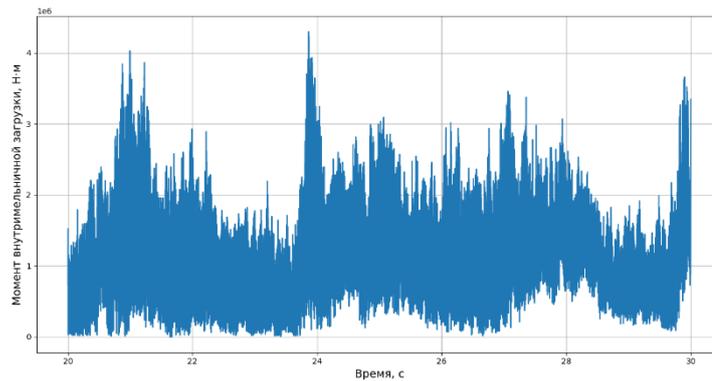
Рисунок 2.7 – Результаты моделирования процесса измельчения при разных значениях износа футеровки мельницы: а) Геометрия мельницы при износе 0%; б) Геометрия мельницы при износе 24,5%; в) Геометрия мельницы при износе 49% (составлено автором)

Появление износа футеровки барабана приводит к изменению нагрузочных моментов и, как следствие, приводит к изменению их спектров.

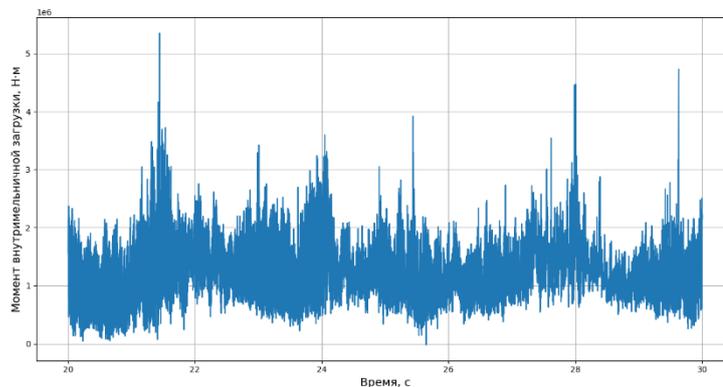
На рисунке 2.8 приведены примеры графиков момента внутримельничной загрузки при разном износе футеровки барабана мельницы: 0%, 24,5% и 49%. На рисунке 2.9 представлены спектры соответствующих моментов внутримельничной загрузки по результатам применения функции БПФ.



а)



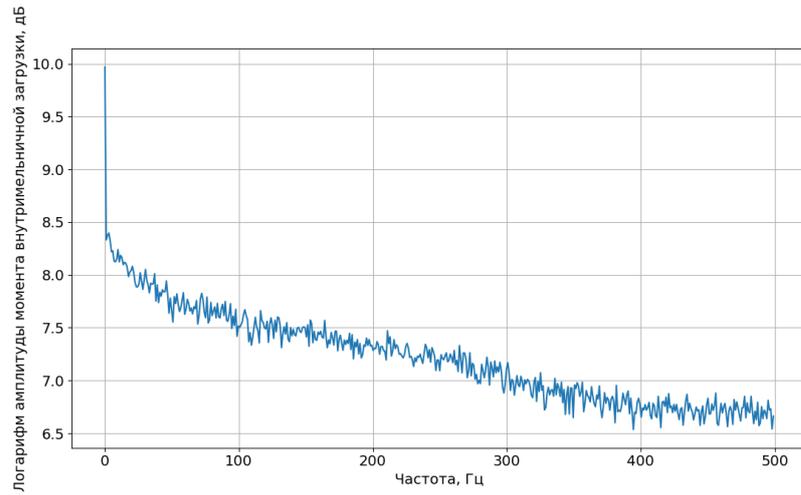
б)



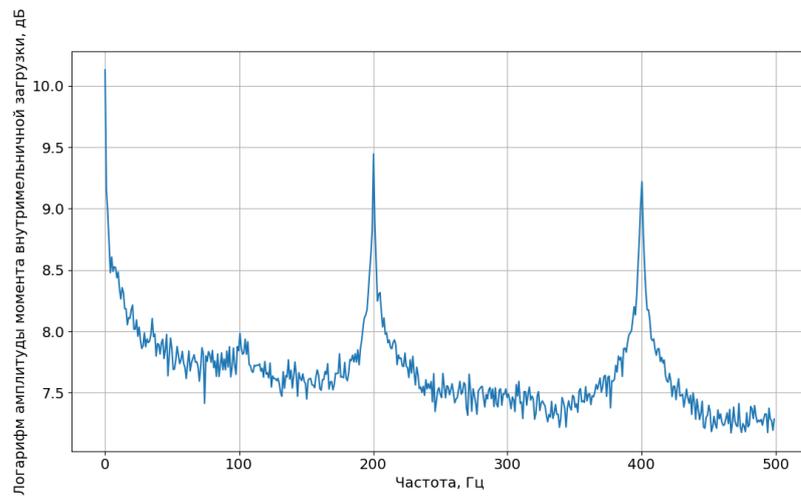
в)

Рисунок 2.8 – Результаты моделирования процесса измельчения в Rocky DEM при разном износе: а) момент внутримельничной загрузки при износе 0%; б) момент внутримельничной загрузки при износе 24,5%; в) момент внутримельничной загрузки при износе 49%

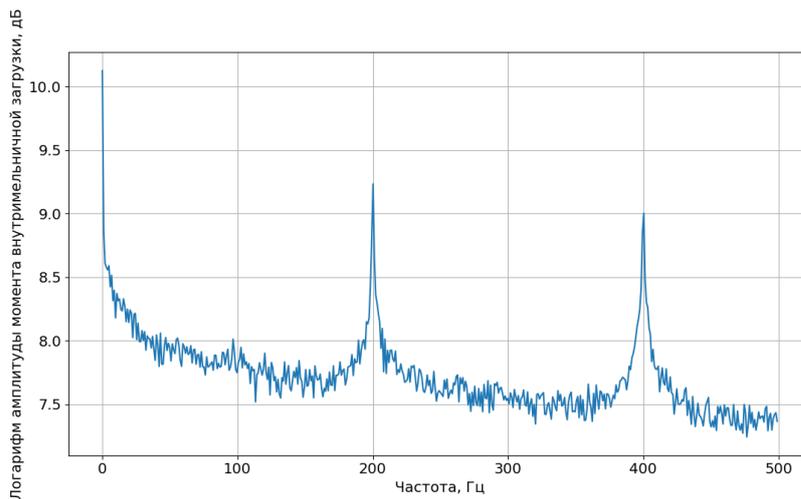
(составлено автором)



а)



б)



в)

Рисунок 2.9 – Вычисленные спектры момента внутримельничной загрузки на основе моделирования процесса измельчения в Rocky DEM при разном износе: а) износ 0%; б) износ 24,5%; в) износ 49% (составлено автором)

При отсутствии износа футеровки внутримельничной загрузки не наблюдается выраженная колебательная составляющая в сигнале момента (рисунок 2.8а). В этом случае момент нагрузки характеризуется практически постоянной величиной, что проявляется в виде доминирующей компоненты на нулевой частоте спектра (рисунок 2.9а).

Наличие износа футеровки нарушает равновесие в системе «частицы – геометрия барабана», приводя к изменению динамики движения шаровой загрузки и руды внутри мельницы. Это вызывает периодические изменения момента внутримельничной загрузки (рисунок 2.8б, в) и формирование характерных гармоник в его спектре (рисунок 2.9б, в).

Кроме того, износ футеровки приводит к изменению траектории движения материала внутри барабана: происходит смещение верхней точки отрыва частиц, а высота их подъёма уменьшается. Снижение потенциальной энергии падающих частиц негативно влияет на эффективность процесса измельчения, поскольку становится недостаточно энергии для разрушения руды. В результате в сигнале момента появляются колебания вокруг новой установившейся точки равновесия. Это, в свою очередь, вызывает дополнительные динамические нагрузки и раскачивание мельницы относительно заданной траектории вращения, что может отрицательно сказываться как на энергоэффективности процесса, так и на надёжности оборудования.

Формирование характерных гармонических составляющих в спектре тока приводного двигателя шаровой мельницы наблюдается на частотах 200,2 Гц и 400,4 Гц. Появление данных гармоник обусловлено конструктивными особенностями мельницы и динамикой взаимодействия внутримельничной загрузки с её геометрией. Конкретные значения частот определяются массой барабана, жесткостью его конструкции и характеристиками распределения нагрузки внутри мельницы.

В случае моделирования износа футеровки, выполненного с использованием модели Арчарда в программной среде Rocky DEM, масса геометрии барабана сохраняется неизменной, так как в данной реализации программного обеспечения износ учитывается исключительно за счёт изменения формы поверхности, без корректировки массовых характеристик. Это позволяет изолировать влияние геометрических изменений на динамику процесса измельчения от эффектов, связанных с изменением инерционных свойств конструкции.

В некоторых сценариях износа футеровки, особенно при значительном снижении высоты лифтеров, возникают дополнительные гармонические компоненты в спектре тока, локализованные вблизи частот 100 Гц и 300 Гц. Эти гармоники связаны с изменением траектории движения шаровой загрузки и руды внутри барабана, что приводит к модификации характера ударных взаимодействий и распределения энергии в системе.

Амплитуда всех выявленных гармонических составляющих напрямую зависит от динамики процесса измельчения, которая, в свою очередь, определяется состоянием лифтеров мельницы. Износ лифтеров снижает эффективность подъёма шаровой загрузки, уменьшает высоту падения частиц и, как следствие, уменьшает энергию ударного воздействия. Это приводит к изменению амплитуд основных гармоник (200,2 Гц и 400,4 Гц) и увеличению относительного вклада дополнительных частот (100 Гц и 300 Гц) в общий спектр сигнала. Анализ спектров выявил нелинейную корреляцию между амплитудами характерных гармоник и степенью износа футеровки, проявляющаяся в изменении монотонности амплитуд гармонических составляющих с их избирательным усилением или ослаблением отдельных амплитуд.

Результаты проведенного исследования были верифицированы путём сравнения с результатами экспериментальных исследований, представленными в работах других учёных, использующих аналогичные подходы для определения уровня заполнения мельниц [110, 81].

В работе [110] проведены исследования для подтверждения выдвинутой авторами гипотезы о влиянии изменения уровня заполнения мельницы на спектр сигнала момента мельницы. Вычисления спектров момента осуществляется на основе данных, полученных по результатам DEM-моделирования и испытаний на стенде, где имеется датчик момента.

В качестве обоснования выдвинутой гипотезы исследователи привели следующие аргументы:

1. Увеличение заполнения мельницы способствует появлению демпфирующего эффекта, оказывающего влияние на шаровую загрузку мельницы.

2. Чем выше уровень заполнения мельницы, тем ниже уровень вибрации.

Ударное взаимодействие мелющих шаров и измельчаемого материала с внутренней поверхностью мельницы создает силовое воздействие, которое, в первую очередь связано, с моментом внутримельничной загрузки, оказывающим влияние на корпус мельницы. При этом увеличение загрузки приводит к увеличению демпфирующего эффекта, который сопровождается не только изменением интенсивности вибрации, но и изменением крутящего момента.

Авторы [110] отмечают формирование характерной гармонической составляющей момента, которая зависит от подъема материала лифтерами, что, в конечном итоге, влияет на изменение момента, который прикладывается к барабану мельницы. Характерная гармоническая составляющая формируется на частоте $n \cdot f$, где n – количество лифтеров; f – частота вращения мельницы, Гц. Результаты экспериментов не выявили монотонной связи между изменением уровня заполнения мельницы и амплитудой характерной гармоники. Авторы представили подход к обработке сигнала спектра момента, который позволил установить взаимосвязь спектра момента внутримельничной загрузки мельницы и уровня заполнения мельницы.

В работе [81] проводились аналогичные исследования по установлению зависимости спектра электромагнитного момента от шарового заполнения мельницы. Спектры момента вычисляются по результатам проведения опытов на экспериментальном стенде. Измерение электромагнитного момента осуществляется на основе наблюдателя координат.

Авторы также отмечают формирование характерной гармоник, которая определяет режим измельчения. Установлено, что гармоника формируется на частоте, кратной частоте вращения мельницы $12 \cdot f$, где f – частота вращения мельницы. Проведены экспериментальные исследования для сравнения способов определения шарового заполнения на основе сигналов вибраций и предлагаемого способа на основе электромагнитного момента. Результаты экспериментов показали идентичную динамику изменения анализируемых сигналов.

Износ футеровки нельзя однозначно определить по одной из характерных гармоник для рассматриваемой геометрии шаровой мельницы. Требуется комплексный показатель, с помощью которого возможно однозначно определить износ футеровки барабана мельницы по спектральным характеристикам момента и тока электропривода шаровой мельницы.

Далее, рассмотрены подходы к установлению взаимосвязи между спектром момента внутримельничной загрузки и износом футеровки барабана мельницы.

2.2.5 Установление функциональной связи износа футеровки от спектров момента внутримельничной загрузки

Режим измельчения, который определяется, в рамках данного исследования, износом футеровки отражается в спектре момента внутримельничной загрузки. Применительно к практической реализации результатов исследования необходимо установить обратную зависимость износа футеровки от спектров момента внутримельничной загрузки.

На основе использования стандартных методов машинного обучения по восстановлению регрессий была аппроксимирована функциональная зависимость износа футеровки m_1 от спектров момента внутримельничной загрузки β_1 (формула 2.7).

$$m_1 = f(\beta_1), \beta_1 \in R^{1024}, \quad (2.7)$$

где R – множество вещественных чисел.

Восстановление зависимости (2.7) осуществлялось с помощью аппроксиматора XGBoost, основанного на принципе градиентного бустинга [75].

Метод градиентного бустинга относится к классу ансамблевых методов, основанных на последовательном построении деревьев решений. Его основная идея заключается в том, что каждое последующее дерево обучается на остатках, которые отражают ошибки предыдущих итераций ансамбля, минимизируя функцию потерь. Данный алгоритм подходит для выявления сложных нелинейных закономерностей, которые характерны для исследуемых закономерностей,

в условиях ограниченного количества данных [98]. Дополнительным преимуществом является его высокая вычислительная эффективность, позволяющая обрабатывать большие объемы информации, что является актуальным при обработке спектральных данных [94].

Восстановление регрессии (2.7) осуществлялось согласно следующему алгоритму:

1. Загрузка данных внутримельничного момента при разном износе.
2. Обработка данных с помощью функции БПФ.
3. Обучение XGBoost.
4. Оценка качества построенной математической модели.

Восстановление описанных зависимостей осуществлялось с использованием классического подхода перекрестной проверки, при котором все исходные данные разделялись на обучающую D_{train} и тестовую D_{test} выборки в пропорции 80% к 20%. Модели обучались на D_{train} , а их качество оценивалось на выборке D_{test} .

Качество построенных математических моделей оценивалось с помощью метрики коэффициента детерминации R^2 . Данная метрика демонстрирует степень точности и адекватности аппроксимации полученных функциональных зависимостей. Использование коэффициента детерминации получило широкое распространение, так как R^2 считается наиболее информативной метрикой для задачи восстановления регрессии [76].

Вычисление коэффициента детерминации R^2 осуществляется по формуле (2.8)

$$R^2 = 1 - \frac{\sum(y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum(y_i - \bar{y})^2}, \quad (2.8)$$

где y_i – реальные значения зависимой переменной;

\hat{y}_i – предсказанные значения;

\bar{y} – среднее значение зависимой переменной.

В результате экспериментальных исследований, среднее значение показателя R^2 на тестовой выборке составило 0,87, что является высоким показателем, достаточным для утверждения о том, что между m_1 и β_1 существует устойчивая зависимость [66]. Модель показывает высокую устойчивость и применимость набора данных. Наблюдается сильная зависимость между параметрами полученной аппроксимирующей функции. На рисунке 2.10 представлена визуальная оценка работы XGBoost-аппроксиматора.

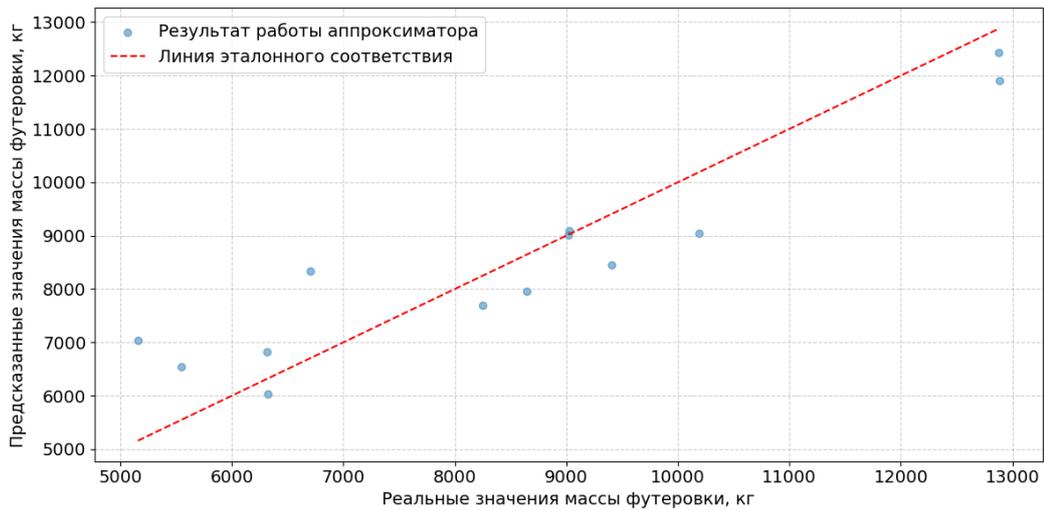


Рисунок 2.10 – Результат работы XGBoost-аппроксиматора на основе сравнения предсказанных и реальных значений массы футеровки барабана мельницы

Построение рисунка 2.10 осуществлялось на основе тестовой выборки данных, используемых для проверки работы построенной модели. Для визуальной оценки точности модели на график нанесена биссектриса координатного угла, соответствующая теоретической эталонной зависимости между фактическими и предсказанными значениями.

Исследование изменения износа футеровки по спектру момента внутримельничной загрузки, вычисленного с помощью ПО Rocky DEM, позволяет создать методологическую основу для разработки алгоритма мониторинга износа футеровки барабана мельницы по спектру тока приводного двигателя. Рассматриваемый подход на основе использования метода дискретных элементов в программной среде Rocky DEM обеспечивает возможность изолированного анализа влияния изменения динамики внутримельничной загрузки на момент внутримельничной загрузки при разном износе, исключив фактор воздействия характеристик электропривода.

2.3 Исследование влияния изменения степени износа футеровки на ток приводного двигателя шаровой мельницы

2.3.1 Исходные данные для моделирования электропривода шаровой мельницы

В работе выполняются исследования по оценке влияния работы шаровой мельницы на ее электродвигатель. Рассматривается высоковольтный двигатель Siemens HV M 1RQ7632 напряжением 6 кВ и мощностью 2,1 МВт. Каталожные данные электродвигателя приведены в таблице 2.6.

В качестве нагрузочных характеристик электродвигателя взяты моменты сопротивления, полученные по результатам DEM-моделирования.

Таблица 2.6 – Каталожные данные двигателя Siemens HV M 1RQ7632 (составлено автором)

$P_{\text{ном}},$ кВт	$n_2,$ об/мин	$U_{\text{ном}},$ кВ	z	$\cos\varphi$	КПД	λ	K_p	K_i	$J,$ кг·м ²
2100	495	6	6	0,82	0,962	2,3	2,3	4,7	283

Где $P_{\text{ном}}$ – номинальная мощность двигателя;

n_2 – номинальная скорость двигателя;

z – число пар полюсов;

$\cos\varphi$ – коэффициент мощности;

λ – перегрузочная способность;

K_p – кратность пускового момента;

K_i – кратность пускового тока;

J – момент инерции двигателя.

Моделирование электромеханических процессов, протекающих в электроприводе, выполнено с учетом принятых допущений:

- изменение параметров Т-образной схемы замещения АД не учитывается;
- сопротивления обмоток АД приняты для установившегося температурного режима;
- статор и ротор имеют трехфазные симметричные обмотки;
- не учитывается гистерезис, насыщение и вихревые токи в магнитопроводе и прочие явления, связанные с неоднородностью магнитной проводимости;
- электромагнитный момент равен механическому моменту на валу;
- анализ электромеханических параметров АД осуществляется в установившихся его режимах работы.

Представленные допущения при моделировании электропривода обусловлены тем, что в работе не изучаются вопросы влияния конструкторских особенностей двигателя на формирование электромагнитного момента, а также не изучается вопрос электромеханических потерь, вызванных работой электропривода.

При исследовании электромагнитных и электромеханических процессов, протекающих в АЭП, на имитационной модели выполняется расчет: фазных токов статора и электромагнитного момента; частоты вращения ротора.

2.3.2 Математическое описание асинхронного электродвигателя шаровой мельницы

Асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором. Математическое описание асинхронного двигателя в неподвижной системе координат $\alpha\beta$ представлено уравнениями [21]:

- Электромагнитного равновесия (2.9):

$$\begin{cases} \frac{d\Psi_{1\alpha}}{dt} = U_{1\alpha} - R_1 I_{1\alpha} \\ \frac{d\Psi_{1\beta}}{dt} = U_{1\beta} - R_1 I_{1\beta} \\ \frac{d\Psi_{2\alpha}}{dt} = -R_1 I_{1\alpha} - \omega_2 \Psi_{2\beta} \\ \frac{d\Psi_{2\beta}}{dt} = -R_1 I_{1\beta} + \omega_2 \Psi_{2\alpha} \end{cases} \quad (2.9)$$

– Связей токов с потокосцеплениями (2.10):

$$\begin{cases} I_{1\alpha} = \frac{1}{\sigma L_1} \Psi_{1\alpha} - \frac{k_2}{\sigma L_1} \Psi_{2\alpha} \\ I_{1\beta} = \frac{1}{\sigma L_1} \Psi_{1\beta} - \frac{k_2}{\sigma L_1} \Psi_{2\beta} \\ I_{2\alpha} = -\frac{k_1}{\sigma L_2} \Psi_{1\alpha} + \frac{1}{\sigma L_1} \Psi_{2\alpha} \\ I_{2\beta} = -\frac{k_1}{\sigma L_2} \Psi_{1\beta} + \frac{1}{\sigma L_1} \Psi_{2\beta} \end{cases} \quad (2.10)$$

– Электромагнитного момента (2.11):

$$M = 1,5zL_0(I_{2\alpha}I_{1\beta} - I_{2\beta}I_{1\alpha}). \quad (2.11)$$

– Движения (2.12):

$$\frac{d\omega_2}{dt} = \frac{M - M_c}{J}. \quad (2.12)$$

Где $\Psi_{1\alpha}, \Psi_{1\beta}, \Psi_{2\alpha}, \Psi_{2\beta}$ – проекции вектора потокосцепления статора и ротора на оси системы координат $\alpha\beta$, Вб;

$U_{1\alpha}, U_{1\beta}, U_{2\alpha}, U_{2\beta}$ – проекции вектора напряжения статора и ротора на оси системы координат $\alpha\beta$, В;

$I_{s\alpha}, I_{s\beta}, I_{r\alpha}, I_{r\beta}$ – проекции вектора тока статора и ротора на оси системы координат $\alpha\beta$, А;

R_1, R_2 – активное сопротивление обмотки статора и ротора, Ом;

ω_2 – частота вращения ротора, рад/с;

σ – коэффициент рассеяния, о.е.;

$k_1 = L_0/L_1$ – коэффициент рассеяния статора, о.е.;

$k_2 = L_0/L_2$ – коэффициент рассеяния ротора, о.е.;

z – число пар полюсов;

L_0 – индуктивность зазора, Гн;

M – электромагнитный момент двигателя, Н·м;

M_c – момент сопротивления, Н·м;

J – момент инерции, кг·м².

2.3.3 Определение износа футеровки барабана с помощью анализа спектра потребляемого тока приводного двигателя шаровой мельницы

В работах [110, 81] оценка внутримельничной загрузки выполняется на основе анализа спектра момента. В [110] оценка внутримельничной загрузки осуществляется на основе механического момента, измеренного с помощью датчика момента, который установлен на валу между двигателем и нагрузкой. В [81] оценка выполнена на основе электромагнитного момента, который вычисляется с помощью наблюдателя координат на основе электромеханических переменных.

Так как в формировании электромагнитного момента M участвуют два основных вектора: ток статора \bar{I}_1 и потокосцепление ротора $\bar{\Psi}_2$, то справедливо рассматривать возможность оценки износа футеровки по току статора (формула 2.13).

$$M = 1,5zk_2|\bar{I}_1||\bar{\Psi}_2| \sin \theta, \quad (2.13)$$

где θ – угол между векторами \bar{I}_1 и $\bar{\Psi}_2$.

Комплексная имитационная модель электродвигателя шаровой мельницей, разработанная в программной среде Matlab Simulink на основе уравнений (2.9-2.12) и сигналов моментов внутримельничной загрузки из ПО Rocky DEM, представлена на рисунке 2.11.

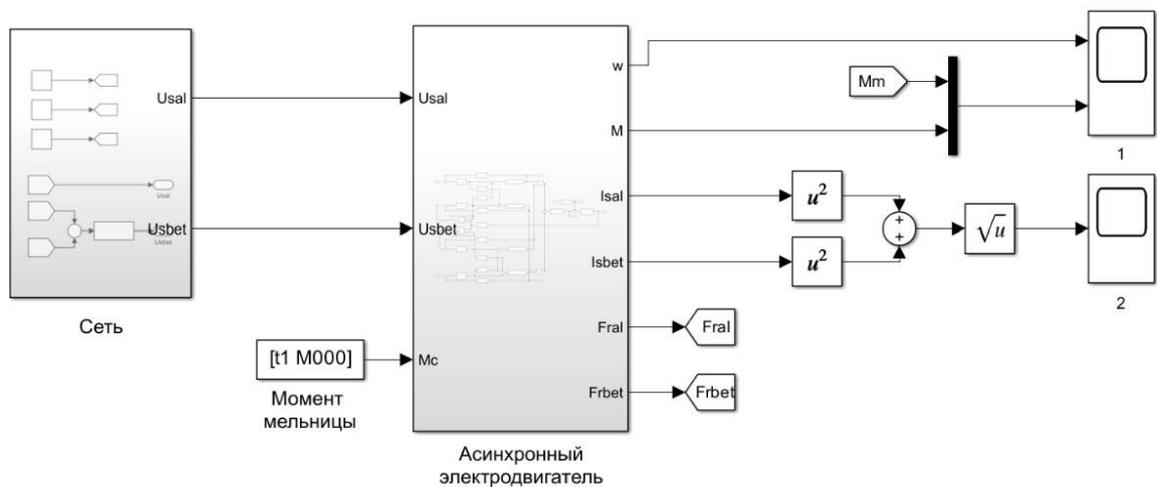
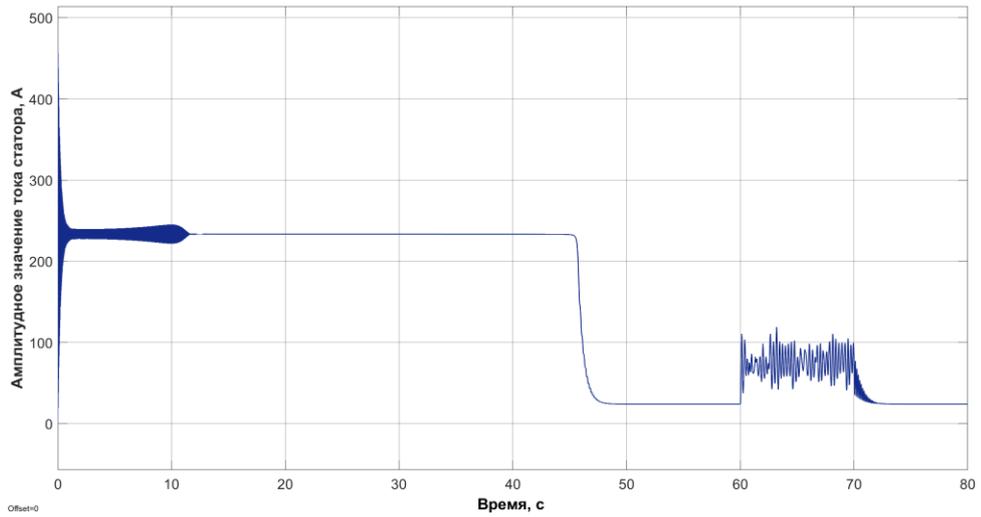
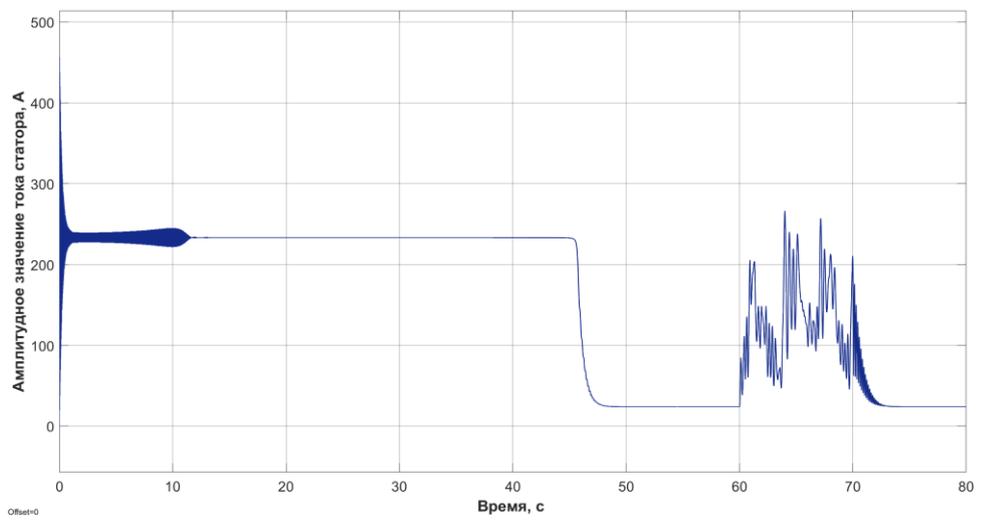


Рисунок 2.11 – Комплексная имитационная модель высоковольтного двигателя шаровой мельницы (составлено автором)

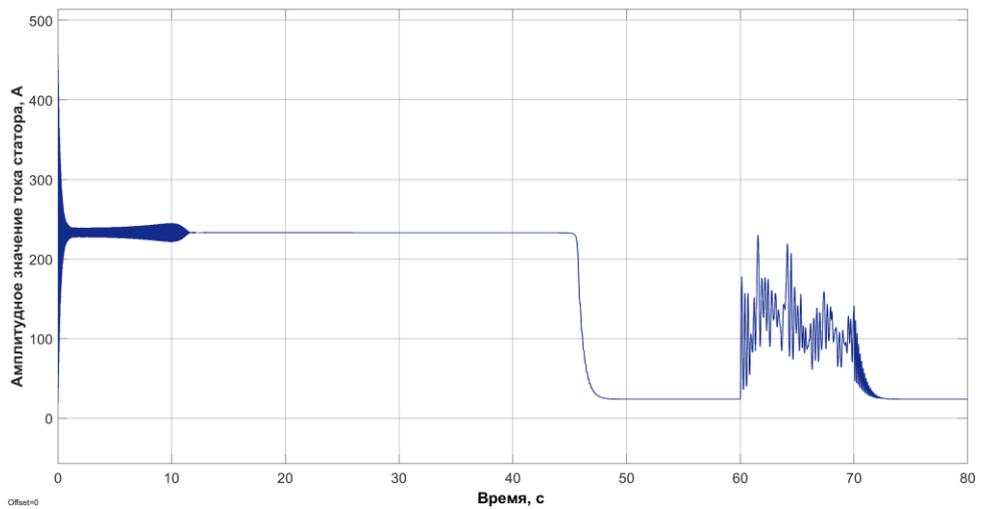
Характер изменения внутримельничной загрузки отражается, как и в сигнале механического момента сопротивления, так и в спектре потребляемого тока. На рисунке 2.12 представлены амплитудные значения тока статора при соответствующей степени износа футеровки барабана мельницы.



а)



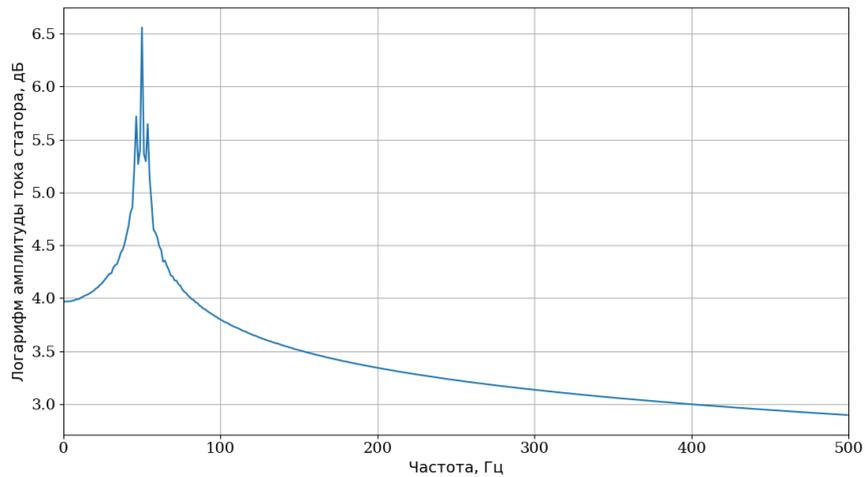
б)



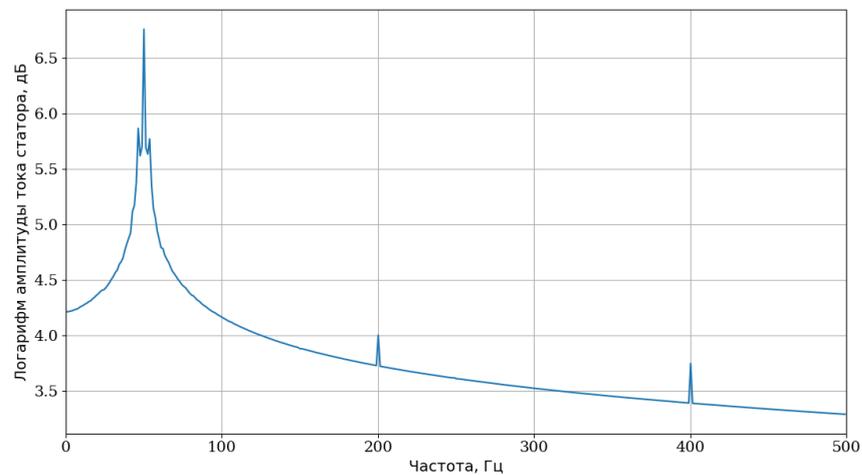
в)

Рисунок 2.12 – Вычисленные амплитудные значения тока статора с помощью комплексной модели электродвигателя шаровой мельницы в Matlab Simulink при разном износе: а) износ 0%; б) износ 24,5%; в) износ 49% (составлено автором)

В спектрах тока двигателя наблюдаются характерные гармоники, амплитуда которых зависит от изменения износа футеровки барабана мельницы (рисунок 2.13).



а)



б)

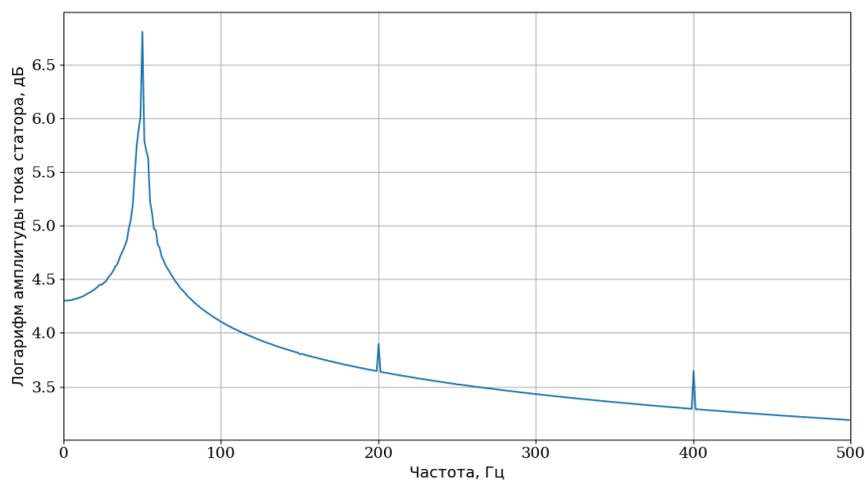


Рисунок 2.13 – Вычисленные спектры тока статора на основе комплексной модели электродвигателя шаровой мельницы в Matlab Simulink при разном износе: а) спектр тока статора при износе 0%; б) спектр тока статора при износе 24,5%; в) спектр тока статора при износе 49% (составлено автором)

Процесс измельчения характеризуется высокой динамикой. Амплитуда колебаний момента внутримельничной загрузки превышает 50% от его среднего значения. При износе футеровки наблюдается увеличение амплитуды колебаний, что приводит к выходу электродвигателя в режим опрокидывания. Отсутствие преобразователя частоты в составе электропривода лишает систему возможности динамической подстройки под изменяющийся момент нагрузки, что снижает устойчивость работы электродвигателя. Для обеспечения устойчивости моделирования электромеханической системы шаровой мельницы нагрузочный момент на валу двигателя был задан на 40% меньше относительно расчётных данных момента внутримельничной загрузки.

Определение износа по дополнительной гармонике, возникающей на 100 Гц, затруднен. В спектре тока двигателя отчетливо локализуются гармоники около 200,2 Гц и 400,4 Гц, как и в спектре момента внутримельничной загрузки мельницы.

Модель XGBoost выявила устойчивую взаимосвязь между входными признаками и целевым показателем, что подтверждается метрикой R^2 . В классическом понимании XGBoost не является полностью интерпретируемым алгоритмом, так как его работа представляет собой модель типа «чёрного ящика». Ансамблевые методы используют множественные деревья для выявления сложных нелинейных взаимосвязей, что снижает интерпретируемость модели по сравнению с одиночным деревом решений. С учетом отсутствия монотонной тенденции в изменении амплитуд характерных гармонических составляющих при изменении износа рассматривается комплексный показатель – коэффициент гармоник, введенный автором диссертационной работы.

Расчет коэффициента гармоник выполняется по формуле (2.14).

$$K = \frac{\sqrt{A(f_2)^2 + A(f_3)^2}}{A(f_1)} \quad (2.14)$$

где K – коэффициент гармоник;

$A(f_1)$ – основная амплитуда спектра на частоте 0 Гц, дБ;

$A(f_2)$ и $A(f_3)$ – амплитуды спектра, возникающие при износе футеровки на частотах 200,2 Гц и 400,4 Гц, соответственно, дБ.

Оценка влияния износа футеровки на спектр тока приводного двигателя выполняется согласно разработанному алгоритму, блок-схема которого представлена на рисунке 2.14.

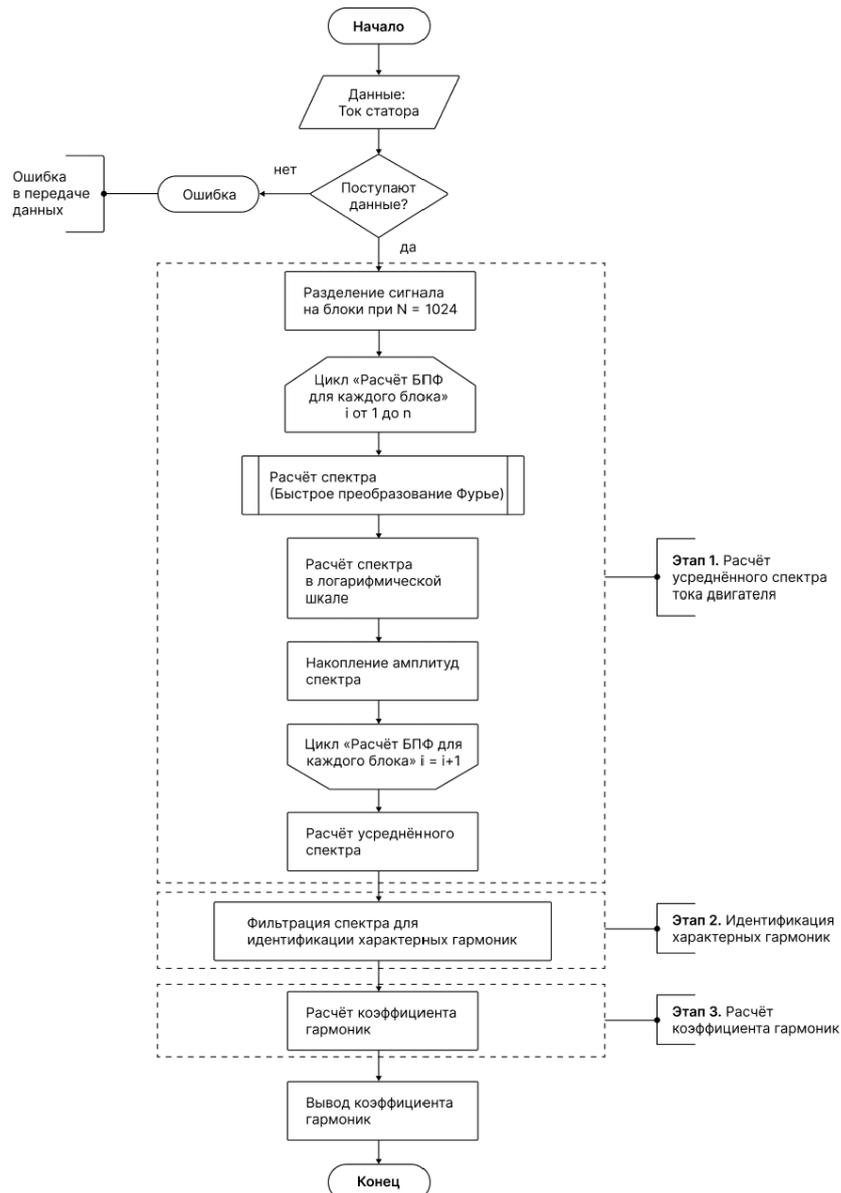


Рисунок 2.14 – Блок-схема алгоритма мониторинга износа футеровки барабана шаровой мельницы (составлено автором)

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

Первым этапом выполняется расчет усредненного спектра тока двигателя на основе функции БПФ. Входной сигнал тока разделяется на блоки. Количество блоков определяется длиной сигнала и размером БПФ. Для каждого блока выполняется БПФ и последующее накопление амплитуд спектра в логарифмической шкале. Далее, выполняется расчет усредненного спектра (формула 2.15).

$$L[k] = \log_{10} |\overline{\beta[k]}|, k = 0, 1, \dots, N - 1, \quad (2.15)$$

где $L[k]$ – логарифмический амплитудный спектр тока двигателя, дБ;

$\overline{\beta[k]}$ – усредненный амплитудный спектр тока двигателя, А;

N – длина спектра.

Усреднение спектров используется в спектральном анализе для подавления случайных шумов и усиления полезного сигнала [25, 119, 125]. Этот подход основан на том, что при многократных измерениях:

- шумовые компоненты, будучи случайными, взаимно компенсируются при усреднении;
- полезный сигнал, оставаясь неизменным и стабильным, накапливается и становится более выраженным.

На втором этапе выполняется идентификация характерных гармоник на основе фильтрации спектра. Фильтрация выполняется на основе порогового коэффициента (j), при котором обнаруживаются характерные гармоники в спектре. Параметр j является настраиваемым по результатам проведения экспериментов. В соответствии с формулой 2.16 при фильтрации спектра осуществляется поиск множества характерных гармоник.

$$P = \{k | L[k] > j \cdot \max(L)\}, \quad (2.16)$$

где P – множество гармоник k ;

j – пороговый коэффициент, при котором обнаруживаются характерные гармоники в спектре;

$\max(L)$ – максимальное значение усредненного спектра, дБ.

Далее, осуществляется поиск частот, на которых зафиксированы соответствующие гармоники и их амплитуды (формула 2.17).

$$\begin{aligned} f &= f[P] = \{f[k] | k \in P\} \\ A &= L[P] = \{L[k] | k \in P\} \end{aligned} \quad (2.17)$$

где f – массив частот, на которых зафиксированы характерные гармоники, превышающие пороговое амплитудное значение;

A – массив амплитуд характерных гармоник.

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 по формуле 2.14.

По результатам проведенных исследований установлено, что коэффициент гармоник позволяет определить степень износа футеровки барабана мельницы. На рисунке 2.15 приведена зависимость степени износа футеровки от коэффициента гармоник.

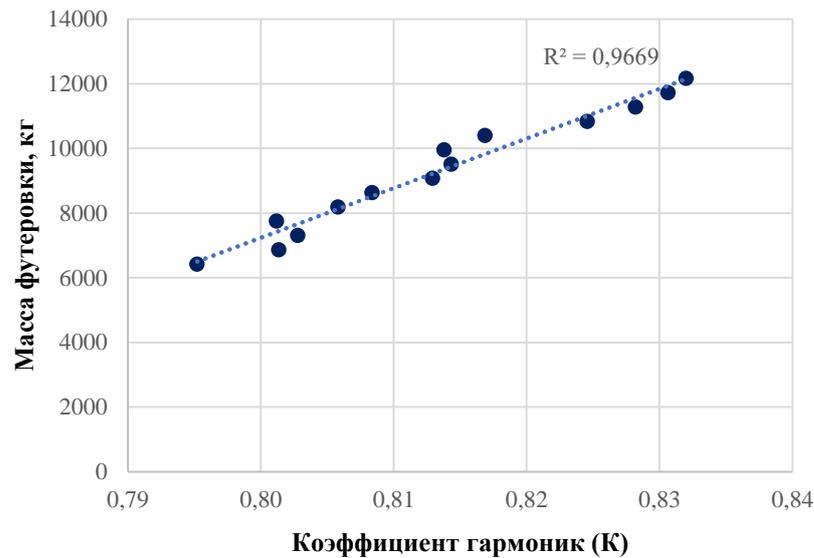


Рисунок 2.15 – Зависимость степени износа футеровки барабана от коэффициента гармоник

2.4 Выводы по главе 2

1. Для реализации бесконтактного мониторинга износа футеровки барабана шаровой мельницы предложен способ, основанный на анализе спектральных характеристик тока статора приводного электродвигателя. Возникновение износа футеровки приводит к изменению динамики движения внутримельничной загрузки, что проявляется в виде характерных гармонических составляющих в спектре потребляемого тока.

2. Разработана комплексная имитационная модель электродвигателя шаровой мельницы, объединяющая механическую систему барабана, динамику внутримельничной загрузки и электромагнитные процессы, протекающие в двигателе.

Модель реализована с использованием метода дискретных элементов (DEM) для описания взаимодействия шаровой загрузки и руды и влияния внутримельничной загрузки на корпус барабана мельницы, а также математического описания асинхронного двигателя в фазных координатах. Моделирование процесса измельчения выполнено в программной среде Rocky DEM. Комплексная имитационная модель электродвигателя шаровой мельницы разработана в среде Matlab Simulink. Модель обеспечивает импорт данных момента внутримельничной загрузки, полученных по результатам моделирования в Rocky DEM. Разработанная комплексная модель позволила воспроизвести реальные физические процессы и установить корректные взаимосвязи между механическими и электрическими параметрами системы «шаровая мельницы-электродвигатель».

3. На основе комплексной модели электродвигателя шаровой мельницы доказана принципиальная возможность использования спектра тока статора электродвигателя для оценки износа футеровки барабана мельницы. Выявлено, что изменения в динамике шаровой загрузки,

вызванные износом футеровки, приводят к формированию характерных гармонических составляющих в спектре тока. Данные гармоники возникают из-за модуляции момента нагрузки, связанной с изменением траектории движения внутримельничной загрузки и снижением высоты отрыва частиц при износе лифтеров. Это подтверждает гипотезу о возможности бесконтактного мониторинга параметров мельницы по доступным электрическим характеристикам.

4. Установлена взаимосвязь между степенью износа футеровки барабана и изменением амплитуд гармоник в спектре тока статора.

По результатам первого этапа исследований, выполненного в ПО Rocky DEM, установлено, что наличие износа футеровки приводит к формированию характерных гармонических составляющих на частотах 200,2 Гц и 400,4 Гц в спектре момента внутримельничной загрузки. Дополнительно выявлены гармонические составляющие на частотах 100 Гц и 300 Гц, которые формируются в отдельных сценариях при значительном износе лифтеров. Установлена нелинейная корреляция между амплитудами характерных гармоник и степенью износа футеровки, проявляющаяся в изменении монотонности амплитуд гармонических составляющих с их избирательным усилением или ослаблением отдельных амплитуд. Оценка взаимосвязи износа футеровки и спектра внутримельничной загрузки выполнена на основе XGBoost-аппроксиматора. Качество восстановленной регрессии оценено с помощью коэффициента детерминации, значение которого составляет 0,84 для тестовой выборки данных, что подтверждает высокую сходимость результатов.

По результатам второго этапа исследования, выполненного на комплексной модели электродвигателя шаровой мельницы в Matlab Simulink, подтверждена локализация характерных гармоник около 200,2 Гц и 400,4 Гц в спектре тока двигателя шаровой мельницы. Для установления взаимосвязи между износом футеровки и спектром тока статора предложен коэффициент гармоник тока статора. Подтверждена линейная корреляция между коэффициентом гармоник тока статора и износом футеровки, позволяющая выполнять количественную оценку износа барабана мельницы по спектральному составу тока двигателя.

5. Разработан алгоритм мониторинга износа футеровки барабана на основе спектра тока приводного двигателя шаровой мельницы, который вычисляется с помощью комплексной имитационной модели электродвигателя шаровой мельницы.

ГЛАВА 3 РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА УПРАВЛЕНИЯ СКОРОСТЬЮ ЭЛЕКТРОДВИГАТЯ ШАРОВОЙ МЕЛЬНИЦЫ

Данная глава посвящена разработке алгоритма управления скоростью электродвигателя шаровой мельницы. Разработка алгоритма выполнена на основе динамической модели процесса измельчения, параметры которой отличаются в зависимости от свойств перерабатываемой руды. Алгоритм позволит осуществлять расчет оптимальной частоты вращения, которая обеспечивает достижение необходимого количества готового класса в продукте измельчения с учетом компенсации динамики изменения диаметра мельницы и объемного заполнения шаровой загрузки.

3.1 Математическое описание процесса измельчения в шаровой мельнице

Целевой функцией процесса измельчения является получение определенного количества готового класса. Готовый класс определяется размером частиц и выбирается, исходя из технологии производства. В качестве модели измельчительного агрегата выбрана модель популяционного баланса при идеальном перемешивании материала внутри мельницы [106, 126]. Модель используется для описания процесса измельчения в шаровой мельнице в открытом цикле. Преимуществом данной модели является взаимосвязь распределения грансостава готового продукта от условий измельчения и от количества подаваемого сырья определенной фракции. С помощью модели популяционного баланса при идеальном перемешивании можно отобразить процесс уменьшения крупности разрушаемого материала по классам крупности (рисунок 3.1).

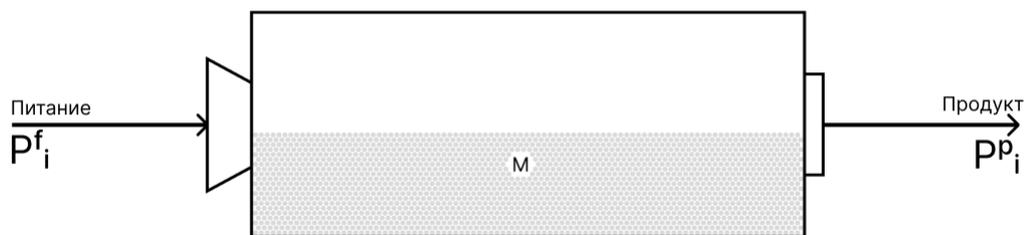


Рисунок 3.1 – Модель идеального перемешивания (составлено автором)

Согласно уравнению популяционного баланса количество разрушаемой фракции зависит от количества подаваемого сырья этой фракции в мельницу, от разрушения суммарного количества частиц большего размера и их накопления в мельнице и от разрушения фракции до меньших классов. С учетом накопления материала в мельнице уравнение популяционного баланса для i -го класса крупности принимает вид (3.1):

$$\frac{dm_i}{dt} = Wp_i^f - Wp_i^p + M \sum_{j=1}^{i-1} b_{ij}k_jm_j - Mk_im_i, \quad (3.1)$$

где m_i и m_j – доли материала в мельнице в классах крупности i и j , соответственно;

W – массовый расход материала в мельнице, т/ч;

p_i^f – доля исходного продукта в классе крупности i (питание мельницы);

p_i^p – доля готового продукта в классе крупности i ;

M – масса материала в мельнице, т;

b_{ij} – приращение функции разрушения;

k_i и k_j – функция селективности для классов i и j , мин⁻¹.

При достижении установившегося режима процесса измельчения уравнение 3.1 будет иметь вид (3.2):

$$Wp_i^f + M \sum_{j=1}^{i-1} b_{ij}k_jm_j = Wp_i^p + Mk_im_i. \quad (3.2)$$

Разделив уравнение 3.2 на W и с учетом условия идеального перемешивания содержимого, при котором $m_i = p_i$ и $m_j = p_j$, уравнение примет следующий вид:

$$p_i^f + \tau \sum_{j=1}^{i-1} b_{ij}k_jp_j^p = p_i^p + \tau k_i p_i^p, \quad (3.3)$$

где τ – среднее время нахождения материала в мельнице, мин.

При накоплении материала в мельнице уравнение (3.1) будет выглядеть следующим образом (3.4):

$$p_i^f + \tau \sum_{j=1}^{i-1} b_{ij}k_jp_j^p = p_i^p + \tau k_i p_i^p + \frac{dp_i}{dt}. \quad (3.4)$$

Для готового продукта по каждому из рассматриваемых классов крупности составляется уравнение (формула 3.5).

$$p_i^p = \frac{p_i^f + \tau \sum_{j=1}^{i-1} b_{ij}k_jp_j^p}{1 + \tau k_i}. \quad (3.5)$$

Разрушение частиц описывается двумя основными функциями:

- функция разрушения (B_{ij});
- функция селективности (k_i и k_j).

Процесс измельчения характеризуется инерционностью. Разрушение руды происходит после накопления определенного количества материала в мельнице. Время нахождения материала в мельнице (τ) в среднем составляет 20-25 минут в зависимости от свойств руды и условий измельчения. Данный временной диапазон был получен в результате проведения натурального эксперимента. Среднее время нахождения материала в мельнице (τ_{cp}) определяется согласно формуле 3.6.

$$\tau_{cp} = \frac{t_1 + t_2}{2}, \quad (3.6)$$

где t_1 – время, за которое из мельницы осуществляется выгрузка материала после начала подачи руды на входе, мин;

t_2 – время, за которое из мельницы прекращается выгрузка материала после завершения подачи материала в мельницу, мин.

Функция разрушения. Функция разрушения определяет переход количества материала из j -го класса в i -ый класс. Функция показывает долю частиц размерного класса i – дочерних частиц, возникающую в результате однократного удара частиц исходного размера j – родительских частиц. Функция разрушения B_{ij} описывается моделью Остина [69] с помощью формулы 3.7.

$$B_{ij} = K \left(\frac{D_i}{D_j} \right)^{n_1} + (1 - K) \left(\frac{D_i}{D_j} \right)^{n_2}, \quad (3.7)$$

где D_i, D_j – размеры дочерних и родительских частиц, определяемые размерами ячеек сит, мм;

K, n_1 и n_2 – эмпирические коэффициенты, определяемые типом измельчаемой руды.

Для каждой исходной частицы (родительской частицы) характерна своя функция разрушения (рисунок 3.2).

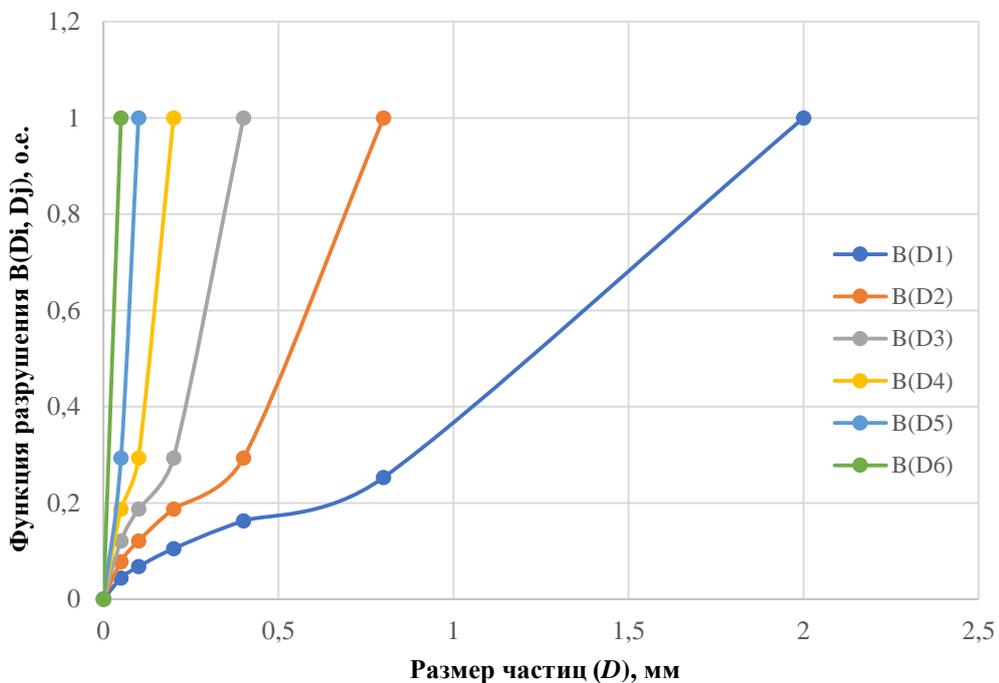


Рисунок 3.2 – Функция разрушения (составлено автором)

Вычисление функции разрушения для каждого класса крупности осуществляется согласно формуле 3.8.

$$b_{ij} = B(D_{i-1}, D_j) - B(D_i, D_j) \text{ или } b_{ij} = B_{i-1,j} - B_{ij}. \quad (3.8)$$

Разрушение родительской частицы j осуществляется при переходе нижней границы размерного класса. Для родительской частицы приращение функции разрушения $b_{jj} = 0$.

Функция селективности. Функция селективности (удельной скорости разрушения частиц) определяет вероятность разрушения частиц. Функция определяется распределением репрезентативного размера частиц. Функция селективности описывается моделью Остина [69] по формуле 3.9.

$$k_i = \frac{S_1 d_{pi}^\alpha}{1 + \left(\frac{d_{pi}}{\mu}\right)^\lambda}, \quad (3.9)$$

где S_1 – удельная скорость разрушения для частиц размером 1 мм, мин⁻¹;

d_{pi} – репрезентативный диаметр частиц i -го класса, мм;

α , μ , λ – параметры функции, определяемые эмпирическим путем (зависят от свойств измельчаемой руды и условий измельчения).

Вычисление репрезентативного размера частиц (d_{pi}) осуществляется следующим образом (3.10):

$$d_{pi} = \sqrt{D_N D_{N-1}}, \quad (3.10)$$

где D_N и D_{N-1} – размеры ячеек сит N и $N - 1$, мм.

Вычисление репрезентативного размера частиц для первого d_{p1} и последнего d_{pi} размерных классов осуществляется следующим образом (3.11):

$$\begin{aligned} d_{p1} &= \frac{d_{p2}^2}{d_{p3}}, \\ d_{pi} &= \frac{d_{pi-1}^2}{d_{pi-2}}, \end{aligned} \text{ мм.} \quad (3.11)$$

Верификация функций разрушения и селективности осуществляется под определенную измельчаемую руду и условия измельчения. Условия измельчения в модели Остина определяются следующими параметрами:

- диаметр мельницы;
- диаметр измельчающих тел – шаров;
- количество шаровой загрузки;
- скорость вращения мельницы.

Применительно к задачам диссертационной работы актуально рассмотреть условия измельчения, среди которых: диаметр мельницы, количество шаровой загрузки и скорость вращения измельчающего агрегата.

При изменении условий измельчения для функции селективности применяются масштабирующие коэффициенты C_1, C_2, C_3, C_4 согласно формуле 3.12.

$$k_i = \frac{S_1 d_{pi}^\alpha}{1 + \left(\frac{d_{pi}}{C_1 \mu}\right)^\lambda} C_2 C_3 C_4. \quad (3.12)$$

Коэффициент, учитывающий изменение диаметра мельницы C_1 (в приведенной формуле отсутствует поправка на изменение диаметра шаров, так как изменение данного параметра не предполагается) (формула 3.13).

$$C_1 = \left(\frac{D}{D_{ref}}\right)^{0,2}, \quad (3.13)$$

где D_{ref} – установленный диаметр мельницы, м,

D – новый диаметр мельницы, м.

Коэффициент, учитывающий изменение диаметра мельницы C_2 (формула 3.14).

$$C_2 = \left(\frac{D}{D_{ref}} \right)^{0,5}. \quad (3.14)$$

Коэффициент, учитывающий изменение шаровой загрузки и количества материала в межшаровом пространстве C_3 (формула 3.15).

$$C_3 = \frac{1+6,6J_{ref}^{2,3}}{1+6,6J^{2,3}} e^{-1,3(U-U_{ref})}, \quad (3.15)$$

где J_{ref} – доля установленного объемного заполнения шаровой загрузки с учетом ее насыпной плотности;

J – доля нового объемного заполнения шаровой загрузки с учетом ее насыпной плотности;

U_{ref} – доля установленного пространства между шарами, заполненного пульпой;

U – новая доля установленного пространства между шарами, заполненного пульпой.

Коэффициент, учитывающий изменение скорости мельницы C_4 (формула 3.16).

$$C_4 = \frac{\varphi-0,1}{\varphi_{ref}-0,1} \cdot \frac{1+e^{15,7 \cdot (\varphi_{ref}-0,94)}}{1+e^{15,7 \cdot (\varphi-0,94)}}, \quad (3.16)$$

где φ_{ref} – установленная скорость мельницы в долях от критической скорости;

φ – новая скорость мельницы в долях от критической скорости.

3.2 Исходные данные для моделирования процесса измельчения

В качестве объекта моделирования выбрана шаровая мельница МШЦ 4,5х6,0, измельчающая магнетитовые кварциты и работающая в открытом цикле. Задача оптимизации модели мельницы выполнялась для семи классов крупности с соответствующими размерами ячеек сит (D_N) и репрезентативными диаметрами (d_{pi}) (рисунок 3.3).

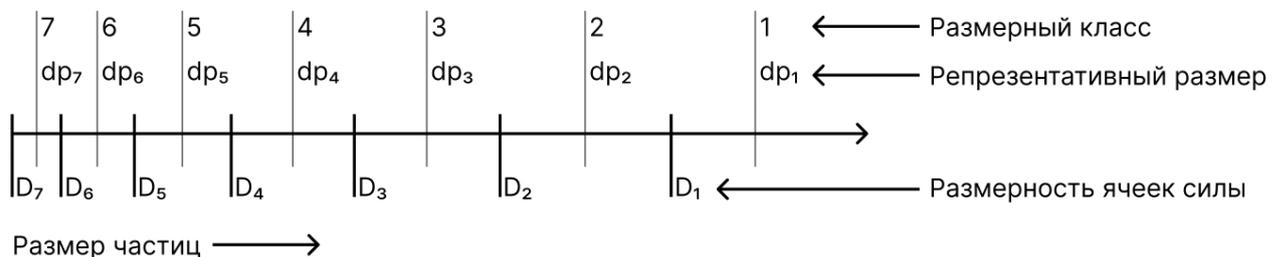


Рисунок 3.3 – Рассматриваемые классы крупности и размеры ячеек (составлено автором)

Согласно [69, 99] для магнетитовых кварцитов справедливо осуществлять подбор настроечных параметров модели измельчения в диапазонах, представленных в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Диапазоны изменения принимаемых значений настроечных параметров модели (составлено автором)

Функция разрушения B_{ij}			
K	n_1	n_2	-
[0,35;1)	[0,6;1]	[3;8]	-
Функция селективности k_i			
S_1	α	Λ	μ
[0,25;0,5]	[1,5;2,2]	[0,5;2,5]	1

Условия измельчения для каждого измельчительного агрегата подбираются по результатам опытно-промышленной эксплуатации. Для рассматриваемой шаровой мельницы МШЦ 4,5х6,0, осуществляющей измельчение на первой стадии измельчения железорудного комбината установлено, что среднее время измельчения (τ_{cp}) составляет 21 минуту. Условия измельчения, применяемые в качестве параметров модели, приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Номинальные условия измельчения мельницы МШЦ 4,5х6,0 (составлено автором)

Диаметр мельницы (с учетом футеровки)	$D_{ref}, \text{ м}$	4,1
Объемное заполнение шаровой загрузки с учетом ее насыпной плотности в долях	J_{ref}	0,3
Доля пространства между шарами, заполненная пульпой	U_{ref}	1
Скорость мельницы в долях от критической	φ_{ref}	0,65

3.3 Оптимизация динамической модели шаровой мельницы

3.3.1 Кластеризация исходных данных и постановка задачи оптимизации

Идентификация параметров модели мельницы выполнялась согласно экспериментальным данным водно-шламовых и количественно-качественных схем железорудного комбината.

В зависимости от источников поступающей руды реакция измельчительного агрегата на шихту будет отличаться. В рамках рассматриваемой модели процесса измельчения (формула 3.5) осуществляется подбор ее оптимальных параметров, представленных в таблице 3.1, в зависимости от измельчаемой руды. Это позволяет разработать динамическую модель процесса измельчения.

Рассматриваемые пять источников руды классифицированы на труднообогатимую руду (ТОР) и легкообогатимую руду (ЛОР), при этом четыре из них относятся к труднообогатимой руде. В процентном соотношении указывается доля подаваемой руды из соответствующего источника.

На основе 29 валидных комплексных опробований источники руды были ранжированы по процентному содержанию ЛОР от общего количества руды.

Для ранжированной руды выполнялась задача кластеризации (рисунок 3.4). В рамках решаемой задачи использовался метод K-means (K-средних) [67]. Данный метод кластеризации разбивает данные на K кластеров, минимизируя суммарное квадратичное отклонение точек от центров их кластеров. Метод получил широкую применимость в решении стандартных задач классификации, отличается простотой и быстротой в своей реализации.

Выделено три кластера ($K = 3$) с соответствующими центроидами (C), которые интерпретируются следующим образом:

1. Кластер 1: Низкое содержание ЛОР в диапазоне $[0 ; 0,2]$, $C_1 = 0,15$.
2. Кластер 2: Среднее содержание ЛОР в диапазоне $(0,2 ; 0,6)$, $C_2 = 0,37$.
3. Кластер 3: Высокое содержание ЛОР в диапазоне $[0,6 ; 0,8]$, $C_3 = 0,74$.

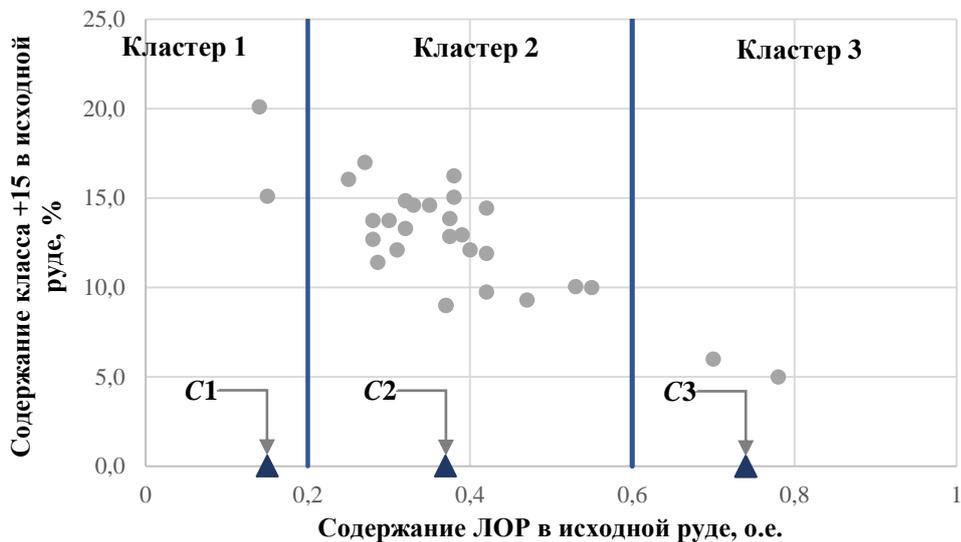


Рисунок 3.4 – Кластеризация исходной руды (составлено автором)

Для каждого кластера руды характерно соответствующее гранулометрическое распределение P^f . По крайнему классу руды +15 можно проследить зависимость: чем больше количества ЛОР в исходной руде, тем меньшее содержание класса +15 в гранулометрическом распределении (рисунок 3.4).

Кластер 2 является целевым кластером, так как удовлетворяет технологическому регламенту и соответствует оптимальному соотношению подаваемой руды на обогащение согласно финансовой модели предприятия.

Кластеры 1 и 3 являются аномальными по отношению к целевому, попадание в которые приводит, в том числе, к отклонению ситовых характеристик.

Задача оптимизации динамической модели шаровой мельницы выполняется на основе средних гранулометрических характеристик питания и продукта измельчения для каждого кластера руды.

Для каждого гранулометрического распределения исходной руды P^f рассматриваемых кластеров требуется подобрать множество оптимальных параметров модели K для достижения соответствующего гранулометрического распределения готового продукта измельчения P^p (формула 3.17).

$$P^f \rightarrow P^p = f(K|W, \rho, \varphi, d, D, n = \text{const}). \quad (3.17)$$

Критерием оптимизации является минимальное отклонение между прогнозируемым и реальным распределениями готового продукта измельчения.

Задача оптимизации параметров модели шаровой мельницы выполняется под исходные кластеры руды при условиях:

- постоянной производительности мельницы: $W = \text{const}$;
- постоянного значения плотности в мельнице: $\rho = \text{const}$;
- постоянного значения шаровой загрузки: $\varphi = \text{const}$;
- одного типоразмера и постоянного диаметра шаров: $d = \text{const}$;
- постоянного диаметра барабана мельницы: $D = \text{const}$;
- постоянной скорости вращения мельницы: $n = \text{const}$.

3.3.2 Алгоритм оптимизации

Для поиска наилучших комбинаций параметров $\{K\}$ в заданных диапазонах, указанных в таблице 3.1, решается задача оптимизации.

Оптимизация выполняется согласно методу Недлера-Мида [83, 93]. Выбор алгоритма обусловлен простотой, так как не требует вычисления частных производных, а также хорошими результатами сходимости в результате его применения. Рассматриваемый метод относится к безградиентным методам оптимизации и работает на основе вычисления формы симплекса (формула 3.18).

$$\min f(x), \quad f \in R^n, \quad (3.18)$$

где f – целевая функция (зависит от n вещественных переменных), поиск минимума которой осуществляется в n -мерном пространстве;

R – множество вещественных чисел.

Симплекс представляет собой геометрическую фигуру в n измерениях, образованный выпуклой оболочкой из $n + 1$ вершин. Пусть вершины симплекса обозначены как x_1, x_2, \dots, x_{n+1} . Алгоритм итеративно создает последовательность симплексов и изменяет их форму для приближения функции к оптимальной точке за счет замены наихудших вершин на наилучшие.

На каждой итерации вершины симплекса $\{x_j\}_{j=1}^{n+1}$ упорядочиваются в соответствии со значениями целевой функции (формула 3.19).

$$f(x_1) \leq f(x_2) \leq \dots \leq f(x_{n+1}). \quad (3.19)$$

Вершина x_1 является лучшей вершиной, а x_{n+1} – худшей.

В алгоритме применяется четыре основные операции: отражение, расширение, сжатие и редукция. Операции представляют собой способы деформации симплекса для поиска минимума функции. Каждая операция связана со скалярным параметром: α (отражение), β (расширение), γ (сжатие) и δ (редукция). Значения данных параметров удовлетворяют условиям: $\alpha > 0$; $\beta > 1$; $0 < \gamma < 1$; $0 < \delta < 1$. При стандартной реализации метода Нелдера-Мида [99, 108] параметры приведенных операции выбираются следующим образом (3.20):

$$\{\alpha, \beta, \gamma, \delta\} = \left\{1, 2, \frac{1}{2}, \frac{1}{2}\right\}. \quad (3.20)$$

Пусть \bar{x} – центроид n вершин, тогда (3.21):

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i. \quad (3.21)$$

Порядок выполнения алгоритма для одной итерации представлен следующими основными шагами:

1. Сортировка. Выполняется сортировка вершин по значению функции согласно (3.19) и выбирается наихудшая точка, которая соответствует наибольшему значению функции.

2. Отражение. Вычисляется точка отражения x_r по формуле 3.22.

$$x_r = \bar{x} + \alpha(\bar{x} - x_{n+1}). \quad (3.22)$$

Далее, выполняется вычисление $f_r = f(x_r)$. Если выполняется условие $f_1 \leq f_r < f_n$, точка x_{n+1} заменяется на x_r .

3. Расширение. Если по результатам отражения выполняется условие $f_r < f_1$, вычисляется точка расширения x_e по формуле 3.23.

$$x_e = \bar{x} + \beta(x_r - \bar{x}). \quad (3.23)$$

Выполняется вычисление функции $f_e = f(x_e)$. Если $f_e < f_r$, x_{n+1} заменяется на x_e ; в противном случае, x_{n+1} заменяется на x_r .

4. Внешнее сжатие. Если $f_n \leq f_r < f_{n+1}$, вычисляется внешняя точка сжатия по формуле 3.24.

$$x_{oc} = \bar{x} + \gamma(x_r - \bar{x}). \quad (3.24)$$

Выполняется вычисление функции $f_{oc} = f(x_{oc})$. Если $f_{oc} \leq f_r$, x_{n+1} заменяется на x_{oc} ; в противном случае, алгоритм переходит к редукции (шаг 6).

5. Внутреннее сжатие. Если $f_r \geq f_{n+1}$, вычисляется внутренняя точка сжатия по формуле 3.25.

$$x_{ic} = \bar{x} - \gamma(x_r - \bar{x}). \quad (3.25)$$

Выполняется вычисление функции $f_{ic} = f(x_{ic})$. Если $f_{ic} < f_{n+1}$, x_{n+1} заменяется на x_{ic} ; в противном случае, алгоритм переходит к редукции (шаг 6).

6. Редукция. Если условия сжатия не выполняются, алгоритм переходит к редукции, и точки симплекса приближаются к лучшей точке x_1 (формула 3.26). Для $2 \leq i \leq n + 1$ определяется точка редукции:

$$x_i = x_1 + \delta(x_i - x_1). \quad (3.26)$$

Повтор шагов алгоритма и составление нового симплекса продолжается до тех пор, пока не будет достигнуто условие сходимости согласно заданной точности. По достижению заданных условий сходимости симплекс стабилизируется вокруг точки минимума, а значения функции перестают существенно изменяться.

В рамках применяемого алгоритма используются следующие условия сходимости:

1. Минимально допустимый размер симплекса ($xatol$). Алгоритм останавливается, когда расстояние между всеми вершинами симплекса становится меньше 10^{-8} .

2. Минимально допустимая разница значений функции в вершинах симплекса ($fatol$). Алгоритм останавливается, когда разница между лучшим и худшим значениями функции в симплексе меньше 10^{-8} .

3. Максимальное число итераций алгоритма ($maxiter$). Алгоритм остановится после 1000 итераций, даже если предыдущие условия не будут выполнены.

Параметры инициализации для поиска оптимальных значений установлены в виде средних величин граничных интервалов, указанных в таблице 3.1.

В качестве метрики, в соответствии с которой выполняется задача оптимизации выбрана евклидова норма – L_2 [54-55]. Использование данной метрики позволяет учесть существенные выбросы и минимизировать незначительные.

В контексте выполняемой задачи на основе L_2 вычисляется расстояние $\|\Delta\|_2$ между двумя векторами гранулометрических распределений: реального и прогнозируемого по формуле 3.27.

$$\|\Delta\|_2 = \sqrt{\sum_{i=1}^n (p_i^{pp} - p_i^p)^2}, \quad (3.27)$$

где p_i^{pp} – прогнозируемые значения математической модели по классам крупности;

p_i^p – реальные значения по классам крупности.

Оптимизация параметров модели осуществляется в соответствии с критерием оптимизации (формула 3.28).

$$\|\Delta\|_2 \rightarrow \min. \quad (3.28)$$

3.3.3 Результаты оптимизации динамической модели шаровой мельницы

Оптимизация параметров модели осуществлялась с помощью языка программирования Python. Модель процесса измельчения шаровой мельницы составлена на основе уравнений 3.5 и 3.7-3.11.

Реальные распределения усредненных характеристик количества питания (p_i^f) и продукта измельчения (p_i^p) по классам крупности в долях по кластерам представлены в таблицах 3.3-3.5.

Таблица 3.3 – Реальные усредненные распределения питания и продукта измельчения по классам крупности для Кластера 1 (составлено автором)

Питание мельницы (p_i^f)						
+2	+0,8	+0,4	+0,2	+0,1	+0,05	-0,05
63,7	7,3	3,3	3,4	6,3	5,8	10,2
Выход мельницы (p_i^p)						
+2	+0,8	+0,4	+0,2	+0,1	+0,05	-0,05
13,9	15,8	9,8	9,7	16,7	16,1	18

Таблица 3.4 – Реальные усредненные распределения питания и продуктов измельчения по классам крупности для Кластера 2 (составлено автором)

Питание мельницы (p_i^f)						
+2	+0,8	+0,4	+0,2	+0,1	+0,05	-0,05
58,1	6,8	5,6	6,5	9,1	6,9	7
Выход мельницы (p_i^p)						
+2	+0,8	+0,4	+0,2	+0,1	+0,05	-0,05
3,8	11,7	12,8	16,2	20,4	15	20,1

Таблица 3.5 – Реальные усредненные распределения питания и продуктов измельчения по классам крупности для Кластера 3 (составлено автором)

Питание мельницы (p_i^f)						
+2	+0,8	+0,4	+0,2	+0,1	+0,05	-0,05
56,4	6,4	5,9	8	9,1	6,2	8
Выход мельницы (p_i^p)						
+2	+0,8	+0,4	+0,2	+0,1	+0,05	-0,05
1	8,3	13,1	18,9	22,1	15,4	21,2

По результатам выполнения задачи оптимизации для каждого кластера руды справедливы соответствующие параметры модели, приведенные в таблице 3.6. При вычислении оптимальных параметров модели достигнуты условия сходимости для всех кластеров руды.

Таблица 3.6 – Параметры модели мельницы для кластеров руды (составлено автором)

S_1	α	A	K	n_1	n_2
Кластер 1					
0,2768	1,6532	2,2153	0,7301	0,9442	3,3681
Кластер 2					
0,3001	1,3831	0,5334	0,4508	0,633	7,6488
Кластер 3					
0,4672	1,9765	1,209	0,4551	0,6334	5,3557

В ходе исследования получены аппроксимирующие кривые гранулометрического распределения продукта измельчения, представленные как суммарные остатки (характеристики «по плюсу»), для каждого кластера (формула 3.29) [109].

$$P_i = \sum_{i=1}^n p_i^p, \quad (3.29)$$

где i – класс крупности;

$i = 1$ соответствует наибольшему классу крупности + 2 мм.

Кривые построены на основе математической модели процесса измельчения в шаровой мельнице с параметрами из таблицы 3.6 согласно формуле 3.29 (рисунок 3.5).

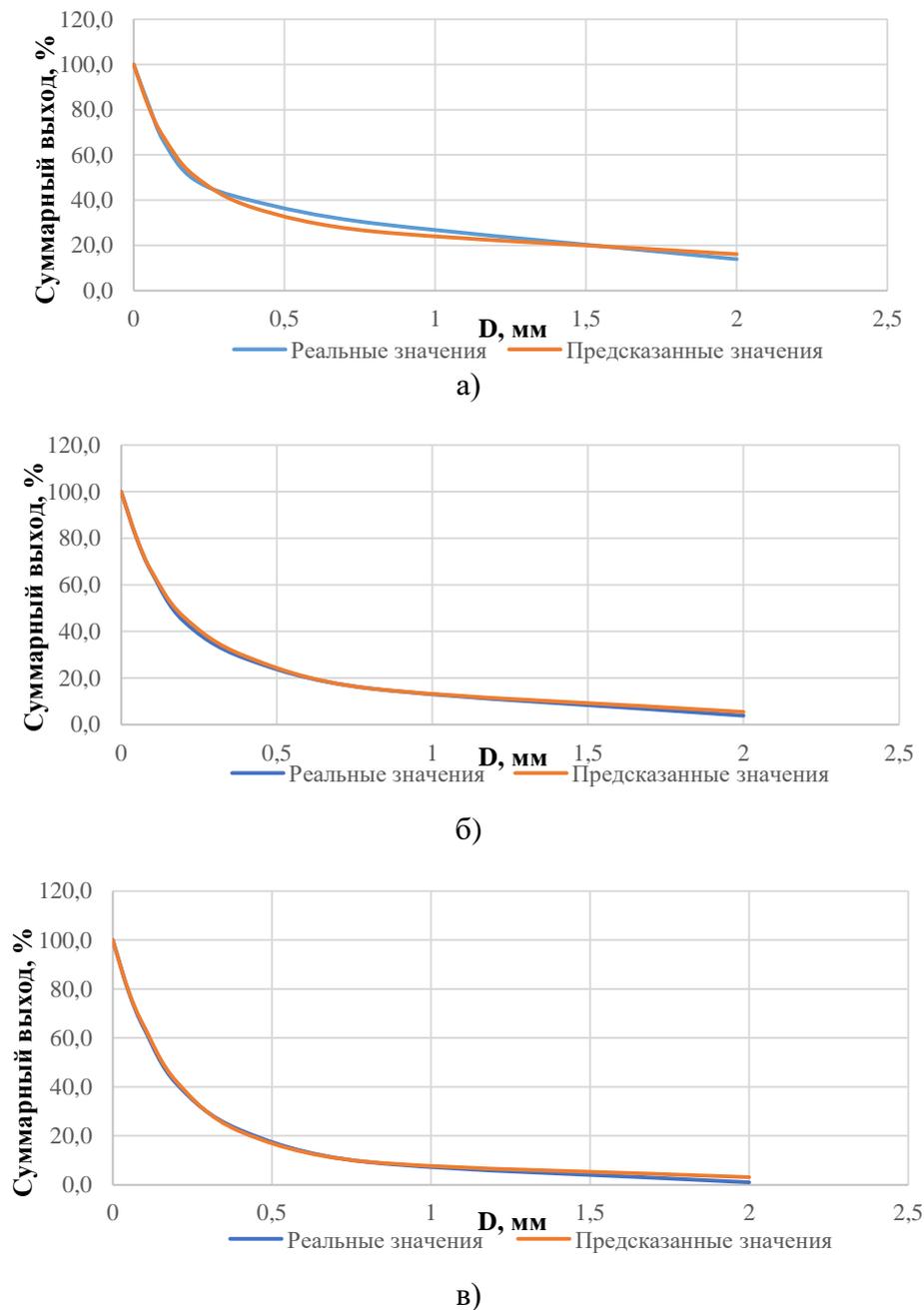


Рисунок 3.5 – Гранулометрические характеристики продукта измельчения, вычисленные на основе динамической модели процесса измельчения: а) Кластер 1; б) Кластер 2; в) Кластер 3 (составлено автором)

Качество полученной динамической модели процесса измельчения является удовлетворительным. Для каждого кластера ошибка между предсказанными и реальными гранулометрическими распределениями составляет:

- для кластера 1 L_2 составляет 8,6%;
- для кластера 2 L_2 составляет 3,7%;
- для кластера 3 L_2 составляет 3,6%.

Полученные аппроксимирующие кривые демонстрируют вогнутую форму (выпуклость вверх), причём степень вогнутости возрастает с уменьшением размера фракций. Наибольшая вогнутость наблюдается у аппроксимирующей функции для кластера 3, что указывает на максимальное содержание мелких частиц в данном распределении.

3.4 Алгоритм управления электродвигателем шаровой мельницы

3.4.1 Выбор целевой функции для кластеров руды

При разработке алгоритма управления электродвигателем шаровой мельницы необходимо сформулировать целевую функцию регулирования для каждого кластера руды. Управление процессом измельчения осуществляется для достижения требуемого массового содержания готового класса в продукте измельчения. Для железорудного концентрата в качестве готового класса принимается класс -0,05 мм. В рамках технологического регламента для рассматриваемого агрегата допускается управление в диапазоне 18-21% по готовому классу. Выход из рассматриваемого диапазона приводит к снижению эффективности обогащения процессов на последующих этапах, а именно к повышению содержания железа в хвостах и, как следствие, к снижению выхода концентрата [18, 33].

Основным критерием качества концентрата является процентное содержание железа в нем [44]. Процентное содержание ЛОР определяет обогатимость железной руды. Обогатимость железной руды является комплексным параметром, который характеризует способность отделять рудный минерал от пустой породы с получением концентрата [15]. Данный параметр определяется по результатам лабораторных исследований. Основными факторами, оказывающими влияние на обогатимость являются: минеральный состав руды; текстура и структура руды; физико-химические свойства.

Выделенные кластеры руды можно охарактеризовать следующим образом:

1. Кластер 1: тонковкрапленная текстура магнетита.
2. Кластер 2: крупнозернистая текстура магнетита.
3. Кластер 3: более крупнозернистая текстура магнетита.

Характер вкрапленности и размер зерен породных и рудных минералов определяет задачи процесса измельчения [1]. Так как количество готового класса продукта измельчения определяет

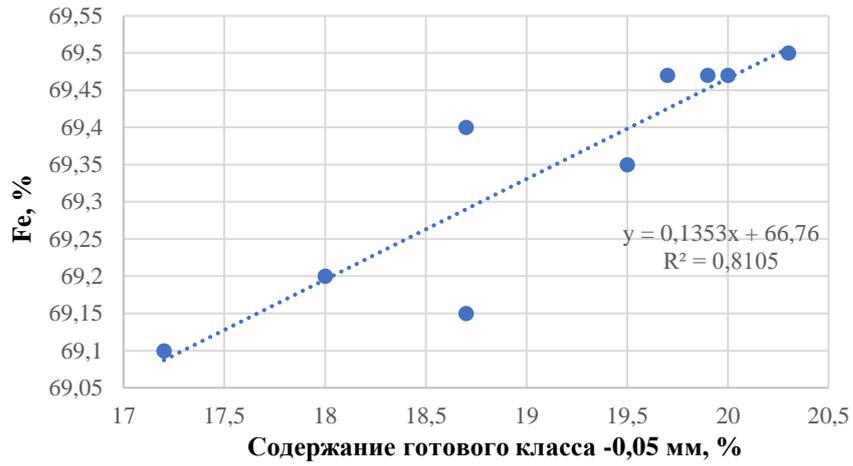
степень раскрытия полезных компонентов и качество производимого концентрата, для каждого кластера установлена соответствующая функциональная зависимость. Согласно установленным зависимостям, определяется задание на эффективное количество готового класса для достижения требуемого качества концентрата (рисунок 3.6).

Зависимости установлены на основе данных ВШС и ККС лаборатории железорудного комбината. Ранжирование данных осуществлялось, исходя из количества ЛОР в измельчаемой руде, для сопоставления с ранее определенными кластерами руды (подпункт 3.3.1 настоящей главы). Далее, результаты опробований на сливе мельницы для рассматриваемой мельницы МШЦ 4,5х6,0 сопоставлялись с результатами опробований концентрата на выходе технологической секции обогащения. Установление зависимостей качества концентрата от количества готового класса в продукте измельчения по кластерам осуществлялось при условии стабилизации основных технологических параметров агрегатов, применяемых на рассматриваемом технологическом переделе обогащения железной руды. Из рассматриваемого набора данных выбирались результаты лабораторных экспериментов при одинаковых плотностях магнитной сепарации и дешламации. На основе полученных выборок получены соответствующие аппроксимирующие кривые с коэффициентами детерминации более 0,8, что позволяет отметить сильную связь зависимой переменной от предикторов (рисунок 3.6).

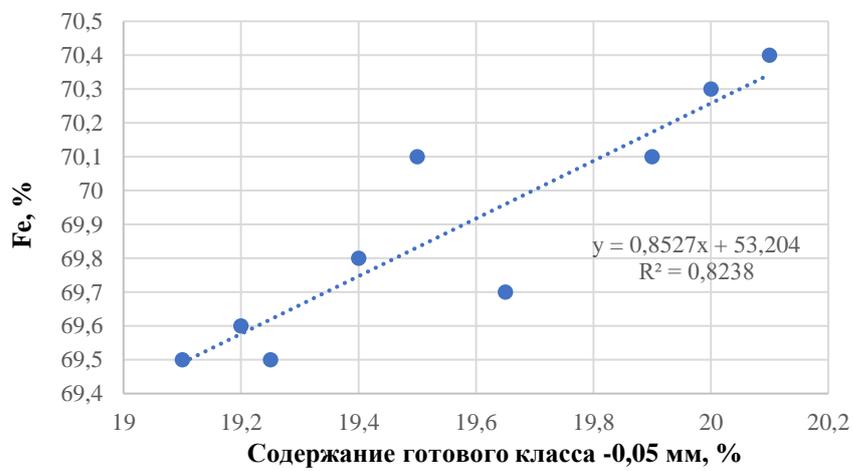
Отличие аппроксимирующих кривых друг от друга обусловлено обогатимостью руды. Для кластера 3 получение концентрата высокого качества является более легко достижимой задачей ввиду более простой минералогией и крупным и однородным вкраплением ценного компонента относительно кластеров 1 и 2. С учетом хорошей измельчаемости магнетитовых зерен данное отличие способствует получению более тонкого помола. Переизмельчение в установленном диапазоне (18-21%) для кластеров 2 и 3 приводит к уменьшению выхода концентрата, так как приводит к увеличению содержания железа в нем. Для кластера 1 требуется совершить большую работу по измельчению для достижения более тонкого помола, чтобы обеспечить раскрытие зерен магнетита и получить требуемое качество концентрата.

Для достижения целевой функции по качеству концентрата и стабилизации его выхода требуется рассмотреть возможность управления контуром регулирования скоростью мельницы с учетом изменения шаровой загрузки и износа футеровки.

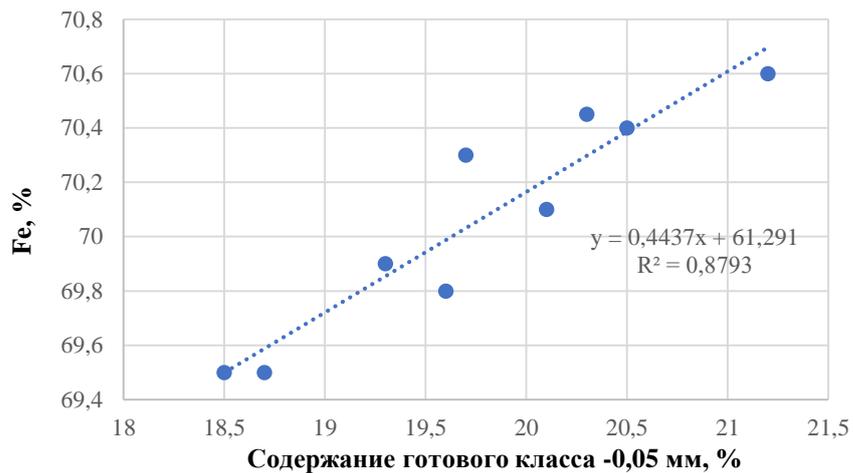
В работе [107] отмечается, что параметр скорости оказывает влияние на время пребывания материала в мельнице с центральной загрузкой и, как следствие, оказывает влияние на качество помола, при этом диапазон регулирования скорости может составлять от 0,5 до 0,9 относительно критической скорости.



а)



б)



в)

Рисунок 3.6 – Зависимости качества концентрата от массового содержания готового класса - 0,05 мм в продукте измельчения: а) Кластер 1; б) Кластер 2; в) Кластер 3 (составлено автором)

3.4.2 Влияние параметров шаровых мельниц на процесс измельчения

На примере модели процесса измельчения, оптимизированной под второй кластер руды, проанализированы зависимости готового класса руды от параметров измельчения (рисунок 3.7):

- износ футеровки;
- объемное заполнение шаровой загрузки;
- скорость мельницы.

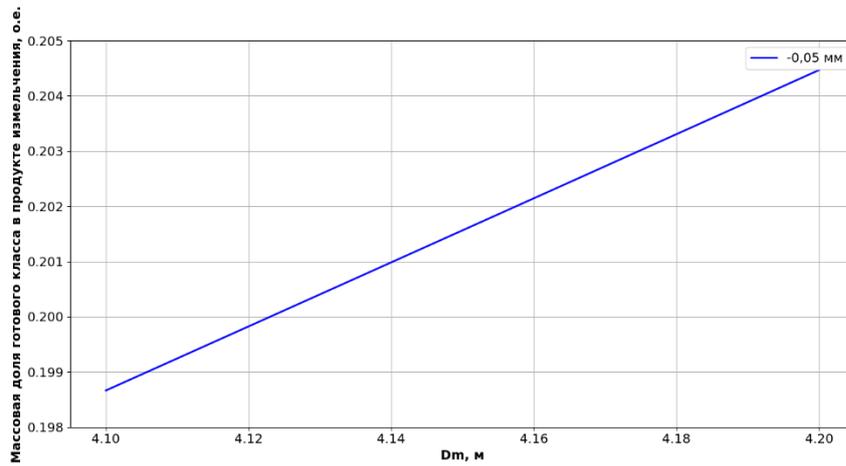
Параметрический анализ зависимостей осуществлялся на основе формул 3.12-3.16. При износе футеровки увеличивается диаметр мельницы и, как следствие, ее рабочий объем. Изменяется геометрия футеровки, что приводит к уменьшению высоты подъема шаров при измельчении. Уменьшение высоты подъема приводит к снижению энергии удара, разрушение руды осуществляется преимущественно за счет истирания. Это приводит, с одной стороны, к переизмельчению и накоплению более мелких фракций, а с другой – к накоплению крупных фракций за счет снижения ударного воздействия.

Влияние износа футеровки на количество готового класса рассматривалось при изменении диаметра от 4,1 м до 4,2 м. Диаметр мельницы 4,1 м соответствует новой футеровке, 4,2 м – изношенной. Изменение количества готового класса на рассматриваемом интервале наблюдается в пределах от 19,9% до 20,5%.

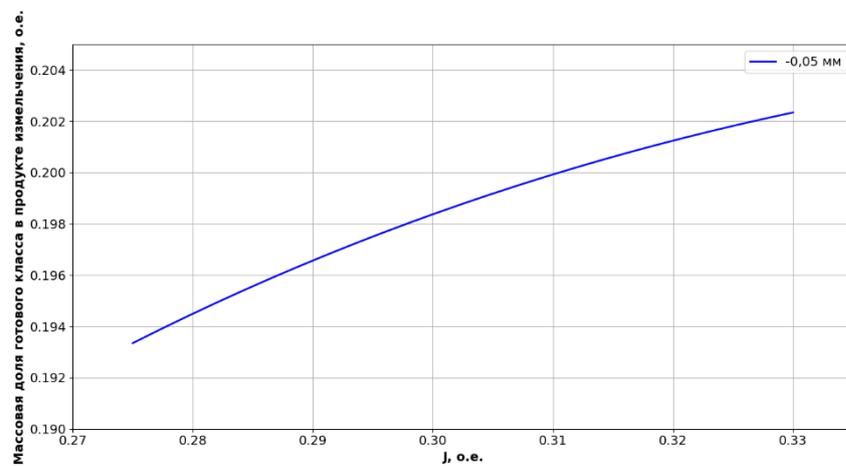
Изменение шаровой загрузки в диапазоне, установленном технологическим регламентом, приводит к изменению готового класса в пределах от 19,3% при $\varphi = 27,5\%$ до 20,2% при $\varphi = 33\%$. Рост количества готового класса при увеличении шаровой загрузки обусловлен увеличением количества ударных и истирающих воздействий мелющими телами.

При реализации регулируемого электропривода управление скоростными режимами работы мельницы в диапазоне от 45% до 80% от критической скорости позволит осуществлять регулирование помолом по готовому классу в пределах, установленных технологическим регламентом.

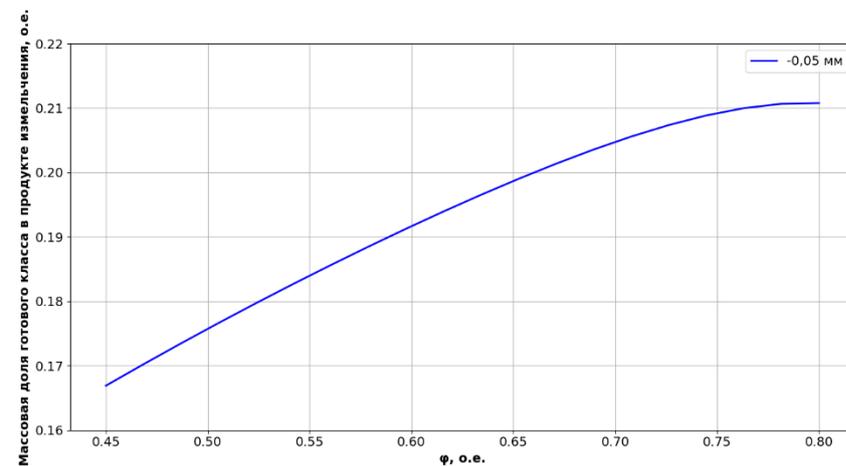
В качестве инструмента поддержания количества готового класса на номинальном уровне рассматривается скорость вращения мельницы [27]. С учетом изменения параметров процесса измельчения с течением времени, скорость вращения позволит осуществлять компенсацию динамики изменения диаметра мельницы и шаровой загрузки.



а)



б)



в)

Рисунок 3.7 – Влияние параметров процесса измельчения на готовый класс в продукте измельчения: а) Зависимость количества готового класса от изменения диаметра мельницы (износ футеровки); б) Зависимость количества готового класса от изменения объемного заполнения шаровой загрузки; в) Зависимость количества готового класса от изменения скорости мельницы (составлено автором)

3.4.3 Алгоритм вычисления оптимальной частоты вращения электродвигателя шаровой мельницы

На основе динамической модели процесса измельчения в шаровой мельнице разработан адаптивный под кластер руды алгоритм по расчету оптимальной частоты вращения электродвигателя мельницы φ с учетом динамически изменяющихся параметров таких, как диаметр мельницы D_m и объемное заполнение шаровой загрузки J . Блок-схема разработанного алгоритма представлена на рисунке 3.8.

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. Алгоритм реализован на языке программирования Python.

Работа алгоритма осуществляется на основе следующих входных данных:

- Данных о руде Q : соотношение в массовых долях руды по источникам добычи.
- Параметров мельницы: актуальный диаметр D_m из системы мониторинга параметров шаровой мельницы по спектральным составляющим потребляемого тока электротехнического комплекса и шаровая загрузка J .
- Уставки по качеству концентрата $Fe_{уст}$.

На первом этапе осуществляется выбор кластера руды i на основе данных по руде Q . Вторым этапом выполняется выбор параметров динамической модели измельчения (таблица 3.6) и функции задания уставки по количеству готового класса на основе зависимостей на рисунке 3.6, соответствующих определенному кластеру руды (формула 3.30).

$$p'_{pi} = f(Fe_{уст}), \quad (3.30)$$

где p'_{pi} – уставка по количеству готового класса в продукте измельчения для кластера i ;

$Fe_{уст}$ – уставка по качеству концентрата.

На третьем этапе выполняется расчет оптимальной частоты вращения мельницы φ с помощью алгоритма Недлера-Мида, который был ранее применен для поиска оптимальных параметров динамической модели (формула 3.31).

$$\varphi = f(D_m, J). \quad (3.31)$$

В данном случае частота вращения φ является единственной вершиной симплекса. Границы оптимизации определены регламентными значениями параметров D_m и J , а также технической возможностью обеспечения вычисленной частоты вращения шаровой мельницы.

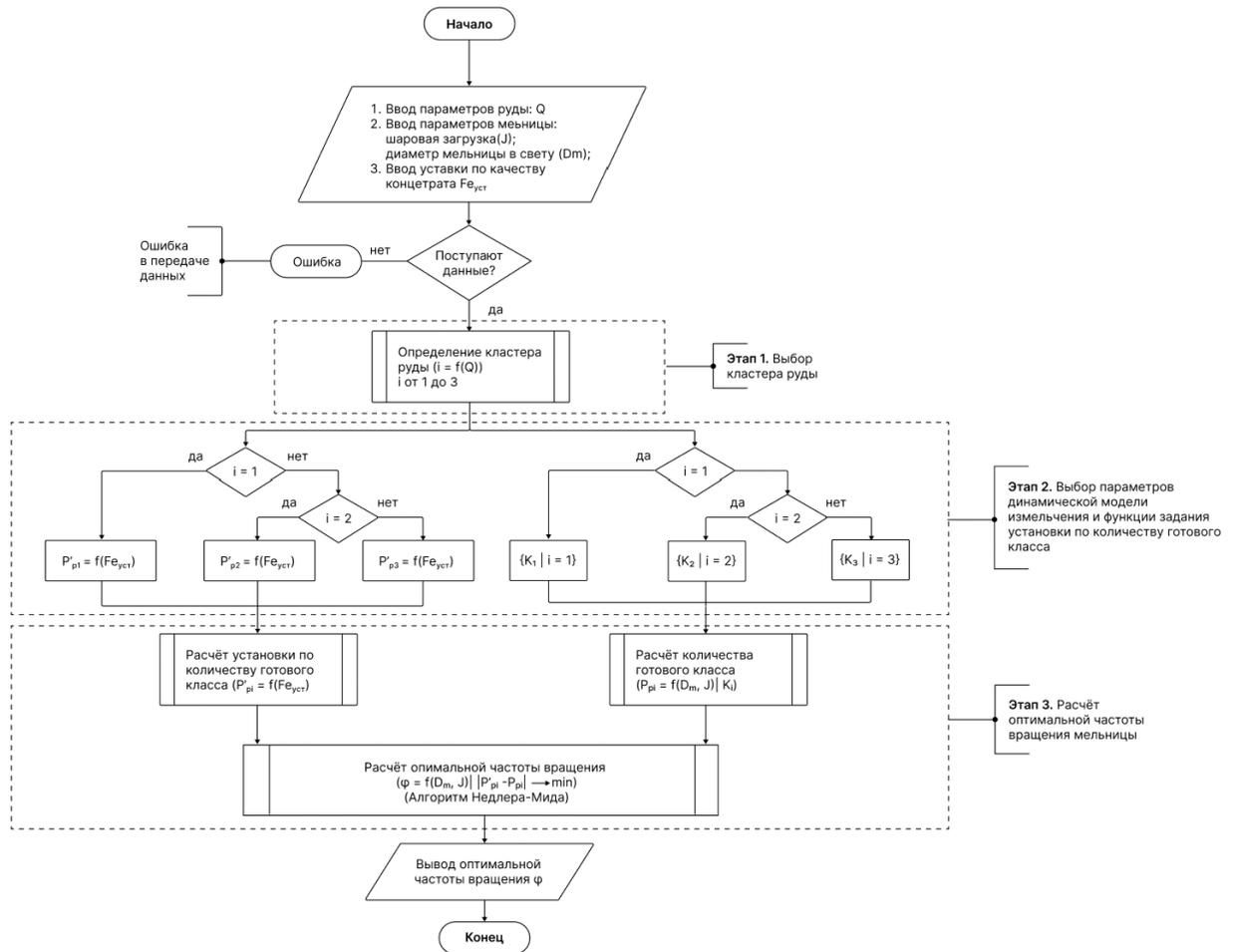


Рисунок 3.8 – Блок-схема алгоритма по расчету оптимальной скорости электропривода шаровой мельницы

Расчет оптимальной скорости выполняется из условия (3.32):

$$|p'_p - p_p| \rightarrow \min, \quad (3.32)$$

где p'_p – уставка по количеству готового класса в продукте измельчения;

p_p – фактическое значение количества готового класса в продукте измельчения.

Расчет фактического количества готового класса выполняется на основе динамической модели процесса измельчения с учетом актуальных значений диаметра мельницы и количества шаровой загрузки (формула 3.5). Корректировка работы алгоритма может осуществляться на основе лабораторных данных предприятия.

По результатам работы алгоритма осуществляется вывод оптимальной частоты вращения мельницы, и расчет уставки на скорость электродвигателя с учетом передаточного числа приводной шестерни и зубчатого венца мельницы.

Применительно к объекту автоматизации МШЦ 4,2 x 6,5 приведены результаты работы алгоритма. Для рассматриваемых кластеров руды выполнен расчет целевого количества готового класса при уставке по качеству концентрата $Fe_{уст} = 69,5\%$:

– кластер 1: $p'_p = 20,3\%$;

- кластер 2: $p'_p = 19,1\%$;
- кластер 3: $p'_p = 18,5\%$.

Задача оптимизации решалась при изменении параметров мельницы в определенных диапазонах. В модели процесса измельчения задавались изменения диаметра мельницы D_m и объемного шарового заполнения J . Диапазон изменения параметра D_m был выбран от 4,1 м до 4,2 м, исходя из паспортных характеристик измельчительного агрегата. Диапазон изменения параметра J был выбран от 27,5% до 33%, исходя из технологического регламента.

Результат работы алгоритма представлен в виде поверхностей в трехмерном пространстве функции вида $\varphi = f(D_m, J)$ для каждого кластера руды. Параметр скорости φ по оси Z осуществляет коррекцию при динамическом изменении параметров D_m и J для достижения соответствующей целевой функций по количеству готового концентрата (рисунок 3.9).

Построение триангуляционных поверхностей осуществлялось, используя линейную интерполяцию, на основе рассчитанных точек в заданных диапазонах параметров, соответствующих регламентным значениям.

Полученные триангуляционные поверхности показывают, как должна изменяться скорость при различных комбинациях D_m и J для достижения заданного качества концентрата.

В таблице 3.7 представлены оптимальные скоростные диапазоны мельницы для рассматриваемых кластеров руды по результатам работы алгоритма.

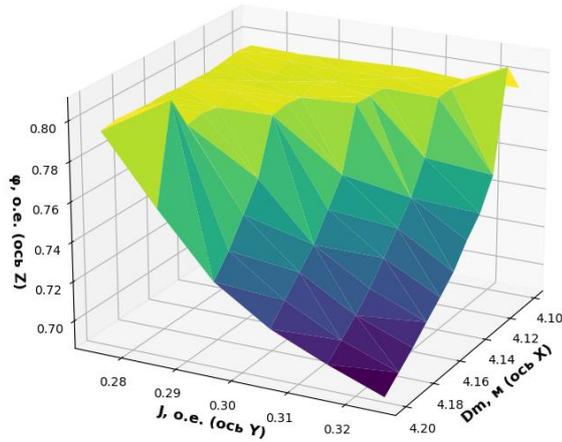
Таблица 3.7 – Оптимальные скоростные диапазоны для кластеров руды (составлено автором)

Кластер	Кластер 1	Кластер 2	Кластер 3
Скоростной диапазон, в долях	(0,7-0,8)	(0,51-0,58)	(0,45-0,49)

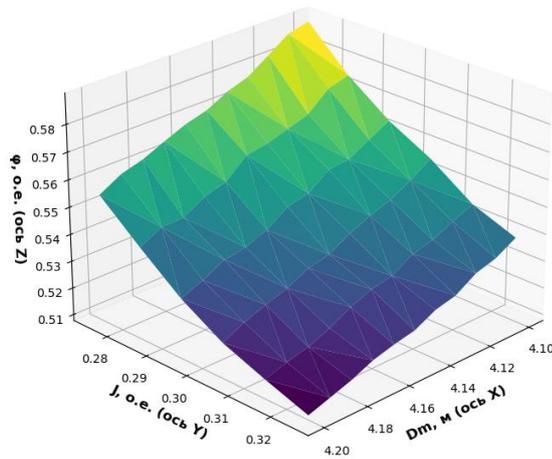
В условиях промышленной эксплуатации, как правило, для измельчения железной руды в шаровых мельницах скорость выбирается из диапазона 0,65-0,7 относительно критической скорости. Для рассматриваемой мельницы МШЦ 4,2 x 6,5 номинальная скорость мельницы составляет 0,65. Сопоставляя с полученными результатами, можно сделать вывод, что скорость 0,65 является средней скоростью, которая получается исходя из скоростных диапазонов для кластера 3 и для кластера 1. Скорость вращения мельницы определяется эмпирическим путем для усредненных характеристик руды, при этом скорость является постоянным технологическим параметром. Однако данная стратегия не позволяет обеспечить корректировку производственного процесса в зависимости от кластера измельчаемой руды и обеспечить его адаптивность.

Реализация предложенной стратегии управления процессом измельчения основана на применении алгоритма управления электродвигателем шаровой мельницы, разработанного с использованием динамической модели процесса измельчения. Данная модель выполняет

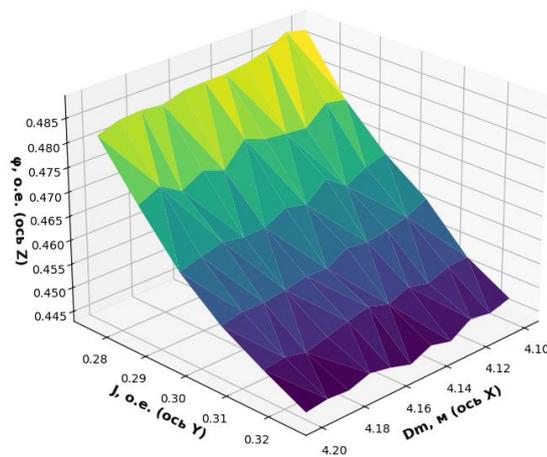
функцию программно-управляемого датчика и может быть интегрирована с системой комплектного электропривода шаровой мельницы.



а)



б)



в)

Рисунок 3.9 – Полученные зависимости частоты вращения мельницы φ от диаметра барабана D_m и объемного шарового заполнения J по результатам работы алгоритма вычисления оптимальной частоты вращения приводного двигателя: а) Кластер 1; б) Кластер 2; в) (Кластер 3) (составлено автором)

3.5 Выводы по главе 3

1. Установлена зависимость количества краевого класса +15 мм в исходной руде от типа измельчаемой руды на основе экспериментальных данных железорудного комбината. С целью определения оптимальных параметров модели шаровой мельницы входная руда разделена на 3 кластера по процентному содержанию ЛОР от общего количества подаваемой руды.

2. Разработана динамическая модель процесса измельчения в шаровой мельнице, параметры которой оптимизированы под каждый кластер руды. Ошибка модели между предсказанными и реальными гранулометрическими распределениям составляет до 8,6%. Разработанная модель позволяет осуществлять непрерывный мониторинг количества готового класса и является основной для программно-управляемого датчика в составе комплектного электропривода шаровой мельницы.

3. На основании экспериментальных данных установлены зависимости качества концентрата от массового содержания готового класса в продукте измельчения в зависимости от кластера руды. Под каждый кластер руды сформулирована целевая функция по количеству готового класса, которая определяет задачи процесса измельчения для достижения требуемого качества концентрата.

4. Установлены зависимости влияния параметров мельницы на количество готового класса в продукте измельчения. В качестве исследуемых параметров выбраны: диаметр мельницы (D_m); объемное заполнение шаровой загрузки (J); скорость мельницы (φ). В качестве регулирующего параметра, обеспечивающего достижение целевой функции по качеству концентрата и стабилизацию его выхода, предложено использовать частоту вращения электродвигателя мельницы. Установлено, что регулирование частоты вращения 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 и компенсировать изменение таких параметров как износ футеровки барабана и объемное заполнение шаровой загрузки, оказывающих влияние на помол.

5. Разработан алгоритм вычисления оптимальной частоты вращения электропривода 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.

ГЛАВА 4 АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД ШАРОВОЙ МЕЛЬНИЦЫ

В данной главе предложена структура автоматизированного электропривода для управления процессом измельчения на основе каскадного преобразователя частоты и интеллектуальной системы управления процессом измельчения. Проведено имитационное моделирование автоматизированного электропривода шаровой мельницы в программной среде Matlab Simulink.

4.1 Структура автоматизированного электропривода шаровой мельницы

Предлагаемая структурная схема автоматизированного электропривода шаровой мельницы, включающего силовую и управляющую части, представлена на рисунке 4.1 [38].

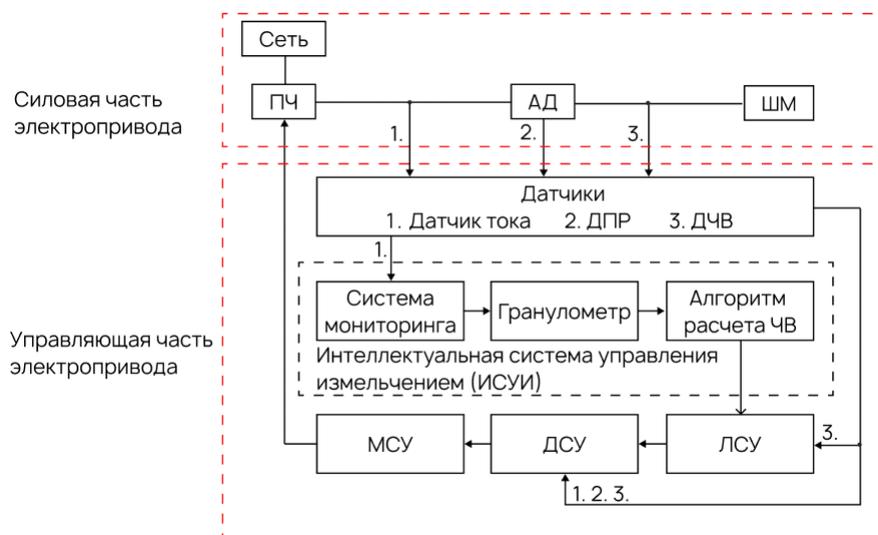


Рисунок 4.1 – Предлагаемая структура автоматизированного электропривода шаровой мельницы, где ПЧ – преобразователь частоты; АД – асинхронный двигатель; ШМ – шаровая мельница; ДПР – датчик положения ротора; ЧВ – частота вращения; МСУ – модуляционная система управления; ДСУ – двигательная система управления; ЛСУ – локальная система управления (составлено автором)

В первой главе проведено обоснование применения асинхронного двигателя в составе автоматизированного электропривода шаровой мельницы.

Предлагается модернизировать структуру электропривода по принципу комплектного электропривода (КЭП) [14, 102]. КЭП обеспечивает эффективное управление преобразованиями энергии и технологическим процессом благодаря встроенным энергетическим, электромеханическим и механическим преобразователям в своем составе.

КЭП включает ключевые компоненты, обеспечивающих его функциональность:

1. Электродвигатель.
2. Преобразователь частоты.

3. Комплексную систему управления (включает технологическую, двигательную и модуляционные системы управления, а также элементы связи с верхним уровнем АСУ ТП).
4. Систему датчиков.
5. Защитную аппаратуру.
6. Механические передачи и элементы кинематической цепи.

Одной из актуальных задач является настройка контуров управления в КЭП при изменении параметров схемы замещения электродвигателя. Изменение параметров схемы замещения приводит к изменению механических и энергетических характеристик [10]. Это приводит к опрокидыванию двигателей на низких скоростях и к снижению КПД электропривода из-за возникающих дополнительных потерь в статоре и роторе из-за нагрева, а также дополнительных потерь из-за намагничивания [24, 129]. В случае применения двухдвигательного электропривода изменение параметров схемы замещения приводит к неравномерному распределению нагрузочных моментов и к неравномерной выработке ресурса оборудования [29, 124].

Отечественные разработки в области КЭП позволяют обеспечить адаптацию к изменению параметров системы: сопротивлений обмоток, индуктивности намагничивания, момента инерции. Адаптация достигается на основе функции автонастройки и расчета коэффициентов управления при заданных показателях качества регулирования [9].

Среди ключевых особенностей КЭП можно выделить:

1. Высокая энергоэффективность (КПД до 95-98%) и возможность рекуперации энергии.
2. Управление параметрами электропривода в широком диапазоне за счет реализации алгоритмов управления.
3. Адаптивность к технологическому процессу.
4. Согласованное взаимодействие всех компонентов.
5. Интеграция с информационной структурой предприятия.
6. Модульная конструкция и полная заводская готовность.

Структура КЭП позволяет электроприводу автономно адаптироваться к условиям работы и интегрироваться с цифровой системой предприятия.

Для повышения эффективности работы электропривода шаровой мельницы на основе комплектного электропривода предлагается включить в состав его структуры преобразователь частоты и интеллектуальную систему управления процессом измельчения (ИСУИ). ИСУИ позволяет управлять АЭП в соответствии с технологическими параметрами процесса измельчения.

ИСУИ направлена на повышение энергетической и технологической эффективности электропривода за счет вычисления оптимальной частоты вращения электродвигателя [101]. В состав ИСУИ входят следующие структурные элементы:

1. Система мониторинга износа барабана шаровой мельницы.
2. Гранулометр (программно-управляемый датчик).
3. Алгоритм расчета оптимальной частоты вращения электродвигателя мельницы.

Результатом вычислений ИСУИ является расчетная уставка частоты вращения электродвигателя мельницы, которая поступает в локальную систему управления (ЛСУ) процесса измельчения. В ЛСУ процесса измельчения осуществляется:

1. Управление производственным процессом.
2. Мониторинг технологических параметров.
3. Контроль состояния оборудования и параметров защиты механизмов.

Из ЛСУ измельчения поступает задание на частоту вращения электропривода в двигательную систему (ДСУ) электропривода.

Для управления двигателем предусматривается установка датчиков: тока статора (ДТС); потокосцепления ротора (ДПР); частоты вращения (ДЧВ). Данные с ДТС поступают в двигательную систему управления (ДСУ) для вычисления параметров работы электропривода и в ИСУИ для вычисления износа футеровки. Данные с ДПР поступают в ДСУ, частота вращения ротора с ДЧВ поступает в ДСУ и ЛСУ.

Система мониторинга износа барабана шаровой мельницы основывается на анализе спектра тока статора электродвигателя. Система позволяет определять текущее состояние футеровки барабана измельчительного агрегата. Данные о текущем состоянии футеровки барабана поступают в ЛСУ, что позволяет на их основе осуществлять коррекцию по шаровой дозагрузке. Гранулометр в ИСУИ является программно-управляемым датчиком. Программно-управляемый датчик – это устройство, которое не является физическим, а представляет собой программную модель, использующую легко измеряемые переменные для оценки трудно измеряемых параметров [13]. Так как после первой стадии измельчения не представляется возможным установить физический гранулометр, программно-управляемый датчик является решением для измерения количества готового класса в сливе мельницы. Работа гранулометра основана на разработанной динамической модели процесса измельчения (представлена в главе 3), которая осуществляет прогноз количества готового класса в зависимости от параметров руды. Вычисленные значения заполнения шаровой загрузки и состояния футеровки барабана мельницы поступают на вход динамической модели процесса измельчения. Адаптация динамической модели процесса измельчения к изменению технологических параметров осуществляется на основе данных из верхнеуровневой системы управления производственными процессами

предприятия – MES-системы. Из MES-системы поступает информация о типе измельчаемой руды и задание на качество концентрата.

Частота вращения электродвигателя мельницы рассчитывается на основе алгоритма оптимизации, учитывающего количество шаровой загрузки и износ футеровки, и данных о количестве готового класса, вычисляемого с помощью гранулометра.

Предлагаемые технические решения на основе комплектного электропривода должны быть интегрированы с существующей системой АСУ ТП предприятия. Схема взаимосвязи АЭП, ИСУИ и АСУ ТП представлена на рисунке 4.2.

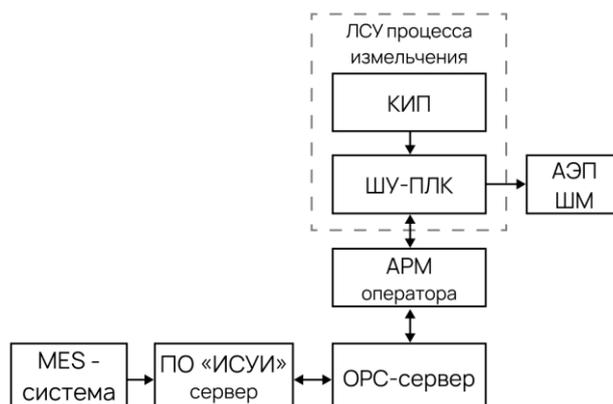


Рисунок 4.2 – Схема взаимосвязи автоматизированного электропривода шаровой мельницы и АСУ ТП предприятия (составлено автором)

Измерение токовых сигналов шаровой мельницы осуществляется с высокой частотой дискретизации, составляющей 1 кГц, что обеспечивает достаточную точность для анализа спектральных характеристик тока статора. Обработка сигналов реализуется с использованием промышленного контроллерного оборудования, оснащённого модулем аналоговых сигналов, поддерживающим необходимую частоту дискретизации. Для этого в структуре управления процессом измельчения устанавливается шкаф управления с программно-логическим контроллером (ШУ-ПЛК). В ПЛК, в том числе, поступает информация с полевого уровня, где установлены датчики процесса измельчения. Информация от данных датчиков используется для анализа состояния внутримельничной загрузки и износа футеровки барабана. Система управления процессом измельчения интегрирована с автоматизированным рабочим местом (АРМ) оператора, где развернута SCADA-система (Supervisory Control and Data Acquisition) для визуализации параметров процесса и обеспечения интерфейса человеко-машинного взаимодействия.

Для централизованной обработки данных и хранения информации о состоянии оборудования и технологических параметрах реализация ИСУИ осуществляется на серверном оборудовании, где развертывается соответствующее программное обеспечение. Взаимодействие между SCADA-системой и сервером ИСУИ осуществляется через OPC-сервер (OLE for Process

Control), что обеспечивает стандартный протокол передачи данных, совместимость с различными производственными системами и минимизацию задержек при обмене данными.

Модернизация электропривода шаровой мельницы предполагает установку следующего оборудования:

1. Преобразователь частоты.
2. Датчики тока.
3. Шкаф управления с ПЛК.
4. Сервер.

4.2 Реализация высоковольтного автоматизированного электропривода мельницы

Основные характеристики исполнительного механизма и приводного двигателя автоматизированного электропривода представлены в таблицах 4.1 и 4.2, соответственно.

Таблица 4.1 – Характеристики исполнительного механизма (составлено автором)

Технологические характеристики	Данные
Размеры мельницы	Диаметр мельницы в свету: 4,1 м Внешний диаметр мельницы: 4,5 м Длина мельницы: 6 м
Тип цикла	Открытый цикл
Объемное заполнение шаровой загрузки	30% от объема мельницы
Насыпная плотность руды после дробления	2,4 т/м ³
Механические характеристики	Данные
Частота вращения барабана мельницы	13,58 об/мин (65% от критической частоты вращения – 20,89 об/мин)
Частота вращения вал-шестерни	154,81 об/мин (при передаточном числе вал-шестерни и зубчатого венца $i = 11,4$)
Диапазон регулирования частоты вращения барабана мельницы в режиме управления процессом измельчения	8,36 – 17,76 об/мин (0,4 – 0,85% от критической частоты вращения)
Необходимый диапазон регулирования частоты вращения барабана мельницы (в том числе для совершения операций технического обслуживания)	0 – 20,89 об/мин

Таблица 4.2 - Характеристики приводного двигателя (составлено автором)

Технические характеристики	Данные
Тип двигателя	АДКР
Установленная мощность	2100 кВт
Номинальная скорость	495 об/мин
Тип охлаждения	Независимое

Выбор преобразователя частоты основывается, исходя из параметров электродвигателя и обеспечения требуемого диапазона регулирования электромеханических характеристик.

С учетом безредукторной структуры электропривода мельницы требуется система управления, способная обеспечить широкий диапазон регулирования частоты вращения в диапазоне 1:100 с высокой точностью регулирования до $\pm 0,5\%$ и с поддержанием полного момента на низких скоростях. Для решения данной задачи наилучшим выбором является система векторного управления. Система прямого управления демонстрирует недостаток в виде пульсаций момента при работе на низких скоростях. Данное явление обусловлено принципом действия релейных регуляторов, характерным для данного метода управления. Система скалярного управления не позволяет управлять моментом и, соответственно, поддерживать его на низких скоростях [10, 11].

Основные требования для выбора подходящей структуры преобразователя частоты представлены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Требования, предъявляемые к преобразователю частоты (составлено автором)

Технические характеристики	Данные
Мощность	2500 кВт
Входное напряжение	6 кВ
Диапазон изменения выходной частоты питающего напряжения двигателя	0 – 25 Гц
Коэффициент мощности на входе ПЧ	$\geq 0,96$
КПД	$\geq 98\%$
Система управления	Векторная
Тип выходного согласующего устройства	Отсутствует
Суммарный коэффициент гармонических искажений выходного напряжения K_U	$< 5\%$
Суммарный коэффициент гармонических искажений напряжения сети K_U	$< 5\%$

Включение преобразователя частоты в состав электропривода позволяет обеспечить дополнительные функции, которые актуальны при управлении процессом измельчения [123]:

1. Система определения и устранения налипшей пульпы внутри барабана мельницы. Пульпа представляет собой смесь руды и воды. Для устранения налипшей пульпы выполняется высоко динамичное подконтрольное раскачивание барабана мельницы за счет прецизионного управления скоростью и электромагнитным моментом мельницы.

2. Медленное движение барабана мельницы. Данная функция необходима для проведения технического обслуживания мельницы. Примером является замена футеровки, где необходимо точное позиционирование на низкой частоте вращения. Для нерегулируемых приводов требуется установка вспомогательных приводов с редуктором.

3. Контроль отката барабана мельницы. При останове мельницы наблюдается раскачка мельницы вперед и назад ввиду несбалансированного положения загрузки внутри барабана мельницы в течение нескольких минут. Управление переменными электродвигателя позволяет снизить время стабилизации останова мельницы.

4.2.1 Топологии высоковольтных преобразователей частоты

Современный электропривод, соответствующий требованиям энергоэффективности, электромагнитной и электромеханической совместимости, предполагает наличие полупроводникового преобразователя частоты. Упрощенная классификация высоковольтных преобразователей представлена на рисунке 4.3 [113].

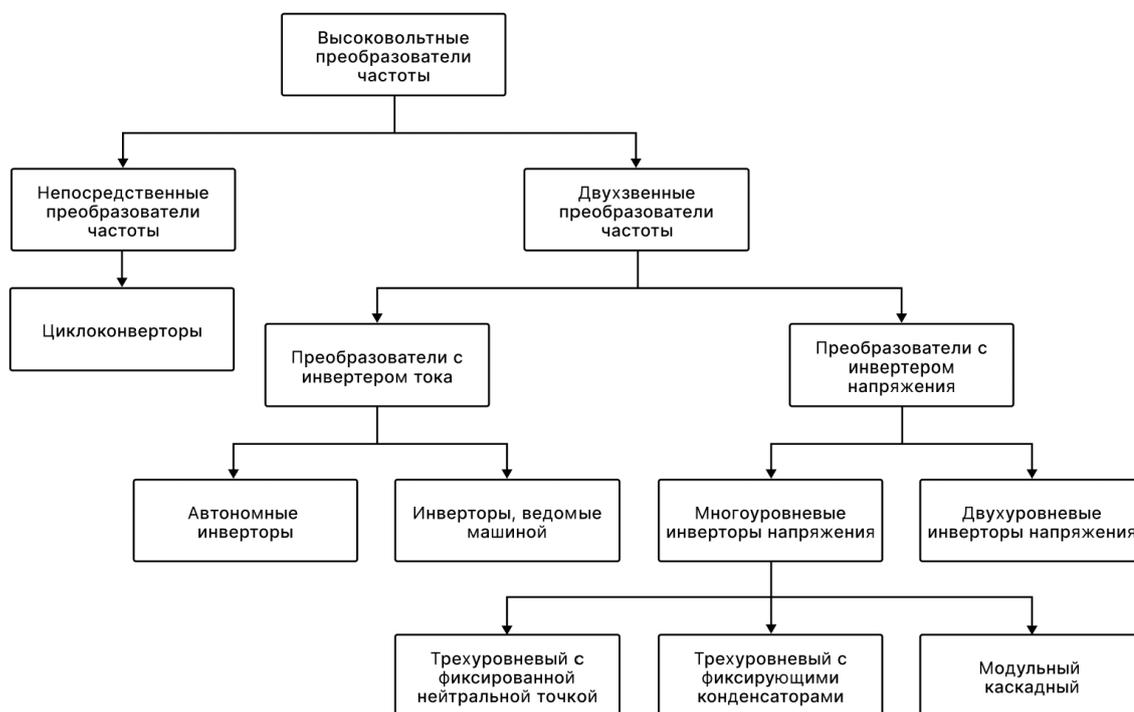


Рисунок 4.3 – Классификация высоковольтных преобразователей (составлено автором на основе [113])

Преобразователи частоты могут осуществлять управление преобразованием электроэнергии в один этап – напрямую (непосредственные ПЧ), или в два этапа – через вставку постоянного тока (двухзвенные ПЧ).

Непосредственные высоковольтные преобразователи строятся по схемам циклоконвертеров (ЦПЧ). ЦПЧ получили широкое распространение в 1960-1980-х годов, в том числе, для управления синхронными двигателями мельниц. Данные устройства до сих пор эксплуатируются на некоторых горно-обогатительных комбинатах [111, 127].

В настоящее время ЦПЧ не находят существенного применения из-за недостатков, которые можно устранить за счет использования других топологий на основе двухзвенных преобразователей частоты. Среди основных недостатков ЦПЧ, актуальных для привода мельниц,

можно выделить: ограниченный диапазон регулирования скорости и момента, применение неэффективных ключей управления, высокие искажения напряжений на входе и на выходе ЦПЧ и, как следствие, необходимость в установке фильтров с большими массогабаритными характеристиками [118]. Однако при мощностях более 10 МВт (до 100 МВт) ЦПЧ по-прежнему могут применяться.

Двухзвенная структура преобразователей является самой распространенной и предполагает наличие выпрямителя и инвертора. Топология двухзвенного преобразователя и выбор составных компонентов зависит от режима работы инвертора:

- режим инвертора тока;
- режим инвертора напряжения.

В данных режимах инвертор может являться, соответственно, преобразователем частоты и амплитуды тока или преобразователем частоты и амплитуды напряжения.

Высоковольтные инверторы тока подразделяются на:

- автономные инверторы (PWM-Current Source Inverter);
- инверторы, ведомые машиной (Load Current Inverter).

В структуре преобразователя с инвертором, ведомым машиной, применяются неуправляемые тиристорные выпрямители (SCR rectifier). Неуправляемые тиристорные выпрямители с инверторами, ведомыми машиной, применимы для электроприводов мощностью до 100 МВт, исходя из более низкой стоимости по сравнению с инверторами, в составе которых полностью управляемые ключи [127].

В структуре преобразователя с автономным инвертором применяются как управляемые тиристорные выпрямители (PWM CSR), так и неуправляемые тиристорные выпрямители (SCR rectifier).

Инверторы напряжения за последние 20 лет получили более широкое распространение и развитие по сравнению с инверторами тока [120]. К настоящему времени разработано множество топологий инвертеров напряжения. Такое многообразие подкрепляется появлением многоуровневых вариантов топологий, что является актуальным для приводов большой мощности [113].

4.2.2 Двухуровневый инвертор напряжения

Для управления трехфазными машинами двухуровневый инвертор напряжения (2У-АИН) является самой простой структурой как для двигателей низкой мощности, так и для высокой мощности (рисунок 4.4).

В соответствии с тремя фазами двигателя в структуре 2У-АИН каждая фаза подключается к своей стойке инвертора. Стойка инвертора состоит из пары ключей – один ключ подключается

к плюсу шины постоянного тока (ШПТ) (верхнее плечо стойки инвертора), а другой к минусу ШПТ (нижнее плечо стойки инвертора). Ключи каждой стойки представляют собой комплементарную пару, т.е. в один момент времени только один ключ фазы может быть подключен к ШПТ. Замыкание двух ключей стойки недопустимо, так как это приведет к короткому замыканию в стойке инвертора.

Количество уровней в фазной кривой напряжения 2У-АИН зависит от количества фаз. Конкретный текущий уровень фазного напряжения зависит от схемы подключения нагрузки (параллельно или последовательно) относительно искомой фазы к источнику питания в определенный момент времени. Таким образом, в трехфазном 2У-АИН в фазном напряжении присутствуют следующие уровни: $+2U_{dc}/3$; $+U_{dc}/3$; 0 ; $-U_{dc}/3$ и $-2U_{dc}/3$.

Количество уровней линейного напряжения на выходе инвертора не зависит от числа фаз и для 2У-АИН равно двум: $+U_{dc}$, 0 , $-U_{dc}$.

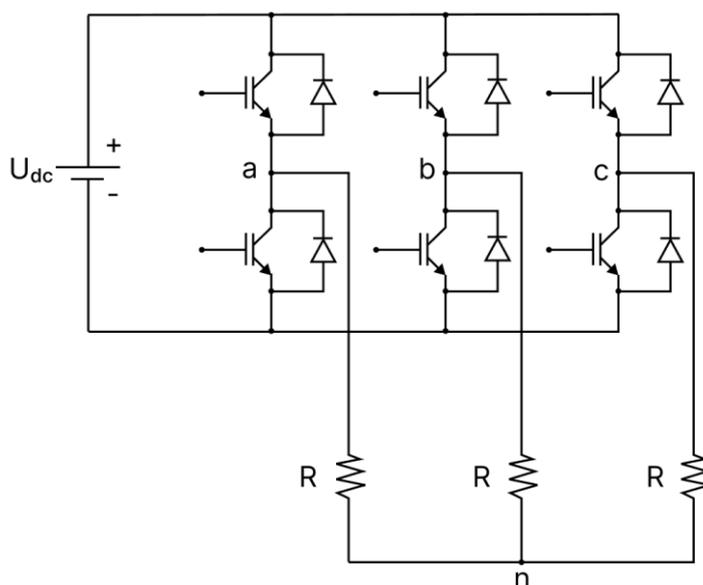


Рисунок 4.4 – Схема двухуровневого инвертора напряжения (составлено автором на основе [87])

Существующий номинал IGBT ключей на высокое напряжение (3,3 кВ; 4,5 кВ; 6,5 кВ) позволяет использовать двухуровневую структуру АИН при разработке привода большой мощности. При необходимости для повышения напряжения преобразователя в плечо инвертора может включаться сразу несколько ключей в зависимости от напряжения ШПТ. На рисунке 4.5 представлена структура 2У-АИН для привода высокой мощности. На примере данной схемы три ключа в плече должны работать, как один ключ, т.е. на базы транзисторов должны поступать одинаковые сигналы [113].

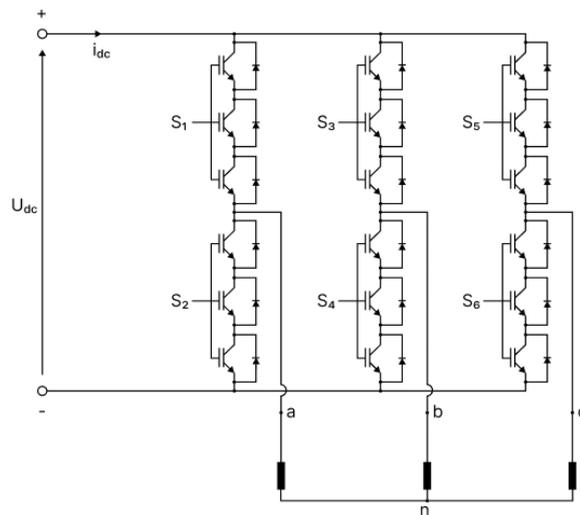


Рисунок 4.5 – Структура 2У-АИН для привода большой мощности (составлено автором на основе [113])

При построении высоковольтных преобразователей целесообразнее использовать многоуровневые структуры, чем обеспечивать требуемое напряжение за счет последовательного включения ключей в плечи инвертора. В первую очередь, за счет использования других топологий, с помощью которых возможно увеличить количество уровней напряжения на выходе инвертора [20]. К тому же, IGBT ключи на напряжение 1200-1700 В доказали свою техническую и экономическую эффективность при построении АИН на их основе [23].

4.2.3 Многоуровневые инверторы напряжения

Все современные высоковольтные электроприводы и другие электротехнические системы оснащаются многоуровневыми инверторами напряжения (МУ-АИН). Ввиду того, что АИ является импульсным источником энергии для приводной машины, большее количество уровней напряжения позволяет обеспечить синусоидальную форму напряжения и снизить коэффициент гармоник выходного напряжения. Повышение уровней в выходном напряжении инвертора позволяет уменьшить частоту коммутации (обычно МУ-АИН работают с частотой около 550 Гц), что позволяет снизить коммутационные потери в инверторе, и следовательно, повысить его КПД [121].

Вместе с увеличением уровней напряжения на выходе инвертора уменьшается и напряжение, прикладываемое к транзисторам. Это позволяет не только использовать ключи на более низкий номинал, но и снизить требования к снабберным цепям из-за уменьшения величины du/dt , формируемое на коллекторе транзистора при его запираии.

Основные преимущества преобразователей с многоуровневыми инверторами по сравнению с двухуровневыми:

- уменьшение искажений синусоидальной формы выходного напряжения преобразователя и входного тока питающей сети;

- снижение потерь мощности в силовых ключах;
- снижение du/dt выходного напряжения;
- улучшенные массогабаритные характеристики и меньшая стоимость выходных LC-фильтров и возможность их отсутствия в составе АЭП.

Наиболее технически применимыми и успешно коммерчески реализованными являются следующие топологии МУ-АИН (рисунок 4.6):

1. Трехуровневый инвертор с фиксированной нейтральной точкой или трехуровневый инвертор с фиксирующими диодами. В зарубежной литературе обозначен, как NPC – neutral point clamped (рисунок 4.6 а).

2. Трехуровневый инвертор с фиксирующими конденсаторами или трехуровневый инвертор с плавающими конденсаторами. В зарубежной литературе обозначен, как FC – flying capacitor (рисунок 4.6 б).

3. Модульный каскадный инвертор. В зарубежной литературе обозначен, как СНВ – Cascaded H-Bridge (рисунок 4.6 в).

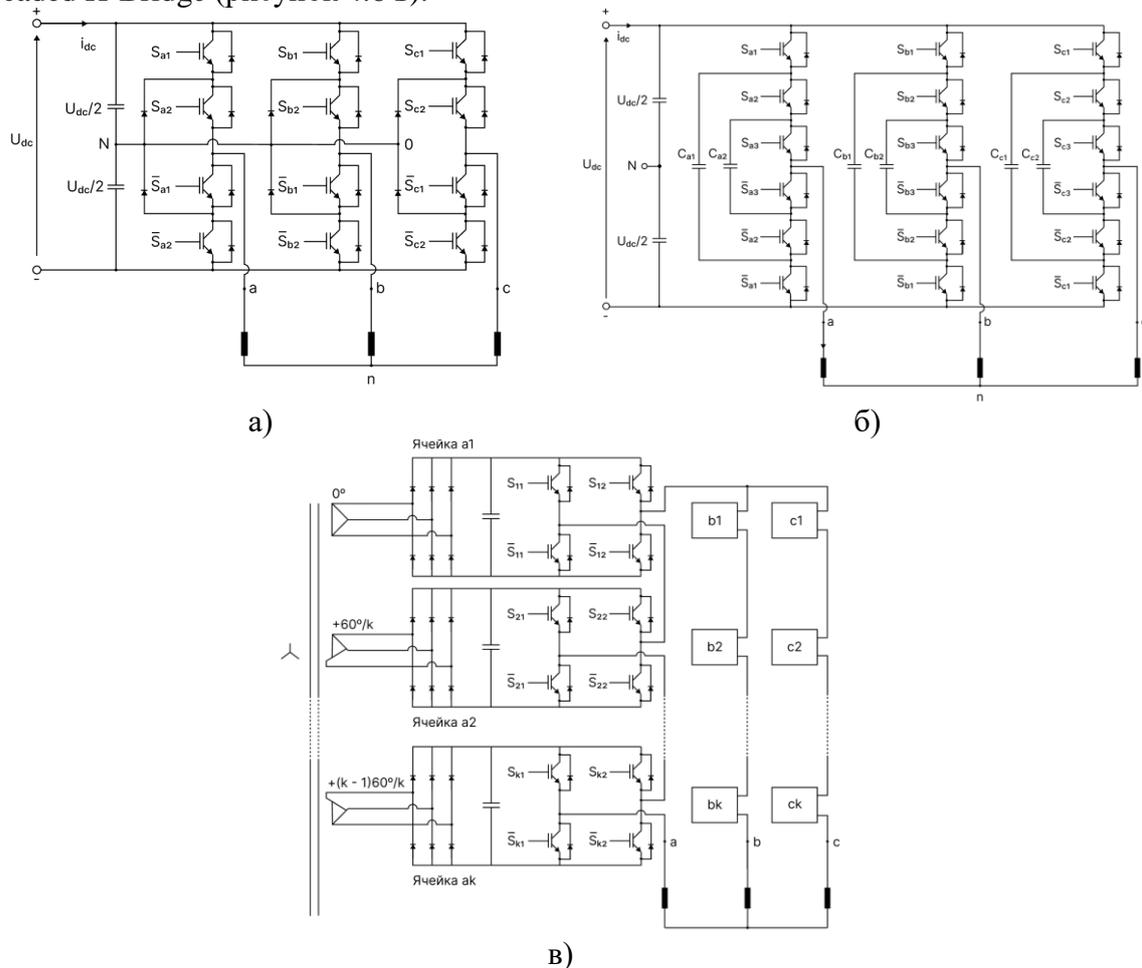


Рисунок 4.6 – Топологии многоуровневых инверторов напряжения: а) Трехуровневый инвертор с фиксированной нейтральной точкой; б) Трехуровневый инвертор с фиксирующими конденсаторами; в) Модульный каскадный инвертор (составлено автором на основе [113])

Сравнение выделенных топологий многоуровневых инверторов показывает, что общее число элементов (конденсаторов, диодов и IGBT модулей – транзисторов и обратных диодов) для каскадного инвертора меньше соответствующих элементов, чем для двух других топологий инверторов при равных значениях числа уровней (таблица 4.4). При этом количество силовых IGBT модулей для всех рассматриваемых топологий одинаково [116].

Таблица 4.4 – Сравнение количества элементов для рассматриваемых топологий (где N – количество уровней напряжения) [116]

Топология	Инвертор с фиксируемой нейтральной точкой	Трехуровневый инвертор с фиксирующими конденсаторами	Каскадный инвертор
Количество модулей (IGBT)	$6(N-1)$	$6(N-1)$	$6(N-1)$
Количество фиксирующих диодов	$3(N-1)(N-2)$	0	0
Количество конденсаторов в звене постоянного	$N-1$	$N-1$	$3(N-1)/2$
Количество балансировочных конденсаторов	0	$3(N-2)$	0
Общее количество	$3N^2-2N-1$ $N = 3,4\dots$	$10N-13$ $N = 3,4\dots$	$15(N-1)/2$ $N = 5, 7, 9$

Анализ современных автоматизированных высоковольтных электроприводов шаровых мельниц от ведущих производителей позволил выявить основные топологии преобразователей частоты, учитывающих особенности работы как приводных машин, так и исполнительных механизмов. В таблице 4.5 приведены основные топологии преобразователей частоты, используемых в составе автоматизированных электроприводов шаровых мельниц, их совместимость с приводными машинами и силовые ключи, на основе которых строятся топологии преобразователей [12, 50, 57, 61, 63].

Таблица 4.5 – Преобразователи частоты мельниц (составлено автором на основе [12, 50, 57, 61, 63])

Топология ПЧ	Двигатели	Ключи
Каскадный ПЧ	<ul style="list-style-type: none"> – Асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором – Асинхронный двигатель с фазным ротором – Синхронный двигатель с возбуждением – Синхронный двигатель с постоянными магнитами 	IGBT-транзисторы

Продолжение таблицы 4.5

Трехуровневый инвертор с фиксированной нейтральной точкой и диодный выпрямитель	–Асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором –Синхронный двигатель с возбуждением –Синхронный двигатель с постоянными магнитами	IGBT-транзисторы, IGCT-тиристоры
Трехуровневый инвертор с фиксированной нейтральной точкой и активный выпрямитель	–Асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором –Синхронный двигатель с возбуждением –Синхронный двигатель с постоянными магнитами	IGBT-транзисторы, IGCT-тиристоры
Циклоконвертер	–Асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором –Синхронный двигатель с возбуждением –Синхронный двигатель с постоянными магнитами	Неуправляемые тиристоры

4.2.4 Каскадный преобразователь частоты

Каскадный преобразователь частоты представляет собой структуру, при которой в каждой фазе последовательно соединяются одинаковые ячейки. Конструкция каждой ячейки представляет собой типовой однофазный мост.

Минимальное количество уровней выходного напряжения, которое можно получить при использовании данной топологии составляет 5 уровней. Количество ячеек в фазе в данном случае составляет $p = 2$. Каждая ячейка получает питание от независимого источника постоянного напряжения. Выходное напряжение каждой ячейки может принимать три возможных уровня: $+U_{dc}$, $-U_{dc}$, 0. Напряжение в фазе преобразователя равно сумме выходных напряжений всех ячеек.

Одной из основных особенностей каскадного преобразователя является необходимость включения в состав его топологии согласующего многообмоточного трансформатора со стороны сети. Трансформатор позволяет обеспечить снижение искажения питающей сети и нужное количество гальванических развязанных источников питания для ячеек инвертора. Количество требуемых вторичных обмоток трансформатора составляет $3p$. Напряжения вторичных обмоток трансформатора для одной фазы преобразователя сдвинуты относительно друг друга на угол $(60/p)^\circ$.

Наиболее известными и широко применяемыми алгоритмами широтно-импульсной модуляции для управления каскадными преобразователями являются:

- синусоидальная ШИМ (СШИМ);
- векторная ШИМ (ВШИМ).

Векторная ШИМ обладает сравнительными преимуществами перед синусоидальной ШИМ. В первую очередь, за счет снижения суммарных потерь мощности в силовых IGBT модулях ячеек преобразователя. Потери с векторной модуляционной системой на 4-16% меньше минимального уровня потерь в преобразователе с синусоидальной ШИМ. Коэффициент использования по напряжению выше, а суммарный коэффициент искажения выходного напряжения составляет менее 5% [8, 26]. Несмотря на преимущества векторной ШИМ, алгоритм синусоидальной ШИМ получил более широкое применение за счет простоты своей реализации. В дальнейшем будут рассматриваться алгоритмы синусоидальной ШИМ.

Управление ключами инвертора на основе алгоритмов синусоидальной ШИМ осуществляется за счет сравнения управляющих и опорных сигналов. Опорные пилообразные сигналы в СШИМ строятся по принципу смещения по уровню или смещения по фазе. Каждой паре управляемых ключей инвертора, работающих в противофазе, ставят в соответствие свой опорный сигнал. Каждый опорный сигнал в точках пересечения с управляющим сигналом определяет коммутацию ключей [12].

Главной особенностью управления многоуровневым каскадным преобразователем с помощью СШИМ являются методы формирования системы опорных сигналов.

Существуют следующие методы формирования системы опорных сигналов [7, 116]:

1. Сдвиг опорных сигналов по фазе. Метод заключается в формировании опорных симметричных пилообразных сигналов одинаковой амплитуды за счет их смещения по фазе относительно друг друга.

2. Сдвиг опорных сигналов по уровню. Метод включает несколько способов:

– Опорные синфазные сигналы смещаются по уровню во всем диапазоне задающего напряжения.

– Группа опорных синфазных сигналов в положительной области значений сдвинуты по фазе на 180° относительно группы синфазных сигналов в отрицательной области.

– Соседние по уровню опорные сигналы сдвинуты друг относительно друга на 180° .

Все рассматриваемые методы применимы для управления каскадным многоуровневым преобразователем. Выбор алгоритма формирования опорных сигналов определяет гармонический состав выходного напряжения. Для всех методов количество требуемых опорных сигналов равно $(n-1)$, где n – это число уровней выходного напряжения.

Метод формирования опорных сигналов по уровню позволяет обеспечить снижение искажений выходного напряжения преобразователя, относительно альтернативного способа формирования опорных сигналов. При этом частота коммутации составит в $2p$ меньше относительно алгоритма модуляции при сдвиге опорных сигналов по фазе. Использование алгоритма формирования опорных сигналов по уровню приводит к небалансу потребляемых

ячейками мощности и увеличению искажения входного сетевого тока. Данную особенность можно компенсировать за счет усложнения алгоритма управления и увеличения частоты коммутации.

Опыт практического применения алгоритмов модуляции показывает, что основным методом формирования опорных сигналов при СШИМ является формирование опорных сигналов со сдвигом по фазе [7, 116].

Алгоритм синусоидальной ШИМ целесообразно рассматривать с предмодуляцией управляющих сигналов с целью увеличения коэффициента использования по напряжению инвертора. Коэффициент использования инвертора по напряжению (M) с СШИМ составляет 78,5%. Алгоритм предмодуляции за счет изменения формы управляющего сигнала с помощью третьей гармоники позволяет увеличить M до 90,7% [116].

Среди основных преимуществ каскадных преобразователей можно выделить [12, 114]:

1. Многоуровневая топология позволяет использовать низковольтные IGBT транзисторы.
2. Широкие возможности резервирования полупроводниковых элементов и обеспечения работоспособности систем при выходе из строя части элементов.
3. Форма выходного и входного напряжения инвертора приближена к синусоидальной. При использовании многоуровневой топологии не требуется установка моторных дросселей и сетевых фильтров. Двигатель не подвергается большим изменениям dv/dt , потери мощности на гармоники минимальны.
4. Регулирование выходной частоты питающего напряжения двигателя в широком диапазоне и обеспечение требуемого момента на низкой частоте вращения (20% от номинальной).

Основным недостатком модульных каскадных инверторов является необходимость в использовании фазосдвигающего трансформатора высокой стоимости для питания силовых ячеек.

4.2.5 Выбор топологии преобразователя частоты

Одним из определяющих факторов при выборе топологии высоковольтного преобразователя частоты является обеспечение требуемого выходного напряжения – 6 кВ. На основании проведенного научного обзора можно выделить несколько способов для увеличения рабочего напряжения привода при разработке преобразователей:

1. Увеличение количества уровней напряжения в многоуровневых преобразователях.
2. Последовательное включение силовых ключей.
3. Каскадное соединение ячеек.

Учитывая комплекс преимуществ каскадных преобразователей частоты перед альтернативными топологиями, наилучшим решением для высоковольтного автоматизированного электропривода шаровой мельницы является выбор каскадного преобразователя [82, 92]. Для обеспечения широкого диапазона регулирования переменных электропривода и необходимого электромагнитного момента на низкой частоте вращения выбрана векторная система управления. В качестве модуляционной системы управления выбрана синусоидальная ШИМ со сдвигом по фазе.

Сравнительная оценка рассматриваемых топологий преобразователей частоты представлена в таблице 4.6.

Таблица 4.6 – Качественное сравнение рассматриваемых топологий преобразователей частоты (составлено автором)

Параметр	Каскадный	Трехуровневый инвертор и диодный выпрямитель	Трехуровневый инвертор и активный выпрямитель
КПД	Высокий	Самый высокий	Высокий
Искажение входного напряжения	Низкое	Сильное	Самое низкое
Искажение выходного напряжения	Самое низкое	Сильное	Сильное
Рекуперация энергии	Нет	Нет	Да
Моторные дроссели	Нет	Необходимы	Необходимы
Сетевые фильтры	Могут отсутствовать	Да	Могут отсутствовать

4.3 Моделирование высоковольтного автоматизированного электропривода шаровой мельницы

4.3.1 Математическое описание автоматизированного электропривода шаровой мельницы

Для управления рассматриваемым высоковольтным электродвигателем с параметрами, представленными в таблице 2.6, используется структура одиннадцатиуровневого каскадного инвертора [128].

Ячейки преобразователя состоят из выпрямляющей и инвертирующей частей. Исследование режимов работы выпрямителя и его влияния на сеть не являются предметными задачами настоящей работы. Целесообразно выполнить эквивалентирование преобразователя частоты по схеме «инвертор-двигатель», чтобы рассмотреть влияние мельничного агрегата на работу автоматизированного электропривода. Моделирование каскадного преобразователя осуществлялось при замене системы «сеть-выпрямитель» для каждой ячейки высоковольтного

инвертора эквивалентным источником постоянного напряжения. На рисунке 4.7 представлена эквивалентная схема исследуемого АЭП шаровой мельницы.

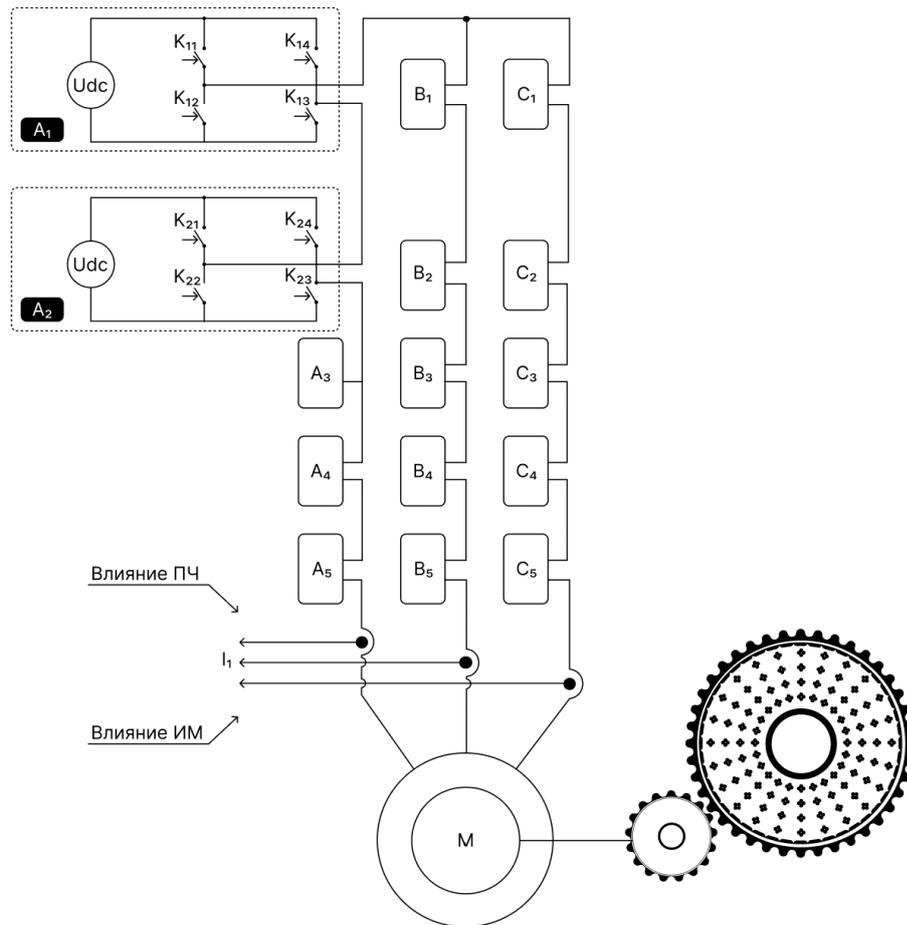


Рисунок 4.7 – Эквивалентная схема исследуемого АЭП шаровой мельницы (составлено автором)

Каскадный инвертор напряжения. Для рассматриваемой топологии инвертора в каждой фазе последовательно соединены пять однотипных структурных элементов – ячеек (рисунок 4.8). Каждая ячейка представляет собой однофазный инвертор напряжения, питающийся от независимого источника постоянного напряжения.

Количество уровней линейного напряжения на выходе инвертора соответствует одиннадцати при пяти ячейках согласно формуле 4.1.

$$m = 2N + 1, \quad (4.1)$$

где m – количество уровней линейного напряжения на выходе инвертора;

N – количество ячеек инвертора для одной фазы.

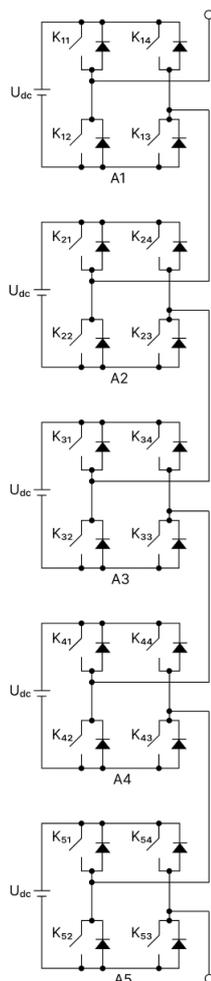


Рисунок 4.8 – Структура одиннадцатиуровневого каскадного инвертора для одной фазы
(составлено автором на основе [128])

При моделировании каскадного инвертора принято, что каждый транзистор представляет собой идеальный ключ, напряжения питания ячеек инвертора одинаково. Выходное напряжение ячеек одиннадцатиуровневого каскадного инвертора напряжения представлено уравнениями 4.2-4.4.

Для фазы А:

$$\begin{cases} U_{A1} = (K_{11} - K_{14})U_{dc} \\ U_{A2} = (K_{21} - K_{24})U_{dc} \\ U_{A3} = (K_{31} - K_{34})U_{dc} \\ U_{A4} = (K_{41} - K_{44})U_{dc} \\ U_{A5} = (K_{51} - K_{54})U_{dc} \end{cases} \quad (4.2)$$

Для фазы В:

$$\begin{cases} U_{B1} = (K_{61} - K_{64})U_{dc} \\ U_{B2} = (K_{71} - K_{74})U_{dc} \\ U_{B3} = (K_{81} - K_{84})U_{dc} \\ U_{B4} = (K_{91} - K_{94})U_{dc} \\ U_{B5} = (K_{101} - K_{104})U_{dc} \end{cases} \quad (4.3)$$

Для фазы С:

$$\begin{cases} U_{C1} = (K_{111} - K_{114})U_{dc} \\ U_{C2} = (K_{121} - K_{124})U_{dc} \\ U_{C3} = (K_{131} - K_{134})U_{dc} \\ U_{C4} = (K_{141} - K_{144})U_{dc} \\ U_{C5} = (K_{151} - K_{154})U_{dc} \end{cases} \quad (4.4)$$

Где U_{AN}, U_{BN}, U_{CN} – выходные напряжения ячеек для фаз А, В и С, соответственно;

$K_{11} - K_{154}$ – коммутационные функции инвертора;

U_{dc} – постоянное напряжение эквивалентных источников каскадного инвертора.

Результирующие фазные напряжения инвертора вычисляются по формулам 4.5.

$$\begin{cases} U_A = U_{A1} + U_{A2} + U_{A3} + U_{A4} + U_{A5} \\ U_B = U_{B1} + U_{B2} + U_{B3} + U_{B4} + U_{B5}, \\ U_C = U_{C1} + U_{C2} + U_{C3} + U_{C4} + U_{C5} \end{cases} \quad (4.5)$$

где U_A, U_B, U_C – результирующие фазные напряжения на выходе инвертора.

Модуляционная система управления на основе синусоидальной ШИМ со сдвигом по фазе. Опорные сигналы всех ячеек в одной фазе смещают на угол в соответствии с формулой 4.6.

$$\varphi_{cr} = \frac{360^\circ}{m-1}, \quad (4.6)$$

где φ_{cr} – угол смещения опорных сигналов;

m – количество уровней напряжения инвертора.

В соответствии с выбранной топологией инвертора для одиннадцати уровней напряжения смещение опорных сигналов по фазе составит 36° .

Количество опорных сигналов определяется общим количеством стоек ячеек фазы инвертора. Для пяти ячеек инвертора количество стоек инвертора составляет десять штук, что соответствует десяти опорным сигналам.

Опорные сигналы $U_{cr1}, U_{cr2}, U_{cr3}, U_{cr4}, U_{cr5}$, смещение которых составляет 36° относительно друг друга, используются для вычисления сигналов коммутации для верхних ключей левых стоек ячеек инвертора (рисунок 4.8):

- для фазы А: $S_{11}, S_{21}, S_{31}, S_{41}, S_{51}$;
- для фазы В: $S_{61}, S_{71}, S_{81}, S_{91}, S_{101}$;
- для фазы С: $S_{111}, S_{121}, S_{131}, S_{141}, S_{151}$.

Остальные опорные сигналы: $U_{cr6}, U_{cr7}, U_{cr8}, U_{cr9}, U_{cr10}$, сдвинутые на 180° относительно сигналов $U_{cr1} - U_{cr5}$, соответственно, используются для вычисления сигналов коммутации для верхних ключей правых стоек инвертора (рисунок 4.8):

- для фазы А: $S_{14}, S_{24}, S_{34}, S_{44}, S_{54}$;
- для фазы В: $S_{64}, S_{74}, S_{84}, S_{94}, S_{104}$;
- для фазы С: $S_{114}, S_{124}, S_{134}, S_{144}, S_{154}$.

Нижние ключи являются комплементарными по отношению к верхним ключам и не участвуют в математическом описании инвертора.

Формирование коммутационных функций транзисторов инвертора осуществляется на основе сравнения управляющих и опорных сигналов.

Алгоритм формирования коммутационных функций осуществляется по формулам 4.7-4.12.

Для фазы А по формулам 4.7-4.8:

$$\begin{cases} U_{Aset} > U_{cr1} \rightarrow S_{11} = 1 \\ U_{Aset} > U_{cr2} \rightarrow S_{21} = 1 \\ U_{Aset} > U_{cr3} \rightarrow S_{31} = 1. \\ U_{Aset} > U_{cr4} \rightarrow S_{41} = 1 \\ U_{Aset} > U_{cr5} \rightarrow S_{51} = 1 \end{cases} \quad (4.7)$$

$$\begin{cases} U_{cr6} > U_{Aset} \rightarrow S_{14} = 1 \\ U_{cr7} > U_{Aset} \rightarrow S_{24} = 1 \\ U_{cr8} > U_{Aset} \rightarrow S_{34} = 1. \\ U_{cr9} > U_{Aset} \rightarrow S_{44} = 1 \\ U_{cr10} > U_{Aset} \rightarrow S_{54} = 1 \end{cases} \quad (4.8)$$

Для фазы В по формулам 4.9-4.10:

$$\begin{cases} U_{Bset} > U_{cr1} \rightarrow S_{61} = 1 \\ U_{Bset} > U_{cr2} \rightarrow S_{71} = 1 \\ U_{Bset} > U_{cr3} \rightarrow S_{81} = 1. \\ U_{Bset} > U_{cr4} \rightarrow S_{91} = 1 \\ U_{Bset} > U_{cr5} \rightarrow S_{101} = 1 \end{cases} \quad (4.9)$$

$$\begin{cases} U_{cr6} > U_{Bset} \rightarrow S_{64} = 1 \\ U_{cr7} > U_{Bset} \rightarrow S_{74} = 1 \\ U_{cr8} > U_{Bset} \rightarrow S_{84} = 1. \\ U_{cr9} > U_{Bset} \rightarrow S_{94} = 1 \\ U_{cr10} > U_{Bset} \rightarrow S_{104} = 1 \end{cases} \quad (4.10)$$

Для фазы С по формулам 4.11-4.12:

$$\begin{cases} U_{Cset} > U_{cr1} \rightarrow S_{111} = 1 \\ U_{Cset} > U_{cr2} \rightarrow S_{121} = 1 \\ U_{Cset} > U_{cr3} \rightarrow S_{131} = 1. \\ U_{Cset} > U_{cr4} \rightarrow S_{141} = 1 \\ U_{Cset} > U_{cr5} \rightarrow S_{151} = 1 \end{cases} \quad (4.11)$$

$$\begin{cases} U_{cr6} > U_{Cset} \rightarrow S_{114} = 1 \\ U_{cr7} > U_{Cset} \rightarrow S_{124} = 1 \\ U_{cr8} > U_{Cset} \rightarrow S_{134} = 1. \\ U_{cr9} > U_{Cset} \rightarrow S_{144} = 1 \\ U_{cr10} > U_{Cset} \rightarrow S_{154} = 1 \end{cases} \quad (4.12)$$

Преобразование переменных электродвигателя. В разработанной модели автоматизированного электропривода осуществляется расчет переменных электродвигателя в трех системах координат:

1. В неподвижной системе координат (ABC).

2. В неподвижной ортогональной системе координат $(\alpha-\beta)$.
3. Во вращающейся ортогональной системе координат $(d-q)$.

Переход из системы в систему осуществляется с помощью фазовых и тригонометрических преобразований (4.13-4.16):

- Прямое фазовое преобразование: $(ABC) \rightarrow (\alpha-\beta)$:

$$\begin{cases} U_\alpha = U_A \\ U_\beta = \frac{U_B - U_C}{\sqrt{3}} \end{cases} \quad (4.13)$$

- Обратное фазовое преобразование: $(\alpha-\beta) \rightarrow (ABC)$:

$$\begin{cases} U_A = U_\alpha \\ U_B = -\frac{1}{2}U_\alpha + \frac{\sqrt{3}}{2}U_\beta \\ U_C = -\frac{1}{2}U_\alpha - \frac{\sqrt{3}}{2}U_\beta \end{cases} \quad (4.14)$$

- Прямое тригонометрическое преобразование: $(\alpha-\beta) \rightarrow (d-q)$:

$$\begin{cases} U_d = U_\alpha \cos\varphi + U_\beta \sin\varphi \\ U_q = U_\beta \cos\varphi - U_\alpha \sin\varphi \end{cases} \quad (4.15)$$

где φ – угол поворота вращающейся ортогональной системы координат $(d-q)$.

- Обратное тригонометрическое преобразование: $(d-q) \rightarrow (\alpha-\beta)$:

$$\begin{cases} U_\alpha = U_d \cos\varphi - U_q \sin\varphi \\ U_\beta = U_d \sin\varphi + U_q \cos\varphi \end{cases} \quad (4.16)$$

Преобразования для токов осуществляются по аналогичным формулам.

Система векторного управления. В системе векторного управления 4 контура регулирования:

- Контур регулирования потокообразующего тока.
- Контур регулирования моментобразующего тока.
- Контур регулирования потокосцепления ротора.
- Контур регулирования частоты вращения.

Управление осуществляется по рассогласованию, в качестве регуляторов используются ПИ-регуляторы.

Вычислитель переменных. В вычислителе переменных осуществляется расчет токов в системе координат $(d-q)$ для обратной связи в системе векторного управления и расчет угла поворота вращающейся ортогональной системы координат (4.17):

$$\left\{ \begin{array}{l} \Psi_{2m} = \sqrt{\Psi_{2\alpha}^2 + \Psi_{2\beta}^2} \\ \cos\varphi = \frac{\Psi_{2\alpha}}{\Psi_{2m}} \\ \sin\varphi = \frac{\Psi_{2\beta}}{\Psi_{2m}} \\ \varphi = \tan^{-1}\left(\frac{\sin\varphi}{\cos\varphi}\right) \end{array} \right. \quad (4.17)$$

4.3.2 Результаты моделирования автоматизированного электропривода шаровой мельницы

Имитационная модель АЭП, разработанная в программной среде Matlab Simulink представлена на рисунке 4.9.

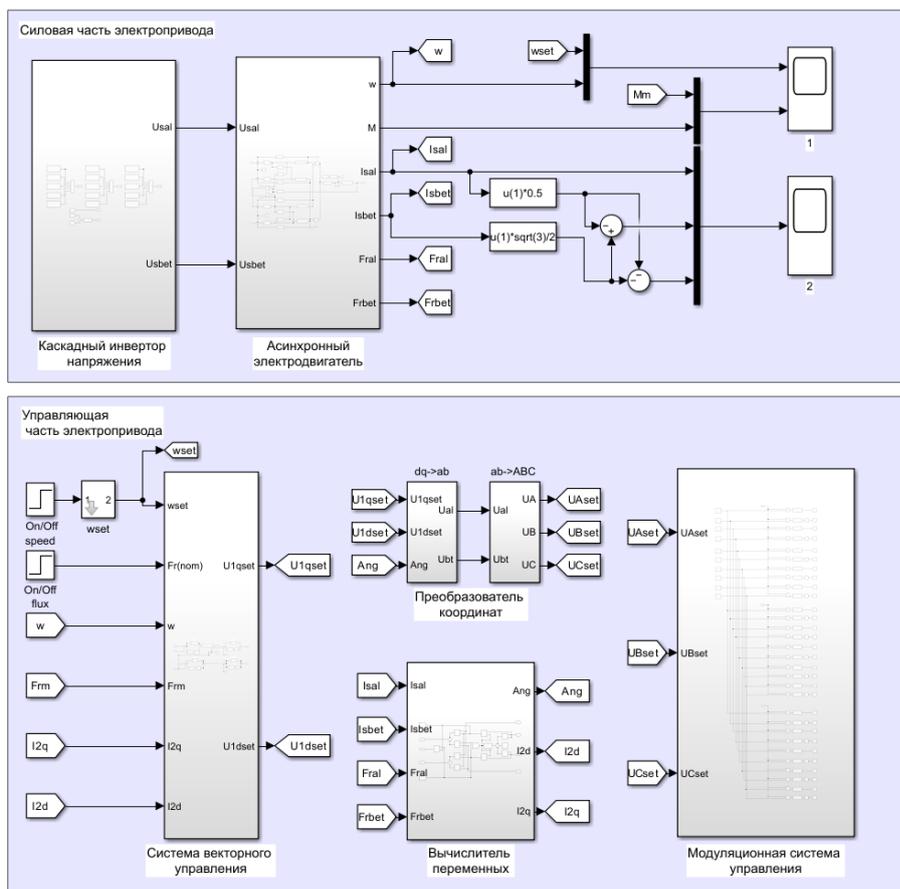


Рисунок 4.9 – Имитационная модель высоковольтного АЭП шаровой мельницы (составлено автором)

Имитационная модель высоковольтного электропривода представлена силовой и управляющей частями. В состав силовой части входят: каскадный инвертор напряжения и высоковольтный асинхронный двигатель. В состав управляющей части входят: система векторного управления, модуляционная система управления, преобразователь координат и вычислитель переменных.

Каскадный инвертор напряжения. Модель каскадного инвертора построена в соответствии с уравнениями 4.2-4.5. Модель каскадного инвертора представлена на рисунке 4.10.

Напряжение для каждой ячейки инвертора принято равным 690 В. Расчет коммутационных функций инвертора осуществляется в соответствии с алгоритмами синусоидальной ШИМ со сдвигом по фазе (уравнения 4.7-4.12).

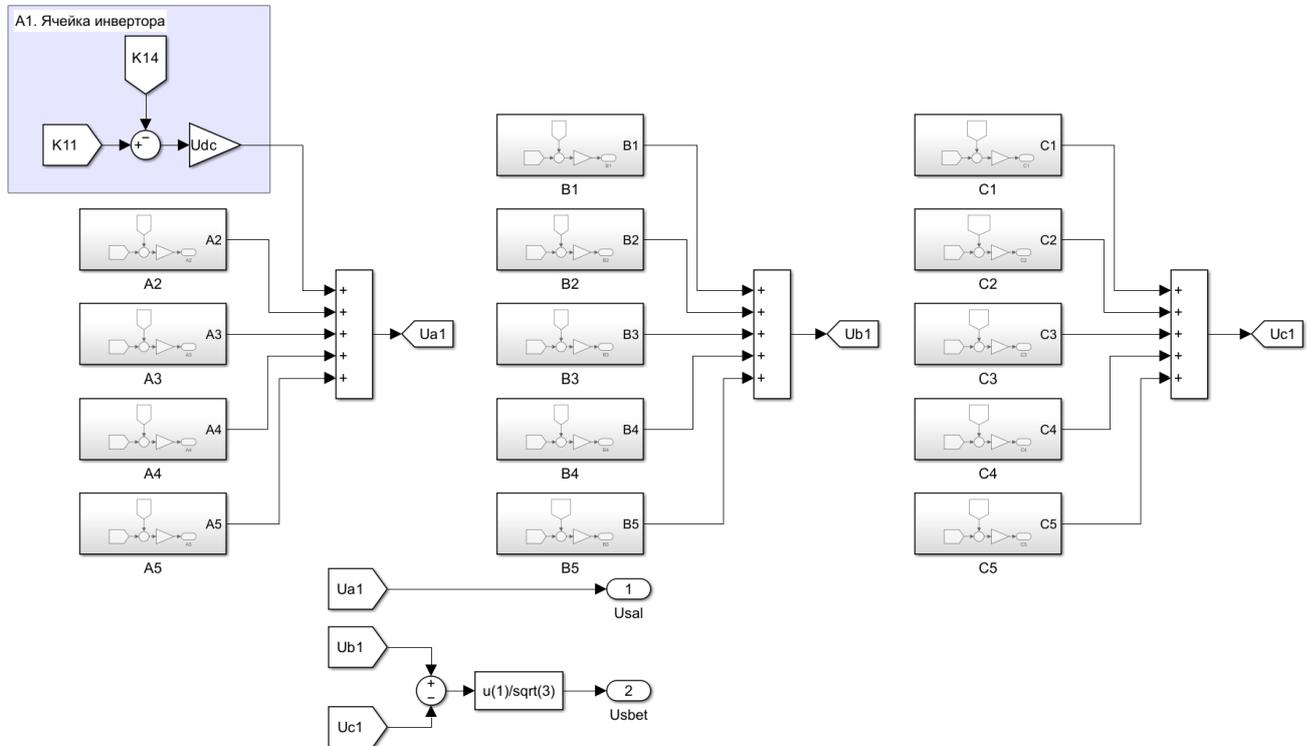


Рисунок 4.10 – Модель каскадного инвертора напряжения (составлено автором)

Модель модуляционной системы управления на основе синусоидальной ШИМ для фазы А в соответствии с алгоритмом формирования коммутационных функций представлена на рисунке 4.11.

Моделирование каскадного инвертора осуществляется с частотой опорных сигналов 500 Гц. На практике относительно низкая частота коммутации позволяет как снизить потери на коммутацию ключей, так и обеспечить относительно низкий коэффициент нелинейных искажений выходного напряжения при выборе каскадной топологии [7].

Сигналы модуляционной системы управления представлены на рисунке 4.12.

Осциллограмма выходного напряжения одиннадцатиуровневого каскадного инвертора представлена на рисунке 4.13.

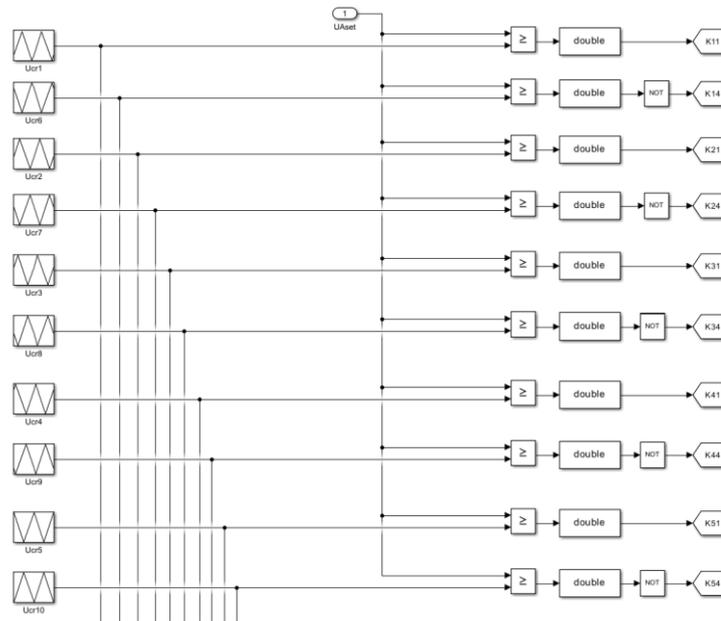


Рисунок 4.11 – Модель модуляционной системы управления каскадного инвертора для фазы А
(составлено автором)

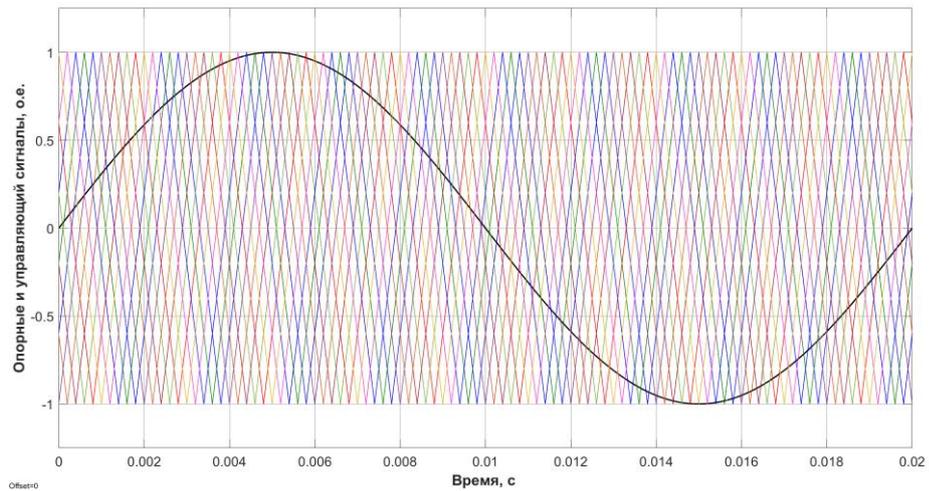


Рисунок 4.12 – Формирование коммутационных функций ключей инвертора (составлено автором)

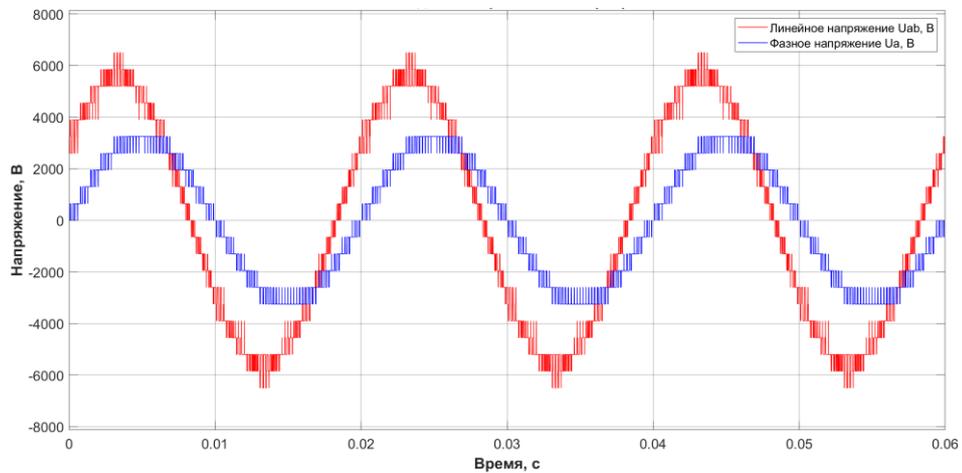


Рисунок 4.13 – Фазное и линейное напряжение инвертора (составлено автором)

Спектральный состав выходного напряжения инвертора представлен на рисунке 4.14. Наибольший вклад гармонических составляющих на выходное напряжение составляет 3,3% от основной гармоники на частоте 50 Гц. Пакет гармонических составляющих (доминантные гармоники) формируется относительно гармоники $n = 10m_f$, где m_f – индекс частотной модуляции.

При частоте сети $f_m = 50$ Гц и частоте несущего сигнала $f_{cr} = 500$ Гц индекс частотной модуляции равен (4.18):

$$m_f = \frac{f_{cr}}{f_m} = \frac{500}{50} = 10. \quad (4.18)$$

Доминантные гармоники распределяются на частотах, близких к эквивалентной частоте переключения инвертора f_{inv} , в соответствии с формулой 4.19.

$$f_{inv} = 10m_f f_m = 10 \cdot 10 \cdot 50 = 5000 \text{ Гц}. \quad (4.19)$$

Следующий пакет гармонических составляющих формируется около двухсотой гармоники, вклад гармонических составляющих не более 1,5%. Коэффициент нелинейных искажений выходного напряжения одинадцатиуровневого инвертора составляет меньше 5%.

Вклад данных гармоник является несущественным при формировании выходного напряжения инвертора. Формируемые пакеты гармоник при одиннадцати уровнях напряжения проявляются и в спектре тока статора. Поскольку анализ изменения износа футеровки барабана ограничивается частотным диапазоном до 500 Гц, необходимость в применении дополнительных алгоритмов фильтрации гармоник отсутствует.

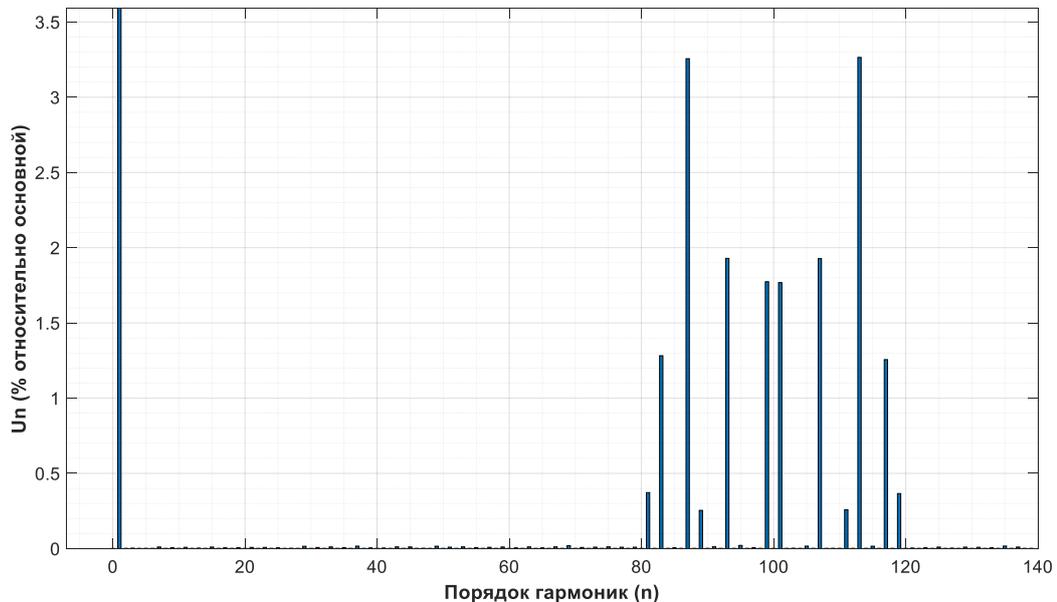


Рисунок 4.14 – Спектр напряжения линейного напряжения U_{AB} (составлено автором)

Векторная система управления. Модель векторной системы управления представлена на рисунке 4.15. Настройка регуляторов потокообразующего тока, моментобразующего тока и

потокосцепления ротора выполнена на технический оптимум. Настройка регулятора частоты вращения выполнена на симметричный оптимум [5].

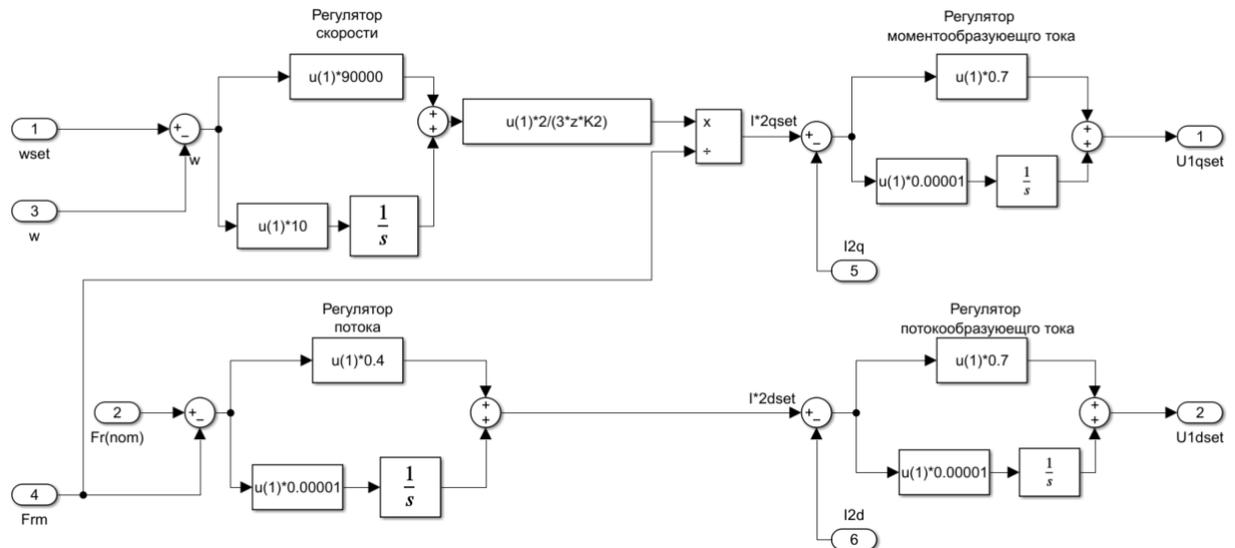


Рисунок 4.15 – Модель векторной системы управления (составлено автором)

Номинальный поток ротора выбран из условия минимального статорного тока для обеспечения потерь, близких к минимальным [19] (формула 4.20)

$$\begin{cases} I_1 = \sqrt{\left(\frac{2M_{\text{НОМ}}}{2Zk_2\Psi_2}\right)^2 + \left(\frac{\Psi_2}{L_0}\right)^2}; (I)_1' \rightarrow \min \\ \Psi_2 = \sqrt{\frac{2M_{\text{НОМ}}L_2}{2Z}}, \end{cases} \quad (4.20)$$

где I_1 – ток статора, А;

Ψ_2 – потокосцепление ротора, Вб;

$M_{\text{НОМ}}$ – номинальный момент двигателя, Нм.

Задание на скорость выбрано по формуле 4.21, исходя из условия $0,65n_{\text{кр}}$:

$$n_{\text{кр}} = \frac{42,3}{\sqrt{D}}, \quad (4.21)$$

где $n_{\text{кр}}$ – критическая скорость двигателя, об/мин;

D – диаметр мельницы, равный 4,5 м.

С учетом передаточного числа приводной вал-шестерни и зубчатого венца мельницы заданная скорость электродвигателя равна (4.22):

$$\omega = \frac{0,65n_{\text{кр}}i\pi}{30}, \quad (4.22)$$

где ω – угловая скорость двигателя;

i – передаточное число вал-шестерни и зубчатого венца ($i = 11,4$).

Автоматизированный электропривод. Пример осциллограмм частоты вращения и электромагнитного момента электропривода при номинальной нагрузке без износа футеровки барабана мельницы представлены на рисунке 4.16.

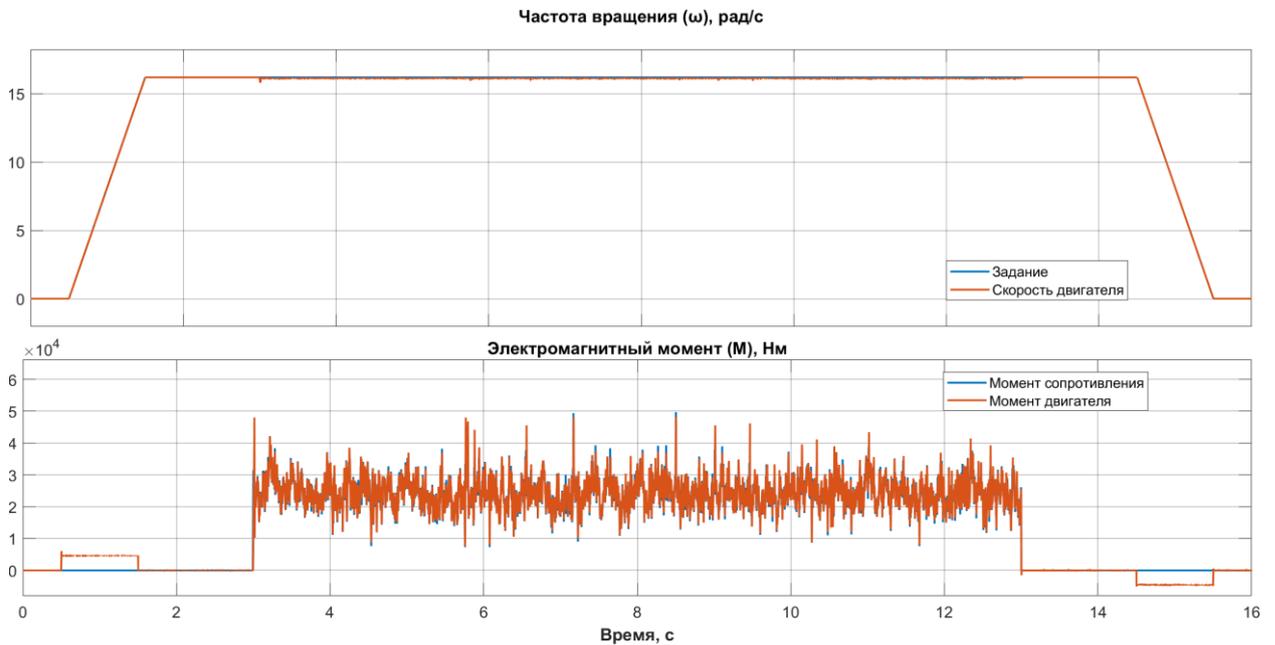


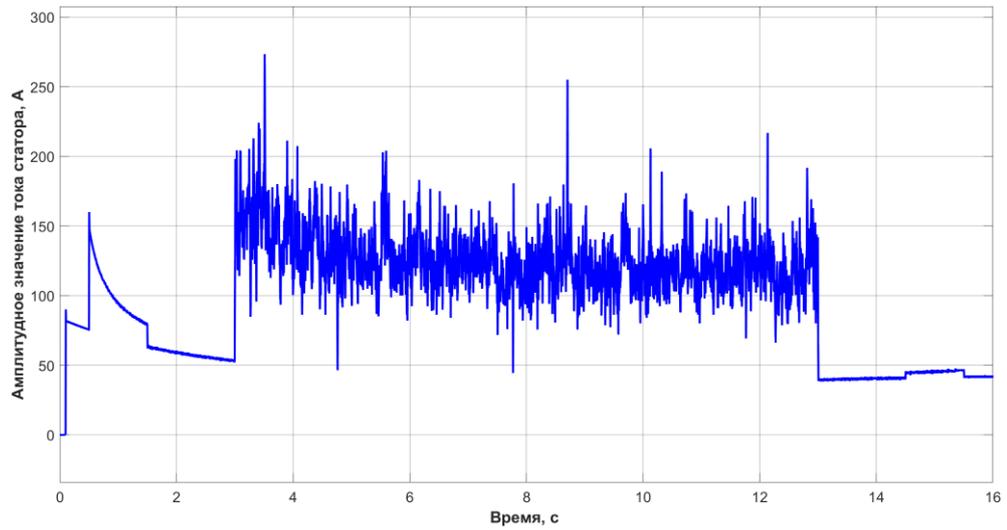
Рисунок 4.16 – Осциллограммы переменных асинхронного электропривода (составлено автором)

По результатам имитационного моделирования комплексной модели АЭП шаровой мельницы получены осциллограммы амплитудных значений тока статора при соответствующем износе (рисунок 4.17). На рисунке 4.18 представлены вычисленные спектры тока статора при разном износе.

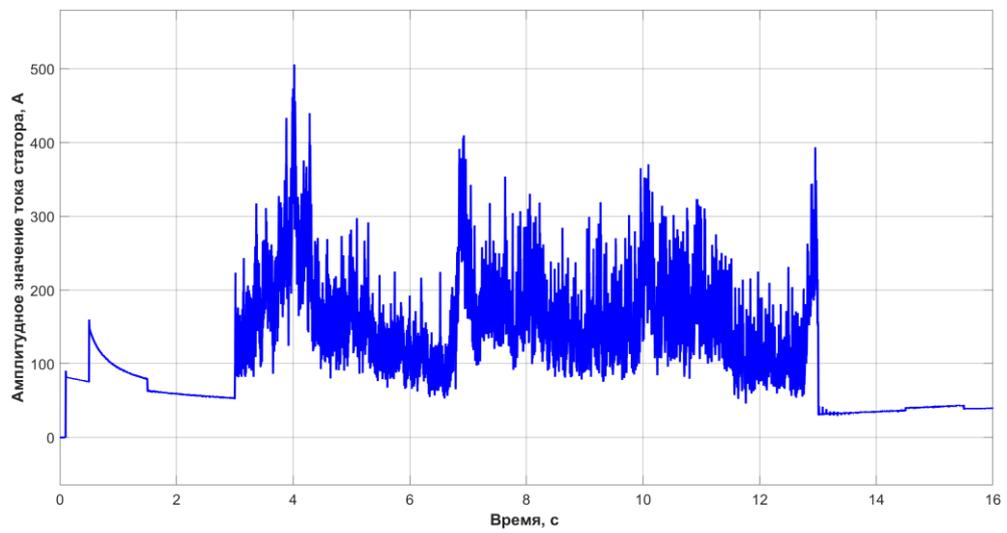
Согласно вычисленным спектрам тока статора на основе комплексной модели АЭП наблюдается формирование двух группы спектральных составляющих, которые обусловлены влиянием как шаровой мельницы, так и работой каскадного инвертора (рисунок 4.17б, в):

1. Характерные гармонические составляющие, которые зависят от степени износа футеровки барабана и формируются на частотах: 200,2 Гц и 400,4 Гц.
2. Пакеты гармонических составляющих, которые зависят от частоты коммутации инвертора и формируются на частотах: 5000 Гц, 10000 Гц, 15000 Гц, 20000 Гц.

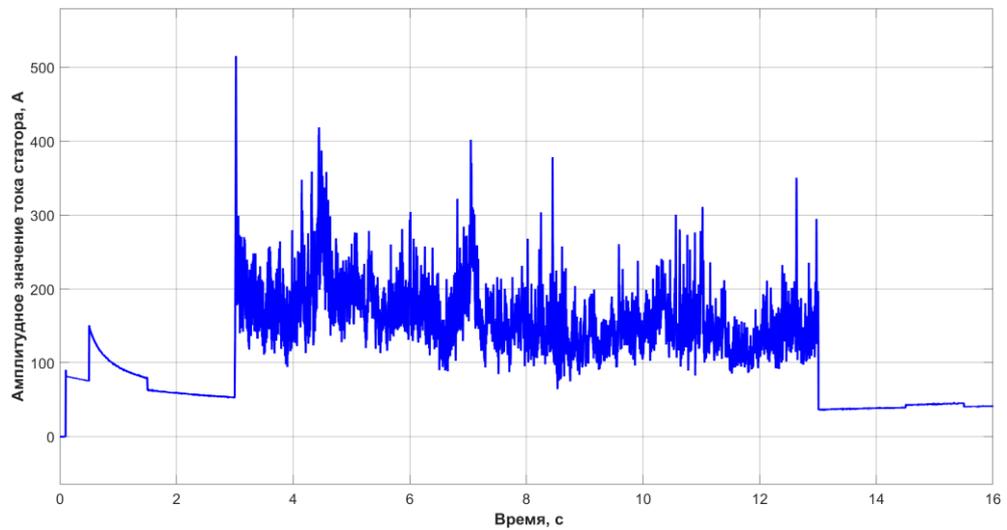
Гармонические составляющие, создаваемые каскадным преобразователем частоты, не влияют на мониторинг износа футеровки, поскольку они формируются вне зоны отслеживаемых частот.



а)

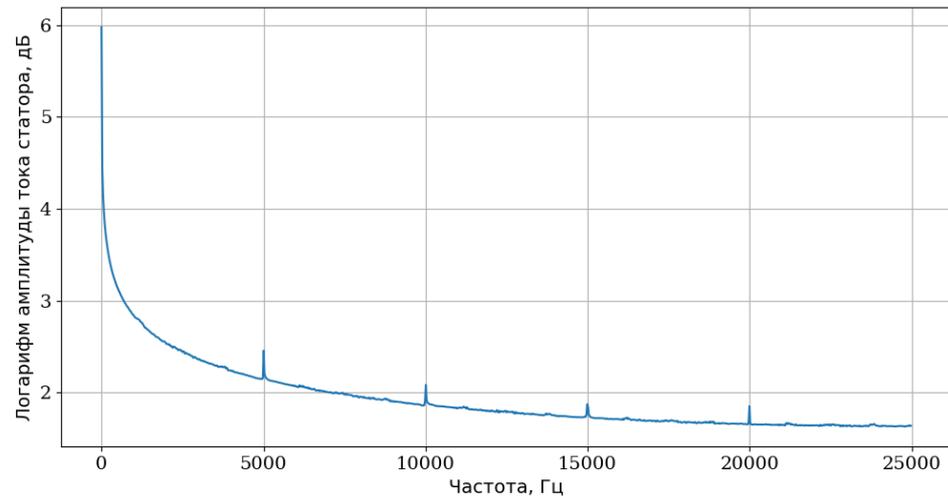


б)

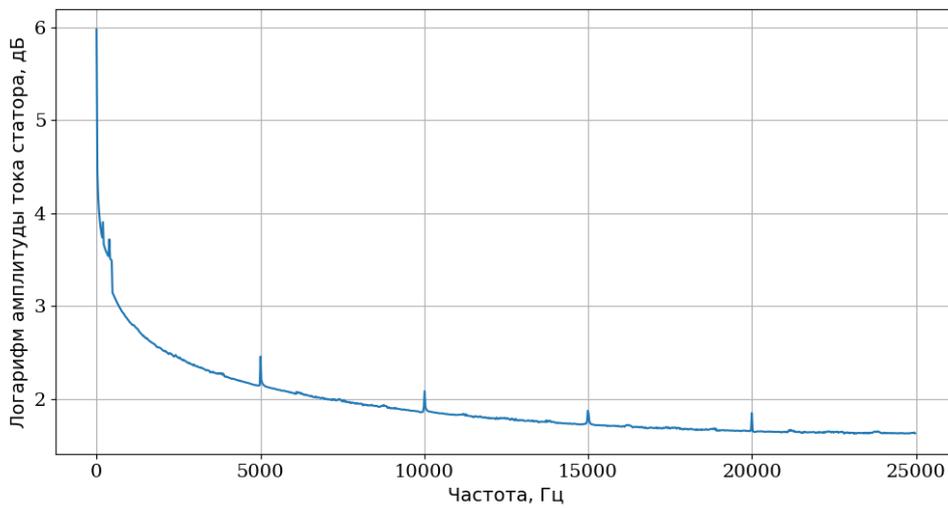


в)

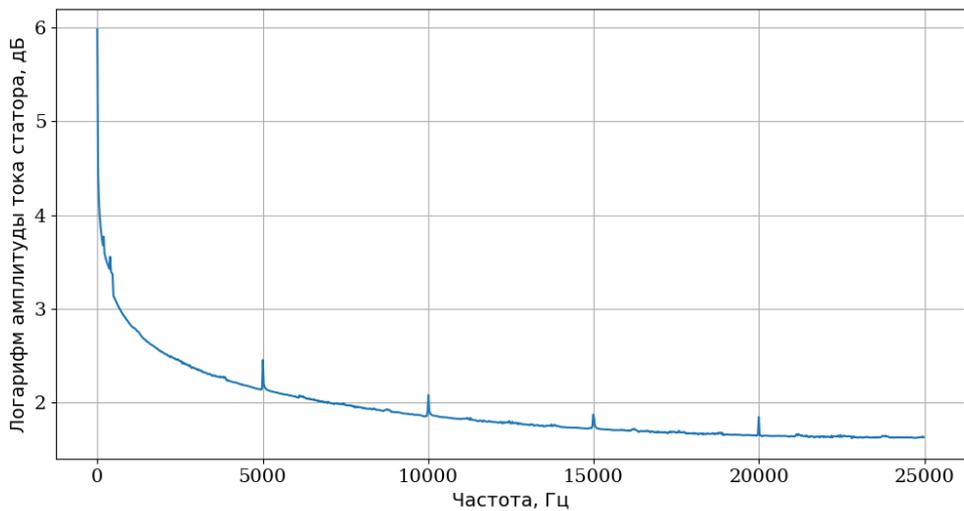
Рисунок 4.17 – Вычисленные амплитудные значения тока статора с помощью комплексной модели АЭП шаровой мельницы в Matlab Simulink при разном износе: а) износ 0%; б) износ 24,5%; в) износ 49% (составлено автором)



а)



б)



в)

Рисунок 4.18 – Вычисленные спектры тока статора на основе комплексной модели АЭП шаровой мельницы в Matlab Simulink при разном износе: а) износ 0%; б) износ 24,5%; в) износ 49% (составлено автором)

4.4 Моделирование корректирующих алгоритмов в составе векторной системы управления высоковольтного электропривода шаровой мельницы

Учет обмоточных параметров двигателя является необходимым условием для реализации преимуществ векторного управления [4, 6]. Управление асинхронным двигателем осуществляется в системе координат $(d-q)$, что требует точного знания параметров обмоток: активного сопротивления статора и ротора, индуктивностей рассеяния и взаимной индуктивности. Ошибка в определении данных параметров в системе СВУ приводит к:

- некорректной ориентации потока;
- снижению точности управления моментом;
- появлению статических и динамических ошибок при управлении скоростью.

Предлагается рассмотреть корректирующие алгоритмы в составе векторной системы управления при реализации двухдвигательного электропривода шаровой мельницы. Алгоритмы осуществляют коррекцию задания на момент и на потокосцепление и позволяют учесть изменение индуктивности цепи намагничивания. Это позволяет обеспечить выравнивание нагрузочных моментов между приводными машинами, связанных жесткой связью, и минимальное энергопотребление [17].

Алгоритм коррекции момента включает две основные операции:

1. Расчет общего момента двигателей $M_{об}$ (формула 4.23).

$$M_{об} = M_{эд1} + M_{эд2}, \quad (4.23)$$

где $M_{эд1}$ – момент первого электродвигателя; $M_{эд2}$ – момент второго электродвигателя.

$$M_{об/2} = \frac{M_{об}}{2}. \quad (4.24)$$

2. Расчет добавочных моментов $M_{д1}$ и $M_{д2}$ для коррекции задания на момент (формула 4.25).

$$\begin{aligned} M_{д1} &= M_{об/2} - M_{эд1}; \\ M_{д2} &= M_{об/2} - M_{эд2}. \end{aligned} \quad (4.25)$$

Корректировка потокосцепления осуществляется на основе корректирующих коэффициентов k_1 и k_2 (формула 4.26).

$$\begin{aligned} \Psi_{з1} &= k_1 \cdot \Psi_{ном1}; \\ \Psi_{з2} &= k_2 \cdot \Psi_{ном2}; \end{aligned} \quad (4.26)$$

где $\Psi_{з1}$ и $\Psi_{з2}$ – задания на потокосцепление ротора для первого и второго двигателя;

$\Psi_{ном1}$ и $\Psi_{ном2}$ – номинальные потокосцепления ротора первого и второго двигателя.

Имитационное моделирование проводилось на примере двигателей Siemens серии Simotics HV M. Моделирование включало три эксперимента:

1. Моделирование двухдвигательного электропривода без корректирующих алгоритмов.

2. Моделирование двухдвигательного электропривода с корректировкой задания на момент.

3. Моделирование двухдвигательного электропривода с корректировкой задания на момент и на потокосцепление.

Для одной из двух приводных машин задавалось номинальное значение индуктивности цепи намагничивания L_μ , для другой – $0,8L_\mu$. Отклонение значения индуктивности цепи намагничивания может осуществляться в диапазоне от 0,7 до 1,1 от номинального значения. Факторы, которые приводят к изменению индуктивности цепи намагничивания, приведены в работе [24]. Моделирование высоковольтного электропривода выполнялось на основе линеаризованной системы векторного регулирования [5].

Основные параметры рассматриваемого электродвигателя приведены в таблице 4.7.

Таблица 4.7 – Параметры асинхронного двигателя Siemens Simotics HV M (составлено автором)

$P_{\text{ном}},$ кВт	$n_2,$ об/мин	$U_{\text{ном}},$ кВ	z	КПД	$\cos\varphi$	λ	K_i	$J,$ кг·м ²
5150	595	6	5	0,972	0,85	2,45	4,5	618

Параметры моделируемой системы электропривода 1 (асинхронный двигатель и инвертор) при L_μ рассчитаны по методике [7] и приведены в таблице 4.8. Аналогичные параметры для моделируемой системы электропривода 2 (асинхронный двигатель и инвертор) при $0,8L_\mu$ приведены в таблице 4.9.

Таблица 4.8 – Параметры модели электропривода 1 при L_μ (составлено автором)

$L_\mu,$ Гн	k_r	$R_d,$ Ом	$T_d,$ с	$K_z,$ рад/с	$T_z,$ с	z	$F_{r\text{ном}},$ Вб	$K_\mu,$ В	$T_\mu,$ с	$T_r,$ с
0,248	0,952	0,162	0,13	62,8	0,1	5	15	8485	0,001	5,035

Таблица 4.9 – Параметры модели электропривода 2 при L_μ (составлено автором)

$L_\mu,$ Гн	k_r	$R_d,$ Ом	$T_d,$ с	$K_z,$ рад/с	$T_z,$ с	z	$F_{r\text{ном}},$ Вб	$K_\mu,$ В	$T_\mu,$ с	$T_r,$ с
0,199	0,762	0,145	0,73	62,8	0,1	5	15	8485	0,001	5,035

Где L_μ – индуктивность намагничивания;

k_r – отношение индуктивности намагничивания к индуктивности ротора;

R_d – эквивалентное активное сопротивление асинхронного двигателя, Ом;

T_d – эквивалентная постоянная времени асинхронного двигателя, с;

K_z – номинальная скорость двигателя, рад/с;

T_z – постоянная времени, регулирующая кривую разгона, с;

z – число пар полюсов;

$F_{r\text{ном}}$ – номинальное потокосцепление ротора, Вб;

K_μ – коэффициент усиления инвертора, В;

T_{μ} – постоянная времени инвертора, с;

T_r – постоянная времени обмотки ротора, с.

На рисунке 4.19 представлена имитационная модель двухдвигательного электропривода, на основе которой были проведены эксперименты в программной среде Matlab Simulink.

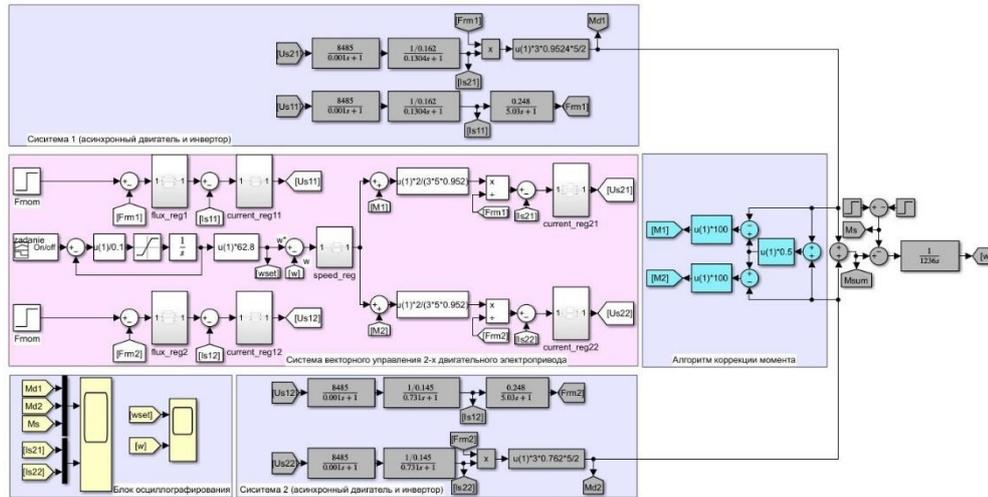


Рисунок 4.19 – Имитационная модель двухдвигательного электропривода шаровой мельницы (составлено автором)

Имитационная модель состоит из пяти основных блоков:

1. Система 1: асинхронный двигатель и инвертор в составе двухдвигательного электропривода.
2. Система 2: асинхронный двигатель и инвертор в составе двухдвигательного электропривода.
3. Система векторного управления двухдвигательным электроприводом.
4. Алгоритм коррекции момента.
5. Блок осциллографирования.

В данной имитационной модели инверторы и асинхронные двигатели представляют собой апериодические звенья первого порядка. Система векторного управления состоит из двух каналов: электромагнитного и электромеханического каналов регулирования. Управление осуществляется потоко- и моментобразующим токами [28].

4.4.1 Моделирование двухдвигательного электропривода без корректирующих алгоритмов

Результаты имитационного моделирования двухдвигательного электропривода без корректирующих алгоритмов представлены на рисунке 4.20.

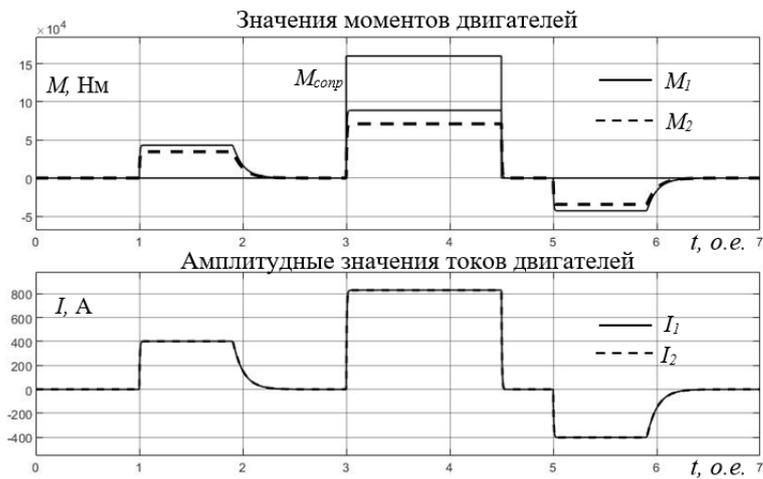


Рисунок 4.20 – Результаты моделирования двухдвигательного электропривода без корректирующих алгоритмов в составе СВУ (составлено автором)

Изменение индуктивности цепи намагничивания второго двигателя приводит к неравномерному распределению нагрузки между приводными машинами в составе двухдвигательного электропривода. Номинальные значения моментов двигателей составляют 82654 Н·м. Снижение индуктивности цепи намагничивания второго двигателя не позволяет сформировать номинальный электромагнитный момент второго двигателя (M_2). Требуемый суммарный электромагнитный момент двухдвигательного электропривода достигается за счет первого двигателя, момент (M_1) которого увеличивается относительно номинального и составляет 89000 Н·м. Это не соответствует рекомендуемым эксплуатационным характеристикам двигателя. Главным образом, ухудшаются его энергетические характеристики. КПД и коэффициент мощности асинхронных двигателей имеют нелинейные зависимости от коэффициента загрузки, отличие электромагнитного момента от номинального приведет к снижению данных характеристик [129]. К тому же, ресурсы обоих двигателей и механических соединений будут расходоваться неравномерно. Амплитудные значения токов составляют 830 А, так как система управления настроена на номинальные параметры двигателей.

4.4.2 Моделирование двухдвигательного электропривода с корректировкой задания на момент

Результаты имитационного моделирования двухдвигательного электропривода с корректирующим алгоритмом задания на момент представлены на рисунке 4.21. Применение алгоритма коррекции момента (формулы 4.23 – 4.25) обеспечивает выравнивание электромагнитных моментов в системе двухдвигательного электропривода: $M_1 = M_2 = 80000$ Н·м. Корректировка осуществляется за счет добавочных значений моментов. В связи с этим, задания на моментобразующий ток будут неодинаковы, поэтому значения амплитуд токов не равны и составляют: для первого двигателя (I_1) 750 А, а для второго (I_2) – 930 А. Эксплуатация второго

двигателя с током выше номинального приводит к росту энергозатрат, сокращению ресурса двигателя и дисбалансу в распределении нагрузки между приводными машинами.

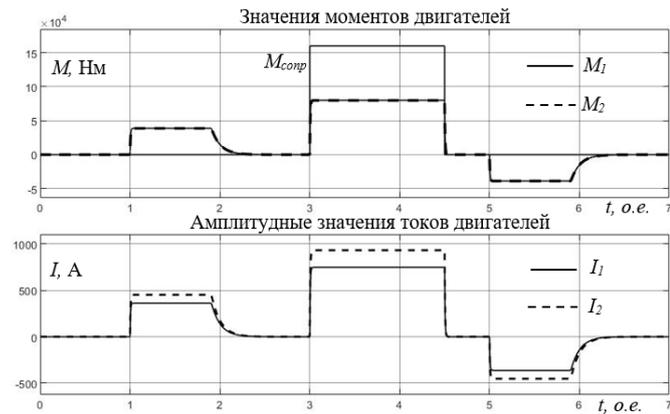


Рисунок 4.21 – Результаты моделирования двухдвигательного электропривода с корректирующим алгоритмом задания на момент в составе СВУ (составлено автором)

4.4.3 Моделирование двухдвигательного электропривода с корректировкой задания на момент и на потокосцепление

Результаты имитационного моделирования двухдвигательного электропривода с корректирующими алгоритмами задания на момент и на потокосцепление представлены на рисунке 4.22.

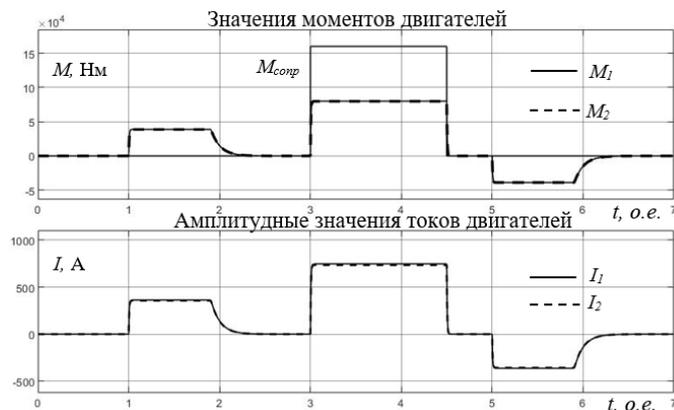


Рисунок 4.22 – Результаты моделирования двухдвигательного электропривода с корректирующим алгоритмом задания на момент и на потокосцепление в составе СВУ (составлено автором)

Применение корректирующего алгоритма задания на потокосцепление в составе СВУ позволяет обеспечить выравнивание амплитудных токов приводных машин (формула 4.26). Корректировка реализуется путем установки задания потокосцепления второго двигателя на уровне 19 Вб. Выравнивание амплитудных токов осуществляется за счет добавочных значений потокосцепления и, соответственно, за счет значений потокообразующих токов. Амплитудные значения токов становятся одинаковыми. Значения электрических моментов двигателей равны и составляют 80000 Н·м. Значения амплитудных равны и составляют 750 А.

На практике задание потокосцепления ротора выше номинального может привести к насыщению сердечника, перегреву обмоток, потере устойчивости векторного управления и, как следствие, к динамическим проблемам работы электропривода, снижению энергоэффективности электропривода [89, 95].

Для успешной интеграции корректирующих алгоритмов с СВУ необходимо выполнить комплекс исследований и предусмотреть ряд дополнительных мер. Среди дополнительных мер можно выделить:

1. Тепловой контроль обмоток.
2. Автоматическая коррекция потокосцепления ротора при насыщении сердечника.
3. Ограничение времени работы электродвигателя при завышенном потокосцеплении ротора.

4.5 Выводы по главе 4

1. Предложена структура электропривода шаровой мельницы на основе комплектного электропривода. Основными компонентами комплектного электропривода являются преобразователь частоты и интеллектуальная система управления измельчением. В предлагаемой структуре автоматизированного электропривода шаровой мельницы преобразователь частоты обеспечивает не только энергетическую эффективность работы электропривода, но и технологическую за счет реализации разработанного алгоритма вычисления оптимальной частоты вращения электродвигателя шаровой мельницы. Вычисление оптимальной частоты вращения осуществляется на основе интеллектуальной системы управления измельчением, реализация которой осуществляется на серверном оборудовании за счет развертывания соответствующего программного обеспечения.

2. Обоснован выбор каскадного преобразователя частоты в составе автоматизированного электропривода шаровой мельницы. Каскадный преобразователь частоты позволяет обеспечить широкий диапазон регулирования частоты вращения в диапазоне 1:100 с высокой точностью регулирования до $\pm 0,5\%$ и с поддержанием полного момента на низких скоростях, что необходимо для реализации разработанного алгоритма вычисления оптимальной частоты вращения при безредукторной механической структуре электропривода. Регулирование электромеханических характеристик в требуемом диапазоне осуществляется с помощью векторной системы управления. Дополнительными преимуществами каскадного преобразователя являются: обеспечение высоких требований по электромагнитной и электромеханической совместимости, а также возможность отсутствия сетевых фильтров и моторных дросселей. Количество уровней выходного линейного напряжения каскадного преобразователя частоты для электродвигателя напряжением 6 кВ соответствует одиннадцати,

что обусловлено технической и экономической эффективностью применения IGBT ключей при построении инвертора на их основе.

3. Предложена интеллектуальная система управления измельчением на основе:
 - системы мониторинга параметров процесса измельчения;
 - программно-управляемого датчика;
 - алгоритма вычисления оптимальной частоты вращения барабана мельницы.

В состав системы мониторинга параметров предлагается включить разработанный алгоритм мониторинга износа футеровки барабана на основе спектра тока приводного двигателя шаровой мельницы.

Программно-управляемый датчик представляет собой гранулометр, который осуществляет вычисление гранулометрической характеристики продукта измельчения на сливе мельницы. Работа программно-управляемый датчика основана на разработанной динамической модели процесса измельчения.

4. Предложен состав оборудования, на основе которого предлагается реализовать разработанные технические решения в составе автоматизированного электропривода шаровой мельницы. Предложена схема взаимосвязи автоматизированного электропривода шаровой и АСУ ТП предприятия для технической реализации проекта.

Выполнено имитационное моделирование автоматизированного электропривода шаровой мельницы с каскадным инвертором напряжения в программной среде Matlab Simulink. По результатам моделирования зафиксированы две группы спектральных составляющих в спектре тока статора: гармоники, зависящие от степени износа футеровки барабана, и пакеты гармонических составляющих, обусловленные режимом работы инвертора.

Результаты исследований подтвердили, что гармонические составляющие, создаваемые каскадным преобразователем частоты, не влияют на мониторинг износа футеровки, поскольку они формируются вне зоны отслеживаемых частот.

5. Предложены корректирующие алгоритмы в составе векторной системы управления для обеспечения требуемых электромеханических характеристик двухдвигательного электропривода при изменении индуктивности цепи намагничивания. Корректирующие алгоритмы позволяют обеспечить равномерное распределение электромагнитных моментов между приводными машинами и снижение амплитудных значений потребляемых токов.

ГЛАВА 5 ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ШАРОВОЙ МЕЛЬНИЦЫ

В данной главе приведен расчет технико-экономических эффектов от применения автоматизированного электропривода шаровой мельницы. Представлен расчет технологического эффекта на основе данных изменения качества концентрата в течение года с учетом режима работы железорудного комбината по производству концентрата. Оценка энергетической эффективности выполнена с учетом минимального и максимального эффектов, которых можно достичь при внедрении автоматизированного электропривода шаровой мельницы. Приведены расчеты показателей экономической эффективности при реализации предлагаемых технических решений.

5.1 Рынок железорудного концентрата

Среди лидеров отечественных производителей железорудного сырья можно выделить ООО УК «Металлоинвест», ПАО «НЛМК», ПАО «Северсталь», ООО «ЕВРАЗ» [43, 49]. Более 80% отечественного рынка железорудного сырья приходится на данные горно-металлургические холдинги (рисунок 5.1).

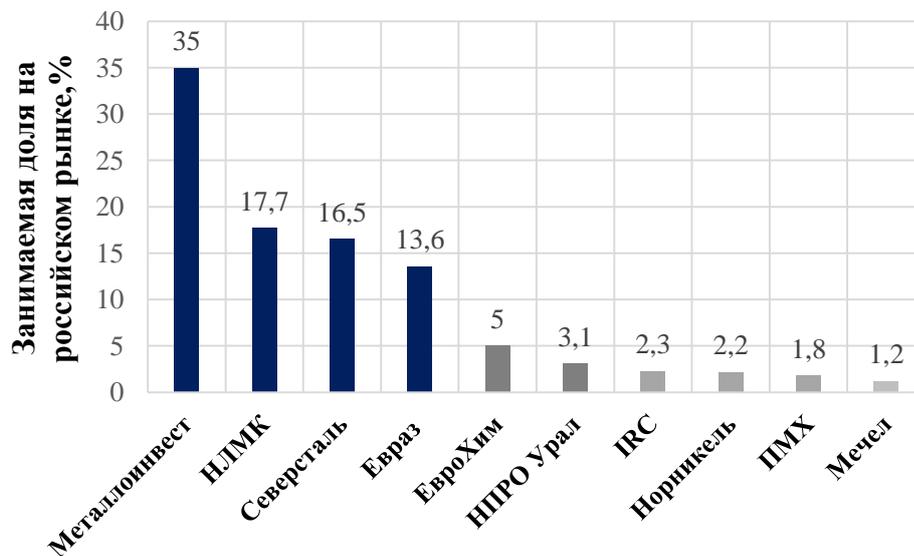


Рисунок 5.1 – Лидеры по производству отечественного железорудного сырья по итогам 2021 г. [49]

Основным видом железорудной продукции является железорудный концентрат (ЖРК). Большая часть экспортных потоков российского ЖРК (около 80%) поступает в Китай. Вторым по величине экспортным направлением ЖРК является Германия, далее следуют Турция и Словакия [62].

Цена на поставку ЖРК определяется его качеством. Качество определяется [44, 46, 56, 60]:
 – содержанием железа;

- примесями, как правило, в виде кремнезема, серы и фосфора;
- влажностью;
- гранулометрией.

Основным фактором, оказывающим влияние на формирование стоимости ЖРК, является содержание железа [44]. Ориентировочный ценовой диапазон на ЖРК в зависимости от содержания железа указан в таблице 5.1 [45, 47, 58].

Таблица 5.1 – Цены на ЖРК по сортам (2023-2024 гг.) (составлено автором на основе [45, 47, 58])

Содержание Fe, %	Ценовой диапазон, USD/т
69-72 (премиум)	145-160
65-68 (стандарт)	115-135
60-64	90-120

Горно-обогатительное предприятие осуществляет поставку железорудной продукции согласно договорным обязательствам, где ключевым является качество производимой продукции. Главным образом, качество регламентируется содержанием полезного компонента в концентрате. Как правило, допустимое отклонение при производстве концентрата составляет $\pm 0,2\%$ в абсолютном эквиваленте относительно заданной уставки. Если качество производимого продукта не удовлетворяет уставке, ЖРК признается бракованным и не подлежит продаже. Для того, чтобы реализовать бракованный концентрат требуется разбавить концентрат низкого качества концентратом высокого качества. Реализация бракованного концентрата требует дополнительных денежных затрат.

В случае превышения уставки по качеству производитель теряет в количестве производимой продукции, при этом за превышение качества покупатель в праве не доплачивать в зависимости от условий договора. Влияние содержания полезного компонента в концентрате на выход концентрата отражено в формуле 5.1.

$$\gamma_k = \frac{\alpha - \theta}{\beta - \theta}, \quad (5.1)$$

где γ_k – выход концентрата;

α – содержание железа в исходной руде;

β – содержание железа в концентрате;

θ – содержание железа в хвостах.

Соответственно, при переработке одной и той же руды с фиксированным содержанием железа в хвостах можно более эффективно или менее эффективно производить продукцию, с точки зрения количества производимого концентрата.

5.2 Расчет технологического эффекта от применения автоматизированного электропривода шаровой мельницы

Производство железорудной продукции предполагает регулярный контроль качества. Контроль осуществляется посредством химических анализов, осуществляемых лабораторией комбината. Частота опробований, как правило, составляет один раз в три часа. Результаты лаборатории являются эталонными, относительно которых принимается стратегия управления производственными процессами горно-обогатительного комбината. На рисунке 5.2 представлено изменение качества концентрата на железорудном горно-обогатительном комбинате в течение года по результатам опробований согласно экспериментальным данным.

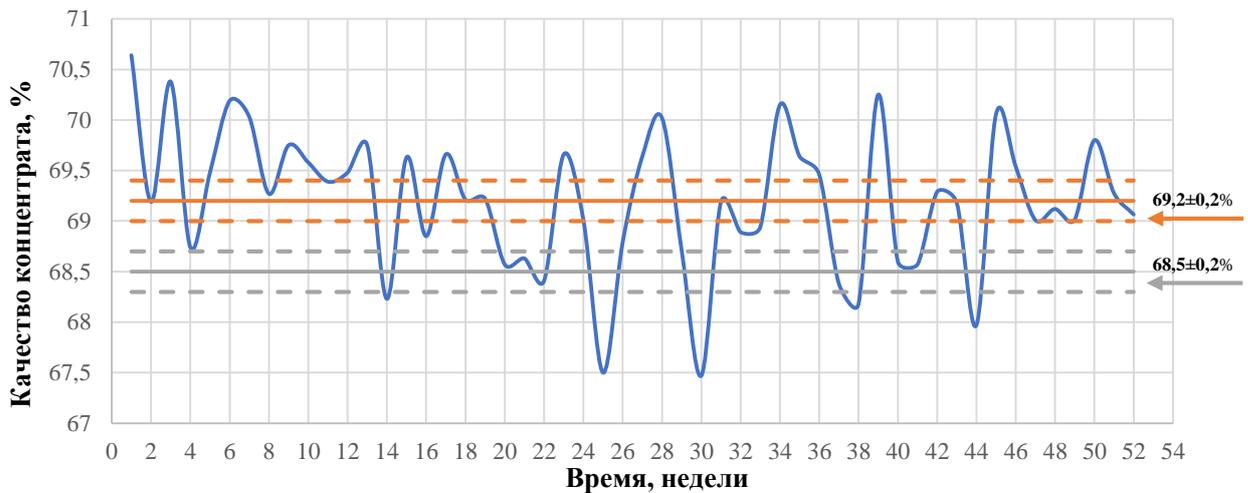


Рисунок 5.2 – Изменение качества концентрата с течением времени (составлено автором)

Предприятие производит два вида концентрата с уставками по качеству 69,2% и 68,5%. При некорректно выбранной стратегии управления технологическим процессом производимая продукция бракуется (качество ниже уставки) или производится с завышенным качеством (качество выше уставки).

Согласно рисунку 5.2 можно выделить три режима производства концентрата:

1. Производство концентрата согласно уставке:
 - $69,0\% \leq x \leq 69,4\%$;
 - $68,3\% \leq x \leq 68,7\%$.
2. Производство концентрата с завышенным качеством:
 - $x > 69,4\%$;
 - $x > 68,7\%$.
3. Производство концентрата с заниженным качеством:
 - $x < 68,7\%$.

Результаты анализа работы железорудного предприятия по выделенным режимам производства концентрата за год приведены в таблице 5.2 для уставки 68,5% и в таблице 5.3 для уставки 69,2%.

Таблица 5.2 – Производство концентрата при уставке 68,5% (составлено автором)

Количество недель (N)	Среднее качество концентрата (β_{cp}), %	Средний выход концентрата (γ_{kcp}), %	Количество переработанной сухой руды (Q_p), т	Выпуск концентрата (Q_k), т
68,3% ≤ x ≤ 68,7%				
6	68,53	30,58	340 254,43	107 285,04
x > 68,7%				
6	68,82	30,45	340 254,43	106 817,51
x < 68,3%				
5	67,87	30,89	283 545,36	90 290,77

Таблица 5.3 – Производство концентрата при уставке 69,2% (составлено автором)

Количество недель (N)	Среднее качество концентрата (β_{cp}), %	Средний выход концентрата (γ_{kcp}), %	Количество переработанной сухой руды (Q_p), т	Выпуск концентрата (Q_k), т
69,0% ≤ x ≤ 69,4%				
14	69,17	30,29	793 927,01	247 936,37
x > 69,4%				
21	69,85	29,99	1 190 890,51	357 202,96

Расчет количества перерабатываемой сухой руды осуществляется по неделям согласно формуле 5.2.

$$Q_c = 7 \cdot 24 \cdot Q_{\text{ч}} \cdot k_{\text{и}} \cdot \left(1 - \frac{W_p}{100}\right), \quad (5.2)$$

где Q_c – количество перерабатываемой сухой руды, т;

$Q_{\text{ч}}$ – номинальная производительность секции (принимается 360 т/ч), т/ч;

$k_{\text{и}}$ – коэффициент использования секции (принимается 0,95);

W_p – влажность сухой руды (принимается 1,3%), %.

Количество сухого концентрата рассчитывается по неделям в соответствии с выходом концентрата и количеством перерабатываемой сухой руды по формуле 5.3.

$$Q_{\text{ск}} = \gamma_k \cdot Q_c, \quad (5.3)$$

где $Q_{\text{ск}}$ – количество сухого концентрата, т.

При расчете выхода концентрата (γ_k) содержание железа в исходной руде (α) и содержание железа в хвостах (θ) принимаются постоянными: $\alpha = 22\%$ и $\theta = 1,5\%$.

Расчет выпуска концентрата осуществляется с учетом влажности концентрата по формуле 5.4.

$$Q_k = \frac{\sum Q_{\text{ск}}}{1 - \frac{W_k}{100}}, \quad (5.4)$$

где Q_k – выпуск концентрата, т;

W_k – влажность концентрата (принимается 3%).

Исходя из анализа производства концентрата качеством 68,5% (таблица 5.2), из перерабатываемой сухой руды количеством 283 545,36 т производится бракованная продукция. При этом из 340 254,43 т также получается неэффективное количество концентрата.

Для того, чтобы реализовать концентрат из данной руды потребуется выполнить смешивание бракованного концентрата с концентратом более высокого качества. Затраты на доведение концентрата до кондиции составят 2 065 237 руб. в год.

С учетом уравнения материального баланса, требуемое количество завышенного качества концентрата для доведения до кондиции бракованного концентрата составит (5.5):

$$M_2 = \frac{M_1(C_c - C_1)}{C_2 - C_c}, \quad (5.5)$$

где M_2 – количество завышенного качества концентрата, т;

M_1 – количество бракованного концентрата, т;

C_c – качество концентрата смеси (соответствует среднему значению качества концентрата 68,53%), %;

C_1 – качество концентрата при браке (соответствует среднему значению качества концентрата при браке 67,87%), %;

C_2 – завышенное качество концентрата (соответствует среднему значению качества концентрата 69,85%), %.

По результатам расчета M_2 соответствует 43 554,15 т.

При производстве концентрата с уставкой 69,2% осуществляется неэффективная реализация концентрата из переработки сухой руды количеством 1 190 890,51 т (таблица 5.3). С учетом M_2 , которое необходимо для компенсации бракованной продукции, количество неэффективно перерабатываемой руды составляет 1 045 683,9 т.

Оценка эффекта от реализации автоматизированного электропривода шаровой мельницы выполняется, исходя из условия поддержания качества концентрата на уровне уставки независимо от руды при обеспечении требуемого количества готового класса в сливе мельницы. Эффект рассчитывается, исходя из сравнения количества концентрата, которое можно реализовать из перерабатываемой руды при производстве согласно уставке и при производстве с завышенным качеством:

- 1 045 683,9 т сухой руды для уставки $69,0\% \leq x \leq 69,4\%$ и для уставки $x > 69,4\%$;
- 340 254,4 т сухой руды для уставки $68,3\% \leq x \leq 68,7\%$ и для уставки $x > 68,7\%$.

Оценивается переотдача количества концентрата, которая возникает из-за выпуска концентрата с превышением уставки по качеству. В таблице 5.4 приведены результаты оценки эффекта.

Таблица 5.4 – Результаты расчета эффекта (составлено автором)

Выпуск концентрата, т $69,0\% \leq x \leq 69,4\%$	Выпуск концентрата, т $x > 69,4\%$	Переотдача, т	Эффект, руб.
326 557,82	323 349,29	3 208,53	38 382 062
Выпуск концентрата, т $68,3\% \leq x \leq 68,7\%$	Выпуск концентрата, т $x > 68,7\%$	Переотдача, т	Эффект, руб.
1 072,85	1 068,18	4,67	52 072
Общий эффект			38 434 134

Эффект рассчитывается, исходя из нереализованного количества концентрата, возникающего при его переотдаче (формула 5.6).

$$\mathcal{E} = (Q_{к1} - Q_{к2})C_{USD}K, \text{ где} \quad (5.6)$$

где \mathcal{E} – экономический эффект от применения АЭП шаровой мельницы, руб.;

$Q_{к1}$ – выпуск концентрата при уставке, т;

$Q_{к2}$ – выпуск концентрата при завышенном качестве, т;

C_{USD} – стоимость за 1 т концентрата (для 69,2% принято 145 \$, для 68,5% принято 135 \$), долл.;

K – курс рубля к доллару (принято 82,5 руб.), руб.

По результатам расчета полученный экономический эффект от внедрения автоматизированного электропривода шаровой мельницы с интегрированным контролем параметров процесса измельчения составляет 38 434 134 руб.

5.3 Расчет энергоэффективности от применения автоматизированного электропривода шаровой мельницы

На основе разработанного алгоритма (глава 3) определены оптимальные диапазоны частоты вращения, в которых необходимо осуществлять управление электроприводом шаровой мельницы для каждого из трех выделенных кластеров руды для энергоэффективного измельчения руды (таблица 3.7).

Мощность, потребляемая электродвигателем шаровой мельницей, изменяется в зависимости от скоростного режима в соответствии с формулой (5.7) [90].

$$P = \frac{\varphi \left(1 - \frac{0,1}{2,9 - 10\varphi}\right)}{\varphi_{ном}} P_{ном}, \quad (5.7)$$

где P – потребляемая мощность электродвигателя, кВт;

φ – скорость мельницы от критической, доли;

$\varphi_{\text{ном}}$ – номинальная скорость мельницы от критической, доли;

$P_{\text{ном}}$ – номинальная потребляемая мощность электродвигателя (принята 2 100 кВт), кВт.

В качестве критерия энергетической эффективности использован удельный расход электроэнергии на тонну производимого концентрата.

Для оценки диапазона снижения удельных энергозатрат принято допущение, что при выпуске концентрата выше уставки, подача руды осуществляется из 2 и 3 кластеров, а при выпуске концентрата ниже уставки из 1 кластера. Таким образом, когда производимый концентрат соответствует уставке, корректировка скоростного режима не требуется, частота вращения принимается равной номинальной.

На основании таблиц 5.2 и 5.3 можно сделать следующие выводы:

- суммарное производство концентрата согласно уставке $Fe_{\text{уст}}$ осуществляется в течение 20 недель в году;
- суммарное производство концентрата выше уставки $Fe_{\text{уст}}$ (кластер 2 и 3) осуществляется в течение 27 недель в году;
- суммарное производство концентрата ниже уставки $Fe_{\text{уст}}$ (кластер 1) осуществляется в течение 5 недель в году.

Оценка удельных затрат электроэнергии выполнена до внедрения и после внедрения АЭП для шаровой мельницы МШЦ 4,5х6,0 по неделям согласно режимам производства концентрата с учетом коэффициента использования секции, равного 0,95. Оценка затрат до внедрения АЭП выполнена при номинальной скорости мельницы ($\varphi_{\text{ном}}$), равной 0,65. Удельные затраты электроэнергии после внедрения рассчитаны для сценариев с минимальным и максимальным эффектами. Для оценки минимального энергетического эффекта рассчитано потребление энергии при максимальных скоростях частоты вращения мельницы в установленных диапазонах для каждого кластера руды, для максимального эффекта – при минимальных скоростях. При расчете потребляемой энергии потери в электроприводе не учитываются.

На рисунке 5.3 представлены результаты расчета потребляемой энергии в соответствии с режимами производства концентрата по неделям до и после внедрения АЭП. За счет выбора оптимального режима электропривода количество потребляемой электроэнергии можно сократить до 31%.

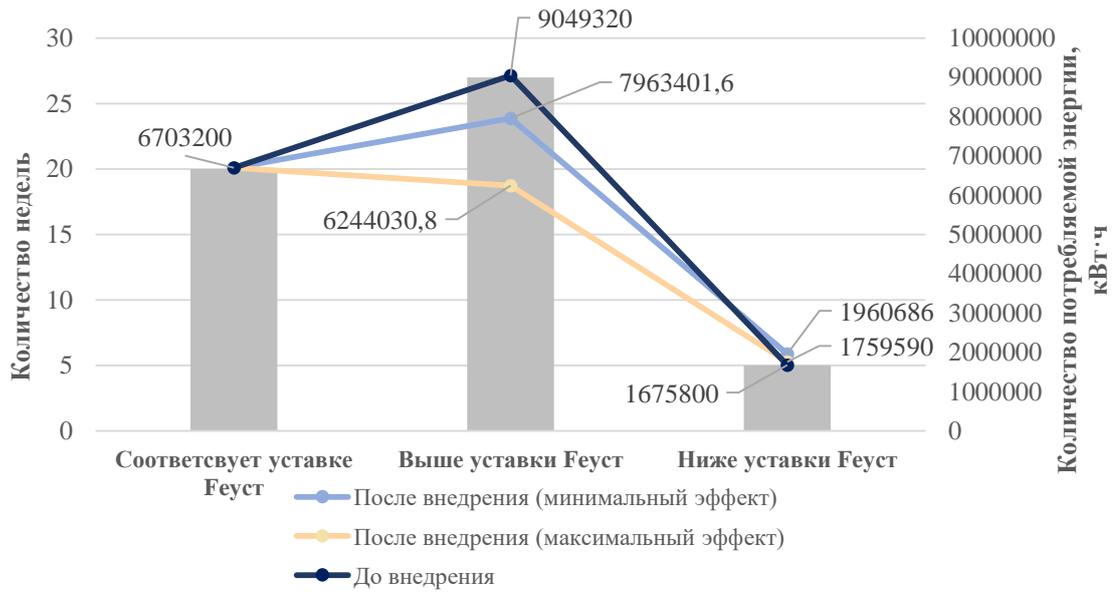


Рисунок 5.3 – Распределение количества потребляемой электроэнергии в соответствии режимами производства концентрата (составлено автором)

На рисунке 5.4 представлены результаты расчета показателей энергоэффективности до и после внедрения АЭП шаровой мельницы. До внедрения АЭП выпуск концентрата составляет 680 532,9 т при общем количестве потребляемой электроэнергии 17 428 320 кВт·ч. Удельные затраты электроэнергии составляют 25,6 кВт·ч/т.

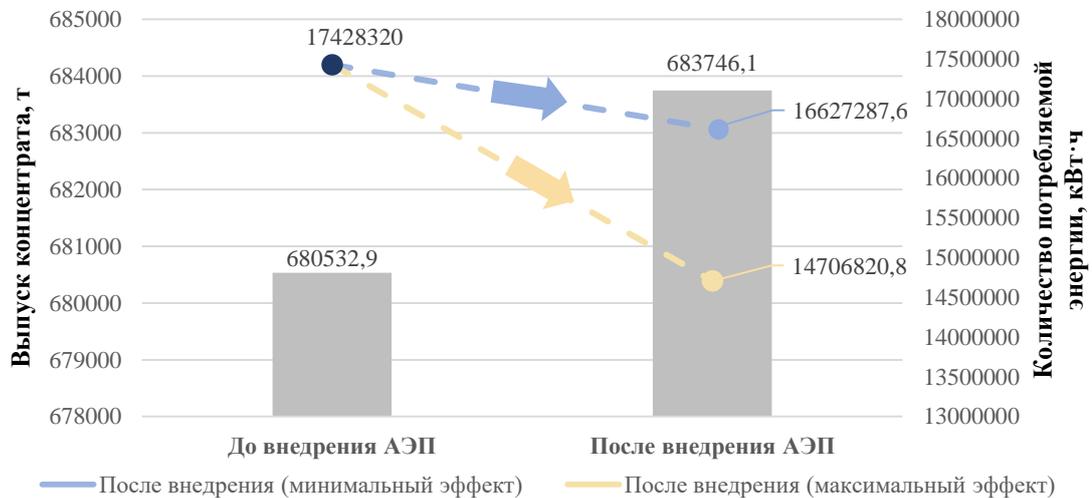


Рисунок 5.4 – Показатели энергоэффективности до и после внедрения АЭП шаровой мельницы (составлено автором)

После внедрения АЭП выпуск концентрата достигнет 683 746,1 т, при этом энергозатраты составят от 16 627 287,6 кВт·ч до 14 706 820,8 кВт·ч. Удельное энергопотребление будет находиться в диапазоне от 24,3 кВт·ч/т до 21,5 кВт·ч/т. Минимальный эффект – снижение удельных затрат электроэнергии на 5% от первоначальных затрат, максимальный эффект – снижение удельных затрат электроэнергии на 16% от первоначальных затрат.

Установленная мощность электропривода шаровой мельницы используется эффективнее, так как количество концентрата увеличивается при снижении энергозатрат. Результаты расчетов сведены в таблицу 5.5.

Таблица 5.5 – Результаты расчетов показателей энергоэффективности (составлено автором)

	До внедрения АЭП	После внедрения АЭП	
Общий выпуск концентрата, т	680 532,9	683 746,1	
		Минимальный эффект	Максимальный эффект
Общее количество потребляемой электроэнергии, кВт·ч	17 428 320	16 627 287,6	14 706 820,8
Удельные затраты электроэнергии, кВт·ч/т	25,6	24,3	21,5

5.4 Экономическое обоснование внедрения АЭП шаровой мельницы с интегрированной системой мониторинга параметров шаровой мельницы

С целью оценки целесообразности внедрения автоматизированного электропривода выполнена оценка показателей эффективности инвестиционного проекта.

Для расчета экономической эффективности выполнен расчет капитальных затрат на внедрение автоматизированного электропривода шаровой мельницы с интегрированным мониторингом параметров процесса измельчения. В состав капитальных затрат входят как затраты на оборудование, так и на выполняемые работы в рамках реализации проекта. В таблице 5.6 представлен перечень затрат на оборудование и выполняемые работы.

Таблица 5.6 – Капитальные затраты на внедрение АЭП с интегрированной системой мониторинга параметров процесса измельчения (составлено автором)

Наименование оборудования	Стоимость, руб.	Срок службы оборудования, лет
ВПЧ с 5 ячейками на фазу с комплектом ЗИП	12 377 521	25 лет
Блок-контейнер для размещения ВПЧ	9 950 344	
Датчики тока в составе с преобразователями (3 фазы)	150 000	10 лет
Шкаф управления в составе с ПЛК	1 567 990	
Серверное оборудование	500 000	5 лет
Выполняемые работы		-
Пусконаладочные работы	1 050 000	-
Шеф-монтажные работы	322 500	-
Программирование ПЛК и алгоритмов обработки данных	1 800 000	-

Продолжение таблицы 5.6

Разработка конструкторской и рабочей документации	2 400 000	-
Итого:	30 118 355	-

Общая стоимость разработки и внедрения автоматизированного электропривода с интегрированной системой мониторинга составляет 30 118 355 руб.

Оценку эффективности проекта принято производить по следующим ключевым показателям:

1. чистая приведенная стоимость;
2. индекс прибыльности;
3. срок окупаемости проекта;
4. внутренняя норма доходности.

Период расчета чистой приведенной стоимости (ЧПС) выбран 25 лет, исходя из срока службы высоковольтного преобразователя частоты. При расчете ЧПС капитальные затраты учитываются в себестоимости производства концентрата в виде амортизационных отчислений. Принята линейная амортизация, при которой стоимость основных средств равномерно распределяется в соответствии со сроком службы оборудования. Кроме этого, эксплуатационные расходы на производство концентрата включают в себя затраты на материалы, заработную плату и страховые взносы, прочие затраты, относимые на себестоимость продукции. По данным предприятия операционные затраты на производство концентрата составляют 26 622 000,7 руб.

Формирование денежных потоков для расчета основных показателей экономической оценки проекта основывается на рассчитанной чистой прибыли с учетом выше указанных объемов произведенного к реализации концентрата в рамках реализации проекта. Чистая прибыль рассчитывается с учетом:

1. Общего эффекта от внедрения АЭП с интегрированным мониторингом параметров процесса измельчения (выручка).
2. Операционных затрат на производство концентрата.
3. Уплачиваемых обязательных налогов.

Расчет ЧПС осуществляется по формуле 5.8.

$$\text{ЧПС} = \sum_{t=1}^T \text{ЧДП}_t \cdot \text{КД}_t - \text{К}_0, \quad (5.8)$$

где ЧДП_t – чистый денежный поток за период времени, руб. (T – период реализации проекта, 25 лет);

КД_t – коэффициент дисконтирования за период времени, доли;

К_0 – начальные инвестиции на момент запуска проекта (капитальные затраты).

При расчете ЧПС прогнозируемые денежные потоки приводятся к их стоимости на текущий момент времени за счет коэффициента дисконтирования. Коэффициент дисконтирования КД рассчитывается по формуле 5.9.

$$\text{КД} = \frac{1}{(1+r)^t}, \quad (5.9)$$

где r – годовая ставка дисконтирования, доли;

t – период, год.

Ставка дисконтирования принята 21% согласно аналогичным проектам компании.

По результатам расчетов ЧПС составляет 27 043 500,00 руб. Так как ЧПС > 0, проект считается прибыльным при этом чистая прибыль формируется на первом году и составляет 8 375 675,58 руб.

Расчет индекса прибыльности ИП осуществляется согласно формуле 5.10.

$$\text{ИП} = 1 + \frac{\text{ЧПС}}{K_0}. \quad (5.10)$$

По результатам расчетов ИП составляет 1,9. Так как ИП > 1, проект является прибыльным – доходы превышают затраты.

Расчет внутренней нормы доходности ВНД выполняется согласно формуле 5.11.

$$\sum_{t=1}^T \frac{\text{ЧДП}_t}{(1+\text{ВНД})^t} = 0, \quad (5.11)$$

где ВНД – внутренняя норма доходности, доли.

ВНД определяет ставку дисконтирования, при которой ЧПС равна нулю, то есть проект окупает вложенные средства, но не приносит дополнительной прибыли. Показатель определяет устойчивость проекта и целесообразность инвестиционных вложений на рассматриваемом периоде времени. Результаты расчета показывают, что ВНД составляет 37,1%, что свидетельствует об устойчивости проекта к неопределенностям и рискам.

Срок окупаемости проекта по внедрению в производство автоматизированного электропривода шаровой мельницы с интегрированным мониторингом параметров процесса измельчения составляет 4 года 9 месяцев, что можно увидеть на графике формирования накопленных дисконтированных денежных потоков на рисунке 5.5.

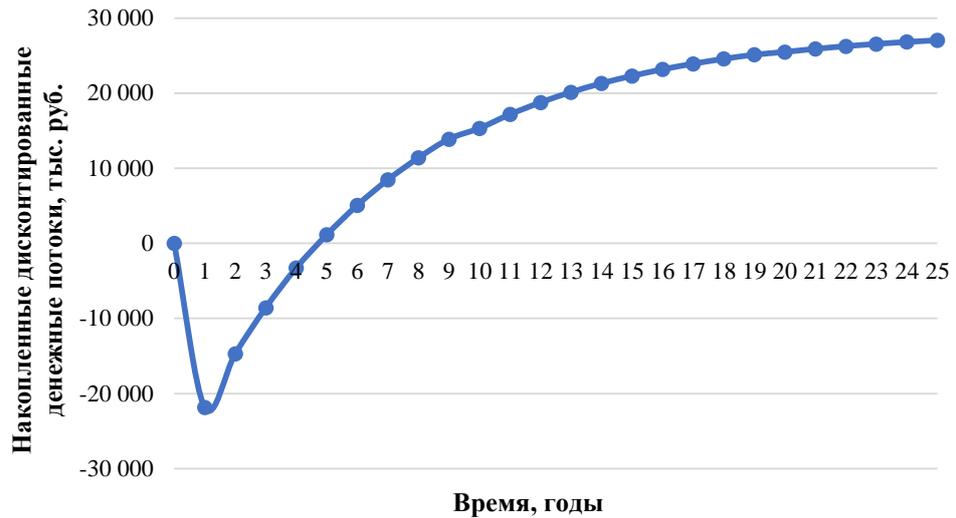


Рисунок 5.5 – Срок окупаемости АЭП с интегрированным мониторингом параметров процесса измельчения (составлено автором)

5.5 Выводы по главе 5

1. На протяжении более половины анализируемого периода времени работа железорудного комбината характеризуется неэффективным производством концентрата. Критерием низкой эффективности работы комбината является несоответствие производимой продукции заданной уставке. Режим работы комбината характеризуется переотдачей концентрата по содержанию железа и производством бракованной продукции.

2. Реализация АЭП в составе с каскадным преобразователем частоты и с ИСУИ обеспечивает поддержание заданной уставки по качеству производимого концентрата за счет оптимальной частоты вращения двигателя мельницы, обеспечивающей адаптацию к изменениям свойств руды.

3. Внедрение разработанных технических решений позволяет получить технологический и энергетический эффекты. Технологический эффект от использования АЭП с ИСУИ заключается в увеличении количества производимого концентрата по сравнению с нерегулируемым электроприводом. По результатам расчетов увеличение количества производимой продукции возможно на 3 213,2 т.

Оценка энергетического эффекта выполнена по критерию удельных затрат электроэнергии на тонну производимого концентрата. В случае применения АЭП управление процессом измельчения осуществляется в соответствии с кластером измельчаемой руды. По результатам расчетов предлагаемая концепция управления АЭП позволяет снизить количество потребляемой энергии, требуемой для измельчения руды, при одновременном увеличении количества производимой продукции. Установленная мощность электропривода шаровой мельницы используется эффективнее. Минимальный эффект заключается в снижении удельных

затрат электроэнергии на 5% от первоначальных затрат, максимальный эффект – в снижении удельных затрат электроэнергии на 16% от первоначальных затрат.

4. Приведены расчеты показателей экономической эффективности внедрения АЭП с ИСУИ. По результатам расчетов эффект от реализации большего количества концентрата составляет 38 434 134 руб. Чистая приведенная стоимость проекта составляет 27 млн руб. к концу периода расчета – 25 лет. Срок окупаемости проекта составляет 4 года 9 месяцев.

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 шаровой 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 ЛИТЕРАТУРЫ

1. Александрова, Т.Н., Чантурия, А.В., Кузнецов, В.В. Минералого-технологические особенности и закономерности селективного разрушения железистых кварцитов Михайловского месторождения //Записки Горного института. – 2022. – Т. 256. – С. 517-526. – DOI: 10.31897/PMI.2022.58.
2. Андреев, Е.Е. Дробление, измельчение и подготовка сырья к обогащению: Учебник / Е.Е. Андреев, О.Н. Тихонов. – Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский государственный горный институт, 2007. – 439 с. – ISBN 978-5-94211-308-7.
3. Анисимова, А.Б. Глубокая и комплексная переработка минерального сырья: определение и экономический смысл //Вестник евразийской науки. – 2019. – Т. 11. – №. 6. – С. 4.
4. Анучин, А.С. Системы управления электроприводов: учебник для вузов / А.С. Анучин. – Москва : Издательский дом МЭИ, 2015. – 373 с. – ISBN 978-5-383-00918-5.
5. Васильев, Б.Ю. Автоматизированный электропривод машин и установок горного производства. Том 1. Основы электропривода и преобразовательной техники / Б.Ю.Васильев. – 2-е изд., стер. – Санкт-Петербург : Лань, 2023. – 356 с. – ISBN 978-5-507-46905-5. – Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. – URL: Диссертация_Малькова Я.М._v2.docx (дата обращения: 22.06.2025).
6. Виноградов, А.Б. Векторное управление электроприводами переменного тока / А.Б. Виноградов. – Иваново : ИГЭУ им. В.И. Ленина, 2008. – 320 с. – ISBN 978-5-89482-579-3.
7. Виноградов, А.Б, Коротков, А.А. Алгоритмы управления высоковольтным многоуровневым преобразователем частоты / А.Б Виноградов, А.А. Коротков. – Иваново : ИГЭУ им. В.И. Ленина, 2018 – 184 с.
8. Виноградов, А.Б., Коротков, А.А. Управление многоуровневым преобразователем частоты энергоэффективного электропривода //Электротехника. – 2017. – №. 4. – С. 38-45.
9. Виноградов, А.Б. Новые серии преобразователей частоты и объектно-ориентированный комплектный электропривод на их основе / А.Б. Виноградов, А.Н. Сибирцев, В.Л. Чистосердов // Электротехника. – 2005. – № 5. – С. 47-54.
10. Виноградов, А.Б. Оптимизация КПД системы векторного управления асинхронным тяговым электроприводом с идентификатором параметров / А.Б. Виноградов, Д.Б. Изосимов, С.Н. Флоренцев, Н.А. Глебов // Электротехника. – 2010. – № 12. – С. 10-19.
11. Виноградов, А.Б. и др. Учет потерь и насыщения стали при оптимальном векторном управлении тяговым асинхронным электроприводом //Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2012. – №. 1. – С. 35-41.
12. Воронцов, А.Г. и др. Особенности управления каскадными преобразователями частоты //Записки Горного института. – 2020. – Т. 241. – С. 37-45. – DOI: 10.31897/PMI.2020.1.37.

13. ГОСТ Р ИСО 15746-1. Системы промышленной автоматизации и интеграция. Интеграция возможностей усовершенствованного управления технологическими процессами и оптимизации для производственных систем. Часть 1. Структура и функциональная модель : издание официальное : утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 5 декабря 2016 г. № 1935-ст. – М: Стандартинформ, 2017. – 27 с.

14. ГОСТ ИЕС 61800-9-2-2021. Системы силовых электроприводов с регулируемой скоростью. Системы силовых электроприводов с регулируемой скоростью. Часть 9-2. Энергоэффективность систем силовых электроприводов, пускателей электродвигателя, силовой электроники и электромеханических комплексов на их основе. Показатели энергоэффективности систем силовых электроприводов и пускателей электродвигателя : межгосударственный стандарт : издание официальное : принят Межгосударственным советом по стандартизации, метрологии и сертификации от 30 июня 2021 г. № 9 141-п : Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 3 августа 2021 г. № 676-ст межгосударственный стандарт ГОСТ ИЕС 61800-9-2-2021 введен в действие в качестве национального стандарта Российской Федерации с 1 января 2022 г. – М.: Российский институт стандартизации, 2021. – 90 с.

15. Гурман, М.А., Александрова, Т.Н. Исследование обогатимости бедных железных руд //Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2010. – Т. 4. – №. 12. – С. 289-297.

16. Еременко, Ю.И. и др. О возможности определения уровня загрузки шаровой мельницы в результате нейросетевого анализа спектра сигнала виброускорения ее цапфы //Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2016. – №. 1. – С. 38-47.

17. 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.

18. ИТС 25-2021. Добыча и обогащение железных руд. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям : справочник. – Москва : Бюро НДТ, 2021. – 287 с.

19. Калачёв, Ю.Н., Самохвалов Д.В., «Основы регулируемого электропривода (Антиучебник)», ДМК Пресс. – 254 с.

20. Карташев, Е. Алгоритмы управления многоуровневыми преобразователями напряжения / Е. Карташев, А. Колпаков // Силовая электроника. – 2009. – № 20. – С. 57-65.

21. Ключев, В.И. Теория электропривода / В.И. Ключев. – Москва : Энергоатомиздат, 2001. – 704 с.
22. Козярук, А.Е. Энергоэффективные электромеханические комплексы горнодобывающих и транспортных машин // Записки Горного института. – 2016. – Т. 218. – С. 261-269.
23. Колпаков, А. Схемотехника мощных высоковольтных преобразователей // Силовая электроника. – 2007. – №. 12. – С. 44-50.
24. 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.
25. Королев, Н.А. Совершенствование методики идентификация 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.
26. Коротков, А.А. Анализ энергоэффективности алгоритмов управления преобразователем высоковольтного частотно-регулируемого привода / А.А. Коротков, А.Б. Виноградов // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2013. – № 2. – С. 47-52.
27. **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.
28. **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.
29. **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.

30. Морозов, В.В. Разработка и применение автоматизированных систем управления процессами обогащения полезных ископаемых / В.В. Морозов, В.П. Топчаев, К.Я. Улитенко, З. Ганбаатар, Л. Дэлгэбат. – Москва : ИД «Руда и Металлы, 2013. – 512 с. – ISBN 978-5-98191-073-9.
31. Морозов, В.В. и др. Управление процессами рудоподготовки и обогащения на основе непрерывного анализа сортности руды / В.В. Морозов, В.М. Авдохин, З. Ганбаатар, Л. Дэлгэбат, К.Я. Улитенко //Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2012. – №. 1. – С. 569-583.
32. Олевский, В.А. Размольное оборудование обогатительных фабрик / В.А. Олевский. – Москва : Госгортехиздат, 1963. – 448 с.
33. Пелевин, А.Е. Технологии обогащения железных руд России и пути повышения их эффективности //Записки Горного института. – 2022. – Т. 256. – С. 579-592. – DOI: 10.31897/PMI.2022.61.
34. Плащинский, В.А., Белоглазов, И.И., Ахмеров, Э.В. Анализ модели изнашивания рабочих элементов шаровой мельницы в процессе измельчения руды. – 2024. – №. 7 – С. 91-110. – DOI: 10.25018/0236_1493_2024_7_0_91.
35. Полещенко, Д.А. Опыт промышленной эксплуатации автоматизированной системы мониторинга уровня заполнения шаровой мельницы //Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2017. – №. 12. – С. 153-160.
36. Пронин, М.В. Электроприводы и системы с электрическими машинами и полупроводниковыми преобразователями (моделирование, расчет, применение) / М.В. Пронин, А.Г. Воронцов, П.Н. Калачиков, А.П. Емельянов. – Санкт-Петербург: Силовые машины, 2004. – 252 с.
37. Соколов, И.В., Кузяков, А.В. К проблеме контроля и управления загрузкой шаров в мельницу 1-й стадии измельчения // Цветные металлы. 2021. № 3. С. 1. - DOI: 10.17580/tsm.2021.03.01.
38. Соколов, И.В. и др. Опыт использования анализатора ВАЗМ-1М в системах контроля и управления трубными мельницами и измельчительными переделами мельница-гидроциклон //Цветные металлы. – 2023. – №. 4. – С. 71-76. – 10.17580/tsm.2023.04.09.
39. 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». – 15с.

40. Улитенко, К.Я. Оптимизация шаровой загрузки барабанных мельниц по потребляемой мощности //Обогащение руд. – 2008. – №. 5. – С. 42-44.
41. Улитенко, К.Я., Морозов, В.В. Повышение эффективности управления процессом рудоподготовки на основе применения многоуровневых динамических моделей //Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2011. – №. 3. – С. 231-238.
42. Ceecthefuture.org : Comminution Energy [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.ceecthefuture.org/resource-center/smart-facts> (дата обращения 01.05.2025).
43. Dprom.online : Добыча железной руды в России: запасы, месторождения, применение [Электронный ресурс]. – URL: <https://dprom.online/mining/dobicha-zhyelyeznoyi-rudi-v-rosseeeee/> (дата обращения 01.05.2025).
44. Fas.gov.ru : Аналитический отчет о состоянии конкуренции на рынке железорудного концентрата [Электронный ресурс]. – URL: <https://fas.gov.ru/documents/685904> (дата обращения 01.05.2025).
45. Fastmarkets.com : Metal Bulletin [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.fastmarkets.com/metal-bulletin-is-part-of-fastmarkets/> (дата обращения 01.05.2025).
46. Industrial.eurochemgroup.com : Железорудный концентрата ТУ 0712-002-00186759-2002 [Электронный ресурс]. – URL: <https://industrial.eurochemgroup.com/wp-content/uploads/2020/07/Железорудный-концентрат-ru.pdf> (дата обращения 01.05.2025).
47. Metaltorg.ru : Железная руда. Динамика цен [Электронный ресурс]. URL: https://www.metaltorg.ru/metal_catalog/metallurgicheskoye_syrye_i_polufabrikaty/zheleznaya_ruda/zheleznaya_ruda/ (дата обращения 01.05.2025).
48. Metso.com : Сенсорная система Millsense для мониторинга загрузки мельницы [Электронный ресурс]. – <https://www.metso.com/ru/portfolio/millsense/> (дата обращения 01.05.2025).
49. Nedradv.ru : Железные руды России [Электронный ресурс]. – URL: <https://nedradv.ru/nedradv/ru/ratings?rubric=b8ce6228fc2b2cdbdf8b61cdf5d9dd97> (дата обращения 01.05.2025).
50. New.abb.com : ABB medium voltage AC drives [Электронный ресурс]. – URL: <https://new.abb.com/drives/medium-voltage-ac-drives> (дата обращения 01.05.2025).
51. New.abb.com : Gearless mill drive (GMD) and digital services for Kinross Tasiast mine [Электронный ресурс]. – URL: <https://new.abb.com/mining/reference-stories/grinding-stories/gearless-mill-drive-with-integrated-digital-services-for-kinross-gold-mine> (дата обращения 01.05.2025).

52. New.abb.com : GMD system for Toromocho mine [Электронный ресурс]. – URL: <https://new.abb.com/mining/reference-stories/grinding-stories/gmd-system-toromocho-mine> (дата обращения 01.05.2025).
53. New.abb.com : Grinding [Электронный ресурс]. – URL: <https://new.abb.com/mining/grinding> (дата обращения 01.05.2025).
54. New.abb.com : Grinding circuit for Mount Milligan mine [Электронный ресурс]. – URL: <https://new.abb.com/mining/reference-stories/grinding-stories/mount-milligan-mine> (дата обращения 01.05.2025).
55. New.abb.com : Service partnership agreement for Sierra Gorda mine [Электронный ресурс]. – URL: <https://new.abb.com/mining/reference-stories/services-stories/service-partnership-agreement> (дата обращения 01.05.2025).
56. Products.metalloinvest.com : Концентрат железорудной с массовой долей железа от 65% до 69,5% [Электронный ресурс]. – URL: <https://products.metalloinvest.com/catalog/iron-ore-products/iron-ore-concentrates/28076/> (дата обращения 01.05.2025).
57. Rockwellautomation.com : Variable Frequency Drive (VFD) Allen-Bradley [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.rockwellautomation.com/en-us/products/hardware/vfd.html#tabid-tabs-aac8270403-item-7de108b343-tab> (дата обращения 01.05.2025).
58. Ru.tradingeconomics.com : Железная руда [Электронный ресурс]. – URL: <https://ru.tradingeconomics.com/commodity/iron-ore> (дата обращения 01.05.2025).
59. Search.abb.com : Ring-gearred mills operated with frequency converter (much more than just variable speed) [Электронный ресурс]. – URL: <https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=9AKK1074920730&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch> (дата обращения 01.05.2025).
60. Severstal.com : Железорудный концентрат [Электронный ресурс]. – URL: <https://severstal.com/rus/clients/products-catalog/zhelezorudnoe-syre/zhelezorudnyy-kontsentrat/> (дата обращения 01.05.2025).
61. Siemens.com : Press [Электронный ресурс]. – URL: <https://press.siemens.com/global/en> (дата обращения 01.05.2025).
62. Statista.com : Export value of iron ores and concentrates from Russia in 2023, by country of destination [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.statista.com/statistics/1317610/russia-iron-ores-export-destinations/> (дата обращения 01.05.2025).
63. Tmeic.com : Drives [Электронный ресурс]. – URL: <https://tmeic.com/product-category/drives/> (дата обращения 01.05.2025).

64. Tyazhmash.com : ТЯЖМАШ – официальный сайт группы компаний [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.tyazhmash.com/> (дата обращения 01.05.2025).
65. Yakov.partners : Цифровизация горно-металлургической отрасли России в 2024 году [Электронный ресурс]. – URL: https://yakov.partners/upload/iblock/67c/cjwhz656wjsfn0up1ze8ka8qg7uxppm8/20240423_Digital_mining.pdf (дата обращения 01.05.2025).
66. Aggarwal, R., Ranganathan, P. Common pitfalls in statistical analysis: The use of correlation techniques //Perspectives in clinical research. – 2016. – Т. 7. – №. 4. – P. 187-190. – DOI: 10.4103/2229-3485.192046.
67. Ahmed, M., Seraj, R., Islam, S. M. S. The k-means algorithm: A comprehensive survey and performance evaluation //Electronics. – 2020. – Т. 9. – №. 8. – P. 1295. – DOI: 10.3390/electronics9081295.
68. Archard, J. F. Contact and rubbing of flat surfaces //Journal of applied physics. – 1953. – Т. 24. – №. 8. – P. 981-988. – DOI:10.1063/1.1721448.
69. Austin, L.G., Brame, K. A comparison of the Bond method for sizing wet tumbling ball mills with a size—mass balance simulation model //Powder Technology. – 1983. – Т. 34. – №. 2. – P. 261-274. – DOI: 10.1016/0032-5910(83)87059-4.
70. Barrios, G.K. P. et al. Contact parameter estimation for DEM simulation of iron ore pellet handling //Powder Technology. – 2013. – Т. 248. – P. 84-93. – DOI: 10.1016/j.powtec.2013.01.063.
71. Bi, L. et al. A new reform of mining production and management modes under industry 4.0: cloud mining mode //Applied Sciences. – 2022. – Т. 12. – №. 6. – P. 2781. – DOI: 10.3390/app12062781.
72. Bian, X. et al. Effect of lifters and mill speed on particle behaviour, torque, and power consumption of a tumbling ball mill: Experimental study and DEM simulation //Minerals Engineering. – 2017. – Т. 105. – P. 22-35. – DOI: 10.1016/j.mineng.2015.10.013.
73. Boikov, A. et al. Universal approach for dem parameters calibration of bulk materials //Symmetry. – 2021. – Т. 13. – №. 6. – P. 1088. – DOI: 10.3390/sym13061088.
74. Bortnowski, P. et al. Energy efficiency analysis of copper ore ball mill drive systems //Energies. – 2021. – Т. 14. – №. 6. – P. 1786. – DOI:
75. Chen, T., Guestrin, C. Xgboost: A scalable tree boosting system //Proceedings of the 22nd acm sigkdd international conference on knowledge discovery and data mining. – 2016. – P. 785-794. – DOI: 10.1145/2939672.2939785.
76. Chicco, D., Warrens, M. J., Jurman, G. The coefficient of determination R-squared is more informative than SMAPE, MAE, MAPE, MSE and RMSE in regression analysis evaluation //Peerj computer science. – 2021. – Т. 7. – P. e623. – DOI: 10.7717/peerj-cs.623.

77. Cleary, P.W. Recent advances in DEM modelling of tumbling mills //Minerals Engineering. – 2001. – Т. 14. – №. 10. – С. 1295-1319. – DOI: 10.1016/S0892-6875(01)00145-5.
78. Clermont, B., de Haas, B. Optimization of mill performance by using online ball and pulp measurements [Электронный ресурс] // Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. – 2010. – Vol. 110, № 3. – P. 133-140. – URL: http://www.scielo.org.za/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2225-62532010000300006&lng=en&nrm=iso (дата обращения: 01.05.2025).
79. Eriksson, K.G., Schaeffer, L. Selection and design of mill liners //Advances in Comminution. – 2006. – Т. 331. – P. 331-376.
80. ESSS Rocky, Release 4.5.1, DEM Technical Manual [Electronic resource] / ESSS Rocky DEM, S.R.L. – 2021. (date of access: 23.04.2023).
81. Esteves, P.M. et al. Charge behavior analysis in ball mill by using estimated torque //IEEE Transactions on Industry Applications. – 2014. – Т. 51. – №. 3. – P. 2600-2606. – DOI: 10.1109/TIA.2014.2377372.
82. Fazel, S.S. et al. Design and comparison of 4-kV neutral-point-clamped, flying-capacitor, and series-connected H-bridge multilevel converters //IEEE Transactions on Industry Applications. – 2007. – Т. 43. – №. 4. – P. 1032-1040. – DOI:10.1109/tia.2007.900476.
83. Gao, F., Han, L. Implementing the Nelder-Mead simplex algorithm with adaptive parameters //Computational Optimization and Applications. – 2012. – Т. 51. – №. 1. – P. 259-277. – DOI: 10.1007/s10589-010-9329-3.
84. Góralczyk, M. et al. Increasing energy efficiency and productivity of the comminution process in tumbling mills by indirect measurements of internal dynamics—an overview //Energies. – 2020. – Т. 13. – №. 24. – P. 6735. – DOI: 10.3390/en13246735.
85. Green, J.H., Stroker, J.J. Ball mill drive motor choices //2000 IEEE-IAS/PCA Cement Industry Technical Conference. Conference Record (Cat. No. 00CH37047). – IEEE, 2000. – P. 39-54. – DOI: 10.1109/CITCON.2000.848509.
86. Greer, S.A. Selection criteria for SAG mill drive systems //IEEE transactions on industry applications. – 2002. – Т. 26. – №. 5. – P. 901-908. – DOI: 10.1109/28.60053.
87. Hava, A.M., Kerkman, R.J., Lipo, T.A. Carrier-based PWM-VSI overmodulation strategies: analysis, comparison, and design //IEEE Transactions on power Electronics. – 2002. – Т. 13. – №. 4. – P. 674-689. – DOI: 10.1109/63.704136.
88. Ja, N. A simplex method for function minimization //Computer journal. – 1965. – Т. 7. – P. 308-313.
89. Holtz, J. Sensorless control of induction motor drives //Proceedings of the IEEE. – 2002. – Т. 90. – №. 8. – P. 1359-1394. – DOI: 10.1109/JPROC.2002.800726.

90. King, R.P. Modeling and simulation of mineral processing systems / R. P. King. – Woburn : Butterworth-Heinemann, 2001. – 415 p. – ISBN 0-7506-4884-8.
91. Kivari, D.B., Chapman, J. Mill drive selection for semiautogenous grinding mills //Mining engineering. – 1992. – T. 44. – №. 1. – P. 58-62.
92. Krug, D. et al. Comparison of 2.3-kV medium-voltage multilevel converters for industrial medium-voltage drives //IEEE Transactions on industrial electronics. – 2007. – T. 54. – №. 6. – C. 2979-2992. – DOI: 10.1109/TIE.2007.906997.
93. Lagarias, J.C. et al. Convergence properties of the Nelder--Mead simplex method in low dimensions //SIAM Journal on optimization. – 1998. – T. 9. – №. 1. – P. 112-147. – DOI: 10.1137/S1052623496303470.
94. Le, T.T.H., Oktian, Y.E., Kim, H. XGBoost for imbalanced multiclass classification-based industrial internet of things intrusion detection systems //Sustainability. – 2022. – T. 14. – №. 14. – P. 8707. – DOI: 10.3390/su14148707.
95. Leonhard, W. Control of electrical drives / W. Leonhard. – Heidelberg : Springer Berlin, 2001. – 460 p. – ISBN: 978-3-540-41820-7.
96. Li, C. et al. The angle of repose and size segregation of iron ore granules: DEM analysis and experimental investigation //Powder Technology. – 2017. – T. 320. – P. 257-272. – DOI: 10.1016/j.powtec.2017.07.045.
97. Li, T. et al. Discrete element method simulations of the inter-particle contact parameters for the mono-sized iron ore particles //Materials. – 2017. – T. 10. – №. 5. – P. 520. – DOI: 10.3390/ma10050520.
98. Li, Z. et al. Interpolation of GNSS position time series using GBDT, XGBoost, and RF machine learning algorithms and models error analysis //Remote Sensing. – 2023. – T. 15. – №. 18. – P. 4374. – DOI: 10.3390/rs15184374.
99. Liberti, L. et al. Euclidean distance geometry and applications //SIAM review. – 2014. – T. 56. – №. 1. – P. 3-69. – DOI: 10.1137/120875909.
100. Lvov, V., Chitalov, L. Semi-autogenous wet grinding modeling with CFD-DEM //Minerals. – 2021. – T. 11. – №. 5. – P. 485. – DOI: 10.3390/min11050485.
101. **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.
102. **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.

103. Mecrow, B.C., Jack, A.G. Efficiency trends in electric machines and drives //Energy Policy. – 2008. – T. 36. – №. 12. – C. 4336-4341. – DOI: 10.1016/j.enpol.2008.09.042.

104. Mishra, B.K., Rajamani, R.K. The discrete element method for the simulation of ball mills //Applied Mathematical Modelling. – 1992. – T. 16. – №. 11. – P. 598-604. – DOI: 10.1016/0307-904X(92)90035-2.

105. Mohan, N. Electric machines and drives. – Hoboken : John Wiley & Sons, 2012. – 290 p.

106. Morrell, S., Man, Y.T. Using modelling and simulation for the design of full scale ball mill circuits //Minerals Engineering. – 1997. – T. 10. – №. 12. – P. 1311-1327. – DOI: 10.1016/S0892-6875(97)00123-4.

107. Mulenga, F.K., Chimwani, N. Introduction to the use of the attainable region method in determining the optimal residence time of a ball mill //International Journal of Mineral Processing. – 2013. – T. 125. – P. 39-50. – DOI: 10.1016/j.minpro.2013.09.007.

108. Mwangi, A. et al. Comminution modeling using mineralogical properties of iron ores //Minerals Engineering. – 2017. – T. 111. – P. 182-197. – DOI: 10.1016/j.mineng.2017.06.017. – DOI: 10.1109/MSP.2015.2398954.

109. Nikolaeva, N., Aleksandrova, T., Romashev, A. Effect of grinding on the fractional composition of polymineral laminated bituminous shales //Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review. – 2018. – T. 39. – №. 4. – P. 231-234. – DOI: 10.1080/08827508.2017.1415207.

110. Pedrayes, F. et al. Frequency domain characterization of torque in tumbling ball mills using DEM modelling: Application to filling level monitoring //Powder Technology. – 2018. – T. 323. – P. 433-444. – DOI: 10.1016/j.powtec.2017.10.026.

111. Pontt, J. et al. Current issues on high-power cycloconverter-fed gearless motor drives for grinding mills //2003 IEEE International Symposium on Industrial Electronics (Cat. No. 03TH8692). – IEEE, 2003. – T. 1. – P. 369-374. – DOI: 10.1109/ISIE.2003.1267276.

112. Rezaeizadeh, M. et al. A new predictive model of lifter bar wear in mills //Minerals Engineering. – 2010. – T. 23. – №. 15. – P. 1174-1181. – DOI: 10.1016/j.mineng.2010.07.016.

113. Rodríguez, J. et al. Multilevel voltage-source-converter topologies for industrial medium-voltage drives //IEEE Transactions on industrial electronics. – 2007. – T. 54. – №. 6. – P. 2930-2945. – DOI: 10.1109/TIE.2007.907044.

114. Rodriguez, J., Lai, J. S., Peng, F. Z. Multilevel inverters: a survey of topologies, controls, and applications //IEEE Transactions on industrial electronics. – 2002. – T. 49. – №. 4. – P. 724-738. – DOI: 10.1109/TIE.2002.801052.

115. Rufli, M., van de Vijfeijken, M. Driving value: Sophisticated ring-gear mill drives from ABB (Part 1) //ABB Review. – 2011. – №. 1. – P. 29-35.
116. Saeed Fazel S. Investigation and comparison of multi-level converters for medium voltage applications : Diss. – Berlin, Techn. Univ., Diss., 2007.
117. Sarkar, S., de Lima, G. H., Potapov, A. Predictive Optimization of SAG Mill Wear Using Rocky. – 2017.
118. Stemmler, H. High-power industrial drives //Proceedings of the IEEE. – 2002. – T. 82. – №. 8. – P. 1266-1286. – DOI: 10.1109/5.301688.
119. Stoica, P. et al. Spectral analysis of signals. – Upper Saddle River, NJ : Pearson Prentice Hall, 2005. – T. 452.
120. Suh, Y., Steinke, J.K., Steimer, P.K. Efficiency comparison of voltage-source and current-source drive systems for medium-voltage applications //IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2007. – T. 54. – №. 5. – P. 2521-2531. – DOI: 10.1109/TIE.2007.900352.
121. Suresh, L.P. et al. A brief review on multi level inverter topologies //2016 international conference on circuit, power and computing technologies (ICCPCT). – IEEE, 2016. – P. 1-6. – DOI: 10.1109/ICCPCT.2016.7530373.
122. Thornton, C., Cummins, S.J., Cleary, P.W. An investigation of the comparative behaviour of alternative contact force models during inelastic collisions //Powder technology. – 2013. – T. 233. – P. 30-46. – DOI: 10.1016/j.powtec.2012.08.012.
123. Van de Vijfeijken M. et al. Copper mountain: overview on the grinding mills and their dual pinion mill drives //SAG Conference, Vancouver BC– September. – 2012. – P. 1.
124. 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. DOI: 10.1109/EIConRus49466.2020.9039468.
125. Welch, P. The use of fast Fourier transform for the estimation of power spectra: A method based on time averaging over short, modified periodograms //IEEE Transactions on audio and electroacoustics. – 2003. – T. 15. – №. 2. – P. 70-73. – DOI: 10.1109/TAU.1967.1161901.
126. Whiten, W.J. A matrix theory of comminution machines //Chemical Engineering Science. – 1974. – T. 29. – №. 2. – P. 589-599. – DOI: 10.1016/0009-2509(74)80070-9.
127. Wu, B. et al. Current-source converter and cycloconverter topologies for industrial medium-voltage drives //IEEE transactions on industrial electronics. – 2008. – T. 55. – №. 7. – P. 2786-2797. – DOI: 10.1109/TIE.2008.924175.

128. Wu, B., Narimani, M. High-power converters and AC drives. – John Wiley & Sons, 2017.
Wu, B. High-power converters and AC drives / B. Wu, M. Narimani. – Hoboken : Wiley, 2017. – 466 c. – ISBN 978-1-119-15603-1.

129. 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. – T. 8. – №. 1. – P. 65-78. DOI: 10.17509/ijost.v8i1.51983.

130. 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. – PP. 686-700. DOI: 10.31897/PMI.2022.91.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Акт о внедрении результатов исследования



labengi.com

ООО «Лаборатория инжиниринга»
Россия, Санкт-Петербург, Афонская д.2
тел. офиса: (812) 244-29-04
эл. почта: info@labengi.com



АКТ

о внедрении результатов кандидатской диссертации
Мальковой Яны Михайловны

соискателя ученой степени кандидата технических наук по специальности
2.4.2. Электротехнические комплексные и системы

Комиссия в составе:

Председатель: генеральный директор ООО «Лаборатория инжиниринга» – Ануфриев О.С.;

Члены комиссии: секретарь Харченко Д.П., заместитель генерального директора Братчиков А.В., эксперт Парфенова П.В. составили настоящий акт о том, что результаты диссертации на тему: «Автоматизированный электропривод шаровой мельницы с интегрированным мониторингом параметров процесса измельчения» рассмотрены на заседании ООО «Лаборатория инжиниринга» от 14.04.2025 г. и утверждены в производственную деятельность при разработке технических решений на основе автоматизированных электроприводов шаровых мельниц, в виде:

- Методики мониторинга процесса измельчения по характеристикам приводного двигателя.

По результатам совместных разработок получено 0 патентов.

Использование указанных результатов позволит стабилизировать процесс измельчения в шаровых мельницах за счет мониторинга производственных параметров и повысить энергоэффективность процесса за счет выбора режима его работы.

Председатель комиссии:
генеральный директор
ООО «Лаборатория инжиниринга»

О.С. Ануфриев

Члены комиссии:
Секретарь

Д.П. Харченко

Заместитель генерального директора

А.В. Братчиков

Эксперт

П.В. Парфенова

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Патент на изобретение

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2806426

**СПОСОБ МОНИТОРИНГА ПРОЦЕССА
ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ В БАРАБАННЫХ МЕЛЬНИЦАХ**

Патентообладатель: *федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
"Санкт-Петербургский горный университет" (RU)*

Авторы: *Малькова Яна Михайловна (RU), Жуковский Юрий
Леонидович (RU), Королев Николай Александрович (RU)*

Заявка № **2023110519**

Приоритет изобретения **25 апреля 2023 г.**

Дата государственной регистрации
в Государственном реестре изобретений

Российской Федерации **31 октября 2023 г.**

Срок действия исключительного права
на изобретение истекает **25 апреля 2043 г.**



*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

Ю. С. Зубов