

ГОСУДАРСТВЕННАЯ ГОРНАЯ АКАДЕМИЯ УКРАИНЫ

На правах рукописи

НОВИЦКИЙ Игорь Валериевич

УДК 622.733 : 621.926.5-52

**АВТОМАТИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА
САМОИЗМЕЛЬЧЕНИЯ РУД В БАРАБАННЫХ
МЕЛЬНИЦАХ**

Специальность 05.13.07 — «Автоматизация
технологических процессов и производств
(промышленность)»

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Днепропетровск

1994

ЛВ 31001
Работа выполнена на кафедре управления в технических системах Государственной горной академии Украины

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ: доктор технических наук,
профессор Чермалых В.М.,
доктор технических наук,
профессор Хорольский В.П.,
доктор технических наук,
главный научный сотрудник
Воронов В.А.

ВЕДУЩЕЕ ПРЕДПРИЯТИЕ: Криворожский филиал Киевского
института автоматки (г.Кривой Рог)

НАУЧНЫЙ КОНСУЛЬТАНТ: доктор технических наук,
профессор Качан Ю.Г.

Защита состоится " 27 " октября 1994 г. в 14⁰⁰
часов на заседании специализированного совета Д.068.08.02 в
Государственной горной академии Украины.

Адрес: 320014, г. Днепропетровск, пр.К.Маркса, 19.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке академии.

Автореферат разослан " 27 " сентября 1994 г.

Ученый секретарь
специализированного совета,
доцент

В.Т.Заика

ЛННБ України ім.В.Стефаніка



00777113 (Q)

ЛННБ ім. В. Стефаніка
АН України

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы: Известно, что при управлении производством целесообразно использовать экономические критерии эффективности его функционирования: себестоимость продукции, размер прибыли в единицу времени, рентабельность производства. Однако, в определенных случаях непосредственное управление технологической линией по этим критериям оказывается невозможным в основном из-за значительной инерционности объекта в сочетании с действием неконтролируемых возмущений. Такая ситуация характерна для многостадийной технологии обогащения руд с большим количеством обратных связей. В этом случае используются иерархические принципы построения систем управления, вводятся промежуточные оценки эффективности функционирования отдельных агрегатов линии и определяются наиболее эффективные управляющие воздействия на основе анализа и других особенностей рассматриваемой технологии.

Известно, что подготовительные процессы обогащения, связанные с сокращением крупности материала, являются наиболее ресурсоемкими. При этом на измельчение приходится более половины всех эксплуатационных расходов при переработке исходной руды в концентрат. С позиций управления это значит, что экономический критерий эффективности работы всей технологической линии обогащения является наиболее чувствительным к управляющим воздействиям, приложенным к барабанной мельнице и его значение во многом определяется режимами работы последней. Вышеизложенное и обуславливает первостепенное значение автоматической оптимизации процессов измельчения для повышения эффективности линии обогащения в целом. Эта задача не является новой. Ее решение, как правило, основывалось на использовании информации о характеристиках входного потока и готового продукта процесса помола.

В настоящей работе принят подход, предложенный профессором Марютой А.Н., который основан на использовании при управлении процессом измельчения параметров, характеризующих движение материала во вращающемся барабане и непосредственно связанных с сокращением его крупности.

Связь темы диссертации с государственными программами. В диссертации отражены результаты НИР, выполненных под научным руководством и при непосредственном участии автора в соответствии с постановлением ГКНТ СССР от 10.03.1986г., программой АН СССР 08.01.Н и координационным планом ИПКОН Н2, приказом Минвуза УССР от 21.03.1991г. № 78.

Целью диссертации является разработка способов и соответствующих систем автоматической оптимизации режимов работы мельниц самоизмельчения руд с точки зрения их производительности по вновь образованному готовому продукту.

Идея работы заключается в обосновании связи между технологической эффективностью процесса измельчения и интенсивностью колебаний центра тяжести рудной нагрузки, используемой в качестве критерия управления мельницами самоизмельчения и синтезе на этой основе более простых и практически реализуемых структур систем их автоматической оптимизации.

Научная проблема состоит в определении закономерностей движения внутримельничной нагрузки при вращении барабана и синтезе на их основе систем автоматической оптимизации процесса самоизмельчения, обеспечивающих повышение эффективности использования подводимой к рабочему органу мельницы энергии.

Защищаемые научные положения и результаты.

Положения.

1. Максимизация производительности барабанной мельницы по вновь образованному готовому продукту является необходимым условием оптимизации технологической линии обогащения в смысле удельных эксплуатационных затрат.

2. В качестве критерия автоматической оптимизации процесса самоизмельчения может быть использована интенсивность колебаний внутримельничной нагрузки при вращении барабана, поскольку этот параметр определяет работу сил трения во внутренних слоях материала, оказывает влияние на производительность мельницы по вновь образованному готовому продукту, а также поддается оперативному измерению и регулированию.

3. Использование механической модели системы привода мельницы в сочетании с многочастичной математической моделью движения материала в барабане, позволяет, в отличие от известных моделей, одновременно учесть случайный характер формирования нагрузочного момента на валу барабана, имитировать прохождение случайного сигнала через электромеханическую систему привода, исследовать влияние технологических и конструктивных параметров мельницы на статистические характеристики сигнала активной мощности приводного двигателя и выполнить на основе указанного сочетания моделей комплексные вычислительные исследования объекта управления.

4. Вероятностный характер формирования наблюдаемой экстремальной зависимости интенсивности колебаний рудной нагрузки от

степени заполнения барабана, подчиняющейся нормальному закону распределения и описываемой кривой Гаусса, позволяет реализовать способ экстремального управления мельницами самоизмельчения, отличающийся от известных ускоренным выходом системы в область оптимального технологического режима работы.

Результаты.

1. Многочастичная математическая модель движения материала в барабане мельницы, основанная, в отличие от известных, на представлении внутримельничной нагрузки в виде отдельных элементарных взаимодействующих частиц, позволяющая с учетом случайного характера формирования нагрузочного момента исследовать влияние технологических и конструктивных параметров мельницы на динамику внутримельничной нагрузки.

2. Способ активной идентификации нелинейных динамических объектов, позволяющий, в отличие от известных способов определять не только параметры, но и структуру математической модели барабанной мельницы по каналу "степень заполнения барабана - интенсивность колебаний внутримельничной нагрузки".

3. Основные требования к алгоритмам переработки информации в системе управления процессом самоизмельчения, которая отличается от известных использованием в качестве параметра оптимизации степени заполнения барабана, а в качестве критерия - интенсивности колебаний внутримельничной нагрузки.

4. Имитационная модель системы автоматического управления измельчительным агрегатом, позволяющая для конкретных параметров объекта управления определить оптимальный алгоритм переработки информации в системе, а также рассчитать параметры закона управления.

5. Способ экстремального управления процессом самоизмельчения, основанный, в отличие от известных, на аппроксимации зависимости критерия от параметра оптимизации кривой Гаусса, что существенно сокращает время выхода системы в область экстремума.

Научная новизна результатов работы заключается в определении закономерностей колебаний внутримельничной нагрузки, которые сопровождаются усилением истирания исходного материала во внутренних слоях; в обосновании интенсивности колебаний нагрузки в качестве критерия автоматической оптимизации процесса помола, а также в разработке соответствующих способов и систем автоматического управления.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается применением апробированных методов составления уравнений движения и взаимодействия частиц, методов спектрального анализа сигналов, математической статистики и теории систем управления, методов имитационного моделирования; сопоставимостью результатов теоретических и экспериментальных исследований по обоснованию критерия автоматической оптимизации процесса помола; проверкой моделей на адекватность реальным объектам; положительными результатами испытаний разработанных систем управления на различных обогатительных комбинатах; экономическим эффектом от внедренных систем управления.

Практическая ценность работы. Исследования, выполненные в диссертации явились научной основой для разработки и внедрения способов и систем контроля и управления процессом самоизмельчения, основанных на измерении интенсивности колебаний внутримельничной нагрузки. Разработанные математические модели объекта и системы управления, способ активной идентификации нелинейных динамических объектов, алгоритмы поиска оптимума могут найти применение на различных обогатительных фабриках черной и цветной металлургии для решения задач проектирования оборудования, анализа и синтеза систем управления объектами обогатительной технологии.

Реализация результатов работы в промышленности. Научно-технические решения, предложенные в работе реализованы в виде систем автоматической оптимизации режимов работы барабанных мельниц самоизмельчения. Такие системы были внедрены в 1989 - 1990 г.г. для управления мельницами типа МРГ 55 x 75 РОФ-2 СевГОКа и мельницами МРТ 40 x 75 РОФ-3 ИнГОКа с экономическим эффектом 162 тыс.р. Эффект получен за счет повышения содержания железа в концентрате до 0,11% и снижения удельных энергозатрат на процесс измельчения.

Апробация работы. Научные и практические результаты диссертации представлялись на следующих научно-технических конференциях и семинарах: Всесоюзной научно-технической конференции "Вопросы разработки и внедрения АСУ ТП агрегатов окускования сыпучих материалов большой единичной мощности" (г. Рустави, 1981 г.), Всесоюзной научно-практической конференции "Развитие теории и практики, совершенствование технологии рудоподготовки при обогащении" (г. Ленинград, 1981 г.), научно-техническом семинаре "Опыт проек-

тирования, разработки и внедрения автоматизированных систем управления технологическими процессами окускования и обогащения" (г. Кривой Рог, 1981 г.); зональной научно-технической конференции "Процессы дробления, измельчения, классификации в технологии переработки железных руд" (г. Белгород, 1983 г.), республиканском научно-техническом совещании "Автоматический контроль и управление в цветной металлургии" (г. Ташкент, 1983 г.), республиканской научно-технической конференции "Молодые ученые - прогрессу в области разработки высокоэффективных технологий, средств механизации и автоматизации добычи и переработки полезных ископаемых" (г. Днепропетровск, 1984 г.); технических советах при главном инженеру ЛебГОКа (г. Губкин, 1982 - 1984 г.г.).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 27 печатных работ, включая 4 авторских свидетельства.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, шести глав и заключения, изложенных на 367 страницах машинописного текста, содержит 88 рисунков, список литературы из 176 наименований на 20 страницах и 13 приложений на 37 страницах.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность работы, формулируются цели и задачи исследования, защищаемые научные положения и результаты.

В первой главе выполнен анализ существующих технических средств сбора и переработки информации, а также подходов при управлении измельчительными агрегатами. С учетом особенностей процесса измельчения как составной части технологии обогащения руд, обоснован подход к его автоматической оптимизации, выполнена постановка задач исследования.

Для выбора подхода к автоматической оптимизации измельчения необходимо определить технологическую цель управления мельницей, ориентируясь на экономические показатели работы всей линии обогащения. Для этого необходимо рассмотреть характерный пример, когда один мощный в смысле перерабатываемого потока Q агрегат I включен последовательно с несколькими менее производительными 2.1, 2.2, ..., 2.n. (рис. I).

$$(a) \quad Q = \left(\frac{1}{\frac{1}{Q_1} + \frac{1}{Q_2} + \dots + \frac{1}{Q_n}} \right) = \left(\frac{1}{\frac{1}{Q_1} + \frac{1}{Q_2} + \dots + \frac{1}{Q_n}} \right) \cdot \frac{1}{\frac{1}{Q_1} + \frac{1}{Q_2} + \dots + \frac{1}{Q_n}} = \dots$$

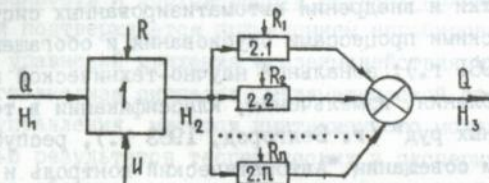


Рис. 1. Схема типового участка технологической линии

H - качественная характеристика потока, R - ресурс, затрачиваемый в единицу времени. Для производства продукции объемом M потребуется время $T = M/Q$, а затраты составят величину $Z = RT + nr$, $T = (R + nr)M/Q$. Пусть поток Q является предельным в смысле выполнения ограничения на качество:

$$H_3 \geq H_{3\text{зад}} \quad (I)$$

где $\partial H_3 / \partial Q < 0$. В то же время имеется возможность путем выбора управляющего воздействия U агрегатом I увеличить Q в m раз ($m > 1$). В этом случае для выполнения (I) необходимо увеличить в m раз и количество аппаратов II. Целесообразность этого можно показать, сравнив затраты до и после увеличения Q и n :

$$\Delta Z = (R + nr)M/Q - (R + nmR)M/(Q \cdot m) = (1 - m^{-1})MR/Q > 0 \quad (2)$$

В реальных условиях производительность Q зависит от H , и характеризуется некоторой функцией распределения $f_1(Q)$. При изменении стратегии управления аппаратом I закон распределения Q изменится - $f_2(Q)$, а средний поток и число n увеличатся в m раз. Для оценки целесообразности этого по знаку ΔZ получено выражение:

$$\Delta Z = (R + nr)M/(kQ) - (R + nmR)M/(mQ) \quad (3)$$

Здесь $1 < k < m$ и определяется функцией $f_2(Q)$.

Если считать, что I - барабанная мельница, а 2.I + 2.n - гидроциклоны или сепараторы, то можно считать что $R \gg nr$, (поскольку эксплуатационные затраты на измельчение значительно выше, чем на классификацию или сепарацию) и выражение (3) упрощается:

$$\Delta Z = \frac{M}{Q} \left[R \left(\frac{1}{k} - \frac{1}{m} \right) + nr \left(\frac{1}{k} - 1 \right) \right] \approx \frac{M}{Q} R \left(\frac{1}{k} - \frac{1}{m} \right) > 0 \quad (4).$$

Полученный результат можно сформулировать в виде следующего вывода: увеличение производительности мельницы по вновь образованному готовому продукту является необходимым условием оптимизации технологической линии обогащения с точки зрения удельных эксплуатационных затрат. Этот вывод оказал решающее влияние на выбор объекта исследования (барabanная мельница) и технологического критерия эффективности его функционирования (производительность по вновь образованному готовому продукту).

Однако, в настоящее время непосредственное измерение (вычисление) производительности мельниц самоизмельчения по вновь образованному готовому продукту затруднено из-за отсутствия соответствующих средств контроля. Кроме того, подобная система оптимизации с непосредственным измерением параметров входных и выходных потоков оказывается неэффективной из-за значительной инерционности объекта (мельница с классификатором). Компенсация возмущений (свойства входного потока, состояние оборудования) практически невозможна также из-за сложности измерения этих параметров.

На основе выполненного в работе обзора установлено, что особенностью информационного обеспечения процесса измельчения являются более совершенные средства контроля внутреннего состояния объекта, чем характеристик входных и выходных потоков.

С учетом этого, в качестве критерия управления процессом самоизмельчения следует использовать один из косвенных параметров, который удовлетворял бы следующим требованиям:

- связь с производительностью по вновь образованному готовому продукту;
- возможность автоматического контроля;
- небольшая инерционность канала управления.

Используемые в известных системах управления косвенные параметры (например, средняя мощность, шум мельницы) характеризуются неоднозначной связью с технологическим критерием эффективности.

Критерий автоматической оптимизации должен быть обоснован на базе углубленных исследований внутренней механики барабанных мельниц, и количественно выражать эффективность использования подводимой к рабочему органу энергии.

В качестве источника получения информации при проведении исследований внутренней механики мельниц целесообразно использовать динамическую составляющую активной мощности двигателя с применением спектральных методов анализа этого сигнала.

Таким образом, для достижения поставленной в работе цели необходимо решить следующие крупные задачи:

1. На основе исследований внутренней механики барабанных мельниц обосновать критерий автоматической оптимизации процесса самоизмельчения. Решение этой задачи предполагает комплекс теоретических и экспериментальных исследований:

- разработать на принципиально новой основе математические модели движения нагрузки во вращающемся барабане, позволяющие представить нагрузочный момент на валу барабана в виде случайной функции времени. С помощью этих моделей выполнить исследования динамических свойств внутримельничной нагрузки как источника низкочастотных колебаний;

- исследование закономерностей прохождения информативных сигналов через систему привода мельницы с целью обоснования способа получения оперативной информации о состоянии внутримельничной нагрузки;

- проведение исследований по определению информативных спектральных составляющих мощности двигателя мельниц в смысле оценки динамических параметров нагрузки;

- проведение исследований по установлению и обоснованию связей между информативными составляющими спектра с основными параметрами и технологической эффективностью процесса.

2. Выполнить структурную и параметрическую идентификацию барабанной мельницы самоизмельчения как объекта оптимизации в смысле обоснованного критерия.

3. На основе анализа измельчительного агрегата как объекта автоматической оптимизации сформулировать основные требования к структуре системы управления и процедурам поиска, разработать соответствующие алгоритмы управления, выполнить их сравнительный анализ и выбрать наилучший.

4. Разработать технические средства оперативного контроля и оптимального автоматического управления процессом самоизмельчения, провести их апробацию в промышленных условиях, определить их работоспособность, технологическую и экономическую эффективность.

Вторая глава посвящена моделированию движения внутримельничной нагрузки при вращении барабана.

Как известно, проблема адекватного описания внутренней механики мельниц не является новой. Однако, практически всем известным моделям присущ характерный недостаток: траектории движения частиц постулируются, а не определяются на основе интегрирования дифференциальных уравнений, составленных в соответствии с законами механики.

Изучение процессов, происходящих при вращении барабана целесообразно начать с простейшего случая, когда на перемещающуюся с некоторой угловой скоростью Ω поверхность помещено плоское тело малых размеров (рис. 2а). Положение тела характеризуется

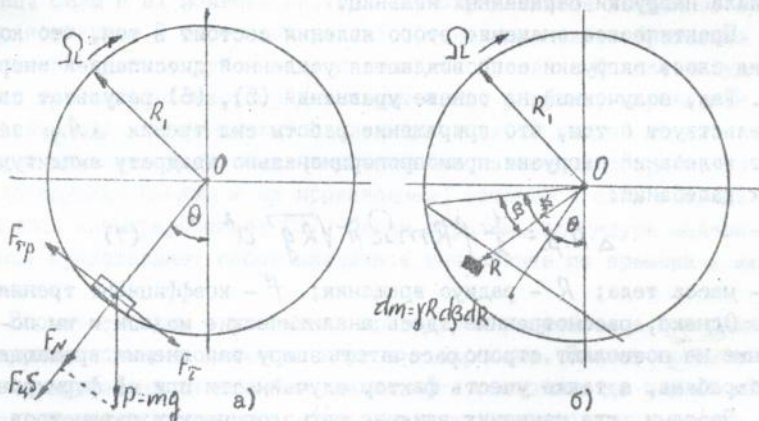


Рис. 2. Задачи о движении плоского тела (а) и сегмента сыпучего материала (б) по внутренней поверхности вращающегося барабана.

угловой координатой θ . Уравнение движения тела имеет вид:

$$\ddot{\theta} - \dot{\theta}^2 f(\Omega - \dot{\theta}) \cdot \text{sign}(\Omega - \dot{\theta}) + \frac{g}{R} \sin \theta - \frac{g}{R} \cos \theta \cdot \text{sign}(\Omega - \dot{\theta}) = 0. \quad (5)$$

R - радиус вращения; $f(\Omega - \dot{\theta})$ - зависимость коэффициента трения от скорости скольжения тела по поверхности. Уравнение (5) имеет качественно различные решения в зависимости от вида функции $f(\Omega - \dot{\theta})$. Так, если $\frac{\partial f(\Omega - \dot{\theta})}{\partial (\Omega - \dot{\theta})} < 0$, то особая точка на фазовой

плоскости $(\theta, \dot{\theta})$ превращается в неустойчивый фокус и в системе (5) возникают колебания.

Уравнение движения сегмента сыпучего материала по перемещающейся поверхности (рис. 2б) получается путем интегрирования по углу β и радиусу R и структурно не отличается от (5):

$$\ddot{\theta} - (A\dot{\theta}^2 + B \cos \theta) \cdot \operatorname{Sign}(\Omega - \dot{\theta}) + C \sin \theta = 0 \quad (6)$$

Разница состоит в том, что коэффициенты A , B , C (а, следовательно, и параметры возникающих колебаний) зависят от угловых размеров сегмента α (рис. 2б).

Анализ уравнений (5), (6), выполненный в работе показывает, что при определенных условиях в области перепада линейных скоростей эсперы заполнения возможны колебания внутренних слоев материала нагрузки барабанных мельниц.

Практическое значение этого явления состоит в том, что колебания слоев нагрузки сопровождаются усиленной диссипацией энергии. Так, полученный на основе уравнений (5), (6) результат свидетельствует о том, что приращение работы сил трения $\Delta A_{тр}$ за счет колебаний нагрузки прямопропорционально квадрату амплитуды a этих колебаний:

$$\Delta A_{тр} = \frac{1}{2} f R m \Omega \pi \sqrt{Rg} \cdot a^2 \quad (7)$$

m - масса тела; R - радиус вращения; f - коэффициент трения.

Однако, рассмотренные здесь аналитические модели и им подобные не позволяют строго рассчитать эсперу заполнения вращающегося барабана, а также учесть фактор случайности при её формировании. Поэтому для изучения влияния технологических параметров процесса измельчения на динамику внутримельничной нагрузки впервые был предложен принципиально новый метод моделирования - метод частиц. Суть его в следующем. Движение каждой частицы описывается простым уравнением динамики. Кроме того, задается модель взаимодействия или контакта двух элементарных частиц. Тогда движение всей системы определяется путем решения системы уравнений по числу частиц.

В случае плоской задачи движение i -й частицы описывается тремя уравнениями - по осям X и Y и вращение вокруг оси - угловая координата φ :

$$\begin{aligned}
 F_{\delta i}^x + \sum_{j=1}^n F_{ji}^x &= m_i \ddot{x}_i; & x_i(0) &= x_{i0}; \dot{x}_i(0) = \dot{x}_{i0}' \\
 F_{\delta i}^y + \sum_{j=1}^n F_{ji}^y &= m_i \ddot{y}_i; & y_i(0) &= y_{i0}; \dot{y}_i(0) = \dot{y}_{i0}' \\
 M_{\delta i} + \sum_{j=1}^n M_{ji} &= J_i \ddot{\varphi}_i; & \varphi_i(0) &= 0; \dot{\varphi}_i(0) = \dot{\varphi}_{i0}'; \quad i = \overline{1, n}
 \end{aligned}
 \quad (8)$$

В левых частях системы (8) расположены силы и моменты сил, действующие на i -ю частицу со стороны контактирующих с ней j -х частиц F_{ji} и барабана $F_{\delta i}$. n — общее число частиц. Силы и их моменты системы (8) определяются выбранной моделью контакта. В настоящей работе обоснована целесообразность применения вязко-упругой модели контакта Кельвина-Фохта, когда в момент контакта на частицу действуют силы: упругая, нормальная диссипативная, тангенциальная диссипативная. В каждый момент времени эти силы могут быть рассчитаны по известным координатам контактирующих частиц и их производным, которые в свою очередь находятся интегрированием (8). Таким образом, процедура моделирования представляет собой циклическое вычисление по времени с малым шагом.

В соответствии с описанной процедурой разработана программа, имитирующая процесс движения кругов в барабане. Расчет процесса падения кругов из взвешенного начального состояния до полной их остановки при невращающемся барабане позволил проверить модель на адекватность реальному явлению с точки зрения энергетического баланса.

В третьей главе выполнено обоснование в качестве критерия автоматической оптимизации процесса самоизмельчения такого параметра как интенсивность колебаний внутримельничной нагрузки.

Обоснование критерия было выполнено в несколько этапов на основе комплекса теоретических и экспериментальных исследований.

С целью изучения закономерностей динамики внутримельничной нагрузки был проведен вычислительный эксперимент на базе разработанной многочастичной модели. В ходе эксперимента для различных скоростных режимов и степени заполнения барабана рассчитывался мгновенный суммарный момент сил $\sum F_{\tau}$, действующий со стороны

кругов на барабан. В результате анализа эшпор заполнения установившихся режимов работы, а также полученных процессов $\sum F_r(t)$ было установлено:

1. В центре внутримельничной нагрузки при вращении барабана образуется область, в которой практически отсутствует линейное перемещение частиц. На границе этой области имеет место наиболее резкий перепад линейных скоростей частиц, что создает условия для возникновения колебаний внутренних слоев нагрузки.

2. В определенном узком диапазоне внутримельничных заполнений движения нагрузки вызывают усиление колебаний нагрузочного момента с частотой, несколько большей, чем частота оборотов барабана.

Известно, что колебания, возникающие в системе привода вызывают колебания активной мощности двигателя, а этот сигнал удобно использовать в качестве источника информации в системе управления.

Обоснование информативности сигнала активной мощности приводного двигателя было выполнено на основе совмещения механической модели привода мельницы и многочастичной математической модели движения материала в барабане, которые были рассмотрены комплексно, как единая система (рис. 3а).

Барабан мельницы с приводом представлены в виде идеализованных механических элементов, а внутримельничная нагрузка - в виде оператора, связывающего скорость вращения барабана с нагрузочным моментом. Использование многочастичной модели позволило, в отличие от известных моделей, учесть фактор случайности формирования нагрузочного момента, имитировать прохождение случайного информативного сигнала через систему привода и исследовать влияние технологических параметров процесса на статистические характеристики сигнала активной мощности двигателя мельницы. В соответствии со схемой, содержащей многочастичную модель в виде отдельной процедуры Δ (рис. 3а) были получены процессы изменения сигнала мощности двигателя и рассчитаны соответствующие графики спектральной плотности для различных степеней заполнения барабана ψ . При этом степень заполнения ψ задавалась как параметр многочастичной модели. В результате обработки графиков спектральной плотности определен информативный частотный диапазон в спектре сигнала активной мощности, который составляет $1,5 + 2 \cdot f_{\Delta}$ (f_{Δ} - частота оборотов барабана) и содержит информацию об ин-

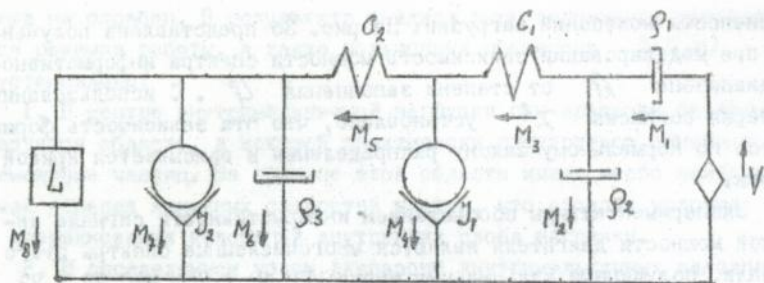
тензивности колебаний нагрузки. На рис. 36 представлена полученная при моделировании зависимость мощности спектра информативного диапазона A от степени заполнения φ . С использованием критерия согласия χ^2 установлено, что эта зависимость формируется по нормальному закону распределения и описывается кривой Гаусса.

Экспериментальным обоснованием информативности сигнала активной мощности двигателя являются многочисленные спектры этого сигнала, полученные для мельниц типов МГР 40 x 75, ММС 70 x 23, МГТ 55 x 75, ММС 90 x 30 в условиях фабрик ТГМК, ЛебГОК, СевГОК, ИнГОК. В спектрах сигнала мощности промышленных мельниц наряду с составляющей на частоте оборотов барабана f_{cD} присутствует составляющая f_p в информативном диапазоне $1,5 + 2 f_{cD}$ (рис. 4а). Амплитуда этой составляющей резко возрастает в определенном диапазоне внутримельничных заполнений (рис. 4б), что согласуется с результатами моделирования (рис. 3б).

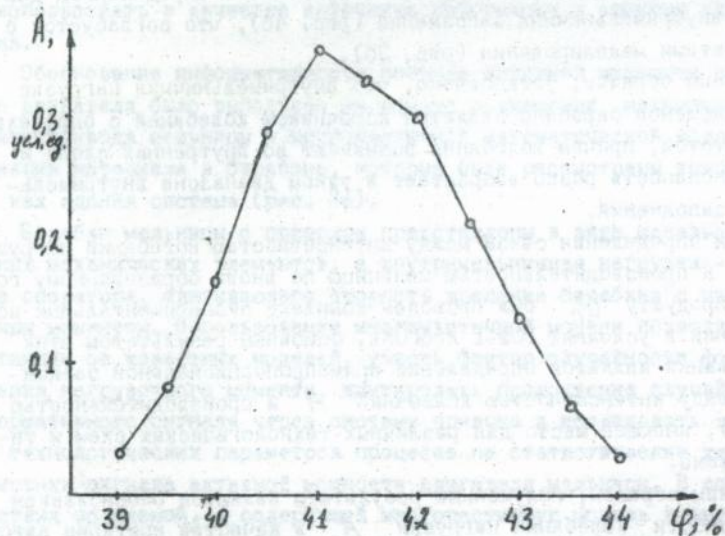
Таким образом, установлено, что внутримельничная нагрузка во вращающемся барабане является источником колебаний с определенной частотой, причем колебания возникают во внутренних слоях и их интенсивность резко возрастает в узком диапазоне внутримельничных заполнений.

Для определения связи между интенсивностью колебаний нагрузки A и производительностью мельницы по вновь образованному готовому продукту Q_p был проведен комплекс экспериментальных исследований в условиях ФОН-1 ЛебГОКа. Основным результатом этих исследований является определение прямопропорциональной зависимости между интенсивностью колебаний A и производительностью Q_p (рис. 5), имеющей место для различных технологических схем и типов мельниц.

Таким образом, полученные результаты являются обоснованием интенсивности колебаний нагрузки A в качестве критерия автоматической оптимизации процесса самоизмельчения, поскольку, во-первых, этот параметр прямопропорционален технологической эффективности мельницы и, во-вторых, поддается оперативному автоматическому контролю и регулированию. Цель управления - максимизация критерия путем изменения потока исходного материала в мельницу. В качестве параметра оптимизации принята степень внутримельничного заполнения (или средняя мощность двигателя мельницы), поскольку к этому параметру наиболее чувствителен критерий.



а)



б)

Рис. 3. Математическая модель системы привода и внутримельничной нагрузки (а) и полученная зависимость интенсивности колебаний от степени заполнения (б)

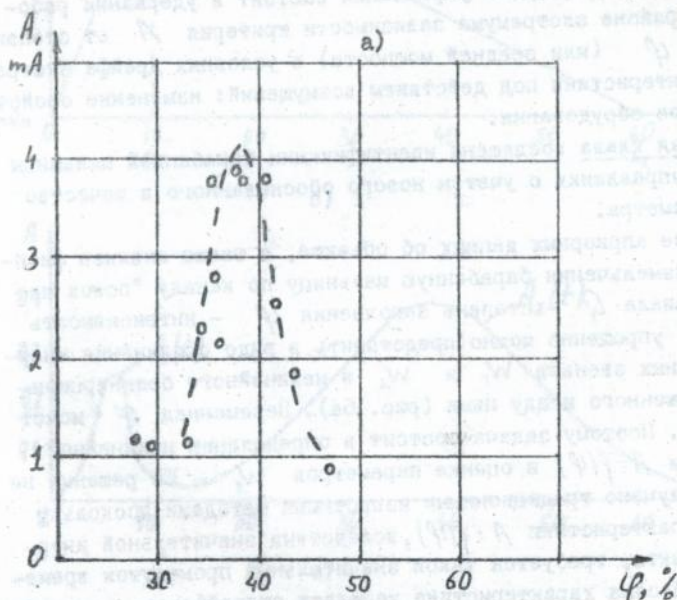
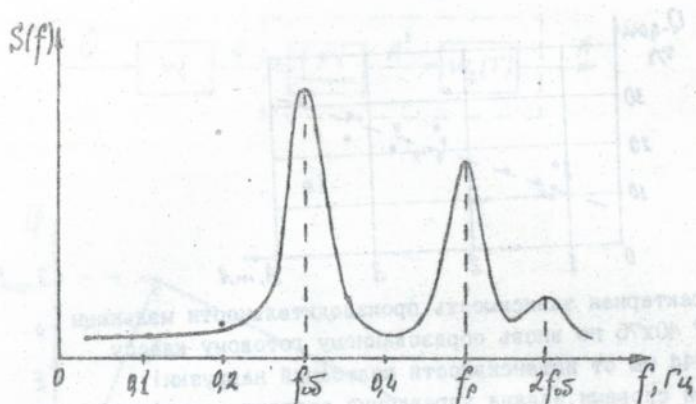


Рис. 4. Характерные график спектральной плотности сигнала мощности (а) и зависимость мощности спектра информативного диапазона от степени заполнения (б)

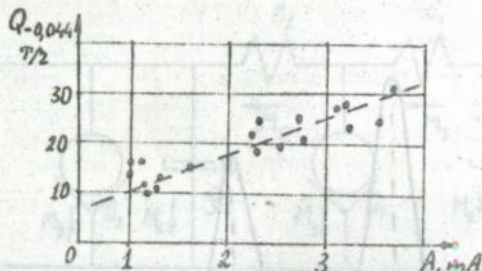


Рис. 5. Характерная зависимость производительности мельницы МР 40x75 по вновь образованному готовому классу - 0,044 мм от интенсивности колебаний нагрузки

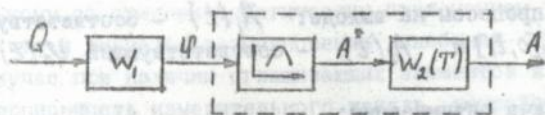
Другими словами, задача управления состоит в удержании рабочей точки в районе экстремума зависимости критерия A от степени заполнения φ (или средней мощности) в условиях дрейфа экстремальной характеристики под действием возмущений: изменение свойств питания, износ оборудования.

Четвертая глава посвящена идентификации барабанной мельницы как объекта управления с учетом нового обоснованного в качестве критерия параметра.

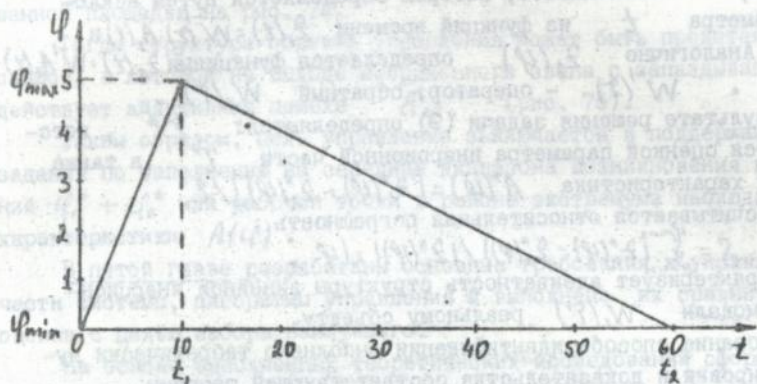
На основе априорных данных об объекте, а также анализа физики процесса измельчения барабанную мельницу по каналу "поток исходного материала Q - степень заполнения φ - интенсивность колебаний A " упрощенно можно представить в виде соединения инерционных линейных звеньев W_1 и W_2 и нелинейного безинерционного, расположенного между ними (рис. 6а). Переменная φ может быть измерена. Поэтому задача состоит в определении нелинейной характеристики $A = f(\varphi)$ и оценке параметров W_2 . Её решение не может быть получено традиционными известными методами, поскольку для снятия характеристики $A = f(\varphi)$, вследствие значительной инерционности объекта, требуется такой значительный промежуток времени, за который сама характеристика успевает отдрейфовать под действием возмущений.

Поэтому для решения поставленной задачи был разработан новый способ активной непараметрической идентификации нелинейных динамических объектов, который предполагает следующую последовательность действий.

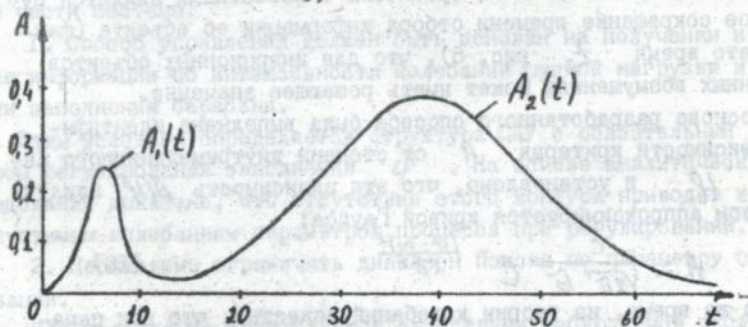
I. Осуществляется монотонное изменение параметра φ на всем рабочем диапазоне от φ_{\min} до φ_{\max} на интервале $t \in [0; t_1]$, а затем от φ_{\max} до φ_{\min} на интервале $t \in [t_1; t_2]$ (рис. 6б).



а)



б)



в)

Рис. 6. Метод идентификации нелинейных объектов

2. Фиксируются процессы на выходе: $A_1(t)$ - соответствующий $\varphi_1(t)$ для $t \in [0; t_1]$ и $A_2(t)$ - соответствующий $\varphi_2(t)$ для $t \in [t_1; t_2]$.

3. Решается задача оптимизации:

$$J(\tau) = \int_{\varphi_{\min}}^{\varphi_{\max}} [\dot{z}_1(\varphi) - \dot{z}_2(\varphi)]^2 d\varphi \rightarrow \min \quad (9)$$

где $\dot{z}_1(\varphi)$ - зависимость, которая определяется путем исключения параметра t из функций времени $\dot{z}_1(t) = W^{-1}(\tau) \cdot A_1(t)$ и $\varphi_1(t)$. Аналогично $\dot{z}_2(\varphi)$ определяется функциями $\dot{z}_2(t) = W^{-1} A_2(t)$ и $\varphi_2(t)$. $W^{-1}(\tau)$ - оператор, обратный $W_2(\tau)$.

В результате решения задачи (9) определяются: Σ^* , которое является оценкой параметра инерционной части τ , а также нелинейная характеристика $A^*(\varphi) = [\dot{z}_1^*(\varphi) + \dot{z}_2^*(\varphi)] / \dot{z}_2$.

4. Рассчитывается относительная погрешность

$$\delta = \int_{\varphi_{\min}}^{\varphi_{\max}} |\dot{z}_1^*(\varphi) - \dot{z}_2^*(\varphi)| / |\dot{z}_2^*(\varphi)| d\varphi,$$

которая характеризует адекватность структуры линейной инерционной части модели $W_2(\tau)$ реальному объекту.

Обоснование способа идентификации выполнено теоретически путем формулировки и доказательства соответствующей теоремы.

Преимуществом способа по сравнению с известными является существенное сокращение времени отбора информации об объекте (фактически это время t_2 рис. 6), что для инерционных объектов подверженных возмущениям может иметь решающее значение.

На основе разработанного способа была выполнена идентификация зависимости критерия A от степени внутримельничного заполнения φ и установлено, что эта зависимость $A(\varphi)$ наилучшим образом аппроксимируется кривой Гаусса:

$$A = \frac{c}{\sqrt{2\pi} \sigma} e^{-\frac{(\varphi - \mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (10)$$

В то же время, из теории колебаний известно, что при параметрическом резонансе в системах с нелинейной диссипацией амплитуда установившихся колебаний в области их возникновения имеет постоянное значение.

С учетом этого, эффект "размывания" наблюдаемой зависимости $A(\varphi)$ объясняется, во-первых, случайным характером формирования эмпры заполнения барабана. Во-вторых, при стабилизации степени заполнения φ или его регулярном изменении этот параметр содержит случайную составляющую, распределенную по закону близкому к

нормальному со среднеквадратическим отклонением ε_{φ} того же порядка, что и диапазон возникновения колебаний $\varphi_1^* \div \varphi_2^*$. В этом случае при наличии сглаживающих элементов в структуре объекта (инерционность измерительного канала, устройства) на его выходе будет наблюдаться экстремальная зависимость $A(\varphi)$, так как показания измерительного устройства будут определяться заштрихованной площадью на рис. 7а.

Тогда структура объекта управления может быть представлена схемой, в которой на выходе инерционного звена с запаздыванием действует аддитивная помеха ε_{φ} (рис. 7б).

Таким образом, цель управления заключается в поддержании задания по заполнению на середине диапазона возникновения колебаний $\varphi_1^* \div \varphi_2^*$ или рабочей точки в районе экстремума наблюдаемой характеристики $A(\varphi)$.

В пятой главе разработаны основные требования к управляющей части системы, алгоритмы управления и выполнена их сравнительная оценка с целью выбора наилучшего.

На основе выполненных теоретических исследований сформулированы четыре основных требования, определяющих структуру управляющей части системы:

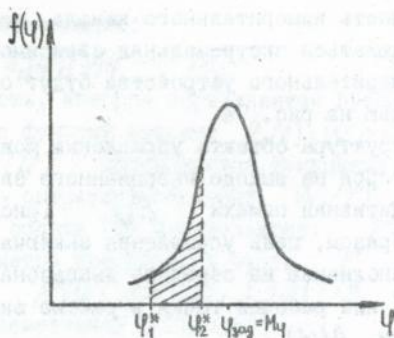
1. Способ управления должен быть основан на получении и анализе информации об интенсивности колебаний рудной нагрузки и степени заполнения барабана.

Этим условием определяется структура САУ с обязательным контуром регулирования заполнения φ . На основе аналитических исследований доказано, что отсутствие этого контура приводит к недопустимым колебаниям параметров процесса при регулировании.

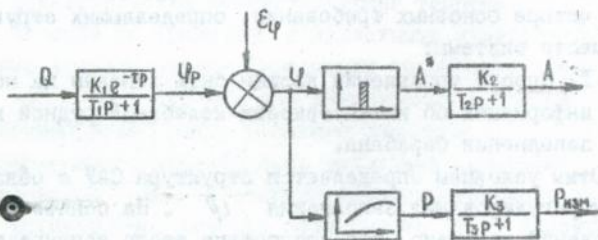
2. Необходимо ограничить диапазон поиска по параметру оптимизации.

Это требование определяется свойствами наблюдаемой экстремальной зависимости $A(\varphi)$: с одной стороны – зона дрейфа характеристики не бывает больше 8 – 10 % заполнения, с другой стороны – возможна потеря чувствительности поисковой системы вдали от экстремума, где $\partial A / \partial \varphi \approx 0$.

3. Процессу поиска следует придать квазистационарный (шаговый) характер. Величина шага должна выбираться из условия минимума суммарной ошибки за счет инерционности объекта и дрейфа экстремальной характеристики.



а)



б)

Рис. 7. Нелинейная экстремальная зависимость (а) и структурная схема (б) объекта управления

Необходимость шагового поиска определяется прежде всего значительной инерционностью объекта в сочетании с высоким уровнем помех в информационных сигналах. В работе показано, что существует оптимальная в смысле суммарной ошибки величина шага и приводится методика его определения.

4. Процедуру поиска необходимо разделить на два этапа: выход в область экстремума и удержание экстремума.

Сформулированные требования являются основой для разработки конкретных алгоритмов поиска.

В работе рассмотрены удовлетворяющие требованиям возможные группы поисковых алгоритмов с точки зрения их сравнительной эффективности в смысле времени выхода системы в район экстремума и функционала $J = \int_0^T A(t) dt$ на этапе удержания экстремума. Эти исследования выполнены с использованием имитационного моделирования работы поисковой системы. Модель САУ (рис. 8) включает следующие элементы: блоки 1, 2 - мельница; 3, 4, 5 - классификатор; 6, 7, 8, 9 - измерительные каналы и датчики; 11, 12, 13 - регулятор; ξ_1, ξ_2, ξ_3 - случайные процессы. В результате установлено, что наиболее эффективными являются алгоритмы, основанные на аппроксимации зависимости $A(\varphi)$ кривой Гаусса. Соответствующие поисковые процедуры предусматривают по трем измеренным парам $(A_i; \varphi_i)$ $i = \overline{1, 3}$ вычисление непосредственно координаты точки оптимума:

$$A_i = \frac{C}{\sqrt{2\pi}B} e^{-\frac{(\varphi_i - M)^2}{2B^2}} \quad i = \overline{1, 3} \quad (II)$$

Система (II) может быть решена относительно M :

$$\varphi_{опт} = M = \frac{\rho_{11}(A_1/A_2) \cdot (\varphi_3^2 - \varphi_2^2) - \rho_{11}(A_2/A_3)(\varphi_2^2 - \varphi_1^2)}{\rho_{11}(A_2/A_3)(2\varphi_1 - 2\varphi_2) - \rho_{11}(A_1/A_2)(2\varphi_2 - 2\varphi_3)}$$

Таким образом, в результате теоретических исследований с использованием многочастичной модели, а также идентификации объекта была определена структура зависимости A от φ (кривая Гаусса), что позволило свести задачу поиска экстремума к задаче идентификации параметров M, B, C в (II) и разработать соответствующий эффективный способ управления.

В шестой главе решаются задачи технической реализации средств контроля и управления, а также их апробации в промышленных условиях.

Измерительное устройство предназначено для оценки интенсивности колебаний рудной нагрузки по колебательной активности сиг-

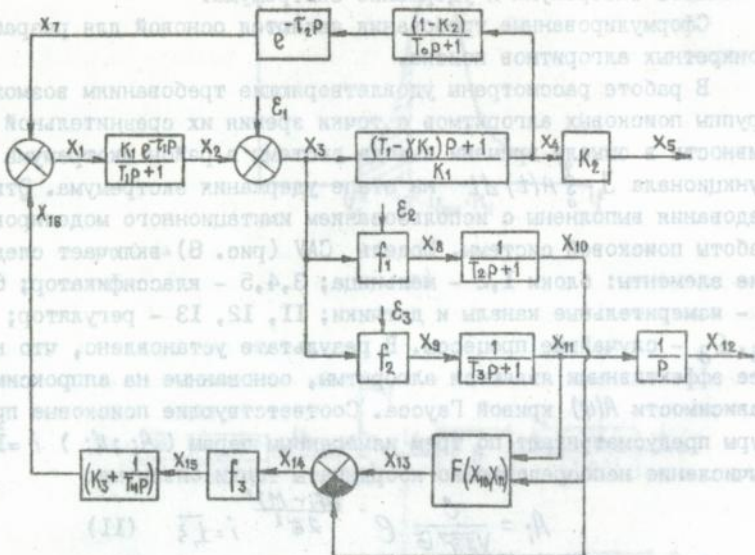


Рис. 8. Имитационная модель системы автоматического управления процессом самоизмельчения

нала активной мощности двигателя мельницы в информативном диапазоне частот. Его основу составляют аналоговые электронные полосовые фильтры, настроенные на соответствующий диапазон частот.

Уровень выходного сигнала устройства прямопропорционален мощности спектра информативного диапазона.

Структура управляющей части САУ зависит от количества объектов управления и конфигурации измерительных цепей на фабрике. В ДГИ разработан на основе приведенных здесь теоретических исследований вариант системы, реализованный на базе микроконтроллера и управляющий восемь мельницами.

Для оценки эффективности разработанной САУ в условиях РОФ-2 СевГОКа проведены сравнительные испытания системы автоматической оптимизации и системы стабилизации средней мощности. В ходе испытаний путем отбора проб определялась производительность мельницы по готовому классу - 0,05 мм и по вновь образованному готовому классу, а также расход электроэнергии. В результате обработки данных установлено, что система оптимизации по сравнению с системой стабилизации позволяет:

- повысить содержание готового класса в сливе классификатора на 2,5 %;
- повысить производительность мельницы по вновь образованному готовому классу на 6%;
- снизить удельный расход электроэнергии на 10,5%.

Система оптимизации, управляющая восемью объектами внедрена в 1989 году на РОФ-2 СевГОКа на мельницах МРГ 55 x 75 и в 1990 году на РОФ-2 ИнГОКа на мельницах МРГ 40 x 75. Экономический эффект 162 тыс.руб./год получен за счет повышения содержания железа в концентрате до 0,11%, а также за счет снижения расхода электроэнергии.

Здесь же, в шестой главе, намечены три основных перспективных направлений исследований в развитие разработанного подхода к интенсификации процесса помола руды в барабанных мельницах: расширение вектора параметров автоматической оптимизации при управлении, оптимальное проектирование узлов конструкции мельниц с использованием разработанных моделей движения внутримельничной нагрузки и введение внешних воздействий, способствующих резонансной передаче энергии от рабочего органа барабана ко внутренним слоям загрузки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основное содержание работы и её результаты могут быть сформулированы в виде следующих тезисов:

1. При решении задач проектирования оборудования, технологических схем и систем управления процессами рудоподготовки необходим комплексный подход. Если следовать этому подходу, то производительность мельницы по вновь образованному готовому продукту будет являться объективным критерием, определяющим эффективность работы всей технологической линии обогащения. В работе показано, что максимизация производительности мельницы по вновь образованному готовому продукту является необходимым условием оптимизации работы всей технологической линии.

2. Выполненный обзор источников и анализ объекта позволил сформулировать проблему автоматической оптимизации процесса самоизмельчения, суть которой состоит в следующем: система управления по отклонению с непосредственным измерением характеристик выходного потока мельницы оказывается неэффективной из-за значительной инерционности объекта. Кроме того, отсутствуют соответствующие средства автоматического контроля. Компенсация же возмущений (свойства исходного потока) также невозможна из-за отсутствия датчиков.

Поэтому для автоматической оптимизации процесса самоизмельчения необходимо в качестве критерия обосновать параметр, отражающий технологическую эффективность процесса и поддающийся измерению и регулированию.

3. Такой критерий оптимизации обоснован на базе углубленных исследований внутренней механики барабанных мельниц. Анализ полученных уравнений движения плоского тела и сегмента материала по внутренней поверхности вращающегося барабана показал, что при определенных условиях во внутренних слоях нагрузки мельниц могут возникать колебания. Показано, что такие колебания сопровождаются приращением работы сил трения, которое пропорционально квадрату амплитуды колебаний.

4. Для исследования зависимости параметров возникающих в нагрузке колебаний от технологических переменных с учетом фактора случайности формирования эпюры заполнения была разработана многочастичная математическая модель движения материала в барабане. В результате проведения вычислительного эксперимента на многочастичной модели установлено, что при определенной степени заполнения бара-

бана интенсивность колебаний нагрузки резко возрастает.

5. Для обоснования канала получения информации о процессах, происходящих в барабане, разработана модель электромеханической системы привода мельницы. Показано, что система привода по каналу "момент на валу барабана - активная мощность двигателя" работает как фильтр низких частот, пропуская сигналы с частотой порядка частоты оборотов барабана.

6. Использование механической модели привода в сочетании с многочастичной математической моделью движения материала внутри барабана позволило исследовать влияние технологических параметров процесса измельчения на статистические характеристики сигнала активной мощности двигателя мельницы и обосновать этот сигнал в качестве источника информации об интенсивности колебаний нагрузки. Так, в результате вычислительного эксперимента был установлен информативный диапазон частот в спектре сигнала мощности и получена зависимость интенсивности сигнала в этом диапазоне от степени заполнения.

7. Экспериментальные исследования спектра сигнала мощности промышленных мельниц типов ММС 70 x 23, ММС 90 x 30, МРГ 40 x 75, МРГ 55 x 75, проведенные в условиях комбинатов ТГМК, ЛГОК, СевГОК, ИнГОК подтвердили полученные теоретические результаты:

- внутримельничная нагрузка во вращающемся барабане является источником низкочастотных колебаний системы привода мельницы и активной мощности её приводного двигателя;

- частота этих колебаний находится в диапазоне $1,5 f_{об} \pm 2 f_{об}$ ($f_{об}$ - частота оборотов барабана);

- при определенной степени внутримельничного заполнения интенсивность этих колебаний резко возрастает.

8. Экспериментальные исследования, проведенные на РОФ-1 ЛГОКа позволили установить прямопропорциональную корреляционную зависимость в рабочем диапазоне заполнений барабана между производительностью мельницы по вновь образованному готовому продукту и интенсивностью колебаний.

9. Таким образом, интенсивность колебаний рудной нагрузки целесообразно использовать в качестве критерия автоматической оптимизации процесса самоизмельчения, поскольку этот параметр прямопропорционален технологической эффективности процесса, может быть оперативно измерен и поддается целенаправленному изменению.

Цель управления – максимизация критерия путем регулирования степени заполнения.

II. Сформулированы основные требования к организации структуры системы управления и процедурам поиска оптимальных режимов работы мельниц самоизмельчения.

12. Разработан способ экстремального управления процессом измельчения, основанный на аппроксимации экстремальной зависимости кривой Гаусса и отличающийся ускоренным выходом в район экстремума.

13. Путем аналитических исследований, а также на основе имитационного моделирования показано, что для управления процессом самоизмельчения этот способ, основанный на аппроксимации, является наиболее эффективным среди других, удовлетворяющих требованиям (п. II).

14. Для автоматического измерения интенсивности колебаний нагрузки разработаны электронные устройства, основу которых составляют полосовые фильтры, настроенные на информативный диапазон частот. Управляющая часть системы реализована на базе современных средств переработки информации и управления.

15. Испытания системы автоматической оптимизации в промышленных условиях показали, что она позволяет улучшить по сравнению с системой автоматической стабилизации следующие показатели: увеличить производительность мельницы по вновь образованному готовому классу на 6%; снизить удельный расход электроэнергии на 10,5%.

16. Системы оптимизации, управляющие 15-ю мельницами внедрены на ОФ СевГОКа и ИнГОКа в 1989 - 1990 г.г. Экономический эффект 162 тыс.руб. получен за счет снижения расхода электроэнергии и повышения качества конечного концентрата на 0,11%.

Содержание диссертации отражено в следующих опубликованных работах:

1. Марюта А.Н., Новицкий И.В. Разработка и испытания в промышленных условиях устройства диагностики состояния внутримельничной нагрузки // Системы управления технологическими процессами. - Новочеркасск, изд. НПИ, 1981 г.

2. Марюта А.Н., Новицкий И.В. О сигнале активной мощности приводных двигателей барабанных мельниц в узкой полосе инфранизкого диапазона частот // Горная электромеханика и автоматика, 1982.

3. Марюта А.Н., Новицкий И.В., Мамонов С.Г., Колесниченко С.В. Промышленные испытания устройств технологической диагностики барабанных мельниц// Горный журнал. - 1982. - №3.

4. Марюта А.Н., Новицкий И.В. Имитационное моделирование оптимального режима измельчения руд для оценки технико-экономической эффективности. В сб.: Повышение эффективности функционирования экономико-производственных систем. Днепропетровск: ДТУ, 1985.

5. Новицкий И.В. Численный метод решения задачи о движении тяжелых кругов в барабане. Деп. в УкрНИИТИ № 2288 Ук-87, 24.07.87.

6. Новицкий И.В. Разработка математической модели движения шаров в барабане для исследования механики измельчающей среды барабанных мельниц. Деп. в УкрНИИТИ № 891. Ук-88, 11.04.88.

7. А.с. 1386302 СССР, МКИ ВОЗС 25/00. Система автоматического управления барабанной мельницей/ Мамонов С.Г., Новицкий И.В., Григорьев В.Б. и др.

8. А.с. 1412811 СССР, МКИ ВОЗС 25/00. Способ управления барабанными мельницами/ Григорьев В.Б., Мамонов С.Г., Новицкий И.В. и др.

9. Новицкий И.В. Математическая модель внутренней механики барабанных мельниц// Изв. вузов. Горный журнал. - 1989 - № 4.

10. Новицкий И.В., Григорьев В.Б., Мамонов С.Г. Испытания системы управления рудногалечной мельницей в условиях РСФ-2 СевГОКа// Металлургическая и горнорудная промышленность. - 1990. - № 2.

11. А.с. 1648563 СССР, МКИ ВОЗС 25/00. Способ управления барабанными мельницами/ И.В.Новицкий, В.Б.Григорьев, С.Г.Мамонов и др.

12. Новицкий И.В., Григорьев В.Б., Бульба В.И. и др. Система автоматического управления рудногалечными мельницами// Горный журнал. - 1990. - № 5.

13. Новицкий И.В. Моделирование движения внутримельничной нагрузки барабанных мельниц методом частиц// Изв. вузов. Горный журнал. - 1991. - № 1.

14. Новицкий И.В. Идентификация статических и динамических характеристик объектов автоматизации обогатительных фабрик// Горная электромеханика и автоматика - 1990 - Вып. 57. - с.44-48.

15. Новицкий И.В. Электромеханическая модель системы привода барабанных мельниц// Горная электромеханика и автоматика. - 1991. - Вып.58. - с.77-80.

16. Новицкий И.В. О комплексном подходе при решении задач проектирования и автоматизации технологической линии обогащения руд// Металлургическая и горнорудная промышленность - 1992. - № 2.

17. Новицкий И.В. Идентификация барабанных мельниц самоизмельчения как объектов автоматической оптимизации// Металлургическая и горнорудная промышленность. - 1992. - № 4.

18. Новицкий И.В., Панченко В.В. Основные принципы построения поисковых процедур при управлении барабанными мельницами самоизмельчения. Деп. в УкрИПТЭИН 23.10.92, № 1728 - Ук.92.

22. Новицкий И.В., Качан Ю.Г. Обоснование информативности сигнала активной мощности приводных двигателей барабанных мельниц. Днепропетров. горн. ин-т - Днепропетровск, 1993. Деп. в ГНТБ Украины 10.06.93, № 1131 - Ук.93.

Всего по теме диссертации опубликовано 27 печатных работ.

Личное участие соискателя в работах, опубликованных в соавторстве: I - 3 - разработка устройств диагностики, организация и проведение экспериментальных исследований, испытаний, обработка и анализ их результатов; 4 - разработка имитационной модели, проведение вычислительного эксперимента; 7 - разработка структурной схемы системы; 8 - предложено изменять мгновенную скорость вращения барабана мельницы с частотой колебаний её нагрузки; 10, 12 - разработка системы управления и организация её испытаний; 11 - предложено измерять степень заполнения и стабилизировать её на данном шаге управления; 18 - разработка и обоснование основных принципов построения поисковых процедур; 19 - разработка моделей, постановка и проведение вычислительных исследований, обработка и анализ их результатов.

І.В.НОВИЦЬКИЙ

АВТОМАТИЧНА ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ САМОЗДРІВЛЕННЯ РУД В БАРАБАНИХ
МЛИНАХ.

Відповідальний за випуск І.В.Новицький.

Підписано до друку 3.08.94. Формат 60x84 1/16. Папір друкарський.

Офсетний друк. Умовн. друк. арк. 1,62. Умовн. фарб.-відб. 1,62. Тираж

100. Замовлення № 5193. Замовлене.

Видавничо-поліграфічне орендне підприємство "Дніпро".

ВПСП "Дніпро" 320070, м. Дніпропетровськ, вул. Серова, 7.

45430

AB 31.037

AB 31.037