

РЕСПУБЛИКА УЗБЕКИСТАН  
НАВОЙСКИЙ ГОРНО-МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЙ КОМБИНАТ  
НАВОЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГОРНЫЙ ИНСТИТУТ

---

---

УДК 66.012-52.678

*Рустамов Рустам Мардонович*

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ  
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ РАБОТА**

на тему:

**АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ  
ПРОЦЕССОМ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ КОМПЛЕКСА  
«МЕЛЬНИЦА-КЛАССИФИКАТОР»**

по направлению: 5521800 – «Автоматизация и управление»

Работа рассмотрена и допускается к  
защите

Зав. кафедрой «Автоматизация и управ-  
ление технологическими процессами и  
производствами »:

\_\_\_\_\_ проф. Базаров М.Б.

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2014 г.

Научный руководитель:

\_\_\_\_\_ доц. Эшмуродов З.О.

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2014 г.

**НАВОЙ – 2014**

## **СОДЕРЖАНИЕ**

### **ВВЕДЕНИЕ**

### **ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ПРОБЛЕМАТИКИ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ГОРНЫХ РУД**

- 1.1.Комплекс «мельница — классификатор» как объект автоматизации....
- 1.2.Классификация основных параметров и характеристик процесса замкнутого цикла измельчения
- 1.3.Анализ существующих методов управления измельчительным агрегатом
- 1.4.Постановка цели и задачи исследования

### **ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА ПОДСИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ ОТ ПЕРЕГРУЗА КОМПЛЕКСА «МЕЛЬНИЦА-КЛАССИФИКАТОР»**

- 2.1.Формализация критерия защиты и диагностики предперегрузочных состояний комплекса с использованием сигнала вибрации подшипников
  - 2.2 Алгоритмическое обеспечение подсистемы защиты от перегруза комплекса мельница-классификатор
  - 2.3. Разработка структурной и функциональной схем управления комплексом мельница-классификатор
- Выводы по главе

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

### **ПРИЛОЖЕНИЕ**

## **ВВЕДЕНИЕ**

### **Актуальность темы выпускной квалификационной работы.**

Производство горных руд занимает важное место в экономике страны. Добыча и первичная переработка горных руд производится на горно-обогатительных комбинатах и является одной из важных ступеней в получении высококачественной продукции в горном производстве. В обогатительном производстве широкое применение получили энергоёмкие энергетические установки, наиболее мощными из которых являются мельницы мокрого самоизмельчения, работающие в замкнутом цикле со спиральным классификатором. В настоящее время наблюдается опережающий рост стоимости энергоресурсов по сравнению с ценами на продукцию, что делает особо актуальными задачи максимальной производительности и более эффективного использования ресурсов, в частности электроэнергии.

Комплекс «мельница-классификатор» - это достаточно сложный, динамический объект, выход которого зависит от большого числа внешних условий. Выполнение требований к процессу измельчения в целом затруднено действием неконтролируемых возмущений, другим осложняющим фактором является возможность перегруза измельчительного агрегата.

Большой вклад в исследование проблем энергетической оптимизации процесса измельчения внесли такие ученые: В.Н. Кирпичев, В.С. А.Я. Ситковский, В.И. Гудима, В.В. Ронканен, О.Н. Тихонов, А.Е. Троп, К.С. Санакулов, А.С. Хасанов и др.

Проведённый анализ современного состояния вопроса автоматизации процесса измельчения показывает, что резервы максимизации производительности и минимизации затрат электроэнергии ещё не исчерпаны. Таким образом, прослеживается тенденция к возможности оптимизации процесса измельчения.

В работе изучаются вопросы создания автоматизированной системы оптимального управления процессом измельчения с использованием методов

современной теории автоматического управления, идентификации, современных методов контроля.

**Задачи исследования.** Для достижения поставленной цели в работе определены следующие задачи исследования:

- проведение анализа состояния проблемы оптимального управления технологическим процессом измельчения комплекса «мельница - классификатор»;

- разработка подсистемы идентификации объекта управления ОУ по данным нормального функционирования в замкнутом контуре регулирования (подсистемы загрузки комплекса «мельница - классификатор»).

**Основная идея** работы состоит в изучении специфических особенностей процесса измельчения, и создании на этой основе автоматизированной системы управления комплексом «мельница-классификатор», позволяющей постоянно поддерживать оптимальный режим измельчения за счет регулирования на основе измерения координат состояния объекта и метода косвенной оценки величины внутримельничного заполнения на основе вибрации подшипников.

**Практическая значимость работы.** Разработанная в работе автоматизированная система управления комплексом «мельница-классификатор» позволит максимизировать производительность по готовому классу и минимизировать удельный расход электроэнергии.

**Реализация и внедрение результатов работы.** Основные теоретические и практические результаты работы в рамках разработанной автоматизированной системы управления процессом измельчения комплекса «мельница-классификатор» можно использовать в учебном процессе НГГИ в дисциплинах «Моделирование систем управления», «Автоматизация технологических процессов и производств».

# ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ПРОБЛЕМАТИКИ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ГОРНЫХ РУД

## **1. Комплекс «мельница - классификатор» как объект автоматизации**

Производство золоторудного концентрата является одним из важнейших технологических процессов.

Более 90 % рудного сырья при рудоподготовке перед основными стадиями обогащения проходит одну или несколько стадий измельчения в барабанных мельницах различных типов. По данным [1,2,3,4,5], более 50 % энергозатрат и 45 — 55 % себестоимости производства концентратов в железорудной отрасли приходятся на процесс измельчения. Схожие показатели характерны и для других отраслей горно-обогатительного производства. Поэтому проблема оптимизации процесса измельчения имеет существенное практическое значение.

Измельчение и классификация минерального сырья являются основными подготовительными операциями перед его обогащением. Эти процессы находятся, как правило, в замкнутом цикле. Поэтому технологические параметры, характеризующие каждый процесс в отдельности, находятся между собой в динамической связи. Решать вопрос автоматизации процессов измельчения и классификации отдельно друг от друга нельзя; целесообразно рассматривать их как единый управляемый объект «мельница-классификатор». Конечным критерием, определяющим работу измельчительно-классифицирующего агрегата, является максимальная производительность (при заданных классах крупности в готовом продукте) при минимальном удельном расходе электроэнергии.

Измельчение и классификация в общем процессе обогащения руд предназначены для раскрытия полезных минералов перед обогащением и получения частиц требуемой крупности.

## **Оборудование системы «Мельница-Классификатор»**

Измельчение сырья производится в стержневых и шаровых мельницах, а также в мельницах мокрого самоизмельчения. Классификация происходит на грохотах, в спиральных классификаторах и гидроциклонах. Все дальнейшие рассуждения будут приводиться применительно к мельницам мокрого самоизмельчения, работающих в замкнутом цикле со спиральными классификаторами, однако научно-технические решения, полученные в данной работе, в значительной мере применимы для измельчительных установок, состоящих и из других технологических агрегатов, приведённых выше.

*Мельница мокрого самоизмельчения [1-10]* состоит (рис 1.1.) из барабана с торцевыми крышками, загрузочной и разгрузочной цапф, опирающихся на подшипники. Барабан вращается электродвигателем посредством зубчатой муфты, приводной шестерни, установленной на сферических роликовых подшипниках, и зубчатого венца, смонтированного на фланце разгрузочной цапфы.

Корпус барабана состоит из двух половин, соединенных фланцами. К нему присоединены полые цапфы. В цапфах находятся загрузочная и разгрузочная втулки. Загрузочная втулка имеет спирали, предназначенные для ускорения подачи руды в мельницу, и спиральное устройство для возвращения в мельницу пульпы, протекающей через уплотнение.

Мельница работает в технологической цепи фабрики в непрерывном режиме. Исходная руда загружается в мельницу при помощи загрузочного устройства, представляющего собой патрубков, передвигаемый на рельсах механическим приводом.

Футеровка барабана состоит из броневых плит и лифтеров (клиньев). Для сопряжения с лифтерами стыки броневых плит имеют наклонные скосы. Футеровка торцевых стенок выполнена из двух рядов плит. Крепление плит осуществляется лифтерами и болтами с потайными головками. У разгрузочного конца мельницы установлена решетка. Щели ее имеют ширину 20 мм и выполнены с расширением в сторону разгрузки. Крепление решеток осуществляется боковыми лифтерами и болтами.

Наличие решетки и разгрузочных лифтеров позволяет осуществлять принудительную разгрузку из мельницы измельченного материала и поддерживать низкий уровень пульпы в мельнице. Классификация разгрузки мельницы осуществляется на бутаре, закрепленной на разгрузочной цапфе.

Мельницы мокрого самоизмельчения в зависимости от типоразмера приводятся в движение одним или двумя двигателями мощностью до 3000-4000 кВт. Зубчатый венец привода смонтирован на разгрузочной цапфе, с ним сопряжены через одну или две малые шестерни один или два приводных вала.

*Техническая характеристика ММС-70х23*

*Таблица 1.1*

| Показатели  | Значение            |
|---|---------------------|
| Размер барабана (диаметр X длина), мм   | 7000x2300           |
| Рабочий объем барабана, м <sup>3</sup>  | 80                  |
| Частота вращения барабана, мин <sup>-1</sup>  | 13                  |
| Максимальный размер загружаемых кусков, мм  | 350-400             |
| Электродвигатель: тип, Мощность, кВт  | СДМ-15-49-6<br>1600 |
| Масса мельницы без электрооборудования, приспособлений, запчастей, системы смазки, кг | 430000,0            |

### **1,2 Режимы работы мельницы**

В зависимости от характеристик исходного сырья и требований к крупности измельчаемого продукта выбирают режим измельчения. В зависимости от частоты вращения барабана мельницы различают следующие режимы движения измельчающих тел: каскадный, водопадный, смешанный и со сверхкритической скоростью (рис 1.2).

**Каскадный режим** осуществляется при низкой частоте вращения барабана и характеризуется перекачиванием измельчаемых тел без их полета. Измельчающая среда вместе с барабаном приподнимается на некоторый угол, а затем под

действием гравитационных сил скатывается. При постоянной частоте вращения высота подъема измельчающих тел постоянна. Они непрерывно циркулируют, поднимаясь по круговым траекториям и затем скатываясь «каскадом» параллельными слоями вниз (рис 1.2, а). Материал при каскадном режиме измельчается в результате раздавливания и истирания.

**Водопадный режим** работы мельницы обеспечивается высокой частотой вращения барабана, составляющей 0,7—0,8 критической. Критической называется частота, при которой начинают центрифугировать тела, расположенные на внутренней поверхности барабана. При водопадном режиме измельчающая среда поднимается по круговым траекториям на большую высоту и падает по параболическим траекториям (рис 1.2, б). Измельчение руды происходит главным образом в результате ударов измельчающих тел и частично вследствие истирания и раздавливания. Водопадный режим работы мельниц применяют для грубого измельчения в I стадии.

**Смешанный режим** характеризуется постепенным переходом от чисто каскадного к чисто водопадному режиму. При этом внешние слои измельчающих тел падают на внутренние слои материала, скатывающегося по склону вниз (рис 1.2, в).

**Сверхкритический режим** наступает при частоте вращения барабана выше критической, когда в центрифугирование постепенно вступают все новые слои измельчающей среды. При центрифугировании всех слоев измельчающей среды мельница уподобляется маховому колесу, а расход полезной энергии и работа измельчения становятся равными нулю (рис 1.2, г).

Критическую частоту вращения (мин) определяют по формуле  $n_{кр} = 30/\sqrt{R}$  (1) где  $R$  - радиус барабана с учетом толщины футеровки, м. При любом режиме измельчающая среда движется по круговым траекториям под действием сил трения, возникающих между футеровкой мельницы и прилегающими к ней телам, а также между самими телами, которые зависят от нормального давления материала на внутреннюю поверхность барабана и коэффициента трения.

На коэффициент трения влияют свойства руды, состояние поверхности футеровки, плотность и вязкость пульпы. При малых частотах вращения барабана и небольших заполнениях мельницы измельчающими телами (коэффициент заполнения  $\phi < 30$  % по объему) возможно скольжение измельчающих тел при движении по круговой траектории. При  $\phi = 40-50$  % и негладкой футеровке скольжение характерно только для внутренних слоев измельчающих тел.

В обычной производственной практике мельницы вращаются при частотах, составляющих 50-90 % от критической (в зависимости от поставленных технологических требований и желательного движения измельчающей среды). [10]

Процесс измельчения в мельницах самоизмельчения можно представить следующим образом.

Более крупные (150—450 мм) куски руды движутся в каскадном режиме, приобретая окатанную форму. Куски промежуточной крупности (50—150 мм) измельчаются в водопадном режиме. При падении по параболическим траекториям они измельчают ударом более мелкие куски и постепенно сами разрушаются. Чтобы поднять рудную массу на необходимую высоту, мельницы самоизмельчения оборудуют лифтерами. Крупноизмельченный продукт целесообразно получать при высокой частоте вращения (смешанный и водопадный режим), тонкоизмельченный — при меньшей частоте вращения барабана (каскадный режим).

***Спиральный классификатор*** [1-10] (рис 1.3, см.) состоит из корыта с полукруглым днищем, одной или двух спиралей, приводного механизма и механизма подъема спиралей. Шаг спирали равен 0,5 - 0,6 её диаметра. Корыто классификатора устанавливают на опорной раме под углом [8-24]. Внутри корыта на пустотелом валу укреплен спираль. Наружную часть спирали для предохранения от износа изготавливают из сменных сегментов из износостойкого чугуна. Верхний конец спирали через подшипник опирается на

специальный кронштейн; нижний конец - на подшипник, который с помощью траверсы и подъёмного механизма может перемещаться в вертикальной плоскости.

Питание подаётся под зеркало пульпы в классификаторе через приемный карман в боковой стенке корыта. Крупные частицы оседают на дно корыта и перемещаются спиралью к верхнему его концу, где разгружаются через песковое отверстие. Мелкие частицы, взвешенные в пульпе, переливаются через порог в нижней части корыта и отводятся через сливной патрубок.

Производительность классификатора зависит от числа спиралей и их диаметра. На отечественных фабриках обогащения используются классификаторы с непогруженной спиралью: односпиральные (1-КСН-15 и др.) и двуспиральные (2-КСН-24 и др.) и классификаторы с погруженной спиралью: односпиральные (1-КСП-12 и др.) и двуспиральные (2-КСП-12 и др.)

*Техническая характеристика классификаторов*

*Таблица 1.2*

| <b>Параметры</b>                           | <b>1 КСН<br/>2,4x13,4</b> | <b>2 КСН<br/>3,0x17,2</b> |
|--|---------------------------|---------------------------|
| Диаметр спирали, мм                        | 2400                      | 3000                      |
| Длина корыта, мм                           | 13400                     | 17200                     |
| Количество спиралей, шт                    | 1                         | 2                         |
| Число оборотов вала спирали, об/мин        | 3,6                       | 3,6                       |
| Угол наклона корыта, град                  | 24                        | 23                        |
| Мощность эл.двигателя привода спирали, кВт | 22                        | 90                        |

### **1.3. Основных параметры и характеристики процесса замкнутого цикла измельчения**

Объектом автоматизации является измельчительный комплекс ГМЗ -1 НГМК, состоящий из мельницы мокрого самоизмельчения ММС 70x23 и односпирального классификатора 1 КСН 2,4x13,4[1,12,13,14,15].

Технологическая схема измельчения представлена на рис 1.4. Бункер силосного типа (объёмом  $1311\text{ м}^3$  и рабочей ёмкостью 1800 т ) имеет окно, для выпуска руды на пластинчатый питатель П-2-18-60.

Исходным сырьём для измельчительного агрегата является дроблёная руда максимальной крупностью 350 мм .

Выходными продуктами являются: пульпа с регламентированными содержанием готового класса твёрдого и плотностью (количеством твёрдого); рудная галля поступающая на следующую стадию измельчения; пески классификатора, поступающие на вход мельницы в качестве рециркулирующего материала.

Комплекс «мельница - классификатор», работающий в замкнутом цикле измельчения характеризуется следующими параметрами (рис 1.5 (см. в Приложение 1) и таблица. 1.3). [10,12,13,14,15,17,20]

*Основные параметры работы комплекса «мельница - классификатор»*

*Таблица 1.3*

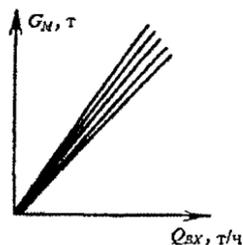
| <b>Группа параметров</b> | <b>Наименование технологического параметра</b> | <b>Единица измерения</b> | <b>Условное обозначение</b> |
|--------------------------|--|--------------------------|-----------------------------|
| Входные                  | Производительность цикла по исходной руде      | $t/ч$                    | $Q_{ВХ}$                    |
|                          | Величина песковой нагрузки классификатора      | $t/ч$                    | $Q_{П}$                     |
|                          | Суммарный входной поток по твёрдому            | $t/ч$                    | $Q_{ВХ\_ОБЩ}$               |
|                          | Суммарный входной поток по объёму              | $t/ч$                    | $Q_{ВХ\_ОБЪЕМ}$             |
|                          | Расход воды в мельницу                         | $\text{м}^3/ч$           | $Q_{В\_М}$                  |
|                          | Расход воды в классификатор                    | $\text{м}^3/ч$           | $Q_{В\_К}$                  |
|                          | Физико-механические                            | -                        | $d_{СП1}$                   |

|          | свойства загружаемой руды                                |       |                     |
|----------|--|-------|---------------------|
| Режимные | Мощность, потребляемая электроприводом мельницы          | кВт   | $P_M$               |
|          | Величина внутимельничного заполнения                     | %     | $G_M$               |
|          | Степень заполнения поперечного сечения барабана мельницы | %     | $\varphi_M$         |
| Входные  | Суммарный выход по твердому классификатору               | $m/ч$ | $Q_{ВЫХ\_M}$        |
|          | Суммарный выход по твердому классификатора               | $m/ч$ | $Q_{ВЫХ\_K}$        |
|          | Содержание готового класса мельницы (-0,074 мм)          | %     | $\beta_M$           |
|          | Содержание готового класса классификатора (-0,074 мм)    | %     | $\beta_K$           |
|          | Производительность мельницы по готовому классу           | $m/ч$ | $Q_{ВЫХ\_M\beta_M}$ |
|          | Производительность классификатора по готовому классу     | $m/ч$ | $Q_{ВЫХ\_K\beta_K}$ |
|          | Плотность пульпы   | г/л   | $\gamma$            |
|          | Физико-механические свойства выгружаемой руды            | -     | $d_{CP2}$           |

Для создания систем автоматизации, правильного выбора измерительных и управляющих средств необходимо изучение закономерностей, характеризующих; объекты автоматизации.

Исследование статических закономерностей мельниц ММС производились по разным направлениям [10,12,13,14,15,17,20], рассмотрим приведённые статические характеристики:

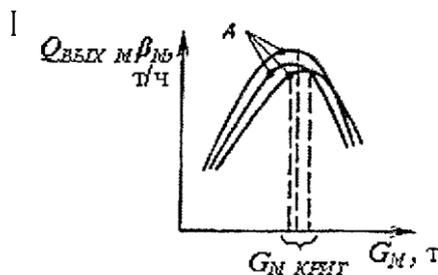
Характеристики на рис.1.6 дают оценку зависимости между величиной внутримельничного заполнения  $G_M$  и производительностью по исходной руде  $Q_{BX}$  на входе мельницы:



**Рис.1.6. Статическая характеристика мельницы:**  
*зависимость величины внутримельничного заполнения от  
 производительности по исходной руде на входе*

Эта характеристика, как правило, линейна до критического значения величины внутримельничного заполнения  $G_{M\_КРИТ}$ , однако наклон линий  $G_M = f(Q_{BX})$  существенно зависит от свойств измельчаемого материала, расхода воды  $Q_{В\_М}$  расхода пескови  $Q_{П}$  др.

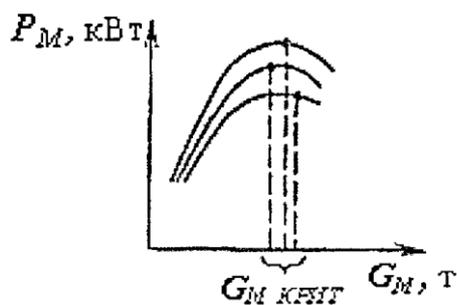
Обобщенные статические характеристики на рис 1.7 указывают на существование нелинейной зависимости между производительностью по готовому классу  $Q_{ВЫХ\_м\beta_M}$  в разгрузке мельницы и внутримельничным рудным заполнением  $G_M$



**Рис.1.7. Статическая характеристика мельницы:**  
*зависимость производительности по готовому классу на выходе от  
 величины внутримельничного заполнения*

Некоторой области оптимальных значений внутримельничного рудного заполнения  $G_M\_КРИТ$ , соответствует максимум производительности по готовому классу  $Q_{ВЫХ\_м\beta_m}$ . Ширина области  $G_M\_КРИТ$ , зависит от многих факторов: величины и состояния внутримельничной нагрузки, свойств исходного материала, расхода воды в мельницу и др. Наличие здесь экстремума можно объяснить следующими физическими явлениями, происходящими внутри барабана мельницы. По мере увеличения  $G_M$  растет переменная  $Q_{ВЫХ\_м\beta_m}$  на выходе мельницы, однако прирост  $\Delta(Q_{ВЫХ\_м\beta_m})$  с ростом  $G_M$  уменьшается. Это объясняется тем, что с увеличением  $G_M$  растет и гидростатическое давление в мельнице. В результате происходит интенсификация разгрузки материала и, следовательно, уменьшение времени его измельчения. В области заполнения  $G_M\_КРИТ$ , положительный прирост производительности по готовому классу вообще прекращается, а при дальнейшем увеличении  $G_M$  интенсивность выхода материала в разгрузке мельницы становится такой, что прирост  $\Delta(Q_{ВЫХ\_м\beta_m})$  делается отрицательным. Работа на падающем участке характеристики  $Q_{ВЫХ\_м\beta_m} = f(G_M)$  вообще нерациональна, так как условия измельчения при  $G_M > G_M\_КРИТ$  становятся неудовлетворительными, а измельчительный агрегат работает неустойчиво.

Статические характеристики  $P_M = f(G_M)$ , показанные на рис 1.8, устанавливают зависимость между величиной внутримельничного рудного заполнения  $G_M$  и мощностью  $P_M$  (кВт), потребляемой приводным двигателем мельницы.

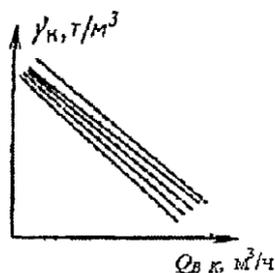


**Рис. 1.8. Статическая характеристика мельницы:**

*зависимость между величиной внутримельничного заполнения и мощностью, потребляемой приводным двигателем*

Области  $G_{M\_КРИТ}$ , на рис.1.8 и на рис. 1.7 в общем случае могут не совпадать, так как дрейф экстремальных значений мощности  $P_M$  вдоль оси абсцисс происходит в основном за счет износа футеровки мельницы, а дрейф вдоль оси ординат - за счет изменения плотности пульпы внутри мельницы и плотности исходной руды. Дрейф же статических характеристик  $Q_{ВЫХ\_МВМ} = f(G_M)$  на рис 1.7 зависит от большого числа возмущений, в первую очередь от изменения свойств исходного сырья (твердости, крупности), соотношения между питанием  $Q_{ВХ}$  и песками  $Q_{П}$  (т/ч).

На рис. 1.9 показаны зависимости между плотностью слива классификатора  $\gamma_K$  (т/м<sup>3</sup>) и расходом воды в ванну  $Q_{В\_К}$  (м<sup>3</sup>/ч).

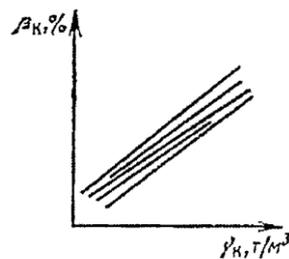


**Рис. 1.9. Статическая характеристика классификатора:**

**зависимость**

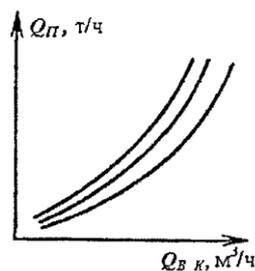
*между плотностью слива классификатора и расходом воды в ванну*

На рисунке 1.10 показаны зависимости между плотностью слива классификатора  $\gamma_K$  и содержанием готового класса в сливе  $\beta_K$  (% , обычно класса --0,074 мм).



**Рис. 1.10. Статическая характеристика классификатора:** *зависимость между плотностью слива классификатора и содержанием готового класса в сливе*

На рис 1.11 показаны зависимости между расходом песков  $Q_{II}$  (т/ч) и расходом воды  $Q_{B\_K}$  в ванну классификатора.



**Рис 1.11. Статическая характеристика классификатора:** *зависимость между расходом песков и расходом воды в ванну*

Из приведенных зависимостей следует, что эффективным регулирующим воздействием на процесс классификации является изменение расхода воды  $Q_{B\_K}$  в ванну.

К важным выходным показателям измельчительного агрегата в целом относятся содержание готового класса  $\beta_K$  в сливе и производительность по готовому классу  $Q_{ВЫХ\_к\beta_K}$ . Промежуточной выходной величиной

классификатора является расход песков  $Q_{П}$ , поступающих в загрузку мельницы. Существенное влияние на процесс классификации оказывают такие возмущения как изменение гранулометрического состава руды ( $\beta_M, d_{CP2}$ ) и расхода твердого в разгрузке мельницы.

Знание статики и динамики процесса измельчения позволяет повысить производительность и обеспечить безаварийную работу при ручном, автоматическом и человеко-машинном управлении. [10,12,13,14,15,17,20]

### **1.3 Анализ существующих методов управления измельчительным агрегатом**

С точки зрения наиболее распространенного функционального подхода к оценке свойств систем [14] целью управления ими должно быть приведение в соответствие с разнообразием возмущений разнообразия управляющих воздействий.

Как указывалось выше, основная задача процесса измельчения — обеспечение подготовки пульпы к обогащению (крупность, раскрытие минералов и т. д.). При этом в цикле измельчения предполагается перерабатывать плановое количество руды.

В связи с этим выделяют следующие критерии управления процессом измельчения [6,9,10,11,12,13,14,15,17,]:

а) максимальная переработка исходной руды ( $Q_{BX \rightarrow \max}$ ) при ограничении на крупность (гранулометрический состав) выходной руды;

б) стабилизация гранулометрического состава и плотности слива мельницы, поступающей в процесс обогащения ( $\beta_M = const, \gamma_M = const$ ) при ограничении на количество исходной руды  $Q_{BX}$

в) стабилизация гранулометрического состава и плотности слива классификатора, поступающей в процесс обогащения ( $\beta_M = const, \gamma_M = const$ ) при ограничении на количество исходной руды  $Q_{BX}$

з) обеспечение максимальной производительности мельницы и классификатора по готовому классу ( $Q_{ВЫХ\_м\beta M} \rightarrow \max, Q_{ВЫХ\_к\beta K} \rightarrow \max$ )

При управлении процессом измельчения для достижения целей управления необходимо компенсировать следующие возмущения:

- изменения физико-механических свойств руды, вызывающие постепенное изменение расхода и гранулометрического состава пульпы на выходе цикла;

- изменения условий работы измельчительного агрегата из-за износа футеровки барабана мельницы.

Поэтому для достижения целей управления процессом измельчения необходимо решение следующих задач:

- стабилизация входных потоков руды и воды, (но при изменении свойств сырья режимы стабилизации необходимо изменить на режимы компенсации действия возмущений);

- стабилизация условий измельчения;

- стабилизация условий классификации;

- стабилизация гранулометрического состава выходного потока пульпы;

- компенсация изменения физико-механических свойств исходной руды.

Для решения данных задач выделим следующие воздействия, совместное использование которых позволяет управлять процессом измельчения:

- регулирование воздействием на подачу исходной руды в цикл измельчения;

- регулирование воздействием на расход воды в барабан мельницы;

- регулирование воздействием на расход воды в классификатор.

Таким образом, при обобщении технологических требований к процессу измельчения [6,9,10,11,12,13,14,15,17,] все разнообразие критериев управления сводится к виду:

$$(Q_{ВХ} \rightarrow \max, Q_{ВЫХ\_М\beta M} \rightarrow \max, Q_{ВЫХ\_к\beta K} \rightarrow \max) \quad (8)$$

$$(\beta_M = const, \beta_K = const, \gamma_M = const, \gamma_K = const)$$

где:  $Q_{ВХ}$  - производительность цикла по исходной руде, (т/ч);  $Q_{ВЫХ\_М\beta_M}, Q_{ВЫХ\_К\beta_K}$  производительность мельницы и классификатора по готовому классу, (т/ч);  $\beta_M, \beta_K$  - содержание готового класса в сливе мельницы и классификатора (— 0,074 мм);  $\gamma_M, \gamma_K$  плотность пульпы, (г/л).

С учетом анализа требований к процессу измельчения, а также статических и динамических характеристик измельчительного агрегата, можно обосновать необходимое количество взаимосвязанных через технологический процесс локальных автоматических систем, которые обеспечивают общие цели функционирования измельчительного агрегата.

Для удовлетворения общих требований к процессу в измельчительном агрегате необходимо реализовать как минимум три локальные системы автоматического регулирования:

- систему стабилизации транспортирования материала внутри барабана мельницы;
- систему стабилизации содержания готового класса в сливе классификатора;
- систему поддержания оптимальной внутримельничной нагрузки измельчаемым материалом.

### **Системы стабилизации транспортирования материала внутри барабана мельницы**

Материал внутри мельницы транспортируется и измельчается более равномерно, если плотность пульпы внутри барабана мельницы поддерживается постоянной.

Блок-схема системы стабилизации транспортирования материала внутри барабана мельницы показана на рис 1.12. (см. в Приложение 1).

На обогатительных фабриках широкое распространение получили системы регулирования заданного отношения твердого к жидкому  $T/J$  (или

отношения руда — вода) на входе мельницы М. В этом случае поддерживается постоянное заданное отношение между суммарным расходом исходного питания  $Q_{ВХ}$  и песков  $Q_{П}$  к расходу воды  $Q_{В\_М}$  т. е.

$$T / Ж = Q_{ВХ\_ОБЩ} / Q_{В\_М} = (Q_{ВХ} + Q_{П}) / Q_{В\_М} = b = const, \quad (9)$$

где  $b$  — коэффициент, определяющий заданное отношение  $T/Ж$ . Система регулирования заданного отношения  $T/Ж$  реализуется следующими элементами: ИУ1, ИУ2 — измерительными устройствами расхода. Руды  $Q_{ВХ}$  и песков ;  $\Sigma$  — сумматором; Р2 — регулирующим устройством  $Q_{П}$  ( $Q_{ВХ\_ОБЩ} = Q_{ВХ} + Q_{П}$ ) отношения  $T/Ж$  с задатчиком ЗД2, ИУ4 — измерительным устройством расхода воды  $Q_{В\_М}$ ; 4 — регулирующим органом. При изменении величины  $Q_{ВХ\_ОБЩ}$  изменяется отношение  $\Delta Q_{ВХ\_ОБЩ} / Q_{В\_М}$  заданного значения коэффициента  $b$ , в результате чего посредством исполнительного механизма ИМ2 и регулирующего органа 4 изменяется расход воды  $Q_{В\_М}$  в мельницу до тех пор, пока величина  $\Delta Q_{ВХ\_ОБЩ} / Q_{В\_М}$  не достигнет заданного значения. Заданное значение  $b = Q_{ВХ\_ОБЩ} / Q_{В\_М}$  устанавливается задатчиком ЗД2. В тех случаях, когда гранулометрический состав (или средняя крупность  $d_{СР1}$ ) исходной руды меняется в достаточно широких пределах, стабилизация заданного постоянного отношения  $T / Ж = Q_{ВХ\_ОБЩ} / Q_{В\_М} = b$  становится неэффективной, так как это приводит к существенному колебанию гранулометрического состава материала в разгрузке мельницы. Уменьшить эти колебания можно, если поддерживать отношение  $T/Ж$  пропорционально некоторой функции от  $d_{СР1}$  [10,12,13,14,15,17,20] т. е.

$$T / Ж = Q_{ВХ\_ОБЩ} / Q_{В\_М} = f(d_{СР1}) \quad (10)$$

Приближенно функцию  $f(d_{СР1})$  можно аппроксимировать линейной зависимостью.

Для практической реализации в измельчительных агрегатах таких систем управления необходимо иметь в наличии измерительные устройства переменных  $Q_{II}$  и  $d_{CP1}$

В некоторых случаях на обогатительных фабриках для поддержания требуемого отношения твердого к жидкому в загрузке мельницы используют выражение

$$Q_{BX} / Q_{B\_M} = b_2 = const, \quad (11)$$

где  $b_2$  — постоянный коэффициент. Управление расходом воды в загрузку мельницы по формуле (11) неэффективно, так как без учета расхода песков могут иметь место существенные колебания гранулометрического состава в разгрузке мельницы (расход песков обычно в два-три раза превышает величину расхода исходной руды  $Q_{BX}$ ).

Для определения расхода песков (*ИУ2* на рисунке 1.12) может использоваться измерительное устройство, основанное на контроле активной мощности, которую потребляет приводной двигатель спиралей классификатора. Измерительные устройства переменной  $Q_{II}$  такого типа, как правило, не точны из-за колебаний напряжения сети, переменного сопротивления вала спиралей в цапфах подшипников, состояния трущихся поверхностей спиралей, зашламленности постели транспортирующего органа.

Для повышения точности измерения используют различные методы непосредственного контроля переменной  $Q_{II}$ , например метод непрерывного взвешивания участка транспортирующего желоба с песками (*ИУ5* на рис 1.12).

Другой метод непосредственного контроля песковой нагрузки  $Q_{II}$  основан на измерении момента сопротивления, который оказывают пески, транспортируемые по желобу водой, звездочке, укрепленной на валу специального двигателя.

### **Системы стабилизации содержания готового класса в сливе классификатора**

Для практической реализации таких систем автоматического управления необходимо иметь измерительное устройство, контролирующее содержание

готового класса  $\beta_k$  в сливе классификатора. При отсутствии устройства можно использовать плотномер, что следует из анализа статических характеристик. Блок-схема системы автоматического контроля и регулирования заданного значения содержания готового класса в сливе спирального классификатора показана на рис.1.13.

Система состоит из следующих элементов: *ИУ* - измерительного устройства, *P* - регулятора с задатчиком, *ЗД*, *ИМ* - исполнительного механизма, *5* - регулирующего органа расхода воды  $Q_{B\_M}$  в ванну классификатора. Выбор и настройка таких стабилизирующих систем производятся по известным инженерным методикам.

### **Системы автоматического поддержания оптимальной величины внутримельничной нагрузки**

Для практической реализации систем автоматического поддержания оптимальной величины внутримельничной нагрузки необходимы измерительные устройства, контролирующие переменную  $G_M$

Существует несколько способов косвенного контроля переменной  $G_M$  (или переменной  $\varphi_M$ ), основные из них описаны ниже.

#### **1. Системы поддержания необходимого питания**

При стабильных условиях транспортирования материала величина внутримельничного заполнения  $G_M$  пропорциональна суммарному расходу

материала на ее входе  $Q_{BX\_ОБЩ} = Q_{П} + Q_{BX}$  т. е.

$$G_M = k_1(Q_{BX} + Q_{П}) = k_1 Q_{BX\_ОБЩ}, \quad (12)$$

где  $k_1$  — постоянный коэффициент, зависящий от конструктивных параметров барабана мельницы, ее разгрузочного узла, свойств измельчаемого материала.

Система автоматического управления, в основу которой положено выражение (12), работает следующим образом. При помощи измерительных устройств контролируются переменные  $Q_{BX}$  и  $Q_{П}$ . Сигналы,

пропорциональные этим переменным, поступают на вход сумматора и затем на регулирующее устройство с задатчиком.

Путем установки задатчика выбирается необходимое задание по  $(k_1 Q_{ВХ\_ОБЩ})$ . При отклонении расхода песков  $Q_{П}$  текущее значение  $k_1 Q_{ВХ\_ОБЩ}$  отклоняется от заданного, в результате чего исполнительный механизм изменяет положение регулирующего органа переменной  $Q_{ВХ}$ . Процесс регулирования длится до тех пор, пока текущее значение  $(k_1 Q_{ВХ\_ОБЩ})$  не станет равным заданному.

В некоторых случаях вместо выражения (12) используется выражение

$$G_M = k_2 Q_{П} + k_3 Q_{ВХ}, \quad (13)$$

учитывающее влияние входных компонентов  $Q_{ВХ}$  и  $Q_{П}$  на величину внутримельничного заполнения измельчаемым материалом. Здесь  $k_2$  и  $k_3$  — постоянные коэффициенты.

Недостатком такого способа стабилизации заданной величины является зависимость коэффициента  $k_1$  в формуле (12) или коэффициентов  $k_2$  и  $k_3$  в формуле (13) от изменения свойств измельчаемого материала.

*2. Метод, основанный на измерении акустических характеристик звукового излучения (шума) мельницы*

Данный метод основан на измерении общего уровня (интенсивности) шума, уровня шума в узкой полосе частот и средней частоты шума. Измерительный преобразователь шума состоит из приемной антенны  $ПА$  (микрофона) и промежуточного преобразователя  $Пр$  (рис 1.14) (см. в Приложение 1).

Для устранения влияния внешних шумов можно использовать две одинаковые приемные антенны, одна из которых направлена на контролируемую мельницу, а другая — помеху. Первая приемная антенна воспринимает шум контролируемой мельницы и частично шум помехи, вторая же воспринимает в основном шум помехи и частично шум контролируемой мельницы. Разность между выходными сигналами антенны подается на

преобразователь  $Пр$ , а затем на вход регулятора  $P$  с задатчиком  $ЗД$ , с помощью которого устанавливается требуемое значение сигнала, пропорциональное измеряемой акустической характеристике. Регулятор  $P$  управляет исполнительным механизмом  $ИМ$  и регулирующим органом 2, изменяющим расход материала  $Q_{ВХ}$

Считается, что звукометрический сигнал  $z$  на выходе  $ПА$  пропорционален величине  $G_M$  т. е.  $z = kG_M$  ( $k$  - коэффициент пропорциональности).

Недостатком автоматических систем описанного выше типа является зависимость изменения коэффициента  $k$  от многих факторов: изменения внутримельничной нагрузки, состояния футеровки, свойств измельчаемого материала (в первую очередь его крупности) и т. д.

### *3. Радиоизотопный метод контроля (на основе прибора РИЗМ)*

На обогатительных фабриках применяются измерительные устройства контроля  $G_M$  основанные на радиоизотопном методе контроля, типа РИЗМ. Прибор РИЗМ (радиоизотопный измеритель заполнения мельниц) разработан базовой изотопной лабораторией МЧМ (г. Днепропетровск) и предназначен для автоматического контроля и управления мельницами мокрого самоизмельчения руд. Сущность способа состоит в том, что о величине  $G_M$  судят по результатам непрерывного контроля за уровнем материала в зоне горловины мельницы. В полости входной и выходной горловин мельницы помещаются излучатель и приемник жесткого гамма-излучения  $ПИ$  (рисунок 1.15, а).

Упрощенная принципиальная схема РИЗМ показана на рис 1.15 (см. в Приложение 1), б. Тип источника  $И$  радиоактивного излучения зависит от типоразмера мельницы. Приемник  $б$  выполнен на основе монокристалла йодистого натрия, активизированного таллием. Гамма-кванты измеряемого потока, проходя через мельницы, попадают на кристалл  $б$ , где и теряют свою энергию. Часть этой энергии преобразуется в световые вспышки-сцинтилляции. Световые вспышки преобразуются затем в импульсы тока на выходе фотоэлектронного умножителя  $7$ , электроды которого питаются через делитель

высоковольтным напряжением  $U$ . Импульсы тока нагрузочного резистора  $R_H$  поступают на вход эмиттерного повторителя 8 и далее через канал связи 9 в усилитель-но-преобразующий блок 10, а затем на вход интенсиметра 11. Блоки 6, 7, 8 на рисунке 1.15, б относятся к приемнику излучения ПИ, а блоки 10, 11 — к преобразователю ПР на рис 1.15, а. Сигнал с выхода ПР поступает на вход регулятора  $P$  с задатчиком ЗД. Работа САР с радиоизотопным измерителем заполнения мельниц (рисунок 1.15, а) происходит так же, как и САР со звукометрическим датчиком.

#### 4. Метод управления с использованием экстремального регулятора

На рис. 1.16 показана блок-схема экстремальной системы с использованием измерительного устройства ИУ контролирующего  $R_M$  и прибора РИЗМ.

Принцип ее работы следующий. В процессе работы измельчительного агрегата изменяются переменные пропорциональные  $R_M$  и  $G_M$  на выходе ИУ и ПР, которые подаются на вход ЭР экстремального регулятора. Местом нахождения рабочей точки на статической характеристике  $R_M = f(G_M)$  (на возрастающем или ниспадающем участке) определяется знак производной  $dP_M / dG_M$ , на возрастающем участке  $dP_M / dG_M > 0$ , на ниспадающем —  $dP_M / dG_M < 0$ , а в экстремуме -  $dP_M / dG_M = 0$ .

Логическое устройство регулятора ЭР вырабатывает управляющее воздействие на исполнительный механизм ИМ, который изменяет положение регулирующего органа так, что изменение регулирующего воздействия  $Q_{BX}$  всегда направлено в сторону возрастания  $R_M$

Недостатком рассмотренных систем автоматического контроля величины внутримельничной нагрузки является отсутствие возможности прямого контроля  $G_M$ . Косвенные методы оценки величины  $G_M$ , применяемые в системах контроля описанных выше типов, не позволяют с необходимой точностью измерить данную величину.

Необходимо учесть, что работа приведённых выше систем контроля величины внутримельничного заполнения тесным образом связана с энергетической эффективностью процесса измельчения.

Работа измельчительного агрегата в критических областях характеристики без перегрузов, с использованием существующих систем автоматического контроля величины внутримельничной нагрузки, не представляется возможной.

Для предотвращения возникновения автоколебаний в измельчительном агрегате (объекте с рециклом) рабочие точки на существенно нелинейных характеристиках  $Q_{ВЫХ\_МВМ} = d(G_M)$  целесообразно сдвинуть несколько влево от экстремума (точки А) [6,9,10,11,12,13,14,15,17].

### **1.3.1 Повышение эффективности АСУТП измельчения ГМЗ-1 средством разработки автоматизированной системы управления загрузки измельчительного агрегата на основе регулятора состояния**

В условиях ГМЗ-1, рассмотрены основные проблемы и возможные пути их решения для повышения эффективности управления комплексом мельница-классификатор, с целью обеспечения максимальной производительности и минимальных затрат электроэнергии, а также качественных характеристик полученного продукта.

В работе предлагается рассмотреть существующую структуру АСУТП измельчения ГМЗ-1 (рис 1.17) [1,2,3,4].



**Рис 1.17. Структурная схема АСУТП измельчения ГМЗ-1**

Рассматриваемая АСУТП предназначена для обеспечения необходимого протекания процесса в соответствии с критерием минимизации удельных затрат электроэнергии при ограничении на производительность, включает в себя следующие подсистемы (контуры) автоматического регулирования и алгоритмы защиты:

- подсистема стабилизации плотности слива классификатора;
- подсистема загрузки руды в ММС;
- подсистема управления водным режимом;
- алгоритм защиты мельницы от перегруза;
- алгоритм защиты классификатора от перегруза.

Процесс получения рудного концентрата в измельчительных агрегатах отличается многообразием взаимозависимых факторов, связанных с наличием трудно формализуемых возмущений, отсутствием четких количественных зависимостей между различными параметрами процесса.

Управление измельчением усложняют существующие и в промышленных условиях не поддающиеся формализации существенные возмущения по механическому и физико-химическому составу измельчаемых материалов (твердость, крупность, однородность и т.д.). Контролировать данные возмущения с требуемой точностью и дискретностью не представляется

возможным, а стабилизация величины вышеуказанных входных материальных потоков не снимает колебаний физико-механических свойств руды. Данные возмущения приводят к значительным качественным отклонениям выходного продукта процесса при неоправданных затратах энергоресурсов. Из этого следует, что с целью компенсации значительных возмущений по физико-механическому составу руды возникает необходимость изменять уровень загрузки рудных материалов в мельницу в широком диапазоне, что ведет к нарушению установившихся режимов по соотношению рудных материалов и оборотных продуктов. При этом весьма существенны как быстроедействие управления, обеспечивающего перевод в новый режим по загрузке, так и необходимость исключения возникновения колебательных переходных процессов параметров измельчения, поскольку последние могут привести к авариям (перегрузам), либо существенному снижению качества работы комплекса мельница-классификатор и обогатительного передела в целом [6,9,10,12,13,14,15,17].

В силу сложившихся объективных производственно-технологических факторов в подавляющем количестве существующих систем и методов автоматического управления технологическим процессом измельчения [11,12,14,15], в том числе и в условиях ГМЗ-1 [1,2,3,], основным является инерционный и "грубый" канал управления по расходу руды, что вносит свою лепту в "размывание" точности поддержания заданного технологического режима процесса.

Попытки реализации обозначенных принципов управления измельчением проводились в рамках действующей системы АСУТП, но не увенчались успехом, так как в условиях ГМЗ-1а не удалось добиться необходимого качества работы. Предварительный анализ показал, что возможность более эффективного ведения процесса, существует только в случае разработки новой подсистемы загрузки руды с использованием более совершенных подходов, которая будет менее подвержена действию внешних возмущений. i

В данной выпускной квалификационной работе, для достижения необходимых целей управления измельчением, в дальнейшем предлагается рассматривать только подсистему загрузки измельчительного комплекса, так как другие подсистемы (стабилизации плотности слива классификатора, управления водным режимом), при всей их важности, мало подвержены внешним возмущениям, а реализация их является решением чисто инженерной задачи.

Для решения поставленной задачи необходима адаптивная подсистема загрузки измельчительного комплекса, которая будет автоматически приспосабливаться к изменению внешних условий и свойств объекта управления, обеспечивая при этом необходимое качество управления.

В самом общем виде адаптивная система состоит из управляющего устройства, устройства адаптации и объекта управления. Управляющее устройство и объект составляют основной контур системы. Устройство адаптации управляет управляющим устройством, изменяя значения его параметров, в соответствии с изменением внешних условий работы и свойств объекта.

Следует различать два принципа организации адаптации: поисковую адаптацию и адаптацию с идентификацией объекта, т.е. с экспериментальной оценкой его математической модели [14,15].

В первом случае поиск оптимальных параметров настройки в процессе адаптации производится варьированием численных значений этих параметров с контролем изменения вызванного этими вариациями принятого критерия оптимальности. Это позволяет определить направление движения к оптимуму и в конечном счете (если процедура сходится) достигнуть его. Разработано много алгоритмов такого поиска (Гауса—Зайделя, наискорейшего спуска деформируемого многогранника и т.д.). Однако такой поиск, естественно, нарушает нормальные режимы работы объекта, и при наличии случайных помех и возмущений оказывается настолько продолжительным, что делает его неприемлемым для практики. В лучшем случае он может применяться на

окончательной стадии адаптации, когда уже достигнута достаточно близкая к оптимуму область настройки.

Адаптация с идентификацией объекта, т.е. с промежуточной экспериментальной оценкой его математической модели, является более приемлемой для построения качественной подсистемы загрузки измельчительного комплекса ГМЗ-1.

Другим осложняющим фактором в управлении измельчением ГМЗ-1 является то, что компенсация неконтролируемых возмущений за приемлемое время не представляется возможной с применением классических законов регулирования [16,18,].

В практике автоматизации по-прежнему доминируют ПИ- и ПИД-регуляторы. Это объясняется рядом причин:

- для многих промышленных объектов такие регуляторы обеспечивают вполне удовлетворительное качество управления;

- их настройка может быть выполнена экспериментальным путем без построения математической модели объекта;

- эксплуатационный персонал служб КИПиА имеет богатый опыт работы с этими регуляторами;

- программное обеспечение большинства регулирующих моделей современных контроллеров содержит готовые программы ПИД-регулирования.

Но ПИД-регуляторы не во всех режимах функционирования объекта обеспечивают оптимальное качество управления. Регулятор, настроенный на отработку ступенчатого задающего воздействия, как правило, достаточно плохо подавляет возмущения.

Существует большое число предложений призванных улучшить качество управления систем автоматического регулирования. Среди этих предложений основной объем занимают оптимальные решения задач, построенных на известных точных моделях регулируемого объекта, заданных возмущениях, известных показателях качества и т.п. Эти решения, успешно развиваемые в

многочисленных монографиях и диссертационных исследованиях, можно отнести к достижениям в области решения вариационных задач прикладной математики.

Следует учесть, что для целей автоматизации промышленных процессов практически не востребованы даже такие крупные успехи теории управления, как динамическое программирование и оптимальная фильтрация.

Одним из современных направлений в управлении сложными динамическими объектами, позволяющим с высокой точностью реализовать заданные режимы функционирования объекта, является использование регуляторов, построенных на координатах состояния неизменяемой части системы.

Несмотря на известность данного метода регулирования, хотелось бы отметить, что вопрос применения регулирования, основанного на координатах состояния для такого многомерного объекта, как измельчительный агрегат, ни кем не рассматривался.

Однако практическая реализация таких систем управления в промышленности сдерживается следующими факторами:

- недостаточностью предыдущего опыта промышленного использования данного подхода, предполагающего использование регулятора состояния, для создания сложных систем управления технологическими процессами, подверженных действию мощных возмущений и помех измерения;

- необходимостью разработки математических моделей неизменяемой части и внешних воздействий на систему, что требует определенных временных и материальных затрат;

- необходимостью разработки высокоэффективной системы оценивания координат состояния;

- опасениями разработчиков систем автоматизации, что неизбежные погрешности моделирования объекта сведут на нет все преимущества данного подхода.

За научную основу при усовершенствовании существующей АСУТП измельчительного агрегата ГМЗ-1а автором принята методика, предполагающая разработку автоматизированной системы управления загрузки измельчительного комплекса с использованием регулятора на основе наблюдения координат состояния объекта и действующих на него неконтролируемых возмущений при помощи наблюдателя Луенбергера [14,15].

#### **1.4. Постановка цели и задачи исследования**

Проведённый выше анализ современного состояния вопроса автоматизации сложных многомерных процессов, протекающих в измельчительном комплексе, и процесса измельчения в частности, показывает, что резервы максимизации производительности и минимизации затрат электроэнергии ещё не исчерпаны. Таким образом, прослеживается тенденция к возможности оптимизации процесса измельчения.

Комплекс «мельница — классификатор» - достаточно сложный динамический объект с экстремальной характеристикой, выход которого зависит от большого числа внешних условий, которые могут изменяться произвольным образом, вызывая нежелательные отклонения хода процесса.

Результаты анализа динамических и статических характеристик объекта показали, что он обладает достаточно выраженными нелинейными характеристиками, поэтому применение традиционного ПИ - регулятора не обеспечит максимальной производительности и не гарантирует отсутствия перегрузочных режимов. Осложняющим фактором для поддержания оптимального режима измельчения также является нехватка знаний и чёткой информации о критических режимах измельчительных агрегатов.

Выполнение общих требований к процессу измельчения в целом затруднено действием неконтролируемых возмущений (дрейф статических характеристик процесса из-за изменчивости свойств сырья, износа футеровки, погрешность приборов и т.д.).

Проведённый анализ подсистем управления процессом измельчения первой стадии в условиях ГМЗ-1 показал, что неопределённые возмущения, затрудняющие управление процессом, изначально действует на подсистему

загрузки. Существующая подсистема загрузки сама не может противостоять действию внешних возмущений, соответственно вносит ошибки и искажения в работу других подсистем. Поэтому в данной диссертационной работе автором сделан акцент на разработку новой подсистемы загрузки измельчительного комплекса (на базе существующей АСУТП ГМЗ-1 НГМК), другие подсистемы (при всей своей значимости) предлагается оставить без изменений.

В данных условиях вполне обоснованным является предложение рассмотреть возможность построения адаптивной подсистемы загрузки, использующей модель комплекса «мельница - классификатор», параметры которой будут подстраиваться на этапе идентификации ОУ в зависимости от режима работы.

Для построения высококачественной системы автоматического управления предлагается разработать систему, использующую регулятор, построенный на координатах состояния, а также наблюдатель координат состояния и действующих на объект возмущений. Такая система обеспечит высокое качество стабилизации оптимального режима в условиях воздействия переменных возмущений по составу и характеристикам рудного сырья.

Адаптацию подсистемы загрузки комплекса предлагается осуществлять средством идентификации модели объекта для формирования оптимальных заданий по всем координатам состояния с целью выработки оптимального управляющего воздействия

Повышение энергетической эффективности процесса измельчения (оптимизации режима работы комплекса в целом) затруднено из-за несовершенства существующего алгоритма защиты от перегруза. В связи с отсутствием возможности прямого контроля величины внутримельничного

заполнения мельницы, существующие методы контроля не позволяют максимально эффективно вести процесс с полным отсутствием перегрузов.

С целью повышения эффективности существующей защиты от перегрузов автором рассматривается вопрос формализации дополнительного критерия диагностики перегруза (или критерия оценки величины внутримельничного заполнения) на основе вибрации в подшипниках мельницы.

Целью выпускной работы является разработка автоматизированной системы управления комплексом «мельница-классификатор», для ведения процесса измельчения в наиболее эффективном режиме, обеспечивая максимизацию производительности и минимизацию удельных затрат электроэнергии.

Для достижения поставленной цели в работе определены следующие задачи исследования:

- проведение анализа состояния проблемы оптимального управления технологическим процессом измельчения комплекса «мельница - классификатор»;

- разработка алгоритма защиты от перегруза комплекса «мельница - классификатор» на основе формализации и исследований дополнительного критерия диагностики перегруза с использованием уровня вибрации подшипников мельницы, доработки многокритериального подхода к оценке индекса перегруза комплекса «мельница - классификатор» с использованием экспертных процедур.

- интеграция автоматизированной системы оптимального управления загрузкой комплекса «мельница - классификатор» в существующую АСУТП ГМЗ-1 НГМК.

## ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА ПОДСИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ ОТ ПЕРЕГРУЗА КОМПЛЕКСА «МЕЛЬНИЦА - КЛАССИФИКАТОР»

С целью разработки качественной подсистемы защиты от перегруза, разработать комплексный критерий диагностики состояния загруженности измельчительного агрегата, позволяющий обнаружить тенденции к перегрузу и недогрузу.

В условиях современного производства технологические условия ведения процесса измельчения могут изменяться как в течение суток, так и в течение рабочей смены. Вместе с внешними условиями меняются также критерии, в соответствии с которыми процесс будет считаться эффективным. Таким образом, задача выбора единого, универсального для всех технологических ситуаций, критерия эффективности функционирования комплекса мельница - классификатор, в условиях существующего информационного обеспечения технологических и производственных процессов не представляется возможным. Тем не менее, на основе доступных технологических данных, можно выделить некоторые локальные критерии эффективной работы комплекса (см. главу 1): максимум производительности, минимум энергопотребления, максимум выхода готового класса, поддержание заданного интервала плотностного режима. В зависимости от режима работы и принятых ограничений по условиям управления перечисленные критерии могут противоречить друг другу, в связи с чем, ни один из них не может быть безоговорочно принят технологическим и административно - производственным персоналом. Из этого следует, что предварительно, до начала процедуры построения управляющих алгоритмов, должны быть сформированы как технологические ограничения, так и критерий эффективности работы комплекса мельница - классификатор при выбранных ограничениях.

В условиях стабильного роста цен на энергоносители наиболее важной производственной, и, соответственно, технологической задачей является снижение

энергопотребления технологических переделов и комплекса мельница-классификатор в частности.

Эффективность работы мельницы с точки зрения экономии электроэнергии существенно повышается при ее объемной загрузке выше некоторого порога.

Производительность мельницы пропорциональна расходу энергии на измельчение. Расход энергии связан со степенью заполнения объема мельницы дробящей средой. С ростом степени заполнения мельницы средой растет расход энергии на измельчение и достигает максимума при степени заполнения 40-45%. Соответственно растет и производительность мельницы и достигает максимума на 40-45%. Дальнейшее увеличение степени заполнения мельницы дробящей средой приводит к уменьшению расхода энергии и производительности мельницы. Степень заполнения связана с величиной внут-римельничного заполнения. Внутримельничное заполнение в свою очередь связано с мощностью потребляемой приводным электродвигателем [17,18,19,20,21].

Таким образом, справедливым можно считать принятие критерия снижения энергопотребления комплекса мельница - классификатор как одного из важнейших.

Оптимизация режима измельчительного комплекса является важной задачей, но её решение затруднено из-за отсутствия точной диагностики и защиты от перегруза [12,13].

Анализируя работу ГМЗ-1 было выявлено, что каждый измельчительный комплекс, в среднем за смену, перегружают как минимум раз, поэтому даже при действующей подсистеме защиты, проблемы перегрузов оборудования в данных условиях производства на сегодняшний день остаются актуальными.

На ГМЗ-1 работа подсистемы защиты комплекса от перегруза заключается в распознавании предперегрузочных и критических режимов по комплексу контролируемых параметров .

Суть метода заключается во введении критерия, обозначенного как индекс перегрузки  $I_n$ , который вычисляется по следующей зависимости:

$$I_{ni} = \sum (V_i D_i) \quad (2.1)$$

где  $V_i$  - значимость (вес) частного  $i$ -го критерия (в % или целых числах), устанавливаемая на основе экспериментальных данных и экспертных оценок операторов-технологов.  $D_i$  - двоичный параметр условия наступления частного  $i$ -го критерия перегрузки ( $D_i = 1$  - если условие выполнено и  $D_i = 0$  - если условие не выполнено).

Расчет обобщенного индекса перегрузки  $I_n$ , производится автоматически на основании частных критериев перегрузки, подбираемых индивидуально для каждого конкретного технологического комплекса, для каждого  $i$ -го шага через установленные интервалы времени между выработкой управляющих воздействий.

Вместе с тем, наступление или изменение каждого (любого) из частных критериев само по себе не является признаком перегрузки или возникновения аварийной ситуации. Обобщенным критерием приближения к перегрузочному режиму является рост частоты регистрации установленных совокупностей частных условий.

На основе данных технологической инструкции и опыта технологического персонала на ГМЗ-1 в качестве частных критериев (признаков) перегрузки для комплекса мельница-классификатор используется следующий ряд показателей: нагрузка по руде ( $Q_{BX}$ ); активная мощность привода мельницы ( $P_M$ ); расход воды в мельницу ( $Q_{B\_M}$ ). Кроме того, особо учитывается величина внутримельничного заполнения, которая косвенно измеряется при помощи РИЗМ ( $G_{M\_РИЗМ}$ ).

Анализируя работу существующей подсистемы (алгоритма) защиты от перегрузов измельчительного комплекса ГМЗ-1 [33] необходимо отметить целесообразность использования многопараметрического метода оценки состояния комплекса, но ввиду отсутствия возможности точной оценки величины внутримельничного заполнения работа комплекса в

предперегрузочных режимах (характеризуемых максимальной эффективностью процесса) с полным отсутствием перегрузов невозможна.

Основная трудность поддержания оптимального режима измельчения с минимальной вероятностью перегрузов заключается в практической невозможности прямого контроля запаса материала в мельнице  $G_M$

Существуют различные методы косвенной оценки величины внутримельничного заполнения  $G_M$ .

- 1. метод поддержания необходимого питания;*
- 2. метод, основанный на измерении шума мельницы;*
- 3. метод радиоизотопного контроля (на основе прибора РИЗМ);*
- 4. метод контроля с использованием экстремального регулятора.*

Как показывает опыт обогащения Навоийского горно-металлургического комбината, использование вышеизложенных методов контроля не позволяет постоянно поддерживать оптимальный режим измельчения с полным отсутствием перегрузов.

Единственно возможной альтернативой повышения качества вышеизложенной подсистемы защиты от перегруза является использование дополнительных критериев оценки перегруза.

Поэтому с целью разработки дополнительного частного критерия перегруза многопараметрического метода, рассмотрен метод оценки величины внутримельничного заполнения комплекса с использованием сигнала вибрации подшипников.

## **2.1 Формализация критерия защиты и диагностики предперегрузочных состояний комплекса с использованием сигнала вибрации подшипников**

В целях интенсификации управления процессом измельчения, в данном разделе, разработан метод использования сигнала вибрации подшипников, как критерий оценки состояния измельчительного агрегата [17].

Вместе с тем, для построения эффективной подсистемы защиты от перегруза, для данного технологического процесса, обязательным является условие: выбранный критерий оценки должен иметь возможность быть измеренным прямым или косвенным образом с достаточной для выработки управляющих воздействий точностью, т.е. быть статистически значимым .

В этой связи возникает задача его формализации вместе с границами применимости в условиях реального информационного обеспечения обогатительного производства в условиях ГМЗ-1.

Одним из перспективных направлений решения этой проблемы является использование сигнала вибрации подшипников, как показателя уровня загруженности измельчительного агрегата. Исследования, результаты которых приведены в [17], а также опыт промышленной эксплуатации показывают, что существует достаточно сильная корреляция уровня вибрации подшипников с величиной внутримельничного заполнения. При этом для численной оценки этой зависимости требуются дополнительные экспериментальные исследования на конкретном измельчительном агрегате.

Рассмотрим причины вибрации в подшипниках мельницы. На рис 2.1 показано поперечное сечение подшипника скольжения, для наглядности в котором показаны очень большие зазоры. Вал вращается в зазоре в направлении по часовой стрелке.

На рис 2.1 (см. в Приложение) цифрами 1, 2 и 3 показаны характерные точки траектории перемещения центра вращения вала мельницы при изменении величины внутримельничного заполнения мельницы (нагрузки на подшипник). Точка 3 на рисунке соответствует полному отсутствию нагрузки на подшипник. Положение точки 1 соответствует такой максимальной нагрузке, когда резервы несущей способности подшипника исчерпаны полностью и начались задевания ротора о вкладыш.

Очень важным для понимания физики процессов в подшипнике является перегиб траектории в точке 2. Кривая траектории перемещения центра вала

этой точкой перегиба 2 делится на два различных по свойствам участка, на которых может располагаться рабочая точка подшипника.

Участок от точки 1 до точки 2 есть участок устойчивой работы подшипника, когда ответная силовая реакция подшипника на возмущающий импульс нагрузки однозначно соответствует величине возмущающего импульса.

На участке от точки 2 до точки 3 картина динамических процессов во многом иная. Вследствие отрицательной кривизны траектории движения центра вала здесь существует специфический эффект, который можно назвать "перерегулированием" в реакции подшипника на внешние возбуждения. То есть в ответ на возмущающий импульс, например единичной силы, ответная реакция подшипника может равняться не единице, а, например, двум. Вал вернется обратно, но "улетит" по траектории дальше, чем нужно. Далее на вал, "улетевший" за точку равновесия, снова будет действовать чрезмерный импульс от масляного слоя подшипника, направленный в сторону точки установившегося режима, но и это усилие снова будет чрезмерным. В итоге вал снова "улетит" за точку равновесия в начальную позицию, а вероятнее всего и даже еще дальше. Результатом этого явления "сильного перерегулирования" станет бесконечное автоколебание вала мельницы на масляном клине относительно точки равновесия.

В форме масляного клина появляются, если смотреть в разрезе, своеобразные "волны", перемещающиеся со входа на выход. В конечном итоге такие колебания наводят достаточно специфическую вибрацию как в вертикальном, так и в поперечном ( радиальных ) направлениях.

Рассмотрим эпюру заполнения поперечного сечения барабана мельницы внутримельничной нагрузкой [17] на рис 2.2

В центре внутримельничной нагрузки образуется малоподвижное ядро ( $ABO_2A$ ) Материал внутри этого ядра движется в каскадном режиме, поднимаясь вверх по круговым траекториям, а затем оползая вниз по траекториям, близким к линейным. Линия  $AO_1B$  является линией перехода

частиц материала внутри ядра с круговых траекторий на траектории оползания. Частицы материала, принадлежащие малоподвижному ядру, в точке  $O_2$  имеют линейную скорость движения  $v_1 = \Omega R_{O_1} - \Omega R_{O_2} = \Omega R_{O_1 O_2}$  где  $R_{O_2}$  — расстояние  $OO_2$ , м;  $R_{O_1}$  — расстояние  $OO_1$ , м;  $R_{O_1 O_2}$  — расстояние  $O_1O_2$ , м;  $\Omega$  - частота вращения мельницы, об/мин.

Частицы материала, находящиеся вне центрального ядра и лежащие на участке  $O_2O_3$ , вращаются вместе с внутренней поверхностью барабана мельницы относительно центра вращения барабана  $O$ . Линейная скорость таких частиц в точке  $O_2$  равна  $v_2 = \Omega R_{O_2}$ . Следовательно, вдоль линии  $AO_2B$  между частицами, принадлежащими и не принадлежащими центральному малоподвижному ядру, существует граничная сила трения  $F_T$  из-за разности линейных скоростей  $v_1$  и  $v_2$ . Работа сил трения вдоль линии  $AO_2B$  направлена на измельчение материала истиранием.

Наличие силы трения  $F_T$  вдоль линии  $AO_2B$  порождает автоколебания центра тяжести  $O_1$  малоподвижного ядра  $ABO_2A$  в результате чего угол поворота  $\Theta$  центра тяжести периодически изменяется с амплитудой  $\pm \Delta\theta$ . Из нелинейной механики, а также теории регулирования нелинейных систем известно, что тело, обладающее определенной массой, колеблется с соответствующей частотой и амплитудой. Следовательно, амплитуда автоколебаний ядра  $AO_2BA$  определенным образом характеризует механику внутримельничной нагрузки (внутримельничное заполнение, трение).

Это дает возможность по величине амплитуды вибрации косвенно судить о состоянии и режиме работы мельницы. Величина сигнала вибрации обратно пропорциональна количеству материала  $G_M$  внутри барабана мельницы. От загруженности мельницы (от количества размалываемого материала) изменяется интенсивность колебаний: чем больше загрузка, тем менее интенсивнее колебания и наоборот.

Экспериментальные исследования ММС на ГМЗ-1 позволили выявить статистически значимую закономерность между величиной вибрации подшипников и величиной объемной загрузки измельчительного агрегата.

Для косвенной оценки величины внутримельничного заполнения мельницы (критерия оценки перегруза) используется сигнал виброускорения пьезоэлектрического датчика ВДТ-104/3, предназначенного для преобразования механических колебаний в электрический сигнал, пропорциональный виброускорению.

С целью выявления наиболее информативного частотного диапазона сигнала виброускорения с ВДТ-104/3 были исследованы его спектральные характеристики на переднем и заднем подшипниках мельницы (рис 2.3, 2.4). Данные для построения спектральных характеристик получены по истечению двух часов работы измельчительного комплекса с заниженной уставкой производительности по руде (т.е. в условиях низкого уровня заполнения мельницы).

Анализ спектральных характеристик исследованных сигналов показал, что:

- интенсивность вибрации на переднем подшипнике (в загрузке) гораздо выше и гораздо чувствительнее к изменению уровня заполнения мельницы;
- максимальную информативность сигнала виброускорения вибродатчика ВДТ-104/3 сосредоточена в диапазоне частот 1900-2200 Гц.

Обобщенная схема аппаратной части системы автоматического контроля внутримельничной нагрузки приведена на рис 3,5

Вибродатчик устанавливается только на передний подшипник. Проведенные исследования показали:

минимальный уровень сигнала вибрации будет наблюдаться при полном отсутствии материала в мельнице (0 %);

в процессе первоначальной загрузки уровень сигнала вибрации резко достигнет максимума (100%), т.е. сила ударов измельчаемого материала о футеровку будет наибольшей;

по мере увеличения загрузки мельницы уровень сигнала вибрации снижается. Для ведения оптимального процесса измельчения необходимо подавать в мельницу такое количество материала, чтобы поддерживать уровень сигнала вибрации не ниже определённого значения (уставки). Уставки определяются экспериментально и индивидуально для каждой мельницы из-за различного износа футеровки и принимают значения в диапазоне 15 - 25 %. Работа при уровне вибрации ниже уставок приводит к переполнению мельницы.

Алгоритм предотвращения завала мельницы по данному критерию должен останавливать подачу материала в мельницу при условии, что уровень сигнала вибрации ниже уставки, полученной экспериментально. Разрешение на подачу материала в мельницу должно производиться при уровне сигнала вибрации в диапазоне 60-80 %.

Данная система контроля внутримельничной нагрузки не требует установки нового программного обеспечения и дорогостоящего оборудования и может быть реализована возможностями существующей системы автоматизации.

На рис 3.6 показана динамика изменения критерия оценки перегруза (сигнала вибрации подшипника мельницы) когда мельница перегрузилась материалом, что привело к ее «заработке». На этом же рисунке показаны графики изменения активной мощности, потребляемой мельницей, и загрузки руды.

Минимальное значение критерия оценки перегруза (сигнала вибрации) (наблюдается примерно в 5:40) соответствующее максимально допустимому значению внутримельничной нагрузки, как видно из графика, сопровождалось прекращением подачи материала в мельницу и последующим выходом на нормальный технологический режим работы измельчительного агрегата.

Вместе с тем, при выборе управляющих воздействий на измельчительный комплекс необходимо учитывать, что наращивание объемной загрузки мельницы, при последующем уменьшении уровня вибрации  $F$  ниже уставки 15% недопустимо, так как это связано с риском выхода комплекса в аварийные режимы.

Предварительный анализ позволил выделить следующие диапазоны изменения уровней вибрации  $F$ :

$25\% > F \geq 20\%$  - в этом режиме комплекс мельница - классификатор работает в близком к максимально возможной загруженности мельницы режиме, т.е. в предперегрузочном режиме, оптимальном по энергетическому критерию;

$F \geq 20\%$  -режим характеризуется тем, что комплекс мельница - классификатор недогружен;

$F < 15\%$  - перегрузочный режим комплекса мельница — классификатор, характеризуется возникновением длительных простоев оборудования, потерями производства, дополнительными издержками электроэнергии на перезапуск комплекса.

С целью повышения эффективности существующей подсистемы (алгоритма) защиты от перегруза измельчительного агрегата в условиях ГМЗ-1, предлагается дополнить данную подсистему разработанным критерием оценки перегруза на основе вибрации подшипников.

## **2.2. Алгоритмическое обеспечение подсистемы защиты от перегруза комплекса мельница-классификатор**

Рассмотрим алгоритм подсистемы диагностики и защиты от перегруза комплекса мельница-классификатор первой стадии ГМЗ-1 (рис 2.7).

Универсальным параметром защиты от перегруза измельчительного агрегата ГМЗ-1, нами был принят рассчитываемый по формуле (2.1) индекс

перегрузки  $In$  для чего, экспертным путём, была определена группа наиболее эффективных частных критериев оценки перегруза с оценкой их качества.

Произведём описание алгоритма:

1. Определим входные параметры:

$P_M$  - мощность эл.привода ММС, с зоной измерения: 0-1600 кВт;

$G_M_{-}РИЗМ$  - заполнение ММС по РИЗМу, с зоной измерения: 0-60 %;

$Q_{ВХ}$  - производительность цикла по исходной руде: 0-150 т/ч;

$F$  - заполнение ММС по сигналу вибрации подшипник а, с зоной измерения: 0-100 %.

С частотой опроса  $\Delta t = 1сек$ , определяем средние значения параметров на пятиминутном интервале. Из этих средних значений получаем средне скользящие зависимости

$P_M_{-}CP = f_1(t)$ ,  $Q_{ВХ}_{-}CP = f_2(t)$ ,  $G_M_{-}РИЗМ_{-}CP = f_3(t)$ , которые используем для контроля перегруза мельниц.

2. Для определения зоны работы алгоритма вводим предельные значения:

$P_M_{-}MAX$  -по активной мощности электропривода мельницы ММС;

$Q_{ВХ}_{-}MAX$  - по расходу руды в мельницу ММС;

$G_M_{-}РИЗМ_{-}MAX$  - по объёмному заполнению ММС с РИЗМ;

$Q_{В_{-}M_{-}MIN}$  - по расходу воды в мельницу ММС;  $F_{MIN}$  - по сигналу вибрации переднего подшипника ММС. Зададим предельные значения:

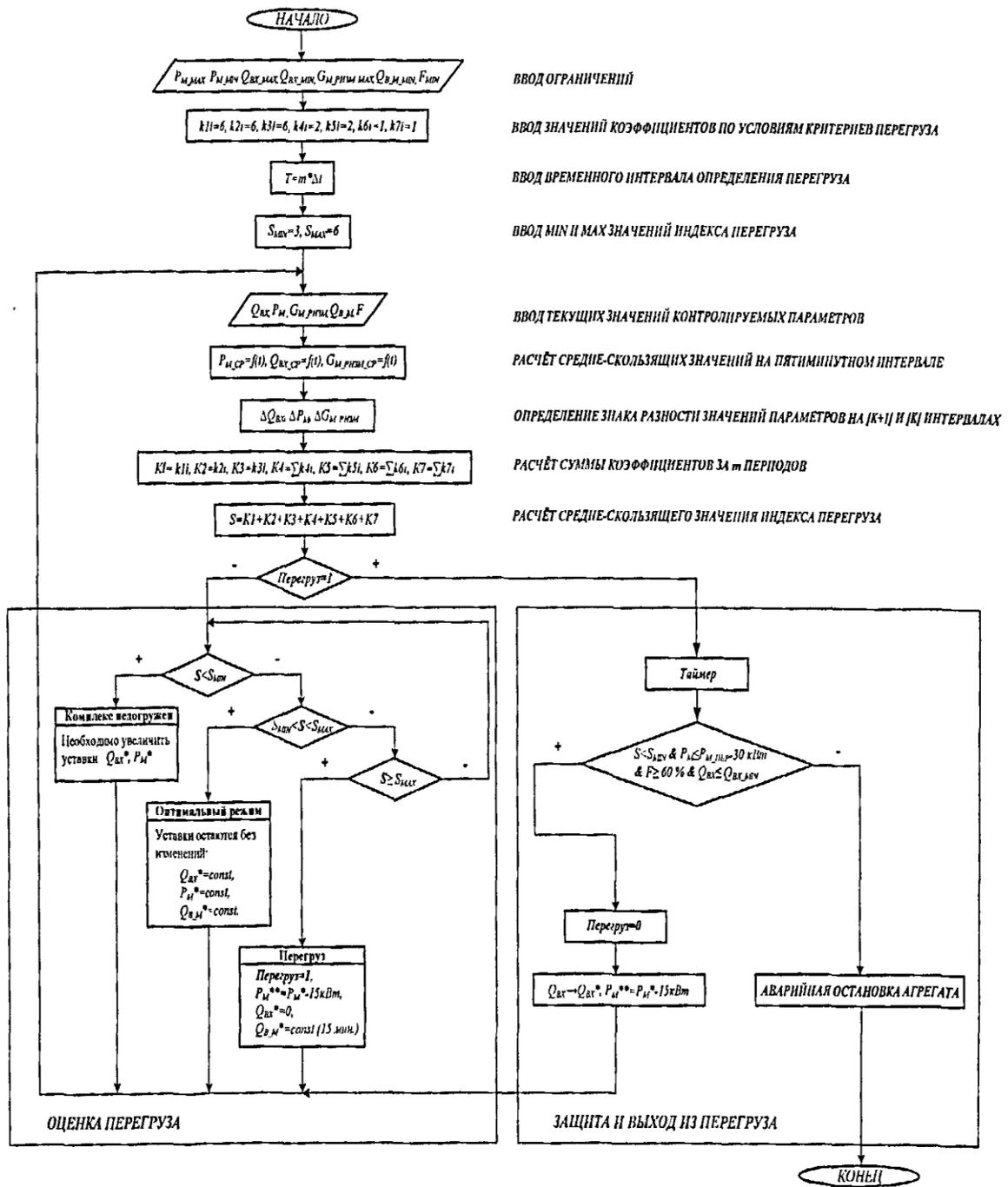


Рис. 2.7 Алгоритм защиты от перегруза комплекса мельница-классификатор ГМЗ-1.

$$P_{M\_MAX} = 1300 \text{ кВт},$$

$$Q_{BX\_MAX} = 120 \text{ м}^3/\text{ч},$$

$$Q_{BX\_MIN} = 10 \text{ м}^3/\text{ч},$$

$$G_{M\_РИЗМ\_MAX} = 51\%,$$

$$Q_{B\_M\_MIN} = 15 \text{ м}^3/\text{ч},$$

$$F_{MIN} = 15\%$$

Предельные величины  $P_{M\_MAX}$ ,  $Q_{BX\_MAX}$ ,  $Q_{BX\_MIN}$ ,  $G_{M\_РИЗМ\_MAX}$ ,  $Q_{B\_M\_MIN}$ ,  $F_{MIN}$  определяются экспериментально для конкретно изучаемого измельчительного комплекса.

Значение нижней границы работы настоящего алгоритма  $P_{M\_MIN}$  определяем как:

$$P_{M\_MIN} = P_M^* - 200 \text{ кВт},$$

где  $P_M^*$  - значение уставки по мощности мельницы ММС.

3. Далее, с частотой опроса  $\Delta t = 5 \text{ сек}$  определяем средние значения параметров на пятиминутном интервале.

Получаем средне скользящие значения контролируемых параметров на каждом  $k$  интервале:

$P_M[k]$  - средняя мощность привода мельницы,  $Q_{BX}[k]$  - производительность цикла по исходной руде,

$G_{M\_РИЗМ}[k]$  - средняя величина внутримельничного заполнения мельницы с РИЗМ.

С периодом  $\Delta t$  определяем:

$\Delta G_{M\_РИЗМ} = G_{M\_РИЗМ}[k+1] - G_{M\_РИЗМ}[k]$  - разность средних значений РИЗМ на текущем  $i$ -ом и предыдущим  $i-1$  интервале.

$\Delta P_M = P_M[k+1] - P_M[k]$  - разность средних значений мощности на текущем  $i$ -ом и предыдущим  $i-1$  интервале.

$\Delta Q_{BX} = Q_{BX}[k+1 - step] - Q_{BX}[k - step]$  разность средних значений производительности на  $[k+1 - step]$  и  $[k - step]$  интервалах, где  $step$  - величина сдвига для анализа производительность цикла по исходной руде относительно интервала для анализа мощности. Область изменения  $step = 1 - 6$  тактов.

4. Перегруз мельницы определяем по признакам, отражающим определенное соотношение полученных параметров  $\Delta P_M$ ,  $\Delta Q_{BX}$ ,  $\Delta G_{M\_РИЗМ}$ .

Для каждого признака перегруза вводим коэффициент с 0-вым начальным значением:

К1i - для признака  $F_{M\_MIN}$ ;

К2i - для признака по знаку разности  $\Delta P_M$ ,  $\Delta Q_{BX}$ ;

К3i - для признака  $Q_{B\_M\_MIN}$ ;

К4i - для признака по знаку разности  $\Delta P_M$

К5i - для признака по знаку разности  $\Delta G_{M\_РИЗМ}$

К6i - для признака по знаку разности  $\Delta P_M$  и  $Q_{BX\_MAX}$ ;

К7i - для признака по знаку разности  $\Delta P_M$ ,  $\Delta G_{M\_РИЗМ}$

С периодом  $\Delta t = 5сек$  определяются значения этих коэффициентов по следующим критериям:

К1i=6 если уровень сигнала вибрации подшипников мельницы снижается ниже критического уровня  $F_M < F_{M\_MIN}$ ;

К2i=6 если активная мощность мельницы понижается, а расход руды в мельницу увеличивается  $P_M[k+1] < P_M[k] \& Q_{BX}[k+1] > Q_{BX}[k]$ ;

К3i=6 если расход воды в мельницу стал ниже минимально допустимого  $Q_{B\_M} < Q_{B\_M\_MIN}$ ;

К4i=6 если активная мощность мельницы увеличивается  $P_M[k+1] > P_M[k]$ ;

К5i=2 если заполнение ММС по РИЗМу превышает максимальный уровень  $G_{M\_РИЗМ} > G_{M\_РИЗМ\_MAX}$ ;

$K6i = 1$  если активная мощность мельницы уменьшается при превышении критического расхода руды в мельницу  $P_M[k+1] < P_M[k] \ \& \ Q_{BX} > Q_{BX\_MAX}$ ;

$K7i = 1$  если активная мощность мельницы уменьшается при положительной динамике загрузки внутримельничного объёма мельницы по РИЗМу  $P_M[k+1] < P_M[k] \ \& \ G_{M\_РИЗМ}[k+1] > G_{M\_РИЗМ}[k]$ . Устанавливаем интервал определения перегруза  $T = m^* \Delta t$  где  $m$  количество периодов расчёта коэффициентов  $K1i$  - для признака  $F_{M\_MIN}$ ;

$K2i, K3i, K4i, K5i, K6i, K7i$  берется из области целых чисел,  $3 \leq m \leq 8$ .

Интервал  $T$  является скользящим и смещается на величину периода  $t$  по мере определения расчётных данных. Затем, в течение времени  $T = m^* \Delta t$  определяем суммы соответствующих коэффициентов за последние  $m$  периодов, обозначаем эти суммы:  $K1, K2, K3, K4, K5, K6, K7$

- |                    |                  |
|--------------------|------------------|
| 1. $K1 = k1i$      | $K1_{max} = 6$   |
| 2. $K2 = k2i$      | $K2_{max} = 6$ ; |
| 3. $K3 = k3i$      | $K3_{max} = 6$ ; |
| 4. $K4 = \sum k4i$ | $K4_{max} = 6$ ; |
| 5. $K5 = \sum k5i$ | $K5_{max} = 6$ ; |
| 6. $K6 = \sum k6i$ | $K6_{max} = 6$ ; |
| 7. $K7 = \sum k7i$ | $K7_{max} = 6$ . |

5. За время  $T$  определяем среднее - скользящее значение контрольной суммы:  $S = K1 + K2 + K3 + K4 + K5 + K6 + K7$ .

По величине этой суммы определяем зоны работы мельницы по загрузке и управляем величиной уставки -  $P_M^*$ , которая формируется алгоритмом загрузки и водного режима ММС. Для определения рекомендуемой рабочей зоны работы вводим предельные значения:  $S_{min} = 3, S_{max} = 6$

Проводим анализ суммы:

а) если  $S \leq S_{\min}$  - режим характеризуется тем, что комплекс мельница

- классификатор недогружен. Необходимо увеличить уставки  $Q_{BX}^*, P_M^*$

б) если  $S_{\min} < S < S_{\max}$  - в этом режиме комплекс мельница - классификатор работает в близком к максимально возможной загруженности мельницы режиме, т.е. в предперегрузочном режиме, оптимальном по энергетическому критерию. Уставки необходимо оставить без изменений, т.е.  $Q_{BX}^* = const, Q_{B\_M}^* = const, P_M^* = const$

в) если  $S \geq S_{\max}$  - зона перегруза, производительность по руде на входе  $Q_{BX} = 0$ , задание по мощности  $P_M^{**} = P_M^* - 15 \text{ кВт}$  количество воды в мельницу  $Q_{B\_M}$  в течение 15 минут не изменяется.

6. При достигнутом перегрузе мельницы анализ суммы

$S = K_1 + K_2 + K_3 + K_4 + K_5 + K_6 + K_7$ . продолжается.

Ситуацию выхода мельницы из перегруза определяем при наличии следующих условий:

$S < S_{\min}$  сумма коэффициентов меньше минимальной;

$P_M \leq P_{M\_ПЕР} - 30 \text{ кВт}$  текущая мощность ММС меньше мощности ММС

с которой вошли в перегруз, где  $P_M$  - текущее значение мощности,  $P_{M\_ПЕР}$  усредненное значение мощности при входе в перегруз;

$F \geq 60\%$  уровень вибрации подшипника больше 60%;

$Q_{BX} \leq Q_{BX\_MIN}$  где  $Q_{BX}$  - производительность цикла по исходной руде;

Уставка после выхода из перегруза определяется по выражению:

$P_M^{**} = P_M^* - 15 \text{ кВт}$ , где  $P_M^*$  - последняя уставка до перегруза.

Таким образом, использование подсистемы защиты от перегруза на основе вышеизложенного алгоритма позволит достаточно безопасно подвести процесс к оптимуму без риска аварийных ситуаций, повысить эффективность производства за счёт сокращения удельного расхода электроэнергии.

### **2.3. Разработка структурной и функциональной схем управления комплексом мельница-классификатор**

Для интеграции разработанных в данной работе автоматизированных решений по повышению эффективности процесса измельчения в АСУТП ГМЗ-1 предлагается произвести описание основных взаимодействий между наиболее важными подсистемами комплекса мельница-классификатор средством построения структурно-логической схемы АСУТП.

Управление комплексом мельница-классификатор осуществляется операторами через операторские станции, на которых технологический процесс отображается в виде мнемосхем, графиков, рапортов и сообщений. При этом контроллер опрашивает состояние приборов измерения, проводит все стадии предварительной обработки сигналов, выполняет необходимые расчеты, передает актуальную информацию в выходные блоки. Система визуализации запрашивает информацию о ходе процесса для архивирования и визуализации, записывает данные для длительного хранения, выводит информацию о состоянии технологического объекта на экран, сообщает в особой форме о выходе технологического параметра за рамки допустимого. Кроме этого, система визуализации позволяет пользователю осуществлять оперативное управление технологическими механизмами непосредственно с операторской станции. При этом управляющие воздействия, команды, заданные значения и т. п. передаются в контроллер. Обмен данными между контроллером и системой визуализации происходит посредством локальной сети Industrial Ethernet. Архивы данных (для формирования математической модели по каналу загрузки) передаются в разработанные программы (язык программирования C++) (см. приложение 2), где производится их обработка с последующей идентификацией, т.е. адаптацией объекта. Параметры математической модели

по каналу загрузки передаётся в контроллер, и используются для наблюдения переменных состояния объекта. Наблюдатель и регулятор состояния подсистемы загрузки реализованы в контроллере в качестве специального программного обеспечения (язык программирования STEP7) (см. приложение 4,5). Найденные переменные состояния передаются в регулирующее устройство (регулятор состояния) для обеспечения его работы, т.е. обеспечения необходимого качества управления подсистемой загрузки, так и всей АСУТП комплекса в целом.

Структурная схема, реализующая управление технологическим процессом измельчения рудных материалов в комплексе мельница-классификатор на базе адаптивной подсистемы загрузки, представлена на рис 3.8..

Система включает в себя технологический измельчительный комплекс, состав и режимы работы которого описаны в главе 1, а также следующие управляющие подсистемы и защитные алгоритмы:

- Подсистема загрузки комплекса мельница-классификатор

Назначение данной подсистемы - осуществить максимально-допустимую загрузку измельчительного агрегата для максимизации производительности и обеспечить высокое качество регулирования данной подсистемы с целью компенсации неконтролируемых возмущений, осложняющих управление процессом, а также обеспечить работу измельчительного комплекса в наиболее эффективном режиме.

Взаимодействие алгоритма системы регулирования загрузки комплекса, алгоритма защиты мельницы от перегруза и алгоритма защиты классификатора от перегруза с контуром загрузки комплекса мельница- классификатор происходит через изменение задания (уставки по производительности питателя) регулятору.

Подсистема управления водным режимом. Назначение данной подсистемы — обеспечить подачу необходимого количества воды в мельницу

для оптимального транспортирования измельчаемого материала через измельчительный комплекс.

Задание по коэффициенту соотношения жидкого к твердому ( $K_{жс:Т}$ ) в процентах устанавливается оператором. Это задание является базовым и по нему рассчитывается текущая уставка по расходу воды в мельницу ММС. Уставка рассчитывается по формуле:

$Q_{В\_М}^* = Q_{ВХ}^* K_{жс:Т} / 100$ , где:  $Q_{В\_М}^*$  - уставка для регулятора воды;  $Q_{ВХ}^*$  - производительность цикла по исходной руде (сглаженный сигнал);  $K_{жс:Т}$  - коэффициент соотношения жидкого к твердому. Взаимодействие алгоритма управления водным режимом, алгоритма защиты мельницы ММС от перегруза и алгоритма защиты классификатора от перегруза с контуром регулирования водным режимом мельницы ММС происходит через изменение задания (уставки) регулятору.

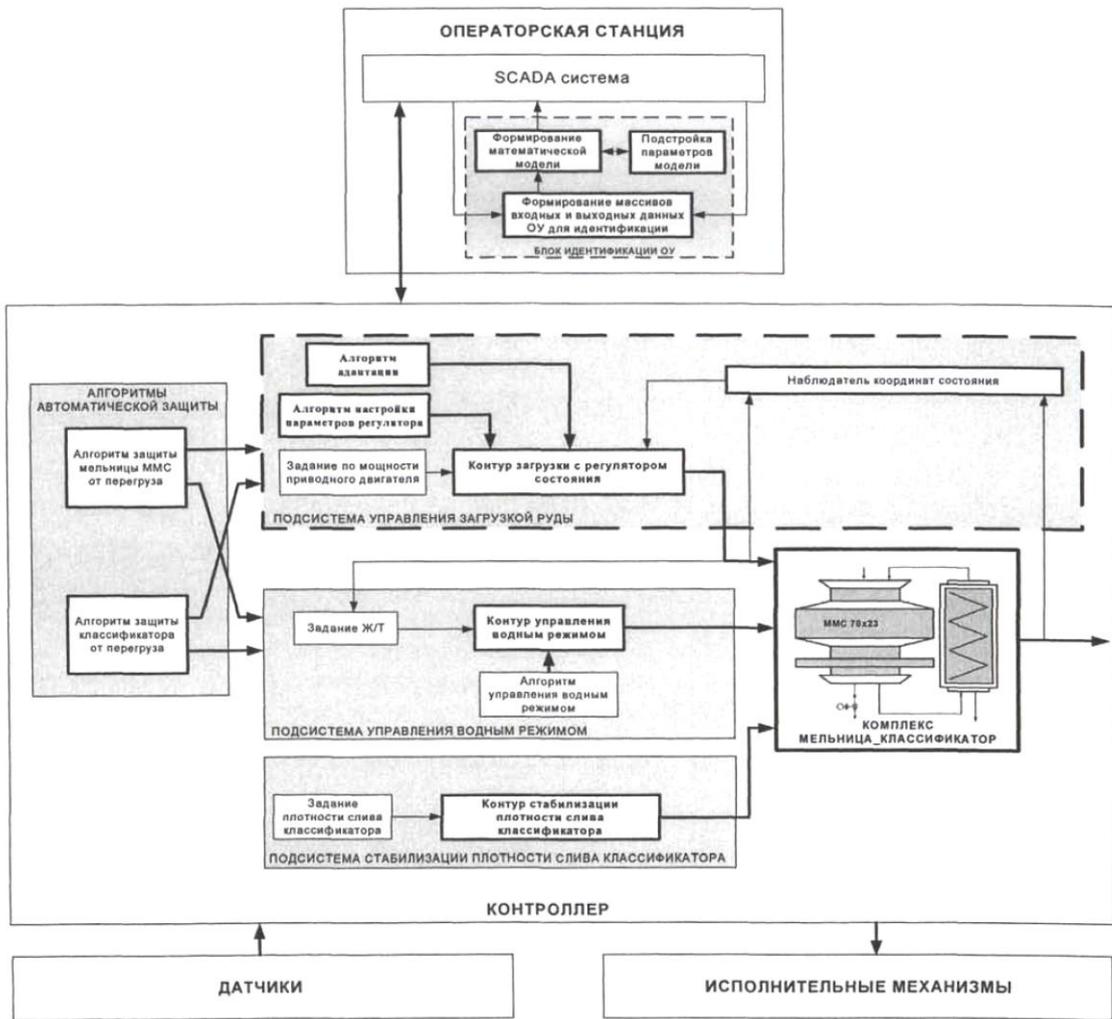


Рис. 2.8. Структурная схема управления комплекса мельница-классификатор.

Рассчитанная уставка по расходу воды ( $Q_{В\_М}^*$ ) может быть изменена выше перечисленными алгоритмами в зависимости от конкретной технологической ситуации.

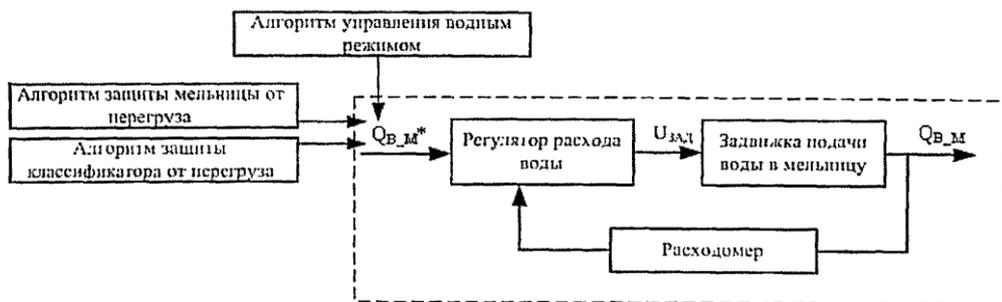


Рис. 2.9. Структурная схема подсистемы управления водным режимом мельницы.

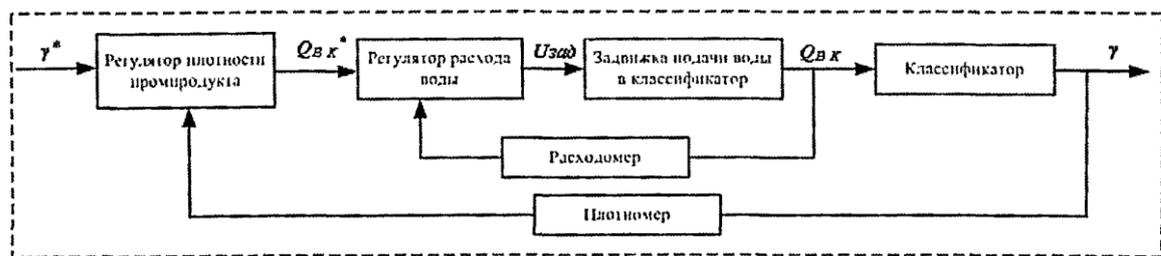
Для контура регулирования водным режимом мельницы ММС, используется стандартный ПИД-регулятор.

На вход регулятора поступает уставка для регулятора воды ( $Q_{В\_М}^*$ ) и сигнал расхода воды (расходомера) в мельницу  $Q_{В\_М}$  а управления водным режимом мельницы происходит за счет изменения подачи воды в результате чего на исполнительный механизм задвижки подаётся управляющее воздействие  $-U_{зад}$

- Подсистема стабилизации плотности слива классификатора. Назначение данной подсистемы - обеспечить заданную плотность слива классификатора.

Для контура стабилизации плотности слива классификатора используется стандартный ПИД-регулятор. На вход регулятора поступает сигнал плотности слива классификатора мельницы ММС и уставка оператора. Стабилизация плотности происходит за счет изменения подачи воды в классификатор средством изменения положения задвижки.

В контроллере в режиме реального времени с определённым периодом дискретности идёт обработка сигнала обратной связи - с плотномера -  $\gamma$ , и выработка управляющего воздействия -  $Q_{В\_К}^*$  на контур подачи воды в классификатор. Параметр  $Q_{В\_К}^*$  является задающим по расходу воды. Далее в регуляторе положения задвижки обрабатываются сигналы  $-Q_{В\_К}$  - текущего расхода воды и  $Q_{В\_К}^*$ , в результате чего на исполнительный механизм задвижки подаётся управляющее воздействие  $-U_{зад}$



**Рис. 2.10. Структурная схема подсистемы стабилизации плотности пульпы в сливе классификатора.**

В процессе регулирования в классификатор подаётся вода, от расхода которой  $-Q_{В\_К}$  в последующем и зависит плотность промпродукта  $- \gamma$ .

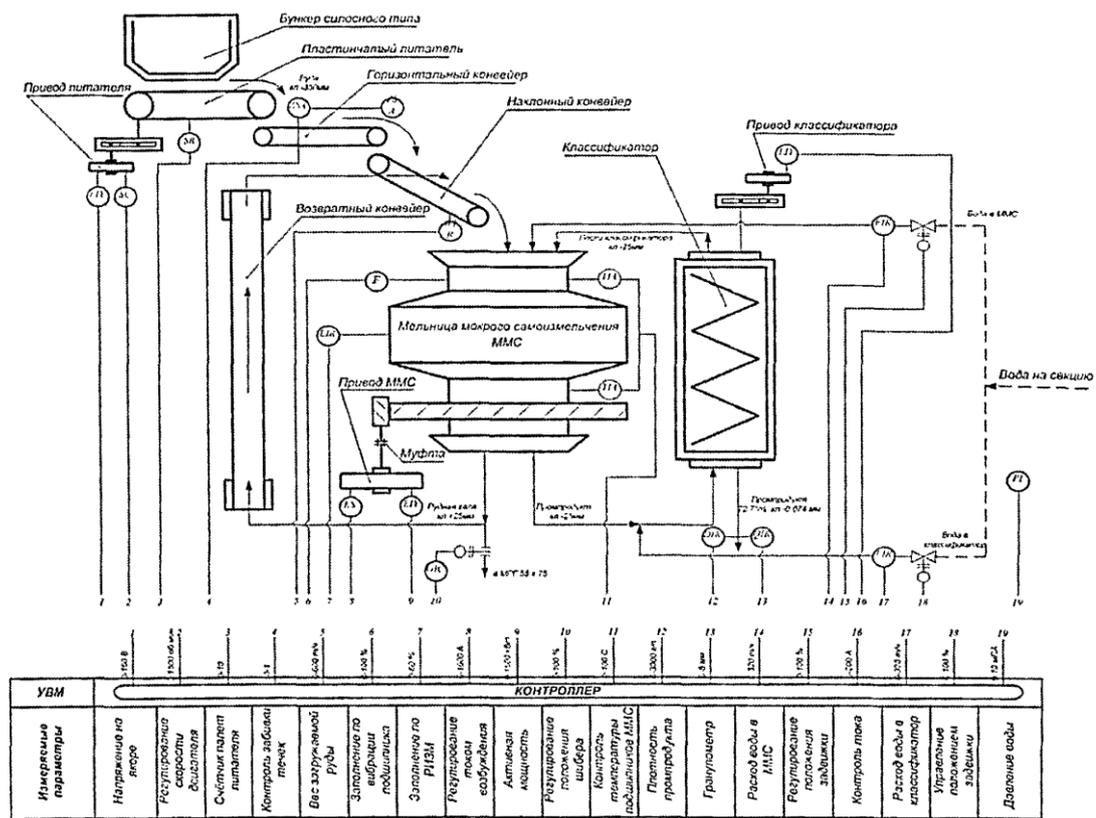
Алгоритмы автоматической защиты комплекса от перегруза. Основное назначение защитных алгоритмов - обеспечить работу комплекса мельница-классификатор в наиболее эффективных и экономичных предперегрузочных режимах (областях управления) без риска выхода в аварийные режимы перегрузок.

Вырабатываемые данными алгоритмами управляющие сигналы имеют наивысший приоритет. Конкретные величины уставок для каждого информационного канала в отдельности в соответствии с режимом работы комплекса. Обработка входной информации данным алгоритмом, а также выработка соответствующих управляющих воздействий должна производиться не менее чем в два раза чаще, чем выработка по единому для всех подсистем управляющему циклу.

Повышение эффективности работы алгоритма защиты мельницы от перегруза, основанного на многопараметрическом методе определения индекса перегрузки, было выполнено за счёт введения в алгоритм дополнительного критерия диагностики и защиты на основе вибрации подшипников мельницы,. Программная реализация данного алгоритма с учётом введения критерия оценки перегруза на основе вибрации может быть легко выполнена на основе программы предыдущего алгоритма с использованием обще инженерного подхода.

На основании структурной схемы управления была спроектирована функциональная схема АСУТП комплекса мельница-классификатор ГМЗ-1, представленная на рис 2.9.

Исходя из общих требований к разрабатываемой АСУТП комплекса «мельница-классификатор» с целью интеграции разработанных решений, необходимо выбрать контроллерное оборудование, способное справиться с поставленной задачей.



**Рис.2.11** Функциональная схема АСУТП комплекса мельница-классификатор ГМЗ-1.

Регулирующее устройство (контроллер) должен обеспечить сбор и первичную обработку информации, а также должен принять на себя непосредственное управление исполнительными механизмами по соответствующим алгоритмам управления.

На основе вышеизложенного можно сделать вывод о наличии принципиальной возможности интеграции разработанных в диссертационной работе научных решений в существующую АСУТП комплекса мельница-классификатор ГМЗ-1.

### Выводы по главе

Произведена разработка структуры подсистемы защиты комплекса мельница-классификатор от перегруза на основе многопараметрического метода оценки индекса перегруза.

Произведена формализация критерия оценки перегруза на основе сигнала вибрации переднего подшипника мельницы.

Произведена модификация многопараметрического метода оценки индекса перегруза с использованием экспертных процедур.

Разработан алгоритм подсистемы диагностики и защиты от перегруза, что позволит достаточно безопасно подвести процесс к оптимуму без риска аварийных ситуаций, повысить эффективность производства за счёт сокращения удельного расхода электроэнергии.

Разработана структурная и функциональная схемы АСУТП на основе адаптивной системы управления процессом измельчения комплекса «мельница-классификатор».

## Список литературы

1. Технологическая инструкция по дроблению и обогащению железистых кварцитов: ТИ 00186803-6.9-01-2005 / Губкин, 2005.
2. Кармазин, В.И. Процессы и машины для обогащения полезных ископаемых [Текст] / В.И. Кармазин, Е.Е. Серго, А.П. Жендринский -М.: Недра, 1974. - 560 с.
3. Чуянов, Г.Г. Машинист обогатительных машин для руд черных и цветных металлов [Текст]: учебное пособие для профтехобразования / Г.Г. Чуянов - М.: Недра, 1983. - 239 с.
4. Саблин, С. А. Машинист мельниц рудообогатительной фабрики [Текст]: справочник рабочего / С.А. Саблин - М.: Недра, 1988. - 144 с: ил.; ISBN 5-247-00298-9
5. Богданов, В.А. Справочник по обогащению руд. Подготовительные процессы [Текст] / О.С. Богданов, В.А. Олевский, - 2-е изд., доп. - М.: Недра, 1982. - 366 с.
6. Богданов, О.С. Справочник по обогащению руд. Специальные и вспомогательные процессы, испытания обогатимости, контроль и автоматика [Текст] / О.С. Богданов, В.И. Ревнивцев, - 2-е изд., доп. - М.: Недра, 1983.-370 с.
7. Богданов, О.С. Справочник по обогащению руд. Основные процессы [Текст] / О.С. Богданов, - 2-е изд., доп. - М.: Недра, 1983. - 381 с.
8. Кошарский, Б.Д. Автоматизация управления обогатительными фабриками [Текст] / Б.Д. Кошарский, А.Я. Ситковский, А.В. Красномовец, -2-е изд., доп. - М.: Недра, 1977. - 527 с.
9. Ронканен, В. В. Проектирование автоматизации обогатительных фабрик [Текст] /В.В. Ронканен - М.: Недра, 1978. - 245 с.
10. Тихонов, О.Н. Автоматизация производственных процессов на обогатительных фабриках [Текст]: учебник для вузов / О.Н. Тихонов - М.: Недра, 1985. - 272 с.
11. Троп, А.Е. Автоматическое управление технологическими процессами

- обогажительных фабрик [Текст]: учебник для вузов / А.Е. Троп, В.З. Козин, Е.В. Прокофьев, - 2-е изд., доп. - М.: Недра, 1986. - 303 с.
12. Хан, Г.А. Автоматизация обогажительных фабрик [Текст] / Г.А. Хан, В.П. Картушин, Л.В. Сорокер, Д.А. Скрипчак - М.: Недра, 1974. - 280 с.
  13. Хан, Г.А. Автоматизация процессов обогащения [Текст] / Г.А. Хан -М.: Недра, 1964. - 264 с.
  14. Справочник по теории автоматического управления [Текст] / Под ред. А.А. Красовского. -М.: Наука. Гл. ред. Физ.-мат. лит., 1987 - 712 с: 22 см. - Библиогр. С. 681 - 704. - Предм. указ.: С. 707 - 711. - 35000 экз.
  15. Виноградов, В.С. Автоматизация технологических процессов на горнорудных предприятиях [Текст] / В.С. Виноградов - М.: Недра, 1984. - 167 с.
  16. Теория автоматического управления [Текст]: учеб. пособие для вузов / Под ред. А.С. Шаталова. - М., «Высш. Школа», 1977 г. - 448 с: ил.; 22 см. -Библиогр. С. 90-91, 155, 251, 310, 379-380, 420, 446.-30000 экз.
  17. Сигуа, Р.И. Автоматизированное управление процессами обогащения и агломерации железных руд и концентратов [Текст] / Р.И. Сигуа - М.: Недра, 1989. - 192 с: ил.; ISBN 5-24701019-1
  18. Исаков, Е.Н. Типовые структуры АСУТП обогажительных фабрик. Вычислительные комплексы [Текст] / Е.Н. Исаков - М.: Недра, 1985. - 200 с.
  19. Головков, Б.Ю. Системы и средства автоматизации обогажительных фабрик [Текст] / Б.Ю. Головков, Л.А. Рейбман, Г.Г. Колпиков - М.: Недра, 1990. - 232 с: ил.: ISBN 5-247-01104-X
  20. Пучков, Л.А. Автоматизированные системы управления в горнодобывающей промышленности [Текст]: учебник для вузов / Л.А. Пучков, Н.И. Федунец, Д.К. Потресов - М.: Недра, 1987. - 285 с.
  21. Солонина, А.И. Основы цифровой обработки сигналов [Текст]: курс лекций / А.И. Солонина, Д.А. Улахович, СМ. Арбузов, Е.Б. Соловьева / Изл. 2-е испр. и перераб. - СПб.: БХВ-Петербург, 2005. - 768 с: ил.; 24 см.

- Библиогр.: С. 741-745.; предм. указ.: С. 747-753. - 5000 экз. — ISBN 5-94157-604-8
22. Лищинский, В.С. Пути снижения расхода электроэнергии на производстве железорудного концентрата [Текст] /В.С. Лищинский, В.П. Попов, Н.Я. Копанев, В.А. Катаев// Горный журнал. - 1996. - № 3. - С. 38 - 39.
  23. Улитенко, К.Я. Автоматическая защита барабанных мельниц от технологических перегрузок [Текст] / К.Я. Улитенко, Е.В. Попов // Обогащение руд. - 2004. - № 2. - С. 38 - 39. - Библиогр.: С. 39.
  24. Чантурия, В.А. Проблемы и концепция развития первичной переработки минерального сырья [Текст] / В.А. Чантурия, А.А. Лавриненко // Обогащение руд. - 2004. - № 2. - С. 3 - 8. - Библиогр.: С. 8.
  25. Маляров, П.В. Влияние крупности питания мельниц на процесс образования новой поверхности в двухстадиальных циклах измельчения [Текст] / П.В. Маляров, В.Ф. Степурин, Г.М. Солдатов, Н.Д. Конник // Обогащение руд. - 2006. - № 5. - С. 7 - 9. - Библиогр.: С. 9.
  26. Сазонов, Г.Т. Программно-технические комплексы для автоматизированных систем управления технологическими процессами переработки минерального сырья [Текст] / Г.Т. Сазонов, О.Н. Тихонов // Обогащение руд. -2006. -№ 5. -С. 29 - 31. -Библиогр.: С. 31.
1. Simulink Documentation.-  
(<http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/toolbox/simulink/>)
  2. Matlab Documentation.-  
(<http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/toolbox/control/>)
  3. <http://www.netcore.ru>  
<http://intellect-micom.spb.ru>

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

На основе системного анализа проблематики автоматизированного управления и оптимизации режима измельчения руды комплекса «мельница-классификатор» в условиях ГМЗ-1 НГМК определены приоритетные направления, поставлены задачи исследования.

1. Разработан алгоритм идентификации объекта управления подсистемы загрузки комплекса «мельница - классификатор», позволяющий получить оценки его параметров. Проведённые исследования показали состоятельность и высокую эффективность полученных оценок.

2. Разработана подсистема защиты от перегруза комплекса «мельница - классификатор» с использованием дополнительного критерия диагностики перегруза на основе вибрации подшипников мельницы и модификации многокритериального метода оценки индекса перегруза средством экспертных процедур.

Основные теоретические и практические результаты работы в рамках разработанной автоматизированной системы управления процессом измельчения комплекса «мельница-классификатор» можно использовать в учебном процессе НГГИ в дисциплинах «Моделирование систем управления», «Автоматизация технологических процессов и производств».