

Министерство образования и науки Украины  
Государственное высшее учебное заведение  
«Национальный горный университет»

Фарис Самир Расми Альхори

**УДК 621.926:534.16**

**МЕТОД АВТОМАТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ СТЕПЕНИ ЗАГРУЗКИ РУДОЙ  
БАРАБАННЫХ МЕЛЬНИЦ МАГНИТООБОГАТИТЕЛЬНЫХ ФАБРИК**

05.13.07 – Автоматизация процессов управления

Диссертация

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель  
доктор технических наук, профессор  
Алексеев М.А.

Днепропетровск

2015

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
РАЗДЕЛ 1. АНАЛИЗ МЕТОДОВ И СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ И РЕГУЛИРОВАНИЯ ЗАГРУЗКИ БАРАБАННЫХ МЕЛЬНИЦ РУДОЙ.....	14
1.1. Анализ технологических схем измельчения железных руд магнитообогатительных фабрик с позиций задач автоматического контроля и регулирования загрузки мельниц рудой.....	14
1.2. Технические требования к системам автоматического контроля загрузки рудой шаровых мельниц и мельниц мокрого самоизмельчения.....	22
1.3. Анализ известных методов и систем автоматического контроля и регулирования загрузки барабанных мельниц рудой.....	28
1.4. Обоснование научной гипотезы метода автоматического контроля степени загрузки барабанных мельниц рудой	51
1.5. Постановка целей и задач исследования.....	54
РАЗДЕЛ 2. ИССЛЕДОВАНИЕ СИГНАЛА АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ МАГНИТНОГО СЕПАРАТОРА КАК КРИТЕРИЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ОПТИМАЛЬНОЙ ЗАГРУЗКИ БАРАБАННЫХ МЕЛЬНИЦ РУДОЙ.....	55
2.1. Теоретические зависимости сигнала активной мощности приводного электродвигателя барабана магнитного сепаратора от его производительности по концентрату.....	55
2.2. Частотный информационный анализ сигнала активной мощности приводного электродвигателя магнитного сепаратора.....	64
2.3. Сравнительные экспериментальные исследования методов автоматического контроля производительности магнитных сепараторов по сигналам активной мощности приводного электродвигателя.....	72
Выводы.....	77

РАЗДЕЛ 3. РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ АВТОМАТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ СТЕПЕНИ ЗАГРУЗКИ БАРАБАННЫХ МЕЛЬНИЦ РУДОЙ.....	79
3.1. Моделирование влияния загрузки шаровой мельницы рудой на раскрытие железной руды.....	79
3.2. Автоматический контроль степени загрузки рудой мельниц мокрого самоизмельчения и шаровых мельниц первых стадий измельчения.....	91
3.3. Автоматический контроль степени загрузки рудой рудногалечной мельницы второй стадии измельчения.....	109
3.4. Автоматический контроль степени загрузки рудой шаровой мельницы второй стадии измельчения.....	120
Выводы.....	126
РАЗДЕЛ 4. ФУНКЦИОНАЛЬНО-АЛГОРИТМИЧЕСКИЕ СТРУКТУРЫ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ СТЕПЕНИ ЗАГРУЗКИ РУДОЙ БАРАБАННЫХ МЕЛЬНИЦ.....	129
4.1. Функциональная схема корреляционной системы автоматического контроля степени загрузки рудой шаровой мельницы.....	129
4.2. Функциональная схема корреляционной системы автоматического контроля степени загрузки рудой рудногалечной мельницы.....	133
4.3. Функционально-алгоритмическая структура системы автоматического контроля степени загрузки рудой шаровых мельниц секции обогащения магнитообогатительной фабрики.....	137
4.4. Функционально-алгоритмическая структура системы автоматического контроля степени загрузки рудой мельниц мокрого самоизмельчения и рудногалечных мельниц.....	140
4.5. Экспериментальные исследования в промышленных условиях системы автоматизированного контроля и управления степени загрузки рудой мельницы мокрого самоизмельчения.....	143
4.6. Техническая реализация систем автоматического контроля степени загрузки рудой барабанных мельниц магнитообогатительных фабрик.....	145

Выводы.....	148
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	149
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	151
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	170
Приложение А. Таблицы экспериментальных данных.....	170
Приложение Б. Справка о практическом использовании научных положений и результатов диссертационной работы.....	174

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность работы.** Украина обладает крупнейшими запасами железных руд. В Криворожском бассейне работают 5 горно-обогатительных комбинатов (ГОКов) по переработке железных руд в высококачественный железорудный концентрат. Это Ингулецкий ГОК, Южный ГОК, Северный ГОК, Центральный ГОК и Новокриворожский ГОК в составе Криворожского горно-металлургического комбината (КГМК). Каждый ГОК перерабатывает ежегодно около 30 млн. тонн руды и производит порядка 15 млн. тонн железорудного концентрата, который обеспечивает сырьем металлургический комплекс Украины и экспортируется за рубеж (в Италию, Финляндию, Чехию, Польшу, Румынию). Шаровые барабанные мельницы и мельницы мокрого самоизмельчения нашли широкое применение на обогатительных фабриках железных руд горно-обогатительных комбинатов. Это, например, шаровые мельницы типа МШР 4,5х5,0 с рабочим объемом  $70 \text{ м}^3$  и двигателем мощностью 2500 квт, мельницы мокрого самоизмельчения типа ММС 90х30А рабочим объемом  $160 \text{ м}^3$  и с мощностью двигателя 4000 квт. На обогатительных фабриках одного ГОКа работают до 100 – 120 таких барабанных мельниц.

Степень заполнения мельниц рудой в значительной мере определяет производительность обогатительных фабрик и качество железорудного концентрата. При измельчении руд с переменными физико-механическими свойствами оптимальная степень заполнения мельниц рудой, при которой обеспечивается наилучшее раскрытие руды, является величиной переменной. Например, при измельчении мелковкрапленных труднообогатимых руд степень заполнения мельниц должна быть меньше, чем при измельчении крупновкрапленных руд.

Запросам автоматизации процессов измельчения и обогащения руд посвящены работы многих ученых, таких как Алексеев М.А., Бунько В.А., Воронов В.А., Гейзенблазен Б.Е., Качан Ю.Г., Кочура Е.В., Марюта А.Н., Моркун В.С., Назаренко М.В., Новицкий И.В., Тихонов О.Н., Троп А.Е., Утеуш

Э.В., Хорольский В.П., А. Линч, Д. Гилберт и др. Однако проблема автоматического контроля оптимальной загрузки мельниц рудой осталась нерешенной.

Известны методы автоматического контроля загрузки шаровых барабанных мельниц рудой путем вейвлет-анализа звукометрического сигнала мельницы или сигнала активной мощности электродвигателя мельницы [5]. Эти методы позволяют надежно определить момент перегрузки мельницы рудой, но не позволяют определить оптимальную степень заполнения мельницы рудой, которая обеспечит наилучшие показатели обогащения руд. Предложены методы автоматической оптимизации загрузки барабанных мельниц по спектральной составляющей сигнала активной мощности приводного электродвигателя мельницы [85]. Эти методы обеспечивают поддержание максимальной производительности мельницы по так называемому «готовому классу» крупности – 0,074 мм, что не всегда соответствует общей задаче оптимизации процесса обогащения руд с переменными физико-механическими свойствами. При этом не исключается переизмельчение руды и дополнительный непроизводительный расход электроэнергии. Известен радиоизотопный метод автоматического контроля и регулирования заполнения мельниц самоизмельчения рудой [28]. При этом заполнение мельницы рудой может поддерживаться от 37% до 50%. Однако остается неизвестным, какую степень заполнения необходимо поддерживать для измельчения и обогащения разных типов руд.

Анализ последних результатов исследований и публикаций по автоматической оптимизации степени заполнения барабанных мельниц рудой позволяет выделить нерешенную проблему, которая заключается в следующем. Существующие методы автоматического контроля и оптимизации позволяют поддерживать заданную степень заполнения мельницы рудой. Но они не позволяют автоматически определять какую именно оптимальную степень заполнения мельницы рудой необходимо поддерживать, чтобы обеспечить

наилучшие показатели измельчения и обогащения железных руд с переменными свойствами.

До настоящего времени отсутствуют методы и системы автоматического контроля оптимальной степени заполнения барабанных мельниц рудой, обеспечивающие измельчение и раскрытие руд с переменными физико-механическими свойствами. Решение этой задачи позволит существенно повысить технико-экономические показатели обогащения железных руд и качество железорудного концентрата на горно-обогатительных комбинатах Украины. Поэтому тема диссертации является актуальной.

**Связь с государственными программами, планами научно-исследовательских работ.** Работа выполнена в соответствии с государственной программой «Развитие и реформирование горно-металлургического комплекса Украины». В основу работы положены материалы, которые обобщают исследования автора в рамках реализации научно-исследовательских и инженеринговых работ, которые выполнялись в Национальном горном университете в соответствии с законом Украины № 2623-14 от 11.07.2001 «Про приоритетные направления развития науки и техники», Постановлениями Кабинета Министров Украины «О мероприятиях по развитию горно-металлургического комплекса», «О ходе выполнения Программы развития железорудной промышленности Украины», Государственной комплексной программой развития Украины, утвержденной Постановлением Кабинета Министров Украины.

Автор диссертации принимал участие в качестве исполнителя при выполнении госбюджетных научно-исследовательских работ «Разработка методов синтеза моделей полезных энергетических, акустических и вибрационных сигналов для идентификации процессов горного производства» (ДР № 0113U000402) и «Автоматизация процессов управления обогатительных фабрик полезных ископаемых» (ДР № 0112U000876). Результаты исследований по этим темам, полученные им лично, представлены в настоящей работе.

**Цель и задачи исследования.** Целью диссертации является повышение производительности технологических комплексов магнитного обогащения железных руд и качества железорудного концентрата на основе научного обоснования и разработки метода автоматического контроля оптимального заполнения рудой шаровых и бесшаровых барабанных мельниц при магнитном обогащении железных руд с переменными физико-механическими свойствами.

Сформулированная цель работы обусловила необходимость решения следующих задач:

- научное обоснование технических требований к системам автоматического контроля оптимальной степени загрузки рудой шаровых мельниц и мельниц мокрого самоизмельчения;
- обоснование информационных каналов для автоматического контроля оптимальной степени загрузки рудой барабанных мельниц;
- установление закономерностей совместного формирования сигналов активной мощности электродвигателей барабанных мельниц и магнитных сепараторов в технологических комплексах измельчения и магнитной сепарации;
- исследование закономерностей процесса раскрытия руды в шаровых и рудногалечных мельницах вторых стадий, последовательно соединённых с магнитным сепаратором, с позиций задач автоматического контроля загрузки мельниц рудой;
- разработка метода повышения точности автоматического контроля производительности пилотного магнитного сепаратора по магнитному продукту на основе спектрального преобразования сигнала активной мощности сепаратора;
- разработка метода автоматического контроля оптимальной степени загрузки рудой барабанных мельниц;
- разработка функционально-алгоритмических структур систем автоматического контроля оптимальной загрузки рудой шаровых мельниц с



решёткой и центральной разгрузкой, мельниц самоизмельчения и рудногалечных мельниц.

**Объект исследования:** технологические процессы измельчения руды в барабанных мельницах и магнитной сепарации.

**Предмет исследования:** методы и модели автоматического контроля загрузки рудой барабанных мельниц.

**Методы исследования:**

– анализ информации, отечественного и зарубежного опыта, систематизация известных методов и систем автоматического контроля загрузки барабанных мельниц рудой для обоснования актуальности, цели и задач исследования;

– теоретические методы исследования механики барабанных мельниц, раскрытия руды измельчением, магнитного обогащения руд для построения математических моделей технологических комплексов измельчения и магнитной сепарации;

– методы теории электропривода, теоретических основ электротехники, теории информации для обоснования информационных каналов получения сигналов об оптимальной загрузке барабанных мельниц рудой;

– методы теории эксперимента, математической статистики и спектрального анализа для экспериментального исследования статических характеристик зависимости спектральной составляющей сигнала активной мощности электродвигателя магнитного сепаратора от сигнала активной мощности приводного электродвигателя мельницы;

– методы автоматизации и алгоритмизации производственных процессов для разработки функционально-алгоритмических структур систем автоматического контроля оптимальной степени загрузки барабанных мельниц рудой.

**Научная новизна полученных результатов.** Получила дальнейшее развитие теория автоматизации барабанных мельниц, что позволило получить новые закономерности формирования сигналов, характеризующих

оптимальную загрузку мельницы рудой, которые сформулированы в виде следующих научных положений.

### **Научные положения:**

1. Критерием автоматической оптимизации степени загрузки барабанных мельниц железной рудой с переменными физико-механическими свойствами, в отличие от критерия максимальной производительности мельницы по заданному готовому классу крупности продукта измельчения, является максимальная производительность по магнитному продукту магнитного сепаратора последовательно соединённого с барабанной мельницей, что позволяет уменьшить переизмельчение руды, повысить извлечение, выход и качество железорудного концентрата.

2. В технологических комплексах измельчения и магнитной сепарации недогрузка или перегрузка барабанной мельницы рудой, в отличие от контроля загрузки по спектральной составляющей сигнала активной мощности приводного электродвигателя мельницы, определяется по знаку эмпирического коэффициента корреляции между выборочными значениями активной мощности электродвигателей мельницы и магнитного сепаратора, которые работают в одном технологическом комплексе магнитного обогащения железных руд, что позволяет автоматически контролировать загрузку мельниц рудой, улучшить раскрытие руд с переменными свойствами, повысить производительность технологических комплексов измельчения и магнитной сепарации, и качество железорудного концентрата.

### **Научные результаты и их новизна:**

1. Предложен новый метод автоматического контроля степени загрузки железной рудой барабанных мельниц по знаку эмпирического коэффициента корреляции между выборочными значениями активной мощности электродвигателей мельницы и магнитного сепаратора, причем для мельниц мокрого самоизмельчения, если этот знак положительный, то имеет место недогрузка мельницы рудой, а если этот знак отрицательный, то имеет место

перегрузка мельницы рудой. Для шаровых мельниц наоборот, положительный знак характеризует перегрузку мельницы рудой, а отрицательный знак – недогрузку мельницы рудой.

2. Научно обоснован метод автоматического контроля производительности по концентрату технологического комплекса измельчения и магнитной сепарации по спектральной составляющей сигнала активной мощности приводного электродвигателя магнитного сепаратора, измеренной на частоте пульсирующего поля магнитного сепаратора, что позволяет повысить точность автоматического контроля производительности по концентрату по сравнению с методом автоматического контроля по общему сигналу активной мощности приводного электродвигателя сепаратора.

3. Установлено, что в технологическом комплексе магнитного обогащения железных руд, состоящего из шаровой мельницы с центральной разгрузкой, последовательно соединенной с барабанным магнитным сепаратором, массовая доля железа в концентрате магнитного сепаратора и радиальная составляющая напряженности магнитного поля в рабочей зоне сепаратора обратно пропорциональна степени раскрытия и крупности помола руды в шаровой мельнице. Это позволяет, в отличие от автоматического контроля крупности частиц твердой фазы пульпы в разгрузке шаровой мельницы, автоматически контролировать по величине радиальной составляющей напряженности магнитного поля необходимую крупность помола руды в мельнице, которая обеспечивает раскрытие руды с переменными физико-механическими свойствами.

4. Получены новые статические характеристики зависимости сигнала активной мощности приводного электродвигателя пилотного магнитного сепаратора от сигналов активной мощности приводного электродвигателя барабанных мельниц различных типов, что в отличие от статической характеристики зависимости производительности мельницы по готовому классу крупности продукта измельчения от степени загрузки мельницы рудой,

дает возможность автоматически определять степень загрузки мельницы рудой с различными физико-механическими свойствами.

### **Практические результаты:**

1. Предложена система автоматического контроля оптимальной степени загрузки железной рудой барабанных мельниц по сигналам активной мощности электродвигателей мельниц и магнитных сепараторов, которая в отличие от контроля загрузки мельницы только по одному сигналу активной мощности электродвигателя мельницы, позволяет автоматически определять заполнение мельницы рудой с различными физико-механическими свойствами.

2. Предложена система автоматического контроля производительности технологического комплекса измельчения и магнитной сепарации по спектральной составляющей сигнала активной мощности электродвигателя магнитного сепаратора, отличающийся от известного метода автоматического контроля производительности магнитного сепаратора по общему сигналу активной мощности сепаратора более высокой точностью, что позволяет повысить точность автоматического контроля оптимальной загрузки барабанных мельниц железной рудой с помощью пилотного магнитного сепаратора.

3. Разработаны принципы построения и технические требования к системам автоматического контроля оптимальной загрузки барабанных мельниц рудой на основе анализа сигналов активной мощности электродвигателей мельниц и магнитных сепараторов, что в отличие от известных систем автоматического контроля загрузки мельниц рудой по максимуму спектральной составляющей сигнала активной мощности электродвигателя мельницы, позволяет автоматически определять оптимальную степень загрузки мельниц рудой с переменными физико-механическими свойствами и повысить производительность комплексов магнитного обогащения по магнитному продукту и качество концентрата.

### **Практическое значение полученных результатов.**

Практическая ценность полученных результатов состоит в разработке функционально-алгоритмических структур систем автоматического контроля оптимальной степени загрузки барабанных мельниц железной рудой с переменными физико-механическими свойствами, что повышает качество железорудного концентрата и улучшает технико-экономические показатели магнитообогатительных фабрик и доменного производства чугуна на металлургических комбинатах Украины.

Результаты работы приняты к внедрению ОАО «Центральный горно-обогатительный комбинат», а также использованы при проведении лекционных и практических занятий со студентами ДВНЗ «НГУ» специальности 8.091401 «Системы управления и автоматика».

**Личный вклад автора.** Все научные положения и результаты работы получены автором лично.

**Апробация результатов работы.** Основные положения работы докладывались на X Международной научно-технической конференции «Ключевые вопросы современной науки – 2014» (Болгария, г. София, 17-25 апреля 2014г.), Всеукраинской научно-практической конференции «Информационные и моделирующие технологии» (г. Черкассы, 29-31 апреля 2014г.)

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 6 статей в научно-технических журналах и сборниках научных работ, рекомендованных ВАК Украины, в том числе 4 статьи в изданиях, которые входят в наукометрическую базу SCOPUS.

# **РАЗДЕЛ 1. АНАЛИЗ МЕТОДОВ И СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ И РЕГУЛИРОВАНИЯ ЗАГРУЗКИ БАРАБАННЫХ МЕЛЬНИЦ РУДОЙ**

## **1.1. Анализ технологических схем измельчения железных руд магнитообогатительных фабрик с позиций задач автоматического контроля и регулирования загрузки мельниц рудой**

Магнитообогатительная фабрика по обогащению железных руд представляет собой ряд параллельно работающих технологических линий или секций обогащения. Технологическую линию магнитного обогащения руд можно условно разделить на ряд последовательно соединенных технологических комплексов, каждый из которых включает в себя технологические операции: измельчение, классификацию и магнитную сепарацию. Измельчение руды может осуществляться в шаровых и бесшаровых мельницах. В первых стадиях измельчения работают шаровые мельницы с решеткой типа МШР и мельницы мокрого самоизмельчения с решеткой. Во вторых стадиях измельчения могут работать шаровые мельницы с центральной разгрузкой типа МШЦ, шаровые мельницы с решеткой типа МШР, а также рудногалечная мельница типа МРГ.

На рис. 1.1 представлена конструктивная функциональная структура мельницы. В шаровую барабанную мельницу в качестве мелющих тел загружаются металлические шары размером 100, 120, 150 мм. Мельница приводится во вращение синхронным двигателем 10. Измельчение руды происходит ударом шаров и истиранием. Роль мелющих тел в мельницах самоизмельчения играют крупные куски руды. В шаровые мельницы и мельницы мокрого измельчения поступает вода, которая является транспортирующим агентом.

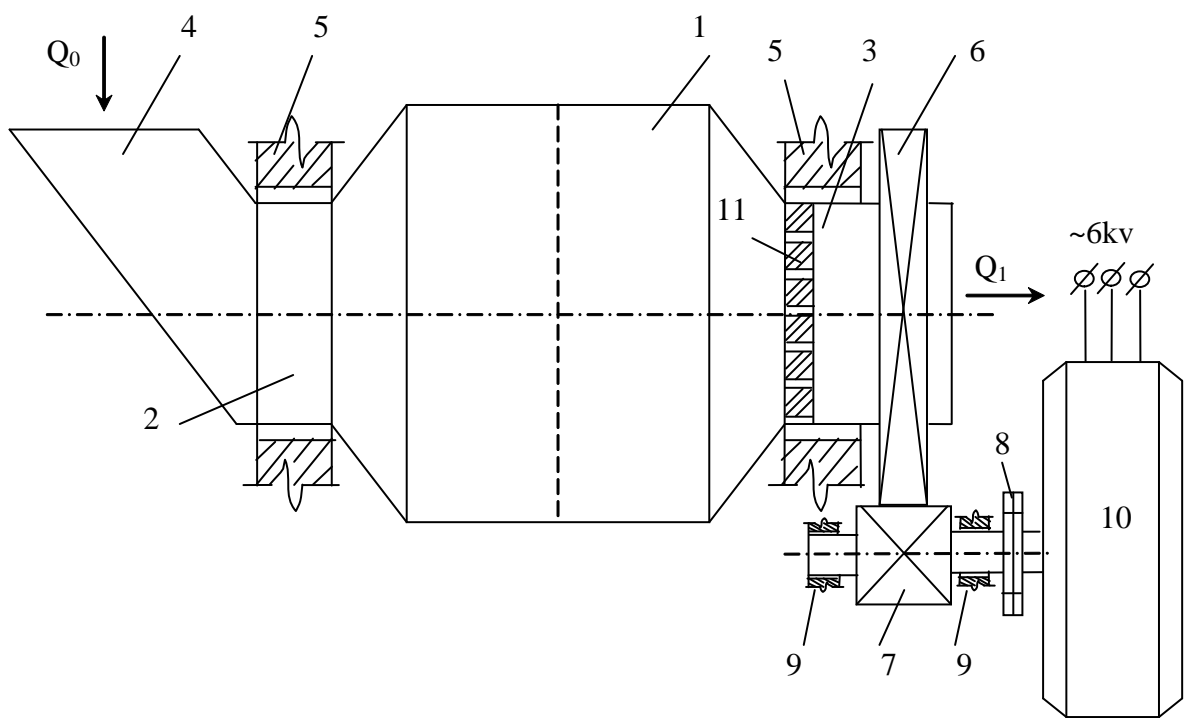


Рис. 1.1. Конструктивная функциональная схема мельницы:

1 – барабан, 2 – полая загрузочная цапфа; 3 – полая разгрузочная цапфа; 4 – загрузочное устройство; 5 – подшипники скольжения; 6,7 – зубчатая передача; 8 – муфта; 9 – подшипники вала редуктора; 10 – приводной синхронный двигатель; 11 – решетка;  $Q_0$  – производительность мельницы по исходной руде;  $Q_1$  – выходная производительность мельницы по измельченному продукту.

В зависимости от стадии и типа применяемых мельниц технологические линии обогащения имеют различную структуру. На ГОКах Кривбасса более широкое распространение получили магнитообогатительные фабрики с шаровыми мельницами, например, обогатительные фабрики ЮГОКа, СевГОКа, ИнГОКа, Полтавского ГОКа и др. Мельницы мокрого самоизмельчения получили применение на обогатительных фабриках ИнГОКа и СевГОКа.

На рис. 1.2 представлена типовая схема технологического комплекса измельчения и магнитной сепарации первой стадии с шаровой мельницей. Здесь руда по главному конвейеру 1 автостеллой 2 подается в бункер 3, откуда с помощью рудопитателя 4 конвейером 5 загружается в мельницу 6, которая вращается электродвигателем 7 и работает в замкнутом цикле со спиральным классификатором 8. Слив классификатора через пульподелитель 9 поступает на группу параллельно работающих магнитных сепараторов 10, 11, 12, 13, барабаны которых вращаются электродвигателями 14, 15, 16, 17. Анализ схемы рис. 1.2 с позиций задач управления качеством показывает, что возмущающими воздействиями на вход технологического комплекса являются переменные свойства исходной руды, поступающей с главного конвейера 1 через бункер 3.

Крупность помола руды в разгрузке мельницы 6 определяется заполнением мельницы рудой. Увеличение заполнения или загрузки мельницы рудой приводит к увеличению крупности помола руды и наоборот уменьшение загрузки мельницы рудой приводит к уменьшению крупности помола руды. Для каждого типа вкрапленности магнетита существует оптимальная крупность помола руды при которой происходит раскрытие рудных зерен и обеспечивается максимальная производительность магнитных сепараторов 10-13 по магнитному продукту. При этом активная мощность, потребляемая магнитными сепараторами, достигает максимального значения. В свою очередь активная мощность электродвигателя мельницы определяется также загрузкой мельницы рудой. Представляет интерес исследование с позиций управления загрузкой мельниц рудой статических характеристик связывающих сигналы



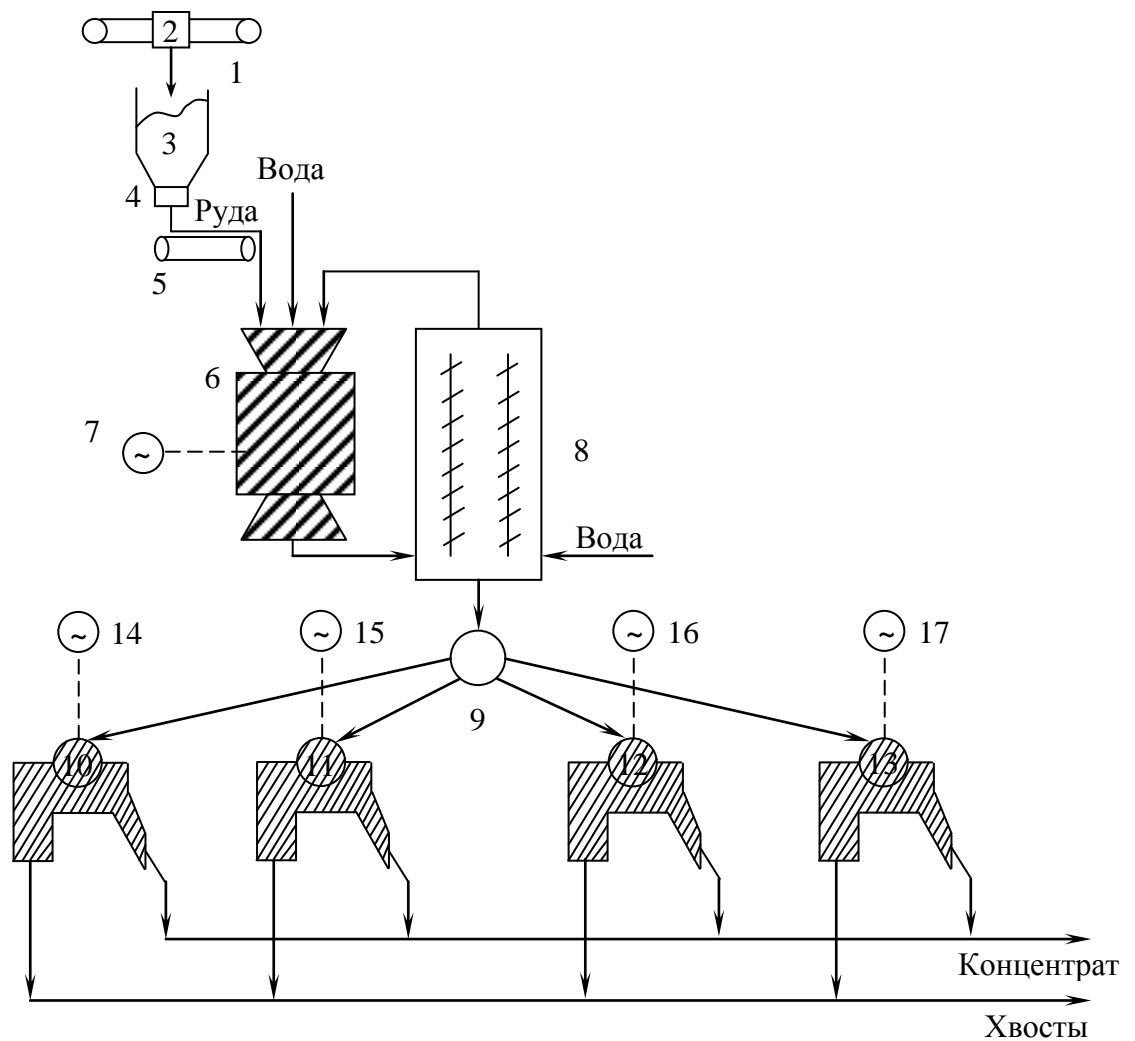


Рис. 1.2. Схема технологического комплекса измельчения и магнитной сепарации первой стадии с шаровой мельницей:

1 – главный конвейер; 2 – автостелла; 3 – бункер с рудой; 4 – рудопитатель; 5 – конвейер; 6 – шаровая мельница с решеткой; 7 – электродвигатель мельницы; 8 – спиральный классификатор; 9 – пульподелитель; 10, 11, 12, 13 – магнитные сепараторы; 14, 15, 16, 17 – электродвигатели барабанов магнитных сепараторов.

активной мощности электродвигателей мельницы и сепаратора. На рис. 1.3 представлена схема технологического комплекса магнитного обогащения типичного для вторых и третьих стадий магнитообогащительных фабрик.

Питание  $Q$ , поступающее с первой стадии через технологический зумпф 5, насосом 6 закачивается в зумпф 7, который с помощью насоса 8 питает гидроциклон 9. Пески гидроциклона 9 попадают на доизмельчение в мельницу 1, которая вращается двигателем 2. Разгрузка мельницы поступает на группу магнитных сепараторов 3. Слив гидроциклона 9 через дешламатор 10 и зумпф 11 и насос 12 поступает на группу магнитных сепараторов 13, выходным продуктом которого является концентрат.

Анализ схемы технологического комплекса показывает наличие двух магнитных сепараторов 3 и 13. Режим работы сепаратора 3 реагирует при прочих равных условиях в первую очередь на крупность помола руды в мельнице 1. Режим работы сепаратора 13 реагирует на крупность слива гидроциклона 9. Крупность помола руды в мельнице 1 определяется загрузкой ее песками или производительностью по пескам гидроциклона, которые поступают в мельницу. Мельница 1 непосредственно связана с сепаратором 3 каналом с минимальным запаздыванием. Поэтому с позиций задач управления загрузкой мельницы рудой представляет интерес исследование статических характеристик этого комплекса и связи раскрытия руды измельчением с выходными сигналами магнитного сепаратора.

На рис. 1.4 представлена схема технологического комплекса магнитного обогащения руд РОФ-2 ИнГОКа с мельницами мокрого самоизмельчения. Исходная руда по главному конвейеру 1 и автостелле 2 подается в бункер 3 и далее через вибропитатель 4 в мельницу первой стадии мокрого самоизмельчения 5, работающей в замкнутом цикле со спиральным классификатором в первой стадии классификации, слив которого поступает на группу магнитных сепараторов 16 первой стадии магнитной сепарации. Магнитный продукт сепараторов 16 через технологический зумпф 15 и насос 14

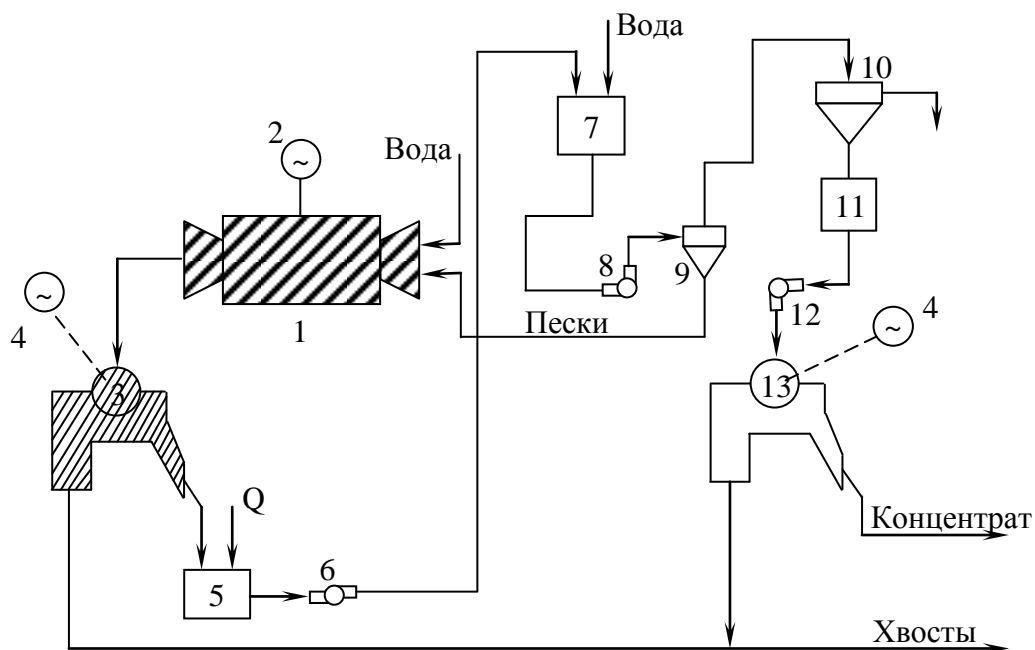


Рис. 1.3. Схема технологического комплекса магнитного обогащения второй (третьей) стадии с шаровой мельницей:

1 – шаровая мельница; 2 – электродвигатель мельницы; 3, 13 – магнитные сепараторы; 4 – электродвигатели сепараторов; 5, 7, 11 – технологические зумпфы; 6, 8, 12 – насосы; 9 – гидроциклон; 10 – дешламатор.

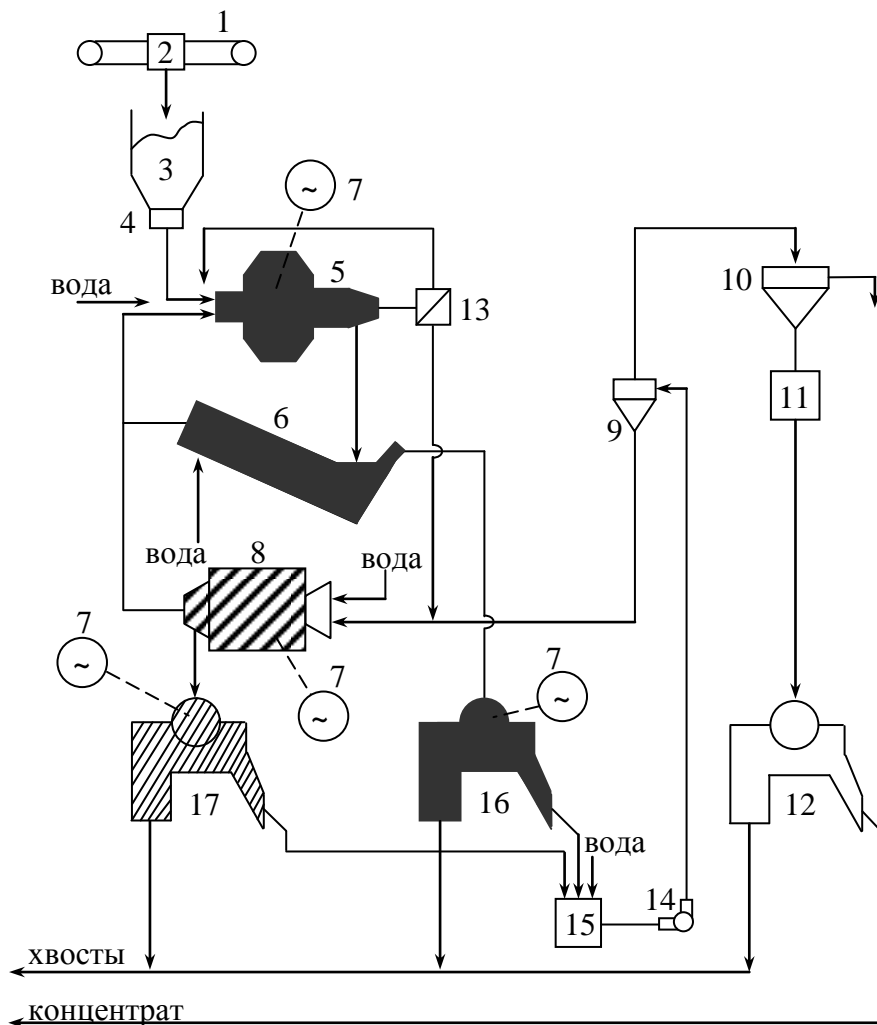


Рис. 1.4. Схема технологического комплекса магнитного обогащения руд с мельницами мокрого самоизмельчения:

1 – главный конвейер; 2 – автостелла; 3 – бункер; 4 – вибропитатель; 5 – мельница самоизмельчения; 6 – спиральный классификатор; 7 – электродвигатели; 8 – рудногалечная мельница; 9 – гидроциклон; 10 – дешламатор; 11, 15 – технологические зумпфы; 12, 16, 17 – магнитные сепараторы; 14 – насос.

поступает на гидроциклон 9. Слив гидроциклона 9 через дешламатор 10 и зумпф 11 поступает на группу магнитных сепараторов 12, выходным продуктом которых является концентрат. Рудная галля через регулирующий орган 13 поступает на вход рудногалечной мельницы 8, слив которой поступает на группу магнитных сепараторов 17. Пески гидроциклонов 9 поступают в мельницу 8. Анализ схемы технологического комплекса позволяет условно разделить ее на три технологических блока. Первый блок включает мельницу 5, спиральный классификатор 6, работающие на группу магнитных сепараторов 16. Система управления первым блоком должна обеспечивать при изменении свойств руды крупность помола и крупность слива, обеспечивающие оптимальный режим работы группы сепараторов 16. Второй технологический блок включает мельницу 8, группу магнитных сепараторов 17. Система управления вторым блоком должна обеспечивать такие режимы работы мельницы 8, которые обеспечивают оптимальный режим работы группы сепараторов 17. Третий блок включает зумпф 15, насос 14, гидроциклоны 9, дешламатор 10, зумпф 11, группу сепараторов 12.

Задачей системы управления третьим блоком является стабилизация качества концентрата на выходе группы магнитных сепараторов. Управляющим воздействием здесь может быть расход воды в зумпф 15. Управляющим воздействием в системе управления вторым технологическим блоком может быть перераспределение рудной галли регулирующим органом 13 и поддержание оптимальной загрузки рудой рудногалечной мельницы 8. Первый технологический блок может управляться поддержанием оптимальной загрузки мельницы рудой, изменением производительности по исходной руде. На основании анализа технологических схем можно сделать вывод, что технологически барабанные мельницы работают на магнитные сепараторы. Заполнение барабанных мельниц рудой определяет крупность помола и режим работы магнитных сепараторов.

Как известно из работы [57] производительность сепаратора по магнитному продукту определяет сигнал активной мощности электродвигателя

магнитного сепаратора, а сигнал активной мощности электродвигателя мельницы определяется загрузкой мельницы рудой [88]. Представляет интерес исследование закономерностей формирования статических характеристик технологического комплекса «барабанная мельница – магнитный сепаратор», а именно исследование связи между сигналами активной мощности электродвигателей сепаратора и барабанных мельниц различных типов: шаровых, рудногалечных, самоизмельчения. Результаты этих исследований позволят решить задачу разработки метода автоматического контроля загрузки барабанных мельниц железной рудой по двум сигналам активной мощности электродвигателей мельницы и магнитного сепаратора.

## **1.2. Технические требования к системам автоматического контроля загрузки рудой шаровых мельниц и мельниц мокрого самоизмельчения**

Измельчение железных руд является подготовительным процессом магнитного обогащения руд [139]. Основным процессом магнитообогатительных фабрик является магнитная сепарация. По такому принципу необходимо строить и системы управления технологическими комплексами магнитообогатительных фабрик. Пилотным или ведущим объектом управления является магнитный сепаратор, а ведомым – барабанная мельница, задачей которой является раскрытие сростков полезного минерала с пустой породой. Возможная степень раскрытия руды определяется характером и крупностью вкрапления зёрен. Например, поступающая на измельчение, классификацию и магнитную сепарацию исходная железная руда является существенно неоднородной по своему химическому составу и текстурно-структурным свойствам даже в рамках одного месторождения. Так, например, Ингулецкое месторождение Криворожского железорудного бассейна [137] представлено четырьмя типами руд: труднообогатимой, состоящей из карбонатно-магнетитовых и силикатно-магнетитовых кварцитов (крупность

вкрапления магнетита 0,008-0,08мм); среднеобогатимой трудноизмельчаемой, состоящей из магнетито-силикатных и карбонатных силикатно-магнетитовых кварцитов (крупность вкрапления магнетита 0,02-0,2мм); среднеобогатимой легкоизмельчаемой, состоящей из красно-серополосатых магнетитовых и силикатно-магнетитовых кварцитов средне и широкополосчатых (крупность вкрапления магнетита 0,02-0,07мм); легкообогатимой, состоящей из силикатно-магнетитовых и магнито-силикатных кварцитов среднеполосчатых (крупность вкрапления магнетита 0,02-0,1мм); переменными является также крепость руды и её плотность, а также минеральный состав: магнетит, мартит, гематит, гидроокись железа, сидерит, сульфиды, кварц, силикаты и т.д.

Основными способами рудоподготовки на магнитообогатительных фабриках является измельчение и классификация с целью управления гранулометрическим составом руды, поступающей на магнитное обогащение. Учитывая сложный состав и переменные свойства руды, возникает необходимость управления процессами измельчения с целью достижения оптимальной крупности помола руды и получения оптимального фракционного состава сырья, поступающего на магнитную сепарацию.

С точки зрения измельчения основной регулируемой переменной барабанных мельниц является загрузка или заполнение мельниц рудой, которая определяет крупность продукта измельчения на выходе измельчительных агрегатов является ее крупность. От крупности помола существенно зависят выходные показатели обогащения. Так, например, в работе [49] представлены зависимости содержания железа в концентрате  $\beta$  и извлечения железа в концентрат  $\varepsilon$  в зависимости от крупности измельчения (рис. 1.5).

Анализ этих зависимостей показывает, что существует оптимальная крупность раскрытия минерала, соответствующая максимальным значениям  $\varepsilon$  и  $\beta$ . В работах [78], [113] критерием управления измельчительными агрегатами выбирается максимальная производительность по «готовому» (-0,074мм) классу. Однако, из рис. 1.6, представленного в работе [49], ясно, что увеличение массовой доли класса -0,074мм хотя и повышает содержание железа в

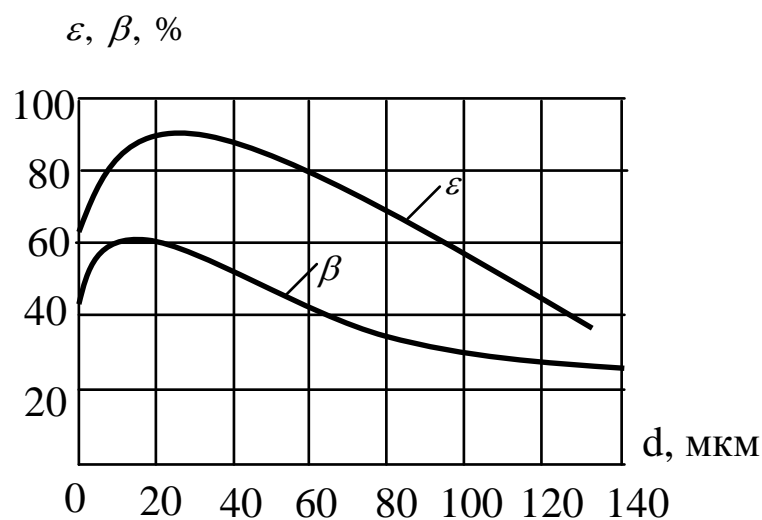


Рис. 1.5. Зависимости показателей магнитного обогащения по данным В. В. Кармазина:

$\varepsilon$  – извлечение;  $\beta$  – содержимое железа в концентрате

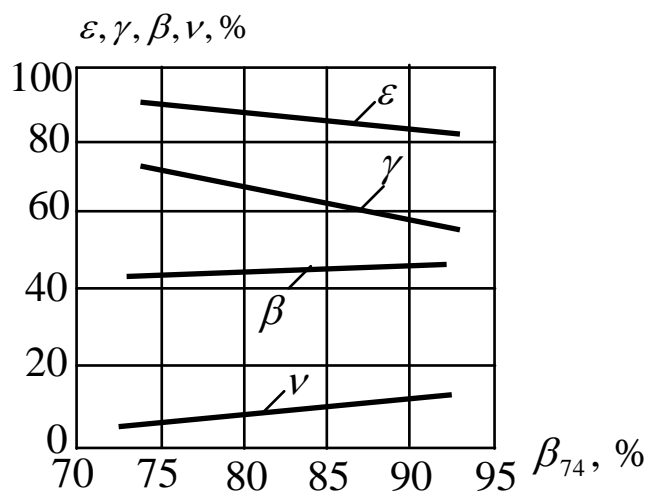


Рис. 1.6. Экспериментальные зависимости содержания железа  $\beta$ , извлечения  $\varepsilon$ , потерь железа в хвостах  $\nu$ , выходе концентрата  $\gamma$  от крупности измельчения  $\beta_{74}$ , %



концентрате  $\beta$ , но снижает извлечение  $\varepsilon$ , выход железа  $\gamma$ , повышает содержание железа в хвостах  $\nu$ . Для каждого типа руды соответствует свой закон распределения крупности вкрапления зёрен железа. Так, например, на рис. 1.7 представлены интегральные функции распределения крупности вкрапления железа для различных типов руд, полученные по данным Полтавского ГОКа. Очевидно, что для полного раскрытия этих типов руд необходимо создавать различные условия, в частности и системой управления загрузки мельницы рудой. При этом ориентироваться в любом случае на критерий «максимум производительности мельницы по «готовому» классу (0,074мм)» не имеет смысла, так как частицы железа с диаметром вкрапления  $d_{\text{вк}} > 0,074\text{мм}$  будут переизмельчаться, что увеличит потери железа с хвостами и приведёт к дополнительным расходам электроэнергии на измельчение руды.

В работе [49] представлены кривые обогатимости (рис. 1.8) хорошо подготовленной руды, кривая 1, и плохо подготовленной руды с нераскрытыми сростками, кривая 2. Заштрихованная область ABDE соответствует доле извлечённого в концентрат железа при хорошо раскрытой руде, а область ABCE при недостаточно раскрытой руде.

Из анализа рис. 1.8 следует, что степень раскрытия руды влияет на долю извлечённого в концентрат железа, которое концентрируется на барабане сепаратора.

Магнитный сепаратор чётко реагирует на фракционный состав поступающего на обогащение минерального сырья (рис. 1.8). Если сырьё недоизмельчено, то выход и содержание железа в концентрате будет меньше, чем при хорошо раскрытом минеральном сырье. И наоборот, если сырьё переизмельчено, то увеличится содержание железа в хвостах, выход концентрата тоже уменьшится.

Таким образом, магнитный сепаратор является естественным индикатором результатов измельчения. Оптимальной крупности помола руды будут соответствовать и оптимальные показатели магнитного обогащения.

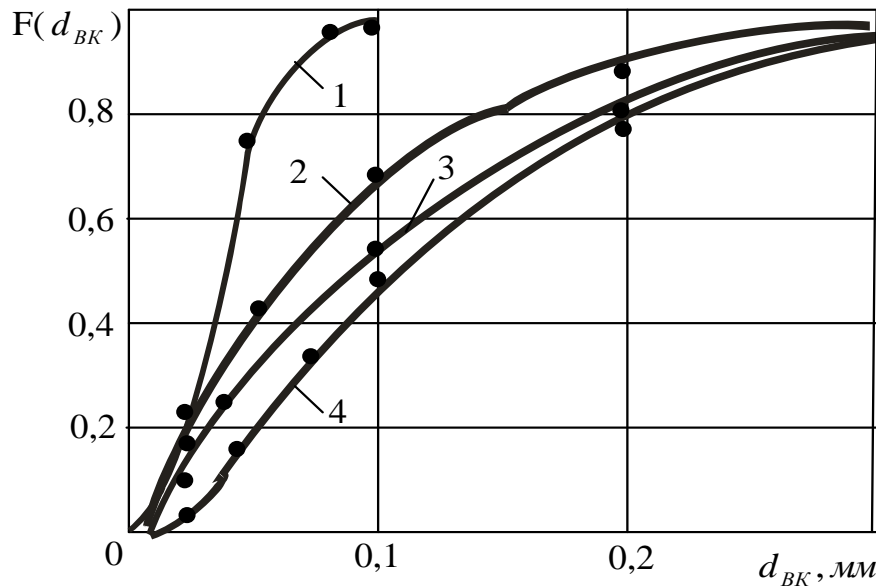


Рис. 1.7. Интегральные функции распределения крупности вкрапления железа по данным Полтавского ГОКа

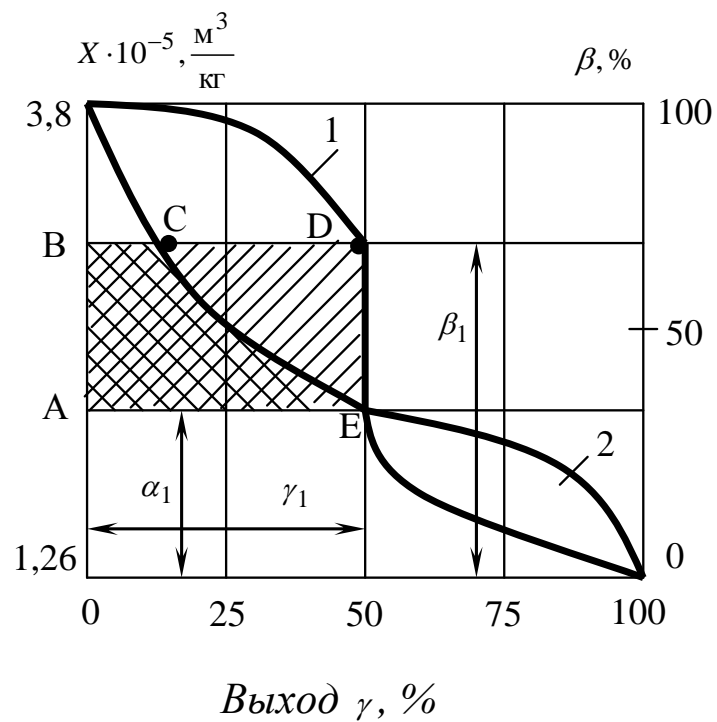


Рис. 1.8. Кривая обогатимости для хорошо (1) и плохо (2) измельчённой руды

Следовательно, критерием оптимальной загрузки барабанной мельницы рудой является максимум производительности пилотного магнитного сепаратора по магнитному продукту.

Из работы [57] известна связь между активной мощностью потребляемой электродвигателем магнитного сепаратора из сети и производительностью сепаратора по магнитному продукту. Следовательно, критерием оптимальной загрузки барабанной мельницы рудой является максимальное значение активной мощности электродвигателя барабана магнитного сепаратора.

Сформулируем технические требования к системе автоматического контроля загрузки барабанных мельниц рудой:

1. Критерием оптимальной степени загрузки барабанной мельницы рудой является максимальное значение сигнала активной мощности электродвигателя магнитного сепаратора.

2. Степень загрузки барабанных мельниц рудой должна автоматически определяться как один из трёх возможных режимов работы мельницы: «недогрузка», «перегрузка», «оптимальная загрузка».

3. Метод автоматического контроля степени загрузки мельниц железной рудой должен основываться на анализе двух сигналов активной мощности потребляемой электродвигателями барабанной мельницы и магнитного сепаратора.

4. Система автоматического контроля степени загрузки барабанных мельниц рудой должна быть универсальной и иметь возможность применения для контроля степени загрузки шаровых мельниц, мельниц мокрого самоизмельчения и рудногалечных мельниц.

5. Система автоматического контроля степени загрузки барабанных мельниц рудой должна быть реализована на стандартных измерительных преобразователях активной мощности, которые включаются в цепь статора электродвигателей 6 кВ и 380 В через измерительные преобразователи тока и напряжения.

6. Система автоматического контроля степени загрузки должна включать подсистему автоматического контроля производительности магнитного сепаратора по магнитному продукту с точностью не более 5 % относительных единиц.

7. Система должна автоматически определять степень загрузки мельниц железной рудой с различными физико-механическими свойствами.

8. Система автоматического контроля степени загрузки барабанных мельниц рудой должна иметь возможность работы как в автоматизированном так и в автоматическом режимах.

### **1.3. Анализ известных методов и систем автоматического контроля и регулирования загрузки барабанных мельниц рудой**

Процесс измельчения материала в шаровой мельнице сопровождается излучением звуковой энергии, возникающей из-за соударений шаров и материала друг с другом и о футеровку. Считается, что сила звука, излучаемого мельницей, зависит от величины загрузки мельницы рудой.

Звукометрические индикаторы загрузки мельницы рудой [30] измеряют общий уровень шума мельницы или интенсивность той части звукового спектра мельницы, которая, как считают, наиболее точно характеризует заполнение мельницы рудой. Схема электроакустического индикатора представлена на рис. 1.9. Он состоит из микрофона 1, усилительно-преобразующего блока 2, вторичного прибора 3, потенциометра 4, М – мельница.

Звукометрические датчики обладают рядом серьезных недостатков: влияние шума соседнего работающего оборудования и низкая помехоустойчивость, сложность, громоздкость и дороговизна оборудования, влияние на показания датчика износа мелющих тел и футеровки мельницы. Эти недостатки приводят к тому, что звукометрические датчики допускают

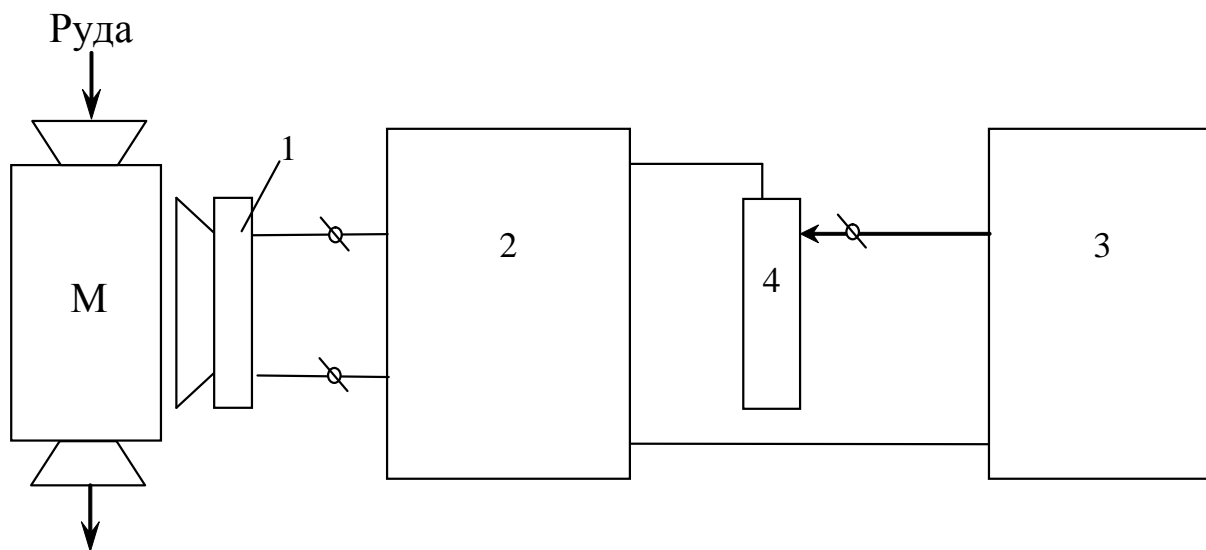


Рис. 1.9. Схема электроакустического индикатора:

1 – микрофон; 2 – усилительно-преобразующий блок; 3 – вторичный прибор; 4 – потенциометр; М – мельница.

большие погрешности в работе и в ряде случаев, как показывает опыт автоматизации обогатительных фабрик ГОКов Кривбасса, оказываются неработоспособными.

В работе [34] описан способ автоматического контроля заполнения мельниц с помощью магнитомодуляционных датчиков. Схема датчика представлена на рис. 1.10. Он представляет собой П-образный магнит 1, имеющий полюсные наконечники 4 из магнитомягкой стали, на которых установлены катушки с согласно включенными сигнальными обмотками. Полюсные наконечники заключены в немагнитную вставку 5, вмонтированную в барабан мельницы. Толщина вставки равна суммарной толщине барабана и футеровки. Когда мельница вращается, немагнитная вставка один раз за оборот попадает в зону перехода частиц внутримельничной загрузки с параболической траектории на круговую. При этом частицы пересекают образующийся между полюсными наконечниками магнитный поток. Обладая магнитной проницаемостью, они вызывают изменение магнитного сопротивления, а, следовательно, и величины магнитного потока, в результате чего в сигнальных обмотках появляется электродвижущая сила. При подходе полюсных наконечников к точке, где частицы внутримельничной загрузки приобретают скорость, равную окружной скорости барабана мельницы, модуляция магнитного потока прекращается. Момент прекращения модуляции зависит от коэффициента заполнения мельницы.

Достоинством датчика является возможность индикации угла отрыва шаров в мельнице. Недостатками датчика являются: низкая надежность вследствие наличия скользящего контакта и токосъемных шин для передачи информации, необходимость переделки футеровки мельницы, громоздкость, сложность и высокая стоимость оборудования, износ немагнитной вставки в футеровке мельницы.

В [35] приводится описание телеизмерительного датчика шума мельницы, предназначенного для регистрации степени заполнения мельниц рудой.

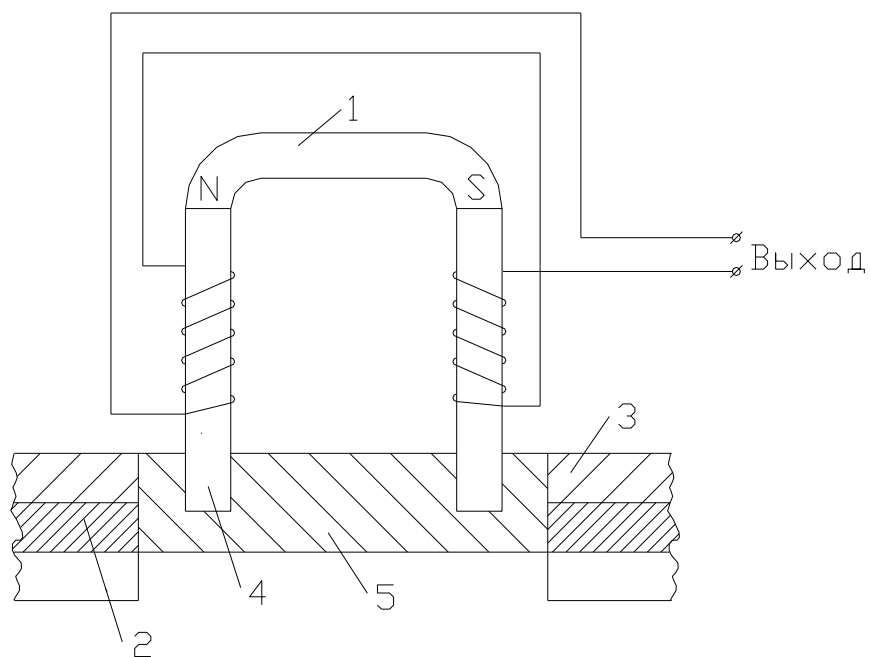


Рис. 1.10. Схема магнитомодуляционного датчика:

1 – магнит; 2 – футеровка; 3 – барабан мельницы; 4 – полюсные наконечники из магнитомягкой стали; 5 – немагнитная вставка.

Схема радиотелеметрического контроля загрузки мельницы рудой представлена на рис. 1.11.

Телеизмерительный датчик 1 представляет собой пьезоэлемент, регистрирующий удары падающих шаров. Сигнал с телеизмерительного датчика 1, укрепленного на барабане мельницы 5 поступает на радиопередатчик 3, который питается от источника постоянного напряжения 2. Радиопередатчик через антенну 4 передает информацию о заполнении мельницы измельчаемым материалом в эфир, которая через приемную антенну 6 поступает на неподвижный приемник 7. Сигнал с приемника 7 поступает через преобразователь 8 на регистрирующий вторичный прибор 9.

Радиотелеметрический способ контроля загрузки мельниц дает невысокую точность вследствие того, что модуляция телеизмерительного датчика возникает раньше, чем датчик входит в зону перехода шаров с круговых траекторий на параболические и в зону перехода шаров с параболических траекторий на круговые, и оканчивается позже, чем датчик выходит из этих зон, так как упругие колебания, возникающие в зонах, передаются металлическому барабану мельниц и накладываются друг на друга. К недостаткам этого метода следует отнести также его сложность и громоздкость, влияние износа мелющих тел и футеровки мельниц.

Авторами работы [31] предлагается контролировать шаровую загрузку мельницы по активной мощности приводного двигателя мельницы В качестве измерителя активной мощности можно применять стандартные приборы. Это является достоинством предлагаемого способа. Недостатком его является то, что активная мощность является функцией веса рудно-шарового тела в мельнице и угла отклонения центра тяжести рудно-шарового тела от вертикальной оси симметрии мельницы. Угол отклонения центра тяжести определяется силами внутреннего трения в мельнице, которые зависят от физико-механических свойств исходной руды, плотности пульпы в мельнице, профиля и степени износа футеровки и другими факторами. Так как в процессе нормальной работы мельницы вышеуказанные факторы являются переменными



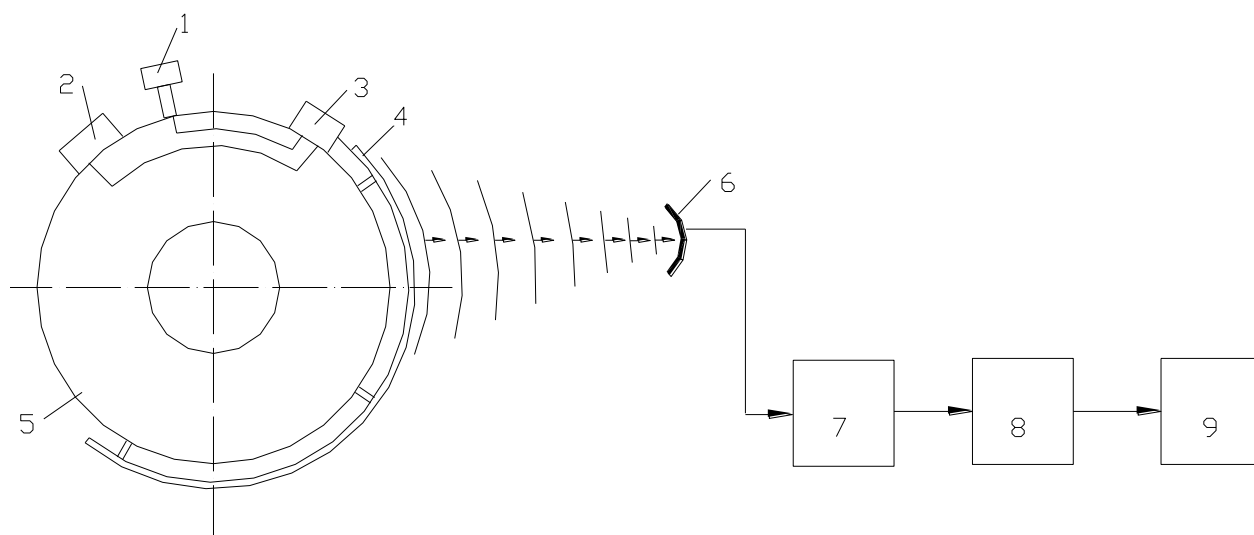


Рис. 1.11. Схема радиотелеметрического контроля загрузки мельницы рудой:

1 – телеизмерительный датчик; 2 – источник постоянного напряжения; 3 – радиопередатчик; 4 – передающая антенна; 5 – барабан мельницы; 6 – приемная антенна; 7 – неподвижный приемник; 8 – преобразователь; 9 – вторичный прибор.

величинами, силы внутреннего трения изменяются, и однозначно судить о шаровой загрузке мельницы только по активной мощности приводного двигателя мельницы не представляется возможным.

В работе [28] предлагается радиоизотопный индикатор заполнения мельниц мокрого самоизмельчения руд (РИЗМ), схема которого представлена на рис. 1.12.

На рис. 1.12: М – мельница, И – источник радиоактивного излучения, П – приемник излучения, С – счетчик Гейгера, У – усилитель, ВП – вторичный прибор. Считают, что интенсивность радиоактивного излучения, попадающего в приемник П, зависит от степени заполнения мельницы рудой. Кривые 1, 2 характеризуют уровень и степень загрузки мельницы рудой. Это излучение регистрируется счетчиком Гейгера С. Сигнал с выходе датчике С усиливается усилителем У и поступает на показывающий вторичный прибор ВП. Статические характеристики РИЗМа при различных плотностях измельчаемой руды представлены на рис. 1.13.

На рис. 1.13:  $\varphi$  – степень загрузки мельницы рудой в %,  $\gamma$  – уровни сигнала в условных единицах на входе приемника П. Кривая 1 соответствует плотности руды  $\delta_1$ , а кривая 2 –  $\delta_2$ . Причем  $\delta_2 < \delta_1$ . Анализ статических характеристик РИЗМа показывает, что одному и тому же показателю прибора ВП  $\gamma_{12}$  могут соответствовать разные значения фактической степени загрузки мельницы рудой  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$ . Кроме того РИЗМ не удалось применить для автоматического контроля загрузки рудой шаровых мельниц из-за особенности их работы в водопадном режиме. Например, при одном и том же заполнении рудой изменяется соотношение между массой шаров, находящихся на круговых и параболических траекториях, что происходит, например, при износе футеровки мельницы или из-за изменения физико-механических свойств измельченной руды. Эти недостатки не позволяют применять РИЗМ для надежного определения оптимальной загрузки рудой мельниц мокрого самоизмельчения и шаровых мельниц.

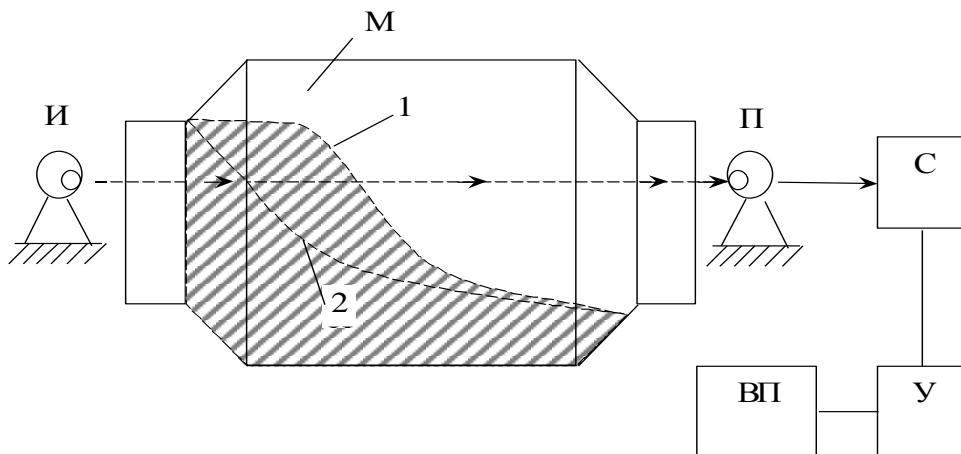


Рис. 1.12. Схема радиоизотопного индикатора заполнения (РИЗМ):  
 М – мельница; И – источник радиоактивного излучения; П – приемник излучения; С – счетчик Гейгера; У – усилитель; ВП – вторичный прибор; 1 – уровень загрузки мельницы рудой; 2 – степень загрузки мельницы рудой.

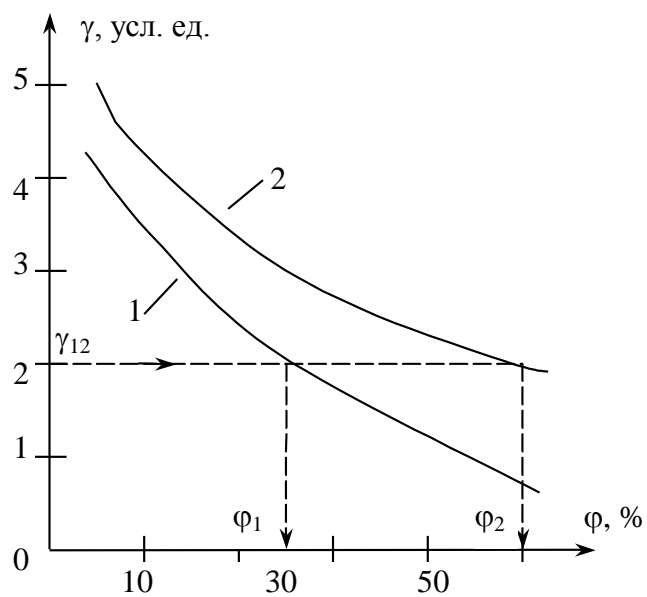


Рис. 1.13. Статические характеристики РИЗМа

Рассмотрим схему расположения датчиков и статические характеристики устройств контроля загрузки мельниц рудой по звукометрическому сигналу, издаваемому мельницей. Схема расположения акустического датчика загрузки представлена на рис. 1.14.

Обозначения на рис. 1.14:  $L$  – длина мельницы,  $G$  – вес рудно-шаровой загрузки мельницы,  $C$  – центр тяжести рудно-шаровой загрузки мельницы,  $\theta$  – угол отклонения центра тяжести от вертикальной оси симметрии барабана мельницы,  $\Delta H$  – перепад уровня пульпы в загрузке и разгрузке мельницы,  $\delta$  – ширина зоны излучения звуковой энергии,  $D$  – акустический датчик,  $BK$  – ширина зоны излучения звука в месте установки датчика,  $M$  – расчетная излучающая точка поверхности барабана мельницы, на которую настраивается акустический датчик.

Падение шаров во вращающейся мельнице при водопадном режиме, характеризующем режим работы мельниц первой стадии измельчения [116], происходит по параболическим траекториям. Наибольшее звучание возникает во время падения шаров при их соударениях, и особенно за счет не смягченного слоя руды прямого удара о футеровку. По всей длине мельницы наблюдается некоторая область  $S$  максимального излучения звуковой энергии. Площадь поверхности этой зоны  $S$  является величиной переменной вдоль длины мельницы  $L$ , так как заполнение мельницы рудой вдоль длины мельницы неравномерное и представлено кривой  $AC$ . Акустический датчик  $D$  настраивают на точку максимального излучения звуковой энергии  $M$ , которая находится внутри исходной зоны излучения  $S_1 \approx l_1 \delta_1$ .

Из-за изменения физико-механических свойств руды, веса шаровой загрузки, износа футеровки мельницы точка  $M$ , на которую настраивают датчик, не совпадает с истинной точкой максимального излучения звуковой энергии, что приводит к существенному дрейфу статических характеристик устройства контроля загрузки, как показано кривыми 1, 2, 3 на рис. 1.15.

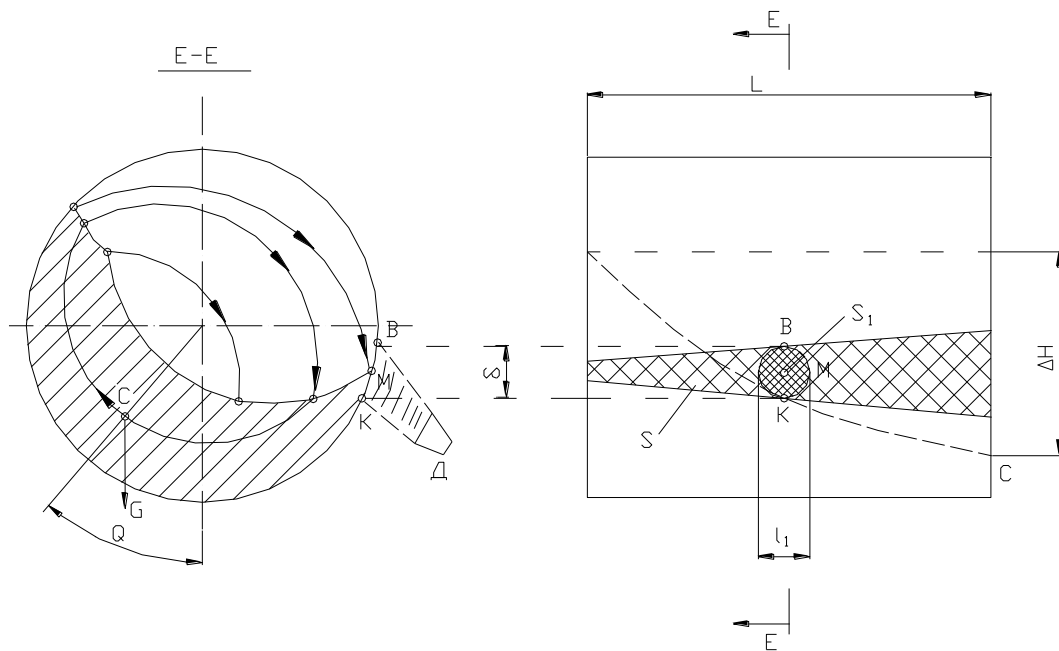


Рис. 1.14. Схема установки акустического датчика загрузки:

$L$  – длина мельницы;  $G$  – вес рудно-шаровой загрузки мельницы;  $C$  – центр тяжести рудно-шаровой загрузки мельницы;  $\theta$  – угол отклонения центра тяжести от вертикальной оси симметрии барабана мельницы;  $\Delta H$  – перепад уровня пульпы в загрузке и разгрузке мельницы;  $\delta$  – ширина зоны излучения звуковой энергии;  $D$  – акустический датчик;  $BK$  – ширина зоны излучения звука в месте установки датчика;  $M$  – расчетная излучающая точка поверхности барабана мельницы, на которую настраивается акустический датчик.

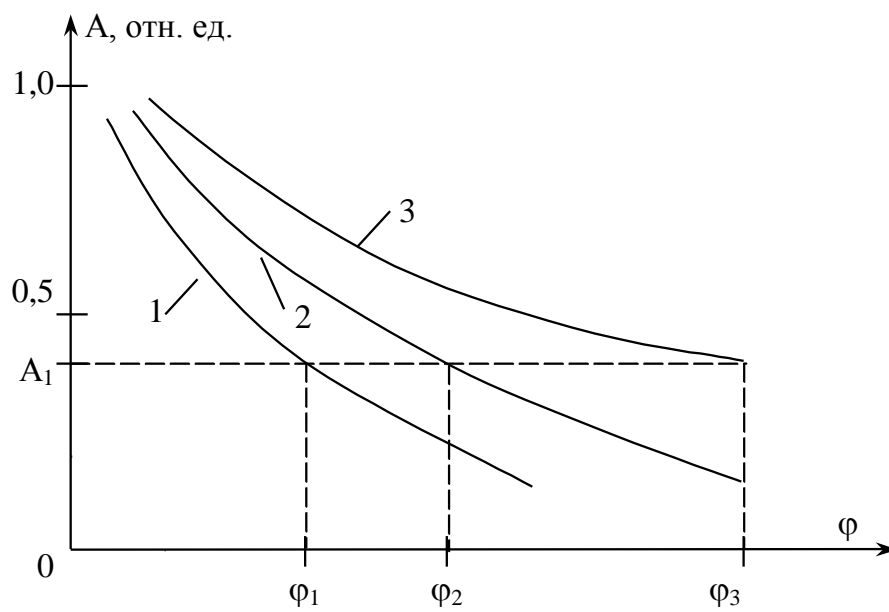


Рис. 1.15. Статические характеристики акустического датчика загрузки

Например, износ футеровки мельницы приводит к изменению угла  $\theta$ . Кривая 1 соответствует новой футеровке. Кривые 2 и 3 соответствуют более изношенной футеровке мельницы. В результате одно и то же показание датчика  $A_1$  может соответствовать различной степени загрузки мельницы рудой  $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ . Следовательно, контролировать оптимальную загрузку мельницы рудой по сигналу звукометрического датчика не представляется возможным.

Схема контроля загрузки рудой мельницы по сигналу активной мощности представлена на рис. 1.16.

Как показано в работе [88] сигнал активной мощности приводного двигателя мельницы также неоднозначно характеризует степень загрузки мельницы рудой. Например, на рис. 1.17 представлены зависимости активной мощности двигателя мельницы  $P$  от степени загрузки ее рудой при различной величине шаровой загрузки мельницы.  $G_1=90$  т,  $G_2=80$  т,  $G_3=70$  т.

Анализ зависимости активной мощности  $P$ , потребляемой электродвигателем шаровой мельницы МШР 3,6x4,0 от степени ее загрузки рудой  $G_p$  показывает неоднозначную зависимость активной мощности  $P$  мельницы от степени загрузки ее рудой.

Эта неоднозначность еще дополнительно возникает из-за экстремального характера статических характеристик мельницы. Так, например, одному и тому же значению сигнала активной мощности  $P_1$  на графике рис 1.17 соответствуют 6 различных величин загрузки мельницы рудой  $G_{p1}, G_{p2}, G_{p3}, G_{p4}, G_{p5}, G_{p6}$ . Эта неоднозначность не позволяет диагностировать оптимальную загрузку мельницы рудой по сигналу активной мощности, потребляемой приводным электродвигателем мельницы.

Из-за неоднозначности показателей рассмотренные датчики загрузки барабанных мельниц рудой и построенные на их базе системы автоматического регулирования показали свою неспособность диагностировать оптимальную загрузку мельниц рудой. Рассмотрим экстремальные системы регулирования загрузки мельниц рудой, основанные на свойстве нелинейности статических

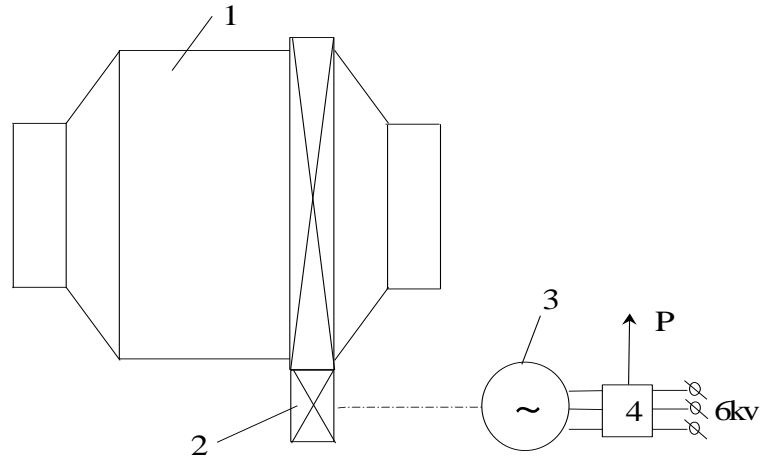


Рис. 1.16. Схема контроля загрузки рудой мельницы по сигналу активной мощности:  
 1 – мельница; 2 – зубчатая передача; 3 – электродвигатель; 4 – преобразователь активной мощности;  $P$  – активная мощность, потребляемая двигателем мельницы.

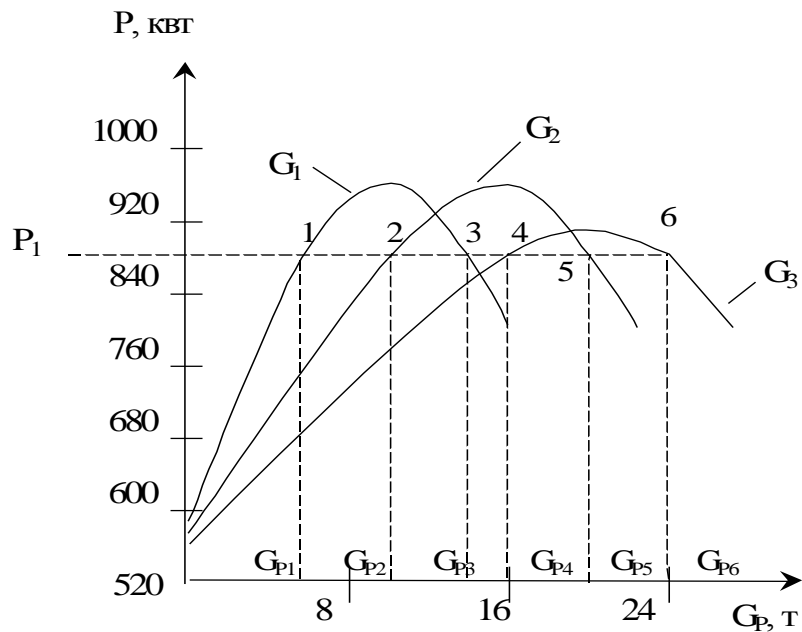


Рис. 1.17. Статические характеристики шаровой мельницы МШР 3,6x4,0



характеристик мельниц. Исследованию динамики шаровых мельниц как существенно нелинейных объектов управления посвящены работы О.Н. Тихонова, Б.А. Арефьева. В работе [9] представлены зависимости постоянной времени мельницы  $T$  от степени заполнения мельницы  $M$ , которые представлены на рис. 1.18.

Экспериментальная зависимость постоянной времени  $T$  шаровой мельницы 2100x3000 Константиновского завода утяжелителей от амплитуды шума мельницы, характеризующего заполнения мельницы рудой, полученная авторами работы [9], представлена на рис 1.19.

Анализ зависимостей рис. 1.18 и рис. 1.19 показывает, что шаровые мельницы являются объектами с переменными параметрами. В известной литературе анализу динамики мельницы как объекта управления с переменными параметрами посвящена только работа А.Н. Марюты [80].

Анализ систем экстремального регулирования производительности шаровых мельниц достаточно полно выполнен в работе [10]. Известные системы экстремального регулирования производительности шаровых мельниц основаны на поисковых методах оптимизации.

Рассмотрим, например, типичную систему экстремального регулирования цикла измельчения на границе области устойчивости [142]. Блок-схема системы представлена на рис. 1.20. Обозначения на рис. 1.20: 1 – шаровая мельница, 2 – спиральный классификатор, 3 – датчик циркулирующей нагрузки  $P$ , 4 – дифференциатор, 5 – логическое устройство, 6 – реле времени, 7 – исполнительный механизм, 8 – бункер с рудой, 9 – конвейер, 10 – датчик шума,  $Q_0$  – расход руды в мельницу,  $V_0$  – расход воды в мельницу,  $V_K$  – расход воды в классификатор.

Работа системы основана на экстремальной зависимости производительности мельницы по готовому классу от суммарной производительности  $P+Q$  на входе мельницы и различной длительности переходного процесса, после совершения пробного шага, по исходному питанию  $\Delta Q$ .

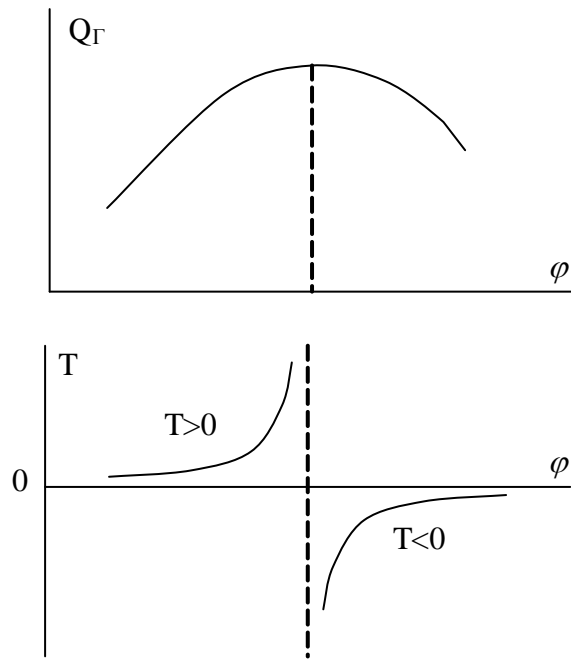


Рис. 1.18. График зависимости производительности шаровой мельницы по готовому продукту  $Q_r$  и ее постоянной времени  $T$  от заполнения мельницы рудой  $\varphi$ .

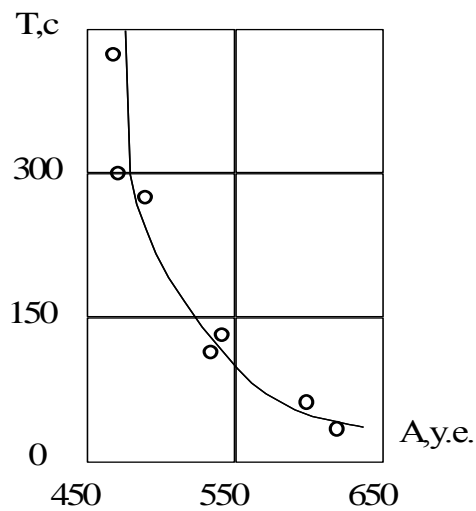


Рис. 1.19. Экспериментальная зависимость постоянной времени шаровой мельницы 2600x3000 Константиновского завода «утяжелителей» от амплитуды шума мельницы, характеризующей заполнение мельницы рудой

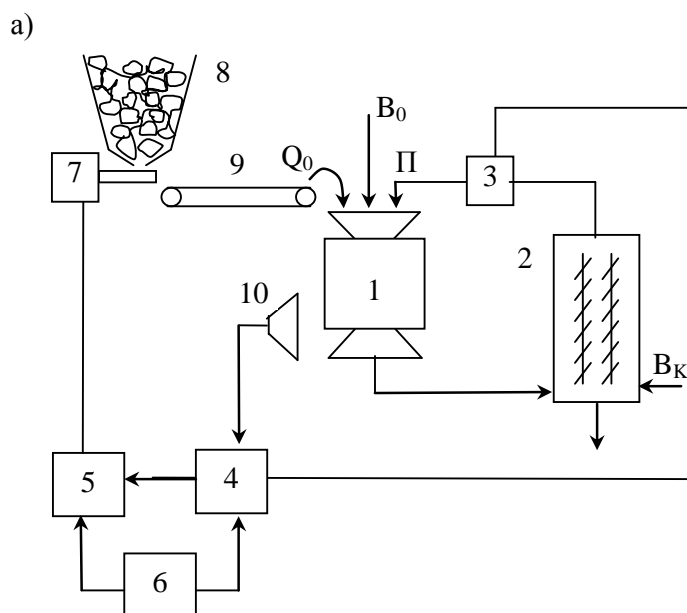


Рис. 1.20а. Блок-схема СЭР цикла измельчения на границе области устойчивости:

1 – шаровая мельница; 2 – спиральный классификатор; 3 – датчик циркулирующей нагрузки  $\Pi$ ; 4 – дифференциатор; 5 – логическое устройство; 6 – реле времени; 7 – исполнительный механизм; 8 – бункер с рудой; 9 – конвейер; 10 – датчик шума;  $Q_0$  – расход руды в мельницу;  $V_0$  – расход воды в мельницу;  $V_K$  – расход воды в классификатор.

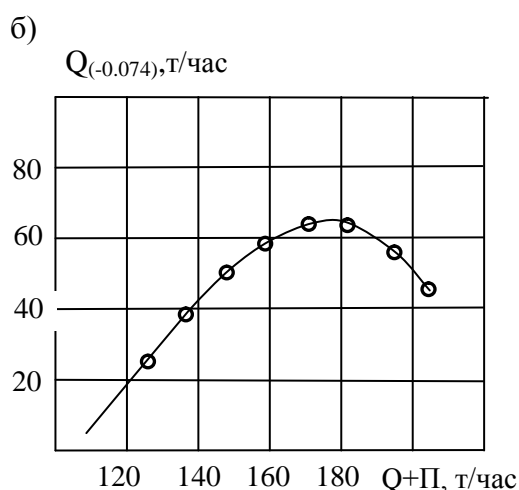


Рис. 1.20б. Зависимость производительности мельниц по готовому классу от суммарной производительности на входе

После совершения шага система делает паузу, ожидая результата скачка, который оценивается по скорости изменения веса циркулирующего материала  $\frac{\Delta\Pi}{\Delta t}$ . В зависимости от знака этой величины выдается команда исполнительному механизму по алгоритму:

Рассогласование управляющего параметра:	Характер команды воздействия регулятора на питатель
Случай I $\frac{\Delta\Pi}{\Delta t} = 0$ , или $\Delta I > \frac{\Delta\Pi}{\Delta t} > 0$	Q увеличить
Случай II $\frac{\Delta\Pi}{\Delta t} > \Delta I > 0$	Q уменьшить
Случай III $\frac{\Delta\Pi}{\Delta t} < 0$	Q = const

где  $\Delta I$  – некоторая наперед заданная величина.

Система работает аналогично, измеряя изменение интенсивности шума мельницы.

Схема и ее описание отличаются четкой постановкой задачи с учетом особенностей, присущих замкнутому циклу измельчения.

В работе [48] О.Н. Тихоновым предложен способ экстремального регулирования измельчительным агрегатом с непрерывным измерением конечной разности. Этот способ снижает размер зоны поиска по сравнению со способом измерения производной, однако поисковые колебания способом не исключаются.

Известны следующие поисковые системы экстремального управления шаровыми мельницами: трехимпульсная СЭР цикла измельчения [141], СЭР плотности разгрузки мельницы [33], самонастраивающаяся система управления загрузкой шаровых мельниц рудой по шуму мельницы [27].

Достоинством рассмотренных СЭР производительности шаровых мельниц является повышение производительности мельниц по сравнению с системами стабилизации. Общим недостатком этих систем является отсутствие

учета физико-механических свойств руды. СЭР оптимизируют производительность измельчительного агрегата только по одному параметру, классу крупности  $-0,074$  мм и не позволяют поддерживать оптимальную загрузку рудой с переменными свойствами.

Известна СЭР с ускоренным выходом измельчительного агрегата на экстремум [12].

Достоинством системы является разработка нового ускоренного метода выхода на экстремум производительности измельчительных агрегатов, исключение поисковых колебаний (кроме процесса выхода на экстремум).

Недостатки: так как параметры объекта  $T$  и  $K$  являются в общем случае переменными, возникает необходимость в коррекции алгоритма вычисления необходимой величины перемещения исполнительного органа.

Известная система экстремального регулирования производительности мельницы мокрого самоизмельчения шагового типа была разработана Вильямсоном [74]. Двухпозиционная система экстремального регулирования загрузки рудой мельниц мокрого самоизмельчения типа «Каскад» была разработана В.А. Вороновым [26]. Вышеуказанные системы отличаются друг от друга конструкцией экстремального регулятора. Экстремальный регулятор изменяет загрузку мельницы рудой таким образом, чтобы мощность приводного двигателя мельницы достигала максимального значения. При определенных технологических режимах система позволяет поддерживать максимальную производительность мельницы по готовому классу  $-0,074$  мм. Ее достоинством является относительная простота, так как в качестве датчика производительности можно использовать стандартные измерительные преобразователи мощности. Недостаток системы в том, что поддержание максимума мощности, потребляемой приводным электродвигателем мельницы, не совпадает с оптимальной крупностью помола руд с переменными свойствами.

Из работы [5] известно, что для технологической диагностики перегрузки мельницы рудой целесообразно применять цифровые вейвлет-фильтры,

которые, которые позволяют повысить надежность систем технологической и технической диагностики перегрузки мельниц рудой.

Функциональная схема системы технологической диагностики перегрузки шаровых мельниц рудой представлена на рис. 1.21. Исходная руда из бункера 1 по конвейеру 2 с производительностью  $Q_0$  поступает в мельницу 3, которая вращается приводным электродвигателем 4. Сигнал активной мощности измеряется преобразователем 5 и поступает на цифровой фильтр 6, который измеряет сигнал активной мощности  $P_M$  на технологической частоте  $\omega_n$ , соответствующей параметрическим фрикционным колебаниям. При нормальном режиме работы мельницы без перегруза логическое устройство 7 не выдает сигнал коррекции на регулятор загрузки 9 через сумматор 8.

При перегрузке мельницы рудой, например при увеличении твердости или крупности руды в сигнале  $P_M$  исчезают инфранизкочастотные технологические колебания. Напряжение на входе логического устройства 7 падает, а на выходе устройства 7 появляется корректирующий сигнал, обозначенный пунктирной линией, который снижает задание  $Q_{03}$  регулятора загрузки 9 и мельница выходит из режима перегрузки. Недостатком этого метода является невозможность поддерживать оптимальное заполнение мельницы рудой с переменными физико-механическими свойствами.

В работе [5] рассмотрен метод звукометрической диагностики перегрузки мельницы рудой, который основывается на статистическом анализе нестационарного изменения звукометрического сигнала мельницы с определением момента изменения статистических характеристик этого сигнала при перегрузке мельницы рудой.

На рис. 1.22 представлена экспериментальная временная диаграмма изменения звукометрического сигнала мельницы МШР 3,6 х 4,0 в нормальном режиме работы – область *A* и в зоне перегрузки – область *B*. Анализ показывает, что в зоне перегруза не только уменьшается сила звука *I*, но и изменяется спектральный состав сигнала.

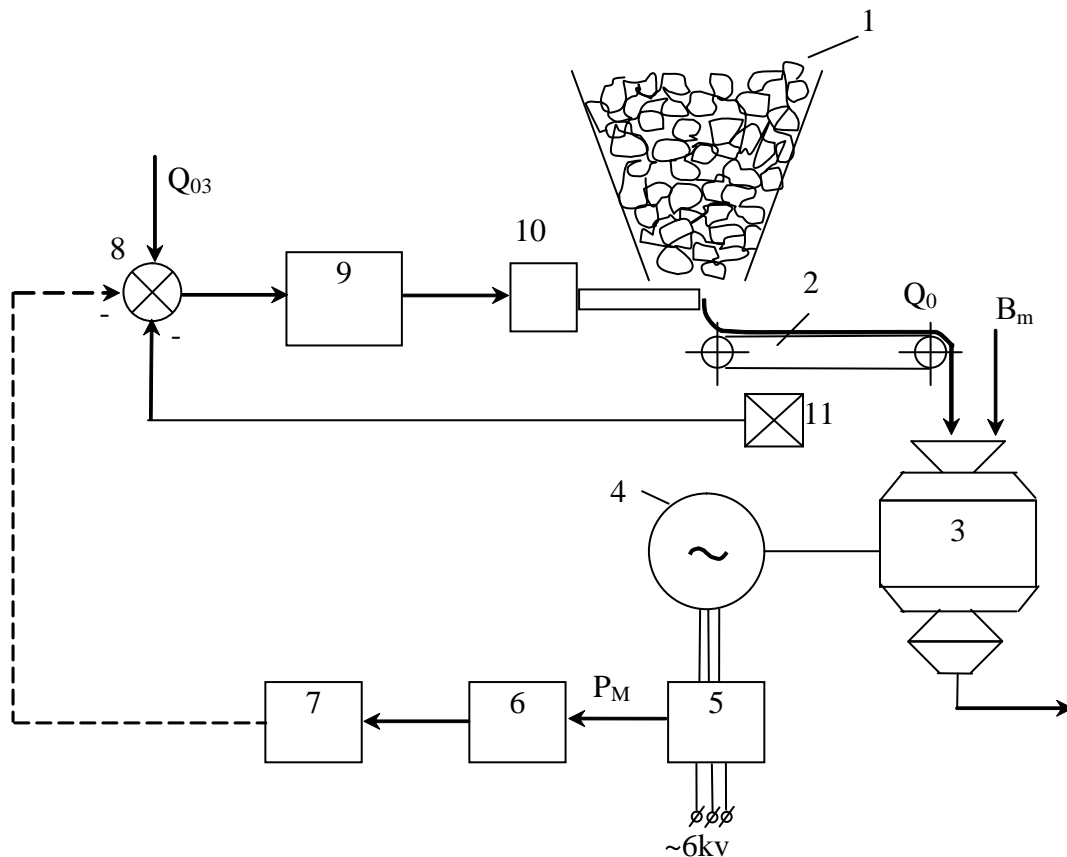


Рис. 1.21. Функциональная схема системы технологической диагностики перегрузки шаровых мельниц рудой:

1 – бункер с рудой; 2 – конвейер 3 – шаровая мельница; 4 – приводной электродвигатель мельницы; 5 – измерительный преобразователь активной мощности  $P_M$  мельницы; 6 – цифровой вейвлет-фильтр; 7 – логическое устройство; 8 – сумматор; 9 – регулятор загрузки мельницы; 10 – вибропитатель;  $Q_{O3}$  – задние регуляторы загрузки;  $Q_O$  – производительность конвейера по исходной руде;  $B_M$  – расход воды в мельнице.

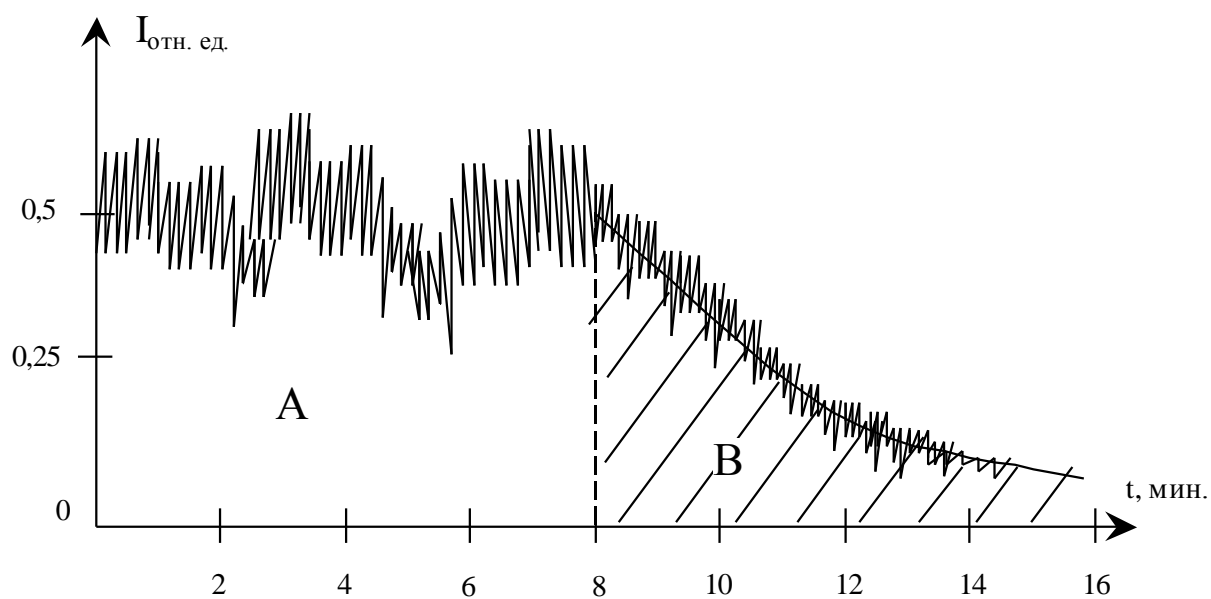


Рис. 1.22. Временная диаграмма звукометрического сигнала мельницы



Это явление связано с изменением режима внутримельничной динамики барабанных мельниц при перегрузке их рудой, а именно с уменьшением амплитуды колебаний рудно-шарового тела. Следовательно, более надежным методом звукометрической диагностики перегрузки мельницы рудой является одновременный контроль силы звука и анализа его спектральных характеристик с целью определения момента времени перегрузки мельницы рудой. Решение этой задачи возможно на основе применения вейвлет преобразования и цифровых вейвлет-фильтров.

На рис. 1.23 представлена функциональная схема системы звукометрической диагностики перегрузки мельницы рудой.

В мельницу 1 по конвейеру 2 поступает руда с производительностью  $Q$  из бункера 3. Звукометрический датчик 7 контролирует силу звука  $I$ . Сигнал пропорционален силе звука  $I$  поступает одновременно на логическую схему “И” 9 и на цифровой вейвлет-анализатор 8. При перегрузке мельницы рудой одновременно уменьшается сила звука и спектральные характеристики звукометрического сигнала. Логическая схема 9 выдает сигнал уменьшения задания регулятору 5 системы регулирования загрузки мельницы рудой, включающий вибропитатель 4 и конвейерные весы 6.

Однако этот метод не позволяет определить, какую степень загрузки мельницы рудой необходимо поддерживать при измельчении и обогащении руд с переменными физико-механическими свойствами.

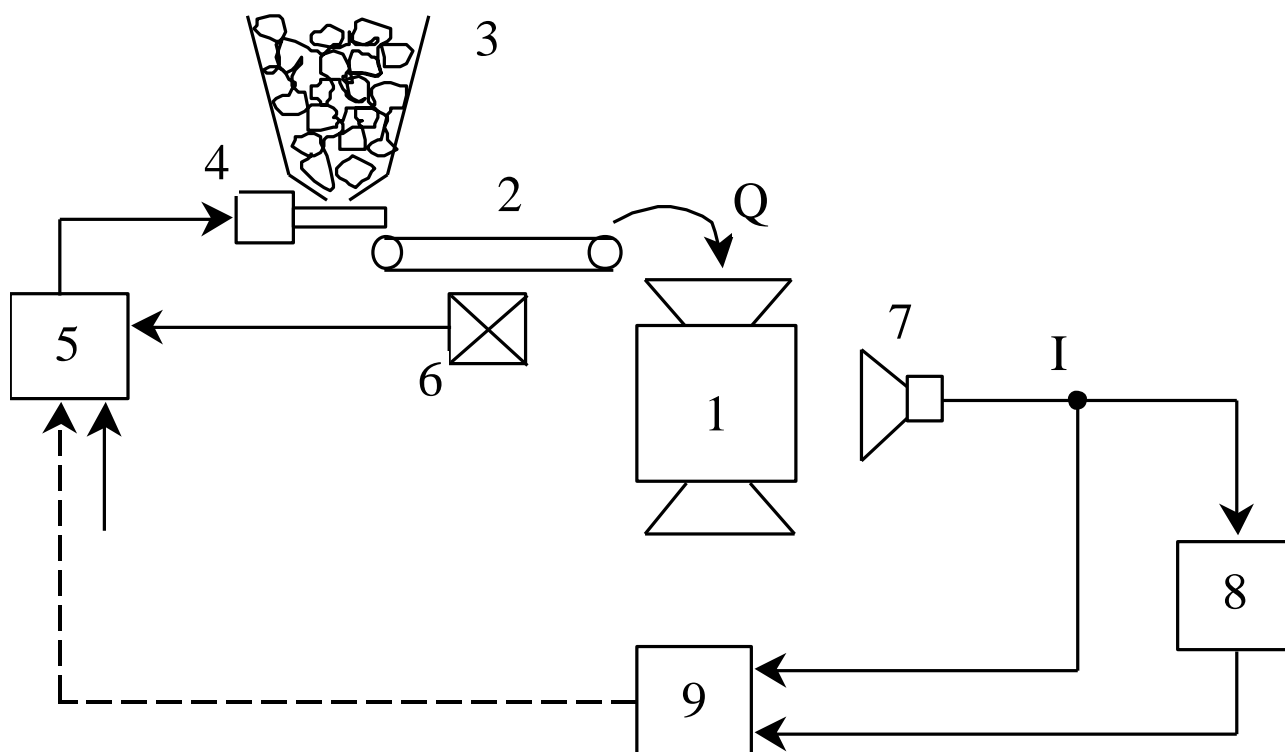


Рис. 1.23. Функциональная схема системы звукометрической диагностики перегрузки мельницы рудой:

1 – мельница; 2 – конвейер; 3 – бункер; 4 – вибропитатель; 5 – регулятор системы регулирования загрузки мельницы рудой; 6 – конвейерные весы; 7 – звукометрический датчик; 8 – вейвлет-анализатор; 9 – логическая схема

## 1.4. Обоснование научной гипотезы метода автоматического контроля степени загрузки барабанных мельниц рудой

Известно, что производительность барабанных мельниц по «готовому» классу продукта измельчения  $Q_{(-0,074)}$  достигается при оптимальной степени заполнения мельницы рудой  $\varphi$  [138]. Статические характеристики шаровой мельницы МШР 3,6х4 представлены на рис. 1.24.

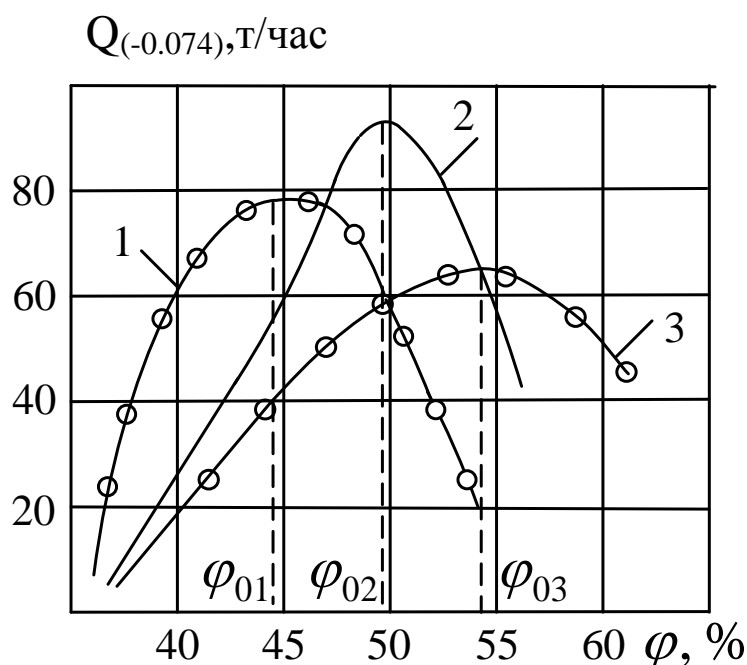


Рис. 1.24. Статические характеристики шаровой мельницы МШР 3,6х4:  
1 — руда средней крепости; 2 — легкоизмельчаемая руда; 3 — трудноизмельчаемая руда

Из рис. 1.24 видно, что максимальная производительность мельницы по готовому классу — 0,074 мм достигается при оптимальной степени заполнения мельницы рудой  $\varphi_0$ . При этом оптимальная степень заполнения мельницы рудой  $\varphi_0$  различная для различных типов руд. Например, для

легкоизмельчаемых руд оптимальная степень заполнения мельницы будет  $\varphi_{02}$ , а для трудноизмельчаемых руд –  $\varphi_{03}$ . Как показано в работе [138] производительность мельницы по «готовому» классу продукта измельчения  $Q_{(-0,074)}$  определяет производительность технологического комплекса магнитной сепарации по магнитному продукту  $Q_M$ . Эта зависимость представлена на рис. 1.25.

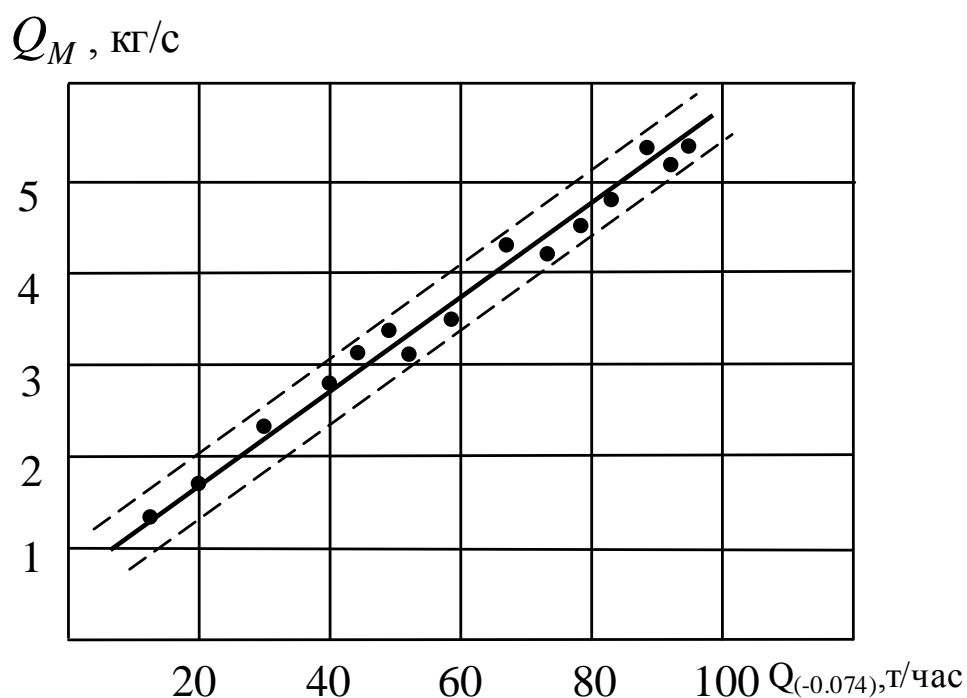


Рис. 1.25. Зависимость производительности комплекса магнитного обогащения по магнитному продукту  $Q_M$  от производительности мельницы по готовому классу  $Q_{(-0,074)}$

В работе [138] показано, что производительность магнитного сепаратора по магнитному продукту можно измерять по сигналу активной мощности электродвигателя барабана сепаратора  $P_c$ . С другой стороны, степень загрузки мельниц рудой  $\varphi$  определяет активную мощность  $P_M$ , потребляемую из сети приводными электродвигателями мельниц.

Представляет научный интерес установить закономерности совместного формирования сигналов активной мощности приводных электродвигателей мельниц  $P_m$  и магнитных сепараторов  $P_c$  в технологических комплексах магнитного обогащения с целью разработки метода автоматического контроля степени загрузки мельниц рудой. Причем для управления процессом обогащения важно не измерять степень загрузки мельницы рудой  $\varphi$  с высокой точностью, что практически невозможно, а определять недогружена или перегружена мельница рудой с целью управления потоком руды на входе технологического комплекса магнитного обогащения.

Установление закономерностей совместного формирования сигналов активной мощности мельниц различных типов и магнитных сепараторов позволяет решить практически важную прикладную задачу, как автоматически поддерживать оптимальную степень загрузки рудой с переменными физико-механическими свойствами, которая обеспечит максимальную производительность комплекса по магнитному продукту.

Научной гипотезой является предположительная экстремальная зависимость сигнала активной мощности электродвигателя магнитного сепаратора от сигнала активной мощности электродвигателя барабанной мельницы в технологических комплексах магнитного обогащения руд.

Теоретическое и экспериментальное подтверждение этой научной гипотезы позволит разработать метод автоматического контроля степени загрузки мельницы рудой с переменными свойствами по двум сигналам активной мощности электродвигателей мельницы и магнитного сепаратора. Это позволит управлять загрузкой мельниц рудой, обеспечить оптимальное раскрытие руды измельчением, упростить системы автоматического контроля степени загрузки мельниц рудой, повысить производительность обогатительной фабрики по концентрату, повысить качество концентрата, снизить переизмельчение и недоизмельчение руды.

## 1.5. Постановка целей и задач исследования

С учётом выполненного выше анализа сформулируем цели и задачи исследования.

Целью исследования является разработка методов автоматического контроля степени загрузки барабанных мельниц железной рудой с переменными физико-механическими свойствами на основании установления закономерностей совместного формирования сигналов активной мощности электродвигателей мельниц и магнитных сепараторов.

Для достижения поставленных целей исследования необходимо решить следующие задачи:

1. Разработать метод повышения точности автоматического контроля производительности магнитного сепаратора по магнитному продукту по спектральной составляющей сигнала активной мощности приводного электродвигателя барабана магнитного сепаратора.

2. Выполнить теоретические и экспериментальные исследования закономерностей формирования статических характеристик технологических комплексов измельчения и магнитной сепарации, связывающих сигналы активной мощности приводных электродвигателей шаровых мельниц, рудногалечных мельниц, мельниц мокрого самоизмельчения с сигналами активной мощности приводного электродвигателя пилотного магнитного сепаратора.

3. Разработать методы и алгоритмы автоматического контроля степени загрузки барабанных мельниц рудой.

4. Разработать функционально-алгоритмические структуры систем автоматического контроля степени загрузки барабанных мельниц рудой, работающих в различных условиях магнитообогажительных фабрик.

Выполнить экспериментальные исследования метода автоматического контроля степени загрузки барабанных мельниц рудой в промышленных условиях магнитообогажительных фабрик.

## РАЗДЕЛ 2. ИССЛЕДОВАНИЕ СИГНАЛА АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ МАГНИТНОГО СЕПАРАТОРА КАК КРИТЕРИЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ОПТИМАЛЬНОЙ ЗАГРУЗКИ БАРАБАНЫХ МЕЛЬНИЦ РУДОЙ

### 2.1. Теоретические зависимости сигнала активной мощности приводного электродвигателя барабана магнитного сепаратора от его производительности по концентрату

Автоматизация технологических комплексов измельчения и магнитного обогащения руд в значительной мере сдерживается из-за отсутствия простых и надежных в эксплуатации датчиков технологических параметров обогащения. Представляет интерес использование для целей автоматического контроля загрузки мельниц рудой сигнала активной мощности приводного двигателя барабана магнитного сепаратора [55], так как оптимальной нагрузке мельницы рудой соответствует максимальная производительность комплекса магнитного обогащения по концентрату.

Известна методика В.И. Кармазина и В.В. Кармазина определения частоты вращения барабана сепаратора по мощности  $P$  электропривода барабана [49]:

$$P = DLn_{\sigma} \left( 40,7 + 0,143d^3 (n_m \pm n_{\sigma})^2 B^2 m^2 / n_{\sigma} \rho + 0,0084\eta D^2 n_{\sigma} / \delta \right), \quad (2.1)$$

где  $D$ ,  $L$  – соответственно диаметр и длина барабана;  $n_{\sigma}$  – частота вращения барабана;  $d$  – толщина барабана;  $n_m$  – частота вращения магнитной системы;  $B$  – магнитная индукция в барабане;  $m$  – число пар полюсов магнитной системы;  $\rho$  – удельное электрическое сопротивление материала барабана;  $\eta$  – коэффициент

внутреннего трения среды;  $f$  – частота магнитного поля;  $\delta$  – плотность пульпы в ванне сепаратора.

Причем первый член правой части уравнения (2.1) дает расход мощности на вращения пустотелого цилиндра, второй – расход мощности на гистерезис и вихревые токи, и третий – на преодоление сопротивления среды вращению барабана.

Для целей автоматизации необходимо определить зависимость полезной активной мощности электропривода сепаратора от характеристик выделенного на его барабане концентрата.

Формула (2.1) не позволяет решить эту задачу, так как в ней не учтено влияние слоя концентрата на барабане на мощность.

Мощность, потребляемую электродвигателем из сети, можно представить в виде суммы ее составляющих:

$$P = P_0 + P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5, \quad (2.2)$$

где  $P_0$  – мощность холостого хода;  $P_1$  – мощность, определяемая статическим моментом от веса слоя концентрата;  $P_2, P_3$  – соответственно мощность, идущая на покрытие потерь от вихревых токов и гистерезиса в барабане;  $P_4$  – потери на гистерезис в слое концентрата;  $P_5$  – мощность, идущая на преодоление сопротивления среды вращению барабана. Согласно (2.1)

$$P_0 = 40,7 D L n_0. \quad (2.3)$$

Мощность, определяемая статическим моментом от веса слоя концентрата

$$P_1 = \frac{\pi d}{180} \left( \frac{R_3 + R_2}{2} \right) L \delta_{cr} \left( R_2 + \frac{d}{2} \right) \sin \beta \cdot \omega, \quad (2.4)$$

где  $\delta_{cr}$  – плотность сгущенного продукта.



Или

$$P = f(K, \delta_{CT}, \Delta), \quad (2.5)$$

где  $K$  – постоянная величина для данного типа магнитного сепаратора.

Как правило, барабаны магнитных сепараторов изготавливают из магнитомягкой нержавеющей стали, поэтому по сравнению с потерями на вихревые токи потери на гистерезис в барабане будут значительно меньше и ими можно пренебречь, следовательно  $P_3 \approx 0$ .

Мощность, идущая на покрытие потерь от вихревых токов [45] в барабане, будет равна

$$P_2 = \frac{4}{3} \gamma K_\phi^2 d^2 f^2 B_{m\phi} V_\phi, \quad (2.6)$$

где  $\gamma$  – удельная проводимость материала барабана;  $K_\phi$  – коэффициент формы кривой э.д.с.;  $d$  – толщина барабана;  $f$  – частота колебаний магнитного поля;  $B_{m\phi}$  – амплитуда колебаний магнитной индукции в барабане магнитного сепаратора;  $V_\phi$  – объем части барабана, находящейся в зоне действия магнитного поля сепаратора

$$V_\phi = \frac{\pi \alpha}{180} \left( \frac{R_1 + R_4}{2} \right) dL, \quad (2.7)$$

где  $\alpha$  – центральный угол части барабана, находящегося в зоне действия магнитного поля.

Потери на гистерезис [45] в слое концентрата

$$P_4 = \eta f B_{mk}^2 V_k, \quad (2.8)$$

где  $\eta$  – коэффициент, зависящий от свойств вещества;  $B_{mk}$  – амплитуда колебаний магнитной индукции в слое концентрата;  $V_k$  – объем слоя концентрата.

При перемещении барабана с магнитным материалом относительно магнитной системы в любой точке на поверхности барабана в рабочей зоне создается бегущее магнитное поле с частотой

$$f = \frac{\omega R_2}{2S}. \quad (2.9)$$

В работе [154] выведены формулы напряженности поля в слое концентрата

$$H_{\underline{\text{II}}} = \frac{2U_0 \lambda^{\gamma-1}}{R_0 \lambda^{\gamma+p} \psi} \sqrt{\gamma^2 + (p^2 - \gamma^2) \sin p\varphi}, \quad (2.10)$$

где  $\varphi$  – угол отклонения точки пространства от вертикально оси симметрии магнитной системы;  $p$  – число пар полюсов;  $R_0$  – радиус магнитной системы;

$$\lambda = \frac{R_2 + \frac{\Delta}{2}}{R_0}; \quad \gamma = \frac{\beta}{2} - \sqrt{\frac{\beta^2}{4} + p^2} < 0, \quad \beta - \text{показатель степени, определяющий}$$

экспоненциальный закон изменения концентрации магнитного железа вдоль радиуса;  $U_0$  – значение потенциала на поверхности полюсов;

$$\psi = \left(1 - \bar{\mu}^* \frac{\gamma}{p}\right) + \lambda_1^{-2p} \left(1 + \bar{\mu}^* \frac{\gamma}{p}\right), \quad \lambda_1 = \frac{R_2}{R_0}, \quad \bar{\mu}^* = \frac{\mu^*}{\mu_0} - \text{относительная магнитная}$$

проницаемость при  $\lambda = \lambda_1$  или  $R = R_1$ ;  $\mu^*$  – магнитная проницаемость концентрата при  $R = R_1$ . Модули напряженности поля в барабане

$$H_I = \sqrt{H_{RI}^2 + H_{\varphi I}^2}. \quad (2.11)$$

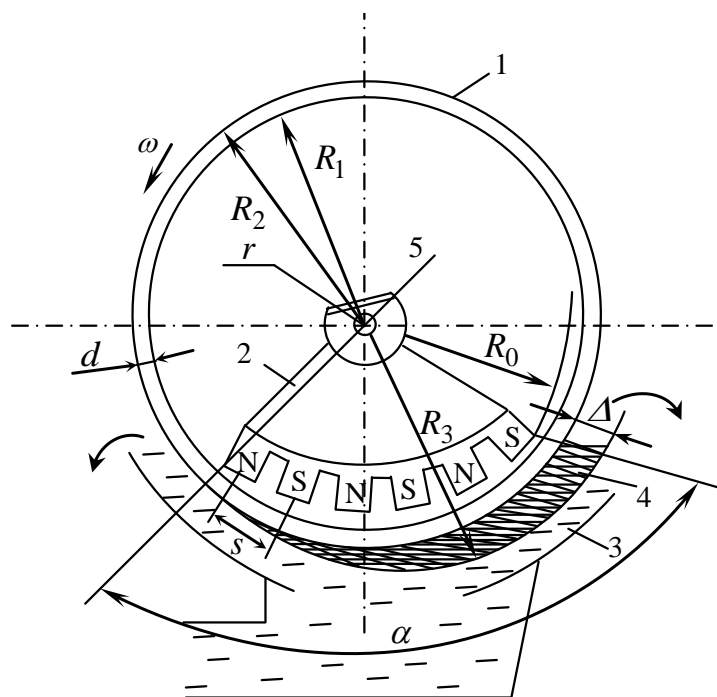


Рис. 2.1. Расчетная схема барабана сепаратора:

1 – барабан; 2 – магнитная система; 3 – ванна; 4 – слой концентрата; 5 – цапфа;  
 $R_0$  – радиус магнитной системы сепаратора;  $R_1, R_2$  – внутренний и внешний диаметры барабана;  $R_3$  – радиус слоя концентрата;  $r$  – диаметр цапфы;  $d$  – толщина барабана;  $s$  – шаг полюсов;  $\alpha$  – угол охвата магнитной системы;  $\Delta$  – толщина слоя концентрата;  $\omega$  – угловая скорость барабана.

Радиальная составляющая напряженности магнитного поля в барабане

$$H_{R1} = \left( \frac{PH_0 R_0^p \psi_1^{-p-1}}{\psi} R + \frac{2pU_0 \psi_2}{R_1^{2p} \psi} R^{2p-1} \right) \cos p\varphi. \quad (2.12)$$

Тангенциальная составляющая напряженности магнитного поля в барабане

$$H_{\varphi 1} = \frac{p}{R} \sin \varphi \left( \frac{U_0 R_0^p \psi_1}{\psi} R^{-p} + \frac{U_0 \psi_2}{R_1^{2p} \psi} R^{2p} \right), \quad (2.13)$$

где  $\psi_1 = 1 - \mu^* \frac{\gamma}{p}$ ;  $\psi_2 = 1 + \mu^* \frac{\gamma}{p}$ ;  $R = R_2 + \frac{\Delta}{2}$ . В формулу (2.6) подставляем

значение  $B_{m\bar{b}} = \mu^* \mu_0 H_{\text{Имак}}$ . В формулу (2.8) подставляем значение

$B_{m\bar{b}} = \mu^* \mu_0 H_{\text{Имак}}$ . Мощность, идущая на покрытие гидродинамического сопротивления среды

$$P_5 = F_c (R_2 + \Delta) \omega, \quad (2.14)$$

где  $F_c$  – сила лобового сопротивления.

В гидродинамике задача нахождения силы, действующей на тело, движущееся в жидкости, эквивалентна задаче о силовом воздействии потока жидкости на находящееся в ней тело, а сила, действующая в направлении потока, называется силой лобового сопротивления. На преодоление этой силы и будет затрачиваться мощность  $P_5$ .

Так как в рабочей зоне ламинарен и постоянен, воспользуемся формулой гидродинамики [37]

$$F_c = C \frac{\rho S_{\text{max}}}{2} V_0^2, \quad (2.15)$$

где  $\rho$  – плотность пульпы в ванне сепаратора;  $S_{max}$  – максимальная площадь поперечного сечения барабана сепаратора в плоскости, перпендикулярной направлению потока;  $V_0$  – скорость движения пульпы относительно барабана сепаратора;  $C$  – коэффициент лобового сопротивления,  $C \leq 1,11$  для нашего случая.

$$S_{max} = aL_{\delta}, \quad (2.16)$$

где  $a$  – глубина погружения барабана сепаратора;  $L_{\delta}$  – длина барабана сепаратора.

$$V_0 = |V_{\delta} - V_{\pi}|, \quad (2.17)$$

где  $V_{\delta}$  – скорость вращения барабана,  $V_{\delta} = \omega(R_2 + \Delta)$ ;  $V_{\pi}$  – скорость движения пульпы в ванне сепаратора, описывается уравнением [37]:

$$V_{\pi} = \frac{6Qr}{h^2} \left(1 - \frac{r}{h}\right) \pm V_{\delta} \left(1 - 4\frac{r}{h} + 3\frac{r^2}{h^2}\right), \quad (2.18)$$

где  $Q$  – расход пульпы на единицу длины барабана;  $h$  – расстояние между поверхностью барабана и дном ванны сепаратора,  $0 \leq r \leq h$ .

В таком случае необходимо определить скорость пульпы в зоне, где она обтекает слой концентрата толщиной  $\Delta$  на барабане сепаратора, то есть  $r = \Delta$ . В формулах (2.4), (2.10), (2.11), (2.18) толщина слоя концентрата [94]:

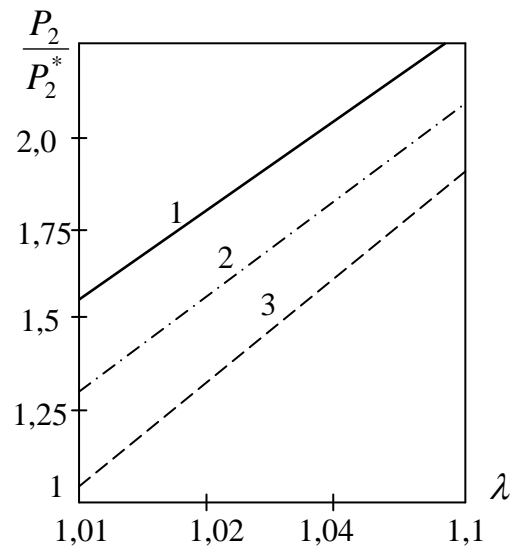
$$\Delta = \frac{Q_T}{0,6V_{\delta}L\delta_T\rho_{\pi\pi}}, \quad (2.19)$$

где  $\delta_T$  – плотность твердой фазы пульпы;  $\rho_{\pi\pi}$  – концентрация твердого в слое пульпы;  $Q_T$  – производительность сепаратора по твердому.

По формулам (2.4)-(2.19) был выполнен расчет зависимости относительно активной мощности  $\frac{P_2}{P_2^*}$  и  $\frac{P_4}{P_2^*}$  приводного двигателя барабана магнитного сепаратора ПБМ-ПП-120/300 от относительной толщины слоя концентрата  $\lambda$  для различных значений магнитной проницаемости слоя  $\mu$ ,  $P_2^*$  – активная мощность, расходуемая на покрытие потерь на вихревые токи в пустом барабане.

Анализ результатов расчета показал, что максимальный удельный вес в активной мощности, потребляемой приводным электродвигателем барабана магнитного сепаратора, имеет активная мощность, расходуемая на покрытие потерь от вихревых токов  $P_2$  (рис 2.2).

а)



б)

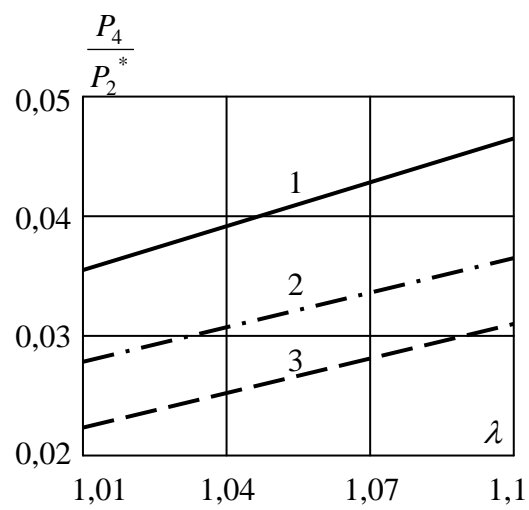


Рис. 2.2. Расчетные зависимости активной мощности

а) потери на вихревые токи;      б) потери на гистерезис

1 –  $\mu_1 = 2.9, \beta = 10$  ; 2 –  $\mu_1 = 2.879, \beta = 11.36$  ; 3 –  $\mu_1 = 2.71, \beta = 13.98$

## **2.2. Частотный информационный анализ сигнала активной мощности приводного электродвигателя магнитного сепаратора**

Производительность технологических комплексов магнитного обогащения железных руд является одним из важнейших технологических параметров магнитообогатительных фабрик. Этот параметр в значительной мере определяет технико-экономические показатели производства железорудного концентрата. Заполнение мельниц рудой определяет производительность технологических комплексов магнитного обогащения и определяет производительность магнитных сепараторов по магнитному продукту. Отсутствие надежных и точных методов и систем автоматического контроля производительности не позволяет достичь высоких показателей качества концентрата.

Последним достижением в области автоматического контроля производительности магнитного сепаратора по магнитному продукту является метод автоматического контроля этого технологического параметра по сигналу среднего значения активной мощности, потребляемой электродвигателем барабана сепаратора [57]. Известен также метод автоматического контроля производительности по сухому выделенному концентрату секции магнитного обогащения после последней стадии магнитной сепарации, сгущения и сушки, с помощью конвейерных весов. Однако этот метод невозможно применить для автоматического контроля производительности по магнитному продукту магнитных сепараторов первой, второй и третьей стадий магнитной сепарации, так как сгущенный магнитный продукт поступает по трубопроводам или желобам непосредственно в технологические ёмкости. Поэтому установка конвейерных весов невозможна.

Метод автоматического контроля производительности магнитного сепаратора по сигналу среднего значения активной мощности электродвигателя



барабана сепаратора обладает невысокой точностью из-за влияния и изменения мощности холостого хода электропривода.

В этом подразделе приводится научное обоснование метода повышения точности автоматического контроля производительности магнитного сепаратора по магнитному продукту на основе исследования закономерностей формирования пульсаций сигнала активной мощности электродвигателя барабана сепаратора [158]. Для целей автоматизации необходимо определить зависимость полезной активной мощности электропривода сепаратора от характеристик самого привода, конструктивных особенностей сепаратора, количества выделенного на его барабане концентрата. В работе [138] показано, что сигнал активной мощности приводного электродвигателя барабана сепаратора пульсирует с частотой бегущего магнитного поля, которая определяется радиусом барабана, скоростью его вращения и шагом полюсов, а для устранения влияния составляющих мощностей холостого хода и гидродинамического сопротивления при косвенном контроле производительности сепаратора по магнитному продукту активную мощность, расходуемую на покрытие потерь от вихревых токов и гистерезиса, можно определить путем её измерения на частоте бегущего магнитного поля.

Создание математических моделей различных барабанных магнитных сепараторов с постоянными магнитами для мокрого обогащения сильномагнитных руд с учетом всего вышесказанного для последующего моделирования позволит сделать вывод о целесообразности использования тех или иных промышленных магнитных сепараторов для получения оперативной информации о ходе технологических процессов рудоподготовки.

В ряде промышленных установок, к числу которых относится и магнитный сепаратор, статический момент нагрузки или момент инерции привода изменяются периодически, в результате чего асинхронный короткозамкнутый двигатель становится источником колебательной составляющей момента. Амплитуду и действительную частоту колебаний при периодической нагрузке можно определить из уравнения движения привода, и

если резонансная частота системы будет близка к частоте бегущего магнитного поля, то малым изменениям нагрузки сепаратора будут соответствовать значительные изменения потребляемой активной мощности привода. В работе [119] была выведена зависимость амплитуды колебаний момента двигателя, отнесенная к амплитуде колебаний момента нагрузки

$$M^{\partial} = \frac{1}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{f}{f_0}\right)^2\right]^2 + \left(\frac{f}{f_0}\right)^2 \frac{T_M}{T}}}, \quad (2.20)$$

где  $T = \frac{1}{n_0 s_K}$  – электромагнитная постоянная времени двигателя;  $T_M = \frac{J n_0 s_K}{2 p M_K}$  – электромеханическая постоянная времени системы;  $n_0$  – обороты ненагруженного асинхронного двигателя;  $s_K$  – скольжение двигателя при критическом моменте нагрузки на его валу;  $M_K$  – критический момент двигателя;  $p$  – число пар полюсов двигателя;  $f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{2 p M_K}{J}}$  – собственная частота колебаний системы;  $J$  – момент инерции барабана сепаратора со слоем концентрата.

Для определения момента инерции  $J$ , приведенного к валу электродвигателя, воспользуемся формулой проф. Кармазина В.И. [49]

$$J = \frac{\pi \rho h (r^4 + 4R^3 r + 6R^2 r^2 + 4R r^3)}{2n} + mR^2, \quad (2.21)$$

где  $\rho$  – плотность сгущенного продукта;  $R$  – радиус барабана;  $r$  – радиус слоя концентрата;  $h$  – длина сепаратора;  $n$  – скорость вращения.

Толщину слоя промпродукта на барабане сепаратора можно определить по формуле из работы [94]:

$$d = Q \frac{1000D}{\rho v h}, \quad (2.22)$$

где  $D$  – содержание магнитного продукта в промпродукте, %;  $\rho$  – плотность сгущенного продукта, г/л;  $h$  – длина барабана сепаратора, м;  $Q$  – производительность барабана по твердому, т/ч;  $v = \frac{2\pi R 60}{t}$  – линейная скорость вращения барабана, м/ч;  $R$  – радиус барабана, м;  $t = \frac{1}{u}$  – время одного оборота барабана, мин;  $u$  – частота вращения барабана сепаратора, 1/мин.

Частота бегущего магнитного поля в любой точке на поверхности барабана в рабочей зоне определяется по формуле

$$f = \frac{\omega R}{2s}, \quad (2.23)$$

где  $\omega = \frac{\pi n}{30}$ , рад/с – угловая скорость барабана;  $s$  – шаг полюсов магнитной системы сепаратора, м.

Окончательно

$$f = \frac{\pi n R}{60s}. \quad (2.24)$$

Анализ приведенных формул показывает, что частоту бегущего магнитного поля можно менять без потерь производительности, изменяя шаг полюсов магнитной системы сепаратора. При этом появляется вариант, когда она совпадает с резонансной частотой колебаний момента нагрузки, которая находится в зависимости от постоянных времени двигателя и системы и определяется выражением

$$f_p = f_0 \sqrt{1 - \frac{T_M}{2T}}. \quad (2.25)$$

На рис. 2.3 показано семейство кривых  $M^\partial(f^*)$  для разных барабанных магнитных сепараторов с постоянными магнитами, где  $f^* = \frac{f}{f_0}$ . Здесь же показаны частоты бегущих магнитных полей для каждого типа сепаратора с различными типами электродвигателей. Например, для сепаратора типа 167 СЭ кривая 1 соответствует электродвигателю АОЛ2-22-6У3 (1,1 кВт), а кривая 2 – электродвигателю 26-СБ-4А112МА8У3 (2,2 кВт). Для сепаратора ПБМ-4ППА кривая 3 соответствует электродвигателю АОЛ2-42-8У3, а для сепаратора ПБМ-90/250 кривая 4 соответствует электродвигателю 4А132S8У3 (4 кВт).

На рис. 2.4 приведена зависимость амплитуды колебаний момента двигателя, отнесенная к амплитуде колебаний момента нагрузки для сепаратора типа ПБМ-90/250. Шаг полюсов магнитной системы этого сепаратора был изменен с 0,168 на 0,012 м, собственная частота колебаний системы 47,188 Гц, резонансная частота колебаний момента нагрузки 46,906 Гц, частота бегущего магнитного поля при старом шаге полюсов магнитной системы сепаратора 3,25 Гц, при новом – 47,125 Гц. Для сепаратора ПБМ-ПП-120/300 частота бегущего поля составляет 5 Гц.

Анализ этого графика показывает, что даже небольшие, порядка 0,1...0,05 Гц, изменения частоты бегущего магнитного поля вызывают достаточно ощутимые изменения момента двигателя, которые уже можно фиксировать и анализировать.

Амплитуда колебаний момента при резонансе

$$M_p^\partial = \frac{1}{\sqrt{\frac{T_M}{T} - \left(\frac{T_M}{2T}\right)^2}}. \quad (2.26)$$

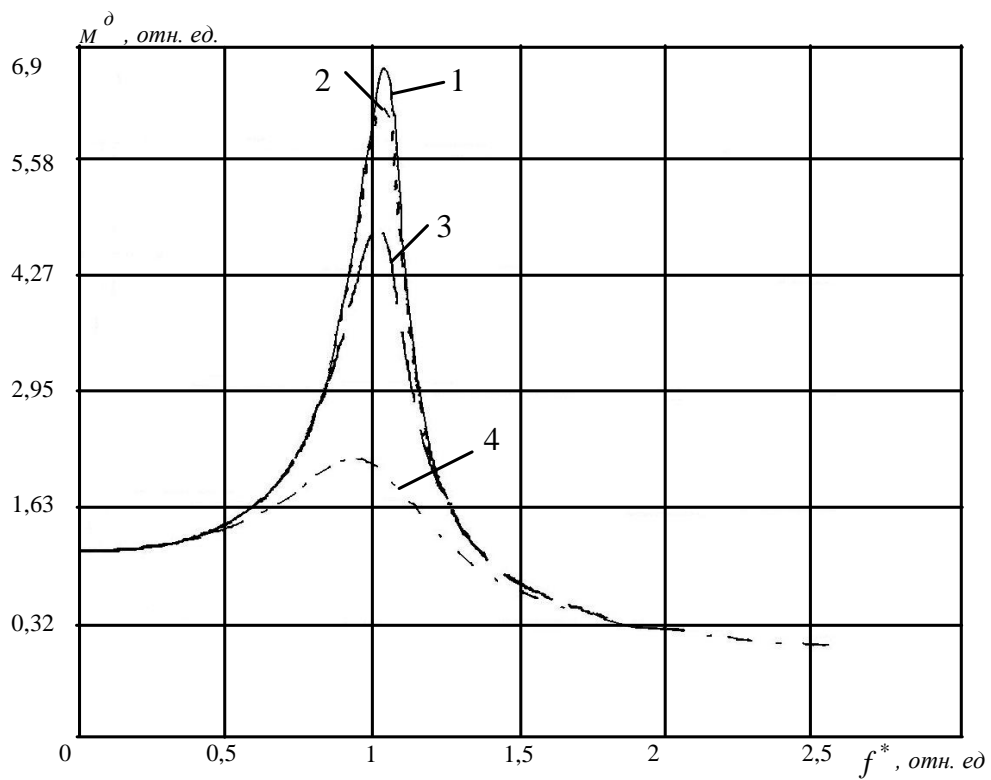


Рис. 2.3. Семейство кривых для разных типов электродвигателей сепараторов:

- 1 – электродвигатель АОЛ2-22-6У3 (1,1 кВт);
- 2 – электродвигатель 26-СБ-4А112МА8У3 (2,2 кВт);
- 3 – электродвигатель АОЛ2-42-8У3 (3 кВт);
- 4 – электродвигатель 4А132S8У3 (4 кВт).

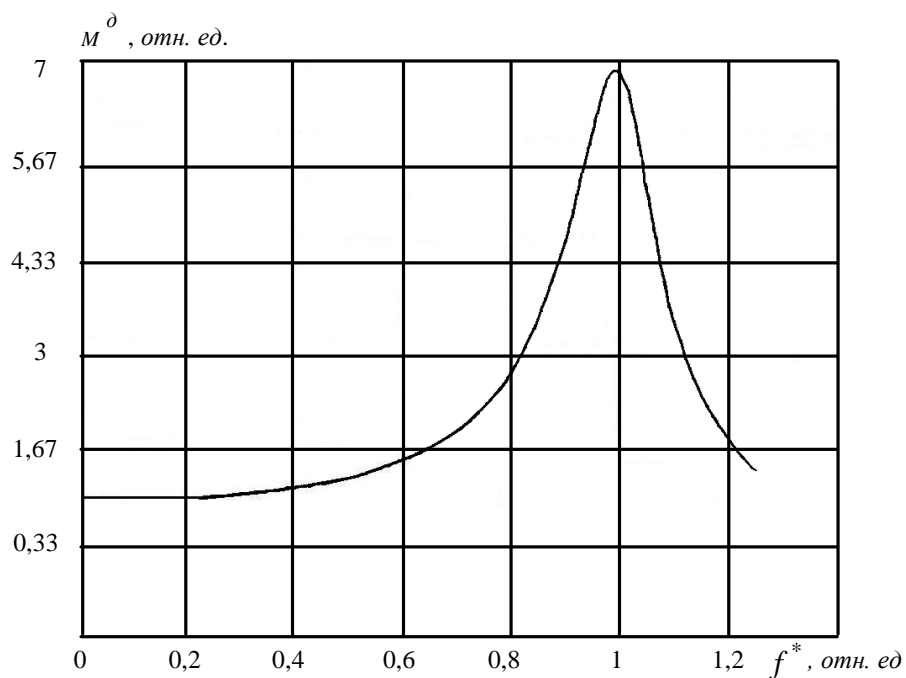


Рис. 2.4. Сепаратор ПБМ-90/250 с измененным шагом полюсов магнитной системы.

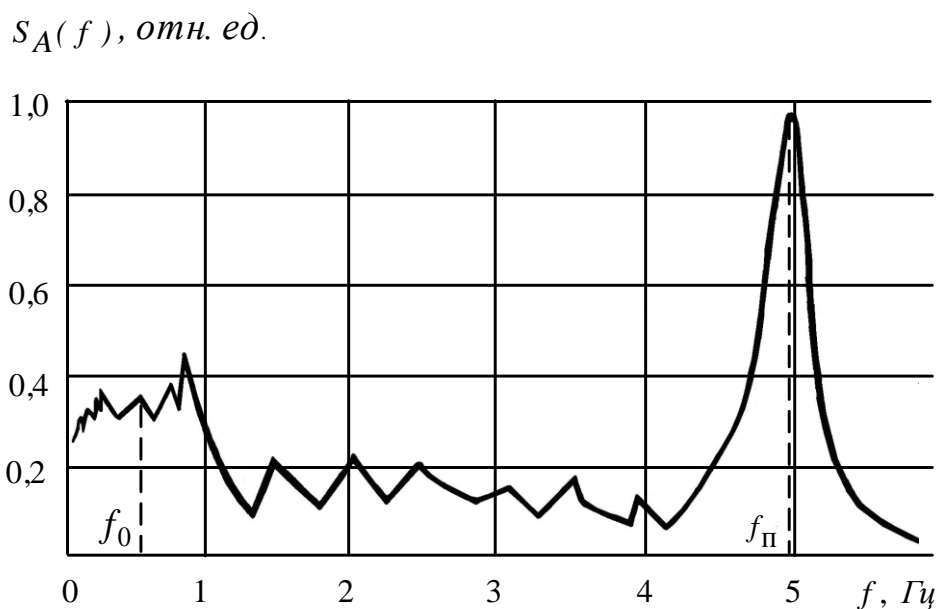


Рис. 2.5. Типовая спектральная плотность сигнала активной мощности электродвигателя магнитного сепаратора ПБМ-ПП-120/300:

$f_0$  – оборотная частота колебаний сигнала активной мощности;  $f_{II}$  – частота бегущего магнитного поля сепаратора.

На рис. 2.5 показана типовая спектральная плотность сигнала активной мощности электродвигателя магнитного сепаратора ПБМ-ПП-120/300.

Частота  $f_0$  обусловлена состоянием механической части сепаратора и гидродинамическим сопротивлением, а  $f_{\pi}$  – частота бегущего магнитного поля сепаратора, создаваемого магнитной системой сепаратора во вращающемся слое концентрата

$$f_{\pi} = \frac{\omega R_{\text{Б}}}{2p}, \quad (2.27)$$

где  $\omega$  – угловая скорость вращения барабана;  $R_{\text{Б}}$  – радиус барабана сепаратора;  $p$  – шаг полюсов.

На основании результатов расчета, представленного на рис. 2.3, можно сделать вывод, что для обеспечения чувствительности колебаний динамического момента по валу приводного электродвигателя барабана сепаратора нецелесообразно выбирать необходимую мощность приводного электродвигателя при проектировании магнитных сепараторов. Обычно коэффициент запаса по мощности выбирается в диапазоне 1,2-1,5. Целесообразно выбирать минимально допустимое значение коэффициента запаса. Это повышает чувствительность и точность метода измерения производительности магнитного сепаратора по магнитному продукту по сигналу активной мощности приводного электродвигателя сепаратора.

### 2.3. Сравнительные экспериментальные исследования методов автоматического контроля производительности магнитных сепараторов по сигналам активной мощности приводного электродвигателя

Экспериментальные исследования проводились в условиях фабрики обогащения ФОб-3 Лебединского ГОКа [159]. Схема проведения эксперимента приведена на рис. 2.7. Исходная руда поступает в мельницу 1 мокрого измельчения ММС90х30 из бункера с рудой 2. Мельница приводится в движение синхронным электродвигателем 3 и работает в замкнутом цикле со спиральным классификатором 5. Степень заполнения мельницы рудой  $\varphi$  контролировалась с помощью радиоизотопного индикатора заполнения 6 типа РИЗМ. По показаниям вторичного прибора 7 заданное значение степени заполнения стабилизируется с помощью системы автоматического регулирования загрузки, в которую входит регулятор загрузки 8 и вибропитатель 9. Активная мощность приводного двигателя 3 мельницы  $P_M$  измерялась измерительным преобразователем мощности 10 и вторичным прибором 11. Плотность слива классификатора  $\gamma$  измеряется радиоизотопным плотномером 12 и вторичным прибором 13 и стабилизируется регулятором 14 и регулирующим клапаном 15 расхода воды в классификатор 5. Рудная пульпа поступает на магнитный сепаратор 16 типа ПБМ-ПП-120/300. Расход воды в мельницу и классификатор контролировался расходомерами  $W_M$  и  $W_K$ . Измерительные преобразователи 10 и 18 измеряли сигналы активной мощности приводного электродвигателя магнитного сепаратора  $P_C$  и мельницы  $P_M$ . Из сигнала  $P_C$  выделялась динамическая составляющая  $\tilde{P}_C$  с помощью фильтра 19 на частоте пульсаций магнитного поля. Производительность сепаратора по магнитному продукту измерялась с помощью мерной емкости 20 и хронометра 21.



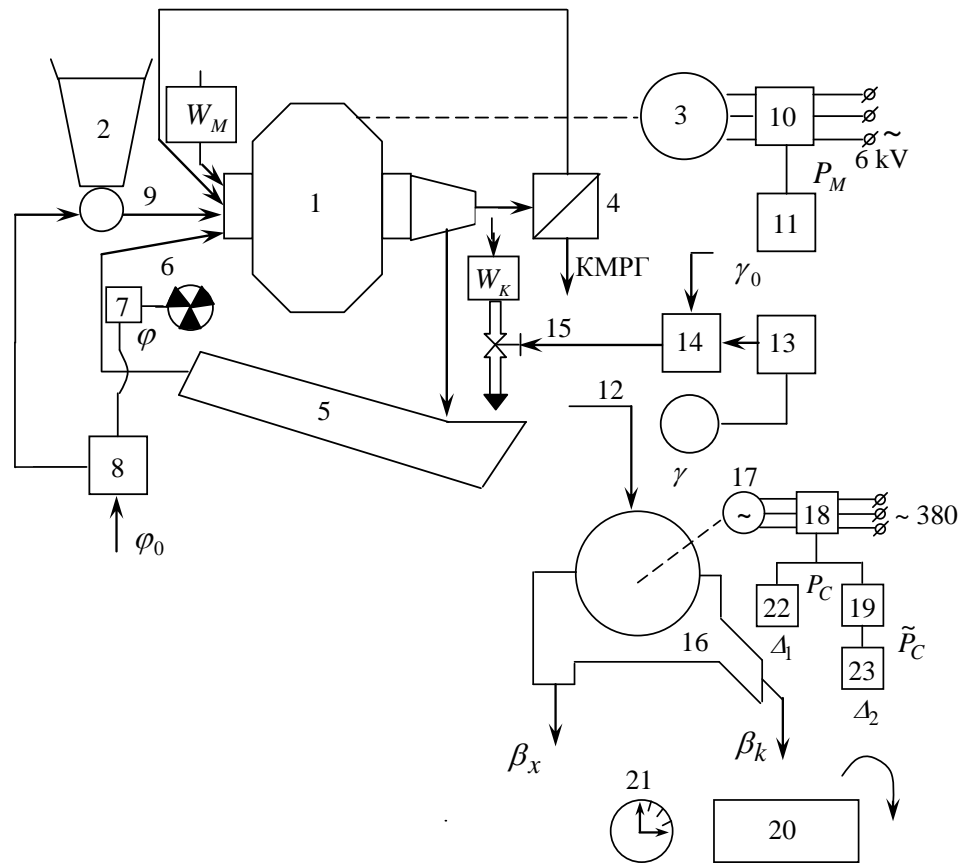


Рис. 2.6. Схема проведения эксперимента:

1 – мельница мокрого самоизмельчения; 2 – бункер; 3 – электродвигатель мельницы; 4 – регулирующий орган; 5 – классификатор; 6 – радиоизотопный индикатор; 7, 11, 13, 22, 23 – вторичные приборы; 8 – регулятор загрузки; 9 – вибропитатель; 10, 18 – измерительные преобразователи активной мощности; 12 – радиоизотопный плотномер; 14 – регулятор плотности; 15 – регулирующий клапан расхода воды; 16 – магнитный сепаратор; 17 – электродвигатель сепаратора; 19 – активный фильтр; 20 – мерная емкость; 21 – секундомер;  $P_C$  – сигнал активной мощности электродвигателя сепаратора;  $\tilde{P}_C$  – динамическая составляющая активной мощности электродвигателя сепаратора, измеренная на частоте пульсаций магнитного поля;  $P_M$  – сигнал активной мощности электродвигателя мельницы;  $\beta_k$  – массовая доля железа в концентрате;  $\beta_x$  – массовая доля железа в хвостах;  $\gamma_0$  – задание регулятору плотности пульпы;  $\gamma$  – плотность слива классификатора;  $\Delta_1$   $\Delta_2$  – показания вторичных приборов 22 и 23.

Во время эксперимента проводился пробоотбор концентрата магнитного сепаратора 16 и выполнялся анализ проб на массовую долю магнитного железа  $\beta_k$  в концентрате.

Объемный расход пульпы в мерную ёмкость:

$$W = W_B + W_T = \frac{Q_B}{\gamma_B} + \frac{Q_T}{\gamma_T}, \quad (2.28)$$

где:  $Q_B$ ,  $Q_T$ ,  $W_B$ ,  $W_T$  – соответственно массовые и объемные расходы воды и твердого;  $\gamma_B$ ,  $\gamma_T$  – соответственно плотность воды и твердого.

Из выражения (2.31), с учетом того, что  $W = \frac{V}{t}$ , где  $V$  – объем мерной емкости;  $t$  – время заполнения емкости, определим производительность сепаратора по магнитному железу:

$$Q = Q_M = \beta_k \gamma_T \left( \frac{V}{t} - \frac{Q_B}{\gamma_B} \right). \quad (2.29)$$

Расход воды в мельницу и классификатор  $Q_B$  контролировался по показаниям расходомеров  $W_M$  и  $W_K$

$$Q_B = B_M + B_K, \quad (2.30)$$

где  $B_M$  – массовый расход воды в мельницу;  $B_K$  – массовый расход воды в классификатор.

Эксперимент проводился в течение трех смен. Отбирались в установившемся режиме технологические пробы концентрата, и фиксировалось время заполнения мерной емкости. По формуле (2.32) рассчитывались значения

$Q_m$  и измерялись показания вторичных приборов 22 –  $\Delta_1$  и 23 –  $\Delta_2$ . Данные эксперимента представлены в таблице 1 (см. приложение А).

Уравнения регрессии зависимостей  $\Delta_1 = f(Q_m)$  и  $\Delta_2 = f(Q_m)$  рассчитывалось на компьютере с помощью табличного процессора EXCEL и представлены на рис. 2.8.

Результаты расчета:

1) уравнение регрессии 1:  $\Delta_1 = 1,35Q_m - 22,82$ ; коэффициент детерминации  $r^2 = 0,87$ ; коэффициент корреляции  $r = 0,93$ ;

2) уравнение регрессии 2:  $\Delta_2 = 3,4Q_m - 57,75$ ; коэффициент детерминации  $r^2 = 0,991$ ; коэффициент корреляции  $r = 0,995$ .

Точность метода контроля производительности магнитного сепаратора по сигналу активной мощности:

$$T_1 = \frac{\delta_1}{Q_{max} - Q_{min}} \cdot 100\% = \frac{0,36}{20 - 17,2} \cdot 100\% = 13\%,$$

где  $\delta_1$  – доверительный интервал уравнения регрессии 1;  $Q_{max}, Q_{min}$  – максимальное и минимальное значение производительности.

Точность метода измерения производительности магнитного сепаратора по сигналу динамической составляющей активной мощности, измеренной на частоте пульсаций магнитного поля сепаратора:

$$T_2 = \frac{\delta_2}{Q_{max} - Q_{min}} \cdot 100\% = \frac{0,13}{20 - 17,2} \cdot 100\% = 4,7\%,$$

где  $\delta_2$  – доверительный интервал уравнения регрессии 2.

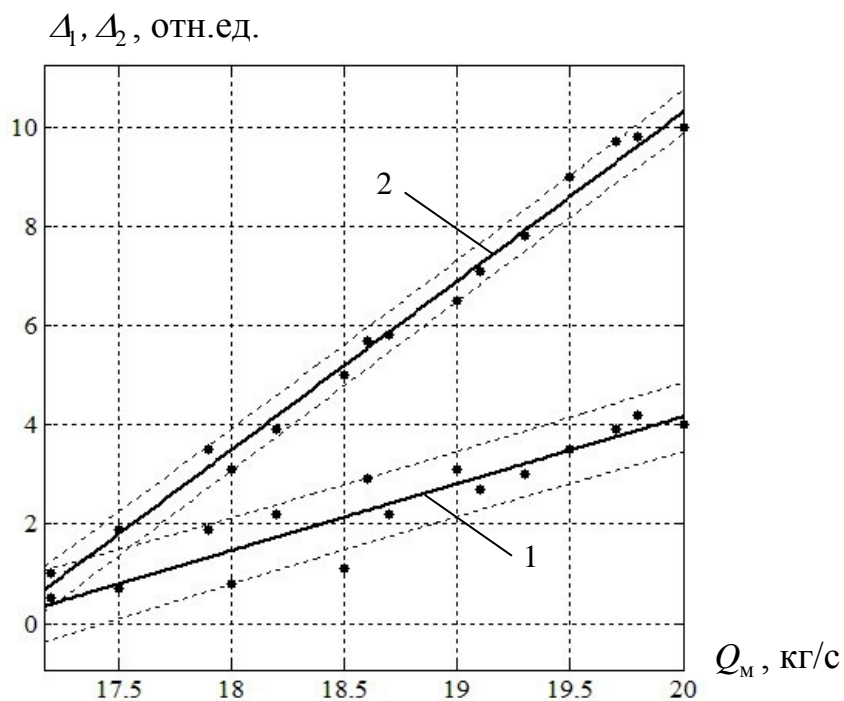


Рис. 2.7. Статические характеристики двух методов измерения производительности сепаратора:

- 1 – статическая характеристика метода контроля производительности магнитного сепаратора по сигналу активной мощности;
- 2 – статическая характеристика метода измерения производительности магнитного сепаратора по сигналу динамической составляющей активной мощности, измеренной на частоте пульсаций магнитного поля сепаратора

## Выводы

На основании выполненных исследований можно сделать следующие выводы.

1. Активная мощность, расходуемая на покрытие потерь на вихревые токи и гистерезис, зависит от толщины слоя концентрата на барабане и его магнитной проницаемости.

2. Сигнал активной мощности приводного электродвигателя барабана сепаратора может быть использован для косвенного автоматического контроля производительности магнитного сепаратора по магнитному продукту и оптимальной степени загрузки мельниц рудой.

3. Сигнал активной мощности приводного электродвигателя барабана сепаратора пульсирует с частотой бегущего магнитного поля, которая определяется радиусом барабана, скоростью его вращения и шагом полюсов.

4. Для устранения влияния составляющих мощностей холостого хода и гидродинамического сопротивления при косвенном контроле производительности сепаратора по магнитному продукту активную мощность, расходуемую на покрытие потерь от вихревых токов и гистерезиса, необходимо измерять на частоте пульсаций магнитного поля сепаратора.

5. Анализ статических характеристик показывает, что точность метода автоматического контроля производительности сепаратора по магнитному продукту по сигналу среднего значения активной мощности составляет  $\delta_1=13\%$  относительных единиц, а точность метода автоматического контроля производительности сепаратора по магнитному продукту по сигналу переменной составляющей активной мощности электродвигателя сепаратора, измеренной на частоте пульсаций бегущего магнитного поля сепаратора  $\delta_2=4,7\%$  относительных единиц, т.е.  $\delta_2 < \delta_1$ . Следовательно, точность измерения производительности магнитного сепаратора по спектральной составляющей сигнала активной мощности на частоте бегущего магнитного поля сепаратора повышается по сравнению с известным методом.

6. Повышение точности автоматического контроля производительности магнитного сепаратора по магнитному продукту возможно по спектральной составляющей сигнала активной мощности электродвигателя сепаратора, изменяющейся с частотой бегущего магнитного поля в рабочей зоне сепаратора. Чувствительность метода измерения производительности магнитного сепаратора по магнитному продукту определяется соотношением электромагнитной и электромеханической постоянными электродвигателя сепаратора, причем при увеличении числа пар полюсов магнитной системы сепаратора чувствительность метода измерения повышается.

### **3. РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ АВТОМАТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ СТЕПЕНИ ЗАГРУЗКИ БАРАБАННЫХ МЕЛЬНИЦ РУДОЙ**

#### **3.1. Моделирование влияния загрузки шаровой мельницы рудой на раскрытие железной руды**

Шаровые мельницы, последовательно соединенные с барабанными магнитными сепараторами, работают во вторых стадиях обогащения железных руд магнитообогатительных фабрик. В большинстве работ по автоматизации процессов измельчения основное внимание уделяется автоматизации шаровых мельниц, работающих в первых стадиях измельчения в замкнутом цикле со спиральными классификаторами. Известные принципы автоматизации вторых стадий измельчения [85] повторяют принципы автоматизации первых стадий измельчения. Однако технологические требования к автоматизации первых и вторых стадий различны. Поэтому и принципы автоматизации первых и вторых стадий измельчения должны быть разными.

Первая стадия измельчения относится к процессам рудоподготовки. Здесь главным является предварительное измельчение исходной руды с последующим выделением максимального количества бедных фракций и пустой породы. Задачей вторых стадий измельчения является раскрытие рудных сростков в промежуточном продукте, поступившем на вторую стадию обогащения после первой стадии. При этом требуемая крупность измельчения определяется требуемой массовой долей железа в продукте измельчения в соответствии с технологической картой. Требуемая крупность измельчения не может быть обеспечена известным критерием управления «максимальная производительность по классу – 0,074мм» по трем причинам: шаровая мельница работает в середине технологической линии и ее производительность задается производительностью предыдущего оборудования и не может быть максимальной; требуемая крупность измельчения задается крупностью вкрапления железа и является величиной переменной, а не фиксированной, равной 0,074 мм. Кроме того во вторых стадиях измельчения применяются

шаровые мельницы с центральной разгрузкой, а не мельницы с решеткой как в первых стадиях измельчения. В настоящее время отсутствуют научно обоснованные принципы автоматизации шаровых мельниц работающих во вторых стадиях магнитообогатительных фабрик.

В данном параграфе научно обосновываются принципы автоматизации загрузки шаровых мельниц, работающих последовательно с магнитным сепаратором, на основе моделирования процессов измельчения и магнитной сепарации железных руд [157].

Схема цепи аппаратов второй стадии измельчения – магнитной сепарации представлена на рис. 3.1.

Рассмотрим математическую модель шаровой мельницы. Уравнение Тунцова-Загустина определяет кинетику измельчения и имеет вид

$$\frac{1}{\bar{d}_2} - \frac{1}{\bar{d}_1} = k_1 t, \quad (3.1)$$

где  $\bar{d}_1, \bar{d}_2$  – соответственно средние крупности руды на входе и выходе мельницы;  $t$  – время измельчения;  $k_1$  – постоянный коэффициент определяющий условия измельчения.

Коэффициент  $k_1$  может быть получен путем совместного решения уравнений Тунцова-Загустина и уравнения Риттингера

$$\frac{6}{\gamma_p} \left( \frac{1}{\bar{d}_2} - \frac{1}{\bar{d}_1} \right) Q = k_p P_m, \quad (3.2)$$

где  $\bar{d}_1, \bar{d}_2$  – соответственно средние крупности руды на входе и выходе мельницы;  $Q$  – производительность по исходной руде;  $k_p$  – коэффициент



Риттингера;  $P_m$  – активная мощность, идущая на измельчение;  $\gamma_p$  – удельный вес руды.

Время измельчения определяется временем нахождения руды в мельнице

$$t = \frac{M_{\Pi}}{Q_{\Pi}} = \frac{L \cdot \varphi_p \pi R^2 \gamma_{\Pi}}{Q_{\Pi}}, \quad (3.3)$$

где  $M_{\Pi}$  – масса пульпы в мельнице;  $L$  – длина барабана мельницы;  $\varphi_p$  – степень заполнения мельницы рудой;  $R$  – радиус барабана мельницы;  $\gamma_{\Pi}$  – плотность пульпы в мельнице;  $Q_{\Pi}$  – производительность мельницы по рудной пульпе.

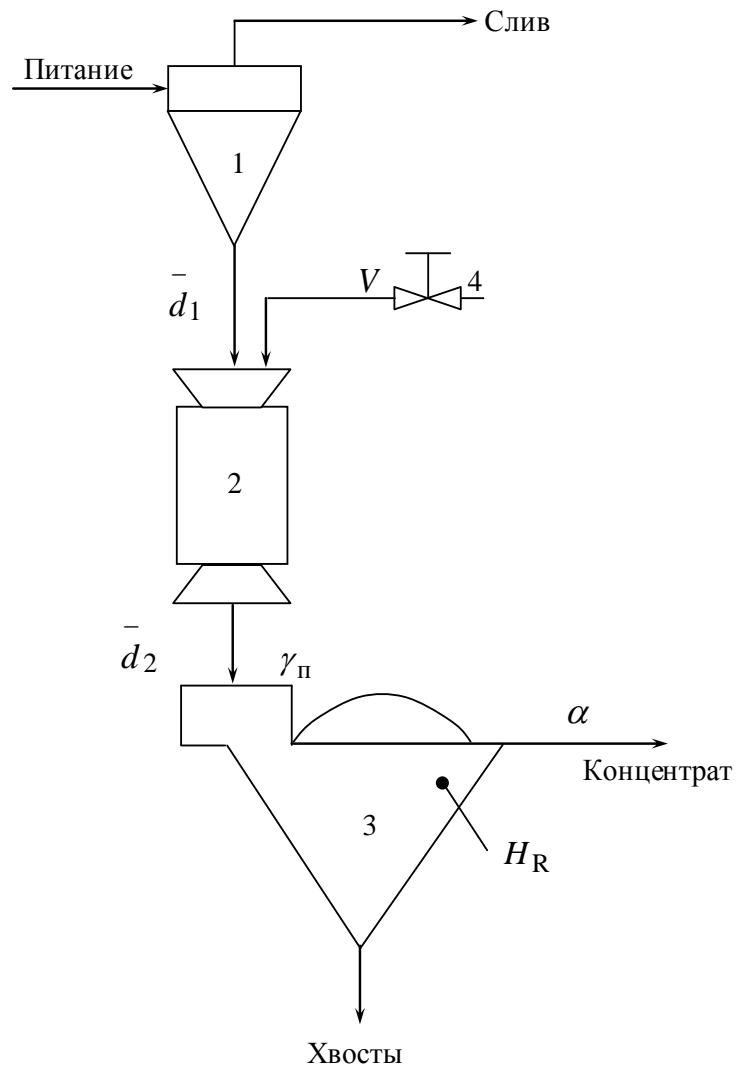


Рис. 3.1. Схема второй стадии измельчения – магнитной сепарации: 1 – гидроциклон; 2 – шаровая мельница; 3 – магнитный сепаратор; 4 – регулирующий орган расхода воды;  $V$  – расход воды в мельницу;  $\alpha$  – массовая доля железа в концентрате;  $\bar{d}_1, \bar{d}_2$  – соответственно средние крупности руды в загрузке и разгрузке мельницы;  $H_R$  – радиальная составляющая напряженности магнитного поля в рабочей зоне сепаратора.

Так как во вторых стадиях измельчения работают шаровые мельницы с центральной разгрузкой, то в номинальных режимах работы  $\varphi_p = const$  и время измельчения определяется плотностью пульпы  $\gamma_{II}$ . Плотность пульпы в мельнице определяется массовыми расходами руды в мельницу  $Q_p$  и воды  $W$ . В соответствии с [85] при условии, что плотность воды  $\gamma_B = 1 \frac{m}{m^3}$

$$\gamma_{II} = \frac{\gamma_p(Q_p + W)}{Q_p + W\gamma_p}, \quad (3.3)$$

где  $\gamma_p$  – плотность руды.

Уравнения (3.1), (3.2), (3.3) представляют собой математическую модель шаровой мельницы с решеткой. Совместно решая уравнения (3.1) и (3.2) с учетом (3.3) получим

$$k_1 = \frac{k_p \cdot P_m \cdot \gamma_p}{6\gamma_{II} \cdot \varphi_p \pi R^2 L}, \quad (3.4)$$

где  $k_p$  – коэффициент Реттингера;  $P_m$  – активная мощность, потребляемая мельницей.

Для согласования моделей измельчения и раскрытия руды необходимо знать среднюю крупность руды в разгрузке мельницы. Известно [8], что после измельчения массу частиц можно обосновать функцией распределения или уравнением Розина-Раммлера

$$f(d) = Ae^{-Ad}, \quad (3.5)$$

где  $A = -\frac{\ln V}{D}$ ;  $D$  – максимальный размер ячейки сита, остаток в котором равен  $v = 0,05$ .

Математическое ожидание крупности частиц

$$M(d) = \bar{d} = \int_0^{\infty} df(d) \partial d = \frac{1}{A}. \quad (3.6)$$

Если функция распределения крупности частиц задана гистограммой, что часто бывает на практике, то выход  $\gamma$  или содержание готового класса  $C_{p2}$

$$C_{p2} = \gamma \approx l_p \cdot A, \quad (3.7)$$

откуда  $A = \frac{C_{p2}}{l_p}$ , где  $l_p = 0,074$  мм «готовый класс».

Средняя крупность частиц, поступающих на магнитную сепарацию, определяется выходом готового класса в разгрузке мельницы

$$\bar{d} \approx \frac{1}{A} \approx \frac{l_p}{C_{p2}}. \quad (3.8)$$

Модели формирования активной мощности электродвигателя барабана мельниц представлены в разделе 2 диссертации. Воспользуемся объединенной моделью раскрытия Уигла и Ди с моделью магнитной сепарации, соответствующей ступенчатой сепарационной характеристике магнитного сепаратора. Будем считать, что при обогащении магнитной руды продукт, поступающий на магнитную сепарацию, состоит из трех компонентов:  $A$  – пустая порода;  $B$  – магнетит;  $AB$  – сростки. Содержание магнитного железа в сростках

$$\alpha_{AB} = \frac{C_{AB} \cdot \rho_B \cdot F_{eM}}{C_{AB} \rho_B - (1 - C_{AB}) \rho_A}, \quad (3.9)$$

где  $C_{AB}$  – средний состав нераскрытых частиц (сростков);  $\rho_B$  – плотность магнетита;  $F_{eM}$  – содержание железа в магнетите;  $\rho_A$  – плотность пустой породы.

$$C_{AB} = \frac{V_B - P_B}{P_{AB}}, \quad (3.10)$$

где  $V_B$  – объемное содержание магнетита в исходной руде;  $P_B$  – массовая доля магнетита;  $P_{AB}$  – массовая доля сростков.

$$P_B = \frac{(k-1)^3}{k^3} \cdot \frac{1}{n+1} + \frac{3(k-1)^2}{k^3} \cdot \left(\frac{1}{n+1}\right)^2 + \frac{3(k-1)}{k^3} \cdot \left(\frac{1}{n+1}\right)^4 + \frac{1}{k^3} \left(\frac{1}{n+1}\right)^8, \quad (3.11)$$

где  $k$  – отношение среднего размера зерна магнетита  $\bar{d}_{BK}$  к размеру частицы  $\bar{d}_2$ , т.е.  $k = \frac{\bar{d}_{BK}}{\bar{d}_2}$ ;  $n$  – коэффициент состава, равный отношению объема  $A$  к

объему  $B$  в агрегате, т.е. куске руды.

$$P_{AB} = \frac{3(k-1)^2}{k^3} \cdot \left[ \frac{(n+1)^2 - (n^2 + 1)}{(n+1)^2} \right] + \frac{3(k-1)}{k^3} \cdot \left[ \frac{(n+1)^4 - (n^4 + 1)}{(n+1)^4} + \right. \\ \left. + \frac{1}{k^3} \left[ \frac{(n+1)^8 - (n^8 + 1)}{(n+1)^8} \right] \right]. \quad (3.12)$$

Следовательно, содержание железа в слое концентрата на барабане магнитного сепаратора при условии, что все частицы, содержащие ценный минерал  $B$ , должны перейти в концентрат, а все частицы пустой породы должны перейти в хвосты, т.е. при идеальной сепарационной характеристике сепаратора массовая доля железа в концентрате будет равна

$$\alpha = \alpha_B \cdot P_B + \alpha_{AB} \cdot P_{AB}, \quad (3.13)$$

где  $\alpha_B$  – массовая доля железа в магнетите;  $\alpha_{AB}$  – массовая доля железа в сродках.

Известно, что магнитная проницаемость концентрата описывается формулой К. Лихтенекера

$$\bar{\mu} = \mu_c^\alpha, \quad (3.14)$$

где  $\mu_c$  – магнитная проницаемость смеси частиц, содержащих вещество магнетита.

Известно, что  $\bar{\mu}_c = 1 + x_c$ , где  $x_c$  – магнитная восприимчивость смеси частиц, содержащих магнетит. В соответствии с [94] магнитная восприимчивость смеси частиц, содержащих магнетит

$$x_c = \frac{x_M \bar{d}^{-2}}{k_1 10^{-n} + \bar{d}^{-2}}, \quad (3.15)$$

где  $x_M$  – магнитная восприимчивость вещества магнетита;  $\bar{d}$  – диаметр или крупность частиц продукта измельчения;  $k_1$  – коэффициент (для руд Кривого Рога  $k_1 = 2$ );  $n$  – коэффициент, зависящий от выбора системы единиц (в системе СИ  $n = 4$ ).

Модель формирования радиальной составляющей напряженности магнитного поля в рабочей зоне сепаратора выделения концентрата описывается уравнением Файнштейна-Федотова [156]

$$H_R = \left( \frac{PH_0 R_0^P \psi_1}{\psi} R_2^{-P-1} + \frac{2PH_0 \psi_2}{R_1^{2P} \psi} R_2^{2P-1} \right) \cos P\varphi; \quad (3.16)$$

$$\left. \begin{aligned} \psi &= \left( 1 - \bar{\mu}^* \frac{\gamma}{P} \right) + \lambda_1^{-2P} \left( 1 + \bar{\mu}^* \frac{\gamma}{P} \right) \\ \psi_1 &= 1 - \bar{\mu}^* \frac{\gamma}{P} \\ \psi_2 &= 1 + \bar{\mu}^* \frac{\gamma}{P} \\ \lambda_1 &= \frac{R_1}{R_0}; \quad \bar{\mu}^* = \frac{\bar{\mu}}{\mu_0}; \quad \bar{\mu} = \mu_M^\alpha \\ \gamma &= \frac{\beta}{2} + \sqrt{\frac{\beta}{\lambda} + P^2} \end{aligned} \right\}, \quad (3.17)$$

где  $H_0$  – напряженность магнитного поля на поверхности магнитных полюсов;

$R_0$  – радиус магнитной системы сепаратора;  $\bar{\mu}^*$  – относительная магнитная проницаемость концентрата;  $R_1$  – радиус барабана сепаратора;  $P$  – количество пар полюсов магнитной системы;  $\beta$  показатель степени экспоненциального закона распределения содержания железа вдоль радиуса слоя концентрата  $R_2$ .

По формулам (3.1)-(3.12) для шаровой мельницы МШЦ 3,6×4,0 последовательно работающей с магнитным сепаратором ПБМ-ПП-120/300 были построены теоретические кривые раскрытия руды во второй стадии измельчения для трех типов руд. Эти кривые представлены на рис. 3.2.

Анализ этих кривых показывает функциональную связь между степенью раскрытия руды измельчением в мельнице второй стадии и массовой долей железа в концентрате магнитного сепаратора. С учетом формул (3.13), (3.14), (3.15) была построена зависимость радиальной составляющей напряженности магнитного поля  $H_R$  в рабочей зоне выделения концентрата сепаратора от средней крупности помола руды в мельнице  $\bar{d}_2$ . Эта зависимость представлена на рис. 3.3. Из рис. 3.3 следует, что радиальная составляющая напряженности

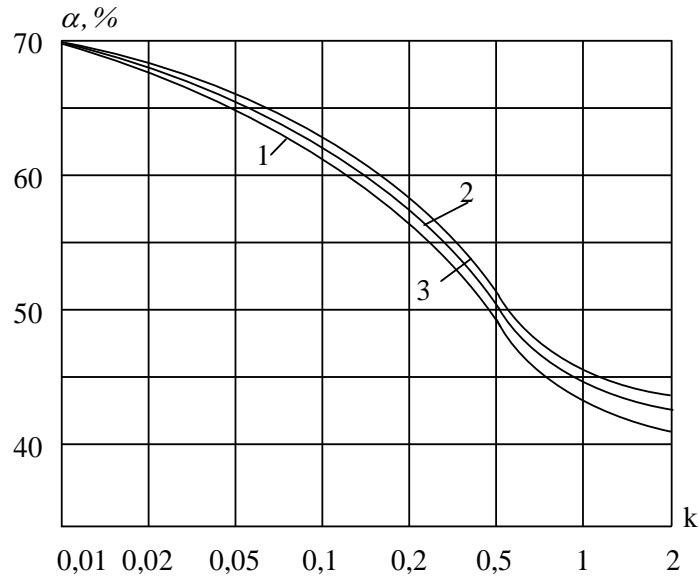


Рис. 3.2. Теоретические кривые раскрытия руды во второй стадии измельчения:

1 –  $\alpha_p = 20\%$ ; 2 –  $\alpha_p = 25\%$ ; 3 –  $\alpha_p = 30\%$ ;  $k$  – коэффициент раскрытия

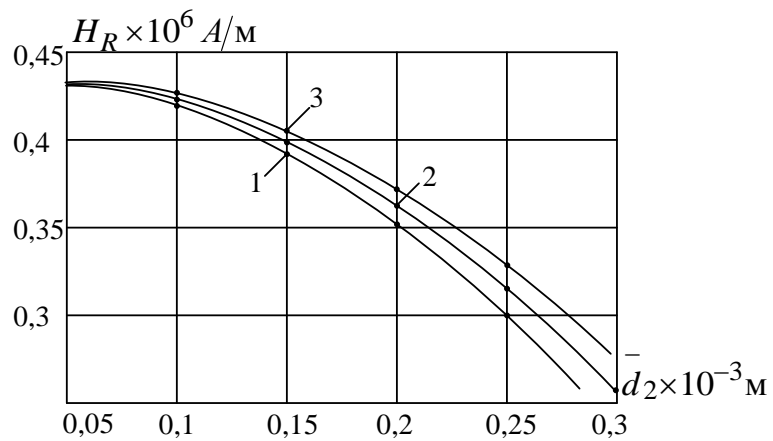


Рис. 3.3. Теоретическая зависимость радиальной составляющей напряженности магнитного поля  $H_R$  в рабочей зоне выделения концентрата сепаратора от средней крупности помола руды  $\bar{d}_2$ .

1 –  $\alpha_p = 20\%$ ; 2 –  $\alpha_p = 25\%$ ; 3 –  $\alpha_p = 30\%$



магнитного поля в рабочей зоне магнитного сепаратора зависит от крупности помола руды в мельнице второй стадии измельчения.

На рис. 3.4 представлены регулировочные характеристики шаровой мельницы второй стадии последовательно соединенной с магнитным сепаратором. Анализ рис. 3.4 показывает, что изменяя плотность пульпы в шаровой мельнице с центральной разгрузкой можно управлять радиальной составляющей напряженности магнитного поля в рабочей зоне сепаратора, и, с учетом зависимостей рис. 3.2, 3.3, крупностью помола и раскрытием руды в шаровой мельнице.

Разработана математическая модель технологического комплекса, состоящего из шаровой мельницы, последовательно соединенной с магнитным сепаратором. В результате исследования этой модели установлено, что:

- барабанный магнитный сепаратор, находящийся в технологическом комплексе второй стадии измельчения магнитной сепарации железных руд, является естественным автоматическим анализатором степени раскрытия железной руды;

- мерой раскрытия руды измельчением является массовая доля железа в концентрате магнитного сепаратора, которая обратно пропорциональна крупности частиц твердой фазы пульпы в разгрузке шаровой мельницы. Это позволяет непосредственно управлять раскрытием руды измельчением путем изменения скорости движения руды в мельнице регулированием расхода воды в мельницу;

- массовая доля железа в концентрате магнитного сепаратора и радиальная составляющая напряженности магнитного поля в рабочей зоне сепаратора обратно пропорциональны степени раскрытия и крупности помола руды в шаровой мельнице;

- регулирование плотности пульпы в разгрузке шаровой мельницы по величине радиальной составляющей напряженности магнитного поля в рабочей зоне магнитного сепаратора, последовательно соединенного с шаровой

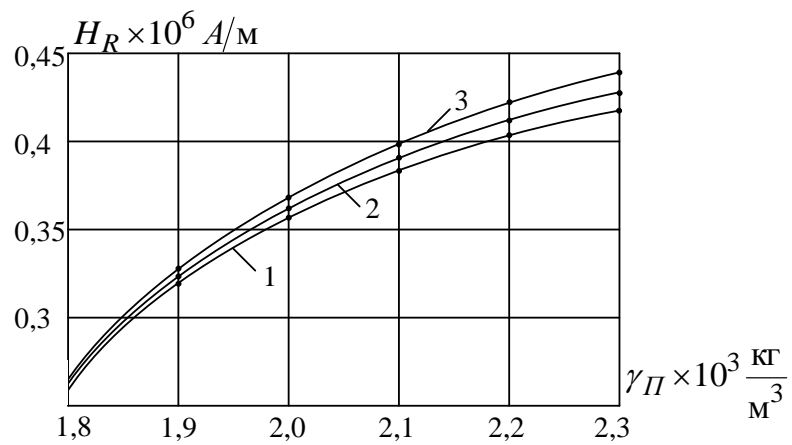


Рис. 3.4. Регулировочные характеристики шаровой мельницы работающей последовательно с магнитным сепаратором  $H_R = f(\gamma_{\Pi})$ .

1 -  $\alpha_p = 20\%$ ; 2 -  $\alpha_p = 25\%$ ; 3 -  $\alpha_p = 30\%$

мельницей, можно использовать в качестве управляющего воздействия раскрытия железной руды во второй стадии измельчения магнитной сепарации.

### **3.2. Автоматический контроль степени загрузки рудой мельниц мокрого самоизмельчения и шаровых мельниц**

Рассмотрим основные технологические схемы обогащения железных руд, в которых работают шаровые и бесшаровые барабанные мельницы первых стадии измельчения. На рис. 3.5 представлена типовая схема технологического комплекса магнитного обогащения первой стадии с шаровой мельницей. Здесь руда по главному конвейеру 1 автостеллой 2 подается в бункер 3, откуда с помощью рудопитателя 4 конвейером 5 поступает в барабанную мельницу 6, которая вращается электродвигателем 7 и работает в замкнутом цикле со спиральным классификатором 8. Слив классификатора через пульподелитель 9 поступает на группу параллельно работающих магнитных сепараторов 10, 11, 12, 13, барабаны которых вращаются электродвигателями 14, 15, 16, 17.

Анализ схемы рис. 3.5 показывает, что загрузка барабанной мельницы 6 рудой определяет режим и результаты обогащения магнитными сепараторами 10, 11, 12, 13, потери железа в хвостах и качество концентрата. Поэтому степень заполнения мельницы рудой необходимо определять по эффективности процесса магнитной сепарации.

Представляет практический интерес оптимизация технологического комплекса магнитного обогащения руд по двум сигналам активной мощности, потребляемой приводными электродвигателями мельницы и группы магнитных сепараторов. Причем активная мощность приводного электродвигателя мельницы характеризует степень заполнения мельницы рудой, а активная мощность приводных электродвигателей группы магнитных сепараторов, характеризует производительность комплекса по извлеченному магнитному железу.

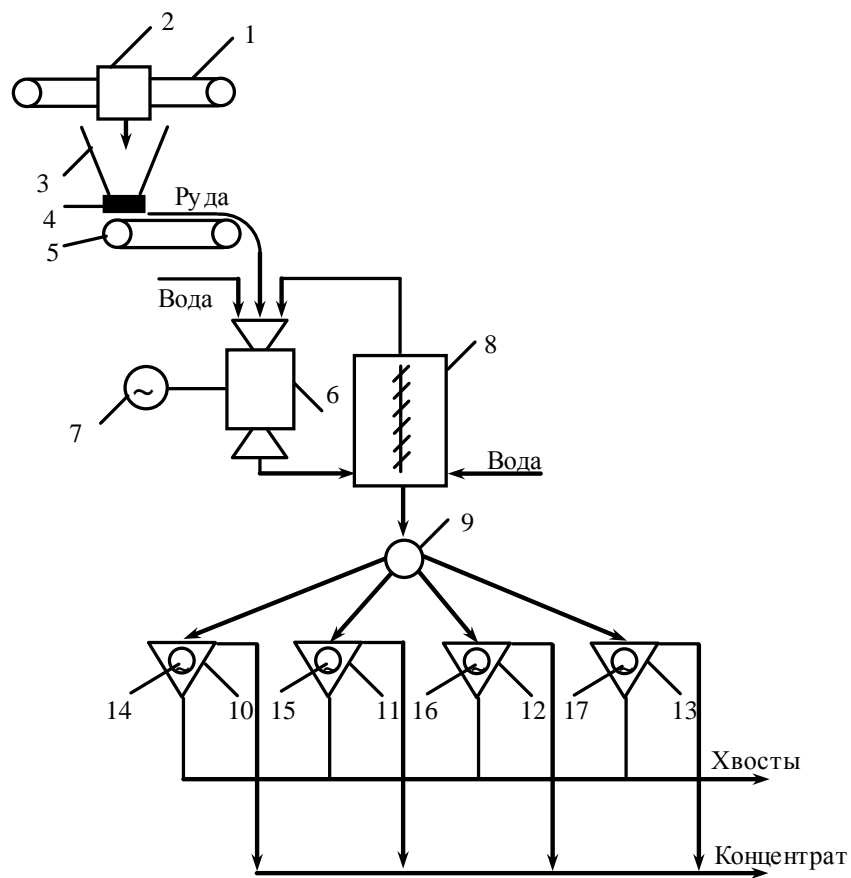


Рис. 3.5. Схема технологического комплекса магнитного обогащения первой стадии:

1, 5 – конвейер; 2 – автостелла; 3 – бункер; 4 – рудопитатель; 6 – барабанная мельница; 7, 14, 15, 16, 17 – электродвигатели; 8 – спиральный классификатор; 9 – пульподелитель; 10, 11, 12, 13 – магнитные сепараторы.

Для разработки алгоритмов оптимизации технологических комплексов магнитного обогащения руд с шаровыми мельницами и мельницами мокрого самоизмельчения необходимо знать статические характеристики этих комплексов.

Была составлена математическая модель технологического комплекса магнитного обогащения первой стадии, схема которой представлена на рис. 3.6. Основные формулы и соотношения взяты из справочника по обогащению руд [138, 139].

Модель формирования активной мощности представлена формулой активной мощности, потребляемой шаровой мельницей полученной в [88] на основании рассмотрения эпюры заполнения мельницы рудой и шарами, представленной на рис. 3.7.

Формула потребляемой шаровой мельницей активной мощности:

$$\begin{aligned}
 P_m = & \frac{4}{3} \omega_0 (\cos \alpha - \cos^3 \alpha) \left\{ G_1 \frac{(R - \Delta)^3 - r^3}{(\pi - 2\alpha)[(R - \Delta)^2 - r^2]} + L \gamma_{II} \left\{ [(R - \Delta)^3 - r^3] \times \right. \right. \\
 & \times \left. \left. \left( 1 - \frac{\gamma_{ш}}{\gamma'_{ш}} \right) + (r^3 - \rho^3) \right\} \right\} + \frac{L}{14g} \frac{\omega_0^3 (1 - S)^3}{(R - \Delta)^3} \left\{ \left[ \gamma'_{ш} + \gamma_{II} \left( 1 - \frac{\gamma_{ш}}{\gamma'_{ш}} \right) \right] \times \right. \\
 & \times \left. \left[ (R\delta - \Delta)^7 - r^7 \right] + \gamma_{II} (r^7 - \rho^7) \right\}. \quad (3.18)
 \end{aligned}$$

где  $\alpha$  – угол отрыва шаров в мельнице;  $\Delta$  – толщина футеровки;  $S$  – скольжение рудно-шарового тела относительно футеровки;  $\gamma'_{ш}$  – насыпной удельный вес шаров;  $\gamma_{ш}$  – удельный вес материала шаров;  $\gamma_{II}$  – плотность пульпы в мельнице. Остальные обозначения в формуле (3.18) такие же, как и на рис.3.7.

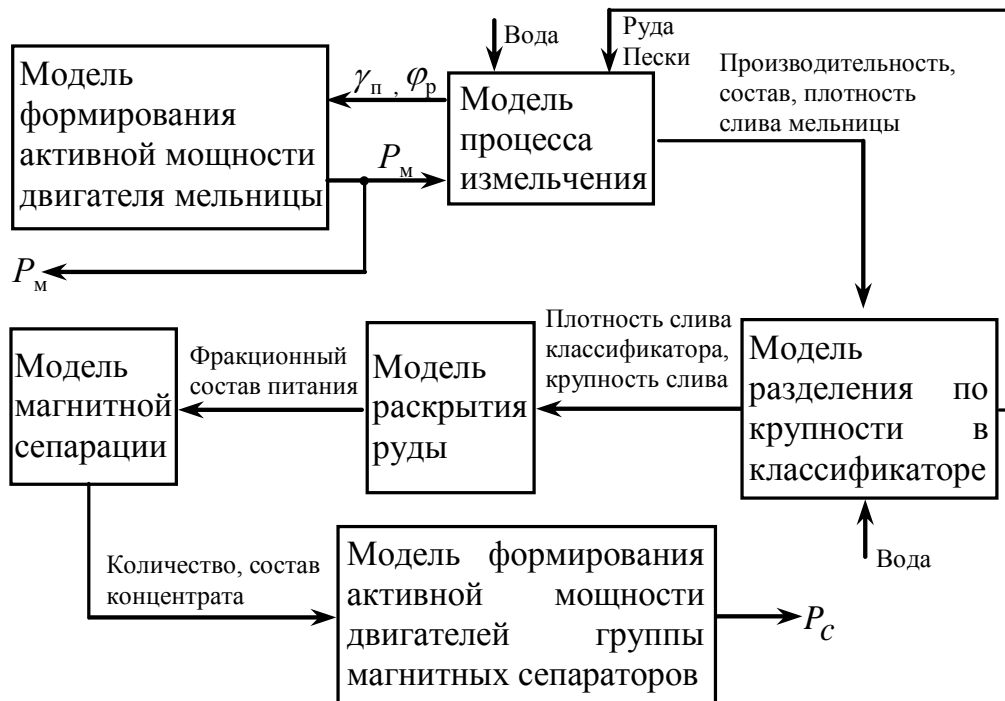


Рис.3.6. Схема математической модели технологического комплекса магнитного обогащения:

$\varphi_p$  – степень загрузки мельницы рудой;  $P_c$  – активная мощность электродвигателя сепаратора;  $P_m$  – активная мощность электродвигателя мельницы,  $\gamma_p$  – плотность пульпы в мельнице.

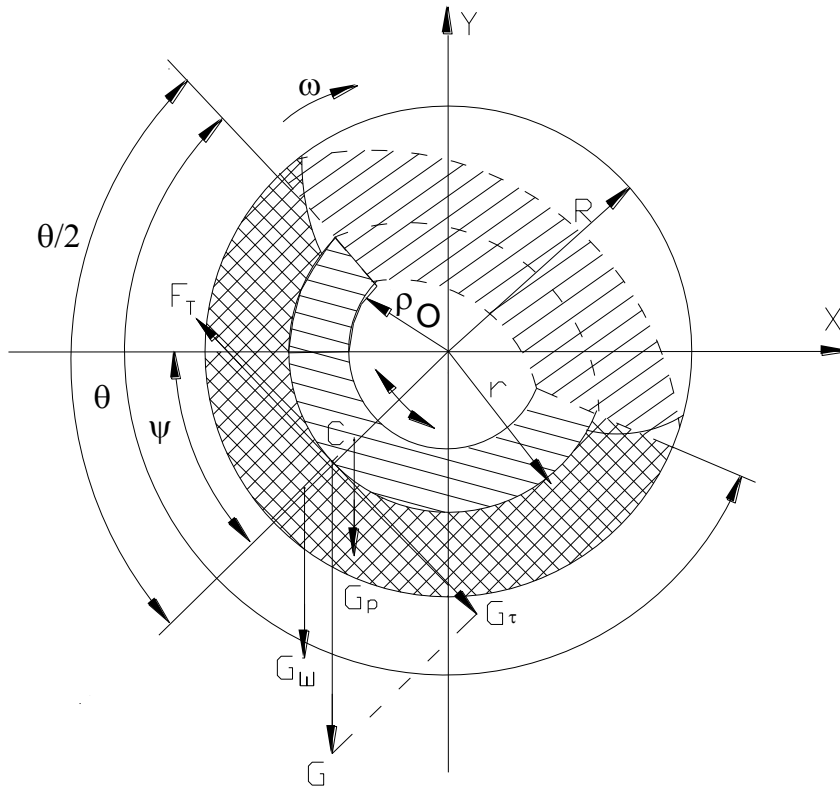


Рис. 3.7. Эпюра заполнения шаровой мельницы рудой и шарами:

$\omega_0$  – угловая скорость вращения барабана мельницы;  $R$  – радиус барабана мельницы;  $r$  – радиус эпюры заполнения мельницы шарами;  $\rho$  – радиус эпюры заполнения мельницы рудой;  $G_p$  – вес рудной загрузки мельницы;  $G_w$  – вес шаровой загрузки мельницы;  $G$  – суммарный вес рудно-шаровой загрузки;  $\theta$ ,  $\psi$  – угловые характеристики эпюры заполнения мельницы;  $F_T$  – результирующая сил трения в мельнице;  $G_\tau$  – тангенциальная составляющая силы веса  $G$ .

В соответствии с [88] вес шаров на круговых траекториях:

$$G_1 = \gamma_{ш} \cdot L[(R - \Delta)^2 - r^2] \cdot (\pi - 2\alpha), \quad (3.19)$$

где  $L$  – длина мельницы.

В результате моделирования была получена статическая характеристика технологического комплекса, представленная на рис. 3.8.

Анализ данной характеристики показывает, что до точки  $M$ , соответствующей максимуму производительности комплекса по магнитному продукту, активная мощность, потребляемая мельницей  $P_m$  и сепаратором  $P_c$  однонаправлены, т.е. с увеличением степени загрузки мельницы рудой они увеличиваются. Дальнейшее увеличение степени загрузки мельницы рудой приводит к уменьшению потребляемой сепараторами активной мощности  $P_c$ , и соответственно производительности комплекса по магнитному продукту, в то время как мощность, потребляемая приводным двигателем мельницы, увеличивается.

Аналогично были получены статические характеристики технологического комплекса магнитного обогащения с шаровой мельницей МШР 3,6×4,0, представленные на рис. 3.9.

Были получены статические характеристики комплексов обогащения при изменении крупности, вкрапленности руды и массовой доли железа в руде. Установлен факт дрейфа статических характеристик от этих параметров без изменения формы характеристик.

Экспериментальное определение статических характеристик технологического комплекса первой стадии магнитного обогащения руд с мельницей мокрого самоизмельчения проводилось в условиях 19 технологической секции обогатительной фабрики № 3 Лебединского ГОКа. Во время эксперимента плотность слива классификатора стабилизировалась системой автоматического регулирования плотности на уровне 1400 г/л.



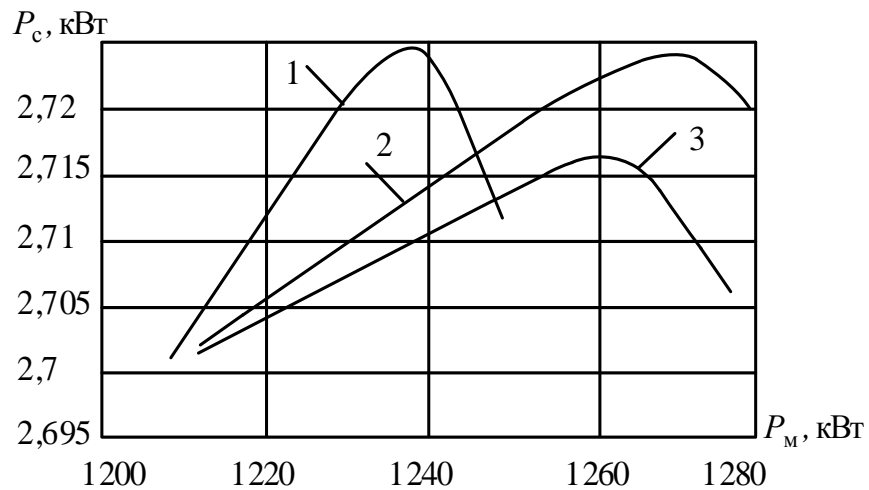


Рис. 3.8. Статическая характеристика технологического комплекса магнитного обогащения с мельницей мокрого самоизмельчения:  
 1 – крупновкрапленная руда; 2 – средневкрапленная руда; 3 – мелковкрапленная руда.

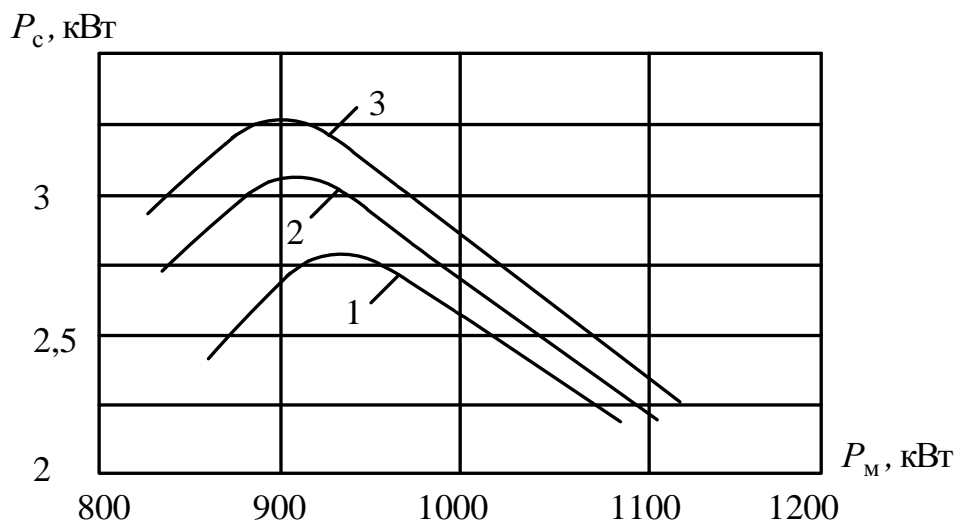


Рис. 3.9. Статическая характеристика технологического комплекса магнитного обогащения с шаровой мельницей:  
 1 – шаровая загрузка 40 т; 2 – шаровая загрузка 45 т; 3 – шаровая загрузка 50 т.

Степень загрузки мельницы рудой  $\varphi$  измерялась и стабилизировалась на заданном уровне с помощью радиоизотопного индикатора заполнения и системы регулирования загрузки мельницы. В ходе каждого опыта отбирались технологические пробы промпродукта и хвостов, выполнялся их химический анализ на содержание железа и определялась объемная производительность сепаратора по промпродукту с помощью мерной емкости и секундомера, а также производительность комплекса по магнитному железу  $Q_M$  по методике изложенной в подразделе 2.3 диссертации. Одновременно регистрировались показания приборов, измеряющих активную мощность приводного двигателя мельницы  $P_M$  и активную мощность  $P_c$  приводных двигателей группы магнитных сепараторов первой стадии. Было получено уравнение регрессии

$$P_c = 16,7 + 3,27Q_M, \quad (3.20)$$

которое подтверждает возможность измерения производительности технологического комплекса по магнитному железу  $Q_M$  по величине активной мощности, потребляемой группой магнитных сепараторов. По результатам эксперимента рассчитывались расходы электроэнергии  $q$  на тонну полученного магнитного продукта. Экспериментальные статические характеристики представлены на рис. 3.10. Коэффициент корреляции  $R_{Q_M P_c}$  между переменными  $Q_M$  и  $P_c$  составил 0,89.

Так как активная мощность, потребляемая магнитными сепараторами,  $P_c$  пропорциональна производительности комплекса по магнитному железу  $Q_M$ , то максимумы статических характеристик  $Q_M = f(\varphi)$  и  $P_c = f(\varphi)$  должны совпадать. Следовательно, до точки  $M$  (рис. 3.10), соответствующей максимуму производительности комплекса по магнитному продукту, увеличение степени загрузки мельницы рудой  $\varphi$  приводит к увеличению активной мощности  $P_c$ , потребляемой магнитными сепараторами, и активной

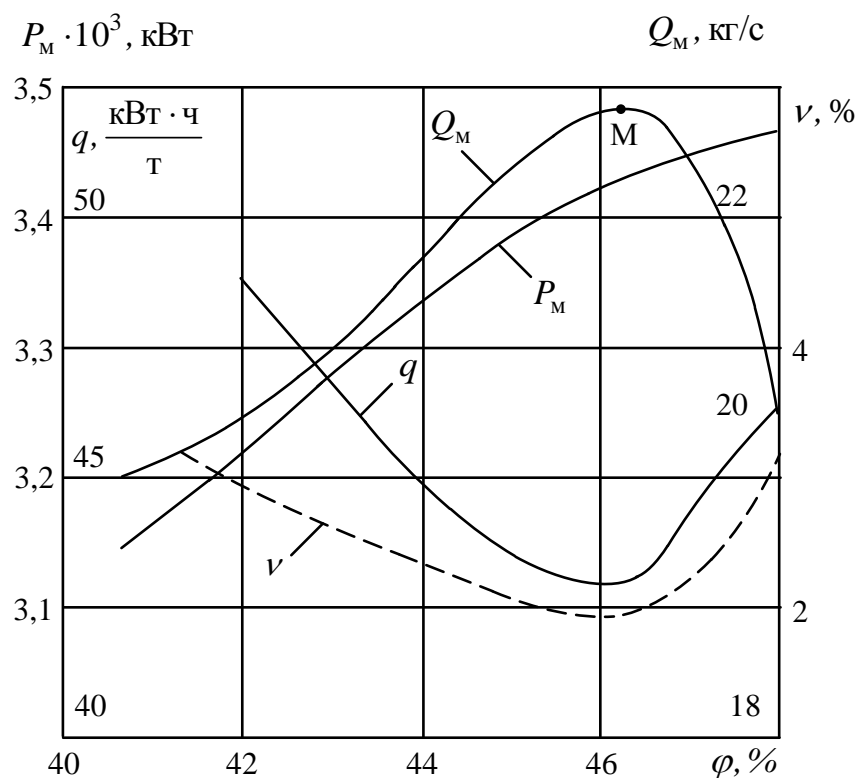


Рис. 3.10. Статические характеристики технологического комплекса магнитного обогащения руд с мельницей мокрого самоизмельчения:

$Q_M$  – производительность комплекса по магнитному продукту;  $P_M$  – активная мощность, потребляемая двигателем мельницы самоизмельчения;  $q$  – удельный расход электроэнергии на тонну магнитного продукта;  $\nu$  – массовая доля железа в хвостах;  $M$  – точка оптимального режима работы комплекса;  $\varphi$  – степень загрузки мельницы рудой.

мощности  $P_m$ , потребляемой мельницей. Дальнейшее увеличение степени загрузки мельницы рудой приводит к уменьшению производительности комплекса по магнитному продукту  $Q_m$  и, соответственно, потребляемой сепараторами активной мощности  $P_c$ , в то время как мощность  $P_m$ , потребляемая приводным двигателем мельницы, увеличивается. Воспользуемся свойством коэффициента корреляции линеаризованной статической характеристики комплекса в окрестностях рабочей точки для обоснования алгоритма оптимизации технологического комплекса магнитного обогащения руд с мельницей мокрого самоизмельчения. В качестве управляющего воздействия используем производительность по исходной руде на входе мельницы. Алгоритм оптимизации заполнения мельницы рудой [160] в этом случае будет иметь вид

$$Q = \begin{cases} \text{недогрузка} : + \Delta Q; R_{P_m P_c} > \varepsilon \\ \text{оптим. загрузка} : \Delta Q = 0; -\varepsilon \leq R_{P_m P_c} \leq \varepsilon \\ \text{перегрузка} : - \Delta Q; R_{P_m P_c} < -\varepsilon \end{cases}, \quad (3.21)$$

где  $R_{P_m P_c}$  – коэффициент корреляции между активной мощностью двигателя мельницы  $P_m$  и активной мощностью двигателей магнитных сепараторов  $P_c$ ;  $\varepsilon$  – величина определяющая зону нечувствительности корреляционного экстремум-детектора.

На рис. 3.11 представлены статические характеристики технологического комплекса первой стадии магнитного обогащения руд с шаровой мельницей МШР 4x5, полученные в условиях 22 технологической секции рудообогатительной фабрики Северного ГОКа по приведенной выше методике. Отличие заключается в определении циркулирующей нагрузки методом водного баланса [116].

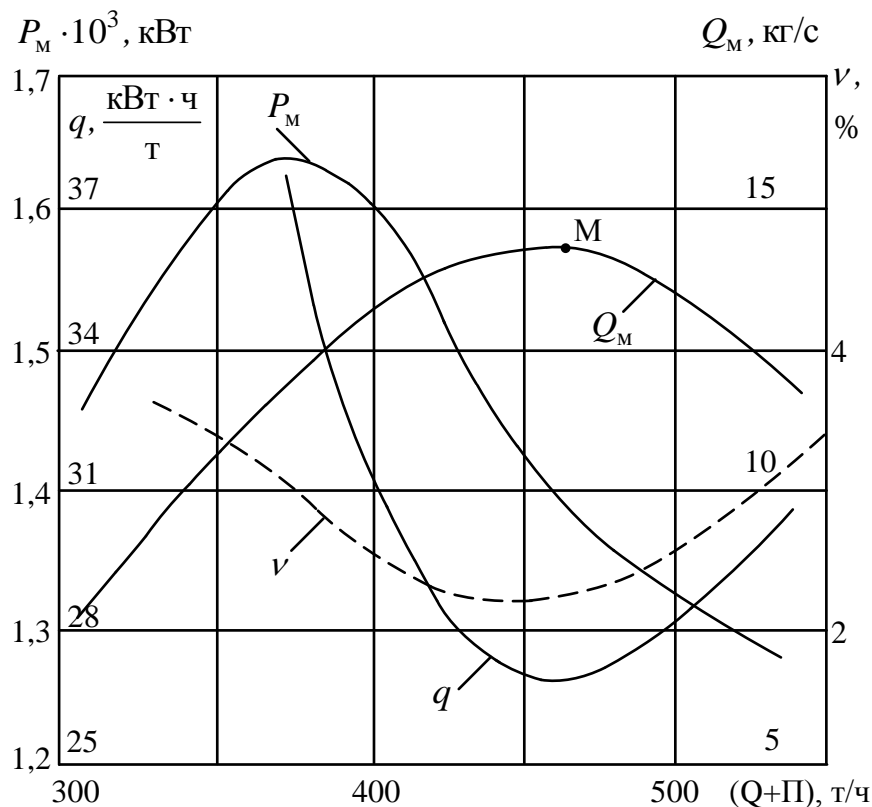


Рис. 3.11 Статические характеристики технологического комплекса магнитного обогащения руд с шаровой мельницей:

$Q$  – производительность по исходной руде;  $\Pi$  – производительность по пескам;  $P_M$  – активная мощность, потребляемая приводным двигателем шаровой мельницы;  $Q_M$  – производительность комплекса по магнитному продукту;  $q$  – удельный расход электроэнергии на тонну магнитного продукта;  $v$  – массовая доля железа в хвостах;  $M$  – точка оптимального режима работы комплекса.

Анализ статических характеристик рис. 3.11 показывает, что в технологических комплексах с шаровыми мельницами, работающих при максимальной производительности по извлеченному магнитному железу, однонаправленное изменение активной мощности, потребляемой двигателями мельницы и сепараторов, будет наблюдаться после достижения максимума производительности, а до этого момента сигналы активной мощности разнонаправлены. Поэтому алгоритм оптимизации заполнения рудой шаровых мельниц [162] в области оптимальной производительности по извлеченному магнитному железу будет иметь вид

$$Q = \left\{ \begin{array}{l} \text{недогрузка : } + \Delta Q; R_{P_M P_c} < -\varepsilon \\ \text{оптим. загрузка : } \Delta Q = 0; -\varepsilon \leq R_{P_M P_c} \leq \varepsilon \\ \text{перегрузка : } - \Delta Q; R_{P_M P_c} > \varepsilon \end{array} \right. . \quad (3.22)$$

Следует отметить, что предлагаемый алгоритм является работоспособным только после выхода технологического комплекса с шаровой мельницей в область технологических режимов, близких к оптимальным по производительности по извлеченному магнитному железу. Алгоритм предназначен для поддержания оптимальной производительности комплекса по магнитному железу путем регулирования заполнения мельницы рудой.

Выход в область оптимума возможен с помощью систем автоматического регулирования или в режиме ручного управления при отключенной системе оптимизации.

В качестве экстремум-детектора системы автоматического контроля степени заполнения барабанных мельниц рудой может быть устройство определения знака первой производной сигнала активной мощности приводного электродвигателя магнитного сепаратора по сигналу

активной мощности электродвигателя мельницы. В соответствии со статической характеристикой мельницы мокрого самоизмельчения алгоритм автоматического контроля степени заполнения мельницы самоизмельчения рудой [161] будет иметь вид

$$\left. \begin{array}{l} \text{недогрузка : } \varphi_p < \varphi_0, \text{ если } \frac{dP_c}{dP_M} > \varepsilon \\ \text{оптм. загрузка : } \varphi_p = \varphi_0, \text{ если } -\varepsilon \leq \frac{dP_c}{dP_M} \leq \varepsilon \\ \text{перегрузка : } \varphi_p > \varphi_0, \text{ если } \frac{dP_c}{dP_M} < -\varepsilon \end{array} \right\}, \quad (3.23)$$

где  $\varphi_0$  – оптимальная степень заполнения мельницы рудой;  $\pm \varepsilon$  – зона нечувствительности экстремум-детектора.

Статическая характеристика экстремум-детектора заполнения рудой мельницы самоизмельчения и шаровой мельницы представлены на рис. 3.12 и 3.13 соответственно.

Функциональная схема системы автоматического контроля оптимальной степени заполнения рудой барабанных мельниц представлена на рис. 3.14. Статические характеристики системы автоматического контроля оптимальной степени загрузки мельницы мокрого самоизмельчения ММС-70-22 представлены на рис. 3.15.

Статические характеристики определялись путем изменения степени заполнения мельницы  $\varphi\%$ , которая регистрировалась по показаниям вторичного прибора 18. Степень заполнения регулировалась изменением производительности по исходной руде  $Q_0$  с помощью вибропитателя 20. При каждой степени заполнения  $\varphi\%$  регистрировались показания вторичных приборов измеряющих соответственно активную мощность приводного электродвигателя мельницы 13 и активную мощность, потребляемую группой электродвигателей 6, магнитных сепараторов 5.

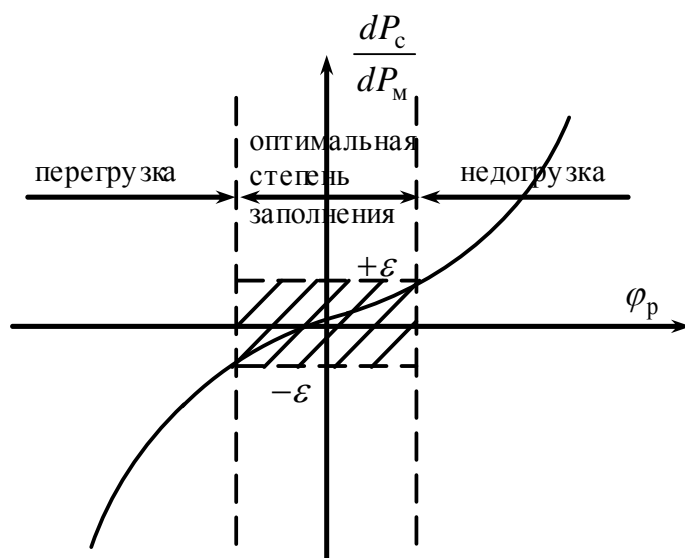


Рис. 3.12. Статическая характеристика экстремум-детектора заполнения рудой мельницы самоизмельчения:

$\pm \varepsilon$  – зона нечувствительности экстремум-детектора.

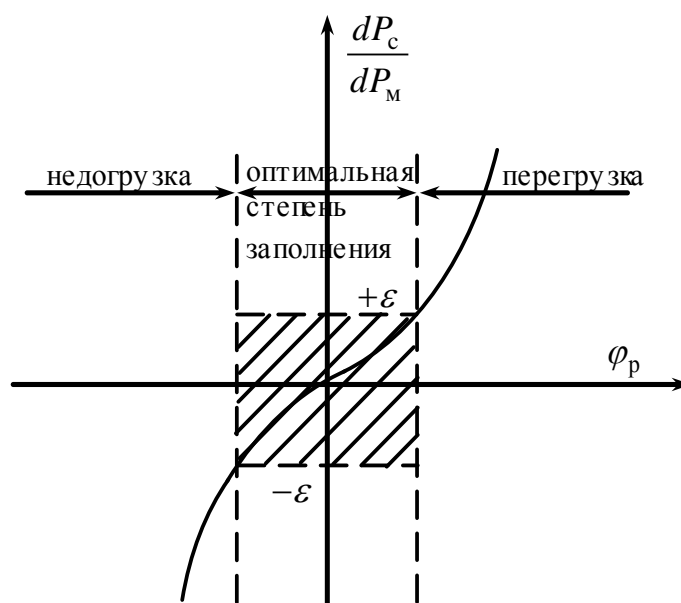


Рис. 3.13. Статическая характеристика экстремум-детектора заполнения рудой шаровой мельницы:

$\pm \varepsilon$  – зона нечувствительности экстремум-детектора.



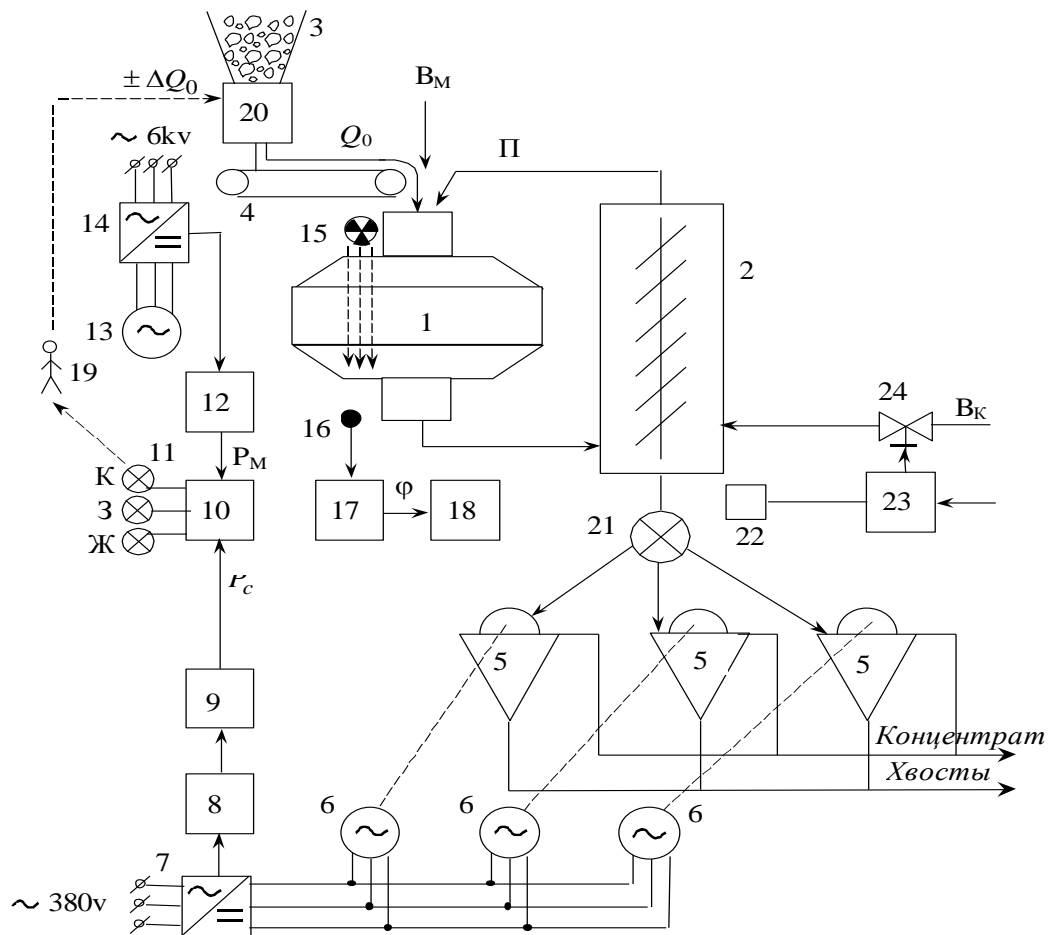


Рис. 3.14. Функциональная схема системы автоматического контроля оптимальной степени заполнения рудой барабанных мельниц:

1 – мельница; 2 – классификатор; 3 – бункер с рудой; 4 – конвейер; 5 – магнитный сепаратор; 6 – электродвигатели сепараторов; 7, 14 – измерительные преобразователи мощности; 8 – фильтр; 9, 12, 18 – вторичные приборы; 10 – экстремум детектор; 11 – электрические лампочки; 13 – электродвигатель мельницы; 15 – источник радиоактивного излучения; 16 – приемник радиоактивного излучения; 17 – преобразователь; 19 – мельник; 20 – вибропитатель; 21 – пульподелитель; 22 – плотномер; 23 – регулятор плотности; 24 – клапан расхода воды;  $Q_0$  – производительность по исходной руде;  $\Pi$  – пески;  $B_M, B_K$  – соответственно расходы воды в мельницу и классификатор;  $\tilde{P}_c$  – переменная спектральная составляющая активной мощности, потребляемой электродвигателями группы магнитных сепараторов;  $P_M$  – активная мощность, потребляемая электродвигателем мельницы; К, З, Ж – соответственно красная, зеленая и желтая электролампочки сигнализации;  $\pm \Delta Q_0$  – шаг изменения производительности по исходной руде.

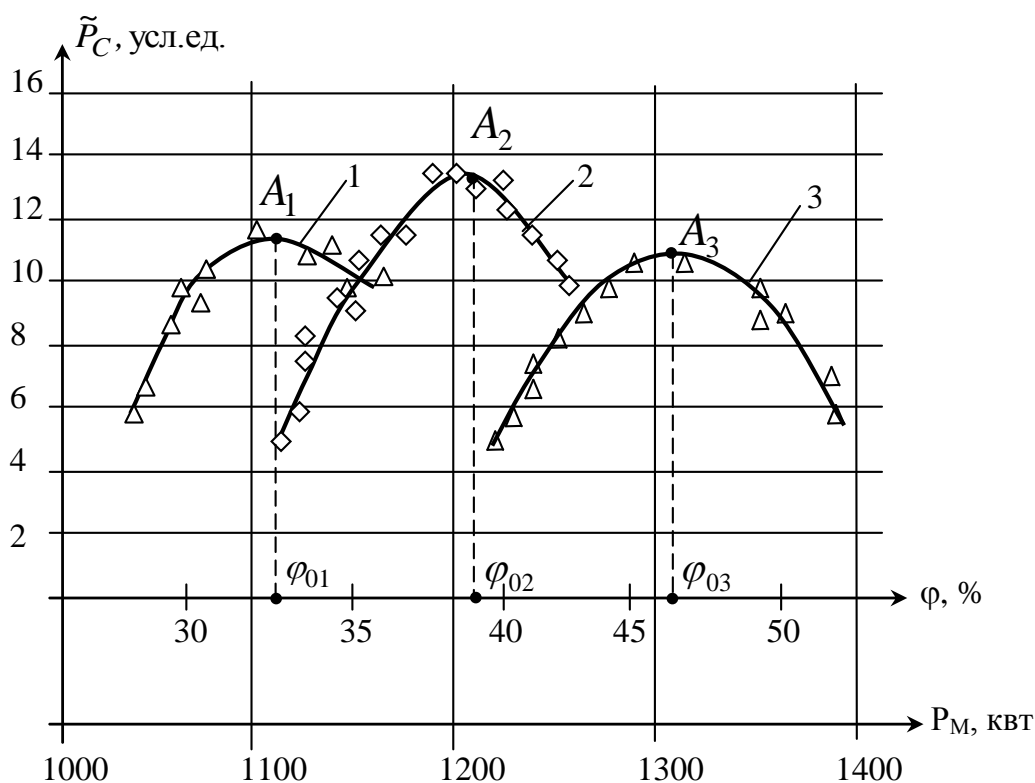


Рис. 3.15. Статические характеристики системы автоматического контроля оптимальной степени загрузки мельницы мокрого самоизмельчения ММС-70-22:

$\varphi$  – степень заполнения мельницы рудой;  $P_M$  – активная мощность электродвигателя мельницы;  $\tilde{P}_C$  – переменная спектральная составляющая сигнала активной мощности, потребляемой электродвигателями группы магнитных сепараторов; 1 – статические характеристики, соответствующие легкообогатимой руде; 2 – статические характеристики, соответствующие среднеобогатимой руде; 3 – статические характеристики, соответствующие труднообогатимой руде;  $\varphi_{01}, \varphi_{02}, \varphi_{03}$  – оптимальные заполнения мельницы рудой, соответствующие легкообогатимым, среднеобогатимым и труднообогатимым рудам;  $A_1, A_2, A_3$  – рабочие точки на статических характеристиках.

Проводилось 3 эксперимента на легкобогатимой, среднебогатимой и труднобогатимой руде с интервалом 1 месяц. Тип руды определялся по данным рудоразборки, которая проводилась рудоиспытательной станцией. Во время экспериментов плотность пульпы классификатора поддерживалась постоянной.

Анализ статических характеристик рис. 3.15 показывает, что при любых типах обогащаемых руд в рабочих точках  $A_1, A_2, A_3$ , соответствующих оптимальным заполнениям мельницы  $\varphi_{01}, \varphi_{02}, \varphi_{03}$  соответствует максимальное значение переменной спектральной составляющей активной мощности группы электродвигателей магнитных сепараторов, а, следовательно, и максимальной производительности технологического комплекса магнитного обогащения по извлеченному магнитному продукту. Определить в какой точке до экстремума или после экстремума статической характеристики можно по знаку производной сигнала  $\frac{d\tilde{P}_C}{dP_M}$ . Если  $\frac{d\tilde{P}_C}{dP_M} > 0$ , то мельница перегружена, если

$\frac{d\tilde{P}_C}{dP_M} < 0$ , то мельница недогружена.

Статическая характеристика экстремум-детектора степени заполнения мельницы рудой будет иметь вид рис. 3.16.

Работа системы автоматического контроля оптимальной степени заполнения рудой, функциональная схема которой представлена на рис. 3.14. При изменении свойств исходной руды, например при увеличении твердости, увеличивается заполнение мельницы рудой и рабочая точка переходит на правую ветвь статической характеристики. Экстремум-детектор 10 вычисляет знак производной  $\frac{d\tilde{P}_C}{dP_M} < -\varepsilon$  и выдает сигнал, загорается красная электролампа

11–К. Мельник 19 уменьшает заполнение мельницы рудой, уменьшая производительность на исходной руде на шаг  $-\Delta Q_0$ . Заполнение мельницы возвращается к оптимальному значению.

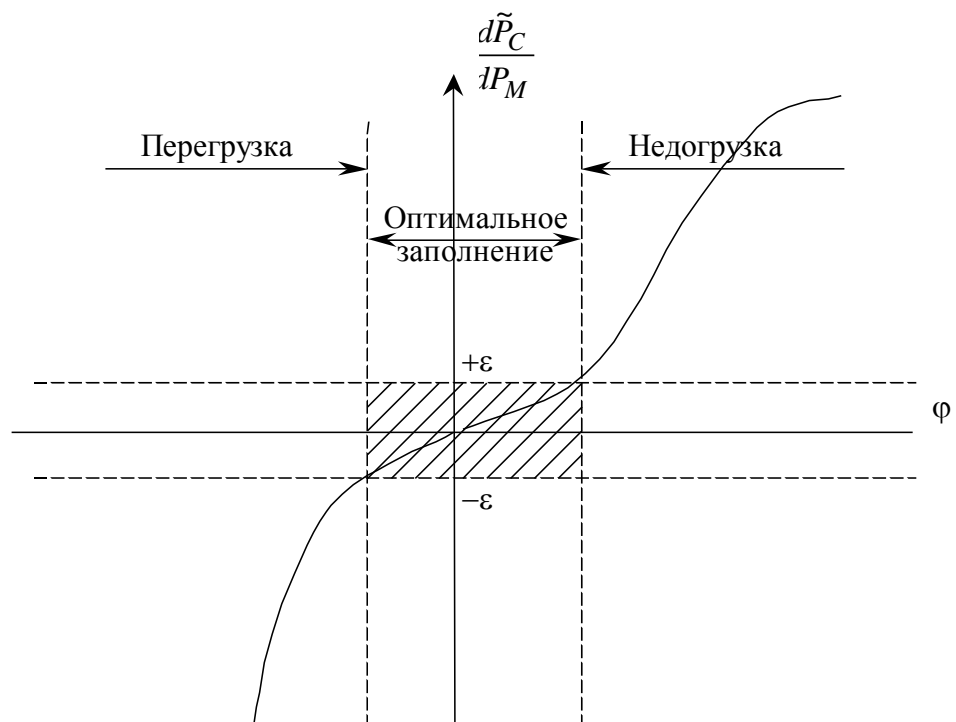


Рис. 3.16. Статическая характеристика экстремум-детектора степени заполнения мельницы рудой:

$\varphi$  – степень заполнения;  $\pm \varepsilon$  – зона нечувствительности экстремум-детектора

Если значение производной находится в пределах  $-\varepsilon \leq \frac{d\tilde{P}_C}{dP_M} \leq \varepsilon$ , то загорается зеленая лампочка 11–3. При уменьшении твердости руды заполнение мельницы уменьшается, мельница работает на левой ветви статической характеристики. Экстремум-детектор 10 вычисляет знак производной  $\frac{d\tilde{P}_C}{dP_M} > \varepsilon$ , загорается электрическая лампа 11–Ж. Мельник 19 увеличивает загрузку мельницы рудой, увеличивая производительность по исходной руде на шаг  $+ \Delta Q_0$ .

### **3.3. Автоматический контроль степени загрузки рудой рудногалечной мельницы второй стадии измельчения**

Оптимальная загрузка рудногалечной мельницы рудой определяет максимальную производительность технологического комплекса второй стадии магнитного обогащения железных руд. Величина оптимальной загрузки рудногалечной мельницы рудой определяет максимальную производительность комплекса по магнитному продукту. Причем величина оптимальной загрузки является переменной величиной и определяется физико-механическими свойствами руды, такими как крупность, твердость, массовая доля железа, вкрапленность железного минерала. До настоящего времени отсутствуют методы автоматизированного контроля оптимальной загрузки барабанных мельниц рудой. Не установлены закономерности формирования статических характеристик технологических комплексов вторых стадий рудногалечного измельчения магнитной сепарации железных руд.

В работах по автоматизации барабанных мельниц основное внимание уделено контролю и регулированию степени загрузки мельниц рудой. Причем эта задача решается отдельно для барабанных мельниц без учета влияния степени загрузки на режим и эффективность работы последующего за мельницей обогатительного аппарата. Известны методы и системы

автоматического контроля заполнения мельниц рудой по звукометрическому сигналу, по сигналу активной мощности электродвигателя мельниц. Предложены методы, основанные на вейвлет-анализе звукометрического сигнала мельницы, методы, использующие спектральный анализ и выделение информативной части сигнала активной мощности электродвигателя мельницы [5]. Недостатком этих методов является отсутствие учета влияния физико-механических свойств обогащаемой руды. Эти методы обеспечивают максимальную производительность мельницы по классу крупности – 0,074 мм и не исключают переизмельчение крупновкрапленных и недоизмельчение мелковкрапленных руд. Они не учитывают обеспечение эффективного режима работы последующего магнитного сепаратора. Отсутствует информация о статических характеристиках комплекса «рудногалечное измельчение – магнитная сепарация».

Следовательно, в настоящее время отсутствуют научно обоснованные принципы автоматического контроля оптимальной загрузки рудой рудногалечных мельниц, работающих последовательно с магнитными сепараторами на магнитобогатительных фабриках железных руд

Научной проблемой является установление закономерностей формирования статических характеристик технологических комплексов рудногалечного измельчения магнитной сепарации железных руд с целью автоматизированного контроля оптимальной загрузки рудногалечной мельницы рудой по сигналам активной мощности электродвигателей магнитного сепаратора и мельницы. Решение этой проблемы позволит разработать систему автоматизированного контроля оптимальной загрузки рудой рудногалечной мельницы, позволит автоматически раскрывать руду с переменными свойствами до необходимой крупности помола, обеспечить максимальную производительность комплекса по магнитному продукту. Это обеспечит повышение технико-экономических показателей обогащения железных руд.

Для решения поставленной проблемы необходимо разработать математическую модель технологического комплекса «рудногалечная мельница

– магнитный сепаратор». Выполнить компьютерное моделирование этого комплекса и найти статические характеристики этого комплекса позволяющие обосновать функциональную схему системы автоматизированного контроля оптимальной загрузки рудой рудногалечной мельницы по сигналам активной мощности электродвигателей магнитного сепаратора и мельницы.

В ДВНЗ «Национальный горный университет» разработаны научные основы применения промышленного магнитного сепаратора в качестве естественного анализатора степени раскрытия руды. В главе 2 показано, что максимальное значение активной мощности электродвигателя барабана сепаратора соответствует максимальной производительности технологического комплекса магнитного обогащения по извлеченному магнитному железу и минимальному удельному расходу электроэнергии. Для комплексного анализа процессов магнитного обогащения руд была разработана математическая модель технологического комплекса магнитного обогащения, включающая модели измельчения и магнитной сепарации, модель раскрытия руды, модели формирования активной мощности приводных электродвигателей мельницы и магнитного сепаратора, представленная на рис. 3.17.

Зависимость активной мощности, потребляемой приводным двигателем рудно-галечной мельницы от конструктивных и технологических факторов, получена в работе [26]:

$$P_{\text{м}} = 6,54 \cdot \omega \cdot \gamma_{\text{п}} \frac{(R^2 + \rho^2)^{\frac{3}{2}}}{f^2 + 1} \left[ \frac{\omega^2 \xi}{g} (\sqrt{R^2 - \rho^2} + f \cdot \rho) + f \cdot \sqrt{(1 + f^2)^2 - \frac{\omega^4 \cdot \xi^2}{g^2} (\sqrt{R^2 - \rho^2} + f \cdot \rho)^2} \right], \quad (3.24)$$

где  $R$  – радиус барабана рудногалечной мельницы;  $\omega$  – угловая скорость вращения мельницы;  $\rho$  – радиус заполнения мельницы рудой;  $f$  – коэффициент трения;  $\gamma_{\text{п}}$  – плотность пульпы в мельнице;  $\xi$  – коэффициент скольжения слоев руды в барабане мельницы;  $g$  – ускорение свободного падения.



Рис. 3.17. Схема математической модели технологического комплекса магнитного обогащения:

$\gamma_p$  – плотность пульпы в мельнице;  $\varphi_p$  – степень заполнения мельницы рудой;

$P_m$  – активная мощность двигателя рудногалечной мельницы;  $\tilde{P}_c$  – переменная составляющая активной мощности двигателя магнитного сепаратора.



Процесс измельчения описывается уравнением Риттингера

$$\frac{6}{\gamma_p} \cdot \left( \frac{1}{d_{cp2}} - \frac{1}{d_{cp1}} \right) \cdot Q = K_p \cdot P_m, \quad (3.25)$$

где  $d_{cp1}$ ,  $d_{cp2}$  – соответственно средние крупности руды на входе и выходе мельницы;  $Q$  – производительность по руде на входе мельницы;  $P_m$  – активная мощность, затрачиваемая на процесс измельчения;  $K_p$  – коэффициент Риттингера;  $\gamma_p$  – плотность измельчаемой руды.

Раскрытие минералов описывается случайной моделью раскрытия Уигла и Ли [74]. Модель магнитной сепарации описывается через магнитную проницаемость концентрата по уравнению К. Лихтенеккера

$$\mu = \mu_m^\alpha, \quad (3.26)$$

где  $\mu_m$  – магнитная проницаемость магнетита;  $\alpha$  – содержание магнетита в сгущенном продукте.

Зависимость активной мощности приводного двигателя барабана магнитного сепаратора от характеристик концентрата представлена в подразделе 2.1.

В результате моделирования [160] были получены статические характеристики активной мощности мельницы и магнитного сепаратора от степени заполнения, представленные на рис. 3.18.

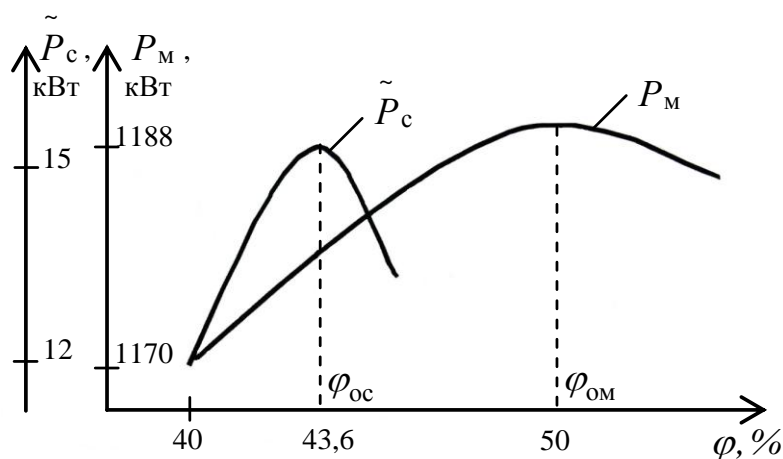


Рис. 3.18. Статические характеристики активной мощности электродвигателей мельницы и магнитного сепаратора:

$P_M$  – активная мощность двигателя мельницы;  $\tilde{P}_c$  – переменная составляющая активной мощности двигателя магнитного сепаратора;  $\varphi_{oc}$  – оптимальное заполнение мельницы рудой по критерию максимальной производительности по магнитному продукту;  $\varphi_{ом}$  – оптимальное заполнение мельницы рудой по критерию максимальной мощности, потребляемой мельницей.

Анализ статических характеристик рис. 3.18 показывает, что максимальная активная мощность электродвигателя сепаратора, соответствующая максимальной производительности комплекса по магнитному продукту, не совпадает с максимумом активной мощности приводного двигателя мельницы. Причем оптимальное заполнение мельницы рудой, которое обеспечивает максимальную производительность комплекса по магнитному продукту  $\varphi_{oc}$  меньше, чем оптимальное заполнение мельницы рудой  $\varphi_{om}$ , которое соответствует максимальному энергопотреблению мельницы. Из рис. 3.18 видно, что оптимальное заполнение мельницы рудой

можно определить по знаку производной  $\frac{d\tilde{P}_c}{dP_M}$ . Причем, если  $\frac{d\tilde{P}_c}{dP_M} > 0$ , то

мельница недогружена, а если  $\frac{d\tilde{P}_c}{dP_M} < 0$ , то мельница перегружена. По данным

статических характеристик рис. 3.18 построена статическая характеристика технологического комплекса, представленная на рис. 3.19.

Анализ данной характеристики на рис. 3.19 показывает, что увеличение подачи руды и увеличение потребления мощности в мельнице (точка А) приводит к увеличению производительности комплекса по магнитному продукту. При дальнейшем увеличении подачи руды в мельницу (точка В) увеличивается потребляемая мощность и уменьшается производительность комплекса по магнитному продукту, что соответствует перегрузке комплекса.

В результате проведенных исследований были получены зависимости статических характеристик технологического комплекса магнитного обогащения от крупности руды на входе мельницы (рис. 3.20), от содержания магнетита в сгущенном продукте (рис. 3.21), от плотности пульпы (рис. 3.22).

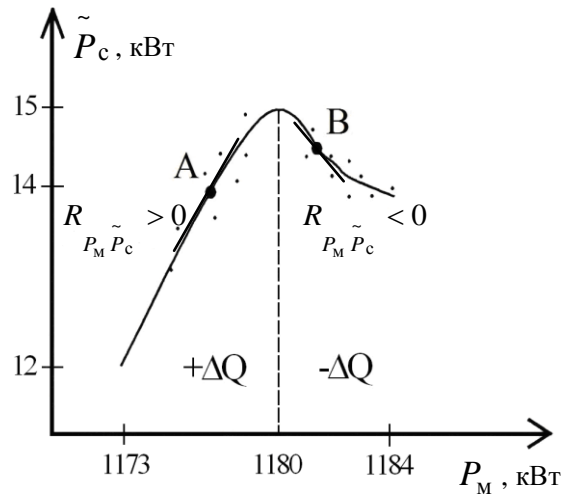


Рис. 3.19. Статическая характеристика технологического комплекса магнитного обогащения:

$\pm \Delta Q$  – приращение производительности по руде на входе мельницы;  $R_{P_M \tilde{P}_c}$  – коэффициент корреляции между сигналами активной мощности электродвигателей сепаратора и мельницы; А – точка недогрузки комплекса; В – точка перегрузки комплекса.

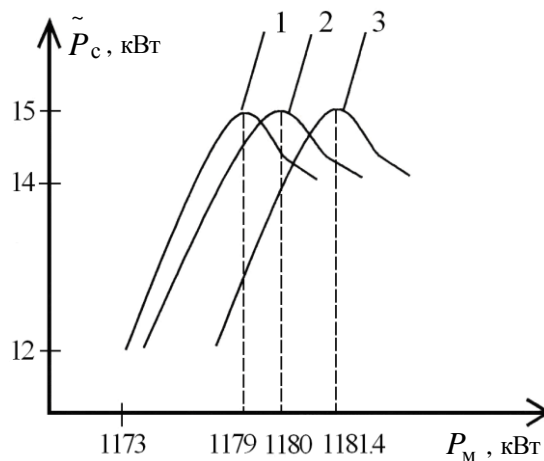


Рис. 3.20. Дрейф статической характеристики от крупности руды  $d$  на входе мельницы:

1 –  $d = 8$  мм; 2 –  $d = 10$  мм; 3 –  $d = 12$  мм.

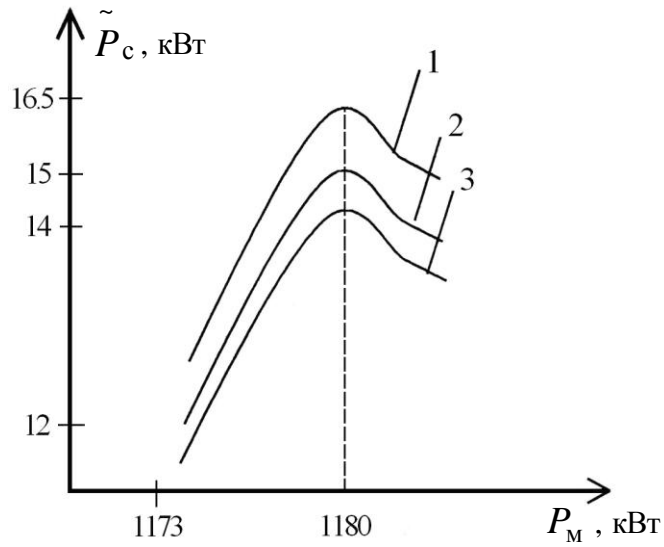


Рис. 3.21. Дрейф статической характеристики от содержания магнетита  $\alpha$  в сгущенном продукте:

$$1 - \alpha = 0,87; 2 - \alpha = 0,85; 3 - \alpha = 0,83.$$

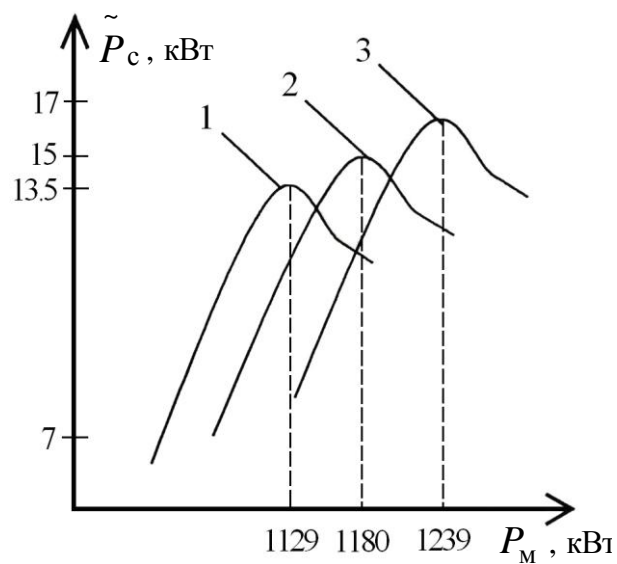


Рис. 3.22. Дрейф статической характеристики от плотности пульпы  $\gamma_n$ :

$$1 - \gamma_n = 2,29 \text{ кг} / \text{м}^3; 2 - \gamma_n = 2,41 \text{ кг} / \text{м}^3; 3 - \gamma_n = 2,53 \text{ кг} / \text{м}^3.$$

Анализ данных зависимостей показывает, что при изменении всех возмущающих воздействий на процесс измельчения и магнитной сепарации сохраняется возможность определения оптимальной загрузки рудногалечной мельницы рудой по знаку производной переменной составляющей сигнала активной мощности электродвигателя магнитного сепаратора по сигналу активной мощности приводного электродвигателя мельницы. Учитывая стохастический характер изменения сигналов активной мощности практически определить знак вышеуказанной производной возможно по знаку коэффициента корреляции между сигналами активной мощности электродвигателей сепаратора и мельницы. Управление загрузкой рудногалечной мельницы рудой производится с помощью системы автоматизированного контроля и управления, функциональная схема которой представлена на рис. 3.23.

Автоматизированная система контроля загрузки рудногалечной мельницы рудой может работать по одному из двух алгоритмов [163].

Первый алгоритм автоматизированного контроля загрузки мельницы работает по знаку производной сигнала переменной составляющей активной мощности электродвигателя сепаратора по сигналу активной мощности электродвигателя мельницы

$$Q = \left\{ \begin{array}{l} \text{увеличить загрузку : } + \Delta Q; \frac{d \tilde{P}_c}{dP_M} > 0 \\ \text{оптимальная загрузка : } \Delta Q = 0; \frac{d \tilde{P}_c}{dP_M} = 0 \\ \text{уменьшить загрузку : } - \Delta Q; \frac{d \tilde{P}_c}{dP_M} < 0 \end{array} \right., \quad (3.27)$$

где  $\pm \Delta Q$  – приращение производительности по руде на входе мельницы.

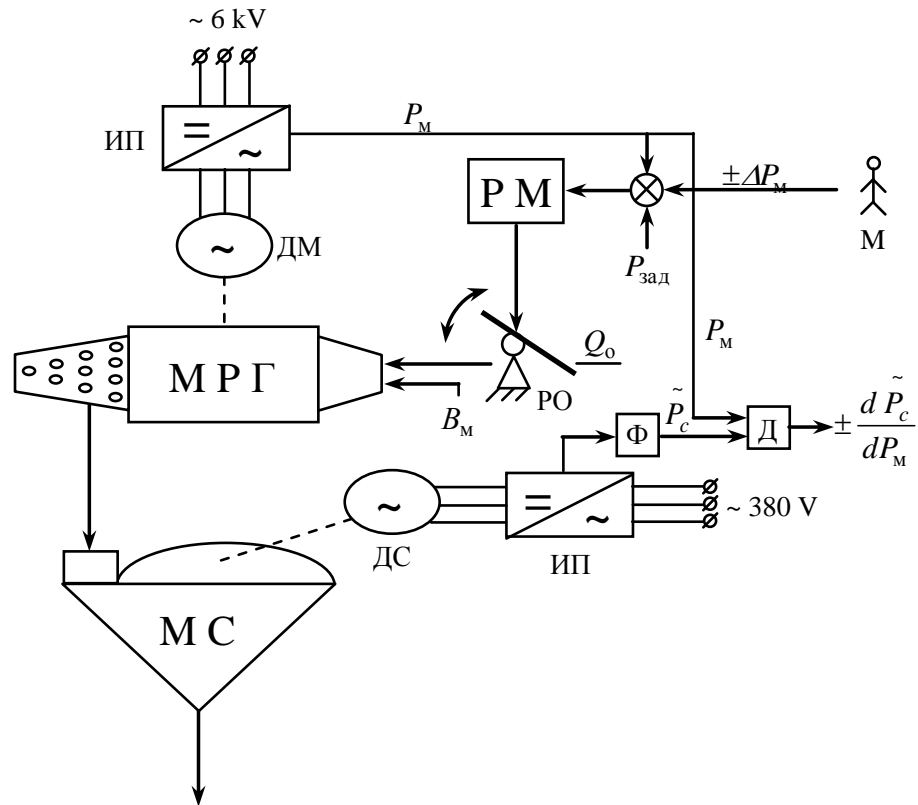


Рис. 3.23. Функциональная схема системы автоматизированного контроля и управления загрузки рудногалечной мельницы рудой:

ИП – измерительный преобразователь активной мощности; ДМ – электродвигатель мельницы; МРГ – рудногалечная мельница; МС – магнитный сепаратор; РМ – регулятор производительности по руде на входе мельницы; РО – регулирующий орган; ДС – электродвигатель сепаратора; М – мельник; Ф – фильтр переменной составляющей активной мощности электродвигателя сепаратора; Д – дифференцирующее устройство;  $\pm \Delta P_M$  – корректирующее воздействие регулятору загрузки рудой по сигналу активной мощности электродвигателя мельницы;  $P_{зад}$  – задающее воздействие;  $P_M$  – активная мощность двигателя мельницы;  $B_M$  – расход воды в мельницу;  $Q_0$  – производительность по руде на входе мельницы.

Второй алгоритм автоматизированного контроля загрузки мельницы рудой работает по знаку коэффициента корреляции  $R_{P_M \tilde{P}_c}$  между сигналами активной мощности электродвигателей магнитного сепаратора и мельницы

$$Q = \left| \begin{array}{l} \text{недогрузка : } + \Delta Q; R_{P_M \tilde{P}_c} > 0 \\ \text{оптимальная загрузка : } \Delta Q = 0; \left| R_{P_M \tilde{P}_c} \right| \leq \delta, \\ \text{перегрузка : } - \Delta Q; R_{P_M \tilde{P}_c} < 0 \end{array} \right. , \quad (3.28)$$

где  $\delta$  – зона нечувствительности.

На основе моделирования технологического комплекса рудногалечного измельчения и магнитной сепарации железных руд разработан метод автоматизированного контроля оптимальной загрузки рудногалечной мельницы рудой по знаку производной переменной составляющей сигнала активной мощности электродвигателя магнитного сепаратора по сигналу активной мощности приводного электродвигателя мельницы. Установлено, что при недогрузке рудногалечной мельницы рудой знак производной положительный, а при перегрузке отрицательный.

Предложен метод автоматизированного контроля оптимальной загрузки рудногалечной мельницы рудой по знаку коэффициента корреляции между сигналами активной мощности электродвигателей магнитного сепаратора и мельницы. Причем при недогрузке мельницы рудой знак коэффициента корреляции положительный, а при перегрузке отрицательный.

### **3.4. Автоматический контроль степени загрузки рудой шаровой мельницы второй стадии измельчения**

Шаровые мельницы широко применяются на обогатительных фабриках руд черных и цветных металлов для предварительного измельчения и



раскрытия руд. Шаровые мельницы первых стадий измельчения применяют для предварительного измельчения руд, а шаровые мельницы вторых и третьих стадий – для раскрытия руды и последующего обогащения. Режим работы и эффективность измельчения и раскрытия руды в шаровых мельницах в значительной мере определяются степенью загрузки мельниц рудой. Причем для каждого типа руды требуется своя оптимальная крупность помола, обеспечивающая необходимое раскрытие руды и высокие показатели магнитного обогащения.

Известные методы автоматического контроля загрузки шаровых мельниц рудой по звукометрическому сигналу мельницы [28], по спектральной составляющей активной мощности приводного электродвигателя мельницы [89] не позволяют ответить на главный вопрос, какую степень загрузки рудой необходимо поддерживать для каждого типа руды.

В этом подразделе диссертации приводится научное обоснование принципов построения автоматического анализатора степени загрузки рудой в шаровой мельницы второй стадии измельчения, последовательно соединенной с магнитным сепаратором.

Функциональная схема автоматического анализатора степени загрузки рудой шаровой мельницы [162] второй стадии измельчения обогатительной фабрики железных руд представлена на рис. 3.24.

Пески П гидроциклона 5 поступают в шаровую мельницу 1. Измельченный продукт поступает в магнитный сепаратор 3. Мельница 1 вращается электродвигателем 2, в цепь статора которого включен измерительный преобразователь активной мощности 10. При изменении свойств руды изменяется заполнение мельницы 1 рудой, изменяется крупность помола и раскрытия руды. Это приводит к изменению производительности по магнитному продукту сепаратора 3 и величины сигнала  $P_C$  активной мощности электродвигателя 4. Сигнал активной мощности  $P_C$  является пульсирующим. Пульсирующая переменная составляющая этого сигнала характеризует потери на вихревые токи и гистерезис в сепараторе. Эта составляющая модулирует

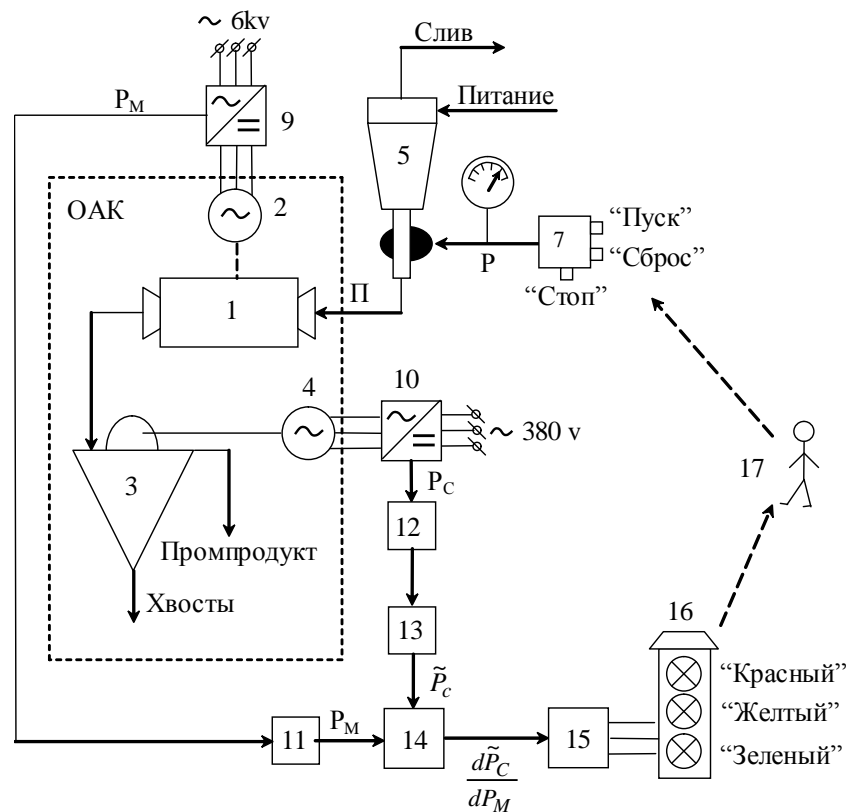


Рис. 3.24. Функциональная схема автоматического анализатора степени загрузки шаровой мельницы рудой

1 - шаровая мельница; 2 - электродвигатель мельницы; 3 - магнитный сепаратор; 4 - электродвигатель сепаратора; 5 - гидроциклон; 6 - пневматический регулирующий орган; 7 - компрессор; 8 - манометр; 9, 10 - измерительные преобразователи активной мощности; 11, 12 - вторичные приборы; 13 - активный фильтр; 14 - дифференцирующее устройство; 15 - логическое устройство; 16 - светофор; 17 - мельник; ОАК - объект автоматизированного контроля;  $\tilde{P}_c$  - переменная составляющая сигнала активной мощности электродвигателя магнитного сепаратора;  $P_M$  - сигнал активной мощности электродвигателя мельницы;  $P$  - давление воздуха;  $P_C$  - сигнал активной мощности электродвигателя сепаратора.

несущую частоту 100 Гц измерительного преобразователя активной мощности 10. Активный фильтр 13 выделяет переменную составляющую активной мощности  $\tilde{P}_c$ , которая вместе с сигналом активной мощности электродвигателя мельницы  $P_M$  поступает на вход дифференцирующего устройства 14.

Дифференцирующее устройство 14 вычисляет знак производной  $\frac{d\tilde{P}_c}{dP_M}$ .

Статическая характеристика пневматического регулирующего органа гидроциклона представлена на рис. 3.25.

Статические характеристики объекта автоматического контроля «мельница – магнитный сепаратор» представлены на рис. 3.26, 3.27. Анализ этих характеристик показывает, что при любых типах руд максимальной производительности сепаратора по магнитному продукту соответствует оптимальное значение загрузки мельницы песками гидроциклона 5. Статическая характеристика дифференцирующего устройства показана на рис. 3.28.

Алгоритм работы автоматического анализатора степени загрузки шаровой мельницы рудой имеет вид

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{если } \frac{d\tilde{P}_c}{dP_M} > +\varepsilon, \text{ то "Перегрузка"} \\ \text{если } \frac{d\tilde{P}_c}{dP_M} < -\varepsilon, \text{ то "Недогрузка"} \\ \text{если } -\varepsilon \leq \frac{d\tilde{P}_c}{dP_M} \leq +\varepsilon, \text{ то "Норма"} \end{array} \right. \quad (3.29)$$

При перегрузке логическое устройство включит красный свет, при недогрузке – зеленый. Если рабочая точка находится вблизи оптимума, то горит желтый свет. Если горит зеленый свет «недогрузка» – мельник 17 нажимает кнопку «Сброс» компрессора 7, давление воздуха  $P$  уменьшается, пневматический регулирующий орган 6 разжимается, диаметр пескового

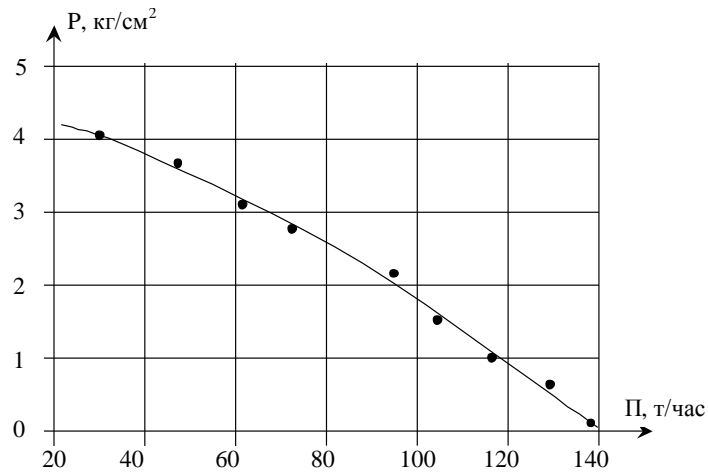


Рис. 3.25. Статическая характеристика пневматического регулирующего органа гидроциклона:

Π – производительность гидроциклона по пескам; P – давление в пневматическом регулирующем органе.

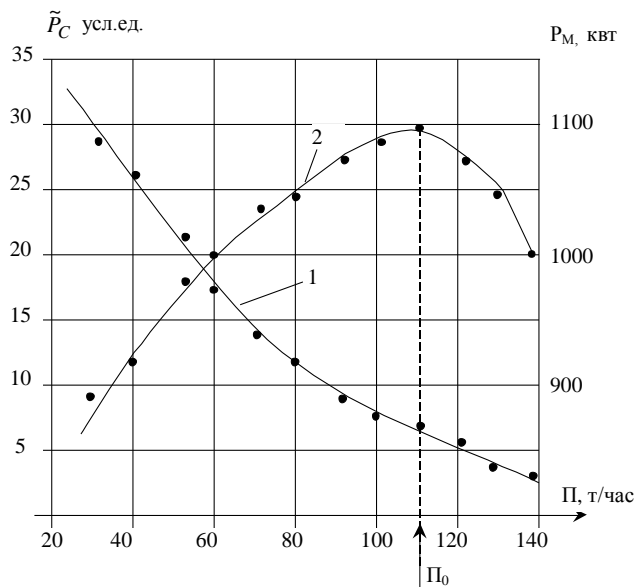


Рис. 3.26. Статическая характеристика технологического комплекса «шаровая мельница – магнитный сепаратор»:

1 – зависимость сигнала активной мощности электродвигателя мельницы  $P_M$  от производительности гидроциклона по пескам; 2 – зависимость переменной составляющей сигнала активной мощности электродвигателя магнитного сепаратора  $\tilde{P}_C$  от производительности гидроциклона по пескам Π;  $\Pi_0$  – оптимальная производительность по пескам гидроциклона на входе мельницы

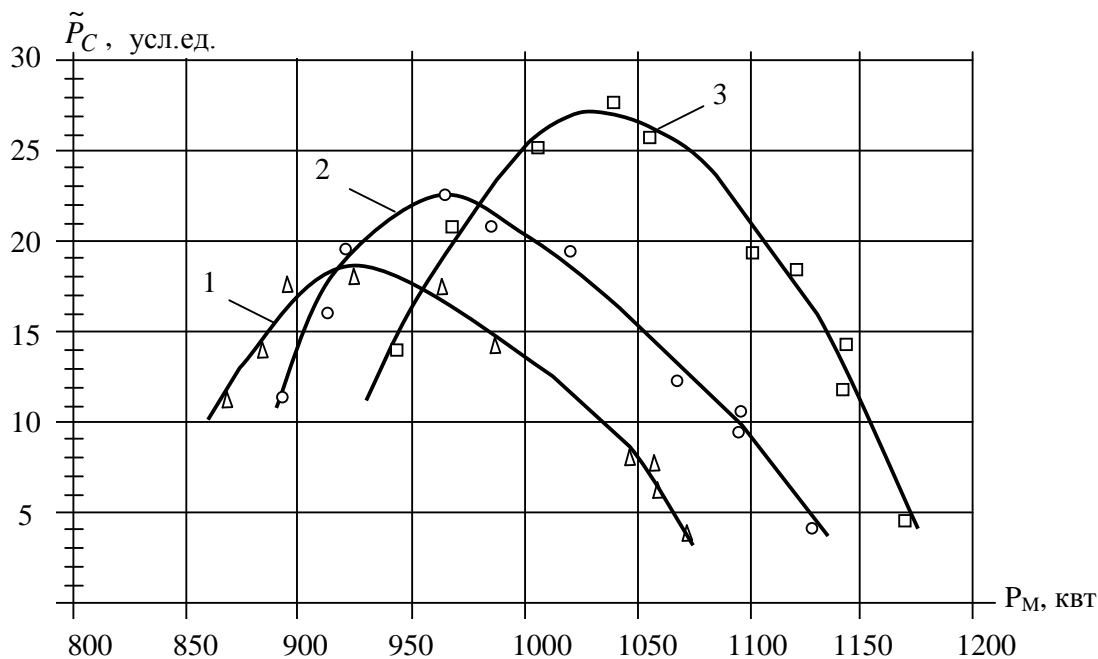


Рис. 3.27. Статические характеристики объекта автоматического контроля оптимальной степени загрузки шаровой мельницы рудой:

1 – шаровая загрузка 75 т; 2 – шаровая загрузка 80 т; 3 – шаровая загрузка 85 т

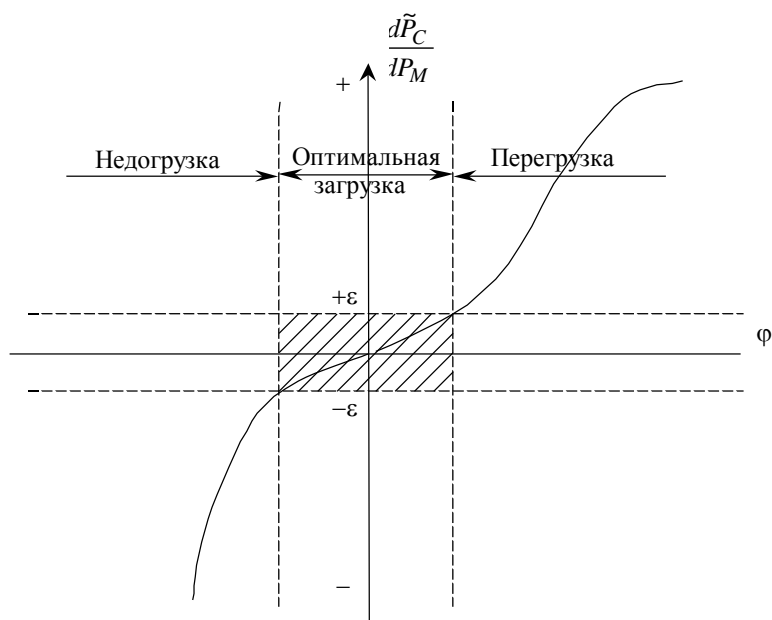


Рис. 3.28. Статическая характеристика дифференцирующего устройства:  
 $\pm \varepsilon$  – зона нечувствительности;  $\varphi$  – степень заполнения мельницы рудой

отверстия увеличивается, расход песков  $P$  увеличивается, мельница загружается до оптимального значения, загорается желтый свет. Мельник 17 нажимает кнопку «Стоп». При перегрузке мельницы рудой загорается красный свет светофора 16. Мельник 17 нажимает кнопку «Пуск» компрессора. Давление воздуха  $P$  в системе увеличивается, пневматический регулирующий орган 6 сжимается, диаметр пескового отверстия уменьшится, мельница разгружается до оптимального значения, загорается желтый свет. Мельник 17 останавливает компрессор, нажимая кнопку «Стоп». Период колебаний свойств руды составляет несколько часов. Поэтому настройку системы загрузки мельницы рудой производят 1-2 раза в смену.

Следовательно, можно сделать следующее заключение, что в технологических комплексах второй стадии измельчения и магнитной сепарации магнитообогажительных фабрик статическая характеристика зависимости переменной составляющей сигнала активной мощности приводного электродвигателя магнитного сепаратора от сигнала активной мощности электродвигателя мельницы имеет экстремальный характер, причем эта характеристика дрейфует при изменении веса шаровой загрузки.

В технологических комплексах измельчения и магнитной сепарации степень загрузки шаровой мельницы рудой определяется по знаку первой производной переменной составляющей сигнала активной мощности приводного электродвигателя магнитного сепаратора, по сигналу активной мощности приводного электродвигателя шаровой мельницы. Причем если знак этой производной положительный, то мельница перегружена рудой, а если знак производной отрицательный, то мельница недогружена.

## **Выводы**

1. Предложена математическая модель технологического комплекса, состоящего из шаровой мельницы, последовательно соединенной с магнитным сепаратором. Рассмотрено математическое описание процесса раскрытия

железной руды измельчением и моделирование изменения напряженности магнитного поля сепаратора в рабочей зоне под воздействием слоя измельченного магнитного продукта. В результате исследования полученной модели с позиций задач управления установлено, что в технологическом комплексе второй стадии измельчения магнитной сепарации железных руд барабанный магнитный сепаратор является естественным автоматическим анализатором степени раскрытия железной руды измельчением в шаровой мельнице, последовательно соединенной с этим сепаратором.

2. В качестве управляющего воздействия раскрытием железной руды во второй стадии измельчения магнитной сепарации можно использовать регулирование плотности пульпы в разгрузке шаровой мельницы по величине радиальной составляющей напряженности магнитного поля в рабочей зоне магнитного сепаратора, последовательно соединенного с шаровой мельницей.

3. Степень загрузки барабанной мельницы рудой определяется по знаку первой производной сигнала активной мощности электродвигателя магнитного сепаратора по сигналу активной мощности электродвигателя мельницы. Причем для мельниц мокрого самоизмельчения, если этот знак положительный, то имеет место недогрузка мельницы рудой, а если этот знак отрицательный, то имеет место перегрузка мельницы рудой. Для шаровых мельниц положительный знак производной характеризует перегрузку мельницы рудой, а отрицательный знак производной характеризует недогрузку мельницы рудой.

4. Предложено знак производной определять по знаку коэффициента корреляции между сигналами активной мощности электродвигателей мельницы и магнитного сепаратора.

5. Установлено, что автоматический контроль оптимальной степени заполнения рудой барабанной мельницы, последовательно соединенной с магнитным сепаратором, осуществляется по экстремуму статической характеристики зависимости спектральной составляющей активной мощности электродвигателя магнитного сепаратора, измеряемой на частоте бегущего магнитного поля сепаратора от активной мощности электродвигателя

мельницы, что позволяет повысить точность автоматического контроля оптимальной степени загрузки рудой барабанной мельницы с учетом переменных физико-механических свойств руды. Знак первой производной сигнала активной мощности электродвигателя магнитного сепаратора по сигналу активной мощности электродвигателя рудногалечной мельницы определяет направление изменения загрузки мельницы рудой. Если знак положительный, то мельница недогружена, а если отрицательный, то перегружена. Установлено, что знак коэффициента корреляции между сигналами активной мощности электродвигателей магнитного сепаратора и рудногалечной мельницы определяет степень загрузки мельницы рудой. Если знак положительный, то мельница недогружена, а если отрицательный, то перегружена. Отсутствие корреляции между сигналами является признаком оптимальной степени загрузки рудногалечной мельницы рудой.

6. Разработан метод и функциональные схемы автоматизированного контроля оптимальной степени загрузки барабанных мельниц рудой с учетом влияния на загрузку физико-механических свойств железной руды, что позволяет повысить качество концентрата, уменьшить переизмельчение руды и потери железа в хвостах, повысить производительность магнитообогатительных фабрик, снизить простои оборудования.



## **РАЗДЕЛ 4. ФУНКЦИОНАЛЬНО-АЛГОРИТМИЧЕСКИЕ СТРУКТУРЫ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ СТЕПЕНИ ЗАГРУЗКИ РУДОЙ БАРАБАННЫХ МЕЛЬНИЦ**

### **4.1. Функциональная схема корреляционной системы автоматического контроля степени загрузки рудой шаровой мельницы**

В третьей главе были рассмотрены системы автоматического контроля степени загрузки рудой барабанных мельниц по знаку производной сигнала активной мощности приводного электродвигателя сепаратора по сигналу активной мощности приводного электродвигателя мельницы.

Процесс измельчения руды в барабанных мельницах является случайным, поэтому для таких процессов более надежным является корреляционный метод определения положения рабочей точки на параболической статической характеристике объекта управления. В этом случае производят линеаризацию статической характеристики в окрестностях рабочей точки. Причем если идет речь только об определении области нахождения рабочей точки до или после экстремума, то главную информацию несет знак коэффициента корреляции. До экстремума этот знак положительный, а после экстремума знак отрицательный. Знаковая информация является более надежной, чем определение величины коэффициента корреляции. Положительный опыт применения такого метода был рассмотрен в работе [120] применительно к механическим классификаторам и магнитным сепараторам. Однако к технологическим комплексам измельчения и магнитной сепарации этот метод еще не применялся.

Функциональная схема корреляционной системы автоматического контроля загрузки рудой шаровой мельницы представлена на рис. 4.1. Мельница МШР вращается электродвигателем ДМ, в цепь статора которого включен измерительный преобразователь активной мощности ПМ.

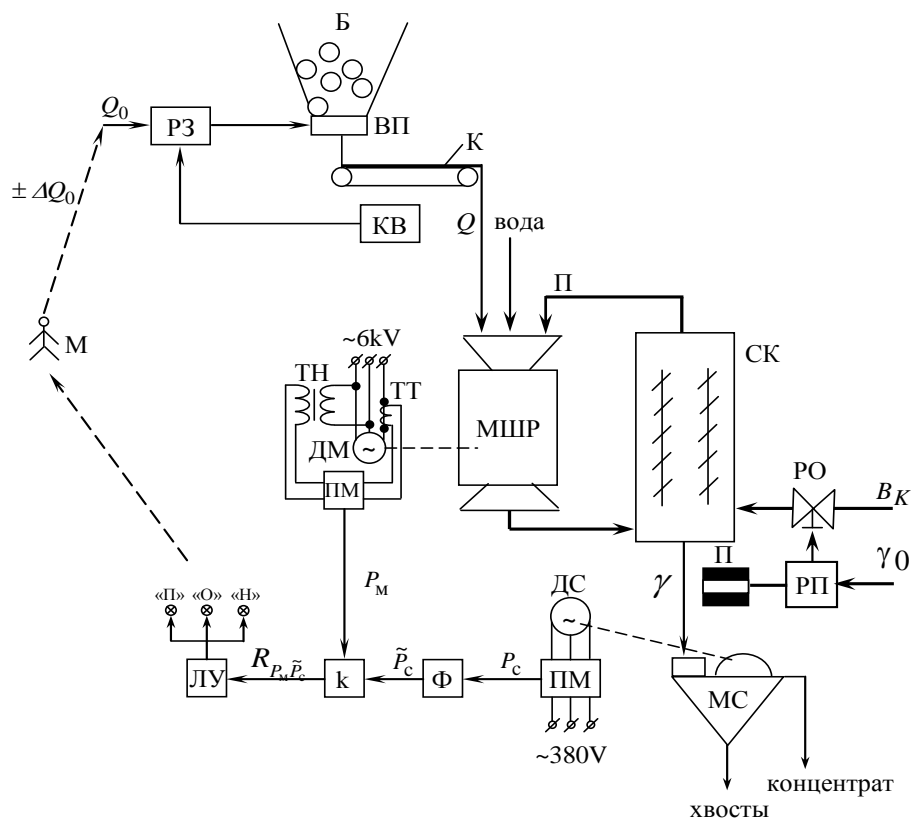


Рис. 4.1. Функциональная схема корреляционной системы автоматического контроля степени загрузки рудой шаровой мельницы:

МШР – шаровая мельница с решеткой; СК – спиральный классификатор; МС – магнитный сепаратор; Б – бункер; ДМ – электродвигатель мельницы; ДС – электродвигатель магнитного сепаратора; Q – производительность по исходной руде; К – конвейер; КВ – конвейерные весы; В<sub>к</sub> – расход воды в классификатор; РЗ – регулятор загрузки исходной рудой;  $\gamma$  – плотность слива классификатора; РП – регулятор плотности слива классификатора; П – плотномер; РО – регулирующий орган расхода воды; ИМ – исполнительный механизм вибропитателя; ТТ – трансформатор тока; ТН – трансформатор напряжения; ПМ – преобразователь активной мощности;  $P_M$  – сигнал активной мощности электродвигателя мельницы;  $\tilde{P}_C$  – переменная составляющая сигнала активной мощности электродвигателя сепаратора; k – коррелятор; ЛУ – логическое устройство;  $R_{P_M \tilde{P}_C}$  – коэффициент корреляции между сигналами активной мощности электродвигателей мельницы  $P_M$  и сепаратора  $\tilde{P}_C$ ;  $\gamma_0$  – задание РП плотности слива классификатора;  $\pm \Delta Q_0$  – корректирующий сигнал задания  $Q_0$  регулятора загрузки.

При изменении свойств руды изменяется заполнение мельницы рудой, изменяется крупность помола и раскрытия руды. Это приводит к изменению производительности по магнитному продукту сепаратора МС и величины сигнала  $P_C$  активной мощности электродвигателя ДС. Сигнал активной мощности  $P_C$  является пульсирующим. Пульсирующая переменная составляющая этого сигнала характеризует потери на вихревые токи и гистерезис в сепараторе. Эта составляющая модулирует несущую частоту 100 Гц измерительного преобразователя активной мощности ПМ. Активный фильтр  $\Phi$  выделяет переменную составляющую активной мощности  $P_C$ , которая вместе с сигналом активной мощности электродвигателя мельницы  $P_M$  поступает на вход коррелятора К, который вычисляет коэффициент корреляции  $R_{P_M P_C}$  между сигналами активной мощности электродвигателей мельницы и сепаратора. Значение коэффициента корреляции поступает на вход логического устройства ЛУ, которое совместно с коррелятором К является корреляционным анализатором степени загрузки рудой шаровой мельницы.

Алгоритм работы корреляционного анализатора:

$$Q = \begin{cases} Q_0 + \Delta Q, & \text{если } R_{P_M P_C} \leq -\delta \\ Q_0 - \Delta Q, & \text{если } R_{P_M P_C} \geq +\delta \\ Q_0 + 0, & \text{если } -\delta < R_{P_M P_C} < +\delta \end{cases} \quad (4.1)$$

Статическая характеристика корреляционного анализатора степени загрузки рудой шаровой мельницы представлена на рис. 4.2.

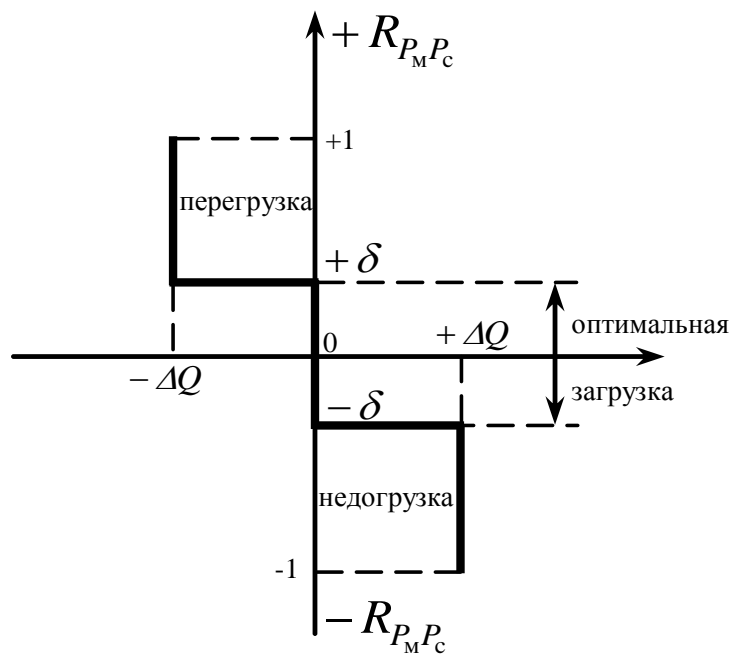


Рис. 4.2. Статическая характеристика корреляционного анализатора степени загрузки рудой шаровой мельницы

## 4.2. Функциональная схема корреляционной системы автоматического контроля степени загрузки рудой рудногалечной мельницы

Функциональная схема корреляционной системы автоматического контроля степени загрузки рудой рудногалечной мельницы второй стадии измельчения представлена на рис. 4.3.

В мельницу 1 рудногалечного измельчения МРГ, которая вращается электродвигателем 2, поступает руда от мельницы мокрого самоизмельчения ММС через регулирующий орган 5. Также в мельницу 1 поступают пески гидроциклона и вода. Разгрузка мельницы через бутару Б поступает на магнитный сепаратор, барабан которого вращается электродвигателем 4. При изменении физико-механических свойств руды изменяется заполнение мельницы рудой, что приводит к изменению активной мощности  $P_M$  электродвигателя мельницы, которая измеряется измерительным преобразователем активной мощности 7. При изменении заполнения мельницы изменяются условия измельчения и крупность помола руды в питании магнитного сепаратора, что приводит к изменению количества магнитного продукта на барабане сепаратора, т.е. к изменению его производительности по магнитному продукту. Сигнал активной мощности изменяется. Если мельница работает до экстремума статической характеристики, то знак коэффициента корреляции между сигналами активной мощности электродвигателей мельницы и сепаратора будет положительный и загорится лампочка «недогруз» мельницы. Если знак коэффициента корреляции отрицательный, то загорается лампочка «перегруз» мельницы. Мельник 13 в зависимости от состояния системы сигнализации изменяет производительность по руде на входе мельниц с помощью регулирующего органа 6 на величину  $\pm \Delta Q$ .

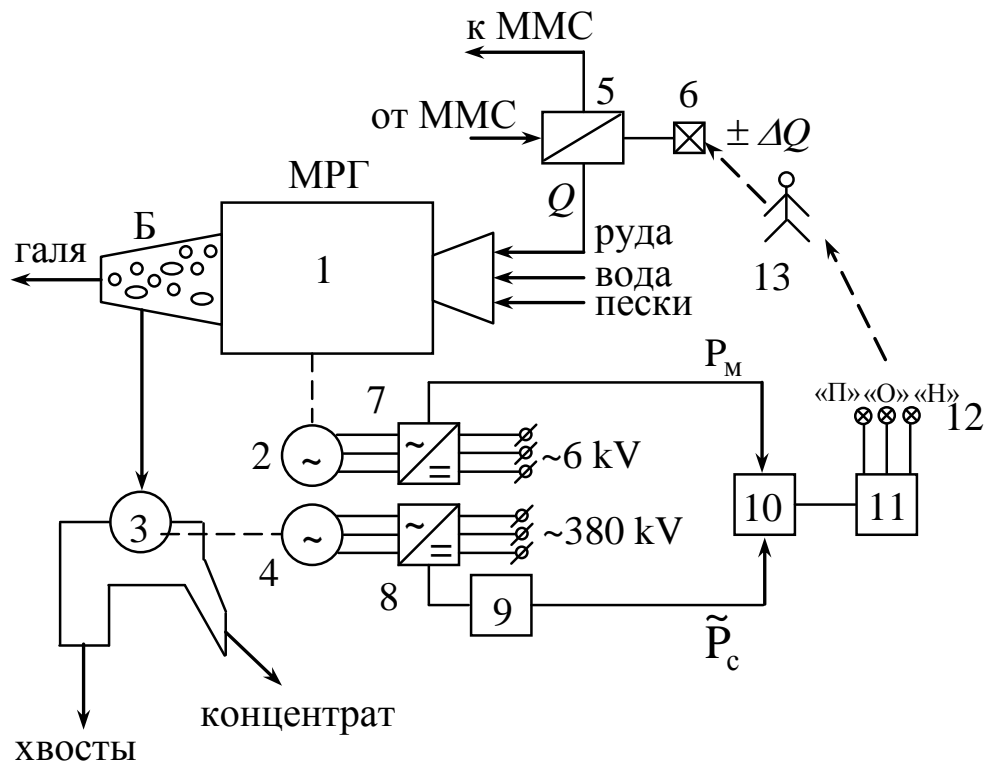


Рис. 4.3. Функциональная схема корреляционной системы автоматического контроля степени загрузки рудой рудногалечной мельницы второй стадии измельчения:

1 – рудногалечная мельница МРГ; 2 – электродвигатель мельницы; 3 – магнитный сепаратор; 4 – электродвигатель сепаратора; 5 – регулирующий орган загрузки мельницы рудой; 6 – исполнительный механизм; 7,8 – измерительные преобразователи активной мощности; 9 – фильтр динамической составляющей активной мощности; 10 – коррелятор; 11 – логическое устройство; 12 – сигнальные лампы; 13 – оператор-мельник;  $\pm \Delta Q$  – корректирующее воздействие производительности по руде  $Q$ ;  $\tilde{P}_c$  – динамическая составляющая сигнала активной мощности электродвигателя сепаратора;  $P_M$  – сигнал активной мощности электродвигателя мельницы; «П» – сигнал «перегрузка»; «О» – сигнал «оптимальная загрузка»; «Н» – сигнал «недогрузка».

Алгоритм корреляционного анализатора степени загрузки рудой рудногалечной мельницы будет иметь вид:

$$Q = \begin{cases} Q_0 + \Delta Q, & \text{если } R_{P_M P_c} \geq \delta \\ Q_0 - \Delta Q, & \text{если } R_{P_M P_c} \leq -\delta \\ Q_0 + 0, & \text{если } -\delta < R_{P_M P_c} < \delta \end{cases} \quad (4.2)$$

Статическая характеристика корреляционного анализатора степени загрузки рудой рудногалечной мельницы представлена на рис. 4.4.

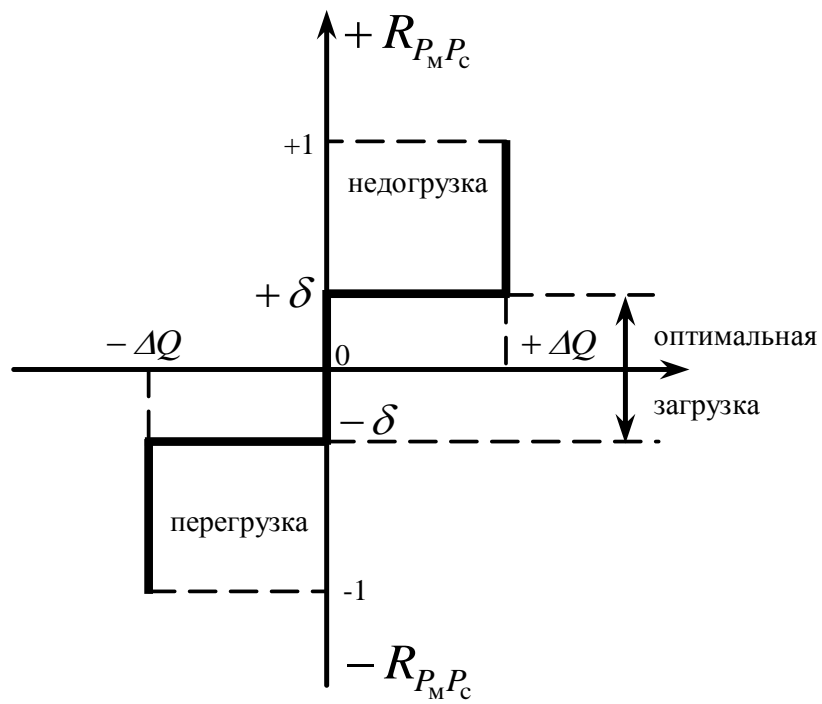


Рис. 4.4. Статическая характеристика корреляционного анализатора степени загрузки рудой рудногалечной мельницы



### **4.3. Функционально-алгоритмическая структура системы автоматического контроля степени загрузки рудой шаровых мельниц секции обогащения магнитообогатительной фабрики**

Общая укрупненная функциональная схема системы автоматического контроля загрузки рудой шаровых мельниц секции обогащения представлена на рис. 4.5.

Сигналы  $P_M$  и  $\tilde{P}_C$  поступают с измерительных преобразователей активной мощности электродвигателей мельниц и базовых магнитных сепараторов БМС, поступают через аналогово-цифровой преобразователь в промышленную компьютерную рабочую станцию ПКРС, где обрабатываются по схеме алгоритма рис. 4.6. Сигналы «недогрузка», «перегрузка» и «оптимальное заполнение» мельниц рудой поступают на монитор оператора-мельника, который изменяет загрузку мельниц I стадии по руде, а мельниц II стадии – по пескам.

Возможна автоматическая оптимизация загрузки рудой шаровых мельниц. В этом случае корректирующий сигнал на загрузку мельниц поступает через цифро-аналоговый преобразователь на исполнительные механизмы.

Схема алгоритма автоматического контроля степени загрузки рудой шаровых мельниц секции обогащения магнитообогатительной фабрики представлена на рис. 4.6.

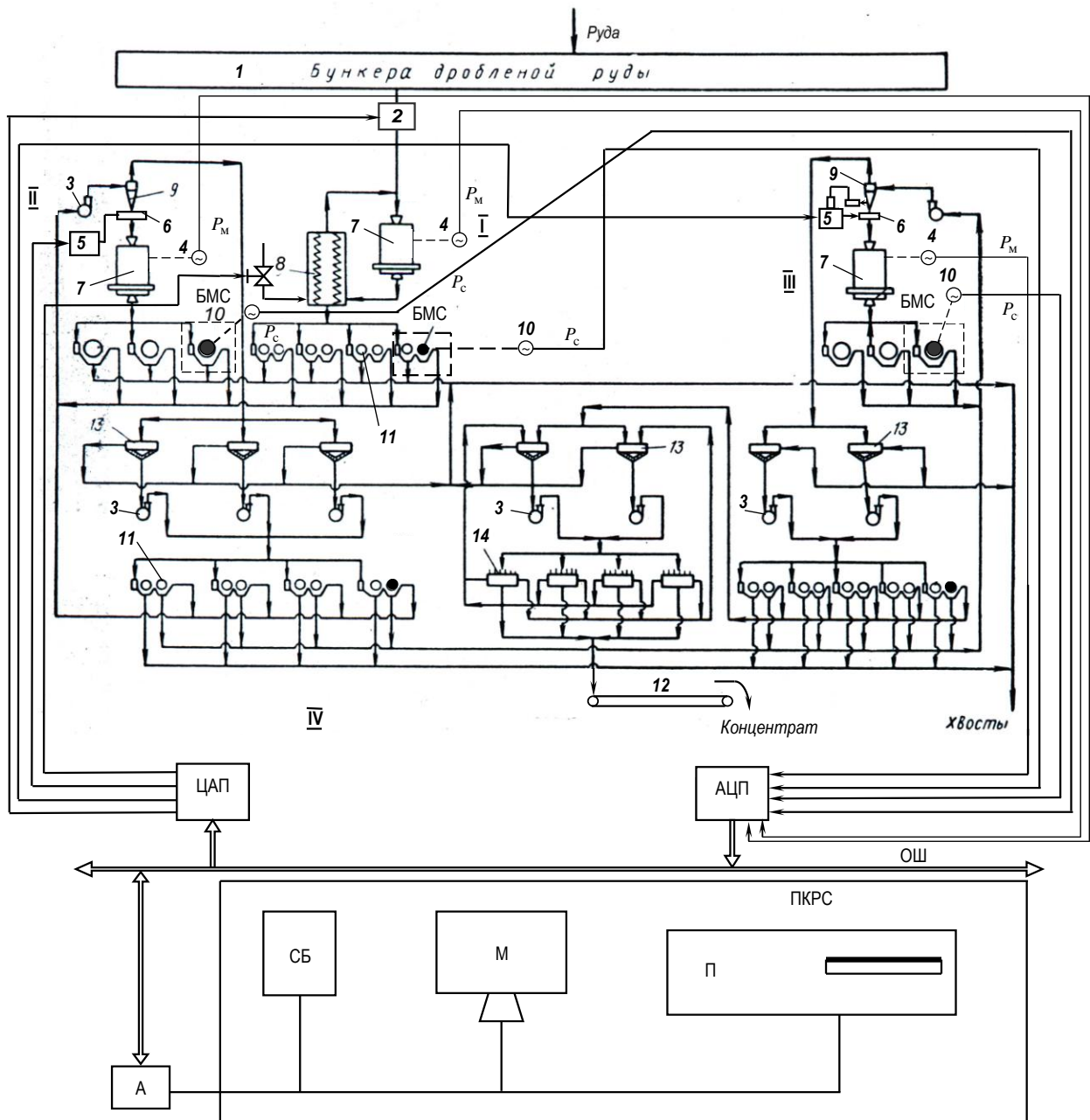


Рис. 4.5. Функциональная схема системы автоматического контроля загрузки шаровых мельниц рудой секции обогащения магнитообогатительной фабрики с шаровыми мельницами:

1 – бункер; 2 – вибропитатель; 3 – насосы; 4 – электродвигатели мельниц; 5 – компрессорные станции; 6 – пневматические исполнительные механизмы; 7 – мельницы; 8 – спиральный классификатор; 9 – гидроциклоны; 10 – электродвигатели барабана сепараторов; 11 – магнитные сепараторы; 12 – конвейер; 13 – дешламаторы; 14 – вакуумный фильтр; И – исполнительные механизмы;  $P_C$  – сигнал активной мощности электродвигателя сепаратора;  $P_M$  – сигнал активной мощности электродвигателя мельницы; БМС – базовый магнитный сепаратор; ЦАП – цифро-аналоговый преобразователь; АЦП – аналогово-цифровой преобразователь; ОШ – общая шина; СБ – системный блок; А – адаптер; М – монитор; П – принтер; ПКРС – промышленная рабочая станция.



Рис. 4.6. Схема алгоритма автоматического контроля степени загрузки рудой шаровых мельниц

#### 4.4. Функционально-алгоритмическая структура системы автоматического контроля степени загрузки рудой мельниц мокрого самоизмельчения и рудногалечных мельниц

Общая функциональная схема системы автоматического контроля степени загрузки рудой мельниц мокрого самоизмельчения и рудногалечных мельниц секции обогащения магнитообогатительной фабрики представлена на рис. 4.7.

Схема алгоритма автоматического контроля и регулирования степени загрузки рудой мельниц самоизмельчения и рудногалечных мельниц представлена на рис. 4.8.

Коэффициент корреляции между сигналами активной мощности электродвигателей мельницы  $P_M$  и сепаратора  $\tilde{P}_C$  рассчитывался по известным формулам.

Пусть  $P_M = x$ , а  $\tilde{P}_C = y$ .

Коэффициент корреляции:

$$r = \frac{\mu_{11}}{\sigma_u \sigma_v}, \quad (4.3)$$

где  $u$  и  $v$  отклонения  $x$  и  $y$  от их средних значений, а

$$\mu_{11} = \frac{\sum_{k=1}^n u_k v_k}{n}, \quad (4.4)$$

где  $u = x - \bar{x}$ ;  $v = y - \bar{y}$ ,  $\bar{x}$ ,  $\bar{y}$  – среднеарифметические значения;  $\sigma_u$ ,  $\sigma_v$  – среднеквадратические отклонения.

Алгоритм расчета коэффициента корреляции является составной частью блока 10 схемы алгоритма на рис. 4.6 и 4.8.

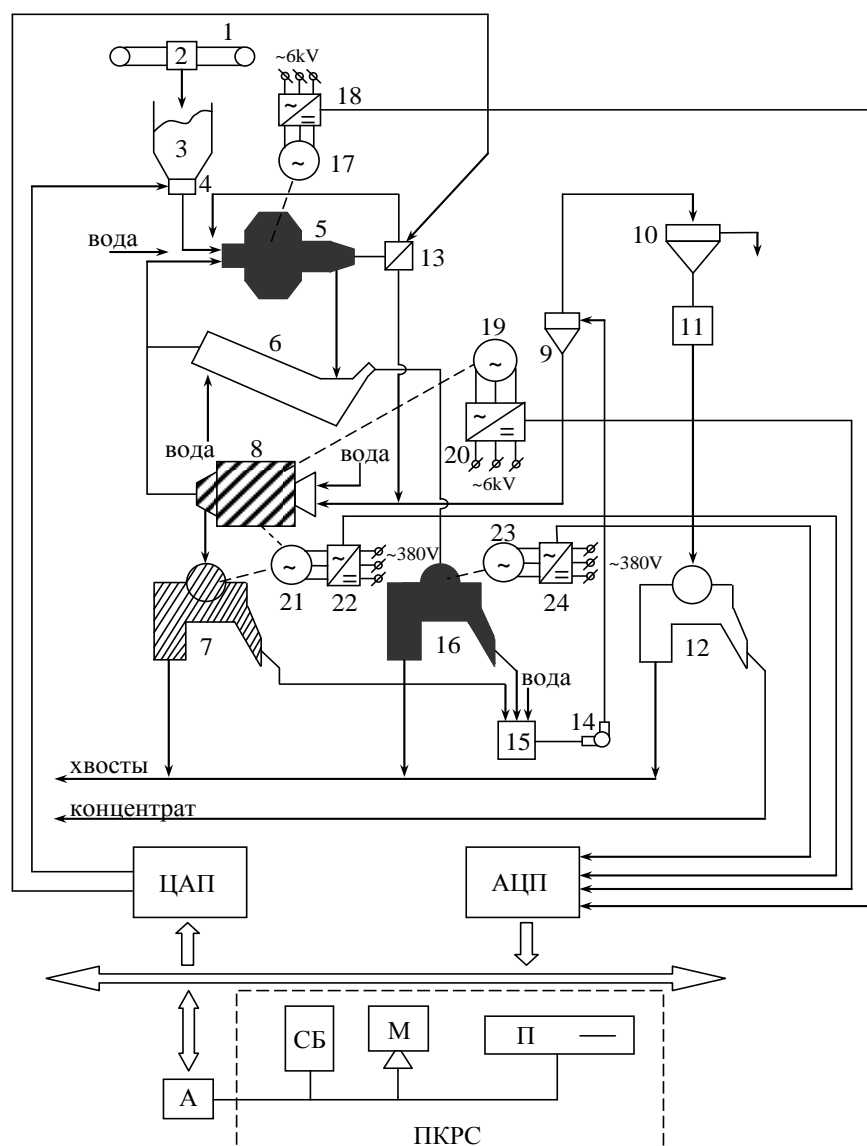


Рис. 4.7. Функциональная схема системы автоматического контроля и регулирования загрузки рудой мельниц самоизмельчения и рудногалечных мельниц секции обогащения железных руд:

1 – конвейер; 2 – автостелла; 3 – бункер с рудой; 4 – вибропитатель; 5 – мельница мокрого самоизмельчения; 6 – классификатор; 7 – пилотный магнитный сепаратор; 8 – рудногалечная мельница; 19, 17 – электродвигатели мельниц; 21, 23 – электродвигатели сепараторов; 18, 20, 22, 24 – измерительные преобразователи активной мощности; 9 – гидроциклон; 10 – дешлактор; 11, 15 – технологические зумпфы; 16 – пилотный магнитный сепаратор; АЦП – аналогово-цифровой преобразователь; ЦАП – цифро-аналоговый преобразователь; А – адаптер; ОШ – общая шина; СБ – системный блок; М – монитор; П – принтер; ПКРС – промышленная рабочая станция.

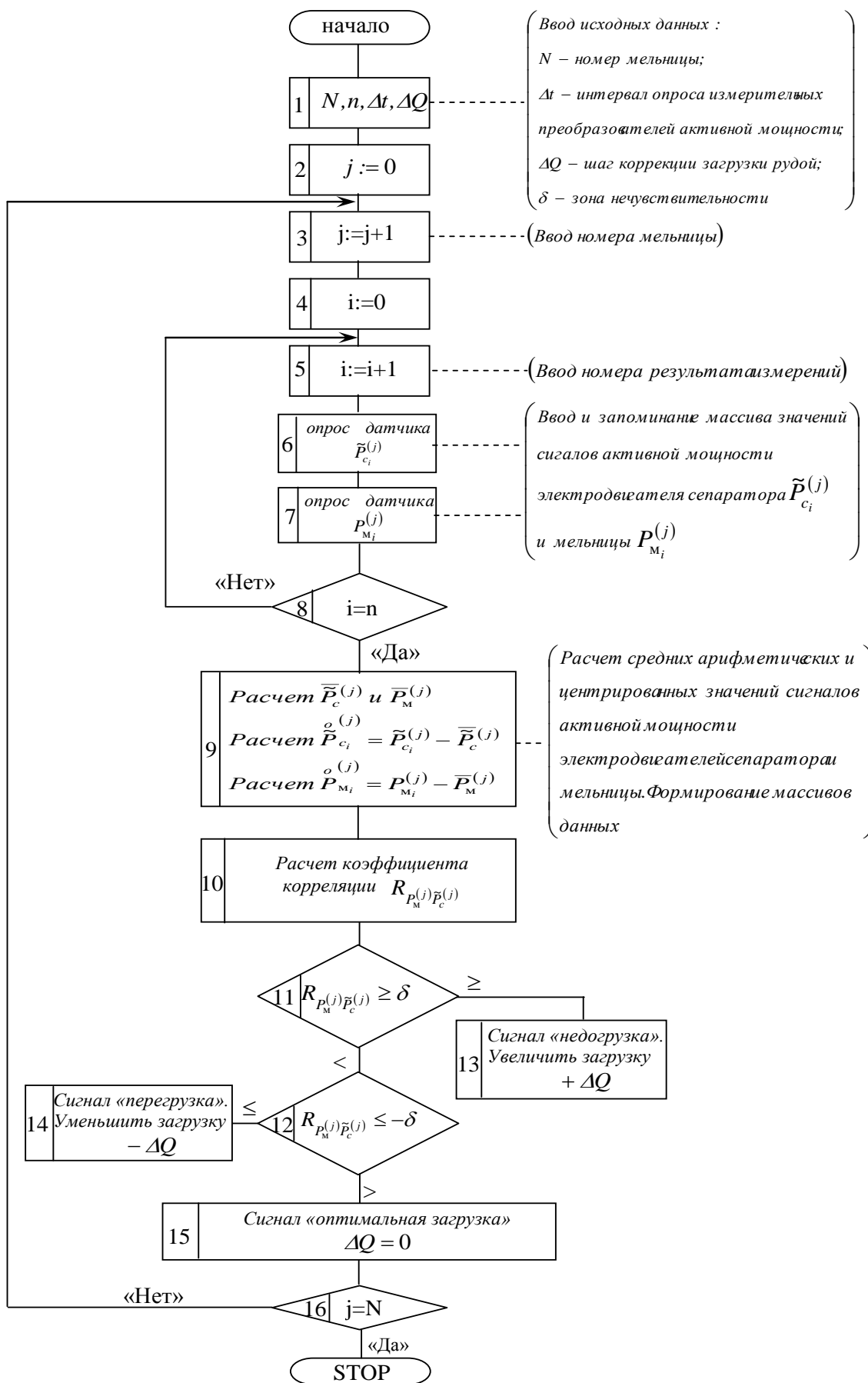


Рис. 4.8. Схема алгоритма автоматического контроля степени загрузки рудой мельниц самоизмельчения и рудногалечных мельниц

#### 4.5. Экспериментальные исследования в промышленных условиях системы автоматизированного контроля и управления степени загрузки рудой мельницы мокрого самоизмельчения

Система автоматизированного контроля и управления степени загрузки мельницы рудой экспериментально исследовалась в промышленных условиях ФОб-3 Лебединского ГОКа. Схема экспериментальных исследований системы представлена на рис. 4.9. Исследования проводились в двух режимах работы. Первый режим – ключ К замкнут. Это режим автоматической стабилизации заданной степени загрузки мельницы рудой путем коррекции задания системы автоматического регулирования производительности вибропитателя 2. Вторым режимом, ключ К разомкнут. Это режим автоматизированного контроля и регулирования степени загрузки рудой мельницы по минимуму коэффициента корреляции между сигналами активной мощности электродвигателей сепаратора  $\tilde{P}_c$  и мельницы  $P_m$ . Расчет коэффициента корреляции проводился с помощью программируемого микрокалькулятора. В зависимости от знака коэффициента корреляции корректировалось задание системы регулирования загрузки мельницы. Экспериментальные исследования проводились в течение 22 дней на одной и той же секции обогатительной фабрики. Поочередно от смены к смене с помощью переключателя 14 изменяли режим работы системы автоматического управления циклом измельчения.

Нечетные номера смен соответствуют режиму работы радиоизотопной системы автоматического регулирования заполнения мельницы. Четные номера смен соответствуют режиму работы корреляционной системы автоматизированного контроля и управления степени загрузки мельницы рудой по знаку коэффициента корреляции. Шаг коррекции загрузки рудой  $\pm \Delta Q = \pm 10 \frac{\text{т}}{\text{час}}$  определялся экспериментально в соответствии с минимальным порогом чувствительности. Во время эксперимента отбирались через 4 часа пробы исходной руды, концентрата и хвостов. По результатам анализа этих

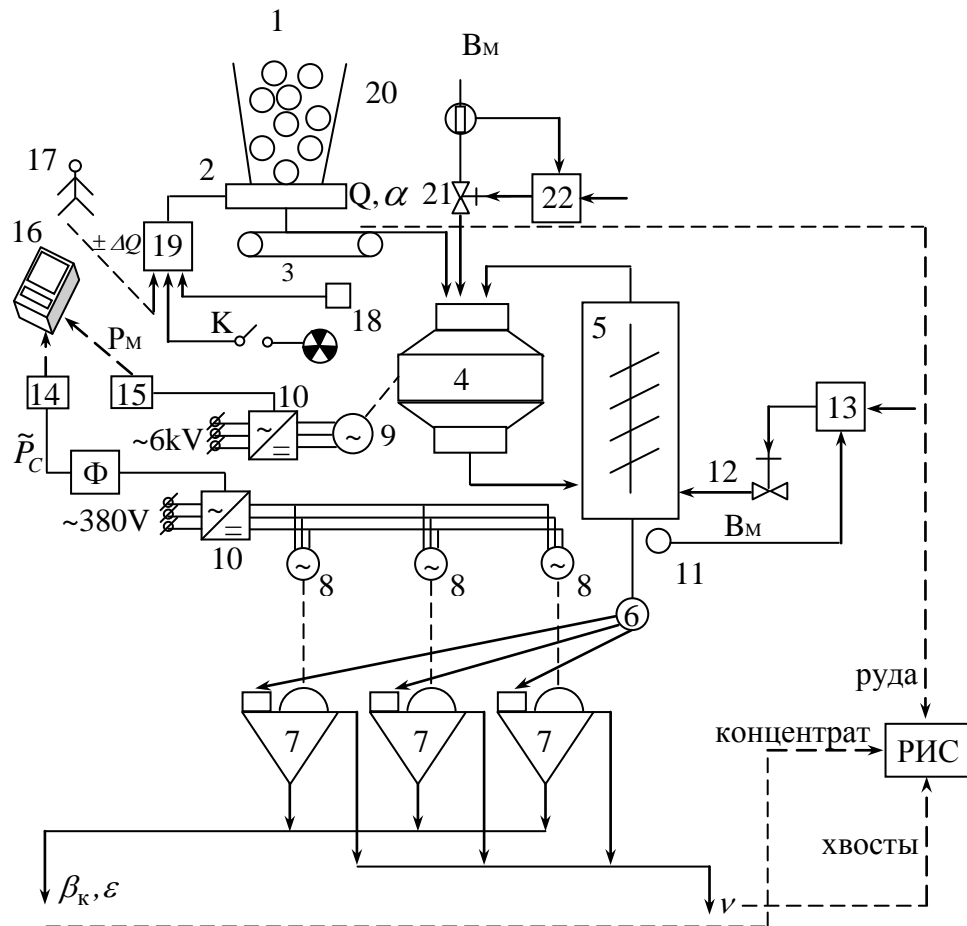


Рис. 4.9. Схема экспериментальных исследований системы автоматизированного контроля и управления загрузкой рудой мельницы мокрого самоизмельчения:

$\tilde{P}_C$  – динамическая составляющая сигнала активной мощности электродвигателя сепаратора;  $P_M$  – сигнал активной мощности электродвигателя мельницы;  $\Phi$  – фильтр; 1 – бункер с рудой; 2 – вибропитатель; 3 – конвейер; 4 – мельница; 5 – классификатор; 6 – пульподелитель; 7 – сепараторы; 8 – электродвигатели сепараторов; 9 – электродвигатель мельницы; 10 – преобразователи активной мощности; 11 – плотномер; 12, 21 – регулирующие клапаны расхода воды; 13 – регулятор плотности слива; 14, 15 – вторичные приборы; 16 – программируемый микрокалькулятор; 17 – оператор-мельник; 18 – конвейерные весы; 19 – регулятор загрузки мельницы рудой; 20 – расходомер воды; 22 – регулятор расхода воды;  $K$  – переключатель режима работы;  $\alpha$  – массовая доля железа в руде;  $\beta_K$  – содержание железа в концентрате;  $\nu$  – массовая доля железа в хвостах; РИС – рудоиспытательная станция.



проб в лаборатории рудоиспытательной станции (РИС) определялись сменные значения извлечения железа в концентрат  $\varepsilon$ . Результаты экспериментальных исследований представлены в Приложении А, см. таблицу 5.

Анализ экспериментальных данных показал, что при работе корреляционной системы автоматизированного контроля и управления степени загрузки мельницы рудой среднеарифметическое значение извлечения железа в концентрат составило:

$$\bar{\varepsilon}_1 = 0,89.$$

При работе радиоизотопной системы автоматического регулирования заполнения мельницы извлечение железа в концентрат составило:

$$\bar{\varepsilon}_2 = 0,83.$$

Повышение среднеарифметического значения извлечения составило:

$$\Delta \bar{\varepsilon} = \bar{\varepsilon}_1 - \bar{\varepsilon}_2 = 0,89 - 0,83 = 0,06,$$

что составляет 7,23%. При этом массовая доля железа в концентрате  $\bar{\beta}_k$  увеличилась на 2,25 %, массовая доля железа в хвостах снизилась на 1,66 %, а переработка руды увеличилась на 5%.

Полученные результаты показали эффективность корреляционной системы автоматизированного контроля и регулирования степени загрузки мельницы рудой по предложенному критерию, так как повышение извлечения железа показывает улучшение раскрытия руды, а снижение потерь железа в хвостах характеризует уменьшение переизмельчения руды.

#### **4.6. Техническая реализация системы автоматического контроля степени загрузки рудой барабанных мельниц магнитообогатительных фабрик**

Разработанные принципы автоматической оптимизации результатов процессов рудоподготовки целесообразно реализовать с помощью

микропроцессорной распределенной системы управления, ориентированной на применении современных технических средств. На ГОКах Украины в настоящее время внедряются современные технические средства автоматизации фирмы ФЕСТО (Полтавский ГОК) и система микропроцессорных контроллеров и персональных ЭВМ SEMATIK фирмы Сименс (Криворожский ГОК окисленных руд).

Структура комплекса технических средств АСУТП представлена на рис. 4.10. Нижний уровень локальных информационно-управляющих систем (ЛИУС) реализуется контроллерами К1, К2, К3, К4, каждый из которых и управляет соответственно поточно-транспортными системами (ПТС) первыми, вторыми и третьими стадиями обогащения двух смежных секций. В качестве контроллеров возможно применение контроллеров S5 155u фирмы Сименс или контроллеров ФЕСТО FPC-405 имеющих модульный принцип построения. На рис. 4.10 цифрами 1,2,...,5 обозначены модули питания, процессора, ввода-вывода. Регулирование основных технологических параметров осуществляется по двухконтурной схеме. Первый контур – это системы стабилизации. Второй контур производит формирование текущего задания систем стабилизации.

Средний уровень управления представляет собой пульт управления смежными секциями. Оператор-технолог осуществляет функции контроля за процессом управления. Для контроля и управления секциями обогащения на экран терминалов Т1, Т2, Т3 вызываются мнемосхемы технологического оборудования. Оператор имеет возможность вводить с экрана числовые значения заданий, пределов и положений исполнительных механизмов. С помощью терминала Т1 осуществляются функции АСУТП. С помощью терминала Т2 реализуются функции технической диагностики, пуска и остановки технологического оборудования.

Терминал Т3 является резервным. Связь терминалов с технологическим процессом осуществляется с помощью сервера С. Документирование осуществляется с помощью принтеров П1, П2, например, типа РТ-88.

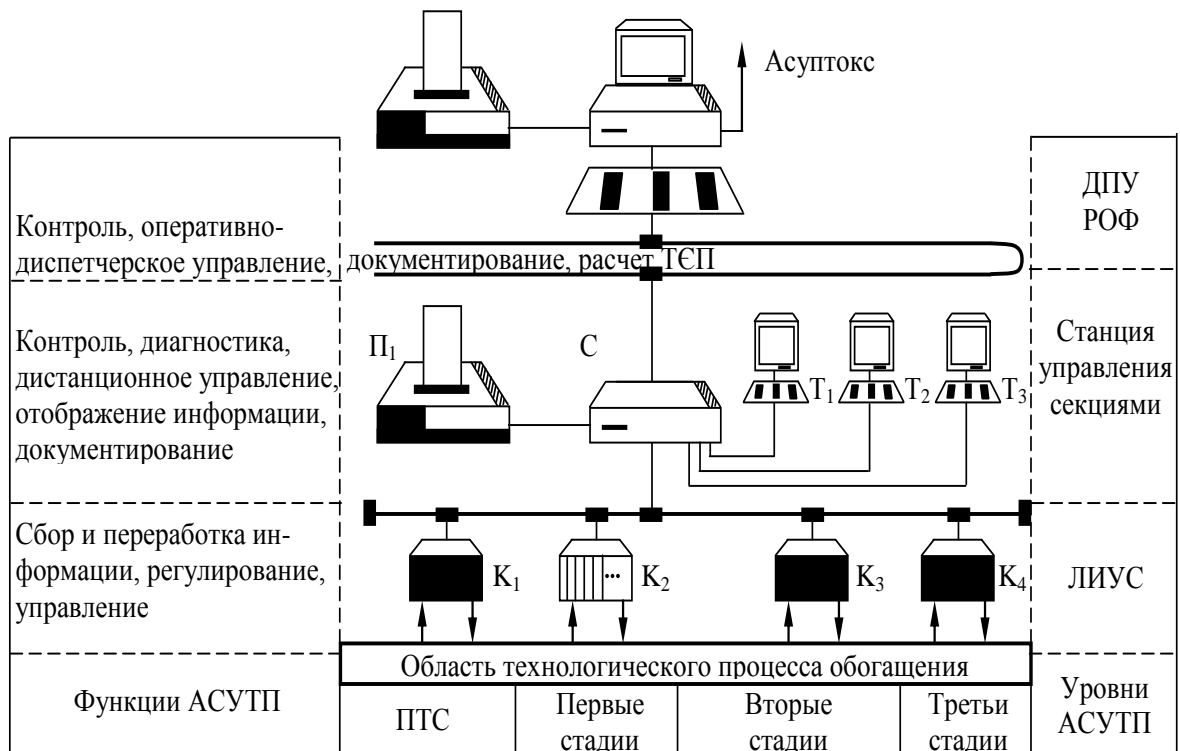


Рис. 4.10. Структура комплекса технических средств

## **ВЫВОДЫ**

1. Разработаны функционально-алгоритмические структуры, включающие функциональные схемы и схемы алгоритмов систем автоматического контроля степени загрузки рудой шаровых мельниц и мельниц самоизмельчения, работающих в условиях секций обогащения магнитообогатительных фабрик.

2. Выполнены экспериментальные исследования в промышленных условиях системы автоматизированного контроля и управления степени загрузки рудой барабанной мельницы мокрого самоизмельчения, которые подтвердили работоспособность и положительный эффект от применения предлагаемого метода автоматического контроля степени загрузки рудой барабанных мельниц.

3. Анализ экспериментальных данных проведенных исследований в промышленных условиях показал, что применяемая система автоматического контроля степени загрузки рудой барабанных мельниц позволяет повысить производительность мельниц по перерабатываемой руде на 5%, массовую долю железа в концентрате на 2,25%, извлечение железа в концентрат на 7,23% относительных единиц и снизить потери железа в хвостах на 1,66%.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В результате выполнения диссертационной работы решена актуальная научно-техническая задача разработки метода автоматического контроля степени загрузки рудой барабанных мельниц при магнитном обогащении железных руд на основе установления новых закономерностей совместного формирования сигналов активной мощности приводных электродвигателей мельниц и магнитных сепараторов, что позволило повысить производительность мельницы по перерабатываемой руде, качество концентрата, извлечение железа в концентрат, снизить потери железа в хвостах, что в итоге существенно улучшает технико-экономические показатели производства железорудного концентрата.

Научно обоснованы технические требования к системам автоматического контроля оптимальной степени загрузки рудой шаровых мельниц и мельниц самоизмельчения.

Предложен новый критерий автоматической оптимизации процессов измельчения и магнитной сепарации – минимальное значение коэффициента корреляции между сигналами активной мощности электродвигателей мельницы и магнитного сепаратора.

Установлены новые закономерности совместного формирования сигналов активной мощности приводных электродвигателей магнитных сепараторов и мельниц различных типов в функции степени загрузки мельниц рудой.

Установлены новые закономерности процесса раскрытия руды в шаровых мельницах вторых стадий измельчения и установлена связь между крупностью помола, раскрытием руды и сигналами магнитной индукции в рабочей зоне магнитного сепаратора, последовательно соединенного с шаровой мельницей.

Разработан метод повышения точности автоматического контроля производительности магнитного сепаратора по магнитному продукту на основе спектрального преобразования сигнала активной мощности электродвигателя магнитного сепаратора и выделения динамической составляющей активной

мощности, которая характеризует потери на вихревые токи и гистерезис и определяется производительностью сепаратора по магнитному продукту.

Получены новые комплексные математические модели технологических комплексов измельчения и магнитной сепарации, связывающие модели процессов измельчения, классификации и магнитной сепарации и модели совместного формирования сигналов активной мощности приводных электродвигателей мельниц и магнитных сепараторов.

Получены новые статические характеристики зависимости сигнала активной мощности электродвигателя магнитного сепаратора от сигнала активной мощности электродвигателя мельницы и установлены закономерности дрейфа этих характеристик от технологических параметров измельчения и физико-механических свойств руды, что позволило разработать метод автоматического контроля степени загрузки барабанных мельниц рудой с переменными физико-механическими свойствами.

Разработаны функционально-алгоритмические структуры систем автоматического контроля степени загрузки рудой шаровых мельниц, мельниц самоизмельчения и рудногалечных мельниц.

Экспериментальные исследования системы автоматического контроля степени загрузки рудой мельницы мокрого самоизмельчения показали, что система позволяет повысить производительность мельницы по переработанной руде на 5%, улучшить раскрытие руды и снизить переизмельчение руды.

Научные положения и результаты диссертации приняты к внедрению на ОАО «Центральный горно-обогатительный комбинат» г. Кривой Рог.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Виноградов В.С. Автоматизация технологических процессов на горно-рудных предприятиях: справочное пособие / В.С. Виноградов. – М.: Недра, 1984. – 166 с.
2. Кучер Б.Г. Автоматизация процессов опробования пульповых продуктов на обогатительных фабриках / Б.Г. Кучер // Черная металлургия. – 1989. – № 1. – С. 2-17.
3. Азбель Е.И. Особенности оптимизации обогатительных процессов при усреднении качественного состава входного потока руды / Е.И. Азбель, И.Д. Устинов // Изв. ВУЗов. Цветная металлургия. – 1986. – №1. – С. 3-7.
4. Алексеев М.А. Функциональный контроль энергообъектов с применением субоптимальных ортогональных преобразований / М.А. Алексеев // Сб. научн. тр. НГА Украины. – Д., 1998. – Вып. 4. – С. 70-73.
5. Алексеев М.А. Метод звукометрической диагностики перегрузки шаровых мельниц рудой / М.А. Алексеев, Х. Шамаллах // Збагачення корисних копалин. – 2005. – №22 (63). – С. 166-168.
6. Алексеев М.А. Применение вейвлет анализа при решении задач функционального контроля промышленных объектов / М.А. Алексеев, Х. Шамаллах // Науковий вісник НГУ. – 2004. – №2. – С. 77-78.
7. Андреев С.Е. О внутреннем трении в шаровой мельнице / С.Е. Андреев // Горный журнал. – 1961. – №2. – С. 33-38.
8. Андреев С.Е. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых / С.Е. Андреев, В.В. Зверевич, В.А. Перов. – М.: Недра, 1966. – 396 с.
9. Арефьев Б.А. Оптимизация инерционных процессов / Б.А. Арефьев. – Л.: Машиностроение, 1969. – 256 с.
10. Арефьев Б.А. Системы экстремального регулирования измельчительными агрегатами / Б.А. Арефьев. – М.: Цветметинформация, 1984. – 123 с.
11. Арефьев Б.А. Схема экстремального регулятора, работающего по принципу однократного пробного шага / Б.А. Арефьев, Е.Л. Крицкий, В.С. Пропуто // Обогащения руд. – 1964. – №1. – С. 14-20.

12. Арефьев Б.А. Экстремальное регулирование обогатительных машин по принципу эпизодического пробного шага / Б.А. Арефьев, Е.Л. Крицкий, В.С. Пропуто // Обогащения руд. – 1963. – №3. – С. 17-22.
13. Аршинский В.М. Принципиальные возможности оптимизации процесса измельчения руд с помощью адаптивной модели / В.М. Аршинский // Автоматический контроль и управление при обогащении и гидрометаллургии цветных металлов: сборник научных трудов. – Ташкент, 1971. – Вып. 1. – С. 15-19.
14. Астафьева Н.М. Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения. Обзоры актуальных проблем / Н.М. Астафьева // Успехи физических наук. – 1996. – №11. – С. 24-27.
15. Афанасьев Т.П. Испытания в промышленных условиях самонастраивающейся системы регулирования цикла измельчения / Т.П. Афанасьев, Б.А. Каплянский, Г.И. Лаврова, О.Н. Тихонов // Известия ВУЗов. Цветная металлургия. – 1969. – №2. – С. 42-44.
16. Бастан П.П. Усреднение руд на горнообогатительных комбинатах / П.П. Бастан, Н.И. Волошин. – М.: Недра, 1987. – 215 с.
17. Балашов Е.П. Статистический контроль и регулирование качества массовой продукции / Е.П. Балашов, В.А. Долженков. – М.: Машиностроение, 1984. – 384 с.
18. Белуженко В.М. Методика решения задач статической оптимизации технологических процессов на обогатительных фабриках / В.М. Белуженко // Изв. ВУЗов. Горный журнал. – 1986. – №10. – С. 107-111.
19. Бессекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического регулирования / В.А. Бессекерский, Е.П. Попов. – М.: Наука, 1975. – 767 с.
20. Бусленко Н.П. Математическое моделирование производственных процессов на цифровых вычислительных машинах / Н.П. Бусленко. – М.: Наука, 1984. – 362 с.
21. Буняк И.П. Система управления процессом магнитного обогащения руд на основе микро-ЭВМ / И.П. Буняк, Р.Е. Леонов, А.Е. Троп // Изв. ВУЗов. Горный журнал. – 1983. – №5. – С. 96-98.



22. Буцхрикидзе Г.Д. О принципах оптимального управления процессами обогащения при максимизации выхода кондиционного продукта / Г.Д. Буцхрикидзе // Изв. ВУЗов. Горный журнал. – 1984. – №6. – С. 105-109.
23. Васильев В.И. Дифференциальные системы экстремального регулирования / В.И. Васильев. – Киев: издательство АН УССР, 1963. – 120 с.
24. Воробьев В.И. Теория и практика вейвлет-преобразования / В.И. Воробьев, В.Г. Грибунин. – СПб.: ВУС, 1999. – 203 с.
25. Воронов В.А. Многоуровневая оптимизация процессов обогащения / В.А. Воронов. – М.: Недра, 1991. – 154 с.
26. Воронов В.А. Разработка и исследование системы автоматического управления агрегатами мокрого самоизмельчения железных руд: автореф. дис. ... канд. тех. наук / Воронов Валентин Андреевич; Днепропетр. горный ин-т им. Артема. – Днепропетровск, 1972. – 19 с. – Библиогр.: с. 15.
27. Гейзенблазен Б.Е. Самонастраивающаяся система управления загрузкой шаровых мельниц / Б.Е. Гейзенблазен // ЦБТИ МЧМ УССР. – 1972. – №185. – С. 34-37.
28. Гейзенблазен Б.Е. Разработка и исследования радиоизотопного измерителя заполнения мельниц мокрого самоизмельчения / Б.Е. Гейзенблазен, Л.Т. Лорман, М.Н. Левченко // Обогащения руд. – 1978. – №2. – С. 38-41.
29. Глущенко И.Н. Автоматический отбор и транспортировка пульповых проб на обогатительных фабриках / И.Н. Глущенко // Цветная металлургия. – 1989. – № 1. – С. 15-20.
30. Гончаров Ю.Г. Автоматический контроль и регулирование технологических процессов на железорудных обогатительных фабриках / Ю.Г. Гончаров, А.С. Давидкович, Б.Е. Гейзенблазен. – М.: Недра, 1968. – 227 с.
31. Гончаров Ю.Г. Автоматический контроль веса шаровой загрузки в барабанных мельницах / Ю.Г. Гончаров, А.П. Полищук, П.С. Энгель // Горный журнал. – 1970. – №11. – С. 53-54.
32. Гончаров Ю.Г. Оптимальные параметры шарового измельчения / Ю.Г. Гончаров, А.П. Полищук, П.С. Энгель // Горный журнал. – 1971. – №14. – С. 96-98.

33. Григорян А.А. Об экстремальном регулировании процесса измельчения руд / А.А. Григорян, Г.М. Григорян // Изв. АН Арм.ССР. Сер. тех. наук. – 1972. – №1. – С. 34-37.
34. Гринман И.Г. Автоматизация процессов обогащения руд цветных металлов / И.Г. Гринман. – Алма-Ата: Изд-во АН КазССР, 1964. – 212 с.
35. Гринман И.Г. Измерения степени загрузки мельницы рудой с помощью телеизмерительного датчика / И.Г. Гринман, Ж.М. Сакбаев, Ж.Р. Жотобаев // Обогащение руд. – 1962. – №1. – С. 27-29.
36. Гудима В.И. Основы автоматизации обогатительных фабрик / В.И. Гудима. – М.: Недра, 1979. – 210 с.
37. Деркач В.Г. Специальные методы обогащения полезных ископаемых / В.Г. Деркач. – М.: Недра, 1966. – 338 с.
38. Дремин И.М. Вейвлеты и их использование. Обзоры актуальных проблем / И.М. Дремин, О.В. Иванов, В.А. Нечитайло // Успехи физических наук. – 2001. – №5. – С. 37-42.
39. Дьяконов В.П. Вейвлеты. От теории к практике / В.П. Дьяконов. – М.: СОЛОН-Р, 2002. – 448 с.
40. Дэвис Э.В. Тонкое измельчение в шаровых мельницах / Э.В. Дэвис. – Новосибирск: Госгортехиздат, 1932. – 354 с.
41. Жернаков Ю.И. Ритмичность производства на горном предприятии / Ю.И. Жернаков, Г.В. Парфёнов, В.Л. Казакова, Л.Ф. Манджула. – М.: Недра, 1974. – 72 с.
42. Жосан А.А. Синтез адаптивного цифрового регулятора с квазискользящим режимом для нестационарных объектов обогатительной технологии / А.А. Жосан, Е.К. Бабец, В.П. Хорольский // Изв. ВУЗов. Горный журнал. – 1990. – №10. – С. 119-124.
43. Зарубин А.П. Автоматический контроль массовой доли магнитного железа в твердой фазе пульты / А.П. Зарубин, И.Н. Куртов, О.П. Тараканов // Горный журнал. – 1984. – №8. – С. 30-34.

44. Зобнин Б.Б. Синтез каскадной системы регулирования содержания железа в концентрате / Б.Б. Зобнин, Б.О. Поюлин, Е.И. Гибелев // Авт. упр. техн. процессами в горной промышленности. – 1981. – №2. – С. 24-29.
45. Зобнин Б.Б. Синтез системы управления технологической линией магнитного обогащения железных руд / Б.Б. Зобнин, М.Н. Поршнева // Изв. ВУЗов. Горный журнал. – 1985. – №8. – С. 21-25.
46. Зобнин Б.Б. Статическая оптимизация технологического режима обогащения железных руд // Изв. ВУЗов. Горный журнал. – 1988. – С. 106-108.
47. Каплянский Б.А. Определение динамических характеристик измельчительного агрегата / Б.А. Каплянский, О.Н. Тимофеев // Обогащения руд. – 1967. – №6. – С. 27-32.
48. Кармазин В.И. Бесшаровое измельчения руд / В.И. Кармазин, А.И. Денисенко, Е.Е. Серго. – М.: Недра, 1968. – 183 с.
49. Кармазин В.В. Магнитные и электрические методы обогащения / В.В. Кармазин, В.И. Кармазин. – М.: Недра, 1983. – 304 с.
50. Коваленко В.Я. Адаптивная математическая модель процесса магнитного обогащения / В.Я. Коваленко // Механизация и автоматизация управления. – 1982. – №3. – С. 23-25.
51. Козин В.З. Опробование, контроль и автоматизация обогатительных процессов / В.З. Козин, О.Н. Тихонов. – М.: Недра, 1990. – 343 с.
52. Козин В.З. Опробование и контроль технологических процессов обогащения / В.З. Козин. – М.: Недра, 1985. – 294 с.
53. Козлюк В.И. Разработка АСУТП обогащения магнетитовых железных руд / В.И. Козлюк, Г.А. Маркин // Механизация и автоматизация управления. – 1983. – №4. – С. 15-19.
54. Кочура Е.В. Автоматическое управление экономией электроэнергии при магнитном обогащении руд / Е.В. Кочура // Контроль и управление в технических системах: 3-я междунар. науч. конф. (1995 г., Винница): тез. докл. – Винница, 1995. – С. 35-39.

55. Кочура Е.В. Исследование сигнала активной мощности электродвигателя магнитного сепаратора с позиций задач управления / Е.В. Кочура // Обогащение руд. – 1994. – №4-5. – С. 46-49.
56. Кочура Е.В. Обобщённая математическая модель комплекса магнитного обогащения руд / Е.В. Кочура. – Днепропетровск: Гос. горн. Акад, 1994. – 120 с.
57. Кочура Е.В. Теоретические зависимости сигнала активной мощности приводного электродвигателя барабана магнитного сепаратора от характеристик концентрата / Е.В. Кочура // Обогащение руд. – 1994. – №6. – С. 46-49.
58. Кочура Е.В. Метод автоматического контроля массовой доли железа в концентрате магнитного сепаратора / Е.В. Кочура, Ислам Абдельхамид Юсеф Аль Бостанжи // Науковий вісник НГУ. – 2005. – № 10. – С. 86-89.
59. Кочура Е.В. Разработка и экспериментальные исследования устройства для автоматического контроля и управления магнитным полем сепаратора / Е.В. Кочура, В.И. Коломиец // Обогащение руд. – 1991. – №6. – С. 30.
60. Кочура Е.В. Методы оптимального управления качеством продуктов обогащения полезных ископаемых на этапе проектирования / Е.В. Кочура, А.Н. Марюта // Автоматический контроль и управление при обогащении и металлургии цветных металлов: тезисы докладов VI Республиканского научно-технического совещания. – Ташкент, 1978. – С. 35-41.
61. Кочура Е.В. Статические критерии активного контроля качества железорудного сырья / Е.В. Кочура, А.Н. Марюта // Изв. ВУЗов. Горный журнал. – 1978. – №2. – С. 20-24.
62. Кочура Е.В. Моделирование и оптимизация управления качеством железорудного концентрата / Е.В. Кочура, А.Н. Марюта, В.С. Голод // Изв. ВУЗов. Горный журнал. – 1981. – №11. – С. 127-131.
63. Кочура Е.В. Система автоматического управления секцией обогащения железных руд / Е.В. Кочура, А.Н. Марюта, И.К. Младецкий // Изв. ВУЗов. Горный журнал. – 1975. – №3. – С. 129-132.
64. Кочура Е.В. Устройство технологической диагностики процесса “измельчение-классификация-магнитная сепарация” / Е.В. Кочура,

- И.К. Младецкий, В.И. Коломиец // Метрологическое обеспечение и автоматизация технологических процессов – основа повышения качества продукции горных предприятий: материалы совещания. – Губкин, 1988. – 20 с.
65. Кошарский Е.Д. Автоматизация управления обогатительными фабриками / Е.Д. Кошарский, А.Я. Ситковский. – М.: Недра, 1977. – 230 с.
66. Крапельский И.В. Коэффициенты трения / И.В. Крапельский, И.Э. Виноградова. – М.: ГНТИ, 1955. – 463 с.
67. Крюков Д.К. Усовершенствование размольного оборудования горнообогатительных предприятий / Д.К. Крюков. – М.: Недра, 1966. – 175 с.
68. Крюков Д.К. Футеровки шаровых мельниц / Д.К. Крюков. – М.: Машиностроение, 1965. – 181 с.
69. Крюков В.П. Динамические характеристики технологических объектов на обогатительных фабриках / В.П. Крюков, Г.С. Нестеров // Изв. ВУЗов. Горный журнал. – 1962. – №1. – С. 12-17.
70. Купін А.І. Критерії і моделі побудови магістральної мережі АСУТП збагачення залізної руди в умовах ГЗК / А.І. Купін, В.М. Назаренко // Сб. научн. трудов НГА України. – Днепропетровск, 2001. – Т. 2. – С. 14-18.
71. Левенсон Л.Б. Дробление и грохочение полезных ископаемых / Л.Б. Левенсон, Г.И. Прейгерзон. – М.: Гостехиздат, 1940. – 296 с.
72. Леонов Р.Е. К вопросу управления технологическим процессом мокрого магнитного обогащения / Р.Е. Леонов, И.П. Буняк // Изв. ВУЗов. Горный журнал. – 1981. – №11. – С. 34-37.
73. Леонов Р.Е. Инерционность обогащения и управления подачей железных руд на фабрику / Р.Е. Леонов // Изв. ВУЗов. Горный журнал. – 1985. – №7. – С. 54-59.
74. Линч А.Дж. Циклы дробления и измельчения. Моделирование, оптимизация, проектирование и управление / А.Дж. Линч. – М.: Недра, 1981. – 343 с.
75. Мак-Лахлан Н.В. Теория и приложения функций Матъе / Н.В. Мак-Лахлан. – М.: Ин. литер., 1953. – 416 с.

76. Маркин Г.А. Разработка математической модели прогнозирования содержания железа в концентрате при магнитном обогащении железных руд / Г.А. Маркин, С.И. Шелудько // Опыт разработки перспективы развития и внедрения АСУ горнообогатительными комбинатами. – 1977. – № 2. – С. 52-53.
77. Маркин Г.А. К вопросу обоснования принципа управления магнитообогатительной фабрики / Г.А. Маркин // Опыт разработки перспективы развития и внедрения АСУ горнообогатительными комбинатами. – 1977. – № 3. – С. 51-52.
78. Марюта А.Н. Автоматическая оптимизация процесса обогащения руд на магнитообогатительных фабриках / А.Н. Марюта. – М.: Недра, 1975. – 230 с.
79. Марюта А.Н. Движения центра тяжести нагрузки барабанной мельницы самоизмельчения материалов / А.Н. Марюта // Изв. ВУЗов. Горный журнал. – 1978. – №5. – С. 98-107.
80. Марюта А.Н. Динамика процесса измельчения материала в барабанных мельницах / А.Н. Марюта // Известия ВУЗов. Цветная металлургия. – 1974. – №1. – С. 12-15.
81. Марюта А.Н. О повышении технико-экономической эффективности энергосберегающей технологии управления измельчением / А.Н. Марюта // Изв. ВУЗов. Цветная металлургия. – 1989. – №2. – С. 17-26.
82. Марюта А.Н. Практические расчеты по внутренней механике барабанных рудоразмольных мельниц / А.Н. Марюта // Изв. ВУЗов. Цветная металлургия. – 1989. – № 3. – С. 20-25.
83. Марюта А.Н. Теория моделирования колебаний рабочих органов механизмов и ее приложения / А.Н. Марюта. – Днепропетровск: Издательство ДГУ, 1991. – 174 с.
84. Марюта А.Н. Экспериментальное определение статистических характеристик объектов управления обогатительных фабрик / А.Н. Марюта, В.А. Бунько. – М.: Недра, 1969 – 119 с.
85. Марюта А.Н. Автоматическое управление технологическими процессами обогатительных фабрик / А.Н. Марюта, Ю.Г. Качан, В.А. Бунько. – М.: Недра, 1983. – 277 с.

86. Марюта А.Н. Динамические характеристики электромеханических систем барабанных мельниц / А.Н. Марюта, А.Н. Коваленко // Изв. ВУЗов. Горный журнал. – 1979. – № 7. – С. 106-114.
87. Марюта А.Н. Исследование динамики барабанных мельниц за технологическими параметрами измельчения / А.Н. Марюта, А.Н. Коваленко // Изв. ВУЗов. Цветная металлургия. – 1981. – № 2. – С. 104-109.
88. Марюта А.Н. Зависимости энергетических параметров электродвигателя шаровой мельницы от загрузки ее шарами и измельчаемым материалом / А.Н. Марюта, Е.В. Кочура // Известия ВУЗов. Горный журнал. – 1973. – №2. – С. 65-71.
89. Марюта А.Н. Спектральный анализ сигнала активной мощности приводного двигателя мельниц мокрого самоизмельчения руд для задач контроля технологических переменных / А.Н. Марюта, Л.И. Мещеряков // Изв. ВУЗов. Цветная металлургия. – 1981. – № 1. – С. 91-96.
90. Марюта О.М. Інформаційний системний аналіз виробничо-економічних об'єктів / О.М. Марюта, О.М. Пензнер. – Дніпропетровськ: Видавництво ДДУ, 1995. – 230 с.
91. Марюта А.Н. Синхронизация фрикционных колебаний, возмущаемых параметрически в механических и технологических узлах барабанных рудоразмольных мельниц / А.Н. Марюта, Н.В. Цыбулько // Изв. ВУЗов. Горный журнал. – 1984. – № 5. – С. 98-107.
92. Михельсон И.Г. О шаровом режиме мельницы первой стадии измельчения / И.Г. Михельсон // Цветные металлы. – 1974. – № 3. – С. 71-79.
93. Младецкий И.К. Обоснование способа управления технологической линией обогащения полезного ископаемого / И.К. Младецкий // Горн. электромеханика и автоматика. – 1985. – № 47. – С. 37-42.
94. Младецкий И.К. Моделирование процесс магнитной сепарации руд / И.К. Младецкий, А.Н. Марюта. – Киев: Вища школа, 1974. – 215 с.
95. Момот В.Н. Комбинированная статистическая модель технологического цикла обогатительной фабрики / В.Н. Момот, И.Б. Сироджа, В.П. Хорольский // Изв. ВУЗов. Горный журнал. – 1977. – №2. – С. 161-167.

96. Моркун В.С. Основные закономерности процесса распространения ультразвуковых поверхностных волн в металлургической пластине при наличии магнитного поля / В.С. Моркун, Н.В. Моркун // Разработка рудных месторождений. – 1999. – №69. – С. 93-97.
97. Моркун В.С. Распространение ультразвуковых волн в железорудной пульте при наличии магнитного поля / В.С. Моркун, Н.В. Моркун // Разработка рудных месторождений. – 2000. – №70. – С. 66-70.
98. Моркун В.С. Систематизация и анализ особенностей распространения ультразвуковых поверхностных волн / В.С. Моркун, Н.В. Моркун // Разработка рудных месторождений. – 2000. – №71. – С. 42-46.
99. Моркун В.С. Определение содержания железа-магнетита в потоке пульты на базе ультразвуковых измерений / В.С. Моркун, Н.В. Моркун // Разработка рудных месторождений. – 2000. – №72. – С. 65-72.
100. Моркун Н.В. Адаптивная система управления процессом магнитной сепарации / Н.В. Моркун // Проблемы развития Криворожского железорудного бассейна: тезисы научно-технической конференции. – Кривой Рог: КТУ, 2002. – С. 99-100.
101. Моркун Н.В. Оптимальное управление процессом магнитной сепарации железных руд / Н.В. Моркун // Тр. Международной научной конференции по прикладной математике и информатике. – Львов: ЛНУ, 2003. – С. 42-46.
102. Моркун Н.В. Адаптивная система управления процессом магнитной сепарации железных руд / Н.В. Моркун // Вісник Криворізького технічного університету. – 2004. – №3. – С. 113-115.
103. Моркун В.С. Алгоритмы адаптивного управления процессами обогащения полезных ископаемых / В.С. Моркун, В.Н. Потапов // Обогащение руд. – 1986. – №6. – С. 44-46.
104. Морозов Е.В. О величине полезной мощности шаровой мельницы в водопадном режиме работы дробящих тел / Е.В. Морозов // Известия ВУЗов. Горный журнал. – 1970. – №12. – С. 35-39.
105. Морозов Е.Ф. Экспериментальное исследование влияния профиля футеровки на скольжение дробящей среды барабанной мельницы /



Е.Ф. Морозов, Г.П. Образцов // Известия ВУЗов. Горный журнал. – 1973. – № 6. – С. 176-183.

106. Муйземнек Ю.А. Испытание модели шаровой мельницы / Ю.А. Муйземнек, О.А. Габов, М.В. Егоров // Обогащения руд. – 1965. – № 5. – С. 39-43.

107. Назаренко В.М., Купин А.И. Имитационная модель отказа корпоративной информационной сети ГОКа для оценки её надежности / В.М. Назаренко, А.И. Купин // Системный анализ, управление и информационные технологии: Вестник Харьковского гос. политехн. университета. – 1999. – №73. – С.123-129.

108. Назаренко В.М. Применение ГИС-технологий для автоматизации диспетчерского управления технологическим транспортом в карьере / В.М. Назаренко, М.В. Назаренко, А.И. Купин // Сб. научн. трудов НГА Украины. – Днепропетровск, 2000. – №9. – С. 190-194.

109. Назаренко В.М. Влияние информационных и компьютерных технологий на качество и себестоимость железорудного сырья на примере Ингулецкого и Южных ГОКов / В.М. Назаренко, М.В. Назаренко, А.И. Купин // Сб. научн. трудов 2-го межд. симпозиума “Оперативный контроль и управление качеством минерального сырья при добыче и переработке”. – Ялта, 1999. – №1. – С.110-117.

110. Назаренко В.М. Некоторые аспекты формирования корпоративных информационных сетей в условиях горно-обогатительного производства / В.М. Назаренко, А.К. Елисеев, М.В. Назаренко, А.И. Купин // Академический вестник Криворожского территориального отделения Международной Академии компьютерных наук и систем. – 1998. – №1. – С. 18-23.

111. Неронов Н.П. Механика шаровой мельницы / Н.П. Неронов // Записки Ленинградского горного института. – 1956. – №3. – С. 45-50.

112. Нестеров Г.С. Технологическая оптимизация обогатительных фабрик / Г.С. Нестеров. – М.: Недра, 1976. – 120с.

113. Новицкий И.В. О комплексном подходе при решении задач проектирования и автоматизации технологической линии обогащения руд /

И.В. Новицкий // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 1992. – №2. – С. 37-42.

114. Новикова В.Л. Автоматизация технологического оборудования обогатительных фабрик / В.Л. Новикова, Л.Е. Попова, Л.Л. Рубцова // *Изв. ВУЗов. Горный журнал*. – 1989. – №3. – С. 55-57.

115. Новожилов М.Г. Качество рудного сырья чёрной металлургии / М.Г. Новожилов, Я.Ш. Ройзен, А.Н. Эсперт. – М.: Недра, 1977. – 415 с.

116. Олевкий В.А. Размольное оборудование обогатительных фабрик / В.А. Олевкий. – М.: Госгортехиздат, 1963. – 447 с.

117. Остапенко П.Е. Обогащение железных руд: справочник / П.Е. Остапенко. – М.: Недра, 1977. – 277 с.

118. Первозванский А.А. Математические модели в управлении производством / А.А. Первозванский. – М.: Наука, 1975. – 615 с.

119. Петров И.И. Специальные режимы работы асинхронного электропривода / И.И. Петров. – М.: Энергия, 1997. – 298 с.

120. Полінський О.М. Оптимізація подрібнювальних агрегатів з пілотним магнітним сепаратором у контурі управління / О.М. Полінський // *Гірнична електромеханіка та автоматика. Науково-технічний зб. НГУ*. – Дніпропетровськ, 2004. – № 73 – С. 50-52.

121. Процуто В.С. Автоматизированные системы управления технологическими процессами обогатительных фабрик / В.С. Процуто. – М.: Недра, 1987. – 253 с.

122. Пролейко В.М. Системы управления качеством изделий микроэлектроники / В.М. Пролейко, В.А. Абрамов, В.Н. Брюнин. – М.: Сов. радио, 1976. – 353 с.

123. Полищук А.П. Автоматизация управления технологическими процессами магнитного обогащения железных руд / А.П. Полищук, В.М. Давидченко // *Измерение, контроль, автоматизация*. – 1984. – №2. – С. 50.

124. Ртищев А.Б. Оптимизация селективного разделения магнетовых руд в магнитном поле / А.Б. Ртищев // *Сборник научных трудов НГУ №15*. – Днепропетровск: РИК НГУ, 2002. – С. 146-151.

125. Ртищев А.Б. Влияние взаимной ориентации магнитных и гидродинамических потоков на качество магнетовых концентратов / А.Б. Ртищев, Т.А. Олейник // Збагачення корисних копалин: наук.-техн. зб. – Дніпропетровськ, 2002. – Вип. 16(57). – С. 54-60.
126. Ртищев А.Б. Влияние конфигурации магнитного поля сепаратора на эффективность разделения минералов / А.Б. Ртищев, Е.Н. Пивень // Разработка рудных месторождений. – Кривой Рог: КТУ, 2003. – Вып.82. – С. 79-84.
127. Ртищев А.Б. Моделирование интегрального однополярного элемента магнитной системы барабанного сепаратора / А.Б. Ртищев // Науковий вісник НГУ. – 2003. – №5. – С. 55-57.
128. Разумов К.А. Проектирование обогатительных фабрик / К.А. Разумов, В.А. Перов. – М.: Недра, 1962. – 518 с.
129. Протодяков М.М. Распределение и корреляция показателей физических свойств горных пород: справочное пособие / М.М. Протодяков, Р.Н. Тедер, Е.И. Ильницкая. – М.: Недра, 1981. – 193 с.
130. Роткоп Л.Л. Автоматическое управление процессами массового производства / Л.Л. Роткоп. – М.: Машиностроение, 1972. – 240 с.
131. Сакбаев Ж.М. Электронное моделирование цикла измельчения в процессе обогащения руд с целью его автоматизации / Ж.М. Сакбаев // Вестник АН КазССР. – 1966. – №6. – С. 54-57.
132. Бессекерский В.А, Сборник задач по теории автоматического регулирования и управления / В.А. Бессекерский. – М.: Наука, 1972. – 587 с.
133. Головков Б.Ю. Системы и средства автоматизации обогатительных фабрик / Б.Ю. Головков, Л.А. Рейбман, Г.Г. Колников. – М.: Недра. 1990. – 232 с.
134. Снапелев Ю.М. Моделирование и управление в сложных системах / Ю.М. Снапелев, В.А. Старосельский. – М.: Сов. радио, 1974. – 264 с.
135. Эйкхофф В.М. Современные методы идентификации систем / В.М. Эйкхофф. – М.: Мир, 1983. – 400 с.
136. Шлаф М.М. Справочник: асинхронные двигатели серии 4А / М.М. Шлаф, А.Э. Кравчик, В.И. Афонин. – М.: Энергоиздат, 2001. – 504 с.

137. Богданов О.С. Справочник по обогащению руд: обогатительные фабрики / О.С. Богданов. – М.: Недра, 1974. – 404 с.
138. Богданов О.С. Справочник по обогащению руд: основные процессы / О.С. Богданов. – М.: Недра, 1974. – 337 с.
139. Богданов О.С. Справочник по обогащению руд: подготовительные процессы / О.С. Богданов. – М.: Недра, 1982. – 365 с.
140. Шинкаренко С.Ф. Справочник по обогащению руд чёрных металлов / С.Ф. Шинкаренко. – М.: Недра, 1980. – 526 с.
141. Тихонов О.Н. Автоматизация производственных процессов на обогатительных фабриках / О.Н. Тихонов. – М.: Недра, 1985. – 272 с.
142. Тихонов О.Н. Автоматическое регулирование обогатительных аппаратов по принципу предельного режима / О.Н. Тихонов // Обогащения руд. – 1964. – №3. – С. 37-41.
143. Тихонов О.Н. Введение в динамику массопереноса процессов обогатительной технологии / О.Н. Тихонов. – М.: Недра, 1973. – 239 с.
144. Тихонов О.Н. Закономерности эффективного разделения минералов в процессах обогащения полезных ископаемых / О.Н. Тихонов. – М.: Недра, 1984. – 207 с.
145. Тихонов О.Н. О динамических свойствах измельчительных агрегатов с замкнутым циклом / О.Н. Тихонов // Цветные металлы. – 1963. – №4. – С. 45-49.
146. Тихонов О.Н. Проектирование оптимальных схем обогащения полезных ископаемых / О.Н. Тихонов // Изв. ВУЗов. Цветная металлургия. – 1988. – №2. – С. 2-7.
147. Тихонов О.Н. Самонастраивающаяся система регулирования измельчительного агрегата с замкнутым циклом / О.Н. Тихонов // Обогащения руд. – 1967. – №6. – С. 34-39.
148. Тихонов О.Н. Экстремальное регулирование с непрерывным измерением конечной разности / О.Н. Тихонов // Известия ВУЗов. Цветная металлургия. – 1967. – №5. – С. 37-41.

149. Трач Т.Ю. Принципы управления процессом разделения в гидроциклоне / Т.Ю. Трач, Л.Р. Тисменецкий, В.П. Хорольский // Обогащение руд. – 1991. – №3. – С. 34-37.
150. Троп А.Е. Автоматизация обогатительных фабрик / А.Е. Троп, В.З. Козин, В.М. Аршинский. – М.: Недра, 1970. – 317 с.
151. Троп А.Е. Автоматическое управление процессами обогатительных фабрик / А.Е. Троп, В.З. Козин, Е.В. Прокофьев. – М.: Недра, 1986. – 302 с.
152. Утеуш Э.В. О переходных процессах шаровой мельницы / Э.В. Утеуш, З.В. Утеуш // Известия ВУЗов. Цветная металлургия. – 1966. – №2. – С. 54-59.
153. Утеуш Э.В. Управление измельчительными агрегатами / Э.В. Утеуш, З.В. Утеуш. – М.: Недра, 1973. – 321 с.
154. Файнштейн Э.Г. Влияние слоя магнетитового концентрата на поле в рабочем пространстве барабанного сепаратора / Э.Г. Файнштейн // Изв. ВУЗов. Горный журнал. – 1974. – №5. – С. 56-61.
155. Федосеев В.А. Экономика обогащения железных руд / В.А. Федосеев. – Л.: Наука, 1974. – 110 с.
156. Федотов А.Г. Зависимость характеристик магнитного поля от распределения концентрата в рабочем пространстве сепаратора / А.Г. Федотов // Обогащение полезных ископаемых. – 1976. – № 1. – С. 34-38.
157. Фарис Самир Расми Альхори. Моделирование процесса раскрытия руды в шаровой мельнице с позиций задач управления / Фарис Самир Расми Альхори, Е.В. Кочура // Науковий вісник Національного гірничого університету. – 2013. – № 1. – С. 102-107.
158. Фарис Самир Расми Альхори. Автоматический контроль производительности магнитного сепаратора на основе спектрального преобразования сигнала активной мощности электродвигателя / Фарис Самир Расми Альхори, М.А. Алексеев // Науковий вісник Національного гірничого університету. – 2014. – № 1. – С. 56-61.
159. Faris Sameer Rasmi Alkhori. Automated control of ore-pebble mill charge by the signal of active power of magnetic separator electric motor / Faris Sameer Rasmi

Alkhorі, M.O. Alekseyev // Науковий вісник Національного гірничого університету. – 2014. – № 3. – С. 71-76.

160. Фарис Самир Расми Альхори. Автоматизированный контроль степени заполнения барабанных мельниц рудой / Фарис Самир Расми Альхори, М.А. Алексеев // Науковий вісник Національного гірничого університету. – 2014. – № 4. – С. 13-19.

161. Фарис Самир Расми Альхори. Система автоматического контроля степени заполнения рудой мельницы мокрого самоизмельчения / Фарис Самир Расми Альхори // Гірнича електромеханіка та автоматика. – 2013. – № 91. – С. 54-58.

162. Фарис Самир Расми Альхори. Автоматический анализатор степени загрузки шаровой мельницы рудой по сигналам активной мощности электродвигателей магнитного сепаратора и мельницы / Фарис Самир Расми Альхори // Гірнича електромеханіка та автоматика. – 2014. – № 92. – С. 58-62.

163. Фарис Самир Расми Альхори. Автоматизированная система контроля загрузки барабанных мельниц рудой / Фарис Самир Расми Альхори // Ключевые вопросы современной науки – 2014: материалы X международной научно-практической конференции (17-25 апреля 2014 г., Болгария, г. София): тезисы доклада. – Бял ГРАД-БГ, 2014. – С. 15-20.

164. Фарис Самир Расми Альхори. Моделирование и управление процессом загрузки рудой барабанных мельниц / Фарис Самир Расми Альхори // Інформаційні та моделюючі технології: матеріали всеукраїнської науково-практичної конференції (29-31 мая 2014 г., г. Черкаси,): тезисы доклада. – ЧНУ им. Б. Хмельницького, 2014. – С. 49-50.

165. Хан Г.Л. Автоматизация обогатительных фабрик / Г.Л. Хан, В.П. Картушин, П.В. Сорокер, Д.А. Скрипчак. – М.: Недра. 1974. – 225 с.

166. Хорольский В.П. К вопросу прогнозирования производственных ситуаций в процессах обогащения / В.П. Хорольский, И.Б. Сироджа, В.Я. Шварцер, В.З. Козин // Изв. ВУЗов. Горный журнал. – 1969. – №10. – С. 135-140.

167. Хорольский В.П. Применение алгоритма распознавания образов в прогнозирующей системе управления обогатительной секцией / В.П.

Хорольский, И.Б. Сироджа, В.З. Козин // Изв. ВУЗов. Горный журнал. – 1970. – №12. – С. 149-155.

168. Хорольский В.П. Оптимальное управление технологией и снижение энергетических затрат при переработке руд / В.П. Хорольский // Изв. ВУЗов. Горный журнал. – 1982. – №8. – С. 131-135.

169. Хорольский В.П. Оптимальный адаптивный регулятор с активной идентификацией для объектов обогатительной технологии / В.П. Хорольский, Д.А. Белова, А.Н. Шубладзе // Изв. ВУЗов. Цветная металлургия. – 1989. – №3. – С. 122-125.

170. Хорольский В.П. Многоуровневая иерархическая система управления технологическим комплексом переработки руд / В.П. Хорольский // Изв. ВУЗов. Геология и разведка. – 1984. – №5. – С. 108.

171. Хорольский В.П. Распределённые системы адаптивного управления технологическими линиями обогатительных фабрик / В.П. Хорольский // Изв. ВУЗов. Цветная металлургия. – 1991. – №2. – С. 75-78.

172. Хорольский В.П. Алгоритм идентификации квазистационарных объектов обогатительной технологии при микропроцессорном управлении / В.П. Хорольский, Н.П. Лапченко, Е.К. Бабец // Горная эл.-механика и автоматика. – 1990. – №57. – С. 64-69.

173. Хорольский В.П. Локальные адаптивные системы микропроцессорного управления процессами переработки руд / В.П. Хорольский // Изв. ВУЗов. Цветная металлургия. – 1984. – №5. – С. 113-115.

174. Хорольский В.П. Цифровые регуляторы в системах управления технологическими процессами обогащения руд / В.П. Хорольский // Изв. ВУЗов. Цветная металлургия. – 1987. – №3. – С. 88-91.

175. Хорольский В.П. Оптимальные настройки систем управления нестационарными объектами с запаздыванием / В.П. Хорольский, Н.П. Лапченко, Е.К. Бабец // Изв. ВУЗов. Горный журнал. – 1985. – №4. – С. 92-95.

176. Хорольский В.П. Подсистема автоматизированного управления энергоёмкими процессами переработки руд / В.П. Хорольский // Изв. ВУЗов. Цветная металлургия. – 1986. – №1. – С. 115-119.
177. Чернов Л.А. Измерения полей в средах со случайными неоднородностями / Л.А. Чернов. – М.: Изд. АН СССР, 1964. – 354с.
178. Шамаллах Х. Сравнительный анализ Фурье и вейвлет-преобразований сигналов / Х. Шамаллах // Науковий вісник НГУ. – 2004. – №10. – С. 14-22.
179. Шамаллах Х. Фильтрация сигналов с использованием вейвлет-преобразований / Х. Шамаллах // Науковий вісник НГУ. – 2004. – № 9. – С. 24-26.
180. Шеннон Р.Ю. Имитационное моделирование систем – искусство и наука / Р.Ю. Шеннон. – М.: Мир, 1978. – 418 с.
181. Шинкаренко С.Ф. Моделирование процессов измельчения в барабанных вращающихся мельницах / С.Ф. Шинкаренко // Горный журнал. – 1973. – №12. – С. 125-129.
182. Шинкаренко С.Ф. О мощности, потребляемой мельницей на движение шаровой загрузки / С.Ф. Шинкаренко // Обогащение руд черных металлов: науч. сб. – М.: Недра, 1973. – Вып. 2. – С. 31-36.
183. Шупов Д.Г. Прикладные математические методы в обогащении полезных ископаемых / Д.Г. Шупов. – М.: Недра, 1972. – 169 с.
184. Aubery, W.M. and Funk, R.M., 1971. The Quadrupole Magnetic Separator. 32nd Annu. Mining Symp., Jan. 12-13, 1971, Duluth, Minn., Univ. of Minnesota, Minneapolis, pp.55-59.
185. Eyssa, Y.M. 1973. A Feasibility Study of Superconducting Magnetic Separators for Weakly-Magnetic Ores. Thesis, Univ. of Wisconsin-Madison, September 25, 1973, Nuclear Engineering.
186. Lawver, J.E. and Carpenter, J.H., 1965. Wet magnetic separation of oxidized semi taconites. Mining Eng., 17(9): 87-91.
187. Lawver, J.E., Wright, J.L. and Kokal, H.R., 1968. The behavior of mesabi iron and silicate minerals in 20 kilogauss magnetic fields. Soc. Mining Eng., 291(2): 194-203.



188. Obertueffer, J.A., 1973. High gradient magnetic separation. IEEE Trans. On Magnetics., MAG-9(3): 303-306.
189. Pryor, E.J., 1965. Mineral Processing. Elsevier, Amsterdam, 3rd., er., pp.571-599.
190. Spells, K.E., 1955. Correlations for use in transport of aqueous suspensions of fine solids through pipes. Trans. Inst. Chem. Eng., 33(2): 79-82.
191. Stone, W.J.D., 1971 Base metals and high intensity wet magnetic separation. Can. Mining J., 92(6): 56-62.
192. Wade, H.H. and Schulz, N.F., 1960. Magnetic roasting of iron ores in traveling grate roaster. Mining Eng., 12(11): 1161-1165.

## ПРИЛОЖЕНИЯ

### Приложение А. Таблицы экспериментальных данных

**Таблица 1**

Результаты сравнительных испытаний методов автоматического контроля  
производительности магнитного сепаратора по магнитному продукту

№ точки	$Q_m, \text{кг/с}$	$\Delta_1, \text{отн. ед.}$	$\Delta_2, \text{отн. ед.}$
1	17,2	0,5	1
2	17,5	0,7	1,9
3	18	0,8	3,1
4	18,2	2,2	3,9
5	18,5	1,1	5
6	18,7	2,2	5,8
7	19	3,1	6,5
8	19,3	3	7,8
9	19,5	3,5	9
10	19,8	4,2	9,8
11	20	4	10
12	19,7	3,9	9,7
13	18,6	2,9	5,7
14	17,9	1,9	3,5
15	19,1	2,7	7,1

**Таблица 2**

Экспериментальные данные для определения статических характеристик  
мельниц мокрого самоизмельчения (легкообогатимая руда)

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$\varphi, \%$	28	29	30	30	31	32	32,5	33	35	34	36	37,5
$\tilde{P}_C$ , усл. ед	6	7	9	10	10,5	10,5	11,8	11,5	11,2	11	8,5	9
$P_M$ , кВт	1050	1060	1070	1070	1080	1090	1110	1130	1150	1120	1170	1180

**Таблица 3**

Экспериментальные данные для определения статических характеристик  
мельниц мокрого самоизмельчения (среднеобогатимая руда)

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
$\varphi, \%$	33	34	34	35	35	36	37	38	39	39	39	40	42	41	43	44
$\tilde{P}_C$ , усл. ед	5	6	7,9	8,2	9,5	9,5	10,5	11,9	12	14	13,8	13	12,5	12	11	10
$P_M$ , кВт	1110	1120	1120	1130	1140	1150	1160	1180	1190	1200	1210	1220	1230	1235	1260	1270

**Таблица 4**

Экспериментальные данные для определения статических характеристик  
мельниц мокрого самоизмельчения (труднообогатимая руда)

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
$\varphi, \%$	40	41	42	42	43	43	44	46	48	49	50	51	52	52
$\tilde{P}_C$ , усл. ед	5	6	7	8	9	10	10,5	12	12	10	10,5	9,5	7	6
$P_M$ , кВт	1220	1230	1250	1250	1270	1280	1290	1300	1320	1340	1350	1370	1390	1390

**Таблица 5**

Экспериментальные данные для определения статических характеристик шаровых мельниц (шаровая загрузка 75 т)

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$P_M$ , кВт	865	880	900	930	970	990	1050	1060	1060	1070
$\tilde{P}_C$ , усл. ед	12	14	17	18	17	15	8	8	7	4

**Таблица 6**

Экспериментальные данные для определения статических характеристик шаровых мельниц (шаровая загрузка 80 т)

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$P_M$ , кВт	890	920	930	970	990	1120	1170	1100	1100	1130
$\tilde{P}_C$ , усл. ед	11	16	19	22	20	19	13	10	9	4

**Таблица 7**

Экспериментальные данные для определения статических характеристик шаровых мельниц (шаровая загрузка 85 т)

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$P_M$ , кВт	940	960	1030	1040	1060	1100	1120	1140	1140	1170
$\tilde{P}_C$ , усл. ед	14	21	25	27	26	19	18	14	12	4

Таблица 8

Экспериментальные данные испытаний системы автоматизированного контроля  
и управления рудой мельницы мокрого самоизмельчения

Радиоизотопная САР заполнения мельницы рудой  
(нечетные смены)

№ смены	$\beta_{общ}$ , %	$\nu_{общ}$ , %	$\varepsilon$ , отн.ед	Q, т/час
1	55,52	11,63	0,8258	221
3	55,39	11,23	0,8189	223
5	55,7	10,88	0,8248	221
7	53,16	11,91	0,7719	226
9	53,06	11,61	0,781	219
11	53,2	11,23	0,8039	223
13	51,82	11,13	0,8111	222
15	51,05	9,88	0,867	218
17	53,14	9,78	0,8632	219
19	55,23	8,88	0,8729	216
21	53,08	8,85	0,8825	221
23	52,75	10,4	0,8433	221
25	55,23	9,33	0,8392	222
27	55,54	9,08	0,8474	218
29	52,7	8,43	0,8733	218
31	49	8,48	0,9159	220
33	54,98	7,98	0,8819	223
35	57,75	12	0,7976	220
37	55,5	12,53	0,7859	221
39	56,15	12,68	0,7761	219
41	53,81	12,93	0,8021	220
43	56,68	12,68	0,7999	217

$$\bar{\beta}_{общ} = 54,11\%, \bar{\nu}_{общ} = 10,62\%, \bar{\varepsilon} = 0,83, \bar{Q}_0 = 220 \text{ т/час}$$

Корреляционная система автоматизированного контроля  
и управления степени загрузки мельницы рудой  
(четные смены)

№ смены	$\beta_{общ}$ , %	$\nu_{общ}$ , %	$\varepsilon$ , отн.ед	Q, т/час
2	57,95	8,42	0,8929	227
4	57,45	8,97	0,8909	230
6	57,59	8,92	0,8914	234
8	57,14	9,6	0,8707	235
10	57,64	9,5	0,8828	233
12	57,12	9,47	0,8883	234
14	57,08	9,66	0,8829	238
16	57,33	9,52	0,8826	226
18	56,74	10,1	0,8773	233
20	56,72	9,67	0,8804	231
22	58,32	9,76	0,8715	230
24	56,26	9,04	0,8843	229
26	56,39	9,02	0,8865	231
28	54,44	8,87	0,8967	234
30	54,81	8,87	0,8985	228
32	55,1	8,45	0,9018	228
34	54,9	8,9	0,8951	232
36	55,7	8,85	0,8952	226
38	56,43	8,44	0,8935	231
40	54,54	8,22	0,8993	230
42	55,3	7,6	0,9035	237
44	55,11	8,3	0,8943	226
46	56,17	7,95	0,9892	227

$$\bar{\beta}_{общ} = 56,36\%, \bar{\nu}_{общ} = 8,96\%, \bar{\varepsilon} = 0,89, \bar{Q}_0 = 231 \text{ т/час}$$



В.О.Тодовного, ректора ПАТ «ЦГЗК»  
Підпис: І.В.Мов

2014р.

АКТ  
про практичне використання результатів кандидатської дисертації  
аспіранта Державного ВНЗ «Національний гірничий університет»  
Фаріє Самір Расмі Альхорі

Даний акт складений про те що аспірант Державного ВНЗ «НГУ» Фаріє Самір Расмі Альхорі передав для практичного використання на збагачувальній фабриці ПАТ «Центральний гірничо-збагачувальний комбінат» наступні технічні пропозиції, методики та рекомендації по автоматичному контролю ступеня завантаження рудою барабаних млинів магнітозбагачувальних фабрик:

1. Метод автоматичного контролю оптимального ступеня завантаження залізною рудою кулевих млинів першого та другого ступеня здрібнення за сигналами активної потужності електродвигунів магнітних сепараторів і млинів.
2. Метод автоматичного контролю продуктивності технологічних комплексів здрібнення і магнітної сепарації залізних руд за спектральною складовою сигналу активної потужності електродвигуна магнітного сепаратора.
3. Схему алгоритму автоматичного контролю оптимального ступеню завантаження кулевого млина рудою за знаком коефіцієнта кореляції між сигналами активної потужності електродвигунів магнітного сепаратора і млина.
4. Функціональні схеми систем автоматичного контролю ступеня завантаження залізною рудою кулевих млинів першої та другої стадії магнітозбагачувальної фабрики.

Передані технічні пропозиції, методики та рекомендації, що розроблені на основі наукових положень і результатів кандидатської дисертації аспіранта Фаріє Самір Расмі Альхорі використані при оперативному управлінні технологічними процесами здрібнення і магнітної сепарації на збагачувальній фабриці.

Вони дозволили:

- Автоматизувати контроль ступеня завантаження рудою кулевих магнітів;
- знизити витрати на автоматичний контроль технологічних параметрів збагачувальної фабрики;
- підвищити продуктивність кулевих магнітів по готовому класу – 0,074 мм;
- підвищити вихід і якість залізородного концентрату.

Начальник економічного управління –  
Начальник центру управління витратами  
ПАТ «ЦГЗК» \_\_\_\_\_ Хоцкін С.А.

Науковий керівник  
зав. каф. ПЗКС ДВНЗ «НГУ»  
д.т.н., проф. Алексеев М.О.

Аспірант ДВНЗ «НГУ»  
Фаріє Самір Расмі Альхорі