

Туз Андрей Александрович

**Управление технологическим процессом
измельчения в шаровой мельнице в цикле
подготовки питания флотации на основе
нечетко-определенных импульсных моделей**

Специальность 05.13.06 -Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (химическая технология; нефтехимия и нефтепереработка; биотехнология)

Специальность 05.17.08 -Процессы и аппараты химических технологий

Диссертация на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель –
кандидат технических наук
Пророков А.Е.

Москва - 2017

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ НА ГОРНО-ОБОГАТИТЕЛЬНЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ	9
1.1 Обзор подходов к повышению эффективности производства	9
1.2 Существующие математические модели диагностирования технологических процессов	18
1.3 Набор информационных средств моделирования технологических систем	25
1.4 Технологические особенности управления процессом мокрого измельчения.....	28
1.5 Постановка задачи исследования.....	37
Выводы по первой главе.....	44
ГЛАВА 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ПРОХОДЯЩЕГО В АГРЕГАТЕ С НЕПРЕРЫВНЫМ ДЕЙСТВИЕМ В ЗАМКНУТОМ ЦИКЛЕ.....	45
2.1 Обобщенная характеристика процесса измельчения	45
2.2 Закономерности измельчения БАДДЕЛЕИТ-АПАТИТ-МАГНЕТИТОВЫХ РУД.....	47
2.2.1 Влияние на показатели обогатительных процессов минералогического состава.....	47
2.2.2 Влияние на эффективность протекания процесса измельчения наполнения мельницы пульпой.....	48
2.2.3 Роль расхода воды в технологический процесс измельчения	51
2.2.4 Заполнение мельниц шарами.....	52
2.2.5 Влияние износа мельничной защитной футеровки	54
2.3 Модель кинетики технологического процесса измельчения, протекающего в агрегате непрерывного действия, работающего в замкнутом цикле.....	57
2.3.1 Модель кинетики технологического процесса измельчения в шаровой барабанной мельнице, работающая в открытом цикле	57
2.3.2 Численный метод предсказания и уточнения для вычисления кинетического уравнения измельчающего процесса.....	62
2.4 Идентификация модели технологического процесса измельчения в шаровой мельнице работающей в открытом цикле.	72
2.4.1 Постановка задачи	72
2.4.2 Градиентный итеративный алгоритм по идентификации модели.....	73
2.4.3 Корректировка нарушений ограничений, возникающих при идентификации модели	78
2.5 Анализ статических и динамических свойств процесса измельчения	81
2.5.1 Динамические характеристики процесса измельчения	82
2.5.2 Математическая модель шаровой мельницы для канала «расход сырья –запас промпродукта в мельнице».....	84
2.5.3 Математическая модель классифицирующего аппарата по каналу «расход воды – плотность слива».....	87
2.5.4 Математическая модель магистрального пульпового насоса по каналу «угловая скорость двигателя – производительность пульпового насоса»	90
2.5.5 Модель процесса измельчения в цикле подготовки питания флотации	94
2.5.6 Схема модели в среде Matlab Simulink для проведения вычислительного эксперимента	96
Выводы по второй главе.....	103
ГЛАВА 3. ОЦЕНКА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ В ШАРОВОЙ БАРАБАННОЙ МЕЛЬНИЦЕ.....	104

3.1	ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ НА ОСНОВЕ СЕТИ ANFIS.....	104
3.2	МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ МАТЕРИАЛА	122
3.2.1	Постановка задачи	122
3.2.2	Подходы к моделированию процесса классификации	122
3.2.3	Модель процесса выделения продукта измельчения.....	125
3.2.4	Система оценки элементов матрицы разделения.....	127
3.3	МОДЕЛЬ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА.....	131
3.4	ПОСТРОЕНИЕ НЕЧЁТКО-ОПРЕДЕЛЁННОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ	136
3.4.1	Определение технологического извлечения поступающего в переработку сырья.....	136
3.4.2	Определение необходимого содержания класса крупности +0,071 мм на сливе классифицирующего аппарата.....	139
3.4.3	Определение содержания класса крупности -0,071+0 мм в пульпе	142
3.4.4	Определение удельной производительности мельниц.....	144
3.4.5	Определение производительности мельницы МШР 3,6 x 5.0	146
3.4.6	Определение плотности слива классифицирующего аппарата	147
	Выводы по третьей главе.....	150
	ГЛАВА 4. ПРИМЕНЕНИЕ ИМПУЛЬСНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОНЕЧНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ РЕГУЛЯРИЗОВАННОЙ ПРОГНОЗИРУЮЩЕЙ МОДЕЛИ УПРАВЛЕНИЯ.....	151
4.1	МОДЕЛЬ УПРАВЛЕНИЯ С ПРОГНОЗИРОВАНИЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИМПУЛЬСНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОНЕЧНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ (КИХ)	152
4.1.1	Измерительные устройства и технологическая установка	154
4.1.2	Регулятор	155
4.1.3	Определение задачи нелинейного программирования для расчёта регулятора КИХ	157
4.1.4	Простой модуль оценки	160
4.1.5	Определение задачи для расчета нелинейного программирования оценочного модуля	161
4.2	УПРАВЛЕНИЕ С ПРОГНОЗИРУЮЩИМИ МОДЕЛЯМИ ПРИ МЯГКИХ ОГРАНИЧЕНИЯХ	166
4.2.1	Определение задачи нелинейного программирования для расчета управления с прогнозирующими моделями с мягкими ограничениями.....	167
4.2.2	Выбор мягких ограничений	170
4.3	АЛГОРИТМ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТОДА С ПРИМЕНЕНИЕМ ВНУТРЕННИХ ТОЧЕК	171
4.4	ПРИМЕНЕНИЕ УПМ С РЕЖИМОМ МЯГКИХ ОГРАНИЧЕНИЙ ДЛЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ	176
4.5	СОСТАВ РЕГУЛЯТОРА	177
4.6	ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ КАК ОБЪЕКТ УПРАВЛЕНИЯ	178
4.7	АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ	180
4.8	МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВУХУРОВНЕВОЙ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЦЕССА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ РЕГУЛЯТОРА С ПРЕДСКАЗАНИЕМ	188
	ВЫВОДЫ.....	190
	ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ	191
	СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	192
	ПРИЛОЖЕНИЕ 1. АКТ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ	207

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы

Актуальность работы обусловлена повышением требований к качеству работы систем управления технологическими процессами промышленных предприятий, обладающих высокой энергоемкостью. Многочисленные исследования показывают, что важную роль в процессе управления технологическими процессами играет способность прогнозировать ход протекания процесса и возможность определять на этой основе управляющие воздействия. Поэтому для повышения качества работы системы автоматического управления необходимо применять методы проектирования, основанные на использовании регуляторов с предсказанием. Расчет данного типа регуляторов можно осуществлять на основе прогнозирующих нечётко-определённых импульсных моделей оценки состояний системы. Объектом исследования в работе является процесс измельчения в шаровой мельнице бадделеит-апатит-магнетитовых руд (БАМР) в цикле подготовки питания флотации, следующего, после стадии железорудного производства АО «Ковдорский горно-обогатительный комбинат».

Вопросы автоматизации и оптимизации процессов дробления и измельчения отражены в трудах Вердияна М. А., Егорова А.Ф., Марюты А. Н., Тихонова О. Н., Олейникова В. А., Козина В. З, Улитенко К. Я., Андреева Е. Е., Андреева С. Е., Линча А. Д., Хорста В.Е. и др.

Существенный вклад в теории автоматического управления технологическими процессами внесла школа академика Кафарова В.В. и его учеников, Егорова А.Ф., Вента Д.П., Перова В.Л., Дорохова И.Н., Мешалкина В.П., Палюха Б.В., Софиева А.В. Используя данные результаты, можно повысить качество систем управления технологическими процессами измельчения, в результате чего добиться большего выхода готового товарного концентрата, при текущем уровне затрат.

Целью работы является повышение производительности процесса измельчения и классификации в цикле подготовки питания флотации, путем разработки системы автоматического управления на основе прогнозирующих нечетко-определенных импульсных моделей оценки состояния системы.

Научная новизна:

1. Разработана система оценки параметров технологического процесса измельчения, учитывающая минеральный состав сырья.
2. Разработана математическая модель технологического процесса измельчения и классификации с применением нейро-нечетких сетевых моделей.
3. Разработана нечетко-определенная импульсная модель оценки состояния системы замкнутого цикла мокрого измельчения с классификаторами в цикле подготовки питания флотации.
4. Разработан алгоритм управления контуром мокрого измельчения на основе нечётко-определённых импульсных моделей оценки состояния системы.
5. Предложена двухуровневая система автоматического управления контуром мокрого измельчения. На нижнем уровне осуществляется регулирование технологическими параметрами контура мокрого измельчения. Верхний уровень управления формирует задание для нижнего уровня. Данная система автоматического управления позволяет учитывать изменение свойств исходного сырья.

Основная теоретическая значимость данной работы заключается в разработке системы управления процессом измельчения, применение которой приводит к повышению качества работы системы управления, что позволяет снизить себестоимости производства готового концентрата, в результате снижения энергии, времени и других ресурсов, используемых в процессе, а также получить продукцию более высокого качества.

Практическая значимость:

Разработана методика оценки параметров технологического процесса измельчения, учитывающая минеральный состав сырья.

Разработана методика построения модели управления контуром мокрого измельчения на основе прогнозирующих нечетко-определенных импульсных моделей оценки состояния системы.

Разработана система автоматического управления контуром мокрого измельчения, которая может быть рекомендована к использованию в промышленных технологических процессах.

Достоверность результатов исследования подтверждается результатами проверки на адекватность разработанных моделей и результатами проведенных экспериментов функционирования разработанной системы автоматического управления.

Личный вклад автора заключается в непосредственном участии в постановке задач исследования, получении исходных данных, в проведении основного объема теоретических и экспериментальных исследований, изложенных в диссертационной работе, анализе и оформлении результатов работы в виде научных публикаций и докладов на научных конференциях.

Объект исследования представлен в работе процессом доизмельчения бадделеит-апатит-магнетитовых руд в шаровой мельнице после стадии железорудного производства в цикле подготовки питания флотации на примере процессов обогащения полезных ископаемых в АО «Ковдорский ГОК».

Предмет исследования: информационное, математическое и программное обеспечение автоматизированной системы управления технологическим процессом измельчения, которое включает в себя математические модели процесса измельчения, протекающих внутри шаровых мельниц, метод формализации задачи управления, нацеленный на увеличение производительности в замкнутых циклах работы.

Задачи, решаемые в диссертационной работе:

- Разработка система оценки параметров технологического процесса измельчения, учитывающая минеральный состав сырья.
- Разработка математической модели технологического процесса измельчения и классификации с применением нейро-нечетких сетевых моделей.
- Проверка разработанной модели на адекватность.
- Обоснование применения нечетко-определенных импульсных моделей для оценки состояний технологической системы.
- Разработка функциональной структуры и алгоритма работы системы управления технологическим процессом на основе индекса оценки качества продукта.
- Апробация разработанной системы управления на примере системы автоматического управления технологическим процессом измельчения.

Методы исследования: методы исследования операций и системного анализа, методы нечетких множеств, методы математического моделирования и оптимизации технологических процессов, методы проектирования информационных систем.

Апробация работы: V Международная научная конференция «Фундаментальные проблемы системной безопасности». Елец, 2014; Международная научно-техническая конференция «Наука и образование». Мурманск, 2014; Школа-семинар молодых ученых «Фундаментальные проблемы системной безопасности». Елец, 2014.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Методика оценки состояний технологического процесса измельчения, учитывающая минеральный состав сырья.
2. Математическая модель технологического процесса измельчения и классификации с применением нейро-нечетких сетевых моделей.

3. Нечётко-определённая импульсная модель оценки состояния контуром мокрого измельчения, которая основана на использовании аппарата нечётких множеств.

4. Система автоматического управления контуром мокрого измельчения.

Публикации: по теме диссертации опубликовано 9 работ, отражающих основные результаты работы, в том числе 3 статьи в журналах из перечня ВАК, 3 статьи в рецензируемых российских научных журналах, тезисы 3-х докладов.

Автор приносит искреннюю благодарность всему коллективу института информатики и математического моделирования Кольского Научного центра РАН, своему научному руководителю и всем сотрудникам НИ РХТУ имени Д.И. Менделеева, за ценные рекомендации при написании данной работы.

ГЛАВА 1. ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ НА ГОРНО-ОБОГАТИТЕЛЬНЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ

1.1 Обзор подходов к повышению эффективности производства

Горно-обогатительное производство включает в себя следующие основные процессы:

- отгрузка и транспортировка добытой руды;
- рудоподготовки и обогащения;
- сушки и обезвоживания.

Наряду с нефтяной и химической промышленностью горно-обогатительная промышленность — это основа народного хозяйства большинства развитых, а также развивающихся стран.

Горно-обогатительные предприятия помимо самостоятельного производства, как например золотодобыча, являются также исходным звеном в цепи металлургического и химического производства, и во многом предопределяет качество и количество продукции произведенное данными отраслями. Расход энергоресурсов в основном производстве Ковдорского ГОКа показан в таблице 1.1.

Таблица 1.1 - Расход энергоресурсов в основном производстве
Ковдорского ГОКа

Расход энергоресурсов в основном производстве Ковдорского ГОКа						
Энергоресурсы	2006 г.	2007 г.	2008 г.	2009 г.	2010 г.	2011 г.
Топочный мазут, тыс. т	104,2	110,2	103,9	108	107,7	104
В том числе:						
ТЭЦ (производство тепловой энергии)	84,6	84,7	84,4	84,9	82,6	57,9
сушка железорудного концентрата	22	22,6	16,4	20,1	23,4	25,9
сушка апатитового концентрата	17,6	22,9	23,1	21	21,7	20,2
Теплоэнергия, тыс. Гкал	516,3	509,7	503,4	493,9	480,2	439,6
В том числе:						
отопление и горячее водоснабжение	167,8	155,7	139,9	143,7	158,2	134
флотовода(подогрев)	141,9	143,6	137,9	117,3	109,5	113,2
пар	206,6	210,4	225,6	232,9	212,5	192,4
Электроэнергия, млн кВт ч	580,7	618,9	629,8	622,4	648,7	654,3
В том числе:						
горные работы	61,2	64,4	64,4	60,5	58,7	60,9
дробление руды	32,6	34,1	31,8	33,1	35,4	32,9
железорудный концентрат (товарный)	231,8	226,6	228,7	231,2	224,3	231,3
apatитовый концентрат (то же)	255,1	293,7	304,8	297,6	330,3	329,2
бадделейтовый концентрат (то же)	17,8	11,3	8,9	17,7	31,6	33,1

Процессы рудоподготовки занимают основную позицию в горнорудном производстве по количеству потребляемой энергии, являясь весьма энергоемкими процессами. Рудоподготовка как правило включает в себя крупное, среднее и мелкое дробление, различные способы измельчения (в стержневых и шаровых мельницах) грохочение, классификацию в гидроциклонах и спиральных классификаторах, сгущение, флотацию, сушку и др.

Ковдорский ГОК является крупным потребителем энергоресурсов. В 2011 г. на собственные нужды израсходовано 754,5 млн кВт·ч электроэнергии, 439,5 тыс. Гкал тепловой энергии, 104 тыс. т топочного мазута. Основная доля расхода электроэнергии около 85 %, тепловой энергии около 70 %, мазута около 44 % приходится на переработку рудной массы (руда + техногенные пески) и производство товарных концентратов. Около 56 % топочного мазута расходует ТЭЦ на выработку теплоэнергии для нужд комбината.

К наиболее энергоемким процессам относятся дробление и измельчение рудной массы (электроэнергия), флотационное обогащение (тепловая энергия), сушка железорудного и апатитового концентратов (топочный мазут). На горных работах 55-58 % расхода электроэнергии приходится на водоотлив. В общей себестоимости товарной продукции (2011 г.) доля электроэнергии составляет 7,5-8 %, теплоэнергии 4-4,5 %, топочного мазута 8-8,2 % [1].

Последнее десятилетие деятельности Ковдорского ГОКа отмечено значительным ростом объемов добычи и обогащения минерального сырья. В 2011 г. доставлено на обогатительный комплекс и переработано 16,7 млн т руды из основного карьера и 4,6 млн т песков техногенного месторождения — 7 млн т/год апатит-штаффелитовых руд (вместо выбывающих мощностей техногенных песков). Общий объем годовой добычи и обогащения минерального сырья возрастет до 24-25 млн т.

Ниже в таблице 1.2. приводится удельный расход электроэнергии на крупное дробление и измельчение в переделе обогащения руды, кВт·ч/т руды [2].

Таблица 1.2 - Удельный расход электроэнергии на крупное дробление и измельчение

Месяц	Крупное дробление в комплексе рудной ЦПТ		Измельчение в стержневых и шаровых мельницах	
	2009 г.	2010 г.	2009 г.	2010 г.
Январь	0,066	0.042	9,42	7,48
Февраль	0.058	0,055	8.47	7,19
Март	0,059	0.051	8,68	7,60
I кв.	0.061	0.049	8,86	7,42
Апрель	0.055	0.046	7,73	7.17
Май	0.049	0.047	8.04	7.37
Июнь	0,048	0,053	8.04	7,52
II кв.	0.051	0.048	7,94	7,35
Июль	0,051	0.052	7.68	7.57
Август	0.046	0.048	8,34	7,62
Сентябрь	0.051	0.034	8.04	7.35
III кв.	0,049	0.045	8,02	7.51
Октябрь	0.051	0,042	7,45	7,79
Ноябрь	0.051	0.047	8.13	7.54
Декабрь	0.046	0,055	7.72	7.59
IV кв.	0.049	0.048	7.77	7,64
Год	0.053	0.048	8.14	7.48

Существующие технологические процессы на горно-обогатительных производствах характеризуются наличием неопределенностей различной природы, некоторые из которых являются взаимосвязанными и соподчиненными. Повышение эффективности данных процессов накладывает необходимость применения современных возможностей вычислительной техники, а также средств математического моделирования [3].

Как правило один отказ технически сложного и дорогостоящего оборудования горно-обогатительных предприятий оценивается сотнями тысяч, и зачастую миллионами рублей. Неисправности производственных систем также сопряжены с аварийными ситуациями, связанными с работой оборудования, систем управления и самих технологий [4].

Последствия неисправностей могут сказаться на производственном персонале и окружающей среде [5,6].

Вопросы, определяющую актуальность и важность вопросов повышения безопасности функционирования промышленных производств в работах [7,8,9].

Существует ряд основных терминов, которые встречаются в литературе, все они характеризуют работу, которая в большей или меньшей степени отклоняется от нормальной.

К таким понятиям в основном относятся:

Предельное состояние объекта – состояние в котором его последующее применение бессмысленно и опасно, в связи с высокой степенью износа

Неработоспособное состояние объекта - характеризуется неспособностью даже одного из элементов выполнять возложенную на него функцию

Работоспособное состояние объекта - определяется возможностью выполнения своих функций каждым из существующих элементов.

В исправном состоянии объект полностью соответствует критериям конструкторской и эксплуатационной документации.

На протяжении эксплуатации объект постепенно переходит из работоспособного состояния в состояние предельного износа, в некоторых случаях за счет имеющихся отказов и повреждений, т.н. дефектов [10]. Возможны также предаварийные и аварийные состояния объектов, применительно к рассматриваемому в работе технологическому процессу измельчения, возврат из которых возможен при необходимых управляющих воздействиях [11].

Эксплуатационно-технологические отказы, наряду с производственно-изготовительными и проектно-конструкционными отказами являются наиболее возможными причинами возникновения дефектов при работе технологических систем [9,12].

При этом, что касается эксплуатационно-технологических отказов, на раннем этапе диагностики возможно снизить значительный урон, который они

могут принести. В то же время задача прогнозирования таких отказов является как правило весьма сложной и неформализуемой.

Другие типы отказов могут быть нивелированы на этапе проектирования, а после внедрения за счет резервирования основного оборудования, что является несколько невыгодно экономически.

Также необходимо отметить возможные нарушения работы технологических процессов в следствии т.н. человеческого фактора, подразумевающего возможные ошибки обслуживающего персонала, в том числе в следствии недостаточно продуманного, или некачественно организованного взаимодействия с информационной системой автоматизированного управления технологическими процессами [13].

При этом попытки систематизировать и упорядочить возможный перечень неполадок на горно-обогатительных производствах, а также некорректные действия обслуживающего персонала, остаются достаточно сложной задачей, одной из причин которой является закрытость данных на различных субъектах производства.

В таблице 1.3 приведены основные данные, согласно работе [14] относительно причин возникновения аварий на промышленных производствах.

Таблица 1.3 - Основные причины аварий на крупных промышленных производствах

Причины аварий	Число аварий, %
Неудовлетворительное обслуживание	38
Ошибки оператора	26
Ошибки проектирования	4

Качественное решение, в контексте создания малоаварийных и возможно безаварийных производств, предполагает комплексный подход [11], состоящий из нескольких направлений:

1. Проектирование систем прогнозирования и диагностики развития аварийных ситуаций, работающих в автоматизированном режиме. При этом следует обеспечить их надежностью и быстродействием.

2. Разработка регламента ведения процесса, предусматривающего наиболее экономичные и безопасные режимы ведения процесса, однако это зачастую противоречит потребностям интенсификации производства [15].

3. Возможность создания систем управления технологическими процессами горно-обогатительных производств, которые способны к управлению критическими режимами существующих производственных процессов, находящихся возможно в предаварийном состоянии, функционирующих в автоматизированном режиме.

Чтобы избежать возможной технологической аварии подобная система, в случае невозможности перевода процесса в исправную область, также имеет возможность произвести останов данного технологического процесса и за счет необходимых управляющих воздействий переместить точку работы технологического процесса в область исправного состояния из области состояния предаварийного.

Существующие модели можно отнести к «мягким» и «жестким», интеллектуальным и алгоритмическим моделям соответственно.

Причины техногенных катастроф и аварий обусловлены:

- ростом сложности производства, с наличием опасных для жизни человека веществ, воздействующих на окружающую среду; применением новых энергоемких технологий;
- человеческим фактором, который выражается в низком уровне профессиональной подготовки. нарушениях трудовой дисциплины на производстве, нарушении производственных регламентов;
- снижением надежности технологического оборудования, несовершенством и устарелостью существующих технологических линий.

Ниже приводится описание и последствия техногенных катастроф [17]:

Авария на заводе по производству пестицидов в Бхопале 03.10.1984 г. (Индия). Погибло свыше 2 тыс. человек, более 200 тыс. человек серьезно пострадали.

Авария на хранилище сжиженных газов в Сан-Хуан-Иксуатепек 19.11.1984 г. (Мексика). Погибло свыше 500 человек, более 7 тыс. человек серьезно пострадали, эвакуировано около 200 тыс. человек.

Авария на Чернобыльской АЭС 26.04.1986 г. (СССР). В первые дни после аварии погибло 32 человека; Количество людей, умерших впоследствии, неизвестно. Эвакуировано свыше 130 тыс. человек, отчуждено от хозяйственной деятельности более 3 тыс. квадратных километров земли. Материальный ущерб оценить невозможно.

Авария на продуктопроводе в Башкирии 04.06.1989 г. (СССР). Погибло свыше 500 человек, серьезно пострадало около 1100 человек.

Прорыв плотины Киселевского водохранилища 14.06.1993 г. (Россия).

Погибло 12 и пострадало 6500 человек. Затоплено 69 квадратных километров поймы реки Каква, и жилых массивов г. Серова и других населенных пунктов. Ущерб составил 63,3 млрд. рублей (в ценах 1993 года) [17].

На угольных, химических, горнорудных предприятиях весьма высокая аварийность, связанная в основном в значительном физическом износе оборудования, его моральном устаревании, не соответствии современным требованиям безопасной эксплуатации.

Требования безопасности выдвигаются из-за необходимости производить сырье или готовый продукт производства наименее опасным, щадящим для экологии способом, так, например, промежуточный продукт, получаемый в ходе производства на некоторых предприятиях может оказаться значительно опаснее, чем готовый продукт.

Современное промышленное производство предполагает наличие актуальных средств интеллектуальной поддержки и принятия решений, для прогнозирования возникновения различных техногенных аварий, а также

оперативное управление предаварийными ситуациями, способными развиваться на промышленных производствах.

Используемые в настоящее время подходы заключаются в установке надежных элементов автоматизации и измерения, с применением систем, функционирующих на принципах искусственного интеллекта, работающих в автоматизированном режиме. Данный подход является информационно-управляющим и значительно отличается от технологического подхода, который основан на автоматизированном проектировании безопасных с точки зрения экологии надежных промышленных производств.

Данный подход обеспечивается за счет создания интеллектуализированных автоматизированных систем, для управления эксплуатационной надежностью и прогнозирования предаварийных ситуаций, а также диагностики возможных неисправностей.

Существующий в настоящее время подход, объединяющий в одну архитектуру управляющие системы, информационно-моделирующие системы, технические средства обработки информации и программные комплексы, основанный на принципах связанности, адаптивности, иерархичности и управляемости именуется как интеллектуальные интегрированные автоматизированные системы управления (ИАСУ). ИАСУ интегрируется в технических, математических, информационных и функциональных направлениях.

ИАСУ промышленных производств может быть функциональным компонентом ИАСУ предприятия. Структура управления промышленным предприятием, технологическими процессами и системами будет являться трехуровневой [18]. Она включает в себя распределенные системы управления технологическими процессами, их системами и промышленными производствами. В данных системах выполняются расчеты материальных, энергетических балансов промышленных производств, а также возможные подсистемы по управлению качеством продукции, технологической безопасности, экологичности производства. При этом данные подсистемы

являются самостоятельными и законченными системами, требующие собственной проработки.

Наличие какого-либо производства служит источником опасности для людей и окружающей среды, при этом существование производства определяет стохастическую природу различных опасностей, таким образом с определенной вероятностью присутствуют факторы риска и источники потенциальной опасности, приводящие к экономическому, социальному или экологическому риску. При этом детерминированный подход при проектировании технологических производств предопределяет риск, как количественную меру опасности производства для окружающей среды и человека. Основной задачей безопасного ведения технологических процессов является минимизация различного рода рисков.

На рисунке 1.1 представлены системы оценки воздействия на окружающую среду.



Рисунок 1.1 - Системы оценки воздействия на окружающую среду

Из рисунка следует, что и на этапе эксплуатации, и на этапе проектирования, должна быть обеспечена безопасность производства.

Безопасность на этапе проектирования обеспечивается:

- за счет создания энерго и ресурсосберегающих технологий;
- создание схем очистки стоков (если предусмотрено технологией);
- улучшение экологических норм производства [18].

Экологическая оценка функционирования природно-промышленных систем и комплексов на этапе эксплуатации должна обеспечивать регламентный уровень экологической обстановки вблизи производства. С этой целью создаются системы управления и контроля качества воздуха с использованием информационных технологий для прогноза загрязнения воздушной среды промышленными предприятиями и в случае возможных аварий на них [18].

Также, необходимо производить оценку вероятных негативных воздействий на человека и окружающую среду, вызванных функционированием промышленных объектов.

1.2 Существующие математические модели диагностирования технологических процессов

В регламентных условиях или близких к таковым, эксплуатации технологических процессов, рассматриваемых в литературе, как правило используются методы, строящиеся на эвристическом и статистическом представлении. В условиях создания широкого спектра объектов, целесообразно использовать математическое моделирование, т.к. данный подход эффективнее в вопросе диагностики неисправностей, которая рассматривается целевой функцией.

Ставя научные вопросы и их решения в условиях современных систем управления, работающих в компьютеризированном режиме, можно свести к минимуму нарушения режимов технологического производства и возникновение возможных отказов при этом.

Это подтверждается положительными характеристиками с ряда предприятий, где установлены снижения нештатных остановок производства

вследствие срабатывания защитных блокировок, либо частичным отказов используемого в технологическом процессе оборудования, за счет формализованного подхода к созданию систем прогнозирования возникновения опасных технологических ситуаций [11].

Особенность диагностики состояний в промышленном производстве осуществляется в условиях отсутствия возможности оценки параметров его текущего состояния непосредственно, диагностирование производится без входной подачи тестовых воздействий.

Наличие математической модели, позволяющая восполнить пробелы в информации об объекте диагностики является условием при создании системы идентификации и обнаружения неисправностей, работающей в автоматическом режиме. Текущие требования к подобным разработкам предполагают, как на стадии построения модели диагностики, так и на стадии реализации вовлечение возможностей современной вычислительной техники, т.к. построение данных моделей является ресурсоемким процессом. Работа модели основана на обработке информации как поступающей от технологического объекта в режиме реального времени, и находящихся в банках данных, так и априорной информации, расположенной в самой модели. Критериями, предъявляемыми к данным моделям, являются практическое удобство их использования, а также их полнота и достаточность в решении возникающих перед моделью задач.

Три группы моделей, применяемых в системе диагностирования, могут использоваться комбинированно либо раздельно. К ним относятся:

Модели в пространстве состояний

Аналитические модели. Модели, у которых выходные реакции исследуемого объекта являются событиями-следствиями, при этом входные воздействия являются причинами, которые их вызвали. Аналитические модели рассматриваются со свойствами причинности, которые характерны для динамических систем, где выделяются выходные и входные переменные [19-37].

Модели причинно-следственные использующиеся для задач диагностики технологических объектов

Среди основных видов моделей в данной группе значатся деревья событий, деревья отказов, направленные графы (ПНГ). Описание объекта в виде графа служит общим представлением для причинно-следственных моделей [38-99].

Изменения в текущем режиме работы переменных состояния являются качественными, но не количественными с использованием трехзначной логики, находящейся в базисе значений $+, 0, -$, при этом два соседних угла соединяются дугой ПНГ, которая показывает причинно-следственную связь. В случае изменения исходного узла дуги это приводит к изменению конечного узла дуги (то же изменение знака) дуга приобретает знак плюс, и в противоположном случае дуга приобретает знак минус. Также чтобы проанализировать текущую скорость, с которой происходят изменения добавляются весовые коэффициенты $\pm 1, \pm 10$.

Логические модели, используемые для задач диагностики непрерывных динамических систем

Логические модели характеризуются следующим: состояние объекта анализируют по величинам параметров контроля, при этом результатами данного контроля будут являться как правило оценки типа «в не допуске или в допуске», «в ненорме или в норме» [7,8,100-134].

В целом, в случае если сложная технологическая система будет являться объектом диагностирования, то для решения отдельных задач целесообразно использовать комбинацию описанных моделей, где каждая из которых будет предназначена для решения узкой задачи.

При этом возможные сценарии развития опасных состояний, в контексте прогнозирования значительного урона должны быть описаны, данное описание составляет определенную трудность. Одним из эффективных подходов является выделение гипотетически опасных элементов и ненадежных участков, с применением эргономичной и удобной в работе модели.

Переменные состояния — это зачастую гипотетические переменные, они не всегда измеряемы и имеют не всегда понятный физический смысл, однако они

необходимы для облегчения вычислений и вводятся, чтобы отобразить изменения в функционировании объекта.

Классическими методами весьма затруднительно решать некоторые задачи диагностики, таким образом метод пространства состояний является одним из возможных решений.

Параметрическая диагностика состояний, основанная на интервальном анализе

Данный метод предусматривает обнаружение и диагностику неполадок оценкой параметров модели и переменных состояния [138-142].

Схема параметрической диагностики предполагает наличие различных выходных и входных переменных X (это как правило значения измеряемых величин технологического процесса), ненаблюдаемых параметров и переменных Z , которые математическая модель технологического процесса F должна вычислить, и выходных переменных (КПД, скоростей превращения веществ и химических реакций, содержание различных веществ на различных стадиях производства, обозначается переменной Z), этим характеризуется технологический процесс P .

Нечеткие математические модели диагностики технологических процессов.

Метод разделения состояний

Если рассматривать любую техническую систему, не вдаваясь в физическую сущность протекающих в ней явлений, но как смену различных ее состояний, происходящих последовательно, расположенных на некотором временном интервале (t_0, t_k) , то состояние технологической системы в отдельно взятый момент времени t будет характеризоваться переменными $x_1, x_2, \dots, x_n$.

При этом дифференциальные уравнения, в методе разделения состояний, применяемых для линейных объектов, описывающих их поведение можно записать так:

$$\frac{dx}{dt} = Ax + b, \quad (1.1)$$

где x выражает вектор переменных состояния и как правило это вещественная концентрация

A – показывает выходные вещественные потоки, являясь матрицей коэффициентов.

b – вектор, который показывает входные вещественные потоки

t – величина времени.

Статический режим метода разделения состояний, имеет множество точек, и определяется частью системы (1.1) расположенной справа

$$Ax + b = 0. \quad (1.2)$$

Координаты вектора b и элементы матрицы A , являются определениями для диапазонов с параметрами выходных и входных потоков, как и режимы функционирования технологического процесса, которые заданы диапазонами переменных состояния.

Как правило присутствует система ограничений переменных состояния, которая определяет различный режим следующего типа:

$$x_{ik}^{(min)} < x_i < x_{ik}^{(max)}, (i=1, I; k=1, Ki) \quad (1.3)$$

также в векторной форме:

$$xk^{(min)} < x < xk^{(max)}$$

здесь: i – порядковый номер для переменного состояния; k – порядковый номер для режима технологической работы от i -ой переменной (рисунок 1.2).

		$x_{j1}^{(max)}$	$x_{j2}^{(max)}$	$x_{j3}^{(max)}$	
$x_{i2}^{(min)}$	2	α_2	α_4	α_6	$x_{i2}^{(max)}$
$x_{i1}^{(min)}$	1	α_1	α_3	α_5	$x_{i1}^{(max)}$
		1	2	3	
		$x_{j1}^{(min)}$	$x_{j2}^{(min)}$	$x_{j3}^{(min)}$	x_j

Рисунок 1.2 - Задание множества элементов алфавита состояний [4]

Нечеткие множества в основе моделей разделения состояний

Теория нечетких множеств, в контексте построения дискретных моделей, основывается на представлении о том, что переменные состояния объекта

являются размытыми для разных людей, и границы переходов их состояние в состояние отсутствуют.

Принцип создания модели управляющего объекта с применением нечетких множеств заключается в закладывании в модели действий оператора-технолога, который при определенной входной ситуации сможет определить критерии неправильной работы технологического процесса и принять необходимое решение к их устранению [16]. Таким образом каждая ситуация S_i поставленная в соответствие, согласно набору возможных технологических ситуаций S_s , формирует продукционную систему, которая моделирует действия оператора-технолога, и принимает некоторые управляющие решения R_i .

Согласно значениям переменных состояния, которые описывают объект, можно оценить состояние диагностируемого объекта, с использованием нечетких множеств. При этом некоторое эталонное состояние сравнивается с текущим состоянием и осуществляется интерпретация, как степень нечеткого равенства, для определения состояния технологического объекта.

Эталонными значениями данного элемента алфавита состояний можно назвать значения функций принадлежности переменных состояния, для каждого элемента алфавита состояний.

Чтобы задать нечеткое множество некоторых эталонных состояний необходимо сформировать множество на основе ограничений.

Таким образом можно получить, после разбиения, множество нечетко определенных элементов алфавита состояний.

В соответствие каждой из переменных состояний x_i ($i \in I = \{1, 2, \dots, p\}$) ставится лингвистическая переменная, описываемая, как тройка $\langle y_i, T_i, D_i \rangle$,

где y_i - наименование переменной состояния;

$T_i = \{T_{1i}, T_{2i}, \dots, T_{Mii}\}$ - терм-множество лингвистической переменной y_i ,

элементы которого соотносятся с отдельными интервалами переменной состояния x_i ; M_i – количество возможных значений лингвистической переменной или количество интервалов;

D_i – базовое множество лингвистической переменной y_i .

Отдельная функция принадлежности ставится в соответствие каждому отдельному интервалу переменной состояния, после этого за ним закрепляется элемент терм-множества (рисунок 1.3) [20,25].

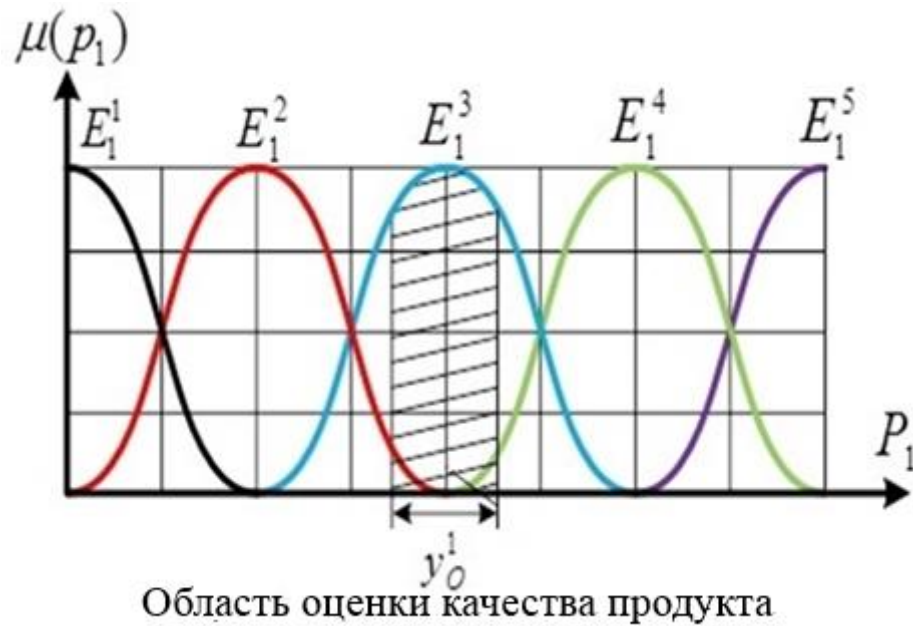


Рисунок 1.3 - Задание в алфавите состояний множества нечетко-определенных элементов

В случае описания типовых значений переменных состояния, их также можно обозначить ситуациями, в целях удобства эксперт может пользоваться словесными описаниями признаков, фактически являющихся некоторыми значениями лингвистических переменных.

С целью описания термов T_{ij} ($j \in L = \{1, 2, \dots, M_i\}$), которые соответствуют значениям y_i , можно использовать нечеткие переменные $\langle T_{ij}, D_i, \mathcal{C}_{ij} \rangle$, то есть T_{ij} опишется нечетким множеством $\mathcal{C}_{ij}$ в базовом множестве D_i :

$$\mathcal{C}_{ij} = \{ \langle \mu_{\mathcal{C}_{ij}}(d)/d \rangle \}, d \in D_i \quad (1.4)$$

где $\mu_{\mathcal{C}_{ij}}(d)$ - степень принадлежности некоторого элемента d нечеткому множеству $\mathcal{C}_{ij}$.

Нечеткой ситуацией $\tilde{S}$ именуется нечеткое множество второго уровня:

$$\tilde{S} = \{ \langle \mu_{\tilde{S}}(y_j)/y_j \rangle \}, y_j \in Y_i, \quad (1.5)$$

где $\mu S(y_j) = \{ \langle \mu_{\mu s}(y_j) (T_{ij}) / T_{ij} \rangle \}$.

1.3 Набор информационных средств моделирования технологических систем

Далее рассмотрены три класса коммерческих программных инструментальных средств, используемых для моделирования различных промышленных систем, для прогнозирования возможных нарушений и причин их возникновения в технологических процессах.

Универсальные системы компьютерной математики, средства (УИСКМ) CASE (computer aided process engineering), системы управления базами данных, различные языки программирования и интегрированные компьютерные среды для разработки программного обеспечения.

CASE – это использование методов моделирования систем для последующего изучения технологических процессов, с позиции разработки, взятых как одно целое.

Основными элементами CASE-средств:

- базы данных основных параметров технологических систем, служащие для автоматизированного нахождения параметров имитационных моделей технологических систем;
- средства имитационного моделирования, решающие задачи различного уровня сложности;
- средства интеграции отдельных элементов CASE в единую АИС, включая также управление интерфейсами.

Прогнозирование состояния технических систем обычно осуществляется с применением имитационных моделей динамического и статического функционирования. Как пример можно привести известные коммерческие CASE средства имитационного моделирования технологических систем:

- модели технологических процессов в системе VTPLAN (BAYER),
- имитационное моделирование технических систем в ASPEN PLUS.

Важно отметить, для подобных программных средств источником информации являются данные систем управления технических систем.

Как пример программного средства управления данными по интеграции отдельных элементов CASE в одну АИС может быть среда ProcessNet (BASF), созданную по технологии mainframe. Данная среда обладает общим интерфейсом и дает возможность передавать данные с результатами работы из программы в программу, а также создавать отчеты.

Существует целый ряд пакетов программ служащих для автоматизации математических расчетов, а также УИСКМ: MatLab, Gauss, Eureka, TK66 Solver! Derive, MathCAD, Maple V, Mathematica, Statistica и др.

Особое место среди УИСКМ, занимает программный пакет MatLab (MathWork). MATLAB — является интерактивной средой с высокоуровневым встроенным языком программирования, позволяет разрабатывать алгоритмы, анализировать данные, создавать приложения и модели, имеет множество различных возможностей для численных расчетов и их визуализации в виде полученных результатов [143].

Сейчас MatLab возможно находится за пределами компьютеризированной матричной системы и является вероятно одной из самых продуктивных УИСКМ. Встроенные в Matlab|Simulink математические функции, инструментарий и язык позволяют исследовать различные подходы и получать возможные решения несколько быстрее, чем при использовании традиционных языков программирования, как например Java или C/C++ или применения электронных таблиц. Matlab может использоваться в областях автоматизации процессов тестирования и измерений, обработке сигналов, связи, обработке видеоданных и изображений, моделировании систем управления технологическими процессами в блоке Simulink, вычислительная биология и другие сферы.

Система MathWorks MatLab возможна к применению с целью расчетов в совершенно разных отраслях науки и техники и активно используется в практике применения при математическом моделировании разнообразных систем. Отчасти за счет наличия мощного блока расширений Simulink, необходимого для решения разнообразных задач при блочном моделировании динамических систем.

Ядро системы MathWorks MATLAB дает возможность упростить работу с матрицами аналитических, комплексных и реальных типов данных, а также с таблицами поиска и структурами данных. MATLAB имеет функции встроенной линейной алгебры, такие, как LAPACK, BLAS, функционал для выполнения работы с полиномами, быстрое преобразования рядов Фурье FFTW, возможностей численного решения дифференциальных уравнений, различные математические библиотеки под Intel MKL, функции базовой статистики.

Среди преимуществ системы возможно отметить ее расширяемость и некоторую ее открытость таким образом есть возможность для создания библиотек из различных файлов для возможности реализации нетрадиционных задач. Наличие в системе Matlab готовых библиотек, также можно отнести к ее плюсам.

Текущая актуальная версия системы MatLab R2016.

Переходя к основным требованиям при выборе языка программирования при создании АИС, сформулировав их исходя из потребности в наличии математического аппарата для логико-лингвистических моделей (ЛЛМ) и теории нечетких множеств (ТНМ) программный комплекс, воспроизводящий алгоритмы создания и работы ЛЛМ, представляет собой диалоговую интеллектуальную систему, в устройство которой входят интеллектуальный блок общения с экспертами и исследователями, блок вывода решений. База набора правил. В связи с этим язык программирования отвечает следующим критериям:

- возможность разработки удобных и эргономичных интерфейсов;
- поиск ошибок и их устранение в режиме отладки программ;
- легкость интеграции с мощными СУБД;
- удобство и простота в реализации математических расчетов.

Таким образом для возможного решения задач вероятно подходят языки программирования 4-го поколения, и их ранние версии, как например объектно-ориентированные высокого уровня языки программирования имеющие

встроенную среду разработки и систему управления базами данных. Ниже представлены некоторые из этих языков:

- Object Pascal (Inprise Corporation), среда разработки Delphi, интеграция с СУБД Paradox,
- Visual Basic (Microsoft), интеграция со средой разработки FoxPro, и с СУБД.
- Visual C++ (Inprise Corporation), интеграция с СУБД Paradox, среда разработки C++ Builder.

При моделировании технологических систем представленные программные продукты могут быть в равной степени применены, так как в целом близки по своим возможностям.

При этом отдельные свойства данных языков, способные оказать влияние при выборе конкретного языка в роли инструментального средства создания программных средств.

Visual C++ - широкие возможности по управлению аппаратными ресурсами ЭВМ, что определяет способность к интеграции создаваемого программного обеспечения с промышленными системами.

Visual Basic – удобен для формирования графических интерфейсов, интегрируется с большинством программ Microsoft Office;

Object Pascal – удобен для воплощения вычислительных алгоритмов, обладает хорошими средствами отладки разрабатываемых программ, интегрированных в Delphi.

Тем не менее выбор программных инструментов всегда остается за разработчиком, принимая во внимание его профессиональные навыки и существующие предпочтения.

1.4 Технологические особенности управления процессом мокрого измельчения

Технологический процесс подготовки питания флотации включает в себя доизмельчение в шаровых барабанных мельницах технологических хвостов железорудного производства (в составе которых апатит-бадделеитсодержащие

пески и другие минералы), подающихся гидротранспортной сетью с магнито-обогажительной фабрики (МОФ) в виде пульповой смеси (взвесь твердого в воде).

Процесс доизмельчения относится к подготовительным технологическим операциям перед последующим процессом флотации.

При дроблении и измельчении раскрытие минералов происходит вследствие разрушения сростков минералов и породы. При этом образуется механическая смесь, содержащая частицы различной крупности и минерального состава. Эта смесь разделяется по крупности при классификации или грохочении.

Хвосты МОФ, поступающие в процесс доизмельчения, имеют различный минералогический состав: процентное содержание основных минералов и примесей. Минералы, входящие в состав технологических хвостов, обладают различными физико-механическими свойствами: крепость; прочность на сжатие и растяжение; упругость и т.д.

Технологические хвосты МОФ также характеризуются гранулометрическим составом – содержанием различных классов крупности имеющих частиц.

Рассмотрим процесс измельчения рудных материалов, происходящий в агрегате мокрого измельчения, непрерывного действия. Внутри барабана непрерывно подается измельчаемый материал, который проходит вдоль него и, подвергаясь воздействию дробящих тел, измельчается ударом, истиранием и раздавливанием. Измельченный продукт непрерывно разгружается [144].

Выходной продукт мельницы поступает в классифицирующий аппарат, где происходит разделение материала по крупности: песковая фракция $Q_{песк}$; готовый продукт измельчения $Q_{гот}$. [145].

Песковая фракция поступает обратно в процесс измельчения, образуя циркулирующую нагрузку мельницы. Готовый продукт измельчения поступает в технологические процессы обогащения (флотация).

Для повышения эффективности работы классифицирующего оборудования в процесс классификации подается вода (рисунок 1.4) [146].

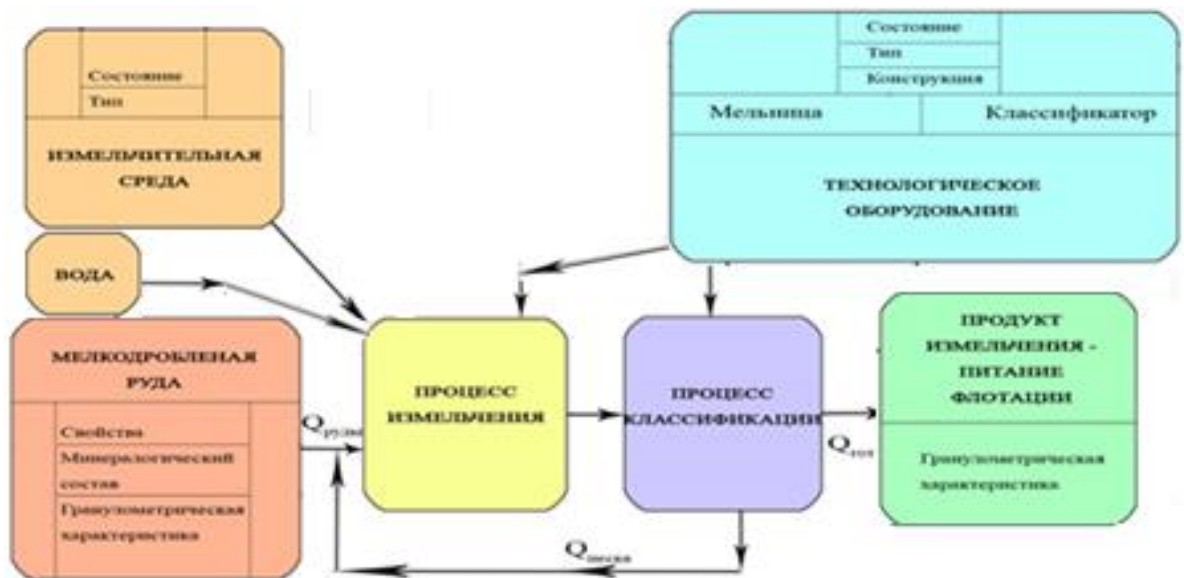


Рисунок 1.4 - Обобщенная технология измельчения

Чтобы технологический процесс флотации протекал максимально эффективно, необходимо обеспечить регламентное соотношение плотности пульпы и ее крупности, содержание расчетного класса – 0,071 мм в конечном сливе, поступающем после сгущения на флотацию.

Существуют следующие основные способы измельчения и разрушения твердого минерала до необходимых частиц:

- удар
- истирание
- раскалывание
- размалывание

В мельнице происходят различные комбинации описанных способов [147].

В цикле подготовки питания флотации доизмельчение в шаровых барабанных мельницах является операцией, связанной с уменьшением крупности исходного материала, обновлением, и раскрытием минеральных зерен.

Крупность измельченных частиц в шаровой барабанной мельнице, как правило, не превышает 1 мм, при этом определяющим классом служит крупность -0,071 мм. Существует как минимум четыре типа циклов измельчения (рисунок 1.5). Это открытый, замкнутый, замкнутый с предизмельчением и замкнутый, с использованием двух гидроциклонов.

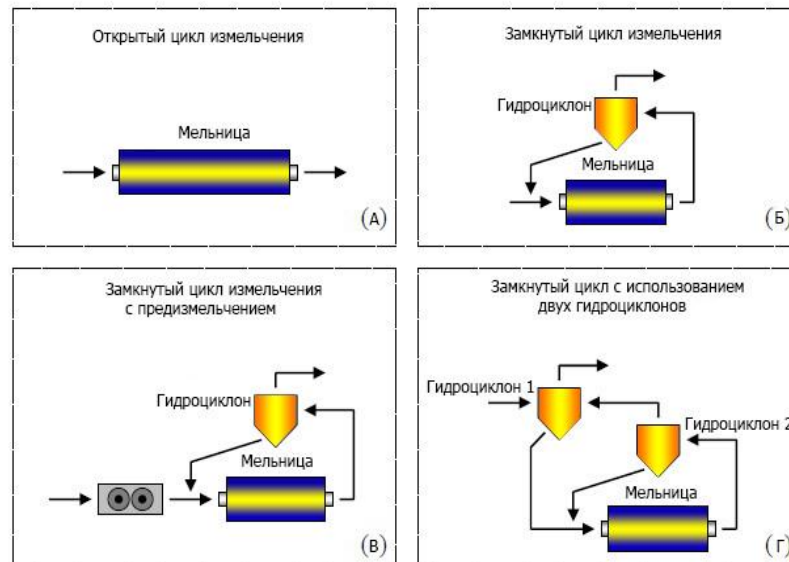


Рисунок 1.5 - Типы циклов измельчения [148]

Мельница состоит из полого барабана, который вращается на торцевых цапфах, вокруг своей горизонтальной оси.

Во время вращения барабана загруженная внутри дробящая среда, за счет центробежной силы поднимается на определенную высоту, затем перекатываясь и падая, измельчает находящуюся внутри руду раскалыванием, ударом и истиранием (рисунок 1.6).

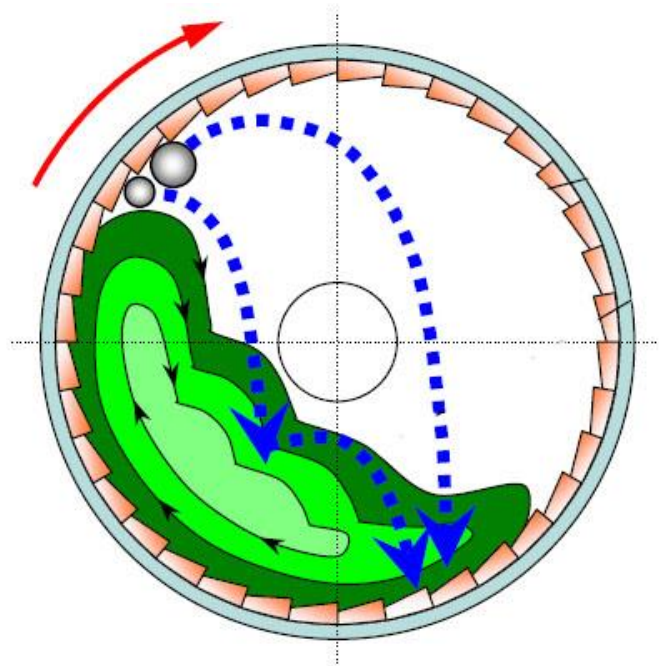


Рисунок 1.6 - Динамика шаровой мельницы [148]

По видам дробящей среды, обычно применяются мельницы самоизмельчения, стержневые, шаровые и галечные. В мельницах

самоизмельчения, дробящая среда выглядит большими кусками, непосредственно самой руды; в стержневых мельницах, это стальные стержни; в шаровых-чугунные или стальные шары; в галечных-кремниевая окатанная галька.

Способ мокрого измельчения применяют при потребности в получении мелкодисперсных фракций минералосодержащих материалов для дальнейших операций обогащения [149].

Траектории движения мелющих тел, в шаровой мельнице являются разнонаправленными, при этом основным движением принято считать водопадное, каскадное и смешанное движения тел измельчения.

Наиболее общим способом определения производительности мельниц служит число тонн исходного сырья пропущенного в единицу времени через мельницу, при этом масса материала расчетной крупности, является искомым значением. Расчет ведется по крупности выходного продукта измельчения по классу -0,071 мм.

В число факторов, определяющих производительность шаровых мельниц, входят:

- измельчаемость сырья;
- крупности входящего сырья и измельченного промпродукта;
- количество оборотов мельницы и степень заполнения ее мелющими телами;
- конструктивные особенности мельницы, формы и материала футеровочного покрытия мельницы;
- разжижение технологической пульпы в мельнице, производительность классификатора;

На обогатительных фабриках производительность мельниц по классу -0,071 мм на 1м³ составляет 0.9 – 1.5 т/ч [151-153].

Для грубого, а также тонкого измельчения рудных материалов на различных предприятиях в основном используются ножевые, шаровые и стержневые мельницы, при этом в ножевых мельницах процесс измельчения происходит в

узком (до 0,5 мм) зазоре, между неподвижными ножами статора и вращающимися ножами ротора.

Размеры и тип мельниц определяются их геометрическими характеристиками, и способом вывода из мельницы готового продукта измельчения, как например, через решетку или сквозь полую цапфу, в случае центральной разгрузки.

Существуют длинные мельницы, где рабочая длина превышает значительно внутренний диаметр барабана мельницы без футеровки (далее рассматривается в работе) и короткие мельницы, у которых соответственно длина будет короче внутреннего диаметра.

Существуют переделы измельчения, где после нескольких стадий дробления, руда направляется сначала в стержневую мельницу, имеющую как правило более равномерное измельчение, а далее в шаровую мельницу для доизмельчения, перед стадией, например, мокрой магнитной сепарации.

Использование шаровых барабанных мельниц возможно, как в открытом, так и закрытом циклах, в последнем случае она работает с классификатором, в данной работе, далее будет рассмотрен гидроциклон в качестве классифицирующего аппарата.

Механика измельчения в мельнице, как правило выглядит как воздействие внешних сил на рудный материал, направленное на различные его дефекты, такие как трещины, ослабленные сечения, по которым разделение происходит наиболее эффективно.

Под степенью измельчения понимается отношение входного гранулометрического состава продукта измельчения (руды крупной, либо мелкоизмельченной) к выходному (пульпы).

Время измельчения материала в мельнице соотносится с плотностью пульпы, и чем она плотнее в мельнице, тем медленнее будет ее движение по всей длине мельницы. Пульпа это взвесь минеральных частиц в воде, как правило равномерно распределенная по всему объему. Чем дольше материал находится в мельнице, тем сильнее степень его измельчения. Под степенью измельчения

понимают отношение размеров кусков (среднее значение) исходного материала к размеру кусков продукта выхода из мельницы.

$$i = \frac{D_{\max}}{d_{\max}} - \frac{D_{cp}}{d_{cp}} \quad (1.6)$$

где $D_{\max}$ и $d_{\max}$ - диаметры кусков материала, до и после измельчения; D_{CP} и d_{CP} — величина диаметров кусков материала до и после измельчения [148].

В случае измельчения сырья на нескольких стадиях, степень измельчения будет равна перемноженным в отдельных стадиях степеням измельчения:

$$i_n = \prod_{k=1}^n i_k, k=1..n \quad (1.7)$$

где n – количество стадий измельчения.

Рассмотрим технологию измельчения на одной из секций отделения подготовки питания флотации для постановки задачи оптимального управления процессом измельчения [154-156].

Технологические хвосты мокрой магнитной сепарации магнитообогатительной фабрики (МОФ) являются исходным сырьем апатитово-бадделиитовой обогатительной фабрики (АБОФ) и подаются на АБОФ по пульпопроводу с использованием аккумулирующей емкости и далее на батарею гидроциклонов для первичного обесшламливания.

Пески с гидроциклонов проходят две стадии грубой классификации на стационарных и вибрационных грохотах и самотеком поступают в пульподелитель цикла доизмельчения и затем распределяются по мельничным зумпфам.

Далее пульповая смесь из мельничного зумпфа насосами ГрАК 1400/40 подается на гидроциклоны ГЦ-710 «Кавекс» (рисунок 1.7), пески с которых идут на доизмельчение в шаровые мельницы МШР 3600х5000, работающие в замкнутом цикле с данными гидроциклонами.

Таким образом, пески гидроциклонов ГЦ-710 в свою очередь образуют циркулирующую нагрузку для мельниц.

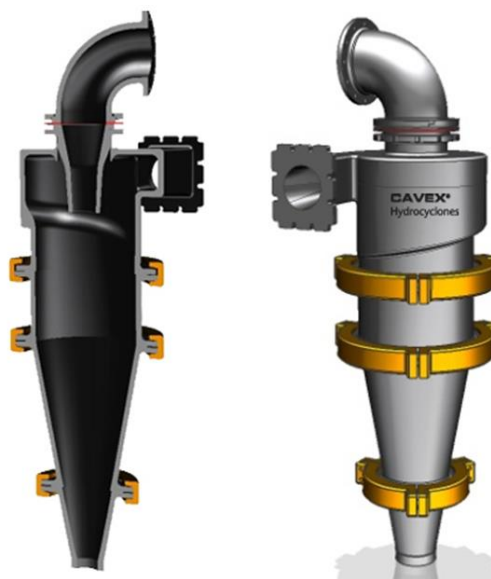


Рисунок 1.7 - Гидроциклон Cavex 710

Слив гидроциклонов ГЦ-710 в дальнейшем проходит еще две стадии гидравлической классификации, после чего объединяется с подрешетным продуктом грохотов и направляется на сгущение, где сгущенный продукт будет являться исходным питанием флотации.

Эффективность работы гидроциклона контролируется по классу $-0,071$ мм. Основные входные факторы, влияющие на показатели работы флотации, это крупность и плотность исходного питания флотации, а также обогатимость питания и содержание ценного компонента, колеблемость данных показателей.

Установленный на фабрике пробоотборник типа ПРО-1А, предназначенный для отбора проб пульпы на обогатительных фабриках, может использоваться в системах автоматизированного отбора и транспортирования проб в экспресс-лабораторию [155,156].

Контур, в котором шаровая мельница работает в замкнутом цикле с гидроциклоном, представлена на рисунке 1.8.

измельчающих агрегатов, работающих в замкнутом цикле величина изменения скорости расхода возврата песков [147].

В исследованиях профессора Фишера еще в 1904 г. представлены теоретические особенности работы стержневых и шаровых мельниц, где показано, что руда, которая находится в мельнице, измельчается как правило не истиранием. А ударами падающих шаров или стержней [157].

Также в исследованиях Г.А. Хана и Л.Б. Ливенсона было определено, что на долю истирания приходится не более 10% от всей энергии измельчения, в то же время основная энергия по разрушению материала производится падающими стержнями или шарами. Профессором Девисом изложены основные элементы баллистики движения тел дробления [147]. Современные представления по теоретическим основам работы барабанных мельниц приведены в работах В.А. Олевского, В.А. Перова, С.Е. Андреева и др. [16, 134, 148-154, 157-160].

1.5 Постановка задачи исследования

Сравнительная оценка моделей, которые используются для оценки состояний, приводится в следующей таблице 1.4.

Таблица 1.4 - Сравнительная оценка моделей для оценки состояний

		ХАРАКТЕРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МОДЕЛЕЙ							
		Метод построения			Целесообразность применения			Иерархический уровень применения в диагностике технологий	
МОДЕЛИ ДИАГНОСТИКИ		экспериментальный	аналитический	анализ	для отказов оборудования	для отказов систем управления	для технологических нарушений	первый (технология)	второй (аппаратные связи)
ЛОГИЧЕСКИЕ (РЕГУЛЯРНАЯ ЛОГИКА)		★			★	★	★	★	★
НЕЧЕТКИЕ ЛОГИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ		★			★	★	★		★
БАЙЕСОВСКИЕ МОДЕЛИ		★			★	★	★	★	★
ПРИЧИНО-СЛЕДСТВЕННЫЕ МОДЕЛИ	ПНГ	★	★		★	★	★	★	★
	ДО	★			★	★			★
	ДС	★			★	★			
МОДЕЛИ ПРОСТРАНСТВА СОСТОЯНИЙ		★	★	★			★		
ИНТЕРВАЛЬНЫЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ		★	★	★			★	★	
ДИСКР. НЕЧЕТКО-ОПРЕДЕЛЕННЫЕ МОДЕЛИ СОСТОЯНИЙ		★	★	★	★	★	★	★	★

В настоящее время существуют достаточно много различных моделей в решении проблемы определения состояний ТП [161,162].

Анализ указанных моделей показал следующие их характерные особенности:

- диагностика состояний осуществляется на основе ограничений, которые накладываются на переменные процессов. При этом возникают проблемы в определении того, какое входное воздействие вызвало выход из ограничений. В большей степени это имеет отношение к интервальным параметрическим моделям и моделям пространства состояний. В меньшей – ко всем остальным, так как в этих моделях заложена многоальтернативность определения первопричин;

- модели булевой, Байесовские модели требуют обработки значительного экспериментального материала, а также постоянной адаптации в силу квазистационарности режимов работы ТП и являются вероятностными аппроксимационными оценочными моделями и со строго формальных позиций в них не учитываются фундаментальные физико-химические законы протекания ТП;

- модели пространства состояний и интервальные модели в основной своей массе построены на основе физико-химических законов. Однако их применение может привести к большим временным издержкам, что недопустимо в решении задач диагностики.

Во всех выше перечисленных моделях количество различных состояний определяется на основе анализа внештатных производственных ситуаций, то есть эмпирическим путем. Такой подход требует больших трудозатрат. Кроме того, количество состояний трудно перечислить – различные состояния описываются различными наборами переменных, что приводит к размытости формального описания состояний, размытости границ состояний.

Все это заставляет искать новые решения в задаче определения состояний ТС. В данной работе развивается направление интеллектуализации процессов принятия решений на основе мягких вычислений – нечёткой логики.

Исследуемый объект характеризуется наличием неопределенностей, обусловленных недостатком знаний. В таких случаях наиболее перспективной формой использования знаний в настоящее время является приложения теории нечётких множеств. Преимуществом использования такого подхода является возможность построить сравнительно точные модели, когда теоретические выкладки отсутствуют, либо громоздки или сложны.

Далее, для постановки задачи исследования, рассмотрена технология измельчения в шаровой мельнице, которая сводится к следующим операциям: - хвосты железорудного производства с магнито-обогажительной фабрики Ковдорского ГОКа насосами пульпонасосной станции ПНС подаются на апатито-бадделеитовую обогажительную фабрику (АБОФ). Из пульповой аккумулирующей емкости АБОФ питание подается на пульподелитель, проходя через секцию магнитных сепараторов, направляется в промежуточный зумпф, откуда пульповыми насосами подается на гидравлическую классификацию в гидроциклоны, пески с которых направляются на доизмельчение в шаровую мельницу МШР 3600x5000 [185].

Слив мельницы направляется в мельничный зумпф, где в целях достижения необходимой плотности смешивается с водой и, в дальнейшем, подается на классификацию в гидроциклоны ГЦ-710, пески которых являются циркулирующей нагрузкой мельницы. Сливы гидроциклонов объединяются и, после промежуточных операций, являются исходным питанием флотации.

Ниже показана технологическая схема подготовки питания флотации (рисунок 1.9).

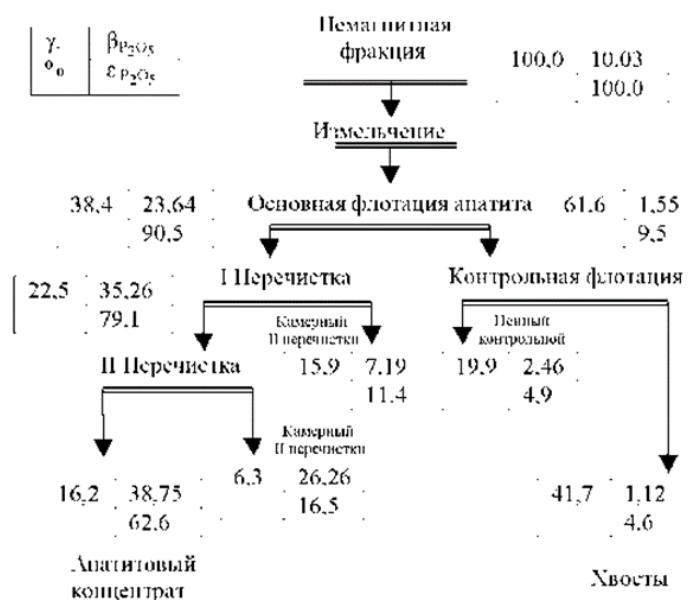


Рисунок 1.9 - Технологическая схема подготовки питания флотации [166]

Технологический процесс измельчения мелкодробленых бадделеит-апатит-магнетитовых руд (БАМР) в шаровой барабанной мельнице, работающей в замкнутом цикле, характеризуется неопределенностью параметров функционирования статистической и не статистической природы. Это связано с широким спектром различных возмущающих воздействий и сложным характером влияния этих воздействий, а также неполнотой или отсутствием знаний о физико-химических параметрах процесса [3,4].

Гранулометрический и химический состав питания флотации приведен в таблице 1.5 [155].

Таблица 1.5 - Гранулометрический и химический состав питания флотации

Класс крупности, мм	Выход, %	Содержание, %		Извлечение, %	
		P ₂ O ₅ ,	MgO	P ₂ O ₅ ,	MgO
+0,2	8,0	40,0	0,85	8,3	4,9
-0,2+0,16	15,6	40,19	0,86	16,2	9,8
-0,16+0,10	26,9	39,87	0,99	27,7	19,4
-0,10+0,071	11,4	39,64	1,62	11,7	13,4

Продолжение таблицы 1.5

Класс крупности, мм	Выход, %	Содержание, %		Извлечение, %	
		P ₂ O ₅ ,	MgO	P ₂ O ₅ ,	MgO
-0,071+0,05	14,2	38,79	1,30	14,3	13,4
-0,05	23,9	35,64	2,25	21,8	39,1
Итого	100,0	38,70	1,38	100,0	100,0

Статистическая неопределённость и неопределённость в знаниях объясняется:

- отсутствием возможности определения функций отбора и разрушения. Основная причина заключается в изменении свойств сырья. Свойства рудного тела зависят от множества факторов, и так как постоянно меняется исходная руда, то соответственно меняются параметры процесса измельчения, следовательно, меняются функции отбора и разрушения;
- сложностью определения фракционного состава.

Это порождает проблемы управления процессом измельчения. В настоящее время для преодоления возникающих при этом трудностей, создаются адаптивные системы управления. Адаптивные системы могут быть реализованы на основе различных подходов.

В данной работе осуществляется аппроксимация на основе нейро-нечеткого подхода для функций разрушения и отделения.

Применяется импульсная модель процесса. Данная модель предполагает последовательную коррекцию динамических свойств, не используя активного воздействия на систему, фиксируя отклик системы и входные возмущения, в моменты отсчетов.

В работе предлагается для оценки динамических свойств использовать индекс оценки качества готового продукта измельчения и классификации.

В качестве индекса оценки качества готового продукта используется степень нечёткого равенства между областью центра оценки качества готового продукта и текущим состоянием системы.

Под центром оценки качества готового продукта измельчения и классификации подразумевается его полное соответствие регламентным значениям по степени крупности и по величине плотности.

Индекс оценки качества строится на основе двух оценок:

- степени нечёткого включения ситуации $\tilde{S}_i$ в ситуацию $\tilde{S}_j$ и обозначается $\nu(\tilde{S}_i, \tilde{S}_j)$ (нечёткая импликация) и определяется выражением:

$$\nu(\tilde{S}_i, \tilde{S}_j) = \& \nu(\mu_{S_i}(T), \mu_{S_j}(T)), \text{ здесь } \nu(\mu_{S_i}(T), \mu_{S_j}(T)) = \& (\mu_{\mu_{S_i}(T)}(E_k) \rightarrow \mu_{\mu_{S_j}(T)}(E_k));$$

- степени нечеткого равенства: $In(\tilde{S}^*)_{\tilde{S}_0} = \nu(\tilde{S}^*, \tilde{S}_0) \& \nu(\tilde{S}_0, \tilde{S}^*)$. Степень нечёткого равенства определяет индекс оценки качества продукта. По другому можно сказать – импликация в две стороны $\nu(\tilde{S}^*, \tilde{S}_0) \square \nu(\tilde{S}_0, \tilde{S}^*)$ - нечёткая эквивалентность

По-другому можно сказать – импликация в две стороны - нечёткая эквивалентность.

В работе отмечается, что решение задачи снятия неопределенности постоянно развивается, исследуются различные методы. Это находит широкое отражение и в периодической печати и в научных исследованиях, отражаемых в работах последних лет.

В работе для решения задачи идентификации состояний и управления технологическим процессом измельчения в цикле подготовки питания флотации предложено применить методы искусственного интеллекта, позволяющие за счет заложенных алгоритмов адаптации и обучения минимизировать погрешность модели, которая связана с неполнотой или отсутствием информации.

При создании системы автоматического управления процессом доизмельчения технологических хвостов железорудного производства в цикле подготовки питания флотации необходимо решить данные задачи [3,4]:

1. Обосновать применение нечетко-логических моделей для оценки состояний объекта управления в условиях неопределенности процесса принятия решений и разработать модель доизмельчения БАМР с использованием методов нечеткой логики и нейро-нечетких сетей. Проверить адекватность разработанной модели.

2. На основании анализа современных подходов для принятия решений для управления сложным динамическим объектом, функционирующим в условиях неопределенности необходимо разработать функциональную структуру и алгоритм работы системы автоматического управления.

3. Разработать комплекс программ для целей управления качеством конечного продукта и провести апробацию разработанной системы управления на примере автоматической системы управления процессом измельчения.

Выводы по первой главе

В первой главе выполнен обзор научно-технической литературы по технологическим процессам измельчения в промышленности, рассмотрены проблемы управления технологическими процессами на горно-обогатительных предприятиях. Рассмотрены технологические особенности управления процессом мокрого измельчения. Проанализирована динамика процесса измельчения, проходящая в шаровой барабанной мельнице. Рассмотрены основные способы измельчения и разрушения твердого минерала до необходимых размеров частиц. Показаны и проанализированы существующие циклы измельчения, применяемые в промышленном производстве. Установлены зависимости эффективности процесса мокрого измельчения от ряда конструкционных и технологических параметров.

ГЛАВА 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ПРОХОДЯЩЕГО В АГРЕГАТЕ С НЕПРЕРЫВНЫМ ДЕЙСТВИЕМ В ЗАМКНУТОМ ЦИКЛЕ

2.1 Обобщенная характеристика процесса измельчения

Измельчение - это процесс постепенного уменьшения крупности частиц материала, является типовым технологическим процессом, относящийся к механическим. Исходный материал, который поступает на измельчение, обладает физико-механическими свойствами (их определяет минералогический состав).

Гранулометрическим составом является распределение объема, массы, числа частиц по их диаметру. Свойства частиц определяется их диаметром, как правило сферы, периметром проекции, площадью поверхности, скоростью опускания в различной среде, а также калибром, через который проникает частица.

Кумулятивное распределение частиц согласно некоторой крупности гранулометрического состава показано на рисунке 2.1.

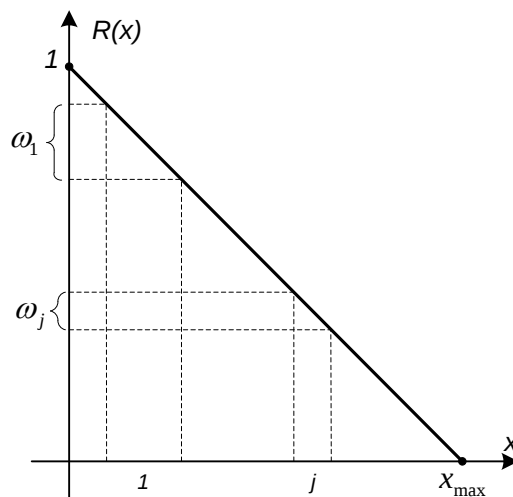


Рисунок 2.1 - Кумулятивное распределение материала по крупности

R — обозначает какую-либо нормированную характеристику количества вещества (массы, концентрации, объема, крупности x , массовой доли) в моменте рассмотрения.

Спектр разбивается на n интервалов.

Многие авторы придерживаются аналогичного способа рассмотрения гранулометрического состава, который удобен в численном анализе технологического процесса измельчения. В результате, в отношении размеров, получается дискретное уравнение измельчения, показанное в работах [41, 42, 45, 49, 116, 118-120, 133].

Исходя из этого исходный материал Q_{ex} во входном потоке представляется в виде:

$$Q_{\text{ex}} = \sum_{i=1}^n q_{\text{ex},i} \quad (2.1)$$

где $q_{\text{ex},i}$ будет являться входным потоком i -й крупностной фракции исходного материала;

n -количество крупностных классов (классов крупности)

Причем

$$q_{\text{ex},i} = \omega_i \cdot Q_{\text{ex}} \quad (2.2)$$

Где ω_i -массовая для материала в i -ом крупностном классе.

Далее подставляя значение $q_{\text{ex},i}$ в уравнение (2.1) из выражения (2.2) получаем условие нормировки

$$\sum_{i=1}^n \omega_i = 1 \quad (2.3)$$

Также можно изобразить поток материала из мельницы $Q_{\text{изм}}$

$$Q_{\text{изм}} = \sum_{i=1}^n q_{\text{изм},i} \quad (2.4)$$

Технологическим процессом измельчения является процесс постепенного убывания количества крупных классов от измельчаемого материала в пользу увеличения содержания более мелких классов. Процесс происходит внутри мельницы, или другого аппарата измельчения. [163]

Физико-механические свойства измельчаемого материала на протяжении всего времени изменяются, поэтому в задачи моделирования процесса измельчения входит прогнозирование по гранулометрическому составу питания

гранулометрического состава доизмельченного материала, с учетом этих изменений и изменений среды для измельчения, с целью управления данным технологическим процессом.

2.2 Закономерности измельчения бадделеит-апатит-магнетитовых руд

2.2.1 Влияние на показатели обогатительных процессов минералогического состава

Измельчаемость руды

Процесс измельчения обеспечивает значительно выше степень сокращения крупности руды, в сравнении с дроблением [164]. При этом на процессе измельчения отражается смена минерального состава руды.

Измельчаемость это превращение материала в процессе измельчения в продукт с заданной крупностью из продукта с определенной в некоторых пределах крупностью [165].

Как правило удельную производительность рассчитывают по удельному расходу электроэнергии на тонну руды и по вновь образованному заданному классу продукта [164].

Удельная производительность - производительность мельницы, зависящая от объема мельницы:

$$q = \frac{Q}{V_M}, \text{ т/м}^3 \cdot \text{ч} \quad (2.5)$$

Производительность шаровой мельницы по классу -0,16+0,2 мм

$$q_{0.16} = \frac{Q^{0.071}}{V_M}, \text{ т/м}^3 \cdot \text{ч} \quad (2.6)$$

где – $q_{0.071}$ удельная производительность по вновь образованному продукту, по классу крупности -0,071+0 мм.

Предельная загрузка мельницы, в регламентном состоянии и шаровом заполнении, определяет ее удельную производительность [164].

Обогатимость руды

Влияние минералогического состава руды на показатели обогащения

Технологическое извлечение определенного ценного компонента в концентрат, измеренное в процентах является критерием обогащения руды.

Минеральный состав песков представлен в таблице 2.1, а химический состав в таблице 2.2, при этом содержание класса -0,071 мм составляет 63,3 % [166].

Таблица 2.1 - Минеральный состав песков

Класс крупности, мм	Выход, %	Содержание. %			
		P ₂ O ₅	MgO	CO ₂	ZrO ₂
+0.2	3.9	7.4	19.	14,3	0.05
-0.2+0.14	6.3	9.3	19.	13.9	0.04
-0.14+0.1	10.5	10.2	19.	14.1	0.05
-0.1+0,071	13.2	10.8	20,	13.1	0,06
-0.071+0,05	21,6	11,3	19.	13,0	0,19
-0.05	44.5	11.0	17.	14,7	0,41
Сумма	100.	10.6	18.	14.0	0.24

Таблица 2.2 - Химический состав песков

Класс крупности,	Минералы. %							
	Апатит	Форстерит	Карбонаты	Флогопит	Магнетит	Сульфиды	Бадделеит	Прочие
+0.2	3.5	6.0	4.5	83.5	Сл	Сл	Сл	Сл
-	29.6	39.1	27.9	сл	Сл	Сл	Сл	Сл
-0.071	23.0	35.9	36.5	сл	Сл	Сл	Сл	Сл
Общая	25,2	36.5	32.2	4.2	0.5	0.3	Менее	0.8

Физико-химические и физико-механические свойства минералов, а также их соотношение в количестве определяет обогатимость и измельчаемость руды. Данные качественные показатели руды взаимосвязаны и определяют тип руды, требующий определенных условий ее обогащения.

2.2.2 Влияние на эффективность протекания процесса измельчения наполнения мельницы пульпой

В зависимости от наполнения мельницы пульпой M , рассмотрим ее удельную производительность, по определяющему классу крупности $q_{0.071}$:

$$q_{0.071} = f(M) \quad (2.7)$$

Удельная производительность мельницы, по определяющему крупностному классу $q_{0,071}=0$ возрастает с количеством материала (объемного наполнения мельницы пульпой M). В случае, когда количество материала в мельнице мало $M = 0$, ей нечего измельчать, следовательно производительность мельницы по определяющему крупностному классу $q_{0,071}=0$, однако при избытке материала, образование определяющего класса крупности также снижается до практически нулевого значения $q_{0,071}=0$.

Производительность мельницы стремиться к максимальному, по определяющему классу, значению

$$q_{0,071} \rightarrow q_{0,071}^{\max} \text{ при } M \rightarrow M_{кр} \quad (2.8)$$

Наполнение мельницы пульпой M (запас материала), косвенный образом характеризуется уровнем потребляемой мощности шаровой мельницей S . Поэтому

$$q_{0,071} \rightarrow q_{0,071}^{\max} \text{ при } S \rightarrow S_{кр} \quad (2.9)$$

Работа мельницы, где

$$\begin{aligned} q_{0,071} &= q_{0,071}^{\max} \\ M &= M_{кр} \end{aligned} \quad (2.10)$$

именуется работой в предельном режиме.

Особенностью измельчения бадделеит-апатит-магнетитовых руд в цикле подготовки питания апатитовой флотации до гранулометрической крупности класса $-0.071+0$ мм в максимально возможном процентном количестве, являются условия распределения в режимах, приближенных к предельному, удельных производительностей класса $d-0$ мм, на одном значении потребляемой мельницей мощности, в режиме с разной крупностью измельчения [163].

В результате исследований, проводимых производственными лабораториями различных горно-обогатительных предприятий установлено [163, 167]:

- при пропорциональном изменении значения уровня мощности потребляемой мельницей S , по всем крупностным классам удельные

производительности пропорционально изменяются, достигая на предельных режимах максимального значения $S = S_{\text{крит}}$, по мере постепенной загрузки рассматриваемого замкнутого цикла $S \rightarrow S_{\text{крит}}$, при условии оптимального пульпового наполнения внутри мельницы;

- кривые распределения производительностей по вновь образованному классу $d-0$ мм в режимах измельчения с различной крупностью в одном загрузочном уровне мельницы $S = \text{const}$ (в т.ч. и $S = S_{\text{крит}}$) пересекаются, имея общие точки, которые соответствуют классу крупности $-0,2+0,071$ мм, и таким образом образовавшаяся «область» показывает соответствие крупности измельчения некоторому времени работы (рисунок 2.2).

Это дает основание заменить значение уровня мощности потребляемой мельницей S (пульповое наполнение) на технологический показатель – удельную производительность измельчительного агрегата по классу $+0,071$ мм.

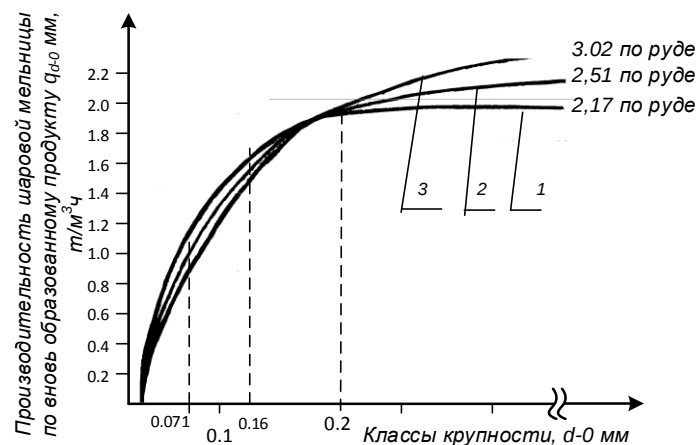


Рисунок 2.2 - Распределение удельных производительностей шаровых мельниц в классах $d-0$ мм (по заново образованному продукту)

- 1 – крупность измельчения 18,08 % класса $+0,071$ мм
- 2 – крупность измельчения 21,36 % класса $+0,071$ мм
- 3 – крупность измельчения 28,42 % класса $+0,071$ мм [163]

Поэтому, степень заполнения мельницы пульпой и степень измельчаемости материала характеризует удельную производительность мельницы по определяющему крупностному классу.

Ниже приводится исследование изменения гранулометрических характеристик во времени (рисунок 2.3) [168].

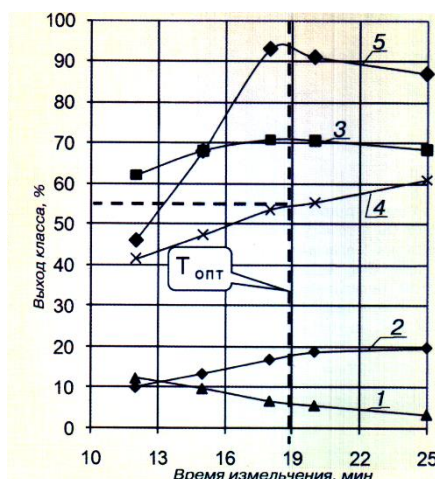


Рисунок 2.3 - Изменение гранулометрических характеристик продукта измельчения в шаровой мельнице

Согласно рисунку 2.3 выход классов составляет:

- 1) + 0,15 мм
- 2) - 0,04 мм
- 3) + 0,02+0,15 мм
- 4) - 0,071 мм
- 5) извлечение P_2O_5 в концентрат флотации

2.2.3 Роль расхода воды в технологический процесс измельчения

Наиболее эффективный процесс измельчения предполагает заполнение всего пространства между шарами в мельнице пульпой (измельчаемым материалом).

От скорости прохождения измельчаемого материала внутри мельницы зависит ее пульповое наполнение и производительность для определяющего класса крупности. Вместе с этим различается скорость прохождения различных классов крупности, в зависимости от количества воды, идущей в процесс W_M .

Режим предельного измельчения (2.10) определяется предельной плотностью мельничной разгрузки (% твердого на сливе с мельницы).

Предельная плотность мельничной разгрузки – 80 % твердого, в то время как мельничный перегруз наступает при 82÷83% содержания на сливе с мельницы твердого.

В исследованиях, проводимых производственными лабораториями различных горно-обогатительных предприятий установлено что расход воды в мельницу должен быть пропорциональным расходу сырья и составлять [163, 167]:

$$W_M = (0.25 \div 0.28) \cdot Q_M \quad (2.11)$$

Данное количество воды нужно чтобы получить порядка 80% твердого на сливе с мельницы.

2.2.4 Заполнение мельниц шарами

Под шаровым заполнением мельницы – подразумевается заполнение её внутреннего объема измельчительной средой (металлическими шарами), выраженное в процентном соотношении ($\phi_{ш}$, %), – которое определяет максимально возможную удельную производительность шаровой барабанной мельницы по определяющему крупностному классу (классу крупности) $q_{0.071}^{\max}$.

$$q_{0.071}^{\max} = f(\phi_{ш}) \quad (2.12)$$

Система управления, учитывающая шаровое наполнение мельницы базируется на зависимости активной (полезной) мощности, потребляемой электродвигателем мельницы (P , кВт), и шарового заполнения мельниц ($\phi_{ш}$, %).

$$P = f(\phi_{ш}) \quad (2.13)$$

Для приведения во вращение шаровой мельницы МРШ-3600х5000 на АО «Ковдорский ГОК» применяется синхронный электродвигатель мощностью $N_{дв}=1250$ кВт [155].

На рисунке 2.4 показан график изменения потребляемой мельницей активной мощности, при догрузке шаров порционно, через определенный интервал времени. Предполагается, что шаровое наполнение показывает работу мельницы с позиции эффективности по вновь образываемому классу $q_{0.071}^{\max}$, то

есть производительность мельницы по руде (пульпе) при условии заданной крупности измельчения. Данная зависимость носит характер экстремальной (рисунок 2.5).

Оптимально реализованная система управления, учитывающая шаровое наполнение мельниц базируется на зависимости потребляемой полезной мощности двигателя мельницы (P) от степени заполнения мельниц шарами ($\varphi_{ш}$).

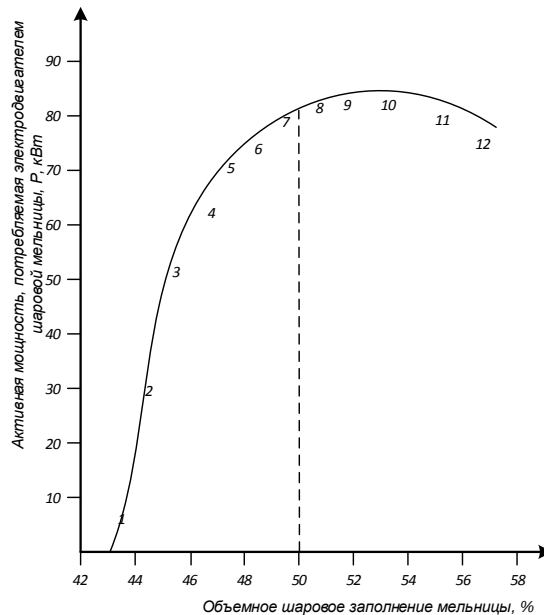


Рисунок 2.4 - Зависимость потребляемой активной мощности от объемного заполнения измельчительной средой (шарами) для мельницы МШР 3,6×5,0

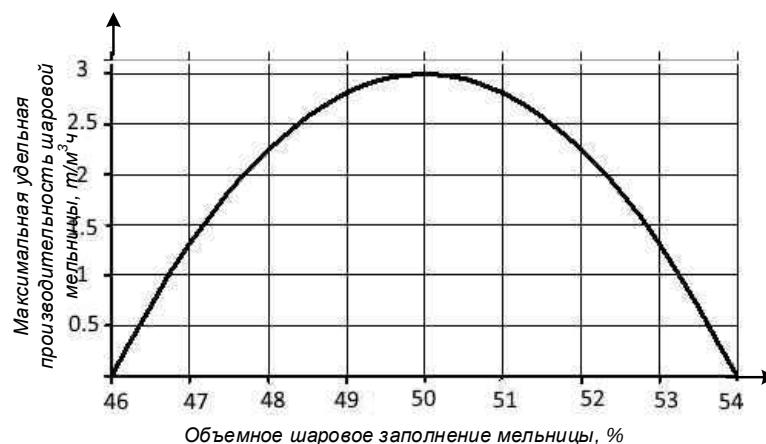


Рисунок 2.5 - Зависимость между эффективностью измельчения в режиме оптимального пульпового наполнения и объемным заполнением мельницы

шарами $\varphi_{ш}$

При постоянной производительности магистрального пульпового насоса (ниже в работе) производилась догрузка шаров одного регламентного размера в равных количествах, при этом фиксировались показания активной и реактивной мощности. Результаты испытаний представлены на графиках рисунков 2.6, 2.7.

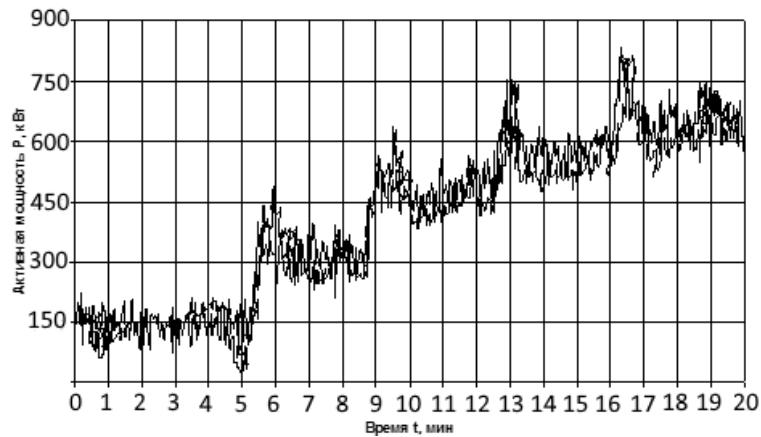


Рисунок 2.6 - Изменение используемой двигателем мельницы активной мощности, при догрузке шаров порционно

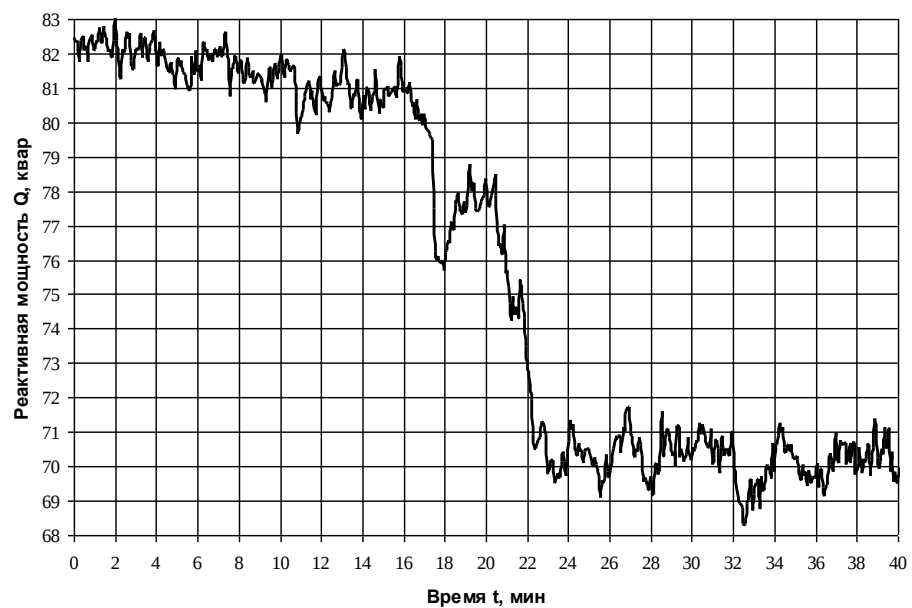


Рисунок 2.7 - Изменение реактивной мощности, используемой двигателем мельницы, при порционной догрузке шаров

2.2.5 Влияние износа мельничной защитной футеровки

В настоящее время защита от износа и разрушения шарами и измельчаемым материалом обеспечиваются заменяемыми футеровочными элементами, как правило стальными или резинометаллическими, такими как: бронеплиты

барабана с поверхностью цилиндрической формы, торцевая бронь, футеровка цапф и решетка разгрузки – воронка разгрузки и загрузочный патрубок.

Наиболее важным параметром структуры цикла ремонта агрегата измельчения при его формировании является срок службы (ресурс) защитной футеровки, если рассматривать ее как деталь, которая влияет на показатели эксплуатации мельницы, безотказность и безаварийность работы комплекса измельчения в целом.

Материал для футеровки выбирается с соблюдением следующих условий. Он должен обладать высокой ударной вязкостью, стойкостью к ударным нагрузкам, абразивной стойкостью и неизменностью свойств при длительном процессе работы.

Профиль футеровки не только влияет на технологический режим работы применяемой дробящей среды, но также в значительной мере определяется срок эксплуатации футеровки мельницы.

Выбор и необходимость применения конкретной конструкции профиля футеровки производится в зависимости от типа, режима работы мельницы, расхода измельчающей среды, эффективности работы шаровой мельницы, физико-механических свойств измельчаемого материала и производительности, а также стоимости материалов, удельных расходов электроэнергии и величины расходов на эксплуатацию.

Измельчаемый материал по своей крепости, крупности и абразивности на прямую влияет на величину абразивного износа мельничной защитной футеровки.

В целом в процессе эксплуатации неплохо себя зарекомендовала резинометаллическая футеровка типа “Rubben Iron”.

Еще один фактор, который оказывает довольно сильное влияние на изнашиваемость футеровки, представляет собой степень заполнения барабана шаровой мельницы мелющими телами и удельное соотношение используемых типоразмеров шаров в процентном соотношении.

В случае применения стальной футеровки, износ футеровки мельниц будет характеризовать удельный расход футеровочной стали на одну тонну идущего в переработку сырья.

Для определения степени влияния на производительность шаровой мельницы износа защитной футеровки в работе [106] проводились промышленные испытания шаровой мельницы МШР.

Выполненные расчеты, показали, с учетом приведенных данных, что расход футеровочной стали на одну тонну перерабатываемого сырья, составил порядка 50 грамм на тонну, что показано в таблице 2.3. Среднее же значение расхода футеровки из марганцовистых сталей на тонну измельченного сырья составляет 60-100 грамм [170].

Таблица 2.3 - Расход футеровочной стали на одну тонну перерабатываемой руды

Наименование	Начальный вес, т	Износ, %	Вес изношенной футеровки, т
Решетка	7,8	60,5	4,7
Боковая футеровка	54,0	54,4	29,4
Торцевая футеровка	19,0	26,1	4,9
Общий износ	80,8	49,5	39,0

На рисунке 2.8 представлена зависимость увеличения рабочего объема шаровой мельницы МШР от общего времени работы мельницы.

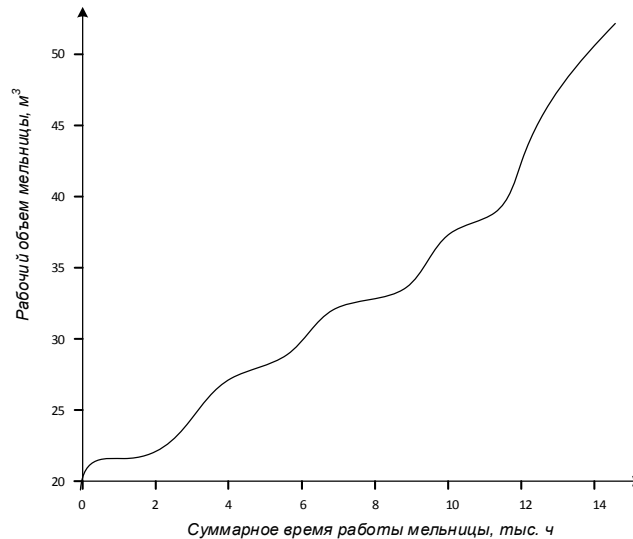


Рисунок 2.8 - Зависимость рабочего объема мельницы от времени ее работы (при износе футеровки)

На изменение рабочего объема мельницы заметно влияет износ футеровки.

Таким образом возможно в процессе эксплуатации шаровой мельницы несколько повысить ее производительность с помощью соответствующего увеличения шаровой загрузки мельницы, при этом большое количество скрапа (металлические отходы от шаров) отрицательно сказывается на удельной производительности мельницы по вновь образовавшемуся классу.

2.3 Модель кинетики технологического процесса измельчения, протекающего в агрегате непрерывного действия, работающего в замкнутом цикле

2.3.1 Модель кинетики технологического процесса измельчения в шаровой барабанной мельнице, работающая в открытом цикле

С помощью модели идеального перемешивания можно отобразить процесс уменьшения крупности материала внутри шаровой барабанной мельницы. При этом на рисунке 2.9 показано, в каком виде может быть описан материальный баланс.

$$\begin{array}{ccccccc}
 \text{Входящее} & & \text{Появление от} & & \text{Разрушение} & & \text{Накопление} \\
 \text{питание} & & \text{разрушение} & & \text{i-го класса} & & \text{i-го класса} \\
 \text{шаровой} & + & \text{более крупных} & - & \text{крупности} & - & \text{крупности в} \\
 \text{мельницы} & & \text{классов} & & \text{мельницы} & & \text{шаровой} \\
 & & & & & & \text{мельнице}
 \end{array}$$

Рисунок 2.9 - Материальный баланс идеального смешения для мельницы

Значит дифференциальное уравнение, которое описывает материальный баланс i -го класса крупности может иметь вид:

$$\frac{d\omega_i}{dt} = \frac{f_i}{\tau} - s_i\omega_i + \sum_{j=1}^{i-1} b_{ij}s_j\omega_j - \frac{\omega_i}{\tau} \quad (2.14)$$

где ω_i – отражает массовую доля i -го класса крупности, пребывающую в мельнице;

f_i – отражает массовую доля i -го класса крупности поступающей на вход мельницы (питание мельницы);

τ – отражает время пребывания измельчаемого материала в мельнице;

b_{ij} – отражает функцию разрушения, которая определяет переход материала j -го класса в i -ый класс крупности;

s_i, s_j – отражает функцию отбора, определяющую скорость разрушения соответственно i -го и j -го класса крупности;

Если процесс установился, то уравнение материального баланса будет иметь вид:

$$\frac{f_i}{\tau} + \sum_{j=1}^{i-1} b_{ij}s_j\omega_j = s_i\omega_i + \frac{\omega_i}{\tau} \quad (2.15)$$

Следуя закону сохранения массы $\sum_i m_i = const$, уравнение (2.14)

преобразуется таким образом, что массовые доли ω_i непосредственно заменяются массами материала m_i i -го класса крупности, который находится внутри мельницы $\omega_i = \frac{m_i}{\sum_i m_i}$.

Значит уравнение (2.14) запишется в виде

$$\frac{dm_i}{dt} = \frac{f_i}{\tau} - s_i m_i + \sum_{j=1}^{i-1} b_{ij}s_j m_j - \frac{m_i}{\tau} \quad (2.16)$$

В уравнении кинетики (2.14) и (2.16) предполагается, что частицы различных классов крупности по времени пребывают в мельнице одинаково, хотя данные частицы фактически имеют некоторый разброс по времени

пребывания внутри мельницы в т.ч. определяющийся перемешиванием, которое характеризуется т.н. функцией распределения по некоторому времени пребывания (функция РВП) [159, 171, 172]:

$$E(t) = \frac{dP}{dt} \quad (2.17)$$

где dP – вероятность нахождения в интервале от t до dt времени пребывания частицы внутри аппарата.

Возможная интерпретация функции РВП - это зависимость концентрации трассера (помеченные неким способом недробимые частицы) при его вводе в импульсной форме на вход аппарата.

Чтобы реализовать все многообразие характеристик потока в реальных технических системах, возможно производить изменения числа эксплуатируемых зон идеального перемешивания и степени этого перемешивания между прилегающими зонами [165, 173].

Применение каскадных смесителей для отображения потока, проходящего через мельницу, позволяет учитывать разное время пребывания частиц.

Каскад, состоящий из трех смесителей (A, B, C), является достаточным для большинства случаев, при условии принятия времени пребывания в смесителях соответственно равным [165, 159, 174]:

$$\begin{aligned} \tau_A &= 0.2 \cdot \tau \\ \tau_B &= 0.2 \cdot \tau \\ \tau_C &= 0.6 \cdot \tau \end{aligned} \quad (2.18)$$

где τ - является общим временем нахождения измельчаемого материала внутри мельницы.

На рисунке 2.10 процесс измельчения изображается в виде каскада, состоящего из трех смесителей (A, B, C). Частицы из i -ой фракции крупности (класса) исходного материала q_{Fi} подаются к входному каналу смесителя A. Выходной канал смесителя A - это входной канал смесителя B q_{FBi} , а входной канал q_{FCi} смесителя C - это, по аналогии, выход со смесителя B. Частицы потоком, перемещаясь по этому каскаду, подвергаются измельчению. Кроме

того, у каждого из смесителей этого каскада присутствует запас исходного материала (масса m_{iA}, m_{iB}, m_{iC}), также подвергаемый процессу уменьшения крупности, то есть измельчения.

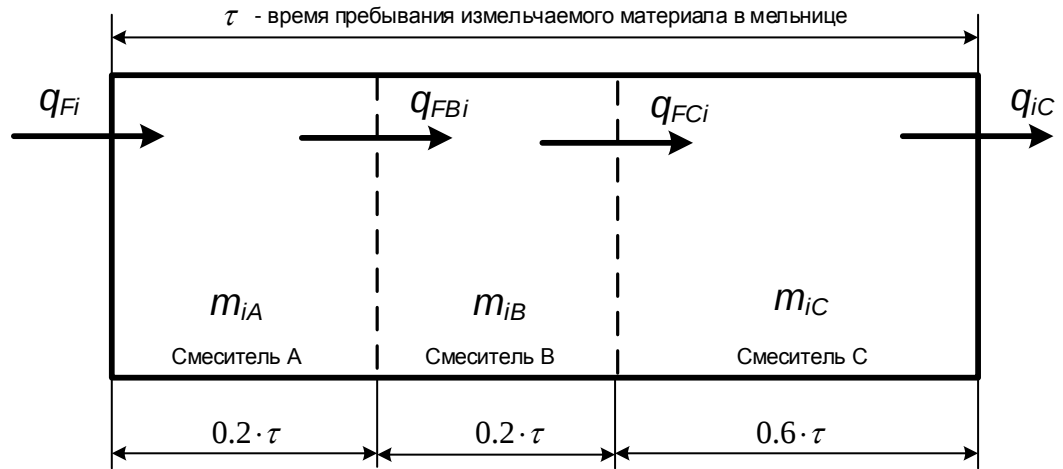


Рисунок 2.10 - Представление процесса измельчения в каскадном виде

С учетом написанного выше кинетическое уравнение (2.16), определенное для трех смесителей будет иметь форму системы уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{dm_{iA}}{dt} &= \frac{f_{iA}}{\tau_A} - s_i m_{iA} + \sum_{j=1}^{i-1} b_{ij} s_j m_{jA} - \frac{m_{iA}}{\tau_A} \\ \frac{dm_{iB}}{dt} &= \frac{f_{iB}}{\tau_B} - s_i m_{iB} + \sum_{j=1}^{i-1} b_{ij} s_j m_{jA} - \frac{m_{iB}}{\tau_B} \\ \frac{dm_{iC}}{dt} &= \frac{f_{iC}}{\tau_C} - s_i m_{iC} + \sum_{j=1}^{i-1} b_{ij} s_j m_{jB} - \frac{m_{iC}}{\tau_C} \end{aligned} \quad (2.19)$$

Где

m_{iA}, m_{iB}, m_{iC} — масса i -ой фракции крупности (класса), находящейся в смесителях А, В, С соответственно.

f_{iA}, f_{iB}, f_{iC} — масса i -ой фракции крупности (класса) на входном канале смесителей А, В, С соответственно;

τ_A, τ_B, τ_C — время пребывания в определенном смесителе;

b_{ij} — функция разрушения, которая определяет переход материала из j -го класса в i -ый крупностный класс (класс крупности);

s_i, s_j — функция отбора, которая характеризует скорость разрушения i -го и j -го класса крупности соответственно.

Систему из n -го количества уравнений (2.20) получаем благодаря разбиению входного потока материала для измельчения на n классов крупности, к примеру, для смесителя A . В то же время, предполагаем, что самый мелкий класс крупности n -го порядка не разрушается.

$$\begin{aligned}
 \frac{dm_{1A}}{dt} &= \frac{f_{1A}}{\tau_A} - s_1 m_{1A} - \frac{m_{1A}}{\tau_A} \\
 \frac{dm_{2A}}{dt} &= \frac{f_{2A}}{\tau_A} + b_{21}s_1 m_{1A} - s_2 m_{2A} - \frac{m_{2A}}{\tau_A} \\
 &\dots\dots\dots \\
 \frac{dm_{(n-1)A}}{dt} &= \frac{f_{(n-1)A}}{\tau_A} + b_{(n-1)1}s_1 m_{1A} + \dots + b_{(n-1)(n-2)}s_{(n-2)} m_{(n-2)A} - s_{(n-1)} m_{(n-1)A} - \frac{m_{(n-1)A}}{\tau_A} \\
 \frac{dm_{nA}}{dt} &= \frac{f_{nA}}{\tau_A} + b_{n1}s_1 m_{1A} + \dots + b_{n(n-1)}s_{(n-1)} m_{(n-1)A} - \frac{m_{nA}}{\tau_A}
 \end{aligned} \tag{2.20}$$

Схема, описывающая структуру системы дифференциальных уравнений (2.20) показана на рисунке 2.11 [26,175].

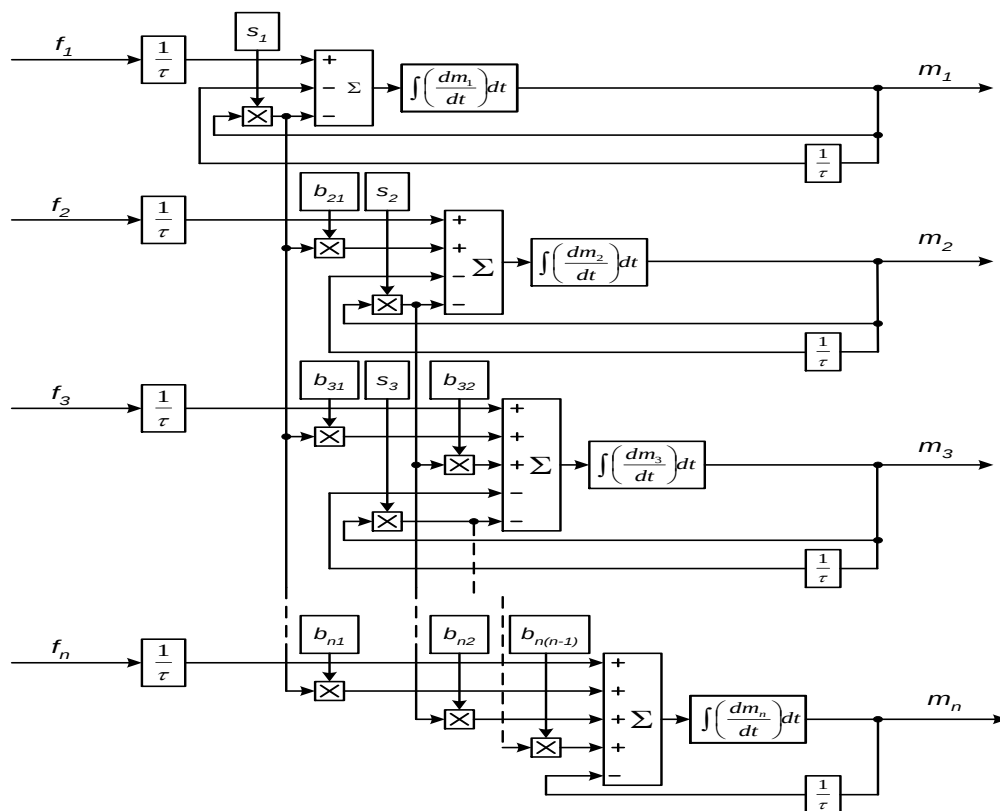


Рисунок 2.11 - Структурная схема кинетики измельчения

2.3.2 Численный метод предсказания и уточнения для вычисления кинетического уравнения измельчающего процесса

Численные предиктор-корректорные методы Адамса [176], при условии повышении порядка до четвертого, необходимы при нахождении решения для системы уравнений дифференциального типа.

Рассмотрим дифференциальное уравнение

$$\frac{dm_i(t)}{dt} = \frac{f_i(t)}{\tau} - s_i m_i(t) + \sum_{j=1}^{i-1} b_{ij} s_j m_j(t) - \frac{m_i(t)}{\tau}, \quad t \in [t_0, t_{\text{кон}}]$$

причем $m_i(t_0) = m_{i,(0)}$

Обозначим

$m_{i,(k+1)}^B$ – приближенное значение решения $m_{i,(k+1)}$, которое подсчитывается по явной экстраполяционной формуле Адамса-Башфорта;

Значит, с учетом принятых обозначений, получим следующие методы предсказания и уточнения Адамса (предиктор-корректорные методы) [176,178]:

первого порядка

$$\begin{aligned} m_{i,(k+1)}^B &= m_{i,(k)} + h \cdot g(m_{i,(k)}, t_k) \\ m_{i,(k+1)} &= m_{i,(k)} + h \cdot g(m_{i,(k+1)}^B, t_{k+1}) \end{aligned} \quad (2.21)$$

второго порядка

$$\begin{aligned} m_{i,(k+1)}^B &= m_{i,(k)} + \frac{h}{2} \cdot [3g(m_{i,(k)}, t_k) - g(m_{i,(k-1)}, t_{k-1})] \\ m_{i,(k+1)} &= m_{i,(k)} + \frac{h}{2} \cdot [g(m_{i,(k+1)}^B, t_{k+1}) + g(m_{i,(k)}, t_k)] \end{aligned} \quad (2.22)$$

третьего порядка

$$\begin{aligned} m_{i,(k+1)}^B &= m_{i,(k)} + \frac{h}{12} \cdot [23g(m_{i,(k)}, t_k) - 16g(m_{i,(k-1)}, t_{k-1}) + 5g(m_{i,(k-2)}, t_{k-2})] \\ m_{i,(k+1)} &= m_{i,(k)} + \frac{h}{12} \cdot [5g(m_{i,(k+1)}^B, t_{k+1}) + 8g(m_{i,(k)}, t_k) - g(m_{i,(k-1)}, t_{k-1})] \end{aligned} \quad (2.23)$$

четвертого порядка

$$\begin{aligned} m_{i,(k+1)}^B &= m_{i,(k)} + \frac{h}{24} \cdot [55g(m_{i,(k)}, t_k) - 59g(m_{i,(k-1)}, t_{k-1}) + 37g(m_{i,(k-2)}, t_{k-2}) - 9g(m_{i,(k-3)}, t_{k-3})] \\ m_{i,(k+1)} &= m_{i,(k)} + \frac{h}{24} \cdot [9g(m_{i,(k+1)}^B, t_{k+1}) + 19g(m_{i,(k)}, t_k) - 5g(m_{i,(k-1)}, t_{k-1}) + g(m_{i,(k-2)}, t_{k-2})] \end{aligned} \quad (2.24)$$

где $t_{k+1} = t_k + h$

Способность контролировать погрешность шага путем сравнения двух приближений к решению, полученных по неявной и явной формулам - это одно из основных преимуществ предиктивно корректорного метода $m_i(t_{k+1})$ [176, 178].

Первая из формул (2.24) вытекает из конечно-разностной формулы, которая определяет экстраполяционный метод Адамса-Башфорта [176]:

$$m_{i,(k+1)} = m_{i,(k)} + h \cdot \left(g_{(k)} + \frac{1}{2} \Delta g_{(k-1)} + \frac{5}{12} \Delta^2 g_{(k-2)} + \frac{3}{8} \Delta^3 g_{(k-3)} + \frac{251}{720} \Delta^4 g_{(k-4)} + \dots \right); \quad (2.25)$$

вторая – из формулы Адамса-Моултона [176]:

$$m_{i,(k+1)} = m_{i,(k)} + h \cdot \left(g_{(k+1)} - \frac{1}{2} \Delta g_{(k)} - \frac{1}{12} \Delta^2 g_{(k-1)} - \frac{1}{24} \Delta^3 g_{(k-2)} - \frac{19}{720} \Delta^4 g_{(k-3)} - \dots \right), \quad (2.26)$$

в которых последними берутся конечные разности третьего порядка, где

Δ^k – конечная разность k -го порядка;

$$g_{(k)} = g(m_{i,(k)}, t_k).$$

Учитывая практически незаметность расчетного шага h и убывание конечных разностей с возрастанием их порядка, основные части погрешностей шага из формул Башфорта и Моултона четвертого порядка в (2.24), в соответствии с (2.25) и (2.26), обозначаются величинами:

$$\frac{251}{720} h \Delta^4 g_{(k-4)} - \text{для явной формулы,}$$

$$\frac{19}{720} h \Delta^4 g_{(k-3)} - \text{для неявной формулы.}$$

Следовательно, если вместе с ранее введенным обозначением $m_{i,(k+1)}^B$ внести обозначение с помощью приближенного значения решения $m_{i,(k+1)}$, через $m_{i,(k+1)}^M$ получаемого по неявной интерполяционной формуле четвертого порядка

Адамса-Моултона, тогда возможна запись двух приближенных представлений $m_{i,(k+1)}$ [176, 177]:

$$m_{i,(k+1)} \approx m_{i,(k+1)}^B + \frac{251}{720} h \Delta^4 g_{(k-4)} \quad (2.27)$$

$$m_{i,(k+1)} \approx m_{i,(k+1)}^M - \frac{19}{720} h \Delta^4 \cdot g_{(k-3)} \quad (2.28)$$

В результате получается, что при постоянстве четвертых разностей функции $g(m_i(t), t)$, связанном с выбором выгодного значения шага h , наблюдается двустороннее приближение значений $m_{i,(k+1)}^B$ и $m_{i,(k+1)}^M$ к конкретному решению $m_{i,(k+1)}$, а точность каждого из них оценивается путем нахождения разности этих значений $m_{i,(k+1)}^B$ и $m_{i,(k+1)}^M$ [176, 179].

Следовательно, уравнивая правые части приближенных равенств (2.27) и (2.28) и отождествляя $\Delta^4 g_{(k-4)}$ с $\Delta^4 g_{(k-3)}$, получается:

$$m_{i,(k+1)}^M - m_{i,(k+1)}^B \approx \frac{19}{720} h \Delta^4 \cdot g_{(k-3)} + \frac{251}{720} h \Delta^4 g_{(k-4)} \approx \frac{3}{8} h \Delta^4 g_{(k-4)}$$

Откуда

$$h \Delta^4 g_{(k-4)} \approx \frac{8}{3} (m_{i,(k+1)}^M - m_{i,(k+1)}^B)$$

Подставляя последнее в (2.28), получаем приближенное равенство

$$m_{i,(k+1)} \approx m_{i,(k+1)}^M - \frac{19}{270} (m_{i,(k+1)}^M - m_{i,(k+1)}^B) \quad (2.29)$$

Таким же способом можно получить приближенные равенства для первого порядка

$$m_{i,(k+1)} \approx m_{i,(k+1)}^M - \frac{1}{2} (m_{i,(k+1)}^M - m_{i,(k+1)}^B) \quad (2.30)$$

для второго порядка

$$m_{i,(k+1)} \approx m_{i,(k+1)}^M - \frac{1}{6} (m_{i,(k+1)}^M - m_{i,(k+1)}^B) \quad (2.31)$$

для третьего порядка

$$m_{i,(k+1)} \approx m_{i,(k+1)}^M - \frac{1}{10} (m_{i,(k+1)}^M - m_{i,(k+1)}^B) \quad (2.32)$$

Использование приближенных формул (2.29), (2.30), (2.31), (2.32) может быть двойственным. Например, для четвертого порядка, записав формулу (2.29) в виде

$$m_{i,(k+1)} - m_{i,(k+1)}^M \approx -\frac{19}{270} (m_{i,(k+1)}^M - m_{i,(k+1)}^B)$$

используем для пошагового контроля точности [176, 178]:

$$\text{если } \frac{19}{270} |m_{i,(k+1)} - m_{i,(k+1)}^B| < \varepsilon$$

полагаем $m_i(t_{k+1}) := m_{i,(k+1)} - \frac{19}{270} (m_{i,(k+1)} - m_{i,(k+1)}^B)$ и переходим к следующему

шагу $k := k + 1$

иначе $m_{i,(k+1)}^B := m_{i,(k+1)}$ и пересчитываем значение $m_{i,(k+1)}$.

Другое назначение формулы (2.29) – это точное применение ее правой части для получения уточненного значения [176]:

полагаем

$$m_{i,(k+1)} := m_{i,(k+1)}^M - \frac{19}{270} (m_{i,(k+1)}^M - m_{i,(k+1)}^B) \quad (2.33)$$

Следовательно, контроль точности будет выполняться на каждом шаге, к уточнению по формуле (2.24) необходимо прибегать при получении окончательных результатов.

Алгоритмы прогнозирования выходного гранулометрического состава продукта измельчения на сливе с шаровой барабанной мельницы, которая работает в открытом цикле, представлены в виде блок-схем на рисунках 2.12–2.18.

На рисунке 2.12 показан алгоритм прогнозирования выходного гранулометрического состава измельчаемого материала на сливе с мельницы, работающей в открытом цикле.

На рисунке 2.13 показан алгоритм прогнозирования запаса материала в смесителе А.

На рисунке 2.14 показан алгоритм прогнозирования запаса материала с помощью метода Адамса первого порядка.

На рисунке 2.15 показан алгоритм прогнозирования запаса материала с помощью метода Адамса второго порядка.

На рисунке 2.16 показан алгоритм прогнозирования запаса материала с помощью метода Адамса третьего порядка.

На рисунке 2.12 показан алгоритм прогнозирования запаса материала с помощью метода Адамса четвертого порядка.

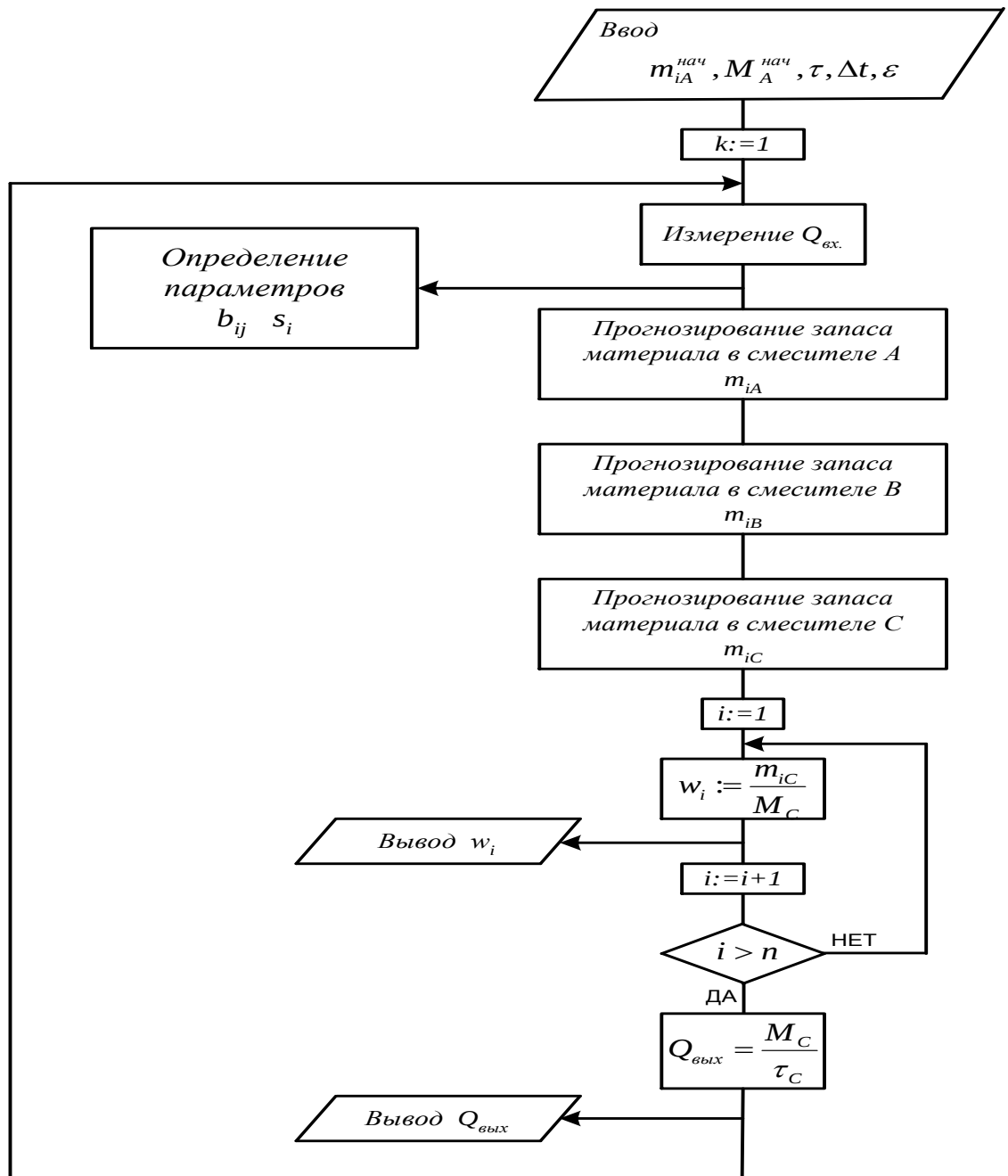


Рисунок 2.12 - Алгоритм прогнозирования выходного гранулометрического состава измельчаемого материала на сливе с мельницы, работающей в открытом цикле

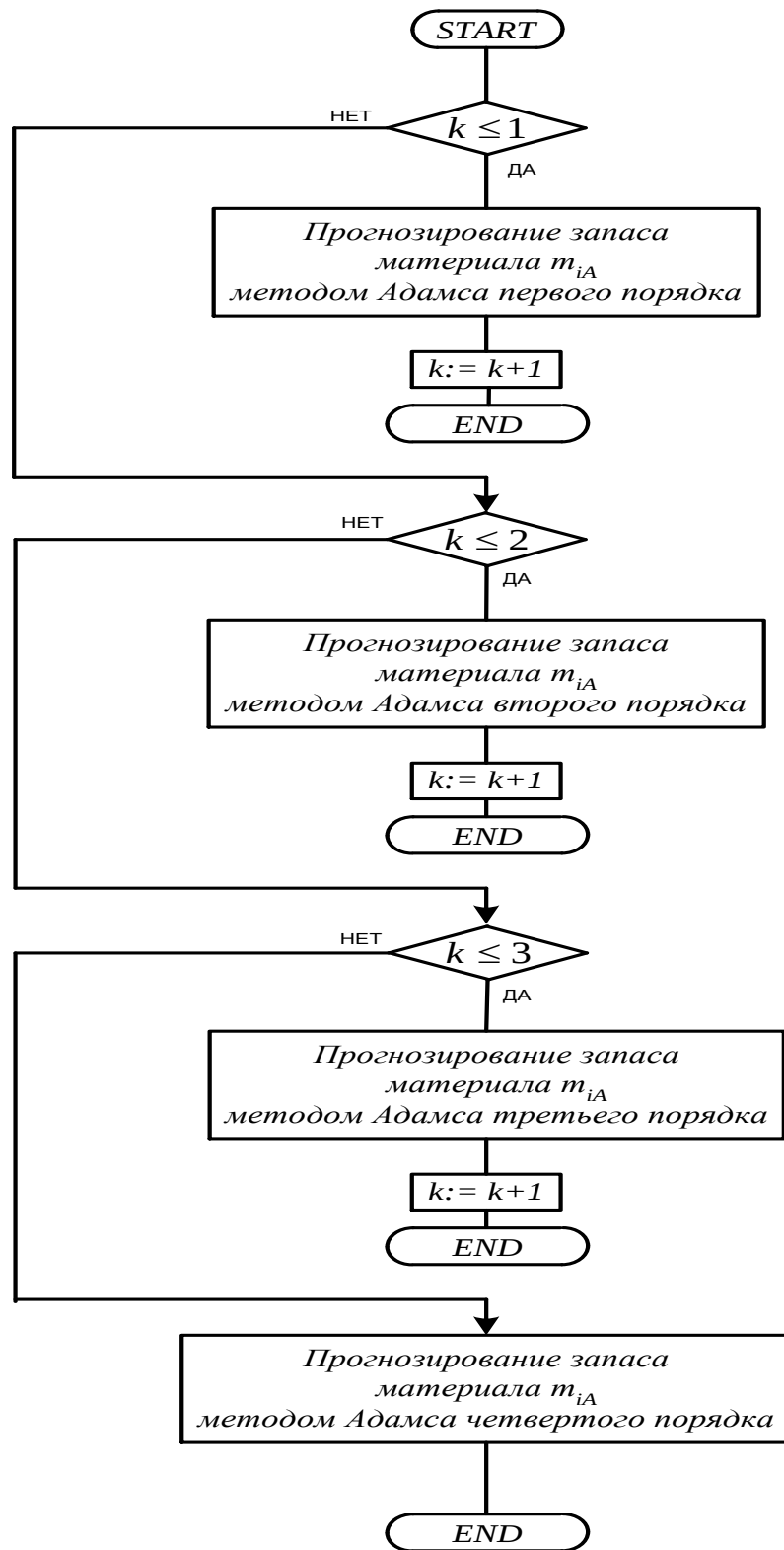


Рисунок 2.13 - Алгоритм прогнозирования запаса материала в смесителе А

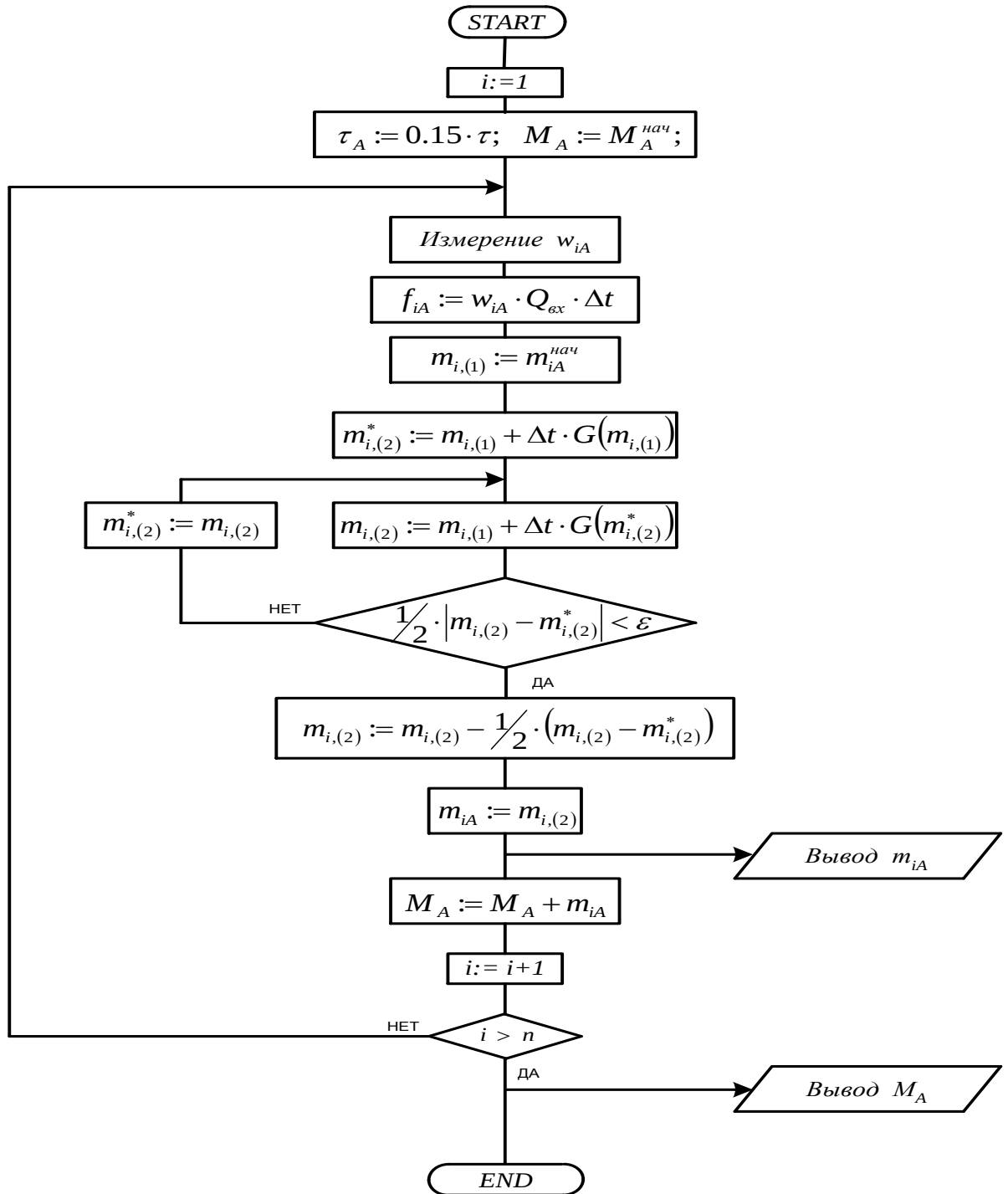


Рисунок 2.14 - Алгоритм прогнозирования запаса материала с помощью метода Адамса первого порядка

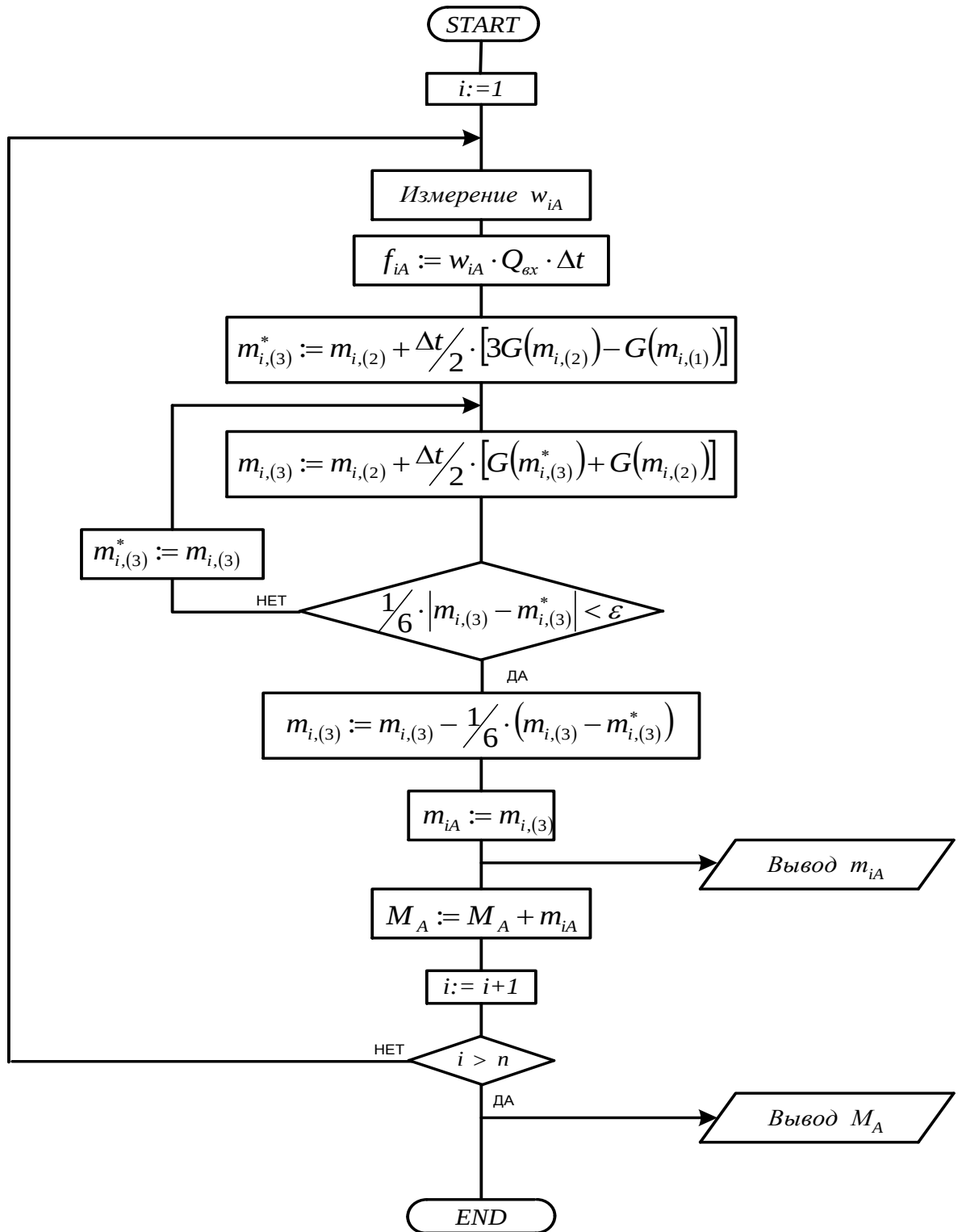


Рисунок 2.15 - Алгоритм прогнозирования запаса материала с помощью метода Адамса второго порядка

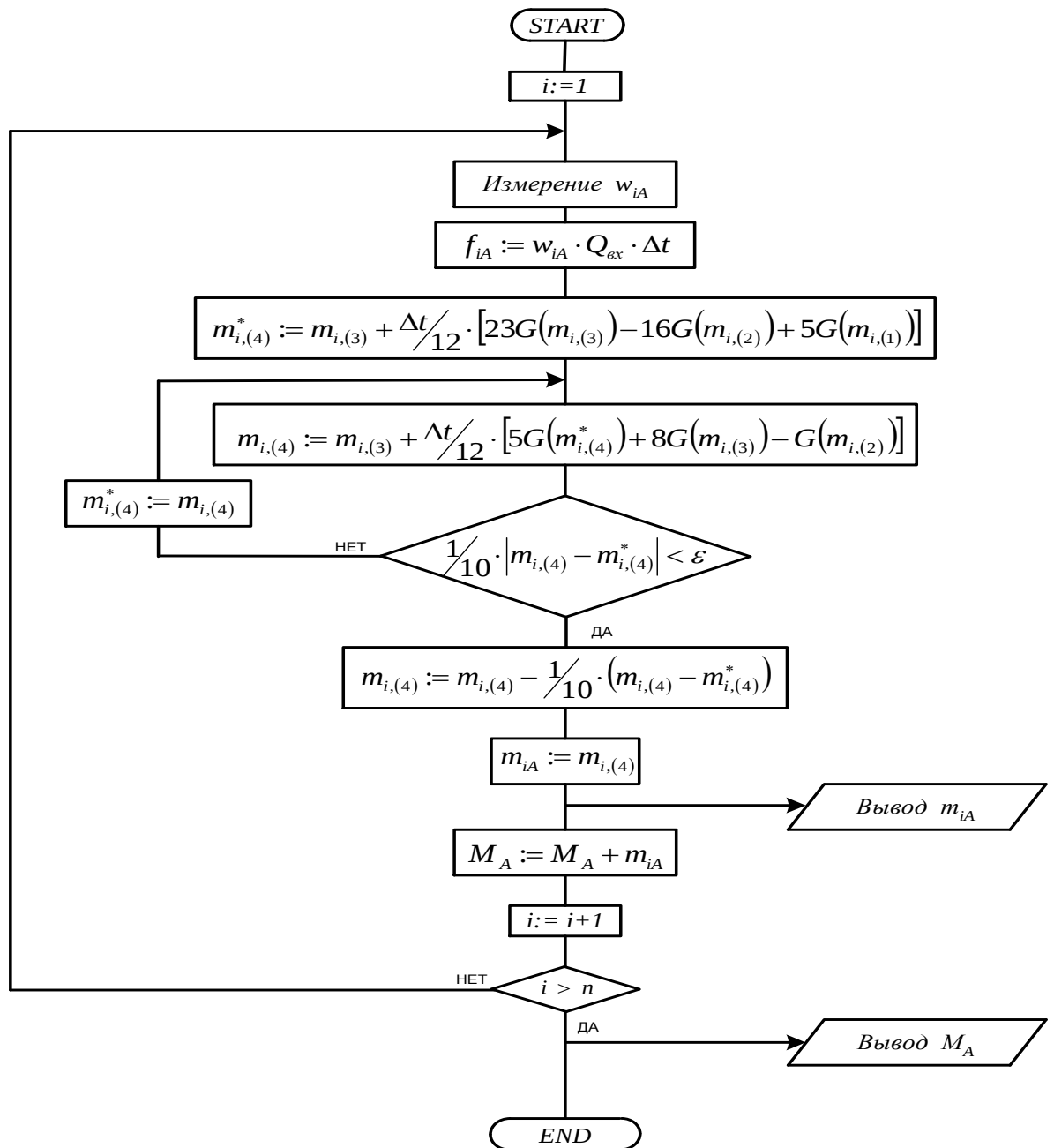


Рисунок 2.16 - Алгоритм прогнозирования запаса материала с помощью метода Адамса третьего порядка

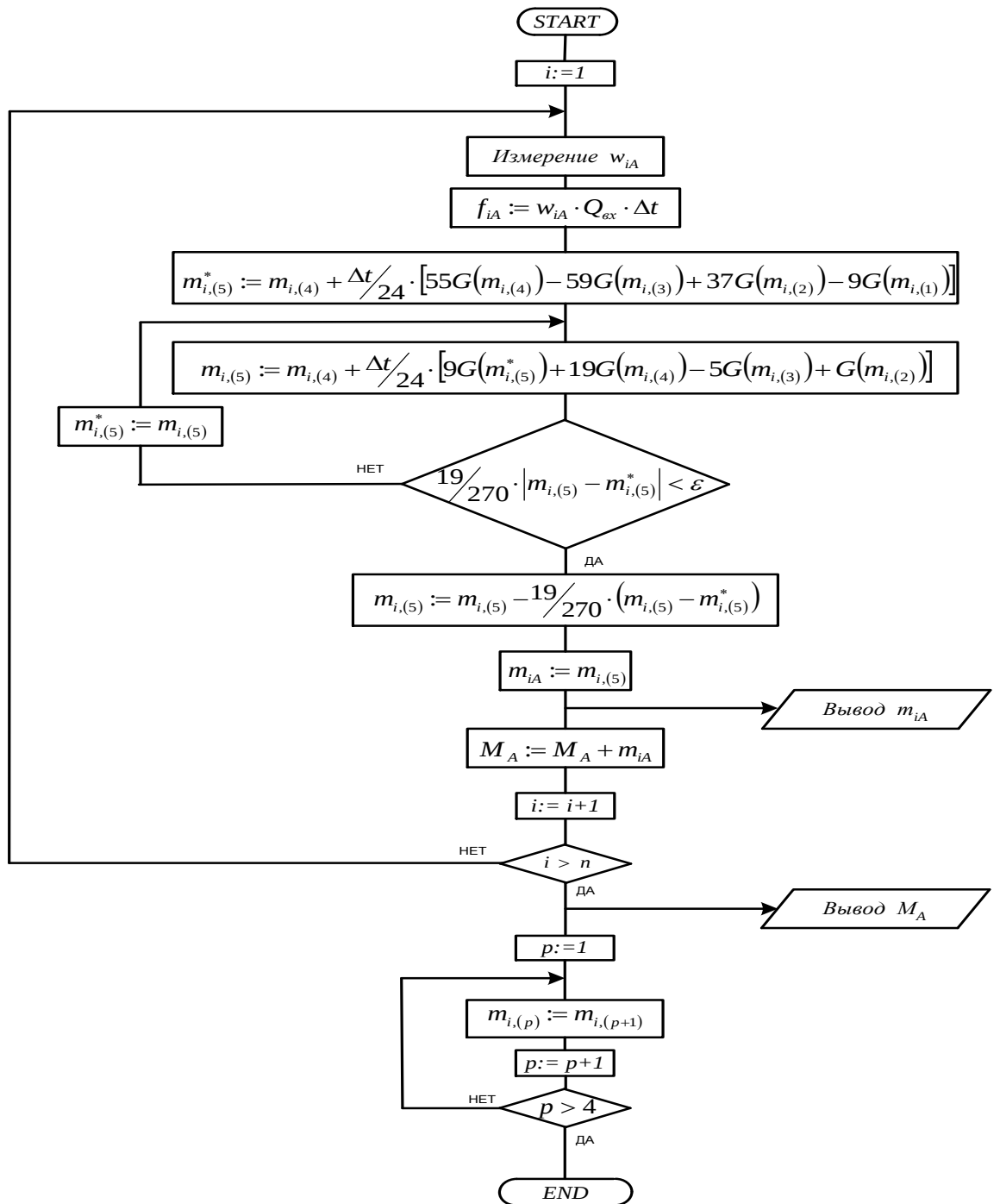


Рисунок 2.17 - Алгоритм прогнозирования запаса материала с помощью метода Адамса четвертого порядка

Ниже, на рисунке 2.18 показана процедура вычисления функции G

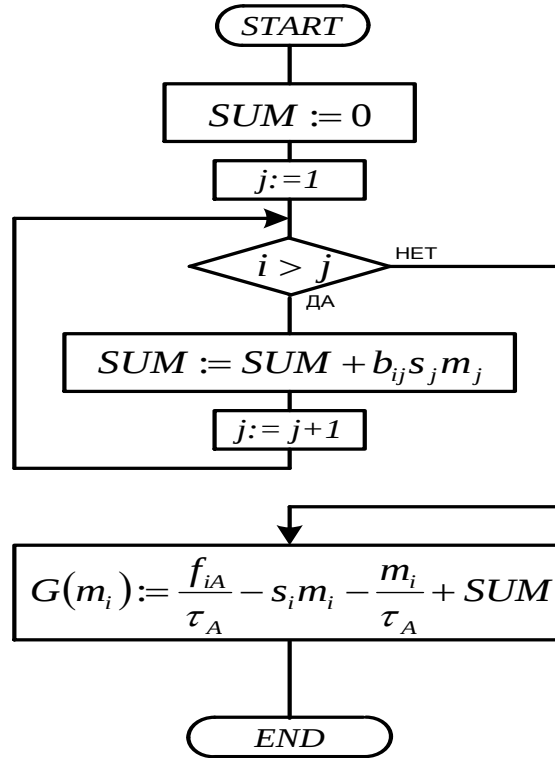


Рисунок 2.18 - Процедура вычисления функции G

2.4 Идентификация модели технологического процесса измельчения в шаровой мельнице работающей в открытом цикле.

2.4.1 Постановка задачи

Отыскание минимума целевой функции является задачей идентификации модели [94, 95, 104]

$$E(b_{ij}, s_i) = \sum_{i=1}^n [w_i(b_{ij}, s_i) - w_i^*]^2 \quad (2.34)$$

(условный минимум) при наличии ограничений

$$\varphi_j(b_{ij}) = \sum_{i=1}^n b_{ij} - 1 = 0, \quad i = \overline{1, n}, \quad j = \overline{1, (n-1)} \quad (2.35)$$

причем $0 \leq b_{ij} \leq 1$ и $0 \leq s_i \leq 1$,

где

$w_i(b_{ij}, s_i)$ – прогнозное значение для гранулометрического состава доизмельченного материала;

w_i^* – измеренное значение на сливе мельницы гранулометрического состава доизмельченного материала;

b_{ij} – функция разрушения материала;

s_i – функция отбора.

Таким образом определение оптимальных значений параметров модели b_{ij}, s_i , при наличии заданных ограничений, которые минимизируют целевую функцию $E(b_{ij}, s_i)$, будет являться задачей идентификации модели.

b_{ij} – элементы нижней треугольной матрицы B размерности $n \times n$:

$$B = \begin{bmatrix} b_{ij} \end{bmatrix}_{n \times n} \quad b_{ij} = 0, \text{ при } j \geq i$$

s_i – элементы диагональной матрицы S размерности $n \times n$:

$$S = \begin{bmatrix} s_{ij} \end{bmatrix}_{n \times n} \quad s_{ij} = 0, \text{ при } j \neq i$$

$$s_{ij} = s_i, \text{ при } j = i$$

где n – количество классов крупности материала.

2.4.2 Градиентный итеративный алгоритм по идентификации модели

При решении задачи идентификации используется градиентный итеративный метод [94, 99].

В два этапа с применением градиентного метода проводится поиск оптимума. На первом этапе ищутся частные производные от целевой функции используя все независимые переменные, определяющие в точке рассмотрения направление градиента.

Во втором этапе производится шаг в направлении скорейшего убывания уменьшения целевой функции (обратное направление градиента) [99].

При выполнении данного шага, изменяются одновременно значения независимых переменных, которые получают приращение, которое пропорционально составляющей градиента, расположенных на данной оси [62].

Выбор точки начального поиска, которая удовлетворяет данной системе ограничений, стоит в основе решения задачи по поиску оптимума, имеющего ограничения типа равенств (2.35), при этом выполняя некоторые шаги спуска в процессе поиска, ограничения (2.35) необходимо корректировать, т.к. они могут быть нарушены [99].

Независимые переменные s_i для начальной точки спуска можно задать произвольным образом, из условия $0 \leq s_i \leq 1$

Строго определены некоторые независимые переменные ($b_{ij} = 0$, при $j \geq i$); в ограничениях b_{ij} (2.35) для тех переменных $(m-1)$ которые остались m , задается произвольно переменная (принцип задания для начальной точки показан на рисунке 2.19), исходя из условий $0 \leq b_{ij} \leq 1$; решением уравнения вычисляется последняя переменная (2.35).

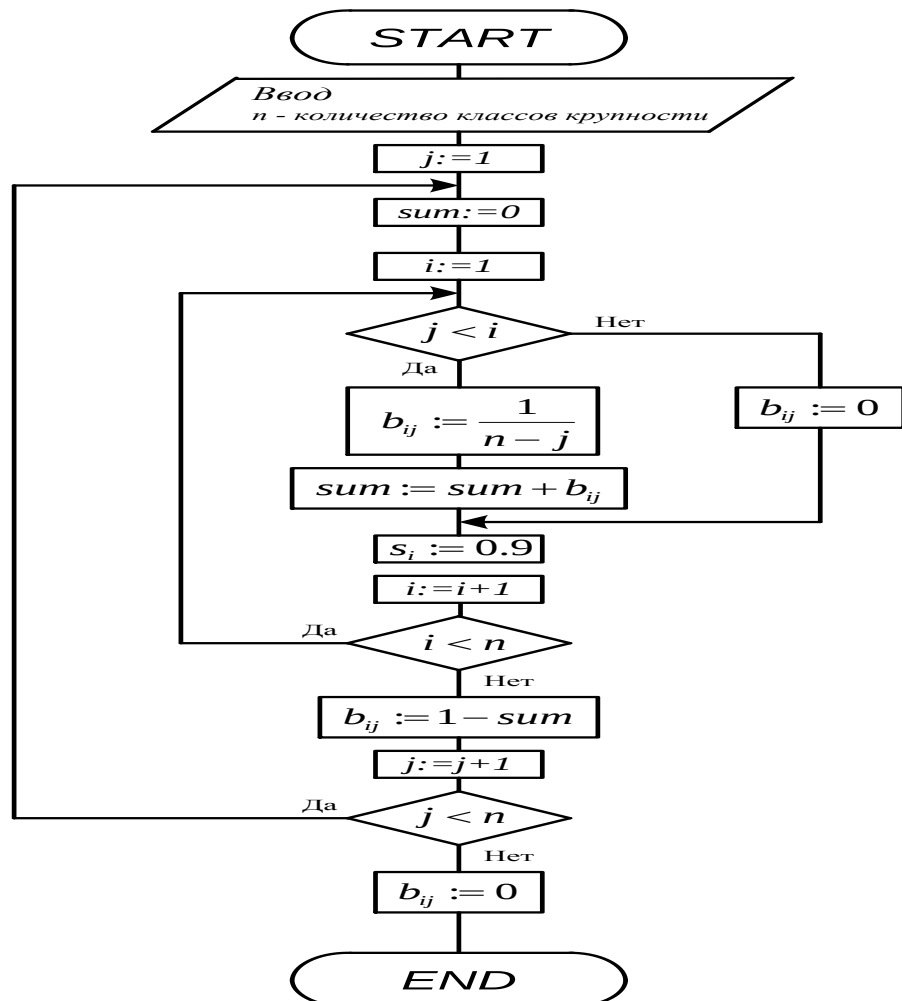


Рисунок 2.19 - Задание начальной точки для поиска оптимума

Таким образом, можно приступить к поиску оптимума, определив начальную точку.

Для удобства последующих рассуждений можно ввести матрицу X размерности $n \times n$, такую что

$$X = B + S$$

Таким образом идентификацию модели можно свести к поиску минимума к целевой функции типа:

$$E(x_{ij}) = \frac{1}{2} \cdot \sum_{i=1}^n [f_i(x_{ij})]^2 \quad (2.36)$$

где

$$f_i(x_{ij}) = w_i(x_{ij}) - w_i^* \quad (2.37)$$

При ограничениях

$$\varphi_j(x_{ij}) = \sum_{i=j+1}^n x_{ij} - 1 = 0, \quad i = \overline{1, n}, \quad j = \overline{1, (n-1)} \quad (2.38)$$

где $0 \leq x_{ij} \leq 1$

следующий вид имеет спуск градиента целевой функции [176]

$$x_{ij}^{(k+1)} = x_{ij}^{(k)} - h \cdot \nabla E(x_{ij}^{(k)}) \quad (2.39)$$

где $\nabla E(x_{ij}^{(k)})$ – градиент целевой функции $E(x_{ij})$, расположенный на k -ом шаге интегриции.

$$\nabla E(x_{ij}) = \left(\frac{\partial E}{\partial x_{11}}, \frac{\partial E}{\partial x_{12}}, \dots, \frac{\partial E}{\partial x_{1n}}, \frac{\partial E}{\partial x_{21}}, \frac{\partial E}{\partial x_{22}}, \dots, \frac{\partial E}{\partial x_{2n}}, \dots, \frac{\partial E}{\partial x_{n1}}, \frac{\partial E}{\partial x_{n2}}, \dots, \frac{\partial E}{\partial x_{nn}} \right)^T$$

Чтобы вычислить значения частных производных для целевой функции прибегаем к приближенному соотношению [176]

$$\frac{\partial E}{\partial x_{ij}} = \delta \cdot \frac{\partial w_i(x_{ij})}{\partial x_{ij}} \quad (2.40)$$

Где

$$\delta = w_i(x_{ij}) - w_i^*$$

$$\frac{\partial w_i}{\partial x_{ij}} = \frac{w_i(x_{11}, x_{12}, \dots, x_{ij} + \Delta x, \dots, x_{nn}) - w_i(x_{11}, x_{12}, \dots, x_{ij}, \dots, x_{nn})}{\Delta x}$$

Проанализируем функцию, для установления величина шага h ,

$$\Phi(h) = E[x_{ij}^{(k)} - h \cdot \nabla E(x_{ij}^{(k)})] \quad (2.41)$$

которая определяет в зависимости от шага h значение функции $E(x_{ij})$, согласно выбранному направлению, при этом шаг h выбирается так, чтобы функция $\Phi(h)$ имела минимум.

Уравнение касательно одной неизвестной h можно найти в случае явной формы вида функции $f_i(x_{ij})$, по условию:

$$\frac{d}{dh} E[x_{ij}^{(k)} - h \cdot \nabla E(x_{ij}^{(k)})] = 0 \quad (2.42)$$

Существует метод приближенного расчета $h^{(k)}$, который дает хорошие результаты [176].

Выражение для функции $\Phi(h)$ (2.41), с учетом уравнений (2.37), возможно представить в виде:

$$\Phi(h) = \sum_{i=1}^n \{f_i[x_{ij}^{(k)} - h \cdot \nabla E(x_{ij}^{(k)})]\}^2 \quad (2.43)$$

Функции под знаком суммы $f_i(x_{ij})$ можно разложить в ряд, с точностью до некоторых членов порядка малости, предполагая, что малой величиной $-h$ можно пренебречь, если ее степени выше первой.

Таким образом

$$\Phi(h) = \sum_{i=1}^n \left[f_i(x_{ij}^{(k)}) - h \cdot \frac{\partial f_i(x_{ij}^{(k)})}{\partial x_{ij}} \cdot \nabla E(x_{ij}^{(k)}) \right]^2 \quad (2.44)$$

$$\text{Где } \frac{\partial f_i}{\partial x_{ij}} = \left[\frac{\partial f_i}{\partial x_{11}}, \frac{\partial f_i}{\partial x_{12}}, \dots, \frac{\partial f_i}{\partial x_{1n}}, \frac{\partial f_i}{\partial x_{21}}, \frac{\partial f_i}{\partial x_{22}}, \dots, \frac{\partial f_i}{\partial x_{2n}}, \dots, \frac{\partial f_i}{\partial x_{n1}}, \frac{\partial f_i}{\partial x_{n2}}, \dots, \frac{\partial f_i}{\partial x_{nn}} \right]$$

Произведя дифференцирование (2.44), получаем

$$\frac{d\Phi(h)}{dh} = -2 \sum_{i=1}^n \left\{ \left[f_i(x_{ij}^{(k)}) - h \cdot \frac{\partial f_i(x_{ij}^{(k)})}{\partial x_{ij}} \cdot \nabla E(x_{ij}^{(k)}) \right] \cdot \frac{\partial f_i(x_{ij}^{(k)})}{\partial x_{ij}} \cdot \nabla E(x_{ij}^{(k)}) \right\} = 0 \quad (2.45)$$

Из этого выражения определим значение оптимального шага $h^{(k)}$:

$$h^{(k)} = \frac{\sum_{i=1}^n \left[f_i(x_{ij}^{(k)}) \cdot \frac{\partial f_i(x_{ij}^{(k)})}{\partial x_{ij}} \cdot \nabla E(x_{ij}^{(k)}) \right]}{\sum_{i=1}^n \left[\frac{\partial f_i(x_{ij}^{(k)})}{\partial x_{ij}} \cdot \nabla E(x_{ij}^{(k)}) \right]^2} \quad (2.46)$$

Алгоритм процесса идентификации модели показан на рисунке 2.20.

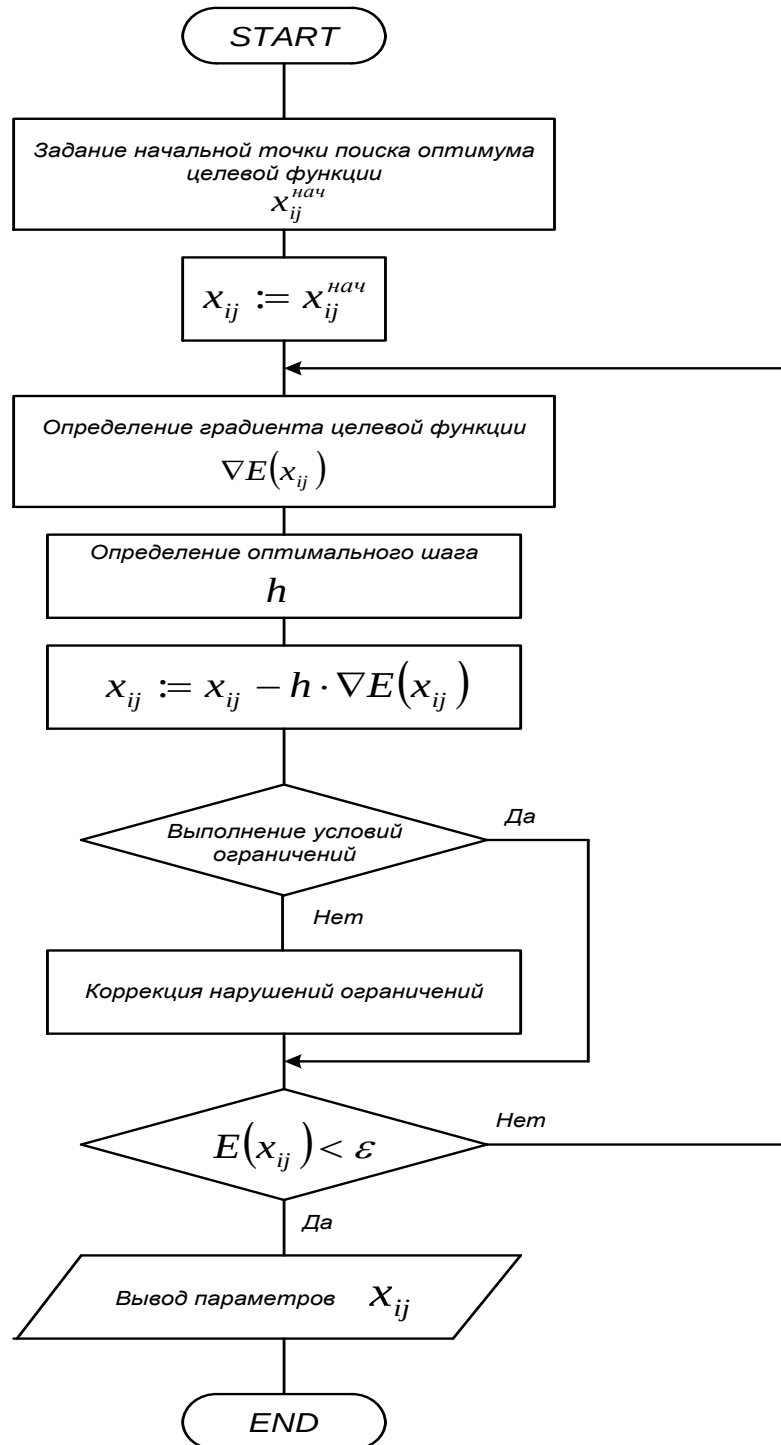


Рисунок 2.20 - Алгоритм процесса идентификации модели

2.4.3 Корректировка нарушений ограничений, возникающих при идентификации модели

Корректировку нарушений ограничений при поиске возможно показать задачей минимизации функций [176, 178]

$$H(x_{ij}) = \sum_{j=1}^{n-1} [\varphi_j(x_{ij})]^2 \quad (2.47)$$

Движение в n -мерном пространстве, расположенном вдоль определенной гиперповерхности, при их пересечении, которые соответствуют равенствам (2.38) можно считать поиском оптимума, с наличием ограничений, вроде равенств (2.38) и спуск на эту гиперповерхность при минимизации функции $H(x_{ij})$ (2.47) со значениями независимых переменных приводит к отклонению от направленного движения до оптимума целевой функции.

Для корректировки нарушений ограничений нужно двигаться по кратчайшему расстоянию от точки нарушений ограничений до гиперповерхности ограничений, к ее нормали [105]. Можно для того чтобы попасть на гиперповерхность ограничений примерно за один шаг применить такой прием [105].

Если в результате шага спуска оказалась нарушенной, система ограничений (2.38), то справедливыми будут соотношения для найденной точки $\bar{x}$.

$$\varphi_j(\bar{x}) = b_j, \quad j = \overline{1, (n-1)}, \quad (2.48)$$

Где некоторые из b_j будут отличны от нуля.

Предположим, что можно попасть в точку $\bar{x}'$, производя спуск от нормали n до гиперповерхности ограничений (2.38), которая расположена на данной гиперповерхности, для нее выполняется равенство

$$\varphi_j(\bar{x}') = 0, \quad j = \overline{1, (n-1)}. \quad (2.49)$$

Соотношением связана точка $\bar{x}'$ с точкой $\bar{x}$

$$\bar{x}' = \bar{x} - \delta n \quad (2.50)$$

где-вектор δn , совпадает с вектором нормали по направлению к гиперповерхности ограничений (2.38).

С помощью соотношений может быть через векторы нормалей $\bar{n}_i$ к гиперповерхностям выражен вектор δn , отвечающий равенствам

$$\delta n = \sum_{j=1}^{n-1} (\bar{n}_j \cdot \delta z_j) \quad (2.51)$$

Это соотношение, т.к. совпадают векторы $\bar{n}_i$ с градиентами по направлениям, можно представить, как:

$$\delta n = \sum_{j=1}^{n-1} (\nabla \varphi_j(\bar{x}) \cdot \delta z_j) \quad (2.52)$$

При этом коэффициенты Z_i отличны от нуля.

Определяя точку $\bar{x}$ из соотношения (2.50) как:

$$\bar{x} = \bar{x}' + \delta n \quad (2.53)$$

И подставим в уравнение (2.48) выражение (2.53) находим:

$$\varphi_j(\bar{x}' + \delta n) = b_j, \quad j = \overline{1, (n-1)}, \quad (2.54)$$

Разложим, считая малой величину δn , которая соответствует малости для нарушений ограничений (2.38), левую часть уравнений (2.54) по степени величины δn в ряд с точностью до членов первого порядка малости:

$$\Delta \varphi_j(\bar{x}') \cdot \delta n = \varphi_j(\bar{x}), \quad j = \overline{1, (n-1)}, \quad (2.55)$$

Запись (2.55) в векторной форме

$$W(\bar{x}') \cdot \delta n = \varphi(\bar{x}) \quad (2.56)$$

Куда введены обозначения:

$$W(\bar{x}') = \begin{bmatrix} \frac{\partial \varphi_1(\bar{x}')}{\partial x_{11}} & \frac{\partial \varphi_1(\bar{x}')}{\partial x_{21}} & \dots & \frac{\partial \varphi_1(\bar{x}')}{\partial x_{n1}} \\ \frac{\partial \varphi_2(\bar{x}')}{\partial x_{12}} & \frac{\partial \varphi_2(\bar{x}')}{\partial x_{22}} & \dots & \frac{\partial \varphi_2(\bar{x}')}{\partial x_{n2}} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial \varphi_n(\bar{x}')}{\partial x_{1n}} & \frac{\partial \varphi_n(\bar{x}')}{\partial x_{2n}} & \dots & \frac{\partial \varphi_n(\bar{x}')}{\partial x_{nn}} \end{bmatrix} \quad (2.57)$$

$$\varphi(\bar{x}) = \begin{bmatrix} \varphi_1(\bar{x}) \\ \varphi_2(\bar{x}) \\ \dots \\ \varphi_{(n-1)}(\bar{x}) \end{bmatrix} \quad (2.58)$$

Также может быть представлена величина δn , характеризующаяся формулой (2.52), с применением матрицы $w(\bar{x}')$ (2.57)

$$\delta n = W^T(\bar{x}') \cdot \delta z \quad (2.59)$$

где

$$\delta z = \begin{bmatrix} \delta z_1 \\ \delta z_2 \\ \dots \\ \delta z_{(n-1)} \end{bmatrix} \quad (2.60)$$

После в уравнение (2.56) подставим выражение (2.59), из получившегося уравнения находим вектор δz

$$W(\bar{x}') \cdot W^T(\bar{x}') \cdot \delta z = \varphi(\bar{x}') \quad (2.61)$$

И с учетом обозначений

$$A(\bar{x}') = W(\bar{x}') \cdot W^T(\bar{x}') \quad (2.62)$$

Записывается в виде:

$$A(\bar{x}') \cdot \delta z = \varphi(\bar{x}') \quad (2.63)$$

После вычисления значений частных производных $\frac{\partial \varphi_j}{\partial x_{ij}}$, определяющие W (2.57) в точке $\bar{x}$ находящейся теоретически на гиперповерхности ограничений, можно решить уравнения (2.63). Так как данная точка не известна заранее, то приходится использовать матрицу, находящуюся в точке, вместо имеющейся в уравнении (2.61) матрицы $w(\bar{x}')$. Допуская, что нарушения ограничений невелики, то считаем, что $w(\bar{x}') \approx w(\bar{x})$ и можно решить приближенное уравнение [176]

$$A(\bar{x}) \cdot \delta z = \varphi(\bar{x}) \quad (2.64)$$

Значит если система ограничений (2.38) образована с помощью линейно независимых функций $\varphi_j(\bar{x})$, то может быть решена система уравнений (2.63).

Таким образом определяется вектор δz , при помощи которого, находится другой вектор δn по формуле (2.59), характеризующий величину и направление

шага спуска, дающий возможность оказаться на гиперповерхности ограничений (2.38), кратким путем.

2.5 Анализ статических и динамических свойств процесса измельчения

Процессы классификации и измельчения являются нелинейными и нелинейны их статические характеристики, но их можно линеаризовать в некотором диапазоне изменений, связанных с входными параметрами. При этом некоторые зависимости имеют выраженный экстремум, как например, выходы готового класса на сливе с классификатора, в зависимости от содержания твёрдого и затрачиваемой мельницей мощности, а также зависимость по сливу с мельницы от содержания твердого в питании мельницы.

За счет этих зависимостей осуществляется экстремальное управление технологическими процессами классификации и измельчения.

Статические характеристики классифицирующих аппаратов и мельниц, по разным каналам, работающих в замкнутом и открытом цикле показаны на рисунке 2.21.



Рисунок 2.21 - Статические характеристики процессов измельчения и классификации: а – гидроциклона по каналу «плотность питания – плотность слива»; б – шаровой мельницы по каналу «производительность – содержание класса -0,071 мм в сливе гидроциклона»

2.5.1 Динамические характеристики процесса измельчения

Рассмотрим агрегат мокрого измельчения с замкнутым циклом как объект автоматического управления. Для этого определим входные воздействия и выходные величины (рисунок 2.22).

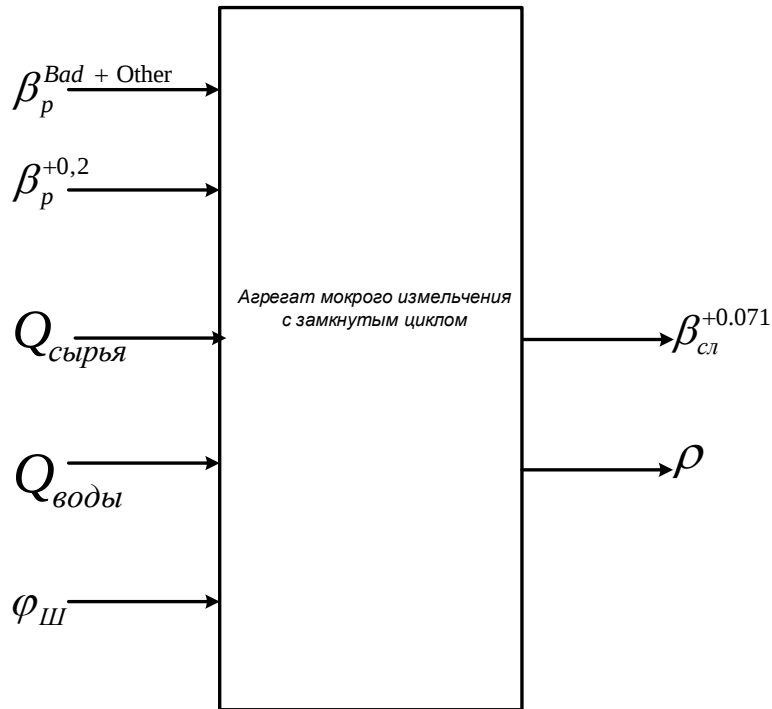


Рисунок 2.22 - Входные воздействия и выходные параметры агрегата мокрого измельчения с замкнутым циклом работы

К входным воздействиям относятся:

- минералогический состав сырья – содержание бадделеита и сопутствующих минералов в исходной измельченной руде, именуемый в работе в дальнейшем, как $\beta^{Bad + Other}$, %;

- гранулометрическая характеристика сырья на входе в мельницу – содержание класса крупности +0,2 мм $\beta_p^{+0,2}$, %;

- производительность агрегата по исходному сырью $Q_{сырья}$, т/ч;

- шаровое наполнение мельницы $\varphi_{ш}$, %;

- расход воды в классифицирующее оборудование $Q_{воды}$, м³/ч;

Выходные параметры:

- гранулометрическая характеристика готового продукта измельчения – содержание определяющего класса крупности $+0,071$ мм на сливе классификатора $\beta_{\text{слив}}^{+0,071}$, %;

- плотность на сливе классифицирующего аппарата ρ , г/см³.

Проанализируем входные воздействия и выходные величины.

Основным требованием, предъявляемым к системе автоматического управления процессом измельчения, является оптимальное пульповое наполнение мельницы при стабилизации содержания класса крупности $-0,071+0$ мм в готовом продукте измельчения, а также заданная плотность. Поэтому управляемыми переменными агрегата мокрого измельчения с замкнутым циклом работы будут являться содержание определяющего класса крупности $+0,071$ мм на сливе классификатора $\beta_{\text{слив}}^{+0,071}$, а также плотность продукта измельчения и классификации ρ .

Управляющими воздействиями будут служить:

- производительность агрегата по исходному сырью $Q_{\text{сырья}}$, т/ч;

- расход воды в классифицирующее оборудование $Q_{\text{воды}}$, м³/ч

К возмущающим воздействиям могут быть отнесены:

- минералогический состав исходного сырья – содержание бадделеита и сопутствующих минералов в исходной руде $\beta^{\text{Bad} + \text{Other}}$, %;

- гранулометрическая характеристика сырья на входе в мельницу – содержание класса крупности $+0,2$ мм $\beta_p^{+0,2}$, %;

- вынос мелких шаров и скрапа из процесса измельчения, приводящий к уменьшению шарового заполнения мельницы $\varphi_{\text{ш}}$, %;

Изменение минералогического состава исходного сырья и гранулометрической характеристики продукта измельчения и классификации, а также износ футеровки барабана мельницы должны быть учтены при формировании задания по расходу исходного сырья и контролю уровня потребляемой мощности.

2.5.2 Математическая модель шаровой мельницы для канала «расход сырья –запас промпродукта в мельнице»

Уравнение баланса будет иметь следующий вид:

$$\frac{dM}{dt} = Q_1 - Q_2 \quad (2.65)$$

где

M – запас материала в мельнице;

Q_1 – входной поток сырья для измельчения;

Q_2 – выходной поток продукта измельчения.

Поток готового продукта измельчения Q_2 непосредственно зависит от запаса материала M в мельнице. В равновесных режимах данная зависимость приводится как статическая характеристика:

$$Q_2 = Q_2(M) \quad (2.66)$$

Приведенная зависимость имеет экстремальный характер, основываясь на следующих рассуждениях. Производительность мельницы по готовому продукту измельчения $Q_2 = 0$, в условиях отсутствия в ней материала ($M = 0$) будет равняться нулю. Соответственно при увеличении M производительность Q_2 будет возрастать. В тоже время в условиях переполнения мельницы материалом, практически прекращается образование вновь образованного измельченного продукта, соответственно уменьшается количество слива с классификатора, и, следовательно, поток Q_2 будет стремиться к нулю.

Приведенное соотношение (2.66) будет справедливо для режимов равновесных, что касается переходных процессов, то скорее всего $Q_2 \neq Q_2(M)$. Возможно оценить, как быстро величина Q_2 примет равновесное значение, если ее вывести из данного состояния, представляя точку, которая характеризует состояние агрегата, не лежащей на статической характеристике, а отклоненной от нее, устанавливая, насколько быстро данная точка сольется с ней приблизившись к характеристике.

Применяя понятия возмущенного и невозмущенного движения согласно теории устойчивости, можно назвать невозмущенным движением-состояние равновесия $Q_{2cm} = Q_2(M)$, и соответственно возмущенным движением-отклонение от него.

Также можно найти уравнение возмущенного движения, обозначив через $\Delta Q_2 = Q_2 - Q_2(M)$, отклонение от значений, соответствующим зависимости (2.65) величины Q_2 .

Принимая скорость изменения для величины ΔQ_2 в возмущенном движении, при котором $\Delta Q_2 \rightarrow 0$ и $Q_2 \rightarrow Q_2(M)$, будет больше, чем во-первых непосредственно отклонение ΔQ_2 , и чем значительней скорость циркуляции измельчаемого материала в агрегате, во-вторых.

$$\frac{d\Delta Q_2}{dt} = -\omega \cdot \Delta Q_2 \quad \text{или} \quad \frac{1}{\omega} \cdot \frac{d\Delta Q_2}{dt} + \Delta Q_2 = 0 \quad (2.67)$$

Здесь число ω будет характеризовать скорость циркуляции, а также быстроту процессов, протекающих в агрегате. Число $T_B = \frac{1}{\omega}$ это постоянная времени для уравнения возмущенного движения (2.67), которое характеризует скорость переходных процессов $Q_2(t) \rightarrow Q_2[M(t)]$.

Просуммируя уравнение статики и уравнение возмущенного движения, получим

$$\frac{1}{\omega} \cdot \frac{d\Delta Q_2}{dt} + \Delta Q_2 + Q_{2cm} = Q_2(M) \quad (2.68)$$

Так как

$$Q_{2cm} + \Delta Q_2 = Q_2 \quad \text{и}$$

$$\frac{d\Delta Q_2}{dt} \approx \frac{d(Q_{2cm} + \Delta Q_2)}{dt} = \frac{dQ_2}{dt} \quad (2.69)$$

То

$$\frac{1}{\omega} \cdot \frac{dQ_2}{dt} + Q_2 = Q_2(M) \quad (2.70)$$

Подставляя сюда $Q_2 = Q_1 - \frac{dM}{dt}$ из уравнения баланса, получаем

$$\frac{1}{\omega} \cdot \frac{d^2M}{dt^2} + \frac{dM}{dt} + Q_2(M) = Q_1 + \frac{1}{\omega} \cdot \frac{dQ_1}{dt} \quad (2.71)$$

Учитывая количественную малость возмущенного движения им возможно пренебречь. Тогда уравнение принимает вид:

$$\frac{d\Delta M}{dt} + Q_2(\Delta M) = \Delta Q_1 \quad (2.72)$$

Приводим это уравнение к виду

$$\frac{1}{Q_2(\Delta M)} \frac{d\Delta M}{dt} + 1 = \frac{Q_1(\Delta M)}{Q_2(\Delta M)} \quad (2.73)$$

Обозначим

$$\frac{1}{Q_2(\Delta M)} = T \quad \frac{Q_1(\Delta M)}{Q_2(\Delta M)} = K \quad (2.74)$$

Получим

$$T \cdot \frac{d\Delta M}{dt} + \Delta M = K \cdot \Delta Q_1 \quad (2.75)$$

Или в операторной форме

$$\Delta M \cdot (Tp + 1) = K \cdot \Delta Q_1 \quad (2.76)$$

Передающая функция объекта, таким образом выглядит

$$W(p) = \frac{\Delta M}{\Delta Q_1} = \frac{K}{Tp + 1} \quad (2.77)$$

Процесс измельчения, протекающий в мельнице, характеризуется транспортным запаздыванием, вследствие того, что материал в ней, перемешиваясь, перемещается вдоль всей длины барабана. Таким образом передаточная функция по каналу «расход сырья – запас промпродукта в мельнице» для агрегата мокрого измельчения примет вид:

$$W_M(p) = \frac{K}{Tp + 1} \cdot e^{-\tau p} \quad (2.78)$$

По разгонной характеристике объекта определяем значение постоянной времени T , коэффициента усиления $K_{об}$ и времени запаздывания τ (рисунок 2.23).

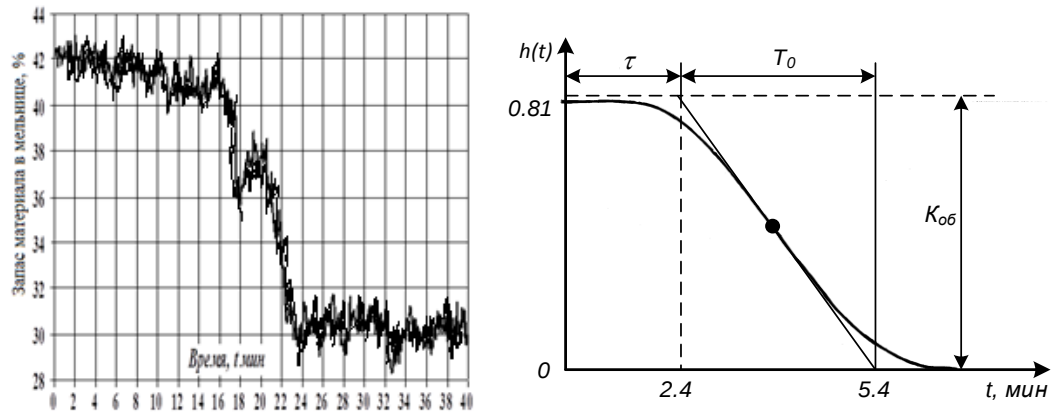


Рисунок 2.23 - Разгонная характеристика мельницы по каналу «расход сырья – запас промпродукта в мельнице»

Проводим касательную к точке перегиба и снимаем следующие параметры:

- запаздывание $\tau = 2,4$ мин.
- время интегрирования $T = 2,8$ мин.
- коэффициент усиления $k = -0,81$

Итак, получили передаточную функцию мельницы по каналу «расход сырья – запас промпродукта в мельнице»:

$$W_M(p) = \frac{-0.81}{2.8p + 1} \cdot e^{-2.4p} \quad (2.79)$$

2.5.3 Математическая модель классифицирующего аппарата по каналу «расход воды – плотность слива»

Для классифицирующего аппарата составим уравнение баланса

$$V \cdot \frac{d\rho_n}{dt} = Q_{изм} + W_B - Q_{песк} - Q_{сл} \quad (2.80)$$

где V – объем пульпы в классифицирующем аппарате, $V = const$;

$Q_{изм}$ – расход измельченного материала;

$Q_{песк}$ – расход песков классификатора;

$Q_{сл}$ – расход готового продукта в сливе классификатора;

$Q_{воды}$ – расход воды в процесс классификации;

ρ_n – плотность пульпы в классифицирующем аппарате.

Запишем уравнение баланса в приращениях

$$V \cdot \frac{d\Delta\rho_n}{dt} = \Delta Q_{изм} + \Delta W_B - \Delta Q_{песк} - \Delta Q_{сл} \quad (2.81)$$

Проанализируем полученное уравнение.

При изменении расхода воды в процесс классификации расход измельченного материала остается постоянным, т.е. $\Delta Q_{изм} = 0$. При неизменном расходе измельченного материала выход песков классифицирующего аппарата остается так же постоянным, т.е. $\Delta Q_{песк} = 0$.

При изменении расхода воды плотность слива классифицирующего аппарата изменяется прямо пропорционально изменению плотности пульпы, находящейся в процессе классификации, т.е. $\Delta\rho_{сл} = k_1 \cdot \Delta\rho_n$.

Кроме того, изменение расхода готового продукта в сливе классификатора пропорционально плотности слива вследствие изменения расхода воды в процесс, т.е. $\Delta Q_{сл} = k_2 \cdot \Delta\rho_{сл}$.

Преобразуем уравнение (2.80) с учетом полученных зависимостей

$$\frac{V}{k_1} \cdot \frac{d\Delta\rho_{сл}}{dt} = \Delta W_B - k_2 \Delta\rho_{сл} \quad (2.82)$$

$$\frac{V}{k_1 k_2} \cdot \frac{d\Delta\rho_{сл}}{dt} + \Delta\rho_{сл} = \frac{1}{k_2} \cdot \Delta W_B \quad (2.83)$$

Обозначив

$$\frac{V}{k_1 k_2} = T \quad \frac{1}{k_2} = K$$

получим

$$T \cdot \frac{d\Delta\rho_{сл}}{dt} + \Delta\rho_{сл} = K \cdot \Delta W_B \quad (2.84)$$

Или в операторной форме

$$\Delta\rho_{сл} \cdot (Tp + 1) = K \cdot \Delta W_B \quad (2.85)$$

Таким образом, передаточная функция объекта

$$W(p) = \frac{\Delta \rho_{сл}}{\Delta W_B} = \frac{K}{Tp + 1} \quad (2.86)$$

Данный процесс характеризуется запаздыванием, связанным с движением пульпы в трубопроводе и классифицирующем аппарате.

Тогда передаточная функция классифицирующего аппарата по каналу «расход воды – плотность слива» примет вид:

$$W_{гц}(p) = \frac{K}{Tp + 1} \cdot e^{-\tau p} \quad (2.87)$$

Значение коэффициента усиления $K_{об}$, постоянной времени T и времени запаздывания определим по разгонной характеристике объекта (рисунок 2.24).

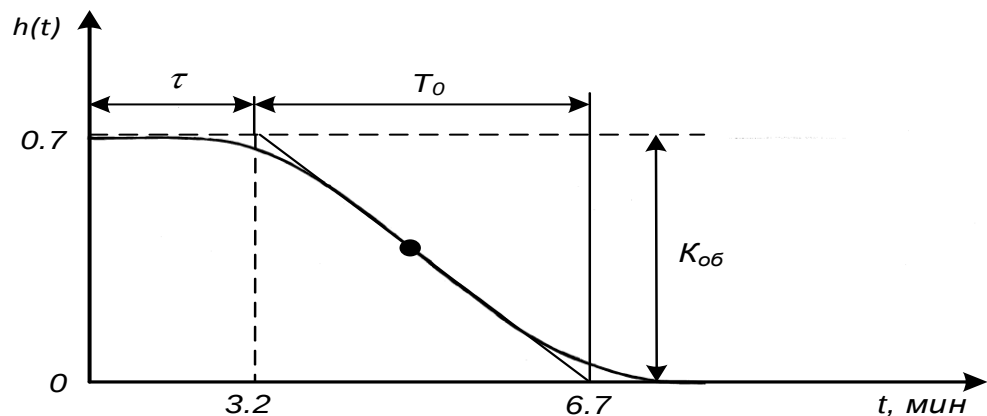


Рисунок 2.24 - Разгонная характеристика классифицирующего аппарата по каналу «расход воды – плотность слива»

Проводим касательную к точке перегиба и снимаем следующие параметры:

запаздывание $\tau = 3,2$ мин.

время интегрирования $T = 3,1$ мин.

коэффициент усиления $k = -0.7$

Итак, получили передаточную функцию мельницы по каналу «расход воды – плотность слива»:

$$W_{гц}(p) = \frac{-0.7}{3.1p + 1} \cdot e^{-3.2p} \quad (2.88)$$

2.5.4 Математическая модель магистрального пульпового насоса по каналу «угловая скорость двигателя – производительность пульпового насоса»

Основное уравнение динамики электропривода имеет вид:

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_{\text{э}} - M_{\text{с}} \quad (2.89)$$

где J – момент инерции вращающихся масс, приведенный к валу электродвигателя;

ω – угловая скорость вращения вала электродвигателя;

$M_{\text{э}}$ – электромагнитный момент, развиваемый двигателем;

$M_{\text{с}}$ – момент сопротивления, приведенный к валу двигателя.

Рассмотрим это уравнение в приращениях

$$J \frac{d\Delta\omega}{dt} = \Delta M_{\text{э}} - \Delta M_{\text{с}} \quad (2.90)$$

При изменении угловой скорости вращения приводного двигателя $\Delta\omega$ момент сопротивления на его валу остается постоянным, т.к. количество пульпы, находящейся в транспортной системе, не изменяется. Таким образом, $\Delta M_{\text{с}} = 0$.

Изменение угловой скорости вращения приводного двигателя $\Delta\omega$ прямо пропорционально изменению производительности магистрального пульпового насоса ΔQ , т.е. $\Delta\omega = k_1 \cdot \Delta Q$.

Изменение угловой скорости вращения двигателя есть некоторая функция от электромагнитного момента, развиваемого двигателем $\Delta\omega = f(\Delta M_{\text{э}})$. Для упрощения расчетов представим эту зависимость в линейном виде: $\Delta\omega = k_2 \cdot \Delta M_{\text{э}}$

$$\Delta M_{\text{э}} = \frac{1}{k_2} \cdot \Delta\omega$$

или

Подставив полученные зависимости в уравнение (2.89), получим

$$J \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot \frac{d\Delta Q}{dt} = \Delta\omega \quad (2.91)$$

Обозначив $K' = J \cdot k_1 \cdot k_2$, запишем уравнение (2.90) в операторной форме

$$K'p \cdot \Delta Q = \Delta \omega \quad (2.92)$$

Передаточная функция магистрального пульпового насоса по каналу «угловая скорость вращения двигателя – производительность пульпового насоса» имеет вид

$$W(p) = \frac{\Delta Q}{\Delta \omega} = \frac{K}{p} \quad (2.93)$$

Можно наблюдать из динамических характеристик, что имеется переход от одних к другим технологическим условиям по всем точкам комплекса, с возмущениями по расходу пульпы. При этом идет изменение плотности и гранулометрического состава гидроциклонного слива при возмущениях по расходу воды [144].

По полученным переходным характеристикам можно сказать, что по любому каналу объект обладает самовыравниванием, объект статический.

Моделирование процесса измельчения и графики переходных процессов динамической системы мельница-классификатор приведены ниже.

Приближенный характер приведенных выше расчетов по выбору параметров САР требует обязательной их проверки. Для этого проводится расчет и построение переходных процессов в САР. Переходные процессы строим с помощью ПЭВМ с использованием частотного метода.

В начале определяется для замкнутой системы $W_3(p)$ частотная вещественная характеристика. С этой целью $W_3(p)$ подставляем $p = j\omega$ и изменяя частоту от нуля до бесконечности определяют вещественную часть $W_3(j\omega)$:

$$P(\omega) = \operatorname{Re} W_3(j\omega) \text{ при } \omega = 0, \omega_1, \omega_2, \dots, \omega_{\max} \quad (2.94)$$

Ограничиваясь максимальной частотой $\omega_{\max}$, ввиду сложности вычисления (2.94) во всем диапазоне частот от 0 до ∞ , которую выбирают с условием что при $\omega > \omega_{\max}$, частотная вещественная характеристика получает пренебрежительной маленькие значения, как пример от начального значения $P_3(0)$ менее 5%.

На второй стадии получают переходной процесс на основе найденной на первом стадии $P_3(0)$ для диапазона

$$0 \leq \omega \leq \omega_{\max}$$

Поэтому применяется выражение:

$$y(t) = \frac{\pi}{2} \int_0^{\infty} P_3(\omega) \frac{\sin \omega t}{\omega} d\omega \quad \text{при } t > 0 \quad (2.95)$$

Интеграл (2.12) для ряда показателей времени от $t=0$ до $t=t_{\max}$. Находится приближенным методом, при этом чтобы переходной процесс практически закончился в момент максимального значения времени.

Графики переходных процессов представлены на рисунках 2.25, 2.26, 2.27.

По графикам переходных процессов можно сделать выводы о качестве регулирования по параметрам переходного процесса – его времени, перерегулировании.

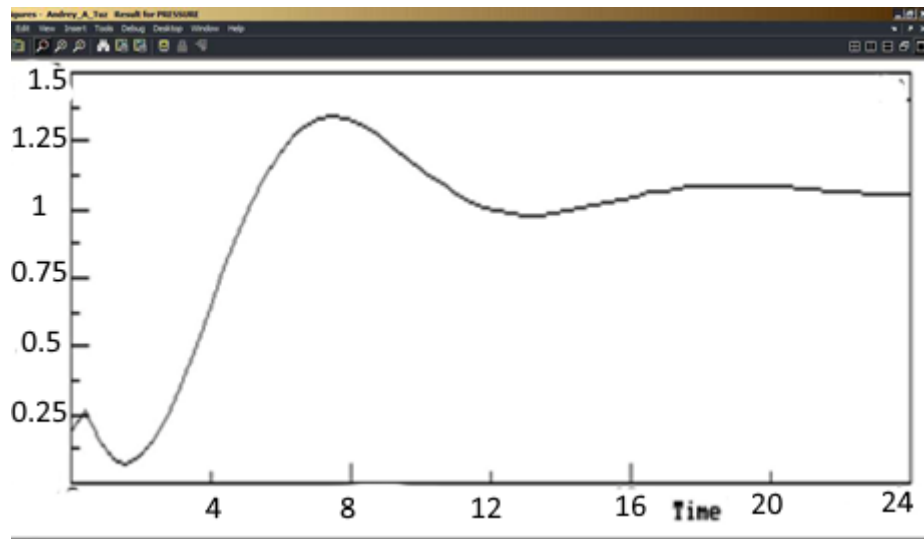


Рисунок 2.25 - Переходный процесс в контуре регулирования производительности магистрального пульпового насоса-питателя

На рисунке 2.25 представлен переходной процесс в контуре управления производительностью магистрального пульпового насоса при ступенчатом увеличении угловой скорости приводного двигателя. Исходя из полученного переходного процесса, находим его характеристики:

А) перерегулирование:

$$\gamma = \frac{h_{\text{vax}} - h_{\text{ycm}}}{h_{\text{ycm}}} \cdot 100\% = \frac{1,28 - 1}{1} \cdot 100\% = 28\%$$

Б) время регулирования:

$$t_p = 12,1 \text{ сек}$$

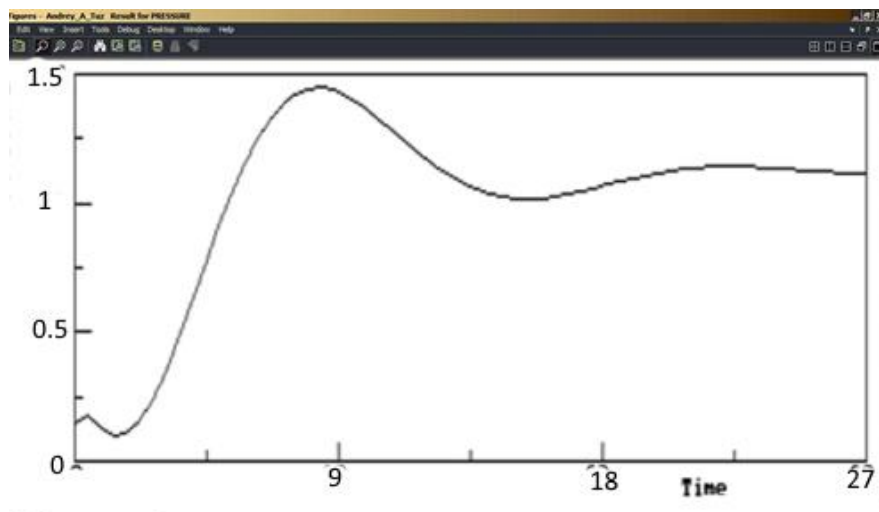


Рисунок 2.26 - Переходный процесс в контуре регулирования пульповым наполнением мельницы по потребляемой мощности

На рисунке 2.26 представлен переходной процесс в контуре регулирования пульповым наполнением мельницы по потребляемой мощности при ступенчатом уменьшении производительности магистрального пульпового насоса по пульпе. Характеристики переходного процесса:

А) перерегулирование:

$$\gamma = \frac{h_{\text{vax}} - h_{\text{ycm}}}{h_{\text{ycm}}} \cdot 100\% = \frac{1,31 - 1}{1} \cdot 100\% = 31\%$$

Б) время регулирования:

$$t_p = 20,4 \text{ мин.}$$

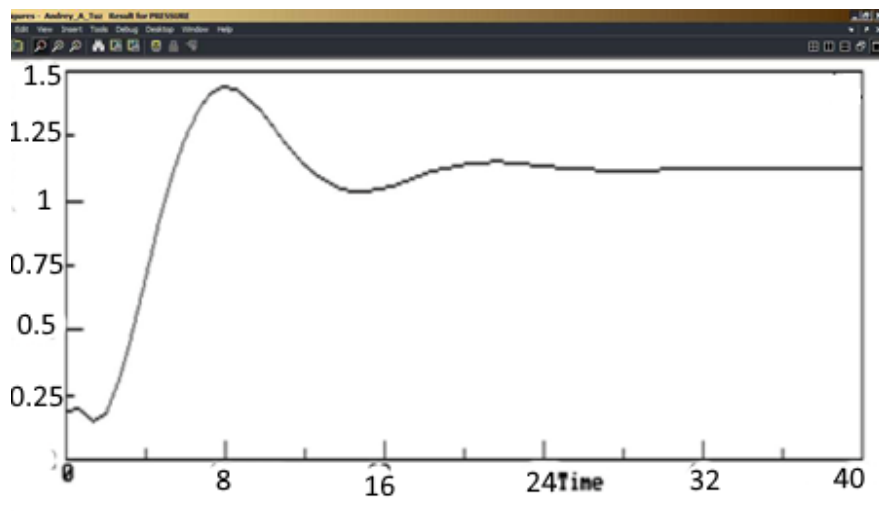


Рисунок 2.27 - Переходный процесс в контуре регулирования плотности слива классифицирующего аппарата

На рисунке 2.27 представлен переходной процесс в контуре стабилизации плотности слива классифицирующего аппарата при ступенчатом уменьшении расхода воды в процесс классификации. Характеристики переходного процесса:

А) перерегулирование:

$$\gamma = \frac{h_{\text{vax}} - h_{\text{уст}}}{h_{\text{уст}}} \cdot 100\% = \frac{1,32 - 1}{1} \cdot 100\% = 32\%$$

Б) время регулирования: $t_p = 23$ мин.

2.5.5 Модель процесса измельчения в цикле подготовки питания флотации

При рассмотрении математической модели процесса измельчения учитывались результаты, полученные выше.

На рисунке 2.28 показан рассматриваемый технологический процесс измельчения в цикле подготовки питания флотации. Насосом №1 из аккумулирующей емкости (пульпобака) №2 технологические хвосты железорудного производства подаются на обесшламливающий гидроциклон ГЦ 1400, пески с которого направляются в шаровую мельницу №4, где происходит процесс доизмельчения, слив с мельницы МШР 3600x5000 №4 направляется в мельничный зумпф №5 и затем подается на классифицирующие гидроциклоны ГЦ-710 №7, пески с которого идут обратно в мельницу, а слив с гидроциклона №7 подается на сгущение, являясь впоследствии исходным питанием флотации.

Производительность мельницы оценивается по потребляемой мощности, при этом учитывается расход исходного сырья по датчику №8, далее система управления вырабатывает управляющее воздействие на электродвигатель насоса №1, через преобразователь частоты.

Для качественного протекания процесса флотации, питание флотации должно иметь необходимый регламентный гранулометрический состав и плотность питания. Плотность питания в данной системы анализируется плотномером №11, информация с которого подается системе управления №9, которая вырабатывает управляющее воздействие на клапан подачи обратной

воды №12, который одновременно является расходомером (клапан-расходомер) [155]. Крупность продукта анализируется прибором измерения крупности №10.

В подобных системах дополнительно может учитываться контроль уровня пульпы в мельничном зумпфе, а также давление на входе в гидроциклон.

Чтобы проанализировать поведение процесса измельчения и классификации в динамике, при изменении расхода исходного сырья в процесс измельчения и расхода воды в зумпф мельницы, при различных коэффициентах разделения на пески и слив внутри гидроциклонов, имитирующих изменение различных физико-химических свойств сырья, был поставлен ряд имитационных экспериментов в среде Matlab Simulink.

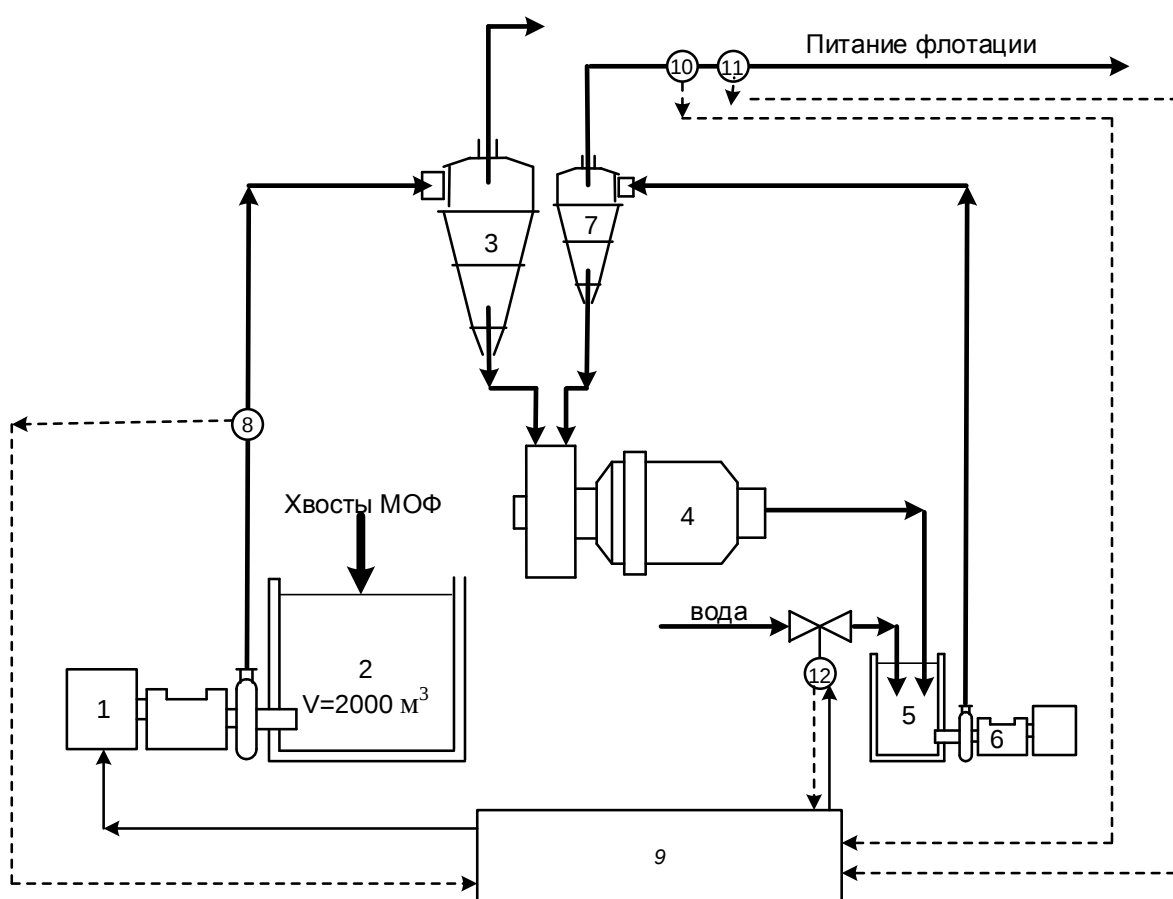


Рисунок 2.28 - Технологический процесс измельчения

2.5.6 Схема модели в среде Matlab|Simulink для проведения вычислительного эксперимента

Ниже, на рисунке 2.29, приведена модель, созданная в среде Matlab|Simulink с целью проведения вычислительного эксперимента. Данная модель построена согласно рисунку 2.28.

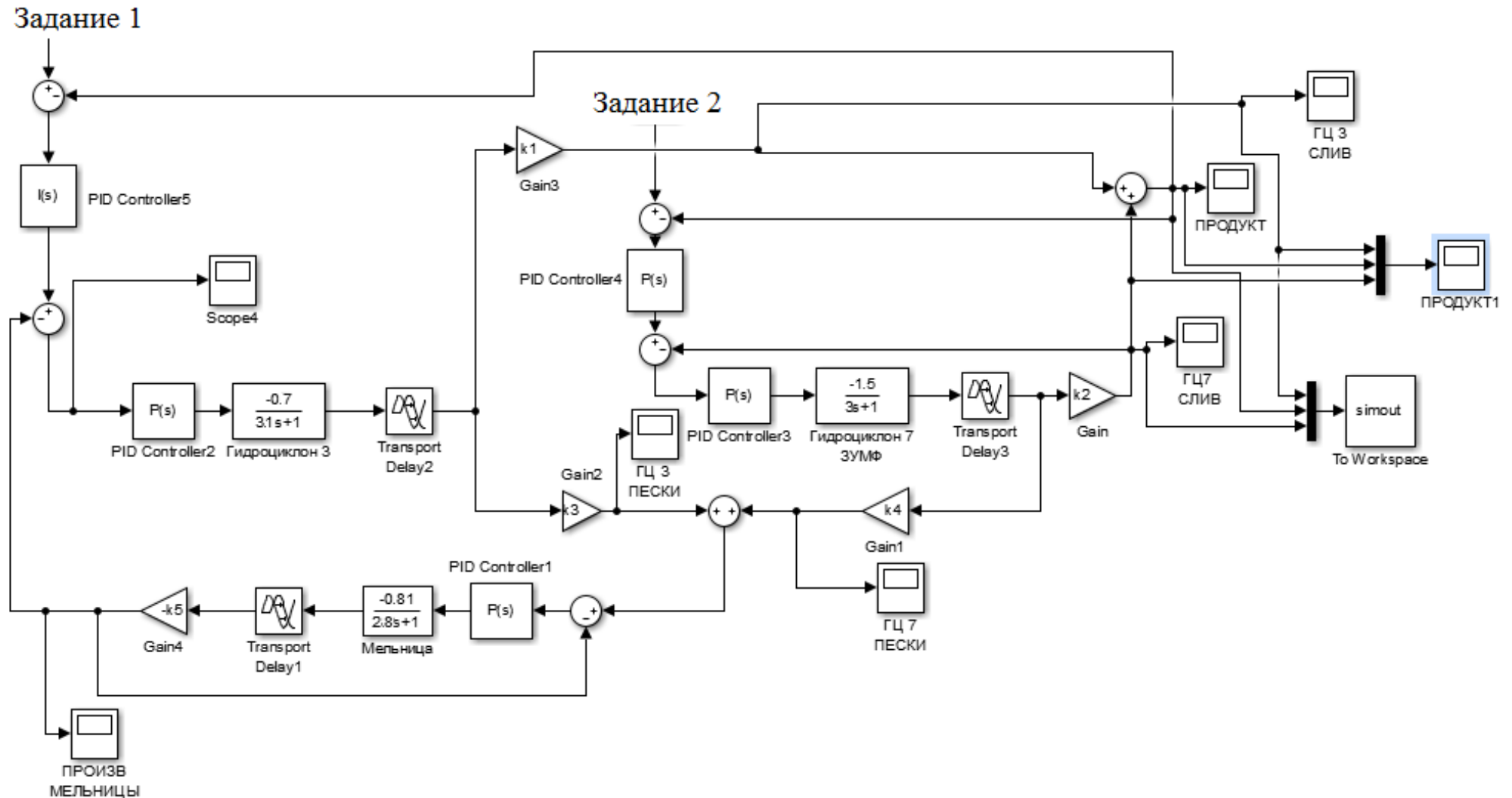


Рисунок 2.29 - Схема модели технологического процесса измельчения в Matlab|Simulink

Таблица вычислительного эксперимента

Ниже в таблице 2.4 показаны данные для трех различных экспериментов, в которых комбинировались задания по исходному питанию и подаче воды в зумпф гидроциклона, при фиксированных коэффициентах отбора материала в пески и в слив гидроциклонов №3 и №7 (согласно рисунку 2.28). Результаты экспериментов №1, №2, №3 представлены в виде графиков на рисунке 2.30. Под продуктами в результатах экспериментов подразумевается слив с гидроциклонов №3 и №7 согласно рисунку 2.28.

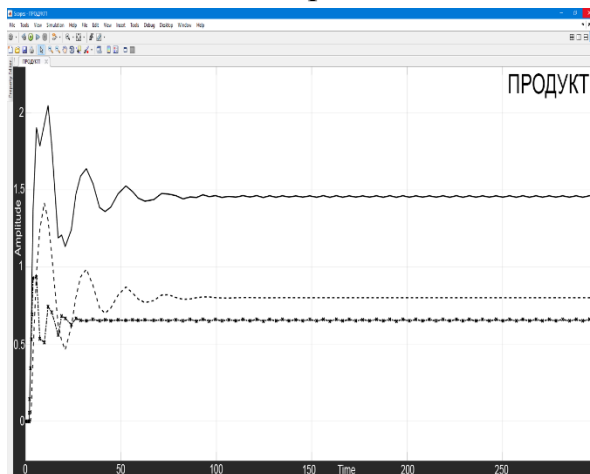
Таблица 2.4 - Данные для экспериментов №1, №2, №3

№ эксперимента	Задание по питанию (задание 1)	Задание подачи воды в зумпф (задание 2)	Коэффициент отбора в слив после гидроциклона 3	Коэффициент отбора в пески после гидроциклона 3	Коэффициент отбора в слив после гидроциклона 7	Коэффициент отбора в пески после гидроциклона 7
Временные характеристики						
1.	Constant1=1	Constant2 =1	k1=0.3	k3 =0.7	k2=0.7	k4 = 0.3
2.	Constant1=1	Constant2 =0	k1=0.3	k3 =0.7	k2=0.7	k4 = 0.3
3.	Constant1=0	Constant2 =1	k1=0.3	k3 =0.7	k2=0.7	k4 = 0.3

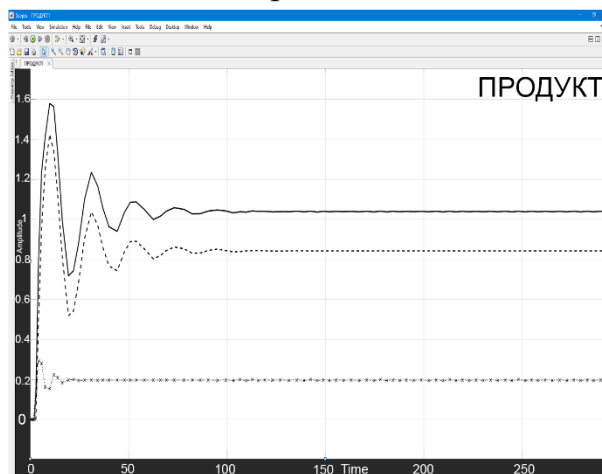
Графики

- — — — — -продукт
- - - - - гидроциклон №3
- - - - - гидроциклон №7

Эксперимент №1



Эксперимент №2



Эксперимент №3

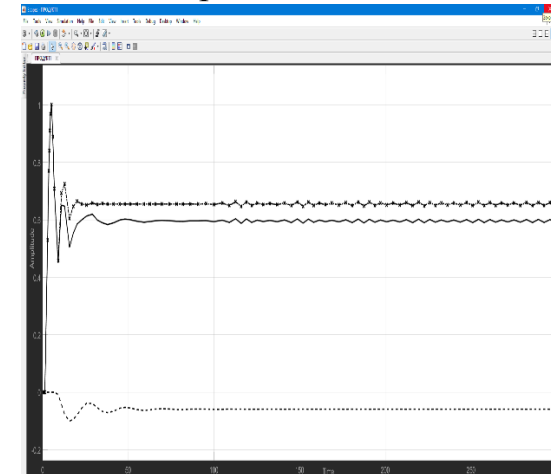


Рисунок 2.30 - Результаты экспериментов №1, №2, №3 в среде Matlab|Simulink

Исследование разделения материала в гидроциклонах на слив и пески.

На рисунке 2.31 приведена модель, созданная в среде Matlab|Simulink, для исследования системы управления с использованием подсистем. Структура подсистем Subsystem 1 и Subsystem 2 показана на рисунках 2.32 и 2.33. В данных подсистемах производится вычисление индекса оценки качества готового продукта. Далее осуществляется последующая корректировка управления в соответствии с полученными значениями.

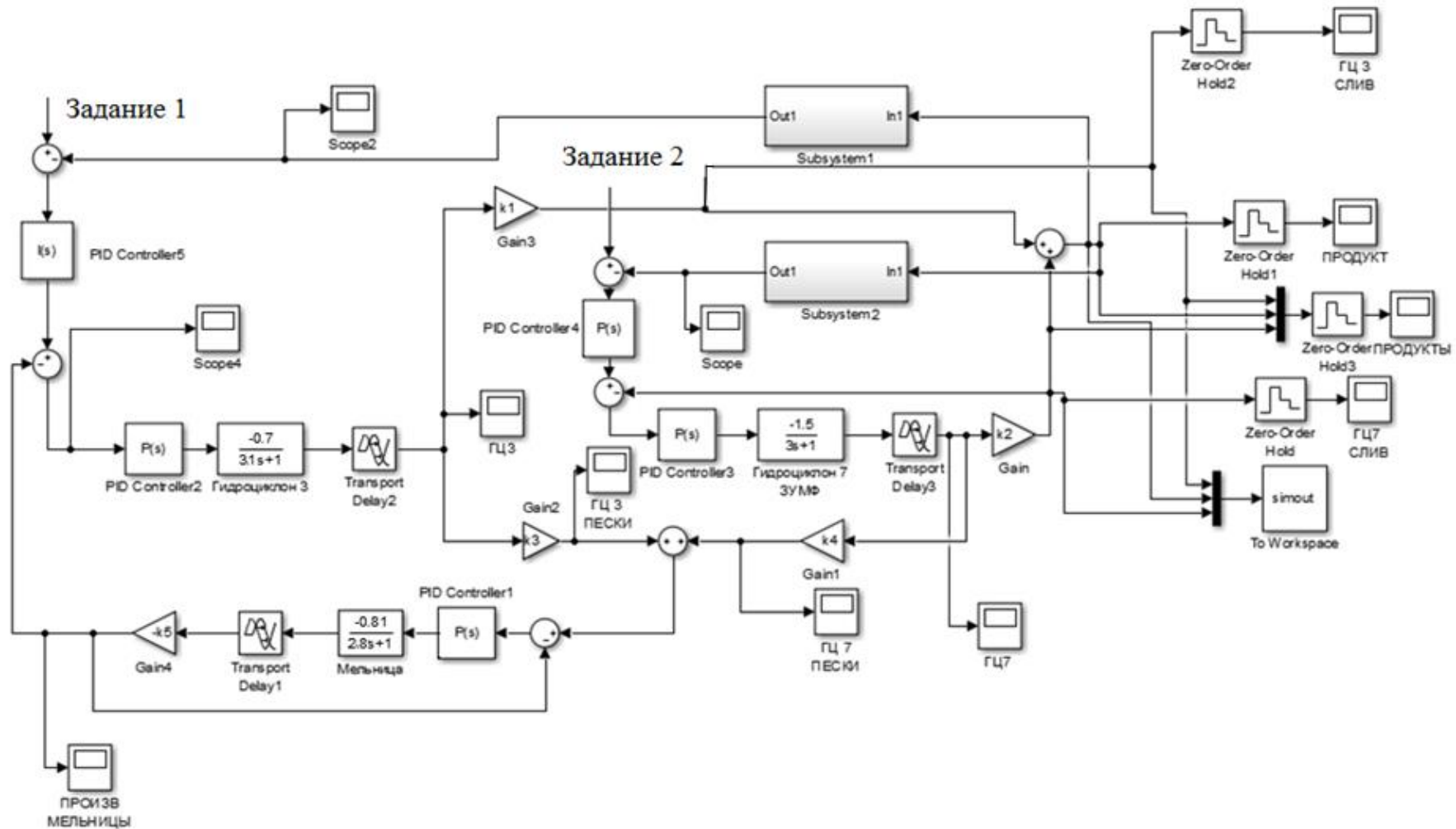


Рисунок 2.31 - Схема модели для исследования системы управления с использованием подсистем

Предиктор 1

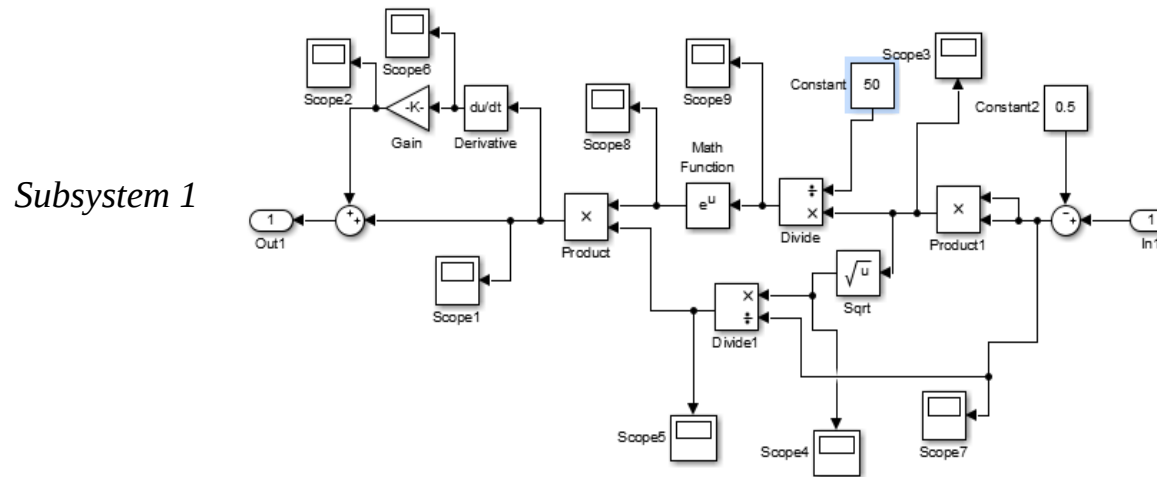


Рисунок 2.32 - Вычисление индекса оценки качества продукта по текущей крупности продукта

Предиктор 2

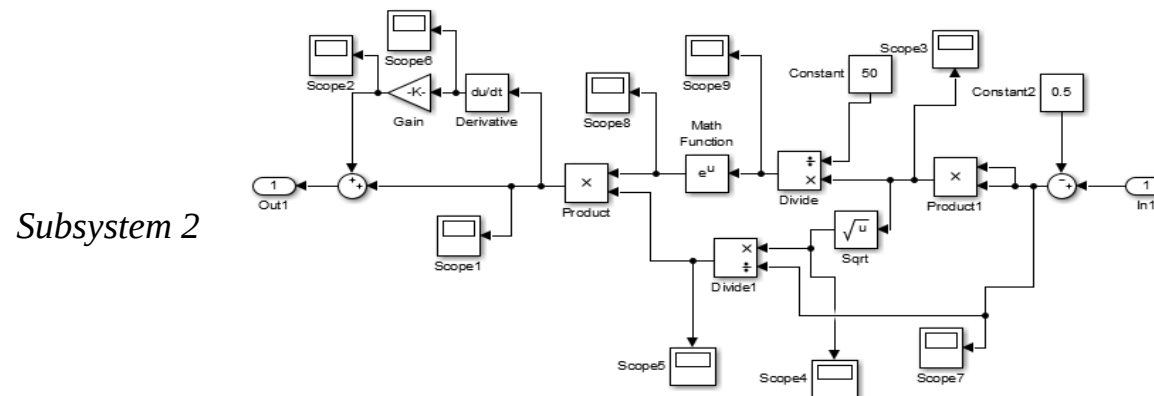


Рисунок 2.33 - Вычисление индекса оценки качества продукта по текущей плотности продукта

Ниже в таблице 2.7 показаны исходные данные для пяти различных экспериментов, согласно модели с подсистемой (рисунок 2.31), в которых, при фиксированном задании по расходу исходного питания и расходу воды в мельничный зумпф комбинировались различные коэффициенты разделения материала на пески и слив в гидроциклонах №3 и №7 (согласно рисунку 2.28). Результаты экспериментов №№4-8 представлены в виде графиков на рисунках 2.34- 2.38.

Таблица 2.7 - Исходные данные для экспериментов №№4-8

№ эксперимента	Задание по питанию (задание 1)	Задание подачи воды в зумпф (задание 2)	Коэффициент отбора в слив после гидроциклона 3	Коэффициент отбора в пески после гидроциклона 3	Коэффициент отбора в слив после гидроциклона 7	Коэффициент отбора в пески после гидроциклона 7
Временные характеристики						
4.	Constant1=1	Constant2 =1	k1=0.3	k3 =0.7	k2=0.7	k4 = 0.3
5.	Constant1=1	Constant2 =1	k1=0.4	k3 =0.6	k2=0.6	k4 = 0.4
6.	Constant1=1	Constant2 =1	k1=0.5	k3 =0.5	k2=0.5	k4 = 0.5
7.	Constant1=1	Constant2 =1	k1=0.6	k3 =0.4	k2=0.4	k4 = 0.6
8.	Constant1=1	Constant2 =1	k1=0.7	k3 =0.3	k2=0.3	k4 = 0.7

Графики

- - продукт
- - - гидроциклон №3
- - -x- - гидроциклон №7

Эксперимент 4

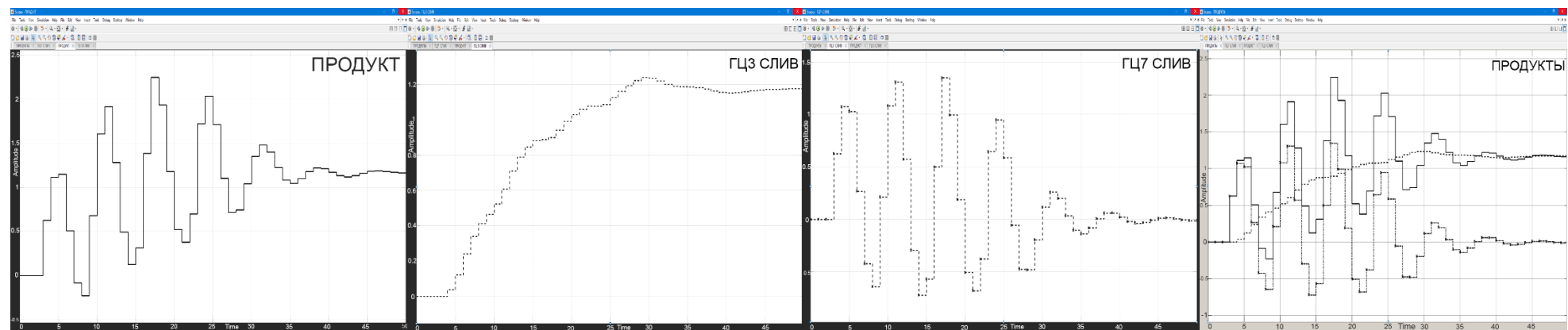


Рисунок 2.34 - Результаты эксперимента №4 в среде Matlab|Simulink

101
Эксперимент 5

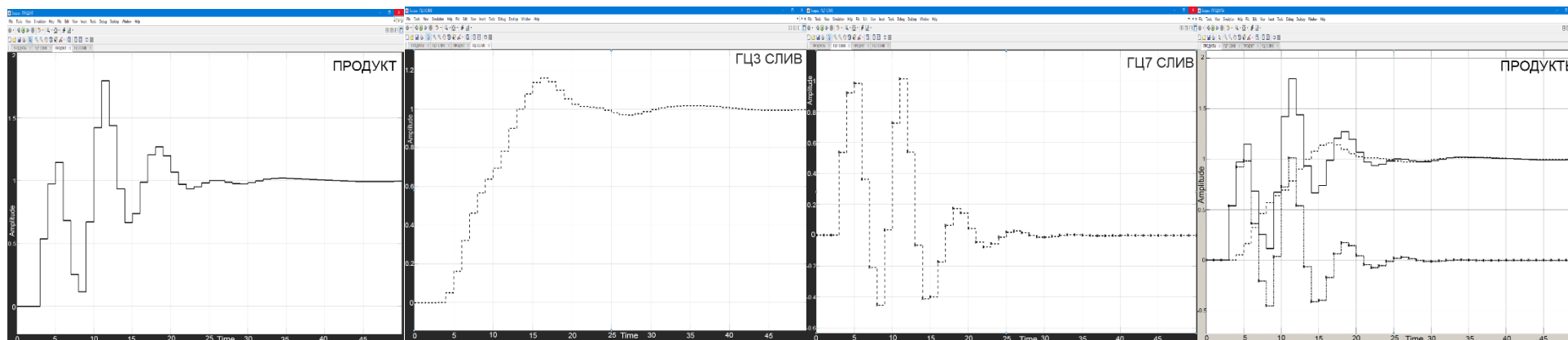


Рисунок 2.35 - Результаты эксперимента №5 в среде Matlab|Simulink

Эксперимент 6



Рисунок 2.36 - Результаты эксперимента №6 в среде Matlab|Simulink

102
Эксперимент 7

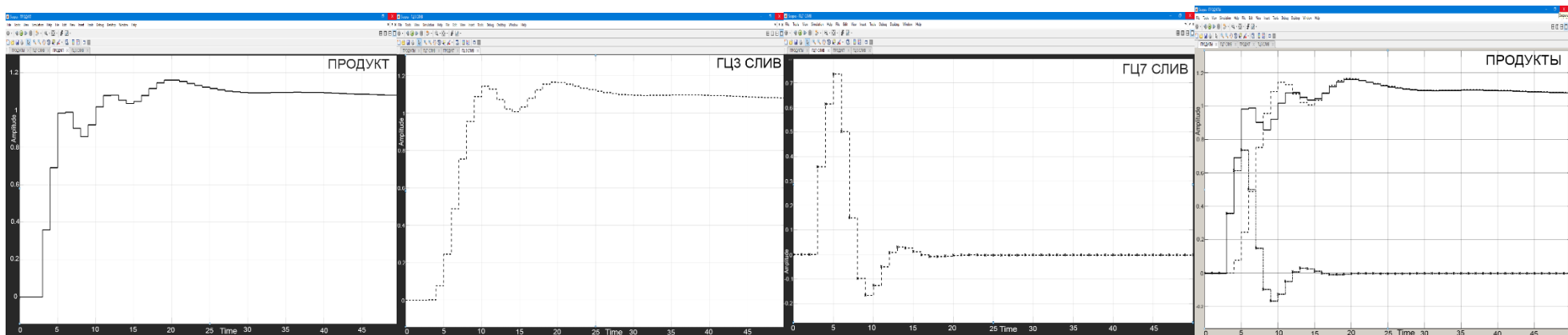


Рисунок 2.37 - Результаты эксперимента №7 в среде Matlab|Simulink

Эксперимент 8

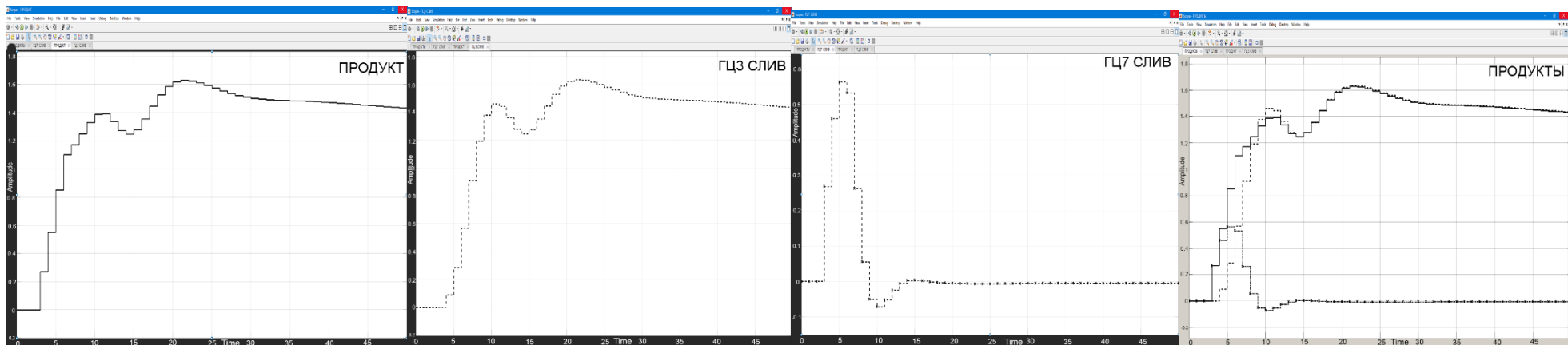


Рисунок 2.38 - Результаты эксперимента №8 в среде Matlab|Simulink

Выводы по второй главе

Во второй главе рассмотрены закономерности измельчения бадделеит-магнетит-apatитовых руд и определена задача моделирования технологического процесса измельчения.

В процессе работы рассматривалась модель кинетики измельчения. Она представлена в виде ячеечной модели, состоящей из каскада трех смесителей.

Предлагается численный предиктор-корректорный метод с повышением порядков до четвертого (по Адамсу), необходимый при нахождении решения для системы уравнений дифференциального типа. Приводится алгоритм по идентификации модели.

Проанализированы динамические свойства процесса измельчения и построены необходимые математические модели.

Выполнен численный эксперимент в среде Matlab|Simulink, с разными комбинациями заданий и различными коэффициентами разделения материала в классифицирующем аппарате.

ГЛАВА 3. ОЦЕНКА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ В ШАРОВОЙ БАРАБАННОЙ МЕЛЬНИЦЕ

Основная цель моделирования процесса измельчения — это предсказание гранулометрического состава измельченного сырья. Возможный гранулометрический состав измельчённого сырья определяется его физико-механическими свойствами. Основная проблема в моделировании процесса измельчения — это определение функции разрушения b_{ij} (коэффициенты уравнений 2.19), которые зависят от физико-механических свойств рудного тела и определяются его составом. Коэффициенты s_i , определяющие функцию отбора, определяются свойствами рудного тела и зависят от состояния шаровой загрузки. В данном разделе решается задача прогнозирования функции разрушения и функции отбора для повышения точности моделирования процесса измельчения.

3.1 Оценка параметров модели на основе сети ANFIS

ANFIS расшифровывается как adaptive neuro-fuzzy inference system и переводится как адаптивная нейро-нечеткая система вывода.

В настоящее время не существует аналитических теорий, которые бы позволяли достаточно точно определить функциональные зависимости для функций разрушения и отбора. Существующие методы строятся на применении экспериментального материала и проведения дополнительных исследований. В связи с этим в работе предлагается использовать нейро-нечеткие сети, с применением аппарата нечёткой логики, при этом подстраивание функций принадлежности осуществляется с использованием аппарата настройки нейро-нечетких сетей.

Аппроксимация функций разрушения измельчаемого материала

Функция разрушения определяется минералогическим составом рудного тела — апатита и бадделеита. Поэтому на вход нечёткого экстраполятора подаётся два входных параметра — содержание бадделеита и сопутствующих минералов,

обозначенное, как $\beta^{Bad + Other}$ и суммарное содержание апатита, бадделеита и сопутствующих минералов в руде $\beta^{Ap+Bad + Other}$.

Введем лингвистические переменные: «содержание бадделеита»; «суммарное содержание апатита и бадделеита с сопутствующими минералами в руде».

В таблице 3.1 представлены лингвистические переменные в формальном виде.

Таблица 3.1 - Характеристика лингвистических переменных

Имя лингвистической переменной	Область определения лингвистической переменной	Имя терм-множества	Область определения терм-множества
Содержание бадделеита и сопутствующих минералов в руде, %	[0, 100]	$N_1 = \text{Very low}$	[0, 37]
		$N_2 = \text{Low}$	[35, 41]
		$N_3 = \text{Average}$	[37, 43]
		$N_4 = \text{Increased}$	[41, 45]
		$N_5 = \text{High}$	[43, 47]
		$N_6 = \text{Very high}$	[45, 100]
Суммарное содержание апатита и бадделеита с сопутствующими минералами в руде, %	[0, 100]	$C_1 = \text{Very low}$	[0, 67]
		$C_2 = \text{Low}$	[64, 70]
		$C_3 = \text{Average}$	[67, 75]
		$C_4 = \text{Increased}$	[70, 76]

Продолжение таблицы 3.1

Имя лингвистической переменной	Область определения лингвистической переменной	Имя терм-множества	Область определения терм-множества
Суммарное содержание апатита и бадделеита с сопутствующими минералами в руде, %	[0, 100]	$C_5 = \text{High}$	[75, 81]
		$C_6 = \text{Very high}$	[76, 100]
Коэффициент разрушения	[0, 1]	B_1	[0; 0,1]
		B_2	[0,1; 0,2]
		B_3	[0,2; 0,3]
		B_4	[0,3; 0,4]
		B_5	[0,4; 0,5]
		B_6	[0,5; 0,6]
		B_7	[0,6; 0,7]
		B_8	[0,7; 0,8]
		B_9	[0,8; 0,9]
		B_{10}	[0,9; 1,0]

Нечёткая модель для входных параметров имеет вид:

для $i=1$

$$\mu_1(x) = \frac{1}{1 + \exp(c_1(x - d_{11}))} \quad (3.1)$$

для $i = 2, 3, 4, 5$

$$\begin{aligned}\mu_i(x) &= \frac{1}{1 + \exp(c_i(x - d_{i1}))}, & \text{при } x \geq a_i \\ \mu_i(x) &= \frac{1}{1 + \exp(-c_i(x - d_{i1}))}, & \text{при } x \leq a_i\end{aligned}\quad (3.2)$$

для $i = 6$

$$\mu_i(x) = \frac{1}{1 + \exp(-c_i(x - d_{i2}))} \quad (3.3)$$

где a_i – мода нечеткого числа ($\mu_i(a_i)=1$);

c_i, d_{i1}, d_{i2} – параметры функции принадлежности;

i – индекс терм-множества [152].

Значения параметров функций принадлежности вынесены в таблицу 3.2.

Нечёткая модель выходного параметра имеет вид:

$$\mu_i(x) = \frac{1}{1 + \exp(c_i(x - d_i))} \quad (3.4)$$

где i – индекс терм-множества.

Значения параметров функций принадлежности входных переменных приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 - Значения параметров функций принадлежности

Лингвистическая переменная	Термножество	l	Параметры функции принадлежности			
			a_l	c_l	d_{l1}	d_{l2}
Содержание бадделеита и сопутствующих минералов в руде, %	N_l	1	–	4	36	–
		2	37	4	38	36
		3	39	4	40	38
		4	41	4	42	40
		5	43	4	44	42
		6	–	4	–	44
Суммарное содержание апатита и бадделеита с сопутствующим и минералами в руде, %	C_l	1	–	4	65,3	–
		2	67	4	68,2	65,2
		3	70	4	71,2	68,3
		4	73	4	74,3	71,2
		5	76	4	77,1	74,7
		6	–	4	–	77,1

Величина начальных значений функций принадлежности нечёткой выходной переменной приведена в таблице 3.3.

Таблица 3.3 - Величина начальных значений функций принадлежности

Лингвистическая переменная	Терм-множество	j	Параметры функции принадлежности	
			c_j	d_j
Коэффициент разрушения	B_j	1	50	0,05
		2	50	0,15
		3	50	0,25
		4	50	0,35
		5	50	0,45
		6	50	0,55
		7	50	0,65
		8	50	0,75
		9	50	0,85
		10	50	0,95

На основе правил вывода R_{ij} определяется значения коэффициента b_{ij} .

Ниже следуют правила сети ANFIS R_{ij} нечёткого вывода, которые имеют следующий вид:

$$PR_1: \text{ЕСЛИ } \beta^{Bad + Other} \rightarrow N_1 \ \& \ \beta^{Ap+Bad + Other} \rightarrow C_1 \text{ ТО } b \rightarrow B_k ;$$

$$PR_2: \text{ЕСЛИ } \beta^{Bad + Other} \rightarrow N_1 \ \& \ \beta^{Ap+Bad + Other} \rightarrow C_2 \text{ ТО } b \rightarrow B_k ;$$

$$PR_3: \text{ЕСЛИ } \beta^{Bad + Other} \rightarrow N_1 \ \& \ \beta^{Ap+Bad + Other} \rightarrow C_4 \text{ ТО } b \rightarrow B_k ;$$

$$PR_5: \text{ЕСЛИ } \beta^{Bad + Other} \rightarrow N_1 \ \& \ \beta^{Ap+Bad + Other} \rightarrow C_5 \text{ ТО } b \rightarrow B_k ;$$

PR₆: ЕСЛИ $\beta^{Bad + Other} \rightarrow N_2$ & $\beta^{Ap+Bad + Other} \rightarrow C_1$ ТО $b \rightarrow B_k$;

PR₇: ЕСЛИ $\beta^{Bad + Other} \rightarrow \text{есть } N_2$ & $\beta^{Ap+Bad + Other} \rightarrow C_2$ ТО $b \rightarrow B_k$;

PR₈: ЕСЛИ $\beta^{Bad + Other} \rightarrow N_2$ & $\beta^{Ap+Bad + Other} \rightarrow C_3$ ТО $b \rightarrow B_k$;

PR₉: ЕСЛИ $\beta^{Bad + Other} \rightarrow N_2$ & $\beta^{Ap+Bad + Other} \rightarrow C_4$ ТО $b \rightarrow B_k$;

PR₁₀: ЕСЛИ $\beta^{Bad + Other} \rightarrow N_2$ & $\beta^{Ap+Bad + Other} \rightarrow C_5$ ТО $b \rightarrow B_k$;

PR₁₁: ЕСЛИ $\beta^{Bad + Other} \rightarrow N_3$ & $\beta^{Ap+Bad + Other} \rightarrow C_1$ ТО $b \rightarrow B_k$;

PR₁₂: ЕСЛИ $\beta^{Bad + Other} \rightarrow N_3$ & $\beta^{Ap+Bad + Other} \rightarrow C_2$ ТО $b \rightarrow B_k$;

PR₁₃: ЕСЛИ $\beta^{Bad + Other} \rightarrow N_3$ & $\beta^{Ap+Bad + Other} \rightarrow C_3$ ТО $b \rightarrow B_k$;

PR₁₄: ЕСЛИ $\beta^{Bad + Other} \rightarrow N_3$ & $\beta^{Ap+Bad + Other} \rightarrow C_4$ ТО $b \rightarrow B_k$;

PR₁₅: ЕСЛИ $\beta^{Bad + Other} \rightarrow N_3$ & $\beta^{Ap+Bad + Other} \rightarrow C_5$ ТО $b \rightarrow B_k$;

PR₁₆: ЕСЛИ $\beta^{Bad + Other} \rightarrow N_4$ & $\beta^{Ap+Bad + Other} \rightarrow C_1$ ТО $b \rightarrow B_k$;

PR₁₇: ЕСЛИ $\beta^{Bad + Other} \rightarrow N_4$ & $\beta^{Ap+Bad + Other} \rightarrow C_2$ ТО $b \rightarrow B_k$;

PR₁₈: ЕСЛИ $\beta^{Bad + Other} \rightarrow N_4$ & $\beta^{Ap+Bad + Other} \rightarrow C_3$ ТО $b \rightarrow B_k$;

PR₁₉: ЕСЛИ $\beta^{Bad + Other} \rightarrow N_4$ & $\beta^{Ap+Bad + Other} \rightarrow C_4$ ТО $b \rightarrow B_k$;

PR₂₀: ЕСЛИ $\beta^{Bad + Other} \rightarrow N_4$ & $\beta^{Ap+Bad + Other} \rightarrow C_5$ ТО $b \rightarrow B_k$;

PR₂₁: ЕСЛИ $\beta^{Bad + Other} \rightarrow N_5$ & $\beta^{Ap+Bad + Other} \rightarrow C_1$ ТО $b \rightarrow B_k$;

PR₂₂: ЕСЛИ $\beta^{Bad + Other} \rightarrow N_5$ & $\beta^{Ap+Bad + Other} \rightarrow C_2$ ТО $b \rightarrow B_k$;

PR₂₃: ЕСЛИ $\beta^{Bad + Other} \rightarrow N_5$ & $\beta^{Ap+Bad + Other} \rightarrow C_3$ ТО $b \rightarrow B_k$;

PR₂₄: ЕСЛИ $\beta^{Bad + Other} \rightarrow N_5$ & $\beta^{Ap+Bad + Other} \rightarrow C_4$ ТО $b \rightarrow B_k$;

PR₂₅: ЕСЛИ $\beta^{Bad + Other} \rightarrow N_5$ & $\beta^{Ap+Bad + Other} \rightarrow C_5$ ТО $b \rightarrow B_k$.

Ниже приводится решающая таблица 3.4 нечеткого вывода коэффициента b_{ij} .

Таблица 3.4 - Решающая таблица нечеткого вывода коэффициента

	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5
N_1	B_k	B_k	B_k	B_k	B_k
N_2	B_k	B_k	B_k	B_k	B_k
N_3	B_k	B_k	B_k	B_k	B_k
N_4	B_k	B_k	B_k	B_k	B_k
N_5	B_k	B_k	B_k	B_k	B_k

где $k = 1, 2, 3, \dots, 10$.

Входными переменными нечёткой модели является «содержание ценных минералов» после предыдущей стадии железорудного производства ($\beta^{Bad + Other}$, $\beta^{Ap+Bad + Other}$), которые определяют физико-механические свойства измельчаемого материала (бадделеит-апатит-магнетитовой руды, после стадии железорудного производства). Вначале производится фазификация входных переменных, затем на выходе второго слоя определяется степень истинности правил нечёткого вывода (рисунок 3.1)[24].

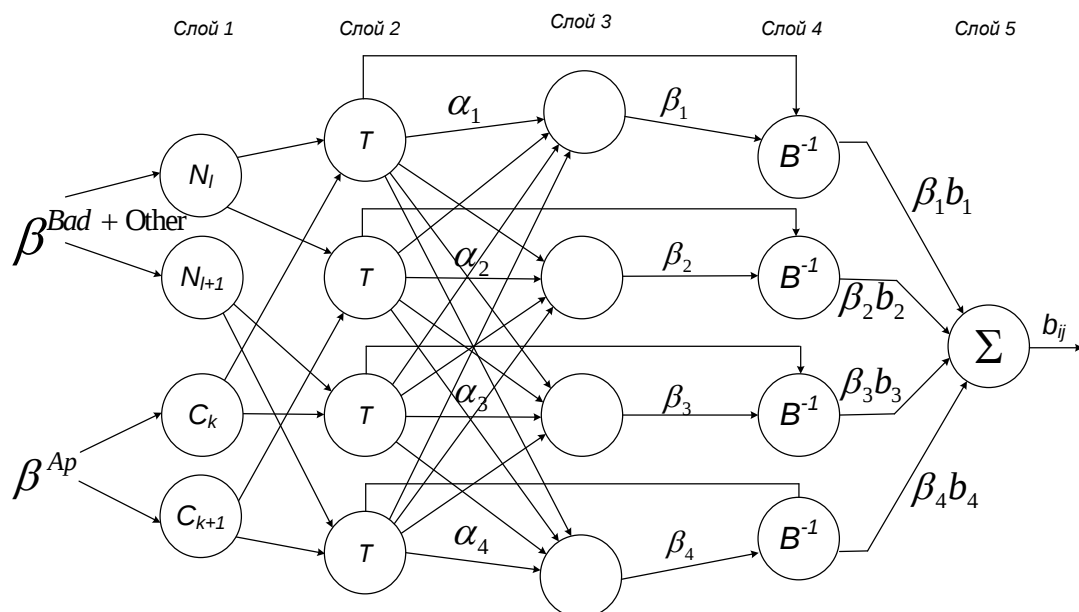


Рисунок 3.1. Структура нейро-нечеткой сети для прогнозирования функции разрушения материала [24]

$$\begin{aligned}
 \alpha_1 &= N_l(\beta^{Bad + Other}) \wedge C_k(\beta^{Ap+Bad + Other}) \\
 \alpha_2 &= N_l(\beta^{Bad + Other}) \wedge C_{k+1}(\beta^{Ap+Bad + Other}) \\
 \alpha_3 &= N_{l+1}(\beta^{Bad + Other}) \wedge C_k(\beta^{Ap+Bad + Other}) \\
 \alpha_4 &= N_{l+1}(\beta^{Bad + Other}) \wedge C_{k+1}(\beta^{Ap+Bad + Other})
 \end{aligned} \tag{3.5}$$

Вычисления выходного сигнала нейрона показаны в таблице 3.5.

Таблица 3.5 - Вычисление выходного сигнала нейрона

№ слоя	Формула для вычисления выходного сигнала нейрона [152]
Третий слой	$ \begin{aligned} \beta_1 &= \frac{\alpha_1}{\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4} \\ \beta_2 &= \frac{\alpha_2}{\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4} \\ \beta_3 &= \frac{\alpha_3}{\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4} \\ \beta_4 &= \frac{\alpha_4}{\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4} \end{aligned} \tag{3.6} $

Продолжение таблицы 3.5

№ слоя	Формула для вычисления выходного сигнала нейрона [152]
Четвёртый слой	$b_1 = B^{-1}(\alpha_1) = d_l + \frac{1}{c_l} \cdot \ln\left(\frac{1-\alpha_1}{\alpha_1}\right)$ $b_2 = B^{-1}(\alpha_2) = d_l + \frac{1}{c_l} \cdot \ln\left(\frac{1-\alpha_2}{\alpha_2}\right)$ $b_3 = B^{-1}(\alpha_3) = d_l + \frac{1}{c_l} \cdot \ln\left(\frac{1-\alpha_3}{\alpha_3}\right)$ $b_4 = B^{-1}(\alpha_4) = d_l + \frac{1}{c_l} \cdot \ln\left(\frac{1-\alpha_4}{\alpha_4}\right) \quad (3.7)$
Пятый слой	$b = \beta_1 b_1 + \beta_2 b_2 + \beta_3 b_3 + \beta_4 b_4 = \frac{\alpha_1 b_1 + \alpha_2 b_2 + \alpha_3 b_3 + \alpha_4 b_4}{\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4} \quad (3.8)$ выполняет операцию приведения к четкости центроидным способом [152]

Оценка функции отбора измельчаемого материала

Функция отбора измельчаемого материала, которая определяется коэффициентом s_i (2.19), зависит от минералогического состава и свойств рудного тела, поэтому на вход имеет смысл подавать тип сырья, который определяется измельчаемостью данного сырья.

Второй параметр – шаровая загрузка мельницы, которая определяется следующим образом:

$$\phi_{III} = \phi_{III}^{нач} + \Delta\phi_{III} \quad (3.9)$$

$\phi_{III}^{нач}$ – первоначальная загрузка мельницы, %;

$\Delta\phi_{III}$ – изменение загрузки в процессе работы, %.

$$\Delta\phi_{III} = \frac{\Delta G_{III}}{V_M \cdot \gamma_{III}} \quad (3.10)$$

ΔG_{III} – изменение веса шаров, т;

V_M – внутренний объем мельницы, м³;

γ_{III} – вес 1 м³ шаров.

Вес 1 м³ и диаметр шаров (D , мм) сведены в таблицу 3.6.

Таблица 3.6 - Вес 1 м³ шаров и их диаметр (D , мм)

Диаметр шара, мм	30	40	50	60	80	100
Вес 1 м ³ шаров	4,8	4,7	4,7	4,6	4,6	4,5

Изменение нагрузки равняется произведению показателя – «веса шаров» на «расход шаров на тонну продукции» на производительность мельницы; ψ – нормирующий множитель.

$$\Delta G_{III} = -\psi \cdot \int_{t_0}^{t_K} Q_p dt \quad (3.11)$$

где Q_p – производительность мельницы по сырью, т/ч.

Значение коэффициента отбора материала будет являться выход сети ANFIS (рисунок 3.2).

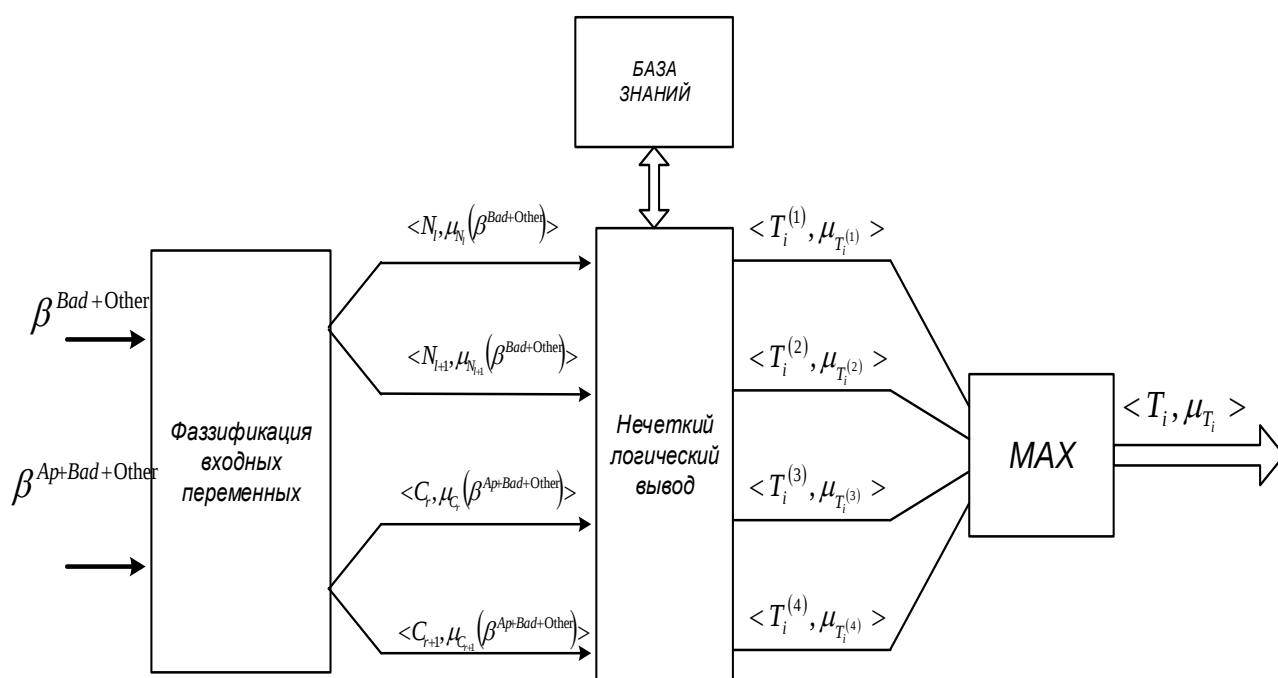


Рисунок 3.2 - Сети ANFIS как нечеткий логический классификатор

Схема алгоритма следующая:

1. Определяется минералогический состав и формируются входные переменные: - «содержание бадделеита и сопутствующих минералов в руде», «суммарное содержание апатита и бадделеита с сопутствующими минералами в руде».

2. Проводится фазификация переменной «шаровая загрузка» (табл. 3.7). В таблице 3.8 «Параметры функций принадлежности» представлены основные переменные, которые определяют вид функций.

Формализация нечётких переменных показана в таблице 3.7.

Таблица 3.7 - Формализация нечётких переменных

Наименование нечёткой переменной	Область определения нечёткой переменной	Терм- множества нечёткой переменной	Область определения терм-множеств
Шаровая загрузка мельницы, %	[0, 100]	$\Phi_1 = \text{Very low}$	[0, 45]
		$\Phi_2 = \text{Low}$	[44, 46]
		$\Phi_3 = \text{Under}$	[45, 47]
		$\Phi_4 = \text{Normal}$	[46, 48]
		$\Phi_5 = \text{Increased}$	[47, 50]
		$\Phi_6 = \text{Very high}$	[48, 100]
Коэффициент s_i	[0, 1]	S_1	[0; 0,1]
		S_2	[0,1; 0,2]
		S_3	[0,2; 0,3]
		S_4	[0,3; 0,4]
		S_5	[0,4; 0,5]
		S_6	[0,5; 0,6]
		S_7	[0,6; 0,7]
		S_8	[0,7; 0,8]
		S_9	[0,8; 0,9]
		S_{10}	[0,9; 1,0]

Параметры функций принадлежности терм-множеств входной переменной «шаровая загрузка мельницы» приводятся в таблице 3.8.

Таблица 3.8 - Параметры функций принадлежности терм-множеств «шаровая загрузка мельницы»

Лингвистическая переменная	Терм-множество	l	Параметры функции принадлежности			
			a_l	c_l	d_{l1}	d_{l2}
Шаровая загрузка мельницы, %	Φ_l	1	—	5	44	—
		2	45	5	46	44
		3	46	5	47	45
		4	47	5	48	46
		5	48	5	49	47
		6	—	5	—	49

Начальные параметры функций принадлежности выходной переменной приводятся в таблице 3.9.

Таблица 3.9 - Начальные параметры функций принадлежности

Лингвистическая переменная	Терм-множество	j	Параметры функции принадлежности	
			c_j	d_j
Коэффициент s_i	S_j	1	50	0,05
		2	50	0,15
		3	50	0,25
		4	50	0,35
		5	50	0,45
		6	50	0,55
		7	50	0,65
		8	50	0,75
		9	50	0,85
		10	50	0,95

При формировании функции принадлежности входной переменной «шаровая загрузка»:

а) Формируется нечёткое множество «тип руды». Правила формирования приведены в таблице 3.10 (решающая таблица нечеткого логического вывода по типу руды). При нечётком выводе используется операция «минимум».

Таблица 3.10 - Правила формирования нечёткого множества «тип руды»

	<i>C1</i>	<i>C2</i>	<i>C3</i>	<i>C4</i>	<i>C5</i>
<i>N1</i>	<i>Tq</i>	<i>Tq</i>	<i>Tq</i>	<i>Tq</i>	<i>Tq</i>
<i>N2</i>	<i>Tq</i>	<i>Tq</i>	<i>Tq</i>	<i>Tq</i>	<i>Tq</i>
<i>N3</i>	<i>Tq</i>	<i>Tq</i>	<i>Tq</i>	<i>Tq</i>	<i>Tq</i>
<i>N4</i>	<i>Tq</i>	<i>Tq</i>	<i>Tq</i>	<i>Tq</i>	<i>Tq</i>

б) Формируется нечёткое множество «шаровая загрузка». Правила формирования приведены в таблице 3.11. При нечётком выводе используется операция «минимум».

Определение коэффициента s_i разделения строится на основании набора правил вывода R_i .

Каждое из правил R_i вывода имеет вид импликаций, и может быть представлено в виде решающей таблицы нечеткого вывода «загрузка мельницы» (таблица 3.11).

Таблица 3.11 - Решающая таблица нечеткого вывода «загрузка мельницы»

	<i>Φ1</i>	<i>Φ2</i>	<i>Φ3</i>	<i>Φ4</i>	<i>Φ5</i>	<i>Φ6</i>
<i>T1</i>	<i>Sf</i>	<i>Sf</i>	<i>Sf</i>	<i>Sf</i>	<i>Sf</i>	<i>Sf</i>
<i>T2</i>	<i>Sf</i>	<i>Sf</i>	<i>Sf</i>	<i>Sf</i>	<i>Sf</i>	<i>Sf</i>
<i>T3</i>	<i>Sf</i>	<i>Sf</i>	<i>Sf</i>	<i>Sf</i>	<i>Sf</i>	<i>Sf</i>
<i>T4</i>	<i>Sf</i>	<i>Sf</i>	<i>Sf</i>	<i>Sf</i>	<i>Sf</i>	<i>Sf</i>

где $f = 1, 2, \dots, 10$.

3. В таблице 3.9 приведены правила истинности определения переменной «функция отбора».

4. Степень истинности посылок определяется после второго слоя (рис. 3.3).

Структура нейро-нечеткой сети показана на рисунке 3.3.

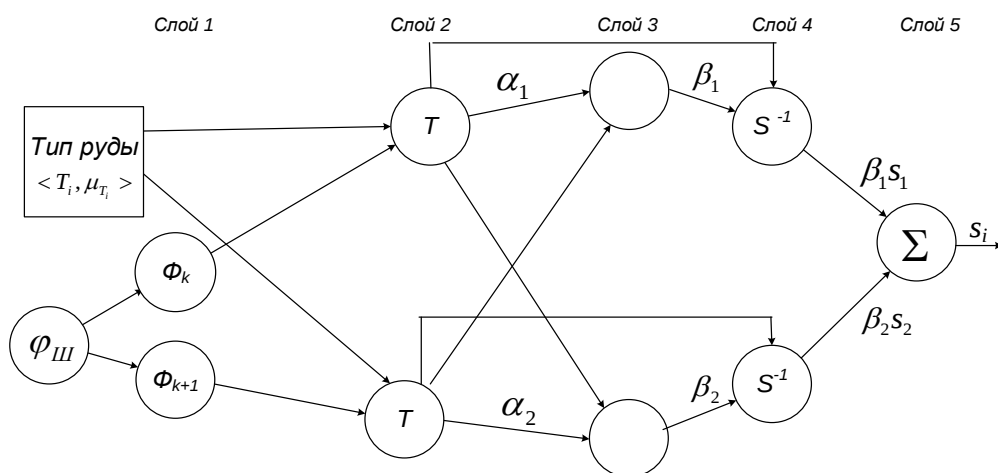


Рисунок 3.3 - Структура нейро-нечеткой сети для прогнозирования функции отбора материала [24]

5. Третий слой – вычисляют величины: (3.13)

$$\beta_1 = \frac{\alpha_1}{\alpha_1 + \alpha_2}$$

$$\beta_2 = \frac{\alpha_2}{\alpha_1 + \alpha_2} \quad (3.12)$$

6. Четвертый слой – выполняют операции: (3.14), где, (3.15), где

$$\beta_1 s_1 = \beta_1 \cdot S^{-1}(\alpha_1)$$

$$\beta_2 s_2 = \beta_2 \cdot S^{-1}(\alpha_2) \quad (3.13)$$

где

$$s_1 = S^{-1}(\alpha_1) = d_l + \frac{1}{c_l} \cdot \ln \left(\frac{1 - \alpha_1}{\alpha_1} \right)$$

$$s_2 = S^{-1}(\alpha_2) = d_l + \frac{1}{c_l} \cdot \ln \left(\frac{1 - \alpha_2}{\alpha_2} \right) \quad (3.14)$$

7. Операция дефазификации выполняется центроидным способом (5 слой)

$$s = \beta_1 b_1 + \beta_2 b_2 = \frac{\alpha_1 b_1 + \alpha_2 b_2}{\alpha_1 + \alpha_2} \quad (3.15)$$

Далее на рисунке 3.4 показан алгоритм обучения нейро-нечеткой сети.

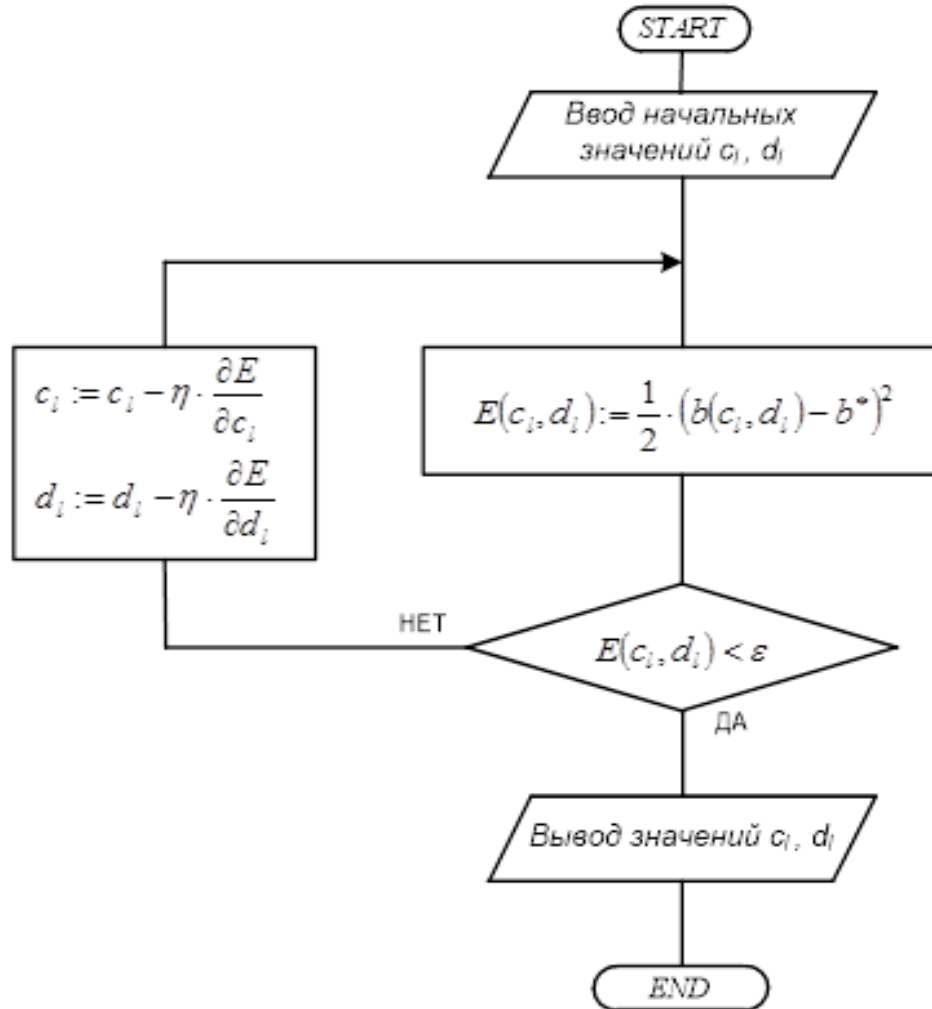


Рисунок 3.4 - Алгоритм обучения нейро-нечеткой сети

Обучение данного типа нейро-нечеткой сети в работе проводится на основе алгоритма обратного распространения ошибки (back propagation) [183, 184]. Блок схема данного алгоритма приводится выше. Функция ошибки системы имеет вид:

$$E(c_i, d_i) = \frac{1}{2} \cdot [b(c_i, d_i) - b^*]^2 \quad (3.16)$$

Минимизация ошибки осуществляется за счёт выбора параметров c_i и d_i . Правильный выбор позволяет уменьшить ошибку и повысить точность прогноза

$b(c_i, d_i)$ – прогнозное значение коэффициента; b^* – значение коэффициента b , полученное по экспериментальным данным.

3.2 Моделирование технологического процесса измельчения материала

Целевое назначение процесса состоит в том, чтобы получить измельчённый продукт определённой степени крупности, выполнить разделение измельчённого материала по классам крупности. Продуктом измельчения является материал с содержанием класса крупности меньше заданного, и далее, после цикла измельчения, продукт поступает на флотацию. Если это условие по крупности не выполняется, предварительно измельчённый материал направляется в песковую фракцию, которая циркулирует в технологической цепи аппаратов – мельница (измельчитель), гидроциклон (классификатор).

3.2.1 Постановка задачи

Модель, выше описанного процесса, используется в системе управления процессом измельчения, и предназначена для прогноза состава песков и продукта измельчения. Данная информация используется для задания определённого режима работы технологической цепи аппаратов процесса измельчения, который определяется свойствами рудного тела, его составом, а плотность выходного продукта, определяется также подачей воды в зумпф гидроциклона.

3.2.2 Подходы к моделированию процесса классификации

Данная технологическая система является достаточно сложной. Причиной такой оценки является как статистическая неопределённость, так и неопределённость в знаниях. Статистическая неопределённость связана с постоянными изменениями свойств руды. Неопределённость в знаниях связана со сложностью определения функций разрушения рудного тела и отделения продукта, который образуют частицы нужного размера.

Аппаратом, в котором происходит процесс разделения, в данной работе является гидроциклон. На работу гидроциклона влияет много факторов – это в первую очередь его технологические условия функционирования. Для оценки работы гидроциклона Далстром (1949 г.) был предложен метод представления его эффективности. Для этого он использовал показатель d , который характеризует крупность частиц при классификации и, соответственно, даёт некоторое представление об эффективности работы гидроциклона. В работах Далстрёма показана полезность применения данного показателя. Однако, оценка полной эффективности на основе этого показателя не является удовлетворительной, так как она не описывает свойства частиц полного диапазона крупности. Приемлемым выходом, в адекватной оценке свойств измельчаемого материала, является построение кривой эффективности работы гидроциклона. Эта кривая характеризует зависимость между процентным выходом частиц, переходящих из питания в песковый продукт, и их крупностью. Эффективность работы гидроциклона E_a в какой-либо точке этой кривой выражается как

$$E_a = \frac{\omega_u M_u}{\omega_f M_f} \quad (3.17)$$

где: ω_u, ω_f - доли материала определённой крупности в рецикловом продукте и питании; M_u, M_f - массовые расходы пескового продукта и питания.

Келсалл (1953 г.) показал, что реальная зависимость эффективности не должна проходить через начало координат. Некоторая доля R_f частиц любой крупности будет разгружаться через песковую насадку независимо от центробежных сил. Поэтому скорректированная эффективность E_c выражается как

$$E_c = \frac{E_a - R_f}{1 - R_f} \quad (3.18)$$

Йосиока и Хотта (1955 г.) разработали способ приведения различных зависимостей эффективности к единственной зависимости, названной «приведенной кривой эффективности». Эта зависимость строится на основе графика относительной зависимости выхода частиц в песковый продукт от действительного размера частиц, который делится на уточнённое значение d_{50c} . Рассмотренная кривая эффективности хорошо согласуется с истинной и скорректированной кривыми эффективности. Формулы для определения уточнённого значения d_{50c} и отношения расходов воды при любых условиях работы гидроциклона необходимо иметь для использования приведенной зависимости эффективности для получения реальной кривой эффективности. Это даёт возможность рассчитывать показатели гидроциклона при их новых условиях работы.

Реальное d_{50} и уточнённое d_{50c} значения отличаются друг от друга, так как они получаются из истинной и скорректированной кривых эффективности ($d_{50c} > d_{50}$). Удобно сначала рассчитывать d_{50c} , а затем d_{50} , так как реальное значение d_{50} следствие влияния действий двух разделяющих процессов, а d_{50c} – только одного из этих механизмов.

При исследовании процесса классификации можно строить три типа функциональных зависимостей эффективности процесса. Их называют: истинная (реальная), приведённая и скорректированная (уточнённая).

Приведённая функциональная зависимость оценивает вероятности перехода частиц из питания в крупный продукт. Это свойство определяется характеристиками гидроциклона и самого измельчаемого материала. Качество работы гидроциклона при изменении технологических условий оценивают на основе приведенной зависимости эффективности.

Линч и Рао (1965 г.) показали, что приведённая функциональная зависимость эффективности разделения остаётся постоянной для определённых аппаратов и рудного тела в достаточно широком диапазоне изменения параметров процесса разделения: - потока питания, содержания твёрдого

материала в пульпе, некоторых конструкционных характеристик оборудования. Одним из недостатков данной характеристики является то, что она не учитывает масштабных переходов на приведённую зависимость, что необходимо при выполнении проектных расчётов, в задачах минимизации переходов крупных частиц в тонкий продукт. Если построить модель на основе оценки вероятностных свойств системы, то можно определить вероятности разрушения частиц рудного Y и последующего перехода частиц из питания в песковый продукт гидроциклона

$$Y = \frac{\exp(\alpha \cdot \omega_f) - 1}{\exp(\alpha \cdot \omega_f) + \exp(\alpha) - 2} \quad (3.19)$$

где ω_f -массовая доля рудного тела определённой крупности, α – параметр. Параметром α определяется форма кривой.

3.2.3 Модель процесса выделения продукта измельчения

Процесс выделения продукта измельчения в технологии обогащения носит название процесса «классификации», и представляет собой технологический процесс разделения измельчаемого потока промпродукта по крупности. Рудное тело, которое характеризуется вероятностным распределением массы материала по фракционному составу (где $m_j^{изм}$, масса i класса разделяемого продукта), поступает на вход выделяющего аппарата. Разделение на фракции зависит от физических свойств рудного тела и от потребления воды технологическим процессом. На основе законов сохранения запишем уравнения материального баланса данного процесса:

$$m_j^{изм} = q_j^{изм} \cdot \Delta t \quad (3.20)$$

$$Q_{изм} = \sum_j q_j^{изм} \quad (3.21)$$

где $q_j^{изм}$ – массовый расход измельченного рудного тела; $Q_{изм}$ – входной поток.

Ниже представлены основные уравнения материальных балансов по фракционному составу и по общим потокам:

1) массовый расход готового продукта измельчения (слив гидроциклона)

$$Q_{som} = \sum_j q_j^{som} \quad (3.22)$$

$$m_j^{som} = q_j^{som} \cdot \Delta t \quad (3.23)$$

2) массовый расход песков продуктов измельчения (пески гидроциклона)

$$Q_{песк} = \sum_j q_j^{песк} \quad (3.24)$$

$$m_j^{песк} = q_j^{песк} \cdot \Delta t \quad (3.25)$$

Технологическая схема процесса представлен на рисунке 3.5.

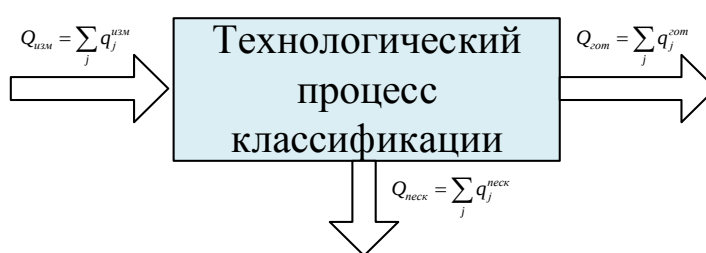


Рисунок 3.5 - Процесс разделения измельченного материала в классификаторе

$$m_i^{som} = c_i \cdot m_i^{изм} \quad (3.26)$$

$$m_i^{песк} = (1 - c_i) \cdot m_i^{изм} \quad (3.27)$$

где c_i – элементы матрицы классификации C .

$$C = [c_{ij}] \quad 0 \leq c_{ij} \leq 1$$

$$c_{ij} = c_i \quad \text{при} \quad i = j.$$

$$c_{ij} = 0 \quad \text{при} \quad i \neq j$$

Анализируя данные соотношения, с учётом разрушения частиц и вводя допущение, что процессов обратного восстановления разрушенных частиц нет, обобщённую математическую модель классификации может представить в виде следующей матричной системы соотношений:

$$\begin{pmatrix} c_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \dots \\ f_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_1 f_1 \\ c_2 f_2 \\ \dots \\ c_n f_n \end{pmatrix} \quad (3.28)$$

3.2.4 Система оценки элементов матрицы разделения

Данное представление основано на соотношении линейности между массами частиц на сливе аппарата и рециркулирующей частью потока.

Из данных рассуждений становится ясно, что для того чтобы описать процесс разделения частиц по фракциям продукта и рециркуляционного остатка, необходимо определить элементы матрицы:

$$c_i = \frac{\omega_i^{\text{от}^*}}{\omega_i^{\text{изм}^*}}, \quad i = \overline{1, n}$$

Схема технологической идентификации показана на рисунке 3.6.

Во входном и выходном потоке определяется гранулометрический состав и вычисляется c_i ($i = 1, \dots, n$).

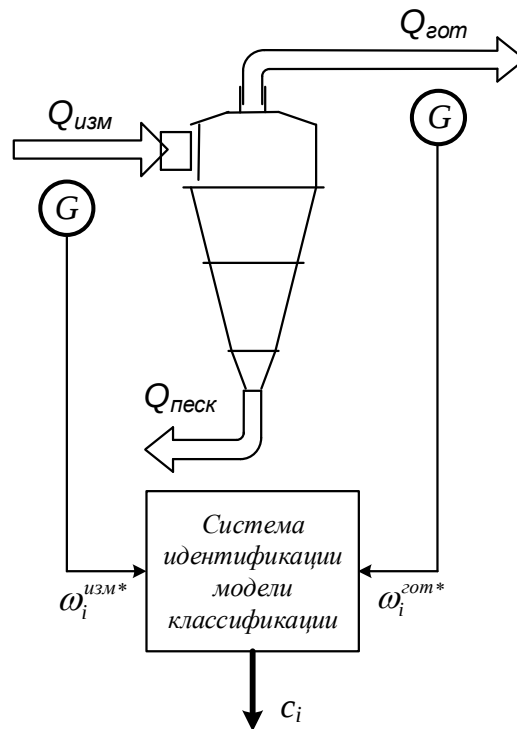


Рисунок 3.6 - Схема технологической идентификации модели процесса разделения

Для решения задачи управления процессом измельчения необходимо в цикле управления решать задачу прогноза фракционного состава, или определения производительности процесса измельчения. В настоящее время, при существующих технологических условиях ведения процессов измельчения, возникает необходимость постоянной корректировки матрицы разделения измельчаемого продукта. Это связано с постоянным изменением с одной стороны свойств рудного тела, а с другой стороны постоянные случайные воздействия, порождаемые как самой технологической системой, так и внешними воздействиями. Если обобщить выше сказанное, можно отметить — управление должно компенсировать случайные воздействия, связанные с изменением свойств сырья, поступающего на измельчение, а это непосредственно связано с изменением подачи питания на процесс, и регулирование подачи воды в зумпф гидроциклона.

В работе для экстраполяции коэффициентов матрицы разделения используется нейро-нечеткая сеть ANFIS (сеть аналогична рассмотренной ранее) (рисунок 3.7).

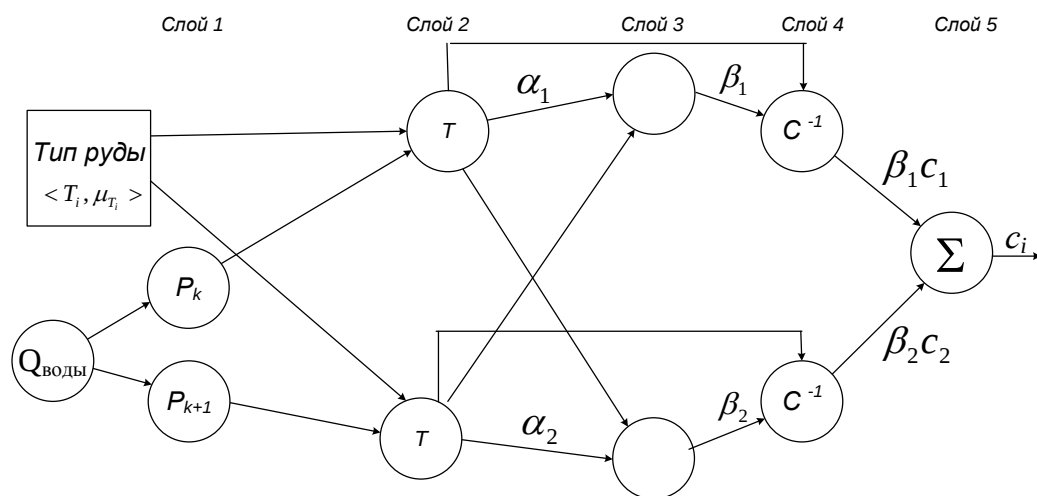


Рисунок 3.7 - Нейро-нечеткая сеть ANFIS для экстраполяции коэффициентов отделения

На вход сети подаётся «Тип руды» и « $Q_{\text{воды}}$, м³/ч» - расход воды.

Работа нейро-нечеткой сети аналогична выше рассмотренной. В таблице 3.12 отражено формальное представление нечёткой переменной « $Q_{\text{воды}}$ ».

Формализация нечётких переменных показана в таблице 3.12.

Таблица 3.12. Формализация нечётких переменных

Имя нечёткой переменной	Область существования нечёткой переменной	Терм-множества нечёткой переменной	Область определения терм-множеств
Расход воды, м ³ /ч	[0, 100]	P_1 =Very low	[0, 45]
		P_2 =Lower	[44, 46]
		P_3 =Normal	[45, 47]

Продолжение таблицы 3.12

Имя нечёткой переменной	Область существования нечёткой переменной	Терм- множества нечёткой переменной	Область определения терм-множеств
Элемент матрицы классификации, c_i	[0, 1]	$P_4=\text{Increased}$	[46, 48]
		$P_5=\text{High}$	[47, 49]
		$P_6=\text{Very high}$	[48, 100]
		C_1	[0; 0,1]
		C_2	[0,1; 0,2]
		C_3	[0,2; 0,3]
		C_4	[0,3; 0,4]
		C_5	[0,4; 0,5]
		C_6	[0,5; 0,6]
		C_7	[0,6; 0,7]
		C_8	[0,7; 0,8]
		C_9	[0,8; 0,9]
		C_{10}	[0,9; 1,0]

Функции принадлежности нечётких входных и выходной переменных отражены в формулах (3.5 – 3.8). Начальные параметры функций принадлежности выходной переменной в таблице 3.9. Набор правил для оценки матрицы разделения c_i по правилам нечёткого вывода.

Каждое из правил R_i логического вывода, имеющий вид

PR₇: ЕСЛИ «ТИП РУДЫ» $\rightarrow T_i$ & $Q_{\text{воды}} \rightarrow P_j$ ТО $c_i \rightarrow C_k$;

Нечеткий логический вывод. Решающая таблица показана ниже 3.13.

Таблица 3.13 - Решающая таблица нечеткого логического вывода

	P₁	P₂	P₃	P₄	P₅	P₆
T₁	C ₁₁	C ₁₂	C ₁₃	C ₁₄	C ₁₅	C ₁₆
T₂	C ₂₁	C ₂₂	C ₂₃	C ₂₄	C ₂₅	C ₂₆
T₃	C ₃₁	C ₃₂	C ₃₃	C ₃₄	C ₃₅	C ₃₆
T₄	C ₄₁	C ₄₂	C ₄₃	C ₄₄	C ₄₅	C ₄₆

3.3 Модель информационной системы оценки параметров процесса

Для организации системы управления процессом измельчения необходимо иметь инструментальные средства для реализации функций управления. Само управление, как процесс призвано обеспечить компенсацию внешних и внутренних возмущений, и тем самым стабилизировать технологический процесс, ориентируя его при этом на эффективный способ выполнения производственного задания. Для такого класса процессов как измельчения основная целевая функция, реализация которой позволит повысить качество управления процессом, является поддержание технологических параметров ведения процесса в стабильном состоянии, гарантирующим выполнение им его производственного задания. В данной работе в качестве одного из критериев управления предлагается использовать «индекс оценки качества продукта». При этом осуществляется стабилизация основных технологических параметров в зоне, так называемой, «области центра оценки качества продукта». Реальная ситуация, которая существует в некоторый конкретный момент времени, не всегда соответствует лучшим условиям протекания процесса. Границы области эволюционируют обычно с изменением, каких-либо параметров сырья,

параметров энергоресурсов, параметров системы управления. Задачей информационной системы является вовремя заметить эти отклонения, предупредить возможные нежелательные последствия таких изменений. Предлагается использовать нечётко – определённые импульсные модели, которые позволяют создать прогноз последующих состояний, и тем самым построить упреждающее управление. Для определения управляющих воздействий необходим критерий управления. Учитывая, что реальная система находится под постоянным воздействием случайных возмущений, надо постоянно контролировать смещение рабочей точки процесса и определять упреждающие значения управляющих воздействий. В качестве оценки смещения используется индекс оценки качества продукта, который характеризует степень нечёткого равенства текущей ситуации и ситуации, соответствующей центру оценки качества продукта. В качестве центра оценки качества продукта может быть принята точка, которая соответствует лучшим регламентным условиям, или, например, точка, значение которой устанавливается на основе экспертного опроса инженеров и квалифицированных работников, обслуживающих данный технологический процесс. Структура информационной системы оценки параметров процесса измельчения и классификации, работающих в замкнутом цикле представлена на рисунке 3.8.

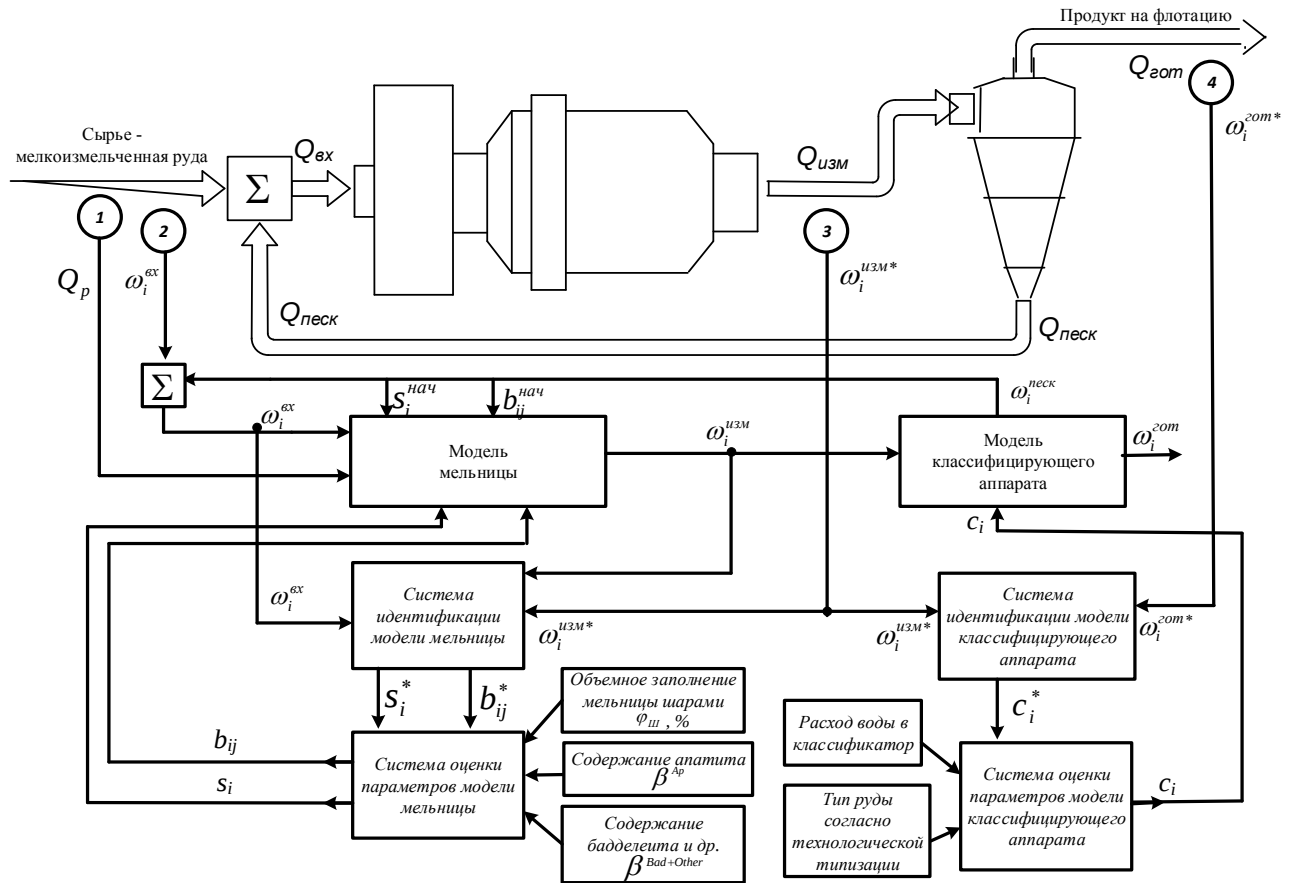


Рисунок 3.8 - Информационная система оценки параметров процесса

Работа информационной системы строится следующим образом.

1. На первом этапе осуществляется сбор информации о входном фракционном составе m_i^{ex} и производительности насоса подачи питания на мельницу.

2. По фракционному составу измельченного сырья $m_i^{изм}$ осуществляется идентификация модели мельницы, и определяются параметры модели b_{ij}^*, s_i^* ;

3. Проводится обучение нейро-нечеткой сети, основная цель, которой – аппроксимация коэффициентов b_{ij}, s_i разрушения и отбора, соответственно. Для этого задаются ранее полученные значения, обучающие последовательности $b_{ij}^{нач}, s_i^{нач}$, выполняется обучение, и делается прогноз выходного фракционного состава $m_i^{изм}$, поступающего на вход модели классифицирующего аппарата, где производится процедура аналогичная описанной.

4. Прогнозное значение возврата песков с гидроциклона $q_i^{песк}$ обратно в процесс измельчения суммируется на входе в мельницу с исходным сырьем $q_i^{сыр}$.

По результатам работы модели определяется прогнозное значение индекса оценки качества готового продукта измельчения. Значение индекса оценки качества по переменным состояния для конкретного момента времени формирует импульсную модель, которая используется для прогноза состояния процесса и выбора управляющих воздействий (см. гл. 4). Как управляющие воздействия используются две переменные: расход питания на мельницу и расход воды в мельничный зумпф.

Проверка адекватности модели

Проверка точности модели проводилась на основе статистических данных работы участка подготовки питания флотации АБОФ Ковдорского ГОКа. На графиках (рисунок 3.9) приводятся расчётные экстраполяционные значения и экспериментальное значение класса крупности +0,071 мм в сливе классификатора.

Модель построена по результатам работы системы оценки параметров. Погрешность расчётов для данного интервала не превышает 5%

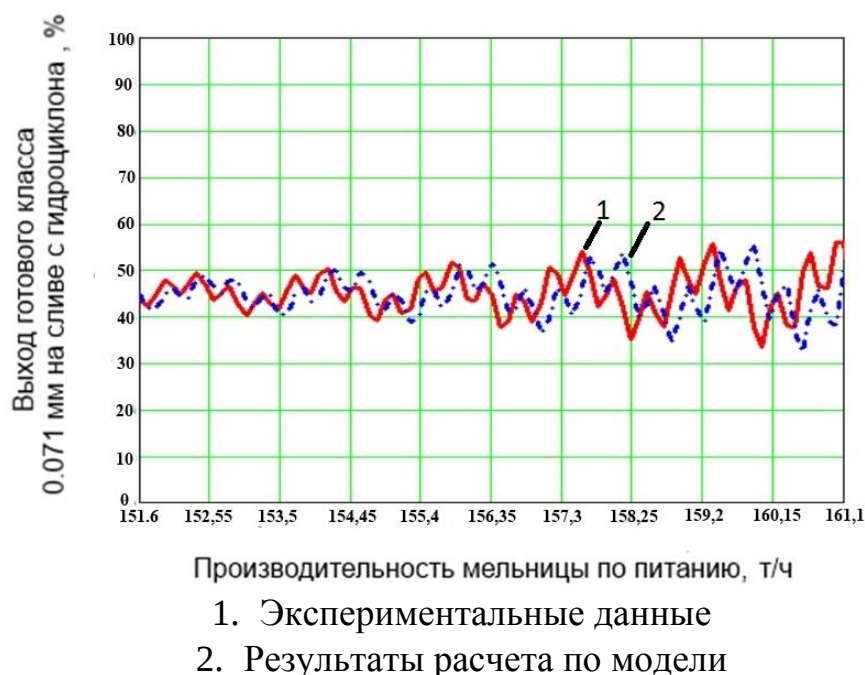


Рисунок 3.9 - Проверка адекватности модели

Данные с предыдущих вычислений используются для построения импульсной нечетко-определенной импульсной модели.

Принцип формирования импульсной нечетко-определенной импульсной модели оценки состояний системы графически представлен ниже на рисунке 3.10.

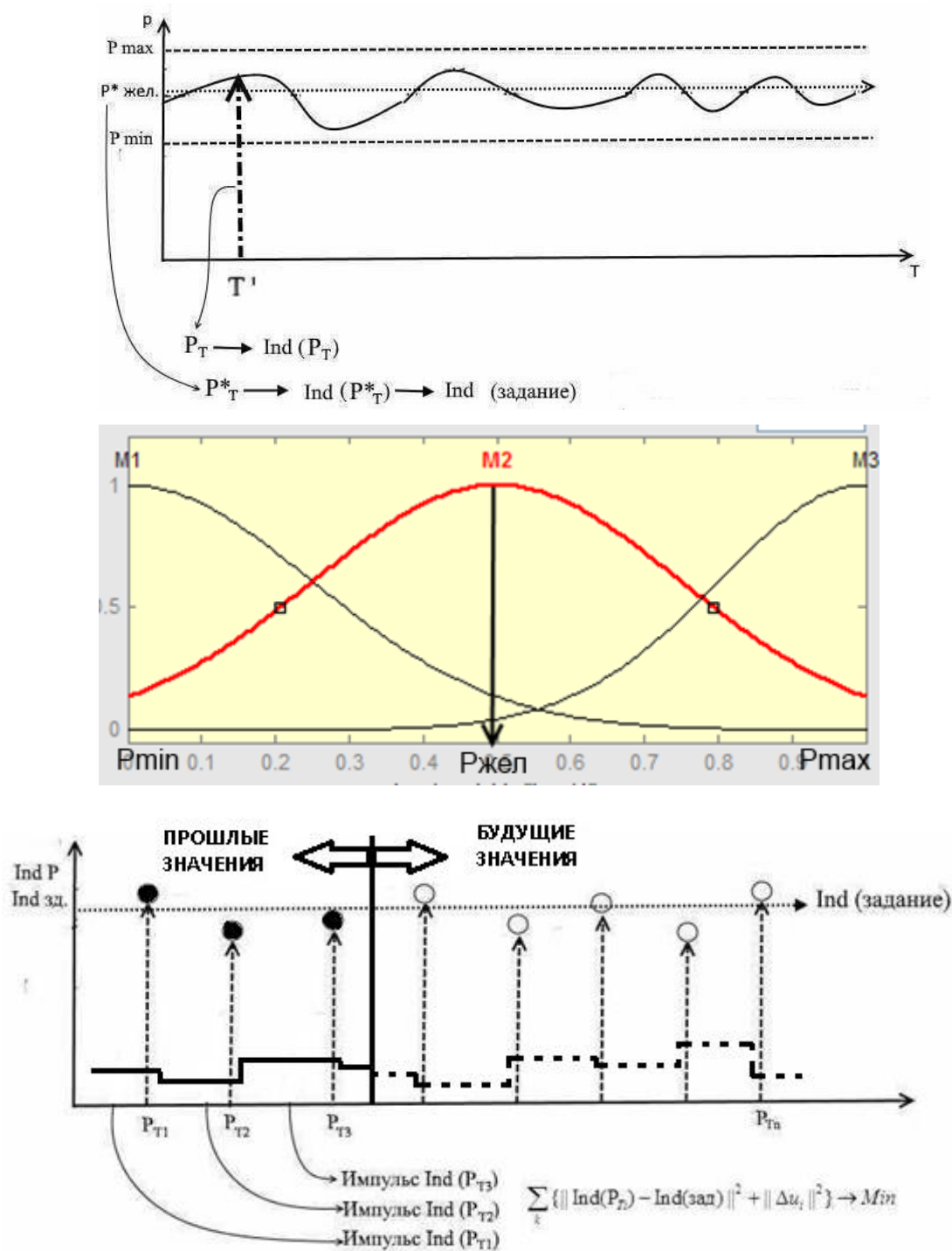


Рисунок 3.10 – Принцип формирования нечетко-определенной импульсной модели

Технологический параметр представлен кривой. Наиболее благоприятным значением параметра P будет являться близость параметра к $P^*_{жел}$. Следующий график показывает область значений, от минимальных значений параметра P_{min} и максимальных значений параметра P_{max} , как область оценки качества готового продукта. При этом значение параметра $P^*_{жел}$ будет приниматься за центр оценки качества готового продукта, что в последствии будет учитываться при формировании задания верхним уровнем управления разработанной системы.

Удаленность значений от центра оценки качества продукта будет формировать индекс оценки качества продукта, за единицу будет взят экстремум функции – максимальное значение, а за ноль координаты P_{max} и P_{min} , где значение функции принадлежности близко к нулю.

Далее показаны импульсы на определенном интервале времени, которые собирают информацию о текущем состоянии параметра (его величине), формируют индекс оценки качества продукта и на основе предыдущих значений система экстраполирует будущее поведение параметра, и соответственно системы, формируя прогнозное управление и вырабатывая необходимые управляющие воздействия.

3.4 Построение нечётко-определённой модели процесса измельчения

3.4.1 Определение технологического извлечения поступающего в переработку сырья

По суммарному содержанию апатита и бадделеита с сопутствующими минералами в сырье $\beta_p^{\Sigma Ap+Bad + Other}$ и содержанию P_2O_5 в исходном сырье $\beta_p^{P_2O_5}$ определяем технологическое извлечение для данного типа руды.

Введем лингвистические переменные со своими терм-множествами:

-содержание апатита и бадделеита с сопутствующими минералами в руде = $\{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6\}$

-содержанию $P_2O_5 = \{P_1, P_2, P_3, P_4, P_5, P_6\}$

-извлечение = $\{E_1, E_2, E_3, E_4, E_5, E_6\}$

Функции принадлежности терм-множеств лингвистических переменных показаны на рисунках 3.11, 3.12, 3.13.

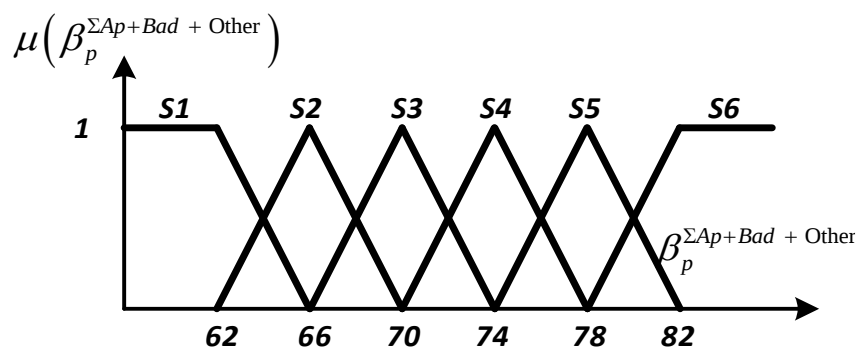


Рисунок 3.11 - Содержание апатита и бадделеита с сопутствующими минералами в руде

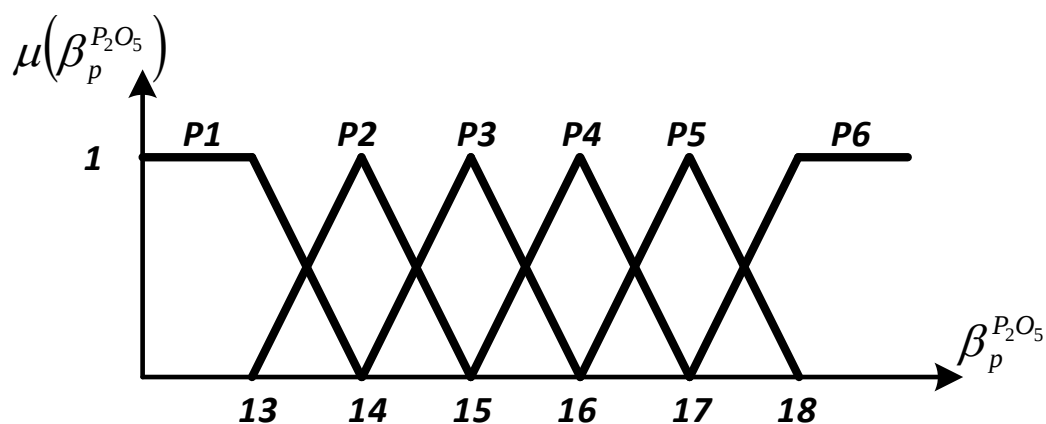


Рисунок 3.12 - Функции принадлежности терм-множеств лингвистической переменной «содержание P_2O_5 »

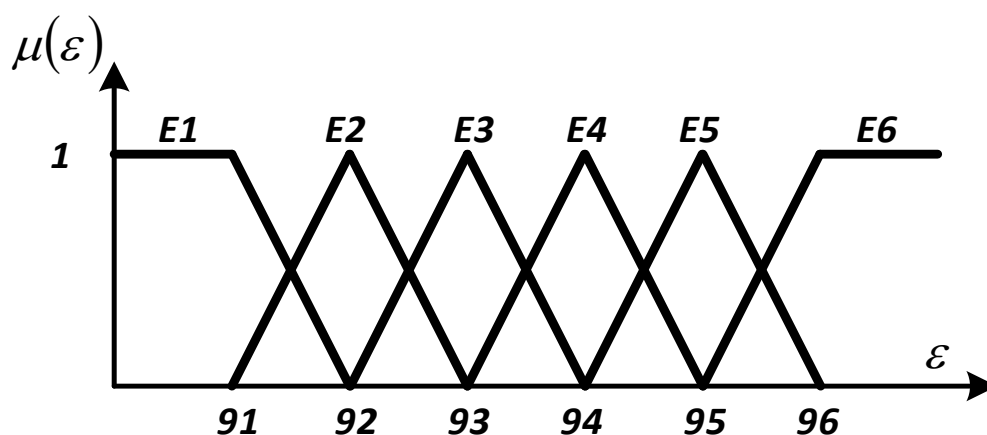


Рисунок 3.13 - Функции принадлежности терм-множеств лингвистической переменной «извлечение»

Ниже приводится решающая таблица нечеткого вывода 3.14.

Таблица 3.14 - Решающая таблица нечеткого вывода

		Содержание апатита и бадделеита с сопутствующими минералами					
		S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6
Содержание апатита	P_1	E_1	E_2	E_2	E_2	E_1	E_1
	P_2	E_1	E_2	E_2	E_3	E_3	E_3
	P_3	E_1	E_2	E_2	E_2	E_3	E_3
	P_4	E_1	E_1	E_2	E_2	E_2	E_2
	P_5	E_1	E_1	E_2	E_3	E_4	E_5
	P_6	E_1	E_1	E_2	E_3	E_5	E_6

Проведем фазификацию.

Содержание апатита и бадделеита с сопутствующими минералами = $\langle S_3, \mu_{S_3}(\beta_p^{\Sigma Ap+Bad + Other}) = 0.8 \rangle, \langle S_4, \mu_{S_4}(\beta_p^{\Sigma Ap+Bad + Other}) = 0.21 \rangle;$

Содержание $P_2O_5 = \langle P_2, \mu_{P_2}(\beta_p^{P_2O_5}) = 0.85 \rangle, \langle P_3, \mu_{P_3}(\beta_p^{P_2O_5}) = 0.15 \rangle.$

Согласно решающей таблице делаем нечеткие выводы.

Если содержание апатита и бадделеита с сопутствующими минералами = S_3 и содержание $P_2O_5 = P_2$

Тогда извлечение = E_2

$$\mu_{E_2}(\varepsilon) = \mu_{S_3}(\beta_p^{\Sigma Ap+Bad + Other}) \wedge \mu_{P_2}(\beta_p^{P_2O_5}) = 0.8$$

Если содержание апатита и бадделеита с сопутствующими минералами = S_3 и содержание $P_2O_5 = P_3$

Тогда извлечение = E_2

$$\mu_{E2}(\varepsilon) = \mu_{S3}(\beta_p^{\Sigma Ap+Bad + Other}) \wedge \mu_{P3}(\beta_p^{P_2O_5}) = 0.15$$

Если содержание апатита и бадделеита с сопутствующими минералами = S_4
и содержание $P_2O_5 = P_2$

Тогда извлечение = E_3

$$\mu_{E3}(\varepsilon) = \mu_{S4}(\beta_p^{\Sigma Ap+Bad + Other}) \wedge \mu_{P2}(\beta_p^{P_2O_5}) = 0.21$$

Если содержание апатита и бадделеита с сопутствующими минералами = S_4
и содержание $P_2O_5 = P_3$

Тогда извлечение = E_2

$$\mu_{E2}(\varepsilon) = \mu_{S4}(\beta_p^{\Sigma Ap+Bad + Other}) \wedge \mu_{P3}(\beta_p^{P_2O_5}) = 0.15$$

Проводим дефазификацию.

$$\varepsilon^{om} = \frac{0,8 \cdot 91 + 0,15 \cdot 91 + 0,21 \cdot 92 + 0,15 \cdot 91}{0,8 + 0,15 + 0,21 + 0,15} = 91,16 \%$$

3.4.2 Определение необходимого содержания класса крупности +0,071 мм на сливе классифицирующего аппарата

По содержанию класса крупности +0,071 мм в концентрате $\beta_k^{+0,071}$ и по вычисленному оптимальному технологическому извлечению ε определяем необходимое содержание класса крупности +0,071 мм на сливе классифицирующего аппарата.

Введем лингвистические переменные со своими терм-множествами:

-извлечение = $\{E_1, E_2, E_3, E_4\}$

-содержание класса +0,071 в концентрате = $\{B_1, B_2, B_3, B_4, B_5, B_6, B_7\}$

-содержание класса +0,071 на сливе = $\{G_1, G_2, G_3, G_4, G_5, G_6\}$

Функции принадлежности терм-множеств лингвистических переменных показаны на рисунках 3.14, 3.15, 3.16.

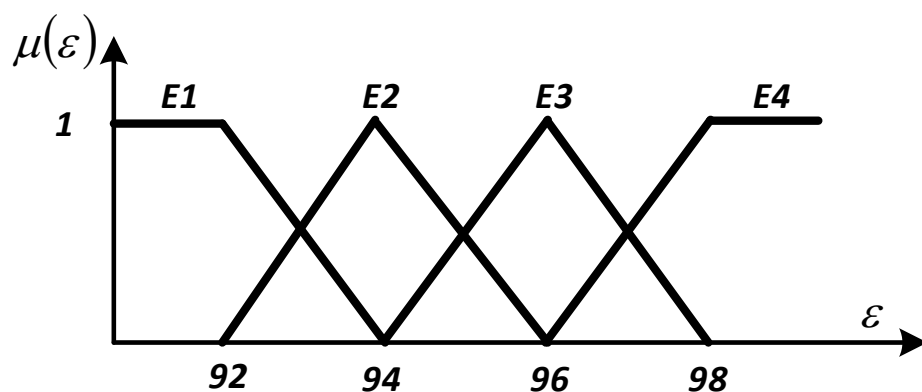


Рисунок 3.14 - Функции принадлежности терм-множеств лингвистической переменной «извлечение»

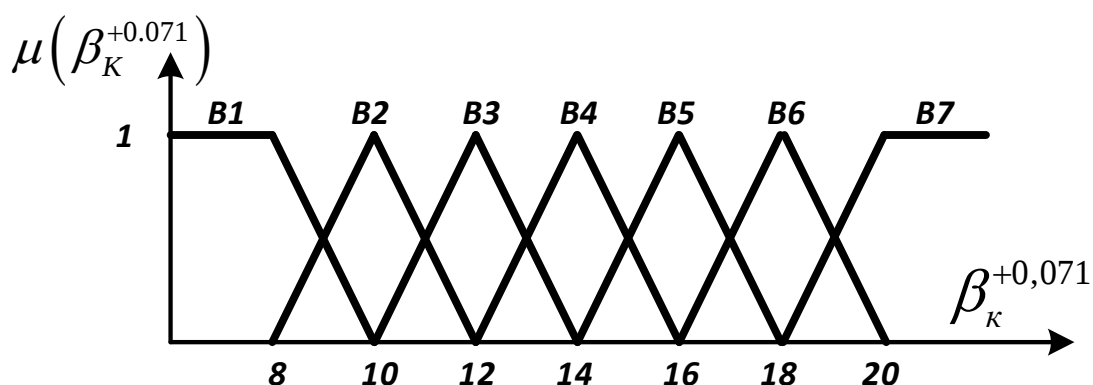


Рисунок 3.15 - Функции принадлежности терм-множеств лингвистической переменной «содержание класса +0,071 в концентрате»

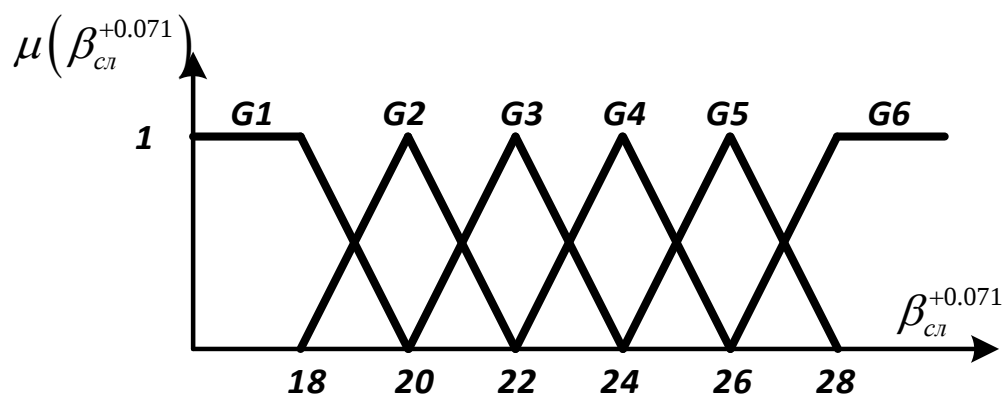


Рисунок 3.16 - Функции принадлежности терм-множеств лингвистической переменной «содержание класса +0,071 на сливе классификатора»

Далее показана решающая таблица нечеткого вывода 3.15.

Таблица 3.15 - Решающая таблица нечеткого вывода

		Технологическое извлечение ε			
		E_1	E_2	E_3	E_4
Содержание класса +0,071 в концентрате	B_1	G_2	G_1	G_1	G_1
	B_2	G_3	G_1	G_1	G_1
	B_3	G_4	G_2	G_1	G_1
	B_4	G_5	G_4	G_2	G_1
	B_5	G_6	G_6	G_3	G_2
	B_6	G_6	G_6	G_5	G_3
	B_7	G_6	G_6	G_6	G_5

Примем содержание класса крупности +0,071 мм в концентрате $\beta_K^{+0.071} = 15.4$ %.

Проведем фазификацию.

Извлечение = $\langle E_1, \mu_{E_1}(\varepsilon) = 0.46 \rangle, \langle E_2, \mu_{E_2}(\varepsilon) = 0.54 \rangle$;

Содержание класса +0,071 в концентрате = $\langle B_4, \mu_{B_4}(\beta_K^{+0.071}) = 0.22 \rangle, \langle B_5, \mu_{B_5}(\beta_K^{+0.071}) = 0.78 \rangle$

Согласно решающей таблице делаем нечеткие выводы.

Если извлечение = E_1 и содержание класса +0,071 в концентрате = B_4

Тогда содержание класса +0,071 на сливе = G_5

$$\mu_{G_5}(\beta_{cl}^{+0.071}) = \mu_{E_1}(\varepsilon) \wedge \mu_{B_4}(\beta_K^{+0.071}) = 0.22$$

Если извлечение = E_1 и содержание класса +0,071 в концентрате = B_5

Тогда содержание класса +0,071 на сливе = G_6

$$\mu_{G6}(\beta_{cl}^{+0,071}) = \mu_{E1}(\varepsilon) \wedge \mu_{B5}(\beta_K^{+0,071}) = 0.46$$

Если извлечение = E_2 и содержание класса +0,071 в концентрате = B_4

Тогда содержание класса +0,071 на сливе = G_4

$$\mu_{G4}(\beta_{cl}^{+0,071}) = \mu_{E2}(\varepsilon) \wedge \mu_{B4}(\beta_K^{+0,071}) = 0.22$$

Если извлечение = E_2 и содержание класса +0,071 в концентрате = B_5

Тогда содержание класса +0,071 на сливе = G_6

$$\mu_{G6}(\beta_{cl}^{+0,071}) = \mu_{E2}(\varepsilon) \wedge \mu_{B5}(\beta_K^{+0,071}) = 0.54$$

Проводим дефазификацию.

$$\beta_{cl}^{+0,071} = \frac{0.22 \cdot 26 + 0.46 \cdot 28 + 0.22 \cdot 24 + 0.54 \cdot 22}{0.22 + 0.46 + 0.22 + 0.54} = 24.83 \%$$

3.4.3 Определение содержания класса крупности -0,071+0 мм в пульпе

По содержанию бадделеита и сопутствующих минералов в исходной руде $\beta^{Bad + Other}$ и содержанию класса крупности +0,2 мм в измельченной руде $\beta_p^{+0,2}$ оцениваем содержание класса крупности -0,071+0 мм в мелкоизмельченной руде (пульпе) $\beta_p^{-0,071}$ [163].

Введем лингвистические переменные со своими терм-множествами:

содержание класса +0,2 в измельченной руде = $\{D_1, D_2, D_3, D_4\}$

содержание бадделеита и сопутствующих минералов = $\{N_1, N_2, N_3, N_4, N_5, N_6, N_7\}$

содержание класса -0,071 в мелкоизмельченной руде (пульпе) = $\{K_1, K_2, K_3, K_4, K_5, K_6\}$

Функции принадлежности терм-множествам лингвистических переменных показаны на рисунках 3.17, 3.18, 3.19.

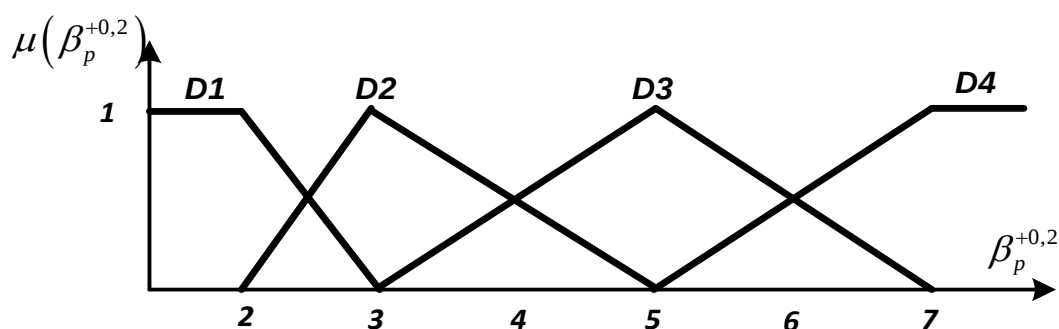


Рисунок 3.17 - Функции принадлежности терм-множеств лингвистической переменной «содержание класса +0,2 мм в измельчённой руде»

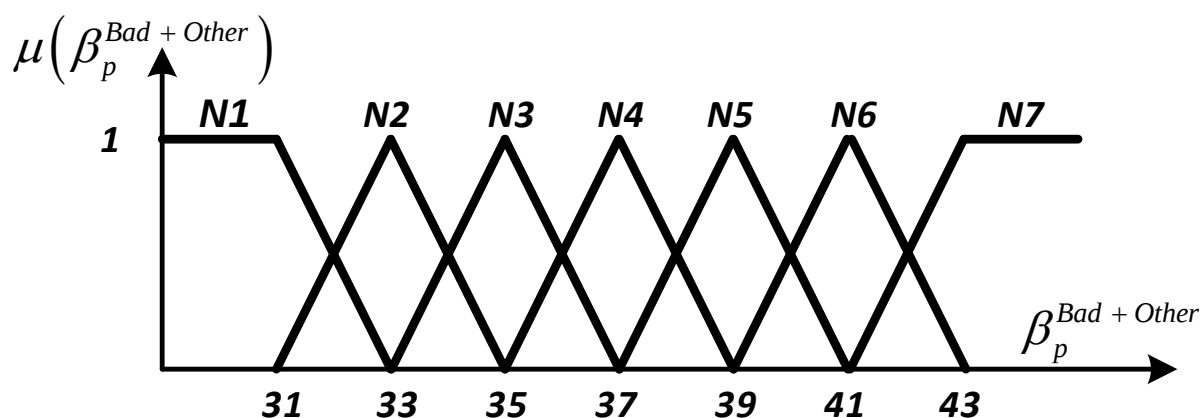


Рисунок 3.18 - Функции принадлежности терм-множеств лингвистической переменной «содержание бадделейта и сопутствующих минералов в руде»

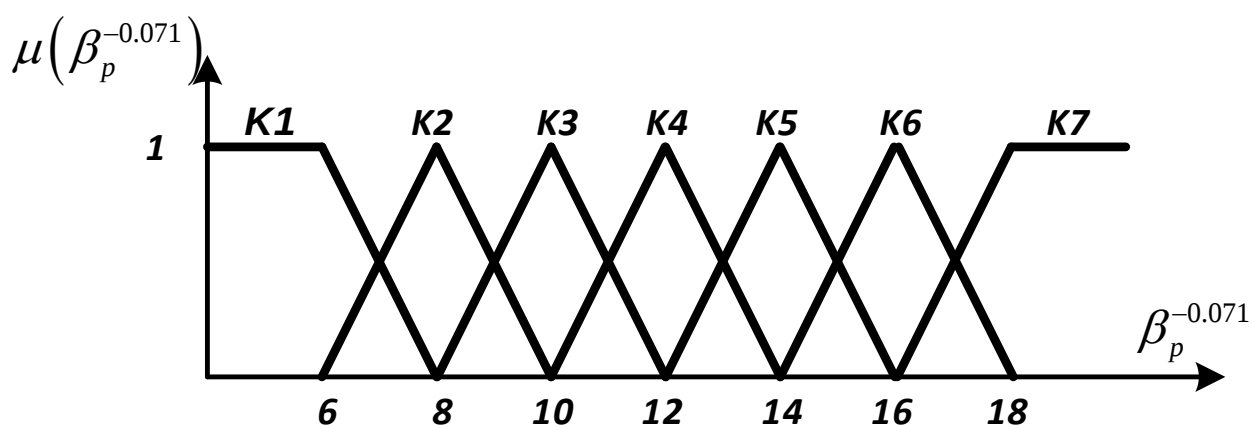


Рисунок 3.19 - Функции принадлежности терм-множеств лингвистической переменной «содержание класса -0,071 мм в мелкоизмельченной руде (пульпе)»

Ниже приводится решающая таблица нечеткого вывода 3.16.

Таблица 3.16 - Решающая таблица нечеткого вывода

		Содержание бадделеита и сопутствующих минералов в руде						
		N_1	N_2	N_3	N_4	N_5	N_6	N_7
Содержание класса +0,2 мм в руде	D_1	K_7	K_7	K_6	K_5	K_4	K_3	K_3
	D_2	K_7	K_6	K_5	K_4	K_3	K_2	K_2
	D_3	K_6	K_5	K_4	K_3	K_2	K_1	K_1
	D_4	K_5	K_4	K_3	K_2	K_1	K_1	K_1

3.4.4 Определение удельной производительности мельниц

По содержанию бадделеита и сопутствующих минералов в исходной руде $\beta^{Bad + Other}$ определяем максимальную удельную производительность мельниц по определяющему классу -0,071+0 мм $q_{0.071}^{max}$.

Введем лингвистические переменные со своими терм-множествами:

содержание бадделеита и сопутствующих минералов в руде = $\{N_1, N_2, N_3, N_4, N_5, N_6\}$

максимальная удельная производительность мельниц = $\{Q_1, Q_2, Q_3, Q_4, Q_5, Q_6\}$

Функции принадлежности терм-множеств лингвистических переменных показаны на рисунках 3.20 и 3.21.

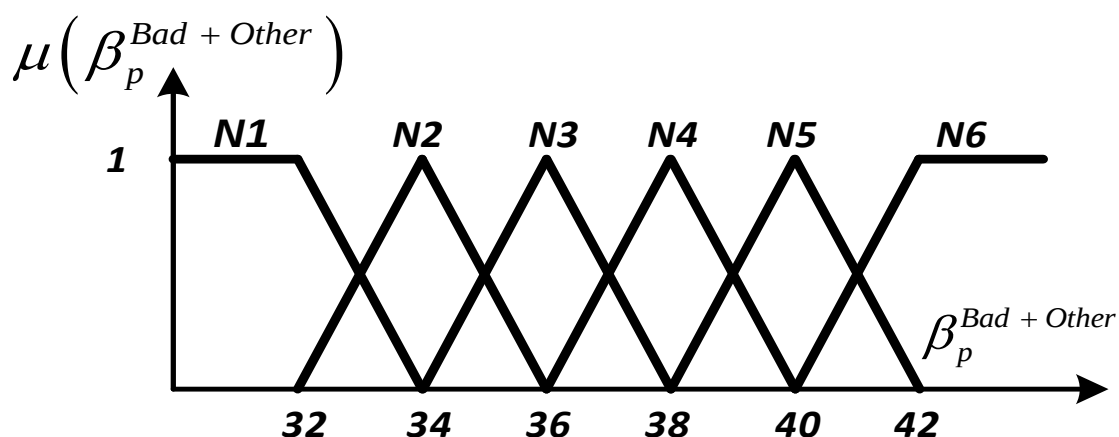


Рисунок 3.20 - Функции принадлежности терм-множеств лингвистической переменной «содержание бадделеита и сопутствующих минералов в измельченной руде»

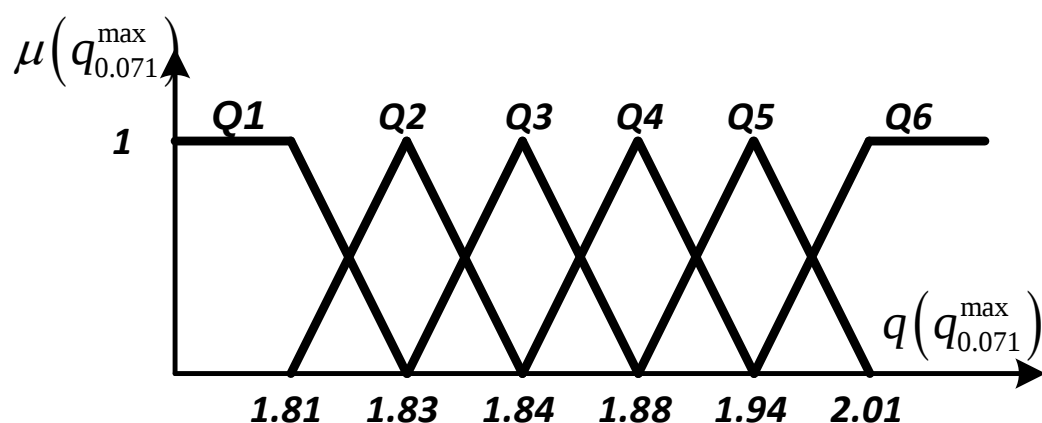


Рисунок 3.21 - Функции принадлежности терм-множеств лингвистической переменной «максимальная удельная производительность мельниц»

Далее показана решающая таблица нечеткого вывода 3.17.

Таблица 3.17 - Решающая таблица нечеткого вывода

Содержание бадделеита и сопутствующих минералов в руде					
N_1	N_2	N_3	N_4	N_5	N_6
Q_6	Q_5	Q_4	Q_3	Q_2	Q_1
Максимальная удельная производительность мельниц					

Проведем фазификацию.

$$\begin{aligned} \text{Содержание бадделеита в руде} &= \langle N_4, \mu_{N_4}(\beta_p^{Bad + Other}) = 0.21 \rangle, \\ \langle N_5, \mu_{N_5}(\beta_p^{Bad + Other}) &= 0.79 \rangle \end{aligned}$$

Согласно решающей таблице делаем нечеткие выводы.

Если содержание бадделеита и сопутствующих минералов в руде = N_4

Тогда максимальная удельная производительность = Q_3

$$\mu_{Q_3}(q_{0.071}^{\max}) = 0.21$$

Если содержание бадделеита и сопутствующих минералов в руде = N_5

Тогда максимальная удельная производительность = Q_2

$$\mu_{Q_2}(q_{0.071}^{\max}) = 0.79$$

Проводим дефазификацию.

$$q_{0.071}^{\max} = \frac{0.21 \cdot 1.87 + 0.79 \cdot 1.86}{0.21 + 0.79} = 1.6814 \text{ т/ч} \cdot \text{м}^3.$$

3.4.5 Определение производительности мельницы МШР 3,6 x 5.0

Оптимальная производительность мельницы – уставка задания по руде в контуре регулирования пульпового наполнения – определяется по формуле:

$$Q_M^{OPT} = \frac{q_{0.071}^{\max} \cdot V_{\text{раб}}}{(100 - \beta_{cl}^{+0.071}) - \beta_p^{-0.071}} \cdot 100 \quad (3.29)$$

Где $q_{0.071}^{\max}$ – максимальная удельная производительность мельницы, т/ч·м³;

$\beta_p^{-0.071}$ – содержание класса -0,071+0 мм в мелкоизмельченной руде (пульпе), %;

$\beta_{cl}^{+0.071}$ – содержание класса +0,071 мм в сливе классификатора, %;

$V_{\text{раб}}$ – рабочий объем мельницы, м³.

Оптимальную производительность будем определять для мельницы МШР 3,6×5,0 с новой футеровкой, т.е. считаем $V_{\text{раб}} = 48 \text{ м}^3$.

$$Q_M^{\text{ОПТ}} = \frac{q_{0,071}^{\text{max}} \cdot V_{\text{раб}}}{(100 - \beta_{\text{сл}}^{+0,071}) - \beta_p^{-0,071}} \cdot 100 = \frac{1.6814 \cdot 48}{100 - 24.83 - 7.15} \cdot 100 = 118.64 \text{ т/ч}$$

3.4.6 Определение плотности слива классифицирующего аппарата

По вычисленному содержанию класса крупности +0,071 мм в сливе классифицирующего аппарата $\beta_{\text{сл}}^{+0,071}$ и по определенному содержанию бадделеита и сопутствующих минералов в руде $\beta^{\text{Bad} + \text{Other}}$ найдем оптимальную плотность слива $\rho_{\text{сл}}^{\text{опт}}$ – уставку задания в контуре регулирования плотности готового продукта измельчения.

Введем лингвистические переменные со своими терм-множествами:

-содержание бадделеита и сопутствующих минералов в руде = $\{N_1, N_2, N_3, N_4, N_5, N_6\}$

-содержание класса +0,071 на сливе = $\{B1, B2, B3, B4, B5, B6, B7, B8, B9\}$

-плотность слива = $\{K_1, K_2, K_3, K_4, K_5, K_6\}$

Функции принадлежности терм-множествам лингвистических переменных показаны на рисунках 3.24, 3.25, 3.26

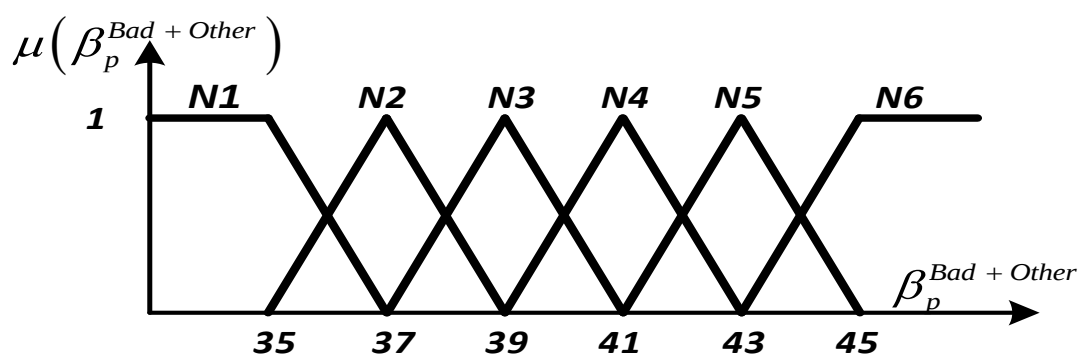


Рисунок 3.22 - Функции принадлежности терм-множеств лингвистической переменной «содержание бадделеита и сопутствующих минералов в руде»

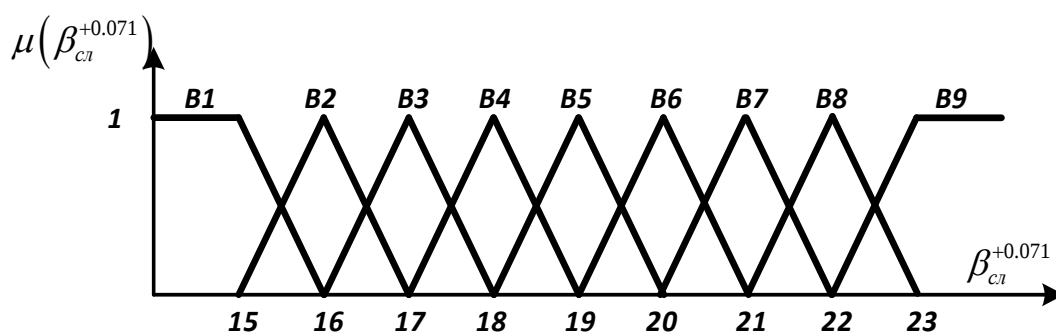


Рисунок 3.23 - Функции принадлежности терм-множеств лингвистической переменной «содержание класса +0,071 в сливе»

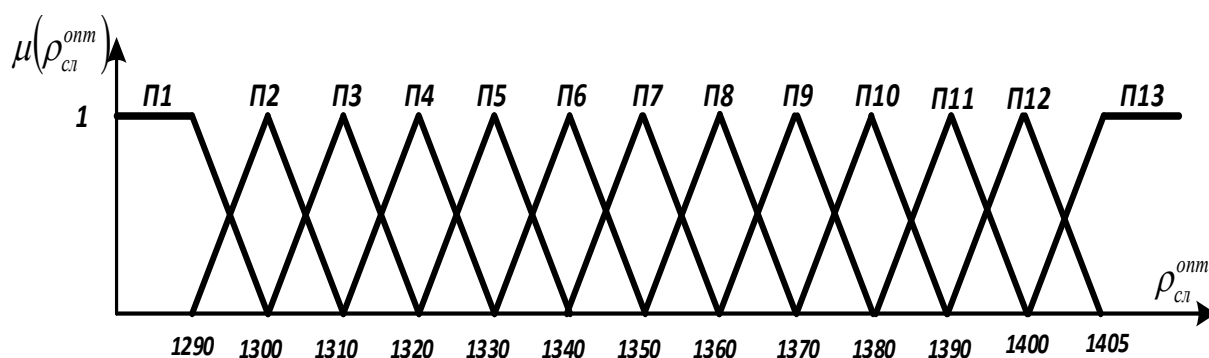


Рисунок 3.24 - Функции принадлежности терм-множеств лингвистической переменной «плотность слива»

Ниже показана решающая таблица нечеткого вывода 3.18.

Таблица 3.18 - Решающая таблица нечеткого вывода

		Содержание бадделеита и сопутствующих минералов в руде					
		N_1	N_2	N_3	N_4	N_5	N_6
Содержание класса +0,071 мм в сливе	B_5	Π_9	Π_8	Π_7	Π_4	Π_3	Π_2
	B_6	Π_{10}	Π_9	Π_9	Π_6	Π_5	Π_4
	B_7	Π_{11}	Π_{10}	Π_{10}	Π_8	Π_7	Π_6
	B_8	Π_{13}	Π_{12}	Π_{11}	Π_{10}	Π_9	Π_8
	B_9	Π_{13}	Π_{13}	Π_{12}	Π_{11}	Π_{10}	Π_9

Проведем фазификацию.

$$\begin{aligned} \text{Содержание бадделеита в руде} &= \langle N_3, \mu_{N_5}(\beta_p^{Bad + Other}) = 0.65 \rangle, \\ \langle N_4, \mu_{N_6}(\beta_p^{Bad + Other}) = 0.35 \rangle \end{aligned}$$

$$\text{Содержание класса +0,071 на сливе} = \langle B_9, \mu_{B_9}(\beta_{cl}^{+0.071}) = 1.0 \rangle.$$

Согласно решающей таблице делаем нечеткие выводы.

Если содержание бадделеита и сопутствующих минералов в руде = N_3 и содержание класса +0,071 на сливе = B_9

$$\text{Тогда плотность слива} = \Pi_{12}$$

$$\mu_{\Pi_{12}}(\rho_{cl}) = 0.65$$

Если содержание бадделеита и сопутствующих минералов в руде = N_4 и содержание класса +0,071 на сливе = B_9

$$\text{Тогда плотность слива} = \Pi_{11}$$

$$\mu_{П11}(\rho_{cl}) = 0.35$$

Проводим дефазификацию.

$$\rho_{cl} = \frac{0.35 \cdot 1370 + 0.65 \cdot 1380}{0.35 + 0.65} = 1376.5 \text{ г/л.}$$

Определение уровня потребляемой мельницей мощности

Критическое значение уровня потребляемой мельницей мощности $S_{кр}$ функционально зависит от максимальной удельной производительности мельницы $q_{0.071}^{\max}$. Линеаризовав данную зависимость, получим эмпирическое уравнение вида:

$$S_{кр} = -35.6 \cdot q_{0.071}^{\max} + 111.23$$

Выводы по третьей главе

Задача идентификации моделей является достаточно сложной и важной задачей современных систем управления. В зависимости от её решения зависит качество системы управления. В данном разделе рассмотрены подходы аппроксимации коэффициентов разрушения и отбора на основе нейро-нечетких методов. Для решения этой задачи была применена сеть ANFIS. Можно, как результат, отметить, что была достигнута степень адекватности модели на уровне 5%. Для промышленных систем это неплохой результат. В заключительном разделе было рассмотрено применение аппарата нечёткой логики для оценки параметров процесса измельчения. Если учесть довольно высокую степень неопределённости в знаниях, применение этого подхода является перспективным и требует своего дальнейшего развития.

ГЛАВА 4. ПРИМЕНЕНИЕ ИМПУЛЬСНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОНЕЧНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ РЕГУЛЯРИЗОВАННОЙ ПРОГНОЗИРУЮЩЕЙ МОДЕЛИ УПРАВЛЕНИЯ

В данной главе рассматривается управление технологическим процессом измельчения внутри шаровой мельницы, отличающиеся нелинейностью и возмущениями. Эти возмущения неразрывно связаны с большим количеством разновидностей и неоднородностью первичного материала. Для управления в таких условиях разработан регуляризованный прогнозирующий контроллер на базе ℓ_2 -нормы импульсной характеристики конечной длительности (КИХ), с ограничениями на вход и на скорость входа [169]. Оценочный модуль основан на простом фильтре с нарушениями постоянной мощности. Проблема регулятора на базе КИХ решается с помощью задачи нелинейного программирования через преобразование целевой функции к стандартному виду. Использован алгоритм на базе метода внутренней точки. Используемая здесь модель является моделью объекта второго порядка с запаздыванием (SOPDT) с 2х2 входами и выходами (MIMO-multi input multi output) и нулевой передаточной функцией.

Оценочный модуль используется для оценки неизвестного нарушения через решение задачи оптимизации. При использовании однополосного двухпозиционного переключателя с нулевой передаточной функцией предусмотрена работа оценочного модуля для измерения шумов. Также исследуется работа управления с прогнозирующими моделями (УПМ) в закрытом контуре с оценочным модулем движущегося горизонта и системой последовательного ввода-вывода. Для прогнозирующего контроллера при выходе определены мягкие ограничения, обеспечивающие ошибкоустойчивость и надежность в случае несовпадения параметров «технологическая установка – модель». Такими ограничениями называют границы вокруг области контрольной точки, в которых ошибки, находясь в зоне нечувствительности, т.е. в области мягких ограничений, имеют минимальное значение, а во время выхода ошибки за границы этой зоны имеют максимальное значение.

4.1 Модель управления с прогнозированием с использованием импульсной характеристики конечной длительности (КИХ)

Для разработки системы автоматического управления был проведен анализ процесса измельчения и классификации, как объекта управления, результаты которого приведены на рисунке 4.1.

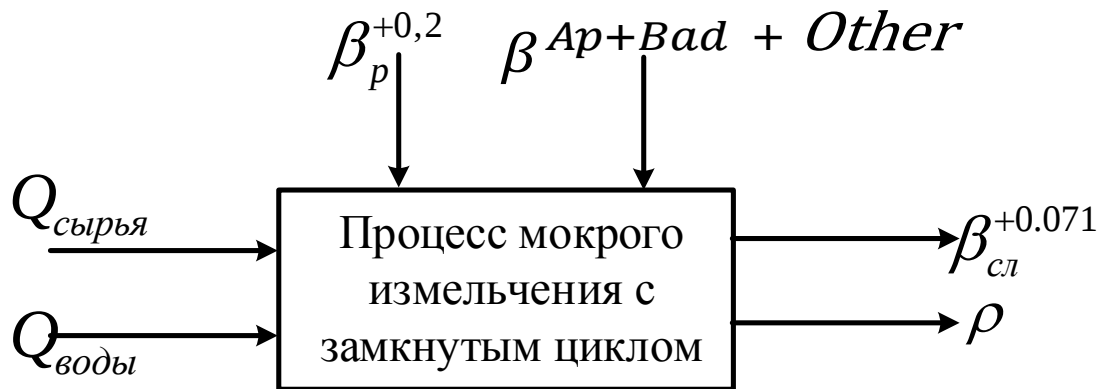


Рисунок 4.1 - Входные воздействия и выходные параметры агрегата мокрого измельчения с замкнутым циклом работы

Управляемые переменные:

- крупность продукта измельчения и классификации $\beta_{сл}^{+0.071}$;
- плотность продукта измельчения и классификации ρ .

Управляющие воздействия:

- расход исходного сырья $Q_{сырья}$;
- расход воды в зумпф мельницы $Q_{воды}$.

Возмущающие воздействия:

- крупность исходного сырья $\beta_p^{+0,2}$;
- минералогический состав исходного сырья $\beta^{Ap+Bad+Other}$.

Совокупность критериев оценки качества продукта процесса измельчения и классификации в работе предложено именовать как центр оценки качества продукта. Качество продукта находится во взаимосвязи с регламентными

режимами и напрямую зависит от максимального соответствия лучшим регламентным режимам ведения технологического процесса.

Отклонение по качеству продукта говорит о выходе процесса из области лучших регламентных режимов. Работу технологического процесса измельчения и классификации можно представить как последовательную смену его различных состояний. При этом лучшие регламентные состояния будут формировать область центра оценки качества. Удаленность текущего состояния технологического процесса от центра оценки качества в работе предложено учитывать через индекс оценки качества. Графическая интерпретация индекса и центра оценки качества продукта приводится на рисунке 4.2.

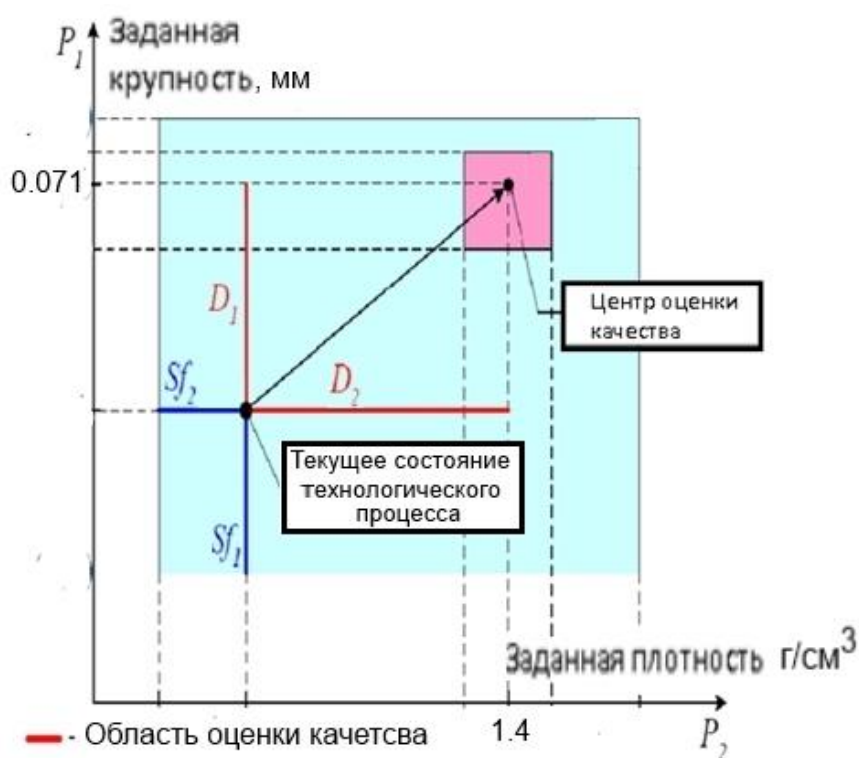


Рисунок 4.2 - Интерпретация индекса и центра оценки качества

Индекс оценки качества продукта строится на основе двух оценок: степени нечёткого включения ситуации $\tilde{s}_i$ в ситуацию $\tilde{s}_j$ и обозначается $\nu(\tilde{s}_i, \tilde{s}_j)$ (нечёткая импликация) и определяется выражением: $\nu(\tilde{s}_i, \tilde{s}_j) = \& \nu(\mu_{\tilde{s}_i}(T), \mu_{\tilde{s}_j}(T))$, здесь $\nu(\mu_{\tilde{s}_i}(T), \mu_{\tilde{s}_j}(T)) = \&(\mu_{\mu_{\tilde{s}_i}(T)}(E_k) \rightarrow \mu_{\mu_{\tilde{s}_j}(T)}(E_k))$; и степени нечеткого равенства $In(\tilde{s}^*)_{\tilde{s}_0} = \nu(\tilde{s}^*, \tilde{s}_0) \& \nu(\tilde{s}_0, \tilde{s}^*)$. Степень нечёткого равенства определяет индекс оценки качества продукта.

Задача управления заключается в том, чтобы направить режим ведения технологического процесса в область лучших регламентных состояний.

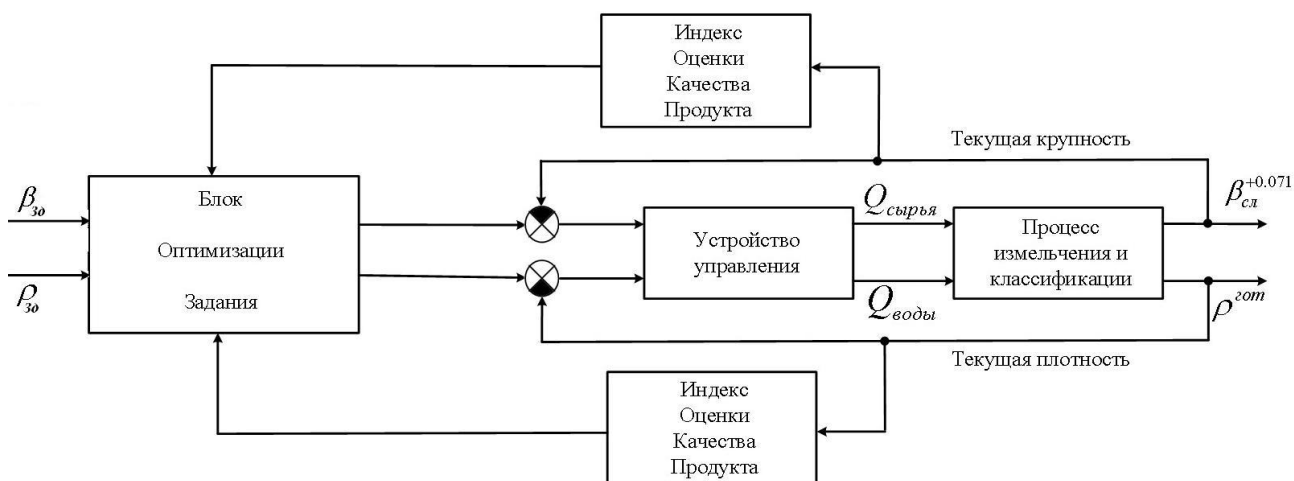


Рисунок 4.3 - Структурная схема системы автоматического управления

В блоке оптимизации задания в соответствии с изменениями минералогического состава, полученной системой оценки параметров модели, осуществляется оптимизация задания, с учетом индекса оценки качества.

4.1.1 Измерительные устройства и технологическая установка

Сделаем предположение о том, что установкой является линейная система пространства состояний:

$$x_{k+1} = Ax_k + Bu_k + B_d d_k + Gw_k x_{k+1}, \quad (4.1)$$

$$z_k = Cx_k, \quad (4.2)$$

где x – состояния процесса;

u – регулирующие переменные;

d – неизмеряемые возмущения;

w – шум стохастического процесса;

z – управляемые переменные.

Измеренные выходы, y , являются регулируемыми выходами, z , с помехами при измерении, v . Таким образом:

$$y_k = z_k + v_k, \quad (4.3)$$

Исходное состояние, помехи во время измерения, равно как и зашумленность процесса, вероятно, представляют из себя нормально распределенные стохастические векторы:

$$x_0 \approx N(\bar{x}_0, P_0), \quad (4.4)$$

$$w_k \approx N_{iid}(0, Q), \quad (4.5)$$

$$v_k \approx N_{iid}(0, R). \quad (4.6)$$

Измеренный выход (y) является сигналом обратной связи, который используется оценочным модулем, сигнал системы управления (u) выполняется на установке [149].

4.1.2 Регулятор

В работе предлагается регуляризованное прогнозирующее управление на основе ℓ_2 -нормы импульсной характеристики конечной длительности (КИХ) с ограничениями на вход и скорость входа. Предложена двухуровневая система управления технологическим процессом измельчения.

Устойчивые процессы представлены режимом КИХ:

$$z_k = b_k + \sum_{i=1}^n H_i u_{k-i}, \quad (4.7)$$

где $\{H_i\}_{i=1}^n$ – коэффициенты импульсной характеристики (Марковские параметры), которые составляют смещение оценочного модуля; b_k -передает отклонение прогнозируемого выхода от фактического.

Следовательно, при помощи КИХ-модели, ℓ_2 -регуляризованная задача наблюдения выхода, имеющего ограничения на вход формулируется таким образом:

$$\min_{\{z,u\}} \phi = \frac{1}{2} \sum_{k=0}^{N-1} \| \text{Ind}(z_{k+1}) - \text{Ind}^{zd}(r_{k+1}) \|_{Q_z}^2 + \| \Delta u_k \|_S^2 \quad (4.8)$$

При котором:

$$z_k = b_k + \sum_{i=1}^n H_i u_{k-i}, \quad k = 1, \dots, N, \quad (4.9)$$

$$u_{\min} \leq u_k \leq u_{\max}, \quad k = 0, \dots, N-1, \quad (4.10)$$

$$\Delta u_{\min} \leq \Delta u_k \leq \Delta u_{\max}, \quad k = 0, \dots, N-1, \quad (4.11)$$

$$z_k \leq z_{\max} + \eta_k, \quad k = 1, \dots, N, \quad (4.12)$$

$$z_k \geq z_{\min} - \eta_k, \quad k = 1, \dots, N, \quad (4.13)$$

при этом $\Delta u_k = u_k - u_{k-1}$ и Q_z, S – это веса регуляризации, а $\|z_{k+1} - r_{k+1}\|_{Q_z}^2$ будет являться общим представлением норм для метода наименьших квадратов по весу.

Это выглядит как:

$$\| \text{Ind}(z_{k+1}) - \text{Ind}^{zd}(r_{k+1}) \|_{Q_z}^2 = \| \text{Ind}(z_{k+1}) - \text{Ind}^{zd}(r_{k+1}) \|_{Q_z} \| \text{Ind}(z_{k+1}) - \text{Ind}^{zd}(r_{k+1}) \|^T \quad (4.14)$$

В данной формулировке горизонт управления будет идентичен горизонту прогнозирования. Однако, по усмотрению, горизонт прогнозирования может быть выбран длиннее горизонта управления. Горизонт управления выберем

такой длины, при которой ни один граничный эффект не воздействовал бы на решение из начала горизонта и решение задачи в дальнейшем могло бы быть преобразовано в ограниченную линейно-квадратичную задачу оптимального управления [180].

Чтобы решать задачи такого типа для длинных горизонтов прогнозирования разработаны эффективные алгоритмы, описанными Йоргенсен и др. (2004). Рассматривается данная задача в стандартной форме эквивалентной уравнению 4.8.

Обобщённый алгоритм оптимизации

1. Собираются данные с объекта по фракционному составу и плотности.
2. На основе нечёткого вывода корректируются центр оценки качества продукта r_k .
3. Назначается $\text{Ind}^{zd}(r_{k+1})$ - уставка для регулятора.
4. Определяется индекс оценки качества продукта по переменным состояния $\text{Ind}(z_{k+1})$ для прогнозного $k+1$ интервала времени.
5. Осуществляется шаг оптимизационной процедуры, и, если оптимум не достигнут (критерий формула 4.8 и ограничения 4.9-4.13), то проводятся вычисления с пункта 4.

Для решения нелинейных программ такого вида существуют различные способы оптимизации. Здесь же применяется алгоритм оптимизации на базе метода внутренней точки.

4.1.3 Определение задачи нелинейного программирования для расчёта регулятора КИХ

Определяем векторы Z , R , U , как:

$$Z = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \vdots \\ z_N \end{bmatrix}, \quad R = \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \\ \vdots \\ r_N \end{bmatrix}, \quad U = \begin{bmatrix} u_0 \\ u_1 \\ \vdots \\ u_{N-1} \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

Следовательно, прогнозы для модели импульсной характеристики выражены как:

$$Z = c + \Gamma U. \quad (4.16)$$

В случае $N = 6$ и $n = 3$, Γ собирается как:

$$\Gamma = \begin{bmatrix} H_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ H_2 & H_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ H_3 & H_2 & H_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & H_3 & H_2 & H_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & H_3 & H_2 & H_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & H_3 & H_2 & H_1 \end{bmatrix}, \quad (4.17)$$

А c собирается как:

$$c = \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \\ c_4 \\ c_5 \\ c_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 + (H_2 u_{-1} + H_3 u_{-2}) \\ b_2 + (H_3 u_{-1}) \\ b_3 \\ b_4 \\ b_5 \\ b_6 \end{bmatrix}. \quad (4.18)$$

Кроме того, для случая $N = 6$, определяем матрицы Λ и I_0 :

$$\Lambda = \begin{bmatrix} I & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -I & I & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -I & I & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -I & I & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -I & I & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -I & I \end{bmatrix} I_0 = \begin{bmatrix} I \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (4.19)$$

и

$$Q_z = \begin{bmatrix} Q_z & & & \\ & Q_z & & \\ & & \ddots & \\ & & & Q_z \end{bmatrix} S = \begin{bmatrix} S & & & \\ & S & & \\ & & \ddots & \\ & & & S \end{bmatrix}, \quad (4.20)$$

Целевую функцию для уравнения выразим как:

$$\begin{aligned} \phi &= \frac{1}{2} \sum_{k=0}^{N-1} \| \text{Ind}(z_{k+1}) - \text{Ind}^{zd}(r_{k+1}) \|_{Q_z}^2 + \| \Delta u_k \|_S^2 \\ &= \frac{1}{2} \| \text{Ind}(Z) - \text{Ind}(R) \|_{Q_z}^2 + \frac{1}{2} \| \Lambda U - I_0 u_{-1} \|_S^2 \\ &= \frac{1}{2} \| c + \Gamma U - R \|_{Q_z}^2 + \frac{1}{2} \| \Lambda U - I_0 u_{-1} \|_S^2 \\ &= \frac{1}{2} U' (\Gamma' Q_z \Gamma + \Lambda' S \Lambda) U \\ &\quad + (\Gamma' Q_z (c - R) - \Lambda' S I_0 u_{-1})' U \\ &\quad + \left(\frac{1}{2} \| c - R \|_{Q_z}^2 + \frac{1}{2} \| I_0 u_{-1} \|_S^2 \right) \\ &= \frac{1}{2} U' H U + g' U + \rho, \end{aligned} \quad (4.21)$$

в которой:

$$H = \Gamma' Q_z \Gamma + \Lambda' S \Lambda, \quad (4.22)$$

$$g = \Gamma' Q_z (c - R) - \Lambda' S I_0 u_{-1}, \quad (4.23)$$

$$\rho = \frac{1}{2} \| c - R \|_{Q_z}^2 + \frac{1}{2} \| u_{-1} \|_S^2, \quad (4.24)$$

Таким образом, решение задачи для регулятора УПМ на базе КИХ в уравнении 4.6 находится в виде решения задачи выпуклого нелинейного программирования как показано ниже:

$$\min_U \psi = \frac{1}{2} U' H U + g' U. \quad (4.25)$$

Так, что:

$$U_{\min} \leq U \leq U_{\max}, \quad (4.26)$$

$$b_l \leq \Lambda U \leq b_u, \quad (4.27)$$

Где:

$$U_{\min} = \begin{bmatrix} u_{\min} \\ u_{\min} \\ \vdots \\ u_{\min} \end{bmatrix}, \quad U_{\max} = \begin{bmatrix} u_{\max} \\ u_{\max} \\ \vdots \\ u_{\max} \end{bmatrix}, \quad (4.28)$$

и

$$b_l = \begin{bmatrix} \Delta u_{\min} + u_{-1} \\ \Delta u_{\min} \\ \vdots \\ \Delta u_{\min} \end{bmatrix}, \quad b_u = \begin{bmatrix} \Delta u_{\max} + u_{-1} \\ \Delta u_{\max} \\ \vdots \\ \Delta u_{\max} \end{bmatrix}. \quad (4.29)$$

В модели прогнозирующего контроллера выполнен в процессе только первый вектор, u_0^* , из U^* :

$$U^* = \left[(u_0^*)' (u_1^*)' \dots (u_{N-1}^*)' \right]', \quad (4.30)$$

В процессе следующей выборки вследствие нового измерения оптимизация повторяется с новой информацией без обратной связи.

4.1.4 Простой модуль оценки

Благодаря КИХ-модели, имеющей различные переменные, получают терминальное управление при отсутствии смещения в случае, когда проявляются неопознанные реакции на возмущения (переходные характеристики), за счет добавления интеграторов в контур обратной связи. Сделаем предположение о том, что входы и выходы находятся в таком отношении:

$$\Delta y_k = \Delta z_k = e_k + \sum_{i=1}^n H_i \Delta u_{k-i}, \quad (4.31)$$

где Δ - обратный разностный оператор, т. е. $\Delta y_k = y_k - y_{k-1}$, $\Delta z_k = z_k - z_{k-1}$ и $\Delta u_k = u_k - u_{k-1}$.

Это представление идентично для модели КИХ:

$$y_k = z_k = \hat{b}_k + \sum_{i=1}^n H_i u_{k-i}, \quad (4.32)$$

если $\hat{b}_k$ вычисляется:

$$e_k = \Delta y_k - \sum_{i=1}^n H_i \Delta u_{k-i}, \quad (4.33)$$

$$\hat{b}_k = \hat{b}_{k-1} + e_k. \quad (4.34)$$

В задаче оптимизации регулятора $b_1 = b_2 = \dots = b_N = \hat{b}_k$ для каждого момента времени. Основанием для этого служит предположение о том, что в процессе обнаруживаются помехи - постоянные возмущения на выходе. Понятно, что помехи таким образом не возникают в реальной практике, так как есть вероятность существенного ухудшения рабочих характеристик из-за такого представления.

4.1.5 Определение задачи для расчета нелинейного программирования оценочного модуля

Проблема оценки может быть сформулирована с учетом конечной импульсной характеристики модели (КИХ):

$$\hat{b}_k = \hat{b}_{k-1} + e_k, \quad (4.35)$$

$$z_k = b_k + \sum_{i=0}^n H_i u_{k-i} + \sum_{i=1}^n H_i d_{k-i}, \quad (4.36)$$

где $\{H_i\}_{i=1}^n$ – коэффициенты импульсной характеристики (Марковские параметры), образующие смещения оценочного модуля.

С помощью передаточной функции модели, проблему модуля оценки можно сформулировать:

$$\min_{\{z,u\}} \phi = \frac{1}{2} \sum_{k=0}^{N-1} \| \text{Ind}(z_{k+1}) - \text{Ind}^{zd}(r_{k+1}) \|_{Q_z}^2 + \| \Delta u_k \|_s^2 \quad (4.37)$$

$$z_k = \bar{b}_k + \sum_{i=0}^n H_{d,i} d_{k-i}, \quad (4.38)$$

$$d_{\min} \leq d_k \leq d_{\max}, \quad (4.39)$$

$$\Delta d_{\min} \leq \Delta d_k \leq \Delta d_{\max}, \quad (4.40)$$

$$\bar{b}_k = b_k + \sum_{i=1}^n H_{u,i} u_{k-i}. \quad (4.41)$$

Предполагается, что $\{d_i\}_{i=-1}^{-n}$ значения возмущения, рассчитанные на предыдущих этапах, и реальным решением переменных в 4.37 являются $\{d_i\}_{k=0}^{N_e}$. Переменные решения, как правило, разделены на медленноменяющиеся компоненты (уровня), d_k , и быстроменяющиеся компоненты (процесса шума), w_k , ограничения будут иметь следующее толкование:

$$d_k = \begin{bmatrix} \bar{d}_k \\ w_k \end{bmatrix}, \quad d_{\min} = \begin{bmatrix} \bar{d}_{\min} \\ w_{\min} \end{bmatrix}, \quad d_{\max} = \begin{bmatrix} \bar{d}_{\max} \\ w_{\max} \end{bmatrix}, \quad (4.42)$$

$$\Delta d_{\min} = \begin{bmatrix} \Delta \bar{d}_{\min} \\ \Delta w_{\min} \end{bmatrix}, \quad \Delta d_{\max} = \begin{bmatrix} \Delta \bar{d}_{\max} \\ \Delta w_{\max} \end{bmatrix}, \quad (4.43)$$

Обычно $\Delta w_{\min} = -\infty$, $\Delta w_{\max} = \infty$ и Δw_k не нарушают целевой функции, чтобы не ограничивать движения быстроменяющейся компоненты неизвестного возмущения. Однако размер w_k должен быть ограничен, в противном случае скорость движения медленно меняющейся компоненты выводит целевую функцию за границы. Следовательно, вес матриц S и R имеют структуру:

$$S = \begin{bmatrix} S_d & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (4.44)$$

$$R = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & R_w \end{bmatrix}, \quad (4.45)$$

Сформулируем квадратичную матрицу в стандартной форме, эквивалентную уравнению (4.37). Это делается путем ликвидации выходов, из задачи оптимизации (уравнение 4.37).

Определяем векторы Z , R , U , как:

$$Z = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \vdots \\ z_N \end{bmatrix}, \quad R = \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \\ \vdots \\ r_N \end{bmatrix}, \quad U = \begin{bmatrix} u_0 \\ u_1 \\ \vdots \\ u_{N-1} \end{bmatrix} \quad (4.46)$$

Таким образом прогнозы по модели импульсной характеристики выражаются как:

$$Z = c + \Gamma U, \quad (4.47)$$

В случае $N = 6$ и $n = 3$, Γ будет собираться как:

$$\Gamma = \begin{bmatrix} H_{d,0} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ H_{d,1} & H_{d,0} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ H_{d,2} & H_{d,1} & H_{d,0} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ H_{d,3} & H_{d,2} & H_{d,1} & H_{d,0} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & H_{d,3} & H_{d,2} & H_{d,1} & H_{d,0} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & H_{d,3} & H_{d,2} & H_{d,1} & H_{d,0} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & H_{d,3} & H_{d,2} & H_{d,1} & H_{d,0} \end{bmatrix}, \quad (4.48)$$

и с будет собираться как:

$$c = \begin{bmatrix} c_0 \\ c_1 \\ c_2 \\ c_3 \\ c_4 \\ c_5 \\ c_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{b}_0 + \sum_{i=1}^3 H_{u,i} u_{0-i} + \sum_{i=1}^3 H_{d,i} d_{0-i} \\ \bar{b}_1 + \sum_{i=1}^3 H_{u,i} u_{1-i} + \sum_{i=1}^3 H_{d,i} d_{1-i} \\ \bar{b}_2 + \sum_{i=1}^3 H_{u,i} u_{2-i} + \sum_{i=1}^3 H_{d,i} d_{2-i} \\ \bar{b}_3 + \sum_{i=1}^3 H_{u,i} u_{3-i} \\ \bar{b}_4 + \sum_{i=1}^3 H_{u,i} u_{4-i} \\ \bar{b}_5 + \sum_{i=1}^3 H_{u,i} u_{5-i} \\ \bar{b}_6 + \sum_{i=1}^3 H_{u,i} u_{6-i} \end{bmatrix}. \quad (4.49)$$

Также в случае $N = 6$, определяем матрицы Λ и I_0 :

$$\Lambda = \begin{bmatrix} I & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -I & I & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -I & I & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -I & I & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -I & I & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -I & I \end{bmatrix} I_0 = \begin{bmatrix} I \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (4.50)$$

и

$$Q_z = \begin{bmatrix} Q_z & & & \\ & Q_z & & \\ & & \ddots & \\ & & & Q_z \end{bmatrix} S = \begin{bmatrix} S & & & \\ & S & & \\ & & \ddots & \\ & & & S \end{bmatrix}, \quad (4.51)$$

Целевую функцию для уравнения выразим как:

$$\begin{aligned}
\phi &= \frac{1}{2} \sum_{k=0}^{N-1} \|\text{Ind}(z_{k+1}) - \text{Ind}(r_{k+1})\|_{Q_z}^2 + \|\Delta d_k\|_S^2 + \|d_k\|_R^S \\
&= \frac{1}{2} \|\text{Ind}(Z) - \text{Ind}(Y)\|_{Q_z}^2 + \frac{1}{2} \|\Lambda D - I_0 d_{-1}\|_S^2 + \frac{1}{2} \|D\|_R^2 \\
&= \frac{1}{2} \|\text{Ind}(c + \Gamma D) - \text{Ind}(Y)\|_{Q_z}^2 + \frac{1}{2} \|\Lambda D - I_0 d_{-1}\|_S^2 + \frac{1}{2} \|D\|_R^2 \\
&= \frac{1}{2} D'(\Gamma' Q_z \Gamma + \Lambda' S \Lambda + R) D \\
&\quad + (\Gamma' Q_z (c - Y) - \Lambda' S I_0 d_{-1})' D \\
&\quad + \left(\frac{1}{2} \|c - Y\|_{Q_z}^2 + \frac{1}{2} \|I_0 d_{-1}\|_S^2 \right) \\
&= \frac{1}{2} D' H D + g' D + \rho
\end{aligned} \tag{4.52}$$

$$H = \Gamma' Q_z \Gamma + \Lambda' S \Lambda + R, \tag{4.53}$$

$$g = \Gamma' Q_z (c - Y) - \Lambda' S I_0 d_{-1}, \tag{4.54}$$

$$\rho = \frac{1}{2} \|c - Y\|_{Q_z}^2 + \frac{1}{2} \|d_{-1}\|_S^2, \tag{4.55}$$

Следовательно, задача построения оценочного модуля на базе КИХ решается за счет разрешения следующей задачи выпуклого квадратичного программирования:

$$\min_D \psi = \frac{1}{2} D' H D + g' D, \tag{4.56}$$

$$D_{\min} \leq D \leq D_{\max}, \tag{4.57}$$

$$b_i \leq \Lambda D \leq b_u, \tag{4.58}$$

$$D_{\min} = \begin{bmatrix} d_{\min} \\ d_{\min} \\ \vdots \\ d_{\min} \end{bmatrix}, \quad D_{\max} = \begin{bmatrix} d_{\max} \\ d_{\max} \\ \vdots \\ d_{\max} \end{bmatrix}, \tag{4.59}$$

$$b_i = \begin{bmatrix} \Delta d_{\min} + d_{-1} \\ \Delta d_{\min} \\ \vdots \\ \Delta d_{\min} \end{bmatrix}, \quad b_u = \begin{bmatrix} \Delta d_{\max} + d_{-1} \\ \Delta d_{\max} \\ \vdots \\ \Delta d_{\max} \end{bmatrix}, \tag{4.60}$$

4.2 Управление с прогнозирующими моделями при мягких ограничениях

Чтобы настроить и улучшить производительность линейной модели прогнозирующего управления используют мягкие ограничения. В данном разделе исследуется воздействие некорректных значений на общую производительность прогнозирующего регуляризованного контроллера модели, который имеет ограничения входа, скорости входа и мягкие ограничения на выходе.

В следствие того, что оценочный модуль при смещающемся горизонте сложен для расчета, и по причине необходимости решения алгоритма для задачи регулирования и анализа параллельно, оценочный модуль, который используется в данном исследовании, является простым.

В нашем случае целевая функция УПМ аналогична функции УПМ на базе КИХ, за исключением вхождения в ее состав линейных и квадратичных весов на мягкие ограничения на выход, в отличие от целевых функций нормального отклонения и исполнительного механизма, включающих ссылочный параметр:

$$\min_{\{z,u\}} \phi = \frac{1}{2} \sum_{k=0}^{N-1} \| \text{Ind}(z_{k+1}) - \text{Ind}^{zd}(r_{k+1}) \|_{Q_z}^2 + \| \Delta u_k \|_s^2 \quad (4.61)$$

При ограничениях:

$$z_k = b_k + \sum_{i=1}^n H_i u_{k-i}, \quad k = 1, \dots, N, \quad (4.62)$$

$$u_{\min} \leq u_k \leq u_{\max}, \quad k = 0, \dots, N-1, \quad (4.63)$$

$$\Delta u_{\min} \leq \Delta u_k \leq \Delta u_{\max}, \quad k = 0, \dots, N-1, \quad (4.64)$$

$$z_k \leq z_{\max} + \eta_k, \quad k = 1, \dots, N, \quad (4.65)$$

$$z_k \geq z_{\min} - \eta_k, \quad k = 1, \dots, N, \quad (4.66)$$

$$\eta_k \geq 0, \quad k = 1, \dots, N, \quad (4.67)$$

где $\Delta u_k = u_k - u_{k-1}$ и η_k – нежесткость мягких ограничений по ссылочной переменной, S_n и s'_η – веса на фиктивные переменные [180].

4.2.1 Определение задачи нелинейного программирования для расчета управления с прогнозирующими моделями с мягкими ограничениями

Определяем векторы Z, R, U как:

$$Z = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \vdots \\ z_N \end{bmatrix}, \quad R = \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \\ \vdots \\ r_N \end{bmatrix}, \quad U = \begin{bmatrix} u_0 \\ u_1 \\ \vdots \\ u_{N-1} \end{bmatrix}, \quad (4.68)$$

Тогда прогнозирование по модели импульсной характеристики можно выразить, как:

$$Z = c + \Gamma U, \quad (4.69)$$

Для случая $N = 6$ и $n = 3$, Γ собирается как:

$$\Gamma = \begin{bmatrix} H_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ H_2 & H_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ H_3 & H_2 & H_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & H_3 & H_2 & H_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & H_3 & H_2 & H_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & H_3 & H_2 & H_1 \end{bmatrix}, \quad (4.70)$$

а c как:

$$c = \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \\ c_4 \\ c_5 \\ c_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 + (H_2 u_{-1} + H_3 u_{-2}) \\ b_2 + (H_3 u_{-2}) \\ b_3 \\ b_4 \\ b_5 \\ b_6 \end{bmatrix}, \quad (4.71)$$

Аналогично, для случая $N = 6$, определим матрицы Λ и I_0 :

$$\Lambda = \begin{bmatrix} I & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -I & I & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -I & I & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -I & I & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -I & I & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -I & I \end{bmatrix} I_0 = \begin{bmatrix} I \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (4.72)$$

Определяем $s_\eta = \left[s_{\eta 1}' s_{\eta 2}' \dots s_{\eta N}' \right]'$ и

$$Q_z = \begin{bmatrix} Q_z & & & \\ & Q_z & & \\ & & \ddots & \\ & & & Q_z \end{bmatrix} S_i = \begin{bmatrix} S_i & & & \\ & S_i & & \\ & & \ddots & \\ & & & S_i \end{bmatrix} \quad (4.73)$$

при $i = \{u, \eta\}$. Тогда в уравнении целевую функцию выразим как:

$$\begin{aligned}
\phi &= \frac{1}{2} \sum_{k=0}^{N-1} \|z_{k+1} - r_{k+1}\|_{Q_z}^2 + \|\Delta u_k\|_S^2 + \frac{1}{2} \|\eta_{k+1}\|_{S_\eta}^2 \\
&= \frac{1}{2} \|Z - R\|_{Q_z}^2 + \frac{1}{2} \|\Lambda U - I_0 u_{-1}\|_S^2 + \frac{1}{2} \|\eta\|_{S_\eta}^2 + s'_\eta \eta \\
&= \frac{1}{2} \|c + \Gamma U - R\|_{Q_z}^2 + \frac{1}{2} \|\Lambda U - I_0 u_{-1}\|_S^2 + \frac{1}{2} \|\eta\|_{S_\eta}^2 + s'_\eta \eta \\
&= \frac{1}{2} U'(\Gamma' Q_z \Gamma + \Lambda' S \Lambda) U + (\Gamma' Q_z (c - R) - \Lambda' S I_0 u_{-1})' U \\
&\quad + \left(\frac{1}{2} \|c - R\|_{Q_z}^2 + \frac{1}{2} \|I_0 u_{-1}\|_S^2 \right) + \frac{1}{2} \eta' S_\eta \eta + s'_\eta \eta \\
&= \frac{1}{2} U' H U + g' U + \rho + \frac{1}{2} \eta' S_\eta \eta + s'_\eta \eta \\
&= \frac{1}{2} x' \bar{H} x + \bar{g}' x + \rho
\end{aligned} \tag{4.74}$$

где:

$$H = \Gamma' Q_z \Gamma + \Lambda' S \Lambda, \tag{4.75}$$

$$g = \Gamma' Q_z (c - R) - \Lambda' S I_0 u_{-1}, \tag{4.76}$$

$$\rho = \frac{1}{2} \|c - R\|_{Q_z}^2 + \frac{1}{2} \|u_{-1}\|_S^2, \tag{4.77}$$

$$x = \begin{bmatrix} U \\ \eta \end{bmatrix}, \tag{4.78}$$

$$\bar{H} = \begin{bmatrix} H & 0 \\ 0 & S_\eta \end{bmatrix}, \tag{4.79}$$

$$\bar{g} = \begin{bmatrix} g \\ s_\eta \end{bmatrix}. \tag{4.80}$$

Таким образом, мы можем решить задачу УПМ на базе КИХ решением задачи выпуклого квадратичного программирования

$$\min_U \psi = \frac{1}{2} x' \bar{H} x + \bar{g}' x, \tag{4.81}$$

$$x_{\min} \leq x \leq x_{\max}, \tag{4.82}$$

$$b_l \leq \bar{A} x \leq b_u. \tag{4.83}$$

В котором:

$$A = \begin{bmatrix} \Lambda & 0 \\ \Gamma & -I \\ \Gamma & I \end{bmatrix}, \quad (4.84)$$

$$x_{\min} = \begin{bmatrix} U_{\min} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad x_{\max} = \begin{bmatrix} U_{\max} \\ \infty \end{bmatrix}, \quad (4.85)$$

где:

$$U_{\min} = \begin{bmatrix} u_{\min} \\ u_{\min} \\ \vdots \\ u_{\min} \end{bmatrix}, \quad U_{\max} = \begin{bmatrix} u_{\max} \\ u_{\max} \\ \vdots \\ u_{\max} \end{bmatrix}, \quad (4.86)$$

и

$$b_l = \begin{bmatrix} \Delta U_{\min} \\ -\infty \\ Z_{\min} - c \end{bmatrix}, \quad b_u = \begin{bmatrix} U_{\max} \\ Z_{\max} - c \\ \infty \end{bmatrix}, \quad (4.87)$$

В модели прогнозирующего контроллера на первом векторе u_0^* из $U^* = \left[(u_0^*)' (u_1^*)' \dots (u_{N-1}^*)' \right]'$ осуществляется процедура оптимизации. В следующий момент выборки, оптимизация без обратной связи повторяется с новой информацией в связи с новым измерением.

4.2.2 Выбор мягких ограничений

Мягкие ограничения на выход, учитываемые регулятором, – это ограничение или область вокруг эталонной цели управляемой переменной. Производительность УПМ определяется на основании выбора ограничений вокруг эталонной цели. Слишком широкое ограничение может привести к замедлению работы регулятора и даже к отклонению от установившегося состояния. Выбор мягких ограничений очень близких к эталонным может

сделать поведение регулятора традиционным и снизит его робастность. На рисунке 4.4 представлен метод выбора мягких ограничений

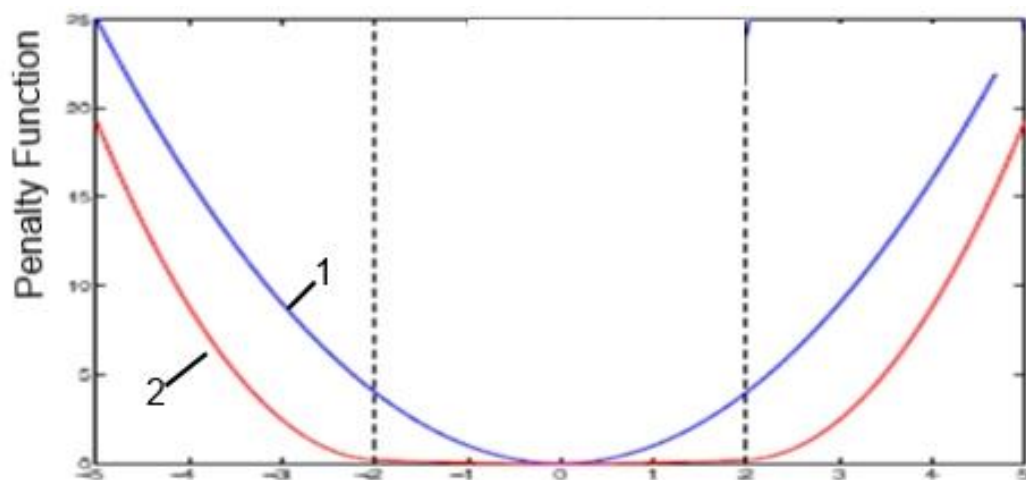


Рисунок 4.4 - Выбор мягких ограничений

На рисунке показана основная ступенчатая функция стоимости ℓ_2 -управление с прогнозирующими моделями (1) (традиционная УПМ) и ℓ_2 упреждающее управление с мягкими ограничениями (2). Ступенчатая функция стоимости, или штрафная функция, графически изображена как функция ошибки заданного значения.

4.3 Алгоритм использования метода с применением внутренних точек

Метод внутренних точек используется для решения задач оптимизации линейного и нелинейного выпуклого видов [180]. Алгоритмы метода внутренних точек были разработаны для линейного программирования. Основные элементы метода заключаются в барьерной функции, используемой для кодирования выпуклого множества. Симплексный метод, достигает оптимального решения путем обхода внутри области допустимых значений. Алгоритм метода внутренних точек, использующийся для решения задач линейного квадратичного программирования, приведен ниже.

Задача поиска оптимального решения может быть сформулирована как:

$$\min_{x \in R^n} g'x, \quad (4.88)$$

таких, что:

$$Ax = b, \quad (4.89)$$

$$x \geq 0. \quad (4.90)$$

Функция Лагранжа может быть представлена в виде:

$$L(x, \mu, \lambda) = g'x - \mu'(Ax - b) - \lambda'x. \quad (4.91)$$

Условия оптимальности:

$$\nabla_x L(x, \mu, \lambda) = g - A'\mu - \lambda = 0, \quad (4.92)$$

$$Ax = b, \quad (4.93)$$

$$x \geq 0, \quad (4.94)$$

$$\lambda \geq 0, \quad (4.95)$$

$$x_i \lambda_i = 0, \quad i = 1, 2, \dots, mc, \quad (4.96)$$

Они могут быть выражены как:

$$r_L = \nabla_x L = g - A'\mu - \lambda = 0, \quad (4.97)$$

$$r_A = Ax - b = 0, \quad (4.98)$$

$$X \Lambda e = 0, \quad (4.99)$$

$$x \geq 0, \quad (4.100)$$

$$\lambda \geq 0. \quad (4.101)$$

Таким образом, условия оптимальности в матричной форме:

$$F(x, \mu, \lambda) = \begin{bmatrix} g - A'\mu - \lambda \\ Ax - b \\ X\Lambda e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = 0 \quad (4.102)$$

Эти условия, таким образом, может быть решены с помощью метода Ньютона после формирования матрицы, как показано ниже:

$$F(x, \mu, \lambda) = \begin{bmatrix} 0 & -A' & -I \\ A & 0 & 0 \\ \Lambda & 0 & X \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta \mu \\ \Delta \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_L \\ r_A \\ r_C \end{bmatrix} \quad (4.102)$$

$$x \geq 0, \lambda \geq 0. \quad (4.103)$$

Где:

$$\begin{bmatrix} x \\ \mu \\ \lambda \end{bmatrix} \leftarrow \begin{bmatrix} x \\ \mu \\ \lambda \end{bmatrix} + \alpha \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta \mu \\ \Delta \lambda \end{bmatrix}. \quad (4.104)$$

Для решения матрицы выше мы сначала должны определить аффинное направления $(\Delta x^{aff}, \Delta \mu^{aff}, \Delta \lambda^{aff})^T$, решая:

$$\begin{bmatrix} 0 & -A' & -I \\ A & 0 & 0 \\ \Lambda & 0 & X \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x^{aff} \\ \Delta \mu^{aff} \\ \Delta \lambda^{aff} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} g - A'\mu - \lambda \\ Ax - b \\ X\Lambda e \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} r_L \\ r_A \\ r_C \end{bmatrix}. \quad (4.105)$$

Затем мы должны найти наибольший шаг α^{aff} и β^{aff} такие, что:

$$x + \alpha^{ff} \Delta x^{aff} \geq 0, \quad (4.106)$$

$$\lambda + \beta^{aff} \Delta \lambda^{aff} \geq 0. \quad (4.107)$$

Вычислить аффинное выражение:

$$s^{aff} = \left(x + \alpha^{ff} \Delta x^{aff} \right)' \left(\lambda + \beta^{aff} \Delta \lambda^{aff} \right) / n, \quad (4.108)$$

где n -размерность x .

Таким образом, для центрального шага, мы должны ввести двойственность меры:

$$s = \frac{x' \lambda}{n}, \quad (4.109)$$

параметр центрирования:

$$\sigma = \left(s^{aff} / s \right)^3. \quad (4.110)$$

Решим окончательное уравнение после его улучшения с помощью корректора шага и вычислим параметр центрирования как:

$$\begin{bmatrix} 0 & -A' & -I \\ A & 0 & 0 \\ \Lambda & 0 & X \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta \mu \\ \Delta \lambda \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} r_L \\ r_A \\ r_C + \Delta X^{aff} \Delta \Lambda^{aff} e - \sigma s e \end{bmatrix}. \quad (4.111)$$

Далее мы вычисляем по величине длины шага α и β , таких, что:

$$x + \alpha \Delta x \geq 0, \quad (4.112)$$

$$\lambda + \beta \Delta \lambda \geq 0, \quad (4.113)$$

и обновление x , и

$$\begin{bmatrix} x \\ \mu \\ \lambda \end{bmatrix} \leftarrow \begin{bmatrix} x + \eta \alpha \Delta x \\ \mu + \eta \beta \Delta \mu \\ \lambda + \eta \beta \Delta \lambda \end{bmatrix}. \quad (4.114)$$

Таким образом, за счет улучшения корректорного шага и вычисления параметра центрирования получается общий шаг для следующей итерации.

Приведем, предиктор-корректорный алгоритм:

1. Вычислить (x_0, μ_0, λ_0) для $\kappa = 0, 1, 2, \dots$
2. Установить $(x, \mu, \lambda) = (x_\kappa, \mu_\kappa, \lambda_\kappa)$ и решить (4.105) для $(\Delta x^{aff}, \Delta \mu^{aff}, \Delta \lambda^{aff})$;
3. Вычислить $\hat{\alpha}^{aff}$ и, $\hat{\beta}^{aff}$ как в (4.106 и 4.107);
4. Рассчитать $s^{aff} = (x + \alpha^{aff} \Delta x^{aff})^T (\lambda + \beta^{aff} \Delta \lambda^{aff}) / n$;
5. Установить параметр центрирования $\sigma = (s^{aff} / s)^3$;
6. Вычислить (4.108) для $(\Delta x, \Delta \mu, \Delta \lambda)$;
7. Рассчитать $\hat{\alpha}_{aff}$ and $\hat{\beta}_{aff}$, как в (4.112 и 4.113);
8. Установить $(x_{\kappa+1}) = (x_\kappa) + \hat{\alpha}(\Delta x)$;
9. Установить $(\mu_{\kappa+1}, \lambda_{\kappa+1}) = (\mu_\kappa, \lambda_\kappa) + \hat{\beta}(\Delta \mu, \Delta \lambda)$;
10. Конец.

Схема алгоритма представлена на рисунке 4.5.

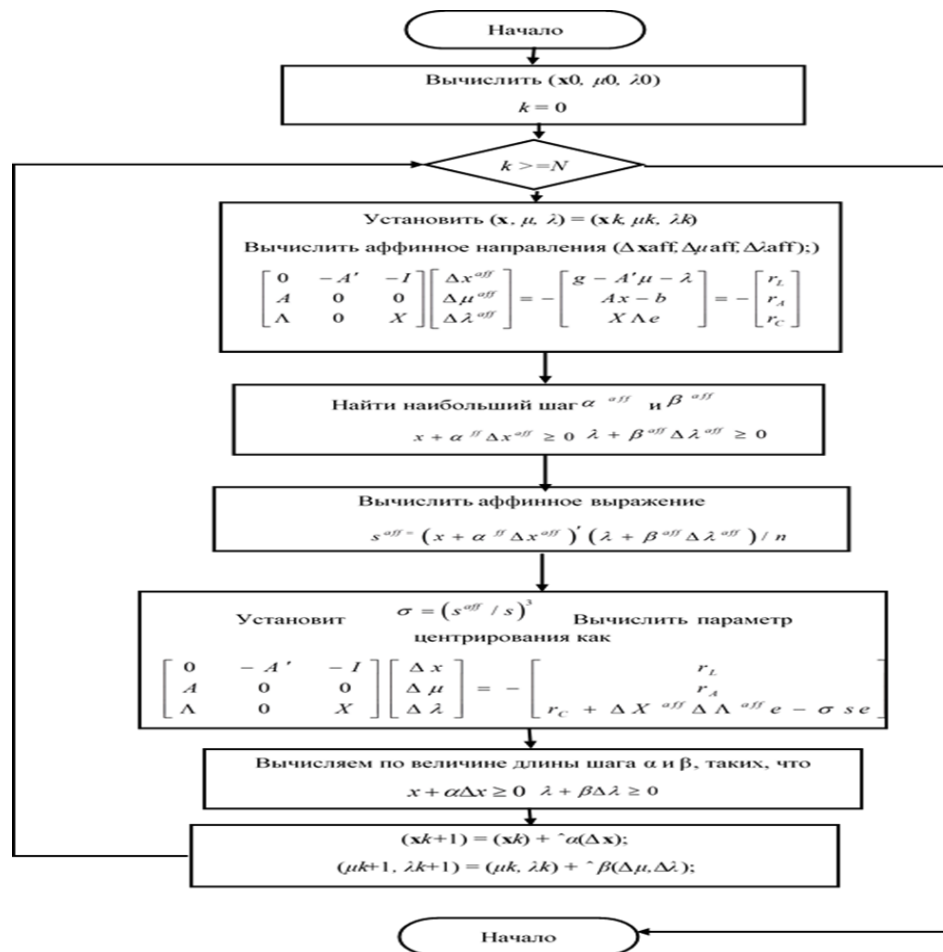


Рисунок 4.5 - Предиктор-корректорный алгоритм квадратичной программы

4.4 Применение УПМ с режимом мягких ограничений для технологического процесса измельчения

Моделирование схемы измельчения предполагает моделирование связей нескольких входных и выходных параметров, а также обеспечение эффективного механизма управления, подразумевающего разработку нового контроллера. В этом заключается задача системы.

В данной работе рассмотрим конкретные параметры на вход и на выход: скорость подачи сырья и степень открытия водяного клапана - входные переменные; тонкость помола по Блейну и плотность слива с гидроциклона №7-выходные переменные. Два последних коэффициента максимально влияют на процесс. Такая система (MIMO) - система, которая имеет множественные входы и выходы. Для нормальной модели УПМ, равно как и для модели с

прогнозирующим управлением, использующей мягкие ограничения, для схемы измельчения руды предназначен данный контроллер. Контроллер введен в схему измельчения с помощью модели технологического процесса. Для прогнозирующего контроллера при выходе определены мягкие ограничения, обеспечивающие ошибкоустойчивость и надежность в случае несовпадения параметров «технологическая установка – модель». Такими ограничениями называют границы вокруг области контрольной точки, в которых ошибки, находясь в зоне нечувствительности, т.е. в области мягких ограничений, имеют минимальное значение, а во время выхода ошибки за границы этой зоны имеют максимальное значение. Тестирование контроллера осуществляется с помощью MATLAB-модели технологического процесса измельчения, для которого была разработана модель, описывающая отношения баланса масс. Контроллер разработан для проектирования, расчета и моделирования УПМ с мягкими ограничениями, используя КИХ.

Функция шума УПМ применяется для измерения шума процесса.

Функция замкнутого моделирования разработана для проверки работы системы с обратной связью.

Модель прогнозирующего контроллера с мягкими ограничениями используется для регулирования схемы измельчения руды. Неточности этой модели обусловлены неоднородностью загружаемого материала, а также вариантами эксплуатации [169,182].

4.5 Состав регулятора

Алгоритм работы регулятора, созданный в MATLAB, следующий:

- определены параметры моделирования, а именно, коэффициент усиления системы; постоянные времени; ноль системы; временное запаздывание системы; время выборки; горизонт моделирования;
- разработана модель процесса измельчения на основе передаточной функции, связывающая управляемые и регулируемые переменные на основании испытания при ступенчатом изменении нагрузок в симуляторе;

- использованы нормальные функции УПМ для обеспечения вычисления управляющей последовательности с помощью УПМ без учета ограничений;
- определены входные параметры управления системы, возмущения в системе, выходные параметры системы, включая стохастические шумы, а также шумы при измерении и шумы процесса;
- определена функция УПМ с мягкими ограничениями для вычисления управляющей последовательности, а также параметры, указанные выше для нормальной УПМ, дополнительные параметры, например, квадратичный весовой функционал на мягких пределах и линейный весовой функционал на мягких пределах для УПМ с мягкими ограничениями.

Система также включает:

- функцию моделирования с обратной связью;
- генератор для получения коэффициентов импульсной характеристики;
- функцию генератора для вычисления шума и возмущения в процессе.

4.6 Технологический процесс измельчения как объект управления

Рассмотрим технологический процесс измельчения, имеющим замкнутый цикл с позиции управления.

Рассматриваемый объект управления имеет такие входные параметры, как:

- производительность магистрального насоса-питателя $Q_{сырья}$;
- гранулометрическая характеристика исходного сырья m_i^{ex}
- величина открытия клапана на воду в мельничный зумпф $Q_{воды}$.

С технологической позиции процесс измельчения с замкнутым циклом раскладывается на два взаимно связанных процесса: сам процесс по сокращению крупности материала (измельчение) и классификация этого измельченного продукта (разделение по крупности). Процесс сокращения крупности материала (измельчение) описывается такими переменными состояниями, как:

- запас промпродукта в мельнице M ;
- наполнение мельницы шарами (измельчающей средой) $\varphi_{ш}$;
- объем внутри мельницы V ;
- техническое состояние мельницы (оборудования) Z_M .

Внутренними переменными этого процесса являются:

- циркуляционная нагрузка на мельницу $Q_{песк}$;
- гранулометрическая характеристика циркуляционной нагрузки m_i^{6x} ;
- выход промпродукта мельницы $Q_{изм}$;
- гранулометрическая характеристика промпродукта $m_i^{изм*}$.

Техническое состояние оборудования (гидроциклоны и гидроциклонные насосы) $S_{кл}$ - это переменные состояния, описывающие процесс классификации измельченного материала.

Для данного технологического процесса существуют такие возмущающие воздействия, как:

- изменение гранулометрической Δm_i^{6x} и минералогической $\beta^{Ap+Bad+Other}$ характеристики исходного сырья;
- изменение технического состояния оборудования для классификации $\Delta Z_{кл}$
- технического состояния барабанной мельницы ΔZ_M .

Для объекта управления определены такие выходные параметры:

- производительность агрегата по готовому продукту измельчения $Q_{гом}$;
- гранулометрическая характеристика готового продукта измельчения $m_i^{гом*}$
- плотность продукта ρ .

Вектор управления всем технологическим процессом измельчения описывается такими воздействиями:

- изменение производительности магистрального насоса-питателя по исходному сырью $\Delta Q_{сырья}$;
- управление величиной открытия клапана на воду $\Delta Q_{воды}$.

Технологический процесс измельчения приведен на рисунке 4.6.

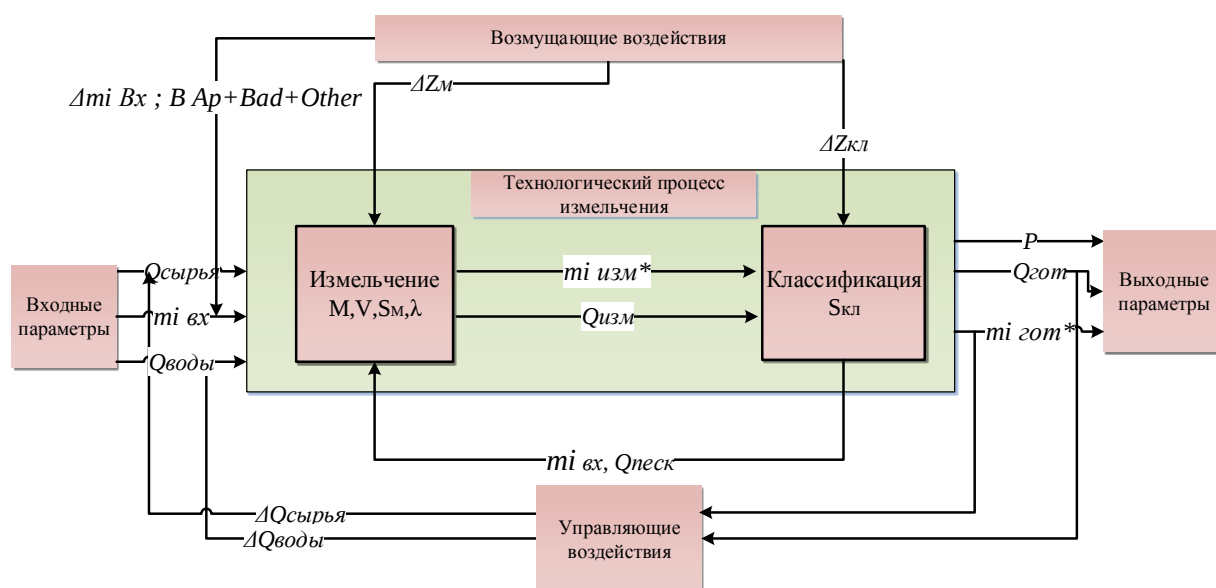


Рисунок 4.6 - Технологический процесс измельчения - объект управления

4.7 Алгоритм управления технологическим процессом измельчения

Ниже изображена блок-схема, иллюстрирующая алгоритм управления технологическим процессом измельчения.

Модель объекта управления осуществляет прогноз гранулометрического состава готового продукта измельчения, обращаясь к показаниям, полученным от технологических датчиков, таких как датчик производительности магистрального насоса-питателя мельницы, датчик определяющий крупность исходного сырья и к показаниям от экспресс-минералогического анализа. Технологические параметры, которые вычисляются по итогам прогноза УПМ: удельная производительность мельницы по определяющему классу крупности

$q=0.071$, коэффициент текущего качества процесса измельчения K и текущую шаровую загрузку мельницы - все эти величины поступают в модуль оценки (блок оценки текущего состояния процесса). Блок оценки состояния обеспечивает непрерывную оптимизацию качества программного управления, нацеленного на приближение регулируемых переменных прогнозируемой модели в направлении соответствующих задающих сигналов на горизонте прогноза. Весь спектр наложенных на регулируемые и управляющие переменные ограничений принимается во внимание во время процесса управления.

Задача оптимального управления состоит в нахождении такого управляющего воздействия из некоего заданного класса, с учетом допустимого множества U , которое обеспечит достижение цели, доставляя минимум функционалу.

Чтобы выбрать управляющий вектор нужно образовать множество альтернативных решений управления принимая во внимание:

- производительность магистрального насоса-питателя мельницы $Q_{сырья}$;
- величину открытия клапана на воду в мельничный зумпф $Q_{воды}$.

Рассматривается алгоритм выработки множества альтернативных решений. Предлагается использовать такие начальные значения как:

- производительность магистрального насоса-питателя $1400 \text{ м}^3/\text{час}$;
- величину открытия клапана на воду в мельничный зумпф $Q_{воды} 15 \%$;
- гранулометрическая характеристика готового продукта измельчения (максимальное количество определяющего класса -0.071 мм);
- циркуляционная нагрузка мельницы $< 200 \text{ т/ч}$.

Вводимые параметры УПМ – это заданные значения, r , для выводных параметров процесса, z , и измеренных выводных параметров процесса, y . Выводные параметры УПМ – управляемые переменные, u .

Рисунок 4.7 отображает УПМ, на базе которого находится итерационная операция по оптимизации с конечным интервалом модели технологического процесса. Данное состояние модели технологического процесса замеряется в каждую отдельную единицу времени t . Затем, посредством численного алгоритма минимизации рассчитывается стратегия управления по минимизации затрат для относительно малого предстоящего периода времени - периода управления n . Для этого применяется вычисление в режиме он-лайн для оценивания предполагаемой траектории за период прогнозирования (N), Формируется алгоритм управления для минимизации затрат на всем периоде управления. Таким образом, происходит первый шаг, после которой вновь фиксируется состояние установки. Вычисления проводятся заново, но для нынешнего зафиксированного состояния, что обуславливает обновленную траекторию управления и обновленную траекторию прогнозирующего состояния. Так как период времени прогнозирования безостановочно растет, такое управление носит название управление с удаляющимся (подвижным) горизонтом [148]. Регулятор при выходе использует прогнозирование, которое обращается к КИХ-модели. Для того, чтобы оценить неизвестное возмущение во время решения задачи оптимизации прибегают к использованию оценочной функции. Благодаря применению *SOPDT* на моделях, имеющих нулевую передаточную функцию, работа оценочной функции обеспечивается с измерением шума.

На следующем шаге рассчитывается передаточная функция, а также ограничения на вход и скорость входа. Затем, начинается настройка параметров, расчет ограничений прогнозной модели.

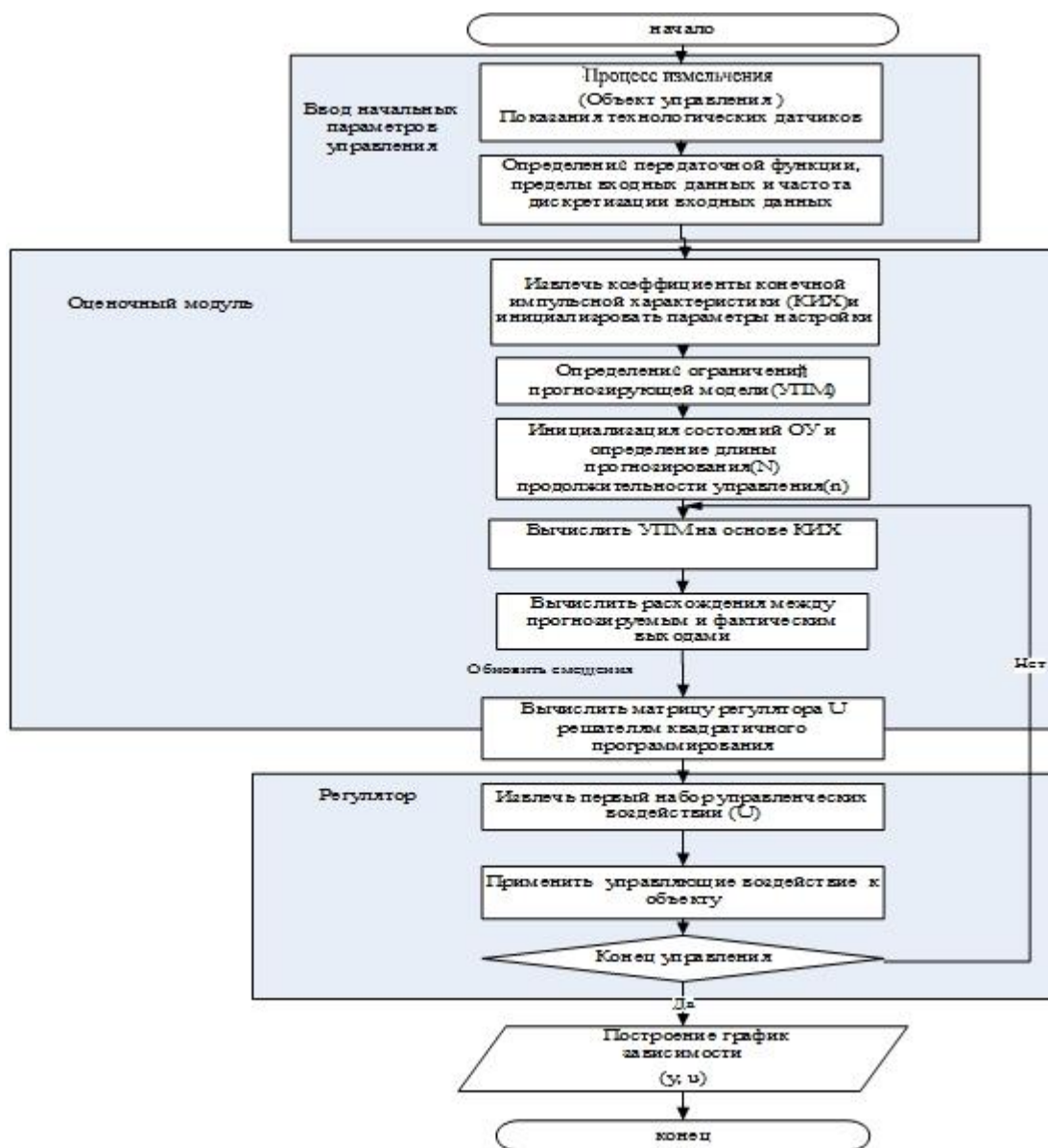


Рисунок 4.7 - Алгоритм управления технологическим процессом измельчения [169]

На следующем этапе необходимо установить режим начальной работы, определяя горизонты прогнозирования и управления.

По схеме, описанной выше определяем несколько технологических этапов:

1. Моделирование процесса измельчения.
2. Рассчитываем передаточную функцию ограничения при входе и скорости входа.

3. Отладка параметров и определение ограничений управлений с прогнозирующими моделями.

4. Устанавливаем первичный режим для работы с установкой и определяем горизонты управления и прогнозирования. Для этого в замкнутой системе осуществляется просчет контроллера модели прогнозирования и реализуется выборка регулируемых значений.

5. Фиксируем отклонение прогнозируемого значения величин от фактического значения этих же величин при выходе. Выбранные регулируемые значения подставляем в систему пространственного состояния линейного вида.

6. Переход к первому этапу цикла. Выкладки УПМ и повторение технологического процесса воспроизводятся до завершения всего моделирования.

После окончания моделирования, проводим расчет данных измеренных выходов и регулируемых переменных.

Рисунок 4.8 иллюстрирует алгоритм управления производительностью мельниц посредством регулировки производительности магистрального насоса-питателя на базе УПМ. Первый этап заключается в установке заданного значения производительности (желаемая траектория поведения объекта) и измерении текущей производительности мельницы. Следующий шаг реализует прогнозирование последующих величин производительности. Оценочный модуль (блок анализа состояния) производит улучшение программного управления, которое нацелено на сдвиг регулируемых значений модели прогноза в сторону соответствующих задающих сигналов на горизонте прогноза. Вопрос о регуляторе на базе КИХ разрешили задачей выпуклого квадратичного программирования (КП) через приведение целевой функции к ее стандартной форме. В то время, как квадратичное программирование разрешили благодаря использованию алгоритма на базе метода внутренней точки.

После вышеописанных действий выполняется оптимальное управление, которое было найдено, и затем измеряется фактическое состояние объекта в конце шага. Ряд действий повторяется после того, как горизонт прогноза переходит на шаг далее.

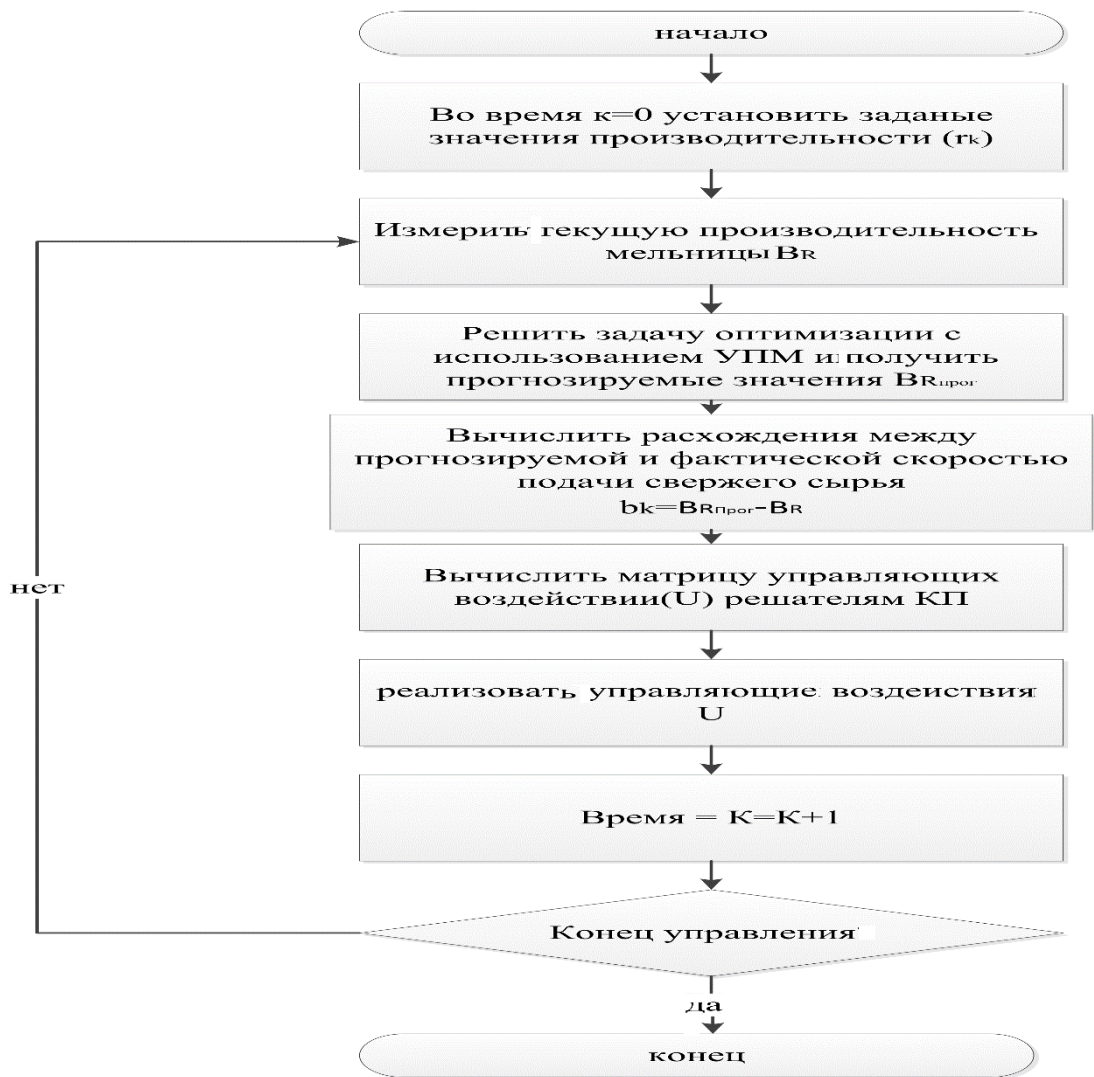


Рисунок 4.8 - Алгоритм управления производительностью технологического процесса

Управление гранулометрическими характеристиками готового продукта измельчения m_i^{som} осуществляется путем регулирования производительности магистрального насоса питателя Q_{ex} . В случае избыточной крупности продукта на сливе с гидроциклона m_i^{som} производительность магистрального насоса питателя снижают, чтобы не перегружать мельницу и обеспечить возможность

более тонкого измельчения. На базе метода УПМ (рисунок 4.9) устанавливается заданное значение желаемой траектории поведения объекта и измеряются текущие гранулометрические характеристики готового продукта измельчения. Блок оценки состояния (оценочный модуль) производит оптимизацию программного управления, нацеленного на сдвиг регулируемых переменных прогнозной модели в сторону соответствующих задающих сигналов на прогнозном горизонте. Вопрос о регуляторе на базе КИХ решаем, используя задачу выпуклого квадратичного программирования (КП) через приведение целевой функции к ее стандартной форме. Квадратичное программирование решили за счет использования алгоритма, основанном на методе внутренней точки [182]. Ряд действий заново воспроизводится после того, как горизонт прогноза переходит на шаг дальше.

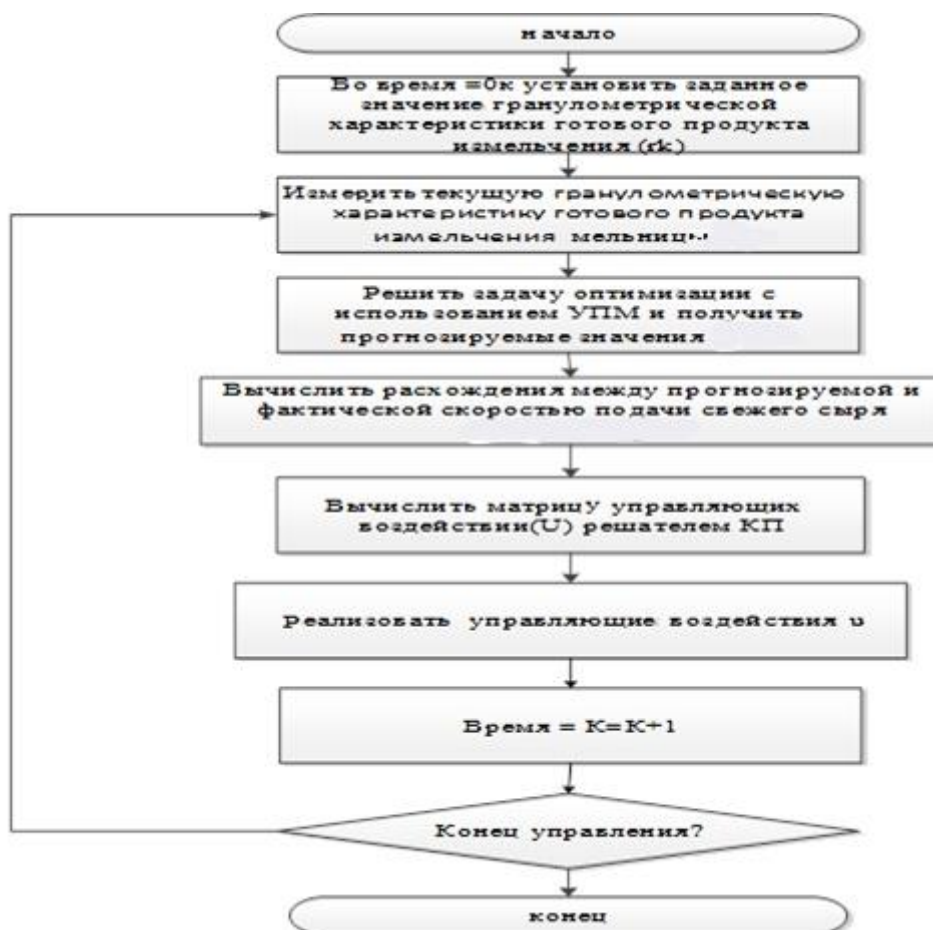


Рисунок 4.9 - Алгоритм управления процессом поддержания заданного гранулометрического состава

На рисунке 4.10 приводится функциональная схема системы автоматического управления процессом измельчения. Прибор измерения крупности выполняет измерение крупностного состава в режиме непрерывной выборки [149,182]. В данном случае основная стратегия управления гранулометрической характеристикой (по Блейну), производительностью агрегата мокрого измельчения и выходной плотностью слива гидроциклона №7 реализуется с помощью управления производительностью магистрального насоса-питателя и величиной открытия клапана на воду в мельничный зумпф №5.

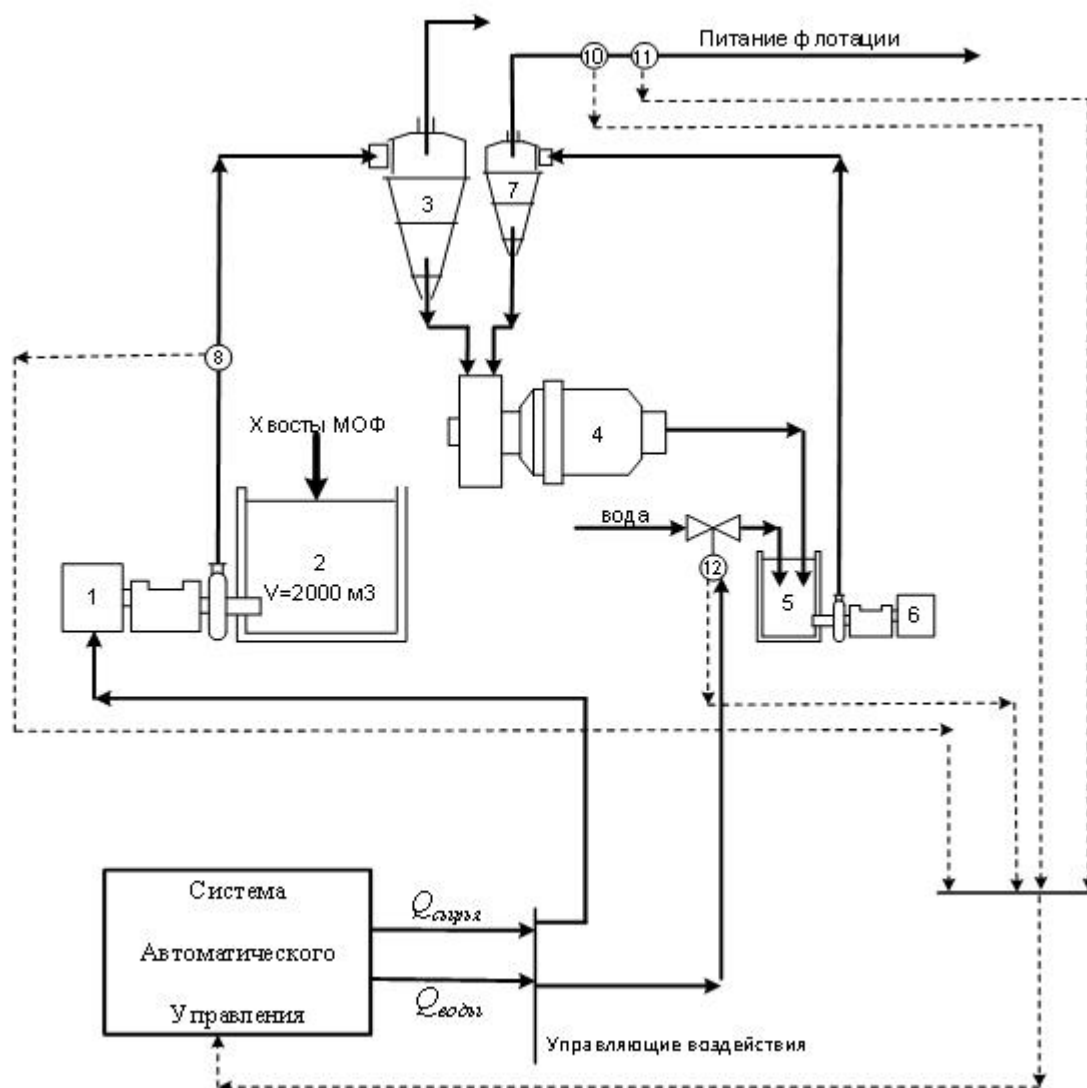


Рисунок 4.10 - Обобщённая функциональная структура алгоритма работы адаптивной системы управления технологическим процессом измельчения на основе УПМ

4.8 Моделирование двухуровневой системы автоматизации процесса измельчения на основе регулятора с предсказанием

В заключительном разделе рассматриваются модели системы управления процессом измельчения, как двух уровневой системы.

На нижнем уровне осуществляется регулирование технологическими параметрами контура мокрого измельчения. Верхний уровень управления формирует задание для нижнего уровня (согласно рис. 4.3).

Моделирование предлагаемой системы управления на основе управления с прогнозирующими моделями – (model predictive control), MPC – регулятора проводилось в системе Matlab|Simulink. Для моделирования использовались результаты работы, полученные во второй главе.

Модель мельницы по каналу «расход сырья – запас промпродукта в мельнице»: $W_M(p) = \frac{-0.81}{2.8p+1} \cdot e^{-2.4p}$.

Модель классифицирующего аппарата по каналу «расход воды – плотность слива»: $W_{\text{лц}}(p) = \frac{-0.7}{3.1p+1} \cdot e^{-3.2p}$.

Модель питателя по каналу «угловая скорость двигателя – производительность магистрального насоса-питателя»: $W_{\text{лц}}(p) = \frac{-1.5}{3p+1} \cdot e^{-2p}$

По результатам исследования ниже представлены графики, отражающие результаты проведенного эксперимента. На рисунке 4.11 показан отклик системы автоматического управления на возмущения по составу сырья. На рисунке 4.12 показан отклик системы автоматического управления на возмущения по плотности.

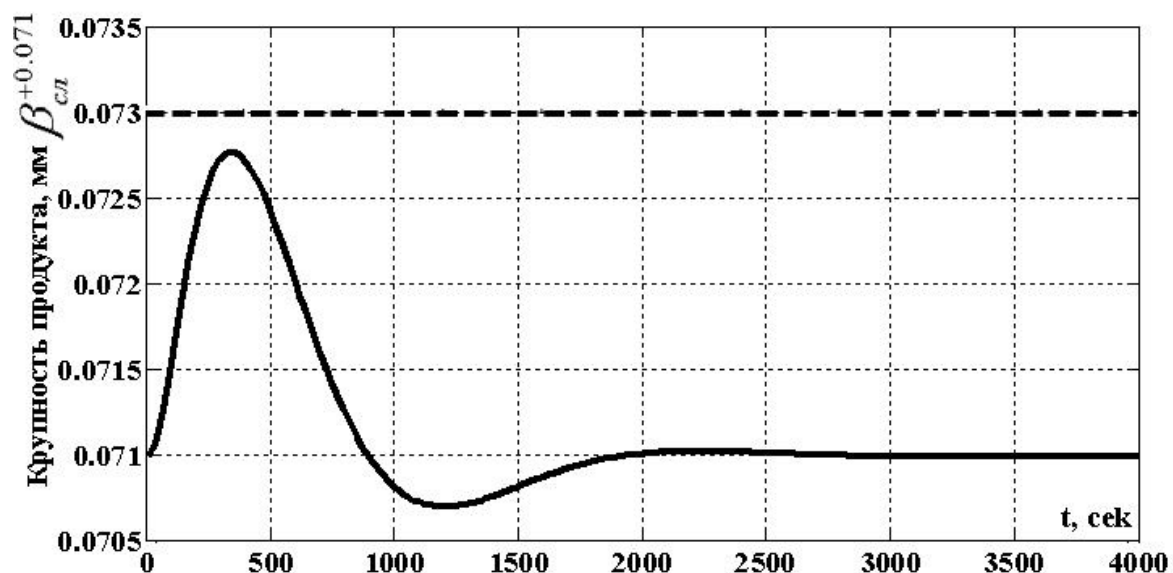


Рисунок 4.11 – Отклик системы автоматического управления на возмущение по составу сырья

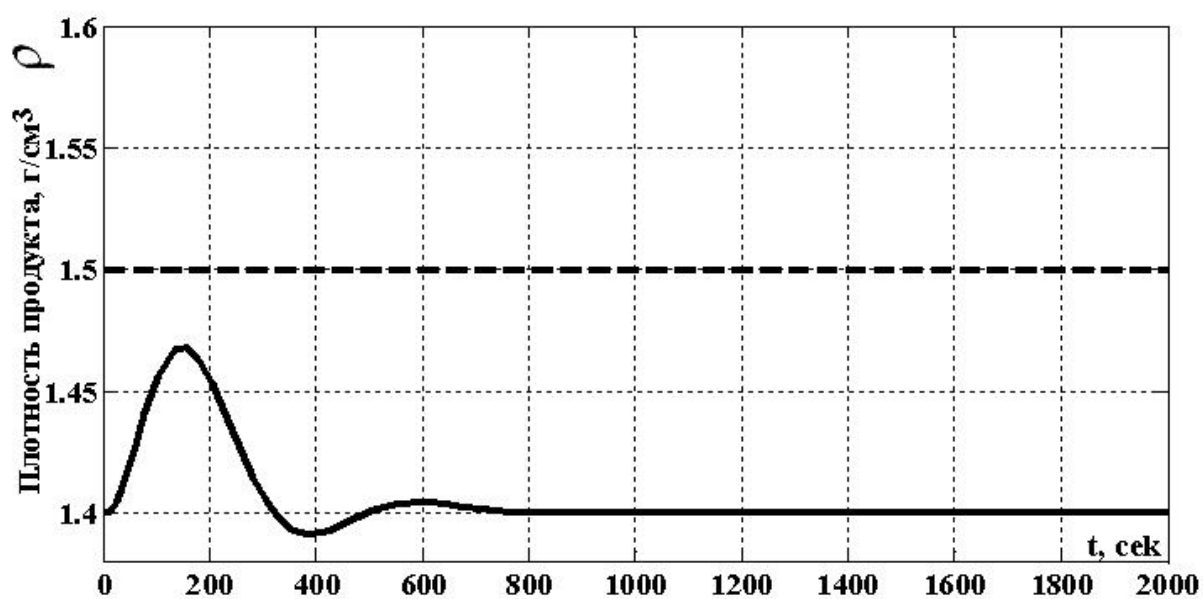


Рисунок 4.12 – Отклик системы автоматического управления на возмущение по плотности

Проведенные эксперименты показали устойчивость созданной системы автоматического управления, при этом динамическая ошибка регулирования не превысила 5%.

ВЫВОДЫ

Для создания системы автоматического управления технологическим процессом измельчения бадделеит-апатит-магнетитовых руд (БАМР), после стадии железорудного производства решены следующие задачи.

Рассмотрены закономерности измельчения руд и определены задачи моделирования технологического процесса измельчения, модель которого представлена в виде ячеечной модели, состоящей из каскада трех смесителей.

Рассмотрены подходы к экстраполяции коэффициентов разрушения и отбора на основе нейро-нечетких сетей и разработана система оценки параметров технологического процесса измельчения БАМР. Для решения этой задачи была применена сеть ANFIS. В результате была достигнута степень адекватности модели на уровне 5%.

Предложена методика, применяемая для целей управления, по критерию индекса оценки качества продукта измельчения и проведена апробация разработанной системы на примере управления процессом измельчения в шаровой барабанной мельнице.

Представлены результаты экспериментов в среде MatLab|Simulink по анализу динамической модели технологического процесса измельчения. Проведенные эксперименты показали устойчивость созданной системы автоматического управления, при этом динамическая ошибка регулирования не превысила 5%.

Используя данные результаты, можно повысить качество систем управления технологическими процессами измельчения, в результате чего добиться большего выхода готового товарного концентрата, при текущем уровне затрат.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

- На основании выполненного обзора современных методов управления замкнутой схемой измельчения были сформулированы цели и задачи исследования.
- Проанализированы математические модели, используемые в задачах моделирования технологических процессов.
- Разработана математическая модель технологического процесса измельчения и классификации с применением нейро-нечетких сетевых моделей.
- Разработана система оценки параметров технологического процесса измельчения, учитывающая минеральный состав сырья.
- Произведена проверка разработанной системы оценки параметров на адекватность.
- Обосновано применения нечетко-определенных импульсных моделей для оценки состояний системы.
- Разработана функциональная структура и алгоритм работы системы управления технологическим процессом на основе индекса оценки качества продукта.
- Проведена апробация разработанной системы управления на примере системы автоматического управления технологическим процессом измельчения.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шилов В.И., Тюков Н.С., Костенко В.И. Основные направления развития и совершенствования систем энергообеспечения производственной деятельности Ковдорского ГОКа // Горный журнал 2012. №10. С. 86-88.
2. Тогунов М.Б. Шитов Ю.А., Данилкин А.А., Мелик-Гайказов Г.В., Фокин В.А. Интенсификация буровзрывного дробления скальных горных пород. // Горный журнал.2012. №10. С. 45-49.
3. Богатиков В.Н. Кулаков А.Г. Реев С.Н. Имитационное моделирование технологического процесса сокращения крупности материала при измельчении в агрегате непрерывного действия с замкнутым циклом. // Труды Кольского научного центра РАН. 2006. №2.
4. Морозов И. Н., Пророков А. Е., Кириллов И. Е.. Алгоритм оценки текущего состояния технологического процесса при нечетко выраженной исходной информации // Труды Кольского научного центра РАН. 2011. №7.
5. Кафаров В.В. Принципы создания безотходных химических производств. - М.: Химия, 1982. - 288 с.
6. Kharbanda O.P., Stallworthy E.A. Planning for Emergencies Lessons From Chemical Industry // Long Range Planning. - 1989. Vol.22. - pp. 83-89.
7. Химмельблау Д. Обнаружение и диагностика неполадок в химических и нефтехимических процессах. - Л.: Химия. 1983. - 352 с.
8. Хенли Э.Дж., Кумамото Х. Надежность технических систем и оценка риска.: - М.: Машиностроение,1984. - 528 с.
9. Кафаров В.В., Мешалкин В.П., Грун Г., Нойманн В. Обеспечение и методы оптимизации надежности химических и нефтеперерабатывающих производств. - М: Химия, 1987. - 272с.
10. ГОСТ 27.002-2015 Надежность в технике. Термины и определения. М: Стандартиформ, 2015 – 24 с.
11. Палюх Б.В. Основы построения и разработки автоматизированной системы управления эксплуатационной надежностью химических производств:

Дис. ... докт. техн. наук (05.13.06). - М., 1991. - 360 с.

12. Перов В.Л., Палюх Б.В., Куперман В.Г. Диагностические процедуры с элементами экспертных систем при распознавании неисправностей на химических производствах // Искусственный интеллект в автоматизированном управлении технологическими процессами: Тез. докл. Всесоюзн. науч. техн. конф. - М., 1989. - С.46-47.

13. Семенов В.П. и др. Производство аммиака. - М: Химия, 1985. - 368 с.

14. Маршалл В.В. Основные опасности химических производств. - М.: Мир, 1989. - 672 с

15. Перлов Е.И., Багдасарян В.С. Оптимизация производства азотной кислоты. - М.: Химия, 1983. - 208 с.

16. Богатилов В.Н. Диагностика состояний и управление технологической безопасностью непрерывных химико-технологических процессов на основе дискретных моделей. Дис. ... докт. техн. наук (05.13.06). - Апатиты, 2002. - 352 с.

17. Производственная безопасность часть 1 теория и организация производственной безопасности. Санкт-Петербург. Издательство Политехнического университета. 2012.

18. Егоров А.Ф., Савицкая Т.В. Управление безопасностью химических производств на основе новых информационных технологий. - М.: КолосС, 2006. - 416 с.: ил. (Учебники и учебные пособия для высш. учеб. заведений).

19. Воронин В.В., Констанди Г.Г., Январев Ю.Э. Диагностирование динамических объектов непрерывного типа. - Л.: ЦНИИ Румб, 1986. - 137 с.

20. Кулаков А.Г., Кузнецов П.В., Евшин П.Н. Количественная оценка безопасности функционирования технологического процесса. Труды ИСА РАН. 2008.Т.39.

21. Willems J.C.//Ric. Aut. -1979. - 10. - pp. 71-106.

22. Виллемс Я.К.// Теория систем. Математические методы и моделирование. Сб. статей (Сер. Математика Новое в зарубежной науке. Вып.44). Пер. с англ. - М.: Мир, 1989.С. 81-91.

23. Ван дер Шафт А. // Теория систем. Математические методы и

моделирование. Сб. статей (Сер. Математика Новое в зарубежной науке. Вып. 44). Пер. с англ. С. 192-237.

24. Морозов И.Н., Кулаков А.Г., Богатилов В.Н. Использование нейросетевых методов в имитационном моделировании сложных динамических объектов // Материалы докладов III Всероссийской научной конференции "Теория и практика системной динамики"; Апатиты, 2009. - С. 61-63.

25. Морозов И.Н. Кулаков А.Г., Богатилов В.Н. Оценка текущего состояния технологического процесса при нечетно определенных параметрах его функционирования для целей управления // Материалы докладов VIII Всероссийской школы-семинара "Прикладные проблемы управления макросистемами"; Апатиты, 2010. – С. 47-49.

26. Морозов И.Н., Кулаков А.Г., Богатилов В.Н. Математическая модель управления безопасностью функционирования технологического процесса. ММТТ-23 [текст]: сб. трудов XXIII Междунар. науч. конф.: в 12 т. Т.9 Секция 10/под общ. ред. В.С. Балакирева. - Саратов: Сарат. гос. техн.ун-т, 2010. С. 227-230.

27. Stefanov S.Z. //Int. J. Syst. Sci. - 1989. - 26, № 5. - pp. 865-888.

28. Арнольд В.И. Теория катастроф. - М.: Наука, 1990. -128 с.

29. Биргер И.А. Техническая диагностика. - М.: Высшая школа, 1978. -240 с.

30. Постон Т., Стюарт Й. Теория катастроф и ее приложения. - М.: Мир, 1980. -608 с.

31. Томпсон Дж. Неустойчивости и катастрофы в науке и в технике. - М.: Мир, 1985. -256 с.

32. Kasumasa H., Masataka I., Toshimitnu U. //IEEETrans. Auto. Contr. -1981.- AC-26, № 2. - pp. 601-603.

33. Casti J. //IEEE Trans. Auto. Contr. - 1980. - AC2-5, № 5. - pp. 1008-1011.

34. Корноушенко Е.К., Пылаев Н.К. Передаточные числа и диагностирование линейных систем// Докл. АН СССР.1988. 300, № 3. - С. 559-561.

35. Корноушенко Е.К., Пылаев Н.К. Новый подход к диагностированию линейных диагностических систем // Автомат. и телемех. 1989. № 5. С. 148-159.

36. Герасимов В.В., Корноушенко Е.К. Диагностирование динамических систем, заданных структурными схемами с нелинейными и нестационарными элементами // Автомат. и телемех. 1990. № 4. С. 133-144.
37. Парамонова Г.Г. Обнаружение неисправных звеньев в линейных системах с учетом погрешности идентификации // Автомат. и телемех. № 2. 1990. С. 152-160.
38. Umeda T., Kuryama T., O'Shima E.O, Matsuyama H.//Chem. Eng. Sci. -1980. - 35. -pp. 2379-2384.
39. Самыгин, В. Д. Основы обогащения руд / В. Д. Самыгин, Л. О. Филиппов, Д. В. Шехирев. М.: Альтекс, 2008.
40. Tsuge Y., Shiozaki J., O'Shima E., Matsuyama H.//I. Chem. Eng. Symp. Ser. 1985. - 92. - pp.133-144.
41. Shiozaki J., Shibata B., O'Shima E., Matsuyama H.//Proc. Int. Workshop Artif. Intell. Ind. Appl., HitachiCity. - 1988. - pp. 461-466.
42. Kokawa M., Miyazaki S., Shingai S. //Automatica. - 1983. - 19. - pp. 729-738.
43. Plamping K., Andow P.K. //Trans. Inst. Contr.- 1983. - 5, № 3. - pp. 161-166.
44. Sun S.S., Hsu J.P. //J. Chin. Inst. Chem. Eng. - 1989. - 20, № 2. - pp. 109-112.
45. H.A. Watson and Bell Telephone Labs, Launch control safety study, Bell Telephone Laboratories, 1961.
46. US. Atomik Energy Commission, Reactor Safety Study. An assessment of accident risks in US commerical nuclear power plants. Rep. WASH1400. Washington, 1975. -311p.
47. Lee W., Grosh D.L., Tillman F.A., Lie C.H.//IEEE Trans. Reliab. - 1985. - R34, № 3. - pp. 194-203.
48. Chunning Y. //Microelectron. Reliab. 1990. - 30, № 5. - pp. 891-895
49. Lees F.P., Andow P.K., Murphy C.P. //Reliab.Eng. - 1980. - 1. - pp. 149-156.
50. Andow P.K. //IEEE Trans. Reliab. - 1980. - R29, - pp. 2-9.
51. Andow P.K. //Microelectron. Reliab. - 1983. - 23, №2. - pp. 325-328.
52. Bechta D.J. //IEEE Trans. Reliab. - 1989. - 38, №2. - pp. 177-185.

53. Salter B.B., Goodwin E.F. //Proc. 8th Trien.IFAC World Congr., Kyoto. - 1981. - 3. - pp. 1799-1904.
54. Hessian R.T., Salter B.B., Goodwin E.F. //IEEETrans. Reliab. - 1990. - 39, № 1. - pp.87-91.
55. Вент Д.П., Пророков А.Е., Санаева Г.Н. и др.. Математические модели, используемые в задачах диагностики технологических систем // Программные продукты, системы и алгоритмы. 2015. №3.
56. Fussel J.B. // Nucl. Eng. Des. - 1973. - 52. - pp.337-360.
57. MartinSolis G.A., Andow P.K., Lees F.P.//Trans. I. Chem. Eng. - 1982. - 60. - pp. 14-20.
58. Andow P.K., Lees F.P. //Trans. I. Chem. Eng. - 1975. - 54. - pp. 195-199.
59. Andow P.K. //Comput. Chem. Eng. - 1980. - 4. - pp.143-153.
60. O. Coudert, J.C. Madre, “MetaPrime: An interactive fault-tree analyzer”, IEEE Transactions on Reliability, vol 43, 1994 March, pp 121-127.
61. J.B. Dugan, K.J. Sullivan, D. Coppit, “Developing a lowcost high-quality software tool for dynamic fault-tree analysis”, IEEE Transactions on Reliability, vol 49, March 2000, pp 49-59.
62. R. Gulati, J.B. Dugan, “A modular approach for analyzing static and dynamic fault trees”, Reliability and Maintainability Symposium, 1997, pp 57-63.
63. Neilsen D. //Ibid. - pp. 849-894.
64. Taylor J.R., Hollo E. // Nucl. Syst. Reliab.Eng. and Risk Assessment, SIAM. - 1977.
65. Camarda P.,Corsi F. //IEEE Trans. Reliab. - 1978. - R-27. - pp. 215-221.
66. Powers G.J., Tompkins F.C. //AIChE J. - 1974. - 20, № 2. - pp. 376-384.
67. Powers G.J., Lapp S.A. //Chem. Eng. Prog. - 1976. - 72, № 4. - pp. 89-93.
68. Powers G.J., Lapp S.A. //IEEE Trans. Reliab. - 1977. - R-26. - pp. 2-13.
69. DE Vries R.C. //IEEE Trans. Reliab. - 1990. - 39, № 1. - pp. 76-86.
70. Andrews J., Breunan G. //Reliab. Eng. Syst.Saf. - 1990. - 28, № 3. - pp. 357-384.

71. Guarro S.B. //Reliab. Eng. Syst. Saf. - 1990.-30, № 1/3. - pp. 21-50.
72. Andow P.K. //Trans. Inst. Chem. Eng. - 1981. - 59. - pp. 125-128.
73. Kumamoto H., Henley E.J. //AIChE J. - 1979. - 25. - pp. 108-113.
74. Suprasad Amari, Glenn Dill, Eileen Howald, "A New Approach To Solve Dynamic Fault Trees",
75. Li YF, Huang HZ, Liu Y, Xiao N, Li H. A new fault tree analysis method: fuzzy dynamic fault tree analysis. *Eksploracja i Niezawodnosc – Maintenance and Reliability* 2012; 14 (3): 208-214
76. J.B. Dugan, S.J. Bavuso, and M.A. Boyd, "Dynamic faulttree models for fault-tolerant computer system", *IEEE Transactions on Reliability*, vol 41, pp 363-377, 1992.
77. J.B. Dugan, K.J. Sullivan, D. Coppit, "Developing a lowcost high-quality software tool for dynamic fault-tree analysis", *IEEE Transactions on Reliability*, vol 49, March 2000, pp 49-59.
78. King, R.. *Modeling and simulation of mineral processing systems*, Butterworth-Heinemann, Oxford, United Kingdom. 2001.
79. Dugan, Venkataraman, and Gulati, "DIFtree: A software package for the analysis of dynamic fault tree models," *Proceedings of the 1997 Reliability and Maintainability Symposium*, January 1997.
80. Qin, S. J. and T. A. Badgwell. *A survey of industrial model predictive control technology*. Control Engineering Practice. 11. 2003.
81. Rohit Gulati and Joanne Bechta Dugan, "A modular approach for analyzing static and dynamic fault trees," in *Proceedings of the Reliability and Maintainability Symposium*, January 1997.
82. Joanne Bechta Dugan, Salvatore J. Bavuso and Mark A. Boyd, "Dynamic fault tree models for fault tolerant computer systems," *IEEE Transactions on Reliability*, Volume 41, Number 3, pages 363-377, September 1992.
83. Kevin J. Sullivan, Joanne Bechta Dugan, and David Coppit. *The Galileo fault tree analysis tool*. In *Proceedings of the 29th Annual International Symposium on Fault-Tolerant Computing*, pages 232-5, Madison, Wisconsin, 15-18 June 1999

84. Kevin J. Sullivan, "Galileo: An advanced fault tree analysis tool"
85. URL: <http://www.cs.virginia.edu/~ftree/index.html>
86. Andrews JD, Dunnet SJ, "Event Tree Analysis using Binary Decision Diagrams", IEEE Trans. Reliability, Vol 49, 2000 Jun, pp 230 - 238.
87. Ливанов Ю.В. //Изд. АН СССР. Сер. Техн. киберн. 1990, № 6. С. 178-184.
88. William R. Dunn, "Practical Design of Safety-Critical Computer Systems", Reliability Press 2002, pp 166 - 176.
89. Knowlton R.E. An Introduction to Hazard and Operability Studies. Vancouver: Chemetics Int. Company, 1987. -328 p.
90. Guidelines for Hazard Evaluation Procedures /AChI, Center for Chem. Process Safety. New York, - 1985.-128 p.
91. Guidelines for Chem. Process Quantitative RiskAnalysis. /AChI, Center for Chem. Process Safety. NewYork, - 1989. -111 p.
92. Garmody T.W. //Reliab. Eng. Syst. Saf. - 1990. - 29, № 1. - pp. 5-14.
93. M Guruprasath Robust Model Predictive control of Cement Mill Circuits. 2011.
94. Sinnamon, R.M. and Andrews, J.D., "Quantitative Fault Tree Analysis Using Binary Decision Diagrams", European Journal of Automation, Vol 30, No.8, 1996.
95. Hong Xu and Joanne Bechta Dugan. Combining Dynamic Fault Trees and Event Trees for Probabilistic Risk Assessment. In Annual Reliability and Maintainability Symposium 2004 Proceedings, LA, January 2004.
96. Gulati, R. and JB Dugan, "A Modular Approach for Analyzing Static and Dynamic Fault Trees," 1997 Proceedings of the Annual Reliability and Maintainability Symposium, Philadelphia, Pennsylvania, Jan. 1997, pp 57 - 63.
97. Ragavan Manian, Joanne Bechta Dugan, David Coppit, and Kevin Sullivan, "Combining various solution techniques for dynamic fault tree analysis of computer systems". In Proceedings Third IEEE International High-Assurance Systems Engineering Symposium, pages 21-28, Washington, D.C., 13-14 November 1998. IEEE.
98. Y. Dutuit and A. Rauzy, "Alinear time Algorithm to find Modules of Fault Trees," IEEE Transactions on Reliability, Vol. 45, No. 3, September 1996, pp.422-425.

99. Торбеев С.А. Метод диагностики авиадвигателей на основе параметрической модели работы турбокомпрессора. Дисс. ... канд. техн. наук (05.22.14). М.: -2008.
100. Lees F.P. //Comput. Chem. Eng. - 1984. - 8, №2. - pp. 91-103.
101. Карибский В.В., Пархоменко П.П., Согмонян Е.С., Халчев В.Ф. Основы технической диагностики. Модели объекта, методы и алгоритмы диагноза. - М.: Энергия, 1976. - 496с.
102. Пархоменко П.П., Согмонян Е.С. Основы технической диагностики. Оптимизация алгоритмов диагностирования, аппаратные средства. - М.: Энергоатомиздат, 1981. - 320с.
103. Ключев В.В. Неразрушающий контроль и диагностика. Справочник / Под ред. Ключева В.В. - М.: Машиностроение, 2003. - 656 с.
104. Сафарбаков А.М. Основы технической диагностики Учебное пособие. — Иркутск: ИрГУПС, 2006. — 216 с.
105. Фролов К.В. (гл. ред.) Машиностроение. Том IV-3. Надежность машин. М.: Машиностроение, 2003. - 592 с, ил.
106. Ключев В.В. (Ред.) Неразрушающий контроль. Том 2. Книга 1, 2. М.: Машиностроение, 2003. — 688 с.
107. Сафарбаков А.М., Лукьянов А.В., Пахомов С.В. Основы технической диагностики деталей и оборудования. Часть 1. Иркутск: ИрГУПС, 2007. — 128 с.
108. Сапожников В.В. и др. Основы технической диагностики. Учебное пособие М.: Маршрут, 2004. — 318 с.
109. Кучер В.Я. Основы технической диагностики и теории надёжности. Письменные лекции. - СПб.: СЗТУ. 2004. - 48 с.
110. Технические средства диагностирования: Справочник. / Под ред. Ключева В.В. - М.: Машиностроение, 1989. - 672 с.
111. Гольдман Р.С. Логические модели диагноза непрерывных объектов // Автомат. и телемех. 1979. - № 5. - С. 149-156.
112. Шаршумов С.Г. //Автомат. и телемех. 1973. - № 12. - С. 161-168.

113. Чикулис В.П. Методы минимизации разрешающей способности диагноза и диагностической информации //Автомат. и телемех. 1975. - № 3. - С. 133-141.
114. Гарковенко С.Н., Сагунов В.И. О доопределении минимальной совокупности точек контроля с целью поиска неисправности произвольной кратности в непрерывных объектах диагностирования //Автомат. и телемех. 1977. - № 7. - С. 175-179.
115. Kramer M.A. //IFAC Workshop: Fault detection and safety in chemical plants, Kyoto. -1986.
116. Pattipati K.R., Alexandridis M.G. //IEEE Trans.Syst. Man Cybern. -1990. - 20, №4. - pp. 872 - 887.
117. Berenblut B.J., Whitehouse H.B. //Chem. Eng. - 1977. -318. - pp. 175-181.
118. Salem S.L., Apostolakis G.e., Okrent D. //Annalis of Nucl. Energy. - 1977. - 4.- pp.417-433.
119. Salem S.L., Wu J.S., Apostolakis G.e. //Nucl. Technol. - 1979. - 42. - pp. 51-64.
120. Worrel R.B. //IEEE Trans. Reliab. - 1981. - R-30, № 2. - pp. 98-100.
121. Pollack S.L. Decision Table: Theory and Practice. New York: Wiley Interscience, - 1971. -275 p.
122. Гуляев В.А., Бугаев А.Е. Логико-лингвистические методы в задачах диагностирования сложных объектов. Киев: Ин-т пробл. моделир. в энерг., 1989. - Вып. 20. - 28 с.
123. Kramer M.A. //AIChE J. - 1987. - 33, № 1. - pp.130-140.
124. Tong R.M. //Automatica. 1977. - 13, № 6. - pp. 559-569.
125. Рябинин И.А. Надежность и безопасность структурно-сложных систем. //СПб.: Политехника, 2000. - 248 с.
126. Рябинин И.А. Концепция логико-вероятностной теории безопасности // Приборы и системы управления. - 1993. - № 10. - С.- 3 - 22
127. Можаяев А. С. Автоматизированное структурно-логическое моделирование в решении задач вероятностного анализа безопасности // Теория и информационная технология моделирования безопасности сложных систем.

Вып. 4. Препринт 110. СПб. ИПМАШ РАН, 1994. - С. 16 - 38.

128. Можаяев А.С., Громов В.Н. Теоретические основы общего логико-вероятностного метода автоматизированного моделирования систем. // СПб. ВИТУ, 2000. -145 с.

129. Можаяев А.С. Современное состояние и некоторые направления развития логиковероятностных методов анализа систем. Часть-I. // В сб.: Теория и информационная технология моделирования безопасности сложных систем. Вып.1. Под редакцией И.А. Рябикина. Препринт 101. - СПб.: ИПМАШ РАН, 1994, с.23-53.

130. Кафаров В. В., Дорохов И. Н., Марков Е. П. Системный анализ процессов химической технологии. Применение метода нечетких множеств. - М.: Наука, 1986. - 360с.

131. Можаяев А.С. Технология автоматизации процессов построения логико-вероятностных моделей систем. // Труды Международной научной конференции "Интеллектуальные системы и информационные технологии в управлении". ИСИТУ-2000, IS@ITS. -Псков: ППИ, 2000, с.257-262.

132. Черкесов Г.Н., Можаяев А.С. Логико-вероятностные методы расчета надежности структурно-сложных систем. // В сб. Качество и надежность изделий. Вып.3(15) М.: Знание, 1991.

133. Можаяев А.С. Учет временной последовательности отказов элементов в логиковероятностных моделях надежности. // Межвузовский сборник: Надежность систем энергетики. - Новочеркасск: НПИ, 1990, с. 94-103.

134. Можаяев А.С. Программный комплекс автоматизированного структурно-логического моделирования сложных систем (ПК АСМ 2001). // Труды Международной Научной Школы "Моделирование и анализ безопасности, риска и качества в сложных системах" (МА БРК - 2001). СПб.: Издательство ООО "НПО "Омега", 2001, с.56-61.

135. Можаяев А.С., Алексеев А.О. Громов В.Н. Автоматизированное логико-вероятностное моделирование технических систем. // Руководство пользователя ПК АСМ, версия 5.0. СПб.: Военный Инженерно Технический Университет,

1999.

136. Можаяев А.С. Общий логико-вероятностный метод анализа надежности структурно-сложных систем. // Л.:ВМА, 1988.

137. Можаяев А.С. Theory and practice of automated structural-logical simulation of system. International Conference on Informatics and Control (ICI&C'97). Tom 3. St.Petersburg: SPIIRAS, 1997, p.1109-1118.

138. Куперман В.Г. Разработка гибридных автоматизированных систем технической диагностики непрерывных химических производств (на примере производства азотной кислоты). Дис. ... кан. техн. наук. - М., МХТИ, 1991. - 167 с.

139. Третьяк Л.Н. Обработка результатов наблюдений: Учебное пособие. – Оренбург: ГОУ ОГУ, 2004. – 171 с.

140. Алефельд Г., Херцбергер Ю. Введение в интервальные вычисления. - М.: Мир, 1987. - 360 с.

141. Калмыков С.А., Шокин Ю.И., Юлдашев З.Х. Методы интервального анализа. - Новосибирск: Наука, 1986. - 224 с.

142. Кафаров В.В., Палюх Б.В., Перов В.Л. Решение задачи технической диагностики непрерывного производства с помощью интервального анализа // Докл. АН СССР. 1990.-Т.311, N 3. - С.677-680.

143. Центр компетенций MathWorks URL: <http://www.matlab.ru>

144. Богатилов В.Н., Исследование агрегата мокрого измельчения с замкнутым циклом как объекта автоматического управления / В.Н. Богатилов, А.Г. Кулаков // Информационные технологии в региональном развитии. Выпуск IV. Сборник научных трудов ИИММ КНЦ РАН. Апатиты. 2004. С. 80-91.

145. Туз А. А., Богатилов В. Н.. Построение модели процесса измельчения в агрегате непрерывного действия с замкнутым циклом ОАО «Ковдорский ГОК» с применением нейросетевых моделей // Труды Кольского научного центра РАН. 2013. №5 (18).

146. Туз А.А., Богатилов В.Н. Математическая модель технологического процесса измельчения апатито-бадделеитового концентрата в закрытой шаровой

мельнице участка подготовки питания флотации Ковдорского ГОКа Туз А.А. Богатилов В.Н. Фундаментальные проблемы системной безопасности. Материалы школы-семинара молодых ученых 20-22 ноября 2014 г. Елецкий ГУ им. Бунина. 2014.

147. Полько, П.Г. диссертация ... кандидата технических наук: 05.13.06 Магнитогорск 2011

148. Mejeoumov G. G. Improved cement quality and grinding efficiency by means of closed mill circuit modeling-2007

149. Авдохин В.М. Основы обогащения полезных ископаемых. Том 2. Технология обогащения полезных ископаемых. Учебник для вузов: В 2 т. — М.: Издательство Московского государственного горного университета, 2006. — Т.2. — 417 с.: ил.

150. Михалёва, З.А. Методы и оборудование для переработки сыпучих материалов и твердых отходов /З.А Михалёва, Д.А. Ковчев, В.П. Таров Тамбов: ГОУ ВПО ТГТУ, 2002, 64 с.137. Технологическая инструкция обогатительной фабрики СФ ОАО «УГОК», г. Сибай. 2007. 98 с

151. Технологическая инструкция обогатительной фабрики СФ ОАО «УГОК», г. Сибай. 2007. 98 с

152. Евменова Г.Л. и др. Дробление, измельчение и подготовка сырья к обогащению. Пособие по курсовому проектированию: Г.В. Иванов, А.А. Байченко; ГУ КузГТУ. - Кемерово, 2005. - 96 с.

153. Сажин Ю.Г. Расчеты рудоподготовки обогатительных фабрик. Учебник. — Алматы: КазНТУ, 2000. — 179 с.

154. Зеленков, С. Ф. Энергосберегающие внутримельничные устройства / С. Ф. Зеленков, В. Г. Струков. Полтава, 1998

155. Бармин И.С. Повышение эффективности флотации апатита из тонкозернистой части техногенного месторождения на основе применения оксиэтилированных моноалкилфенолов - диссертация ... кандидата технических наук - 25.00.13. Москва 2011

156. С.Н. Бочаров, В.С. Кузнецов, Е.М. Шендерович, К.Б. Кузьмин. Технологический комплекс переработки песков техногенного месторождения. Горный журнал 2007. №9.
157. Богданов О.С. Справочник по обогащению руд. Том 1. Подготовительные процессы. Москва "Недра" 1982 г. 367 с.
158. Троп А. А. Автоматическое управление технологическими процессами обогатительных фабрик. / А. А. Троп, В. З. Козин, Е. В. Прокофьев. М.: Недра, 1986.
159. Гуревич Л.С., Кремер Е.Б. Моделирование структуры потоков в барабанной мельнице// Обогащение руд. – 1989. – №2 – С. 34-37.
160. Богданов О.С. Справочник по обогащению руд. Том 2. Основные процессы. Москва "Недра" 1983 г. 381 с.
161. Тоичкин, Н.А. Диагностика состояний и управление технологической безопасностью с использованием индекса безопасности: На примере цеха выпарки производства хлора и каустика: диссертация ... кандидата технических наук: 05.13.06 Апатиты 2006
162. Борисов, А.Л. Автоматизированная система управления технологической безопасностью непрерывных химико-технологических процессов на основе дискретных моделей диссертация ... кандидата технических наук: 05.13.06 Тверь 2004
163. Туз А.А., Санаева Г.Н., Пророков А.Е., Богатиков В.Н. Управление технологическими процессами измельчения и основные направления их автоматизации // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 8, №2 (2016)
164. Златорунская Г.Е. Оценка измельчаемости дробленой руды по ее гранулометрической характеристике. Обогащение руд, № 2, 1985 г.
165. Линч А. Дж. Циклы дробления и измельчения. Моделирование, оптимизация, проектирование и управление: М., Недра, 1981, 243 с.
166. Способ обогащения апатитсодержащих руд. Патент на изобретение. Мелик-Гайказов И.В., Попович В.Ф, Бармин И.С. и другие. 2008.

167. Златорунская Г.Е., Бойко А.Ю., Голованов В.Г. и др. Оптимизация процессов рудоподготовки и обогащения руд различного минералогического состава. ч. II, М., 1989 г., 186 стр.
168. Исследование и оптимизация технологии флотационного обогащения руд Ковдорского апатит-штаффелитового месторождения. Туголуков А.В., Бармин И.С., Новожилова В.В., Белобородов В.И., Брыляков Ю.Е.. Горный журнал. 2012. №10.
169. Чохонелидзе А. Н., Форгор Лемпого, Виллиам Браун-Аквей Разработка системы автоматизированного управления для замкнутой цепи измельчения с использованием метода управления с прогнозирующими моделями // Интернет-журнал Науковедение. 2014. №6 (25).
170. Муратов В. С., Давыдов О. В. Анализ материалов для футеровки мельниц измельчения // Современные наукоемкие технологии. 2008. №5.
171. Гуревич Л.С., Кремер Е.Б., Рубисов Д.Г. Моделирование структуры потоков в многокамерной флотационной машине// Обогащение руд. – 1987. – №1. – С. 35-39.
172. Nasset J.E. The application of residence time distributions to floatation and mixing circuits//CIM Bull. – 1988. – V.81. – №919. – P. 75-83
173. Rogovin Z., Lo Y.C., Herbst A.J., Rajamani K. Closed grinding circuit residence time distribution analysis//Minerals & Metallurgical Processing. – 1987. – V.4. – №4. – P. 207-214/
174. Лукошко С.Г. Влияние транспортирования материала в вибромельнице на грансостав продукта помола//Вибрационные эффекты в процессах добычи и переработки минерального сырья/ Киев, Наукова думка, 1989. – С. 65-72.
175. Кулаков А.Г. Морозов И.Н. Колесник А.Е. Итеративный алгоритм ситуационного управления технологическим процессом. Труды ИСА РАН 2008. Т. 39.
176. Демидович Б.П., Марон И.А. Основы вычислительной математики.– М., Физматгиз, 1963. 659 с.

177. Острейковский В.А., Швыряев Ю.В. Безопасность атомных станций. Издательство "Физматлит" 2008. 352 стр.
178. Вержбицкий В.М. Численные методы (математический анализ и дифференциальные уравнения): Учеб. пособие для вузов.— М., Высш. шк., 2001.— 382 с.
179. Методы прогноза и коррекции. URL: <http://lektsii.org/2-84242.html>
180. Туз А.А., Богатилов В.Н.. Построение системы адаптивного управления процессом измельчения апатито-бадделеитового концентрата участка подготовки питания флотации ОАО «Ковдорский ГОК» // Труды Кольского научного центра РАН. 2014. №5 (24)
181. Чохонелидзе А.Н., Браун-Аквей Виллиам, Форгор Лемпото Разработка программного обеспечения для управления контуром помола // Интернет-журнал Науковедение. 2014. №3 (22)
182. Богатилов В. Н., Браун-Аквей Виллиам, Форгор Лемпото. Аппаратное и программное обеспечения для системы управления технологическим процессом измельчения // Интернет-журнал Науковедение. 2015. №1 (26).
183. Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта / Под ред. Д.А. Поспелова. - М.: Наука, 1986. - 396 с.
184. Оссовский С. Нейронные сети для обработки информации. Пер. с польск. И.Д. Рудинского. - 2-е изд., перераб. и доп. М.: Горячая Линия – Телеком, 2016.- 448 с.
185. Туз А.А., Санаева Г.Н., Пророков А.Е., Богатилов В.Н., Кулаков А.Г. Системы автоматического регулирования агрегата мокрого измельчения с замкнутым циклом на основе нечеткоопределенных моделей // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 8, №2 (2016)

ПРИЛОЖЕНИЕ 1. Акт об использовании результатов диссертационного исследования



Общество с ограниченной ответственностью
**«Проектно-конструкторское бюро
 автоматизации производств»**
 (ООО «ПКБ АП»)



Российская Федерация
 170008, г. Тверь,
 ул. Ротмистрова, д. 27
 корп. 1

тел. (4822) 41-53-38
 тел./факс (4822) 41-53-38
 E-mail: pkbap@mail.ru
www.pkbap.ru

УТВЕРЖДАЮ

Директор

[Подпись]
 « »

В.М.Кожемякин



АКТ

об использовании результатов диссертационного исследования Туз А.А.
 «Управление технологическим процессом измельчения в шаровой мельнице
 в цикле подготовки питания флотации на основе нечётко-определённых
 импульсных моделей»

Комиссия в составе: - председатель главный инженер Бакин А.Ю.,

члены - главный конструктор Иванов Р.П.,

- ведущий инженер системотехник Давыденков П.Ф.

составила настоящий акт об использовании результатов диссертационной работы соискателя кафедры информационных системы и технологии Новомосковского Филиала РХТУ им. Менделеева Туз А.А. по теме «Управление технологическим процессом измельчения в шаровой мельнице в цикле подготовки питания флотации на основе нечётко-определённых импульсных моделей».

Для информационной поддержки принятия решений по оценке состояний и управлению качеством ведения технологического процесса подготовки питания флотации, предложена двухуровневая система управления контуром измельчения. На первом уровне решаются задачи прогнозирования нагрузок. На втором уровне определяются реализуемые управляющие воздействия. Данная система позволяет учитывать изменение свойств сырья и другие возможные случайные возмущения и представляет

ПРИЛОЖЕНИЕ 1. Окончание

возможность рассчитывать наилучшие технологические режимы ведения технологического процесса.

Система управления обеспечивает решение следующих задач:

- определение состояний технологического режима работы и оборудования, задействованного в цикле подготовки питания флотации;
- распознавание предаварийных состояний технологического оборудования;
- поддержки принятия решений при обнаружении неполадок оборудования.

При создании системы использовались следующие результаты:

- методика оценки качества продукта по исходной информации о состоянии технологического процесса;
- экспертная система, основанная на выборе вариантов решений с применением нечетко-определенных импульсных моделей;
- коррекция управляющих воздействий в соответствии с прогнозируемыми значениями параметров процесса в режиме реального времени;

Использование разработанной системы оценки параметров технологического процесса измельчения, которая учитывает состав исходного сырья, позволяет улучшить качество управления объектом и как следствие, увеличить выход готового товарного концентрата, при текущих эксплуатационных затратах. Поскольку управление по критериям качества предполагает поддержание технологического процесса измельчения в области лучших регламентных состояний, то в результате можно добиться снижения потерь и повышения эффективности работы путем прогнозирования отказов основного оборудования.

Председатель комиссии

главный инженер



Бакин А.Ю.

Члены комиссии

главный конструктор



Иванов Р.П.

ведущий инженер системотехник



Давыденков П.Ф.