

Казахский национальный исследовательский университет
имени К.И. Сатпаева

УДК 004.896:622.7(043)

На правах рукописи

КУЛАКОВА ЕЛЕНА АЛЕКСАНДРОВНА

**Разработка интеллектуальной системы управления процессом
гравитационного обогащения руды**

6D070200 – Автоматизация и управление

Диссертация на соискание степени
доктора философии PhD

Научные консультант
доктор технических наук, профессор
Сулейменов Б.А.

Зарубежный научный консультант
D.Sn.eng, профессор
Andrzej Smolarz

Республика Казахстан
2021 год

СОДЕРЖАНИЕ

НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ.....	4
ОПРЕДЕЛЕНИЯ	5
ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ	6
ВВЕДЕНИЕ.....	7
1 ОПИСАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ГРАВИТАЦИОННОГО ОБОГАЩЕНИЯ РУДЫ	12
1.1 Описание технологии обогащения руды гравитационным способом	12
1.2 Основные особенности гравитационного обогащения руды.....	13
1.3 Современное состояние систем управления процессами гравитационного обогащения	17
1.4 Технологические показатели обогащения при существующих системах управления процессом гравитационного обогащения	19
Выводы по первому разделу	22
2 АНАЛИЗ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПРОЦЕССОВ ГРАВИТАЦИОННОГО ОБОГАЩЕНИЯ РУДЫ	23
2.1 Математические модели движения частиц в аппаратах гравитационного обогащения.....	23
2.2 Математические модели движения частиц в отсадочной машине сепараторного типа	23
2.3 Математические модели движения частиц в центробежном концентраторе.....	25
2.4 Разработка математической модели движения частиц концентрата и пустой породы руды в отсадочной машине сепараторного типа	28
2.5 Характеристика аппаратов гравитационного обогащения как объектов исследования.....	33
2.6 Идентификация ключевых переменных процессов гравитационного обогащения в исследуемых аппаратах.....	35
2.7 Постановка задачи для разработки интеллектуальной системы управления	36
Выводы по второму разделу	39
3 РАЗРАБОТКА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ГРАВИТАЦИОННОГО ОБОГАЩЕНИЯ РУДЫ	40
3.1 Разработка иерархической структуры интеллектуальной системы управления	40
3.2 Методика создание базы знаний интеллектуальной системы управления процессами гравитационного обогащения	43

3.3 Синтез интеллектуальных моделей (алгоритмов) системы управления процессом гравитационного обогащения руды	52
3.3.1 Синтез интеллектуальных моделей (алгоритмов) управления процессом гравитационного обогащения в отсадочной машине сепараторного типа.....	53
3.3.2 Синтез интеллектуальных моделей (алгоритмов) процессом гравитационного обогащения в центробежном концентраторе.....	68
Выводы по третьему разделу	75
4 ПРОВЕРКА АДЕКВАВТНОСТИ АЛГОРИТМОВ (МОДЕЛЕЙ) УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССАМИ ГРАВИТАЦИОННОГО ОБОГАЩЕНИЯ РУДЫ	76
4.1 Оценка адекватности интеллектуальных моделей (алгоритмов) управления аппаратами гравитационного обогащения	76
4.2 Методика проведения промышленного эксперимента для проверки интеллектуальных моделей (алгоритмов) управления процессом гравитационного обогащения	84
Выводы по четвертому разделу	90
5 ИНТЕГРАЦИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ В СУЩЕСТВУЮЩИЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ ОБОГАТИТЕЛЬНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ	92
5.1 Интеграция интеллектуальных моделей (алгоритмов) управления с ПЛК системы автоматизации аппаратов гравитационного обогащения.....	92
5.2 Функциональные схемы автоматизации аппаратов гравитационного обогащения.....	96
Выводы по пятому разделу	98
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	99
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	102
ПРИЛОЖЕНИЕ А – Тестирование моделей (алгоритмов) отсадочной машины в режиме максимального содержания	107
ПРИЛОЖЕНИЕ Б – Тестирование моделей (алгоритмов) отсадочной машины в режиме максимального извлечения.....	109
ПРИЛОЖЕНИЕ В – Тестирование моделей (алгоритмов) управления центробежным сепаратором	111
ПРИЛОЖЕНИЕ Г – Список публикаций	114
ПРИЛОЖЕНИЕ Д – Справка об исследованиях в период стажировки....	116
ПРИЛОЖЕНИЕ Е – Акт испытания алгоритмов.....	117

НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ

В настоящей диссертации использованы ссылки на следующие стандарты:
ГОСТ 7.32-2001 - Отчет о научно-исследовательской работе. Общие требования и правила оформления.

ГОСТ 7.1-2003 - Библиографическая запись. Библиографическое описание. Общие требования и правила составления.

ГОСТ 7.12-93 – Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Библиографическая запись. Сокращение слов на русском языке. Общие требования и правила.

ГОСТ 21.408-2013 – Правила выполнения рабочей документации автоматизации технологических процессов.

ОПРЕДЕЛЕНИЯ

В настоящей диссертации применяют следующие термины, с соответствующими определениями:

Технологические показатели обогащения – количественная мера извлечения полезных компонентов в виде концентратов.

Концентрат — продукт обогащения с повышенным содержанием полезных или пониженным содержанием вредных компонентов по сравнению с исходной рудой.

Промпродукты – промежуточный продукт обогащения, содержание ценного компонента в котором меньше чем в концентрате, но больше чем в отходах производства.

Хвосты – отходы процессов обогащения полезных ископаемых, в которых содержание ценного компонента ниже, чем в исходном сырье.

Техногенное сырье – отходы, образованные на стадиях получения и обработки металлов, которые могут служить источником воспроизводства сырья, а также отходы горно-металлургических производств, содержащие цветные, редкие и благородные металлы.

Отсадка – процесс гравитационного обогащения полезных ископаемых, который базируется на разделении зернистого материала по плотности в вертикальном пульсирующем потоке воды или сжатого воздуха знакопеременной скорости.

Отсадочная машина – аппарат гравитационного обогащения, который выполняет разделение смеси частиц концентрата и пустой породы преимущественно по плотностям под воздействием пульсирующего потока воды или воздуха.

Центробежный сепаратор – промышленное оборудование, предназначенное для разделения потока, использующее центробежный способ разделения.

Интеллектуальный алгоритм – набор эвристических данных и вычислений, который создает на основе данных модель.

Матрица планирования полного факторного эксперимента — матрица, которая реализует все возможные неповторяющиеся комбинации уровней независимых факторов, каждый из которых варьируется на заданном количестве уровнях.

ОРС технология – технология, обеспечивающая обмен данными между программой контроллера и программным обеспечением приложений.

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

- АО "ТНК Казхром" – Транснациональная компания Казхром
НДФЗ – Новоджамбульский фосфорный завод
ОМ – Отсадочная машина
КЦ – Концентратор центробежный
ИТ – Интеллектуальные технологии
ANN – искусственной нейронной сети
АСУТП – Автоматизированные системы управления технологическими процессами
ПФЭ – Полный факторный эксперимент
R – корреляция экспертных и модельных значений
RMSE – среднеквадратичная ошибка
MAPE – средняя абсолютная ошибка
ФСА – Функциональная схема автоматизации
ПЛК – программируемый логический контроллер
ПО – программное обеспечение
РКЦ–1М – концентратор мер рентгенофлуоресцентный цеховой

ВВЕДЕНИЕ

Оценка современного состояния решаемой научно–технологической проблемы

В современном мире внедрение экономичных и экологических технологий обогащения руды является приоритетным. Требованиями в области рационального и комплексного использования недр и охраны недр являются:

- обеспечение рационального и комплексного использования ресурсов недр на всех этапах проведения операций по недропользованию;
- предотвращение загрязнения недр, особенно при подземном хранении нефти, газа или иных веществ и материалов, захоронении вредных веществ и отходов [1].

Следовательно, возникает необходимость в комплексной переработке руды и минимизации отходов обогатительного производства.

Казахстан занимает первое место по разведанным запасам хрома в мире и второе место по объему потенциальных запасов [2]. Особый интерес представляют тонкие и мелкие классы руды, которые всего несколько десятилетий назад практически не подвергались обработке и образовали залежи техногенных отходов производства. Следовательно, возникает необходимость в усовершенствовании технологий переработки как добываемого так и техногенного сырья, которое представляет собой возобновляемый ресурс, не требующий затрат на добычу и первичную переработку. Обогащение существующего техногенного сырья и качественная переработка добываемого может обеспечить экологическую реабилитацию территорий, подверженных негативному воздействию объектов хозяйственной деятельности добывающей и горноперерабатывающей промышленности. Кроме того, в ряде случаев в техногенных отходах содержание ценных компонентов превышает их содержание в разрабатываемых природных месторождениях.

Эффективность работы обогатительных аппаратов характеризуется такими показателями обогащения как содержание ценного компонента в готовом продукте (концентрате) и содержание ценного компонента в хвостах (отходах производства).

Повышение технологических показателей гравитационного обогащения возможно двумя способами:

- разработка новых технологий обогащения и конструкций обогатительных аппаратов;
- разработка эффективных систем управления.

Первый метод требует инвестиций в исследование и разработку новых технологий обогащения, а также колоссальных финансовых затрат на производство и испытание новых обогатительных аппаратов.

Второй метод позволяет использовать существующее технологическое оборудование промышленных предприятий. Важно отметить, что в целом обогатительное производство в Казахстане имеет высокий уровень автоматизации. В связи с этим актуально создание систем, способных к

интеграции с имеющимися средствами автоматизации обогатительных предприятий.

Основные и исходные данные для разработки диссертации

Основанием для разработки данной темы диссертационной работы является приказ №1600–д от 30.10.17 КазННТУ им. К.И. Сатпаева «О назначении научных руководителей и утверждений тем докторских диссертаций докторантов PhD». Исходными данными для выполнения проекта являются научные статьи, учебники и монографии, а также техническая документация, полученная на обогатительных предприятиях Казахстана.

Обоснование необходимости проведения исследований по теме диссертационной работы

Применение технологий переработки техногенного сырья началось сравнительно недавно. Например, АО «ТНК «Казхром» – Донской горно–обогатительный комбинат на Фабрике обогащения и окомкования руды Донского ГОКа в 2009 году запустил участок обогащения тонких и мелких классов, производительностью 100 т/час. А в 2014 году данная практика была продолжена и введена вторая линия обогащения такой же производительностью. Концентрат, полученный на данных участках используется для производства хромовых окатышей, которые в свою очередь используются для производства ферросплавов [2].

Тонкие и мелкие классы руд подвергаются процессам гравитационного обогащения. В качестве технологических аппаратов на обогатительных фабриках используются – грохоты, разнообразные сепараторы (винтовые, магнитные и т.п.), концентраторы, а также отсадочные машины.

В диссертационной работе для повышения технологических показателей аппаратов гравитационного обогащения руды тонких и мелких классов предлагается разработать интеллектуальную систему управления, способную к интеграции в существующие на обогатительных предприятиях Казахстана системы автоматизации. Основой предлагаемой системы являются интеллектуальные алгоритмы управления, позволяющие исключить влияние человеческого фактора на многомерный процесс обогащения в гравитационных аппаратах. Разработка, моделирование и испытание интеллектуальных алгоритмов эффективного управления процессами гравитационного обогащения позволит при минимальных затратах обеспечить рациональное и комплексное использование как добываемого так и техногенного сырья.

Процесс гравитационного обогащения является многомерным и многосвязным. В следствии чего создание достаточно адекватных математических моделей невозможно. Попытки создания систем оптимального управления, способную обеспечить максимальные технологические показатели обогащения, традиционными методами математического моделирования не приводят к результатам. Необходим новый подход к разработке систем управления гравитационными аппаратами. Предлагается рассмотреть разработку и исследование интеллектуальной системы управления. Так как интеллектуальные технологии позволяют разрабатывать непосредственно

модели оптимального процесса гравитационного обогащения, в отличии от традиционного метода, где необходима длительная и дорогостоящая идентификации математической модели самого объекта управления.

Анализ литературных источников показал, что использование интеллектуальных технологий в управлении процессами гравитационного обогащения ограничивается расчетом или прогнозированием отдельных переменных процесса. Интеллектуальных систем управления с учетом режимов работы гравитационных аппаратов не обнаружено.

Конечным результатом работы будут интеллектуальные алгоритмы управления процессами гравитационного обогащения в двух технологических аппаратах с учетом заданного режима работы.

Сведения о метрологическом обеспечении диссертации

Все экспериментальные исследования будут проводиться в лицензионном программном пакете Matlab и в условиях ТОО «Восход Хром» с использованием средств измерения и автоматизации, прошедшего все процедуры сертификации и поверки.

Актуальность диссертационной работы

В условиях современной экономики и ухудшающейся экологии качественное обогащение существующего техногенного сырья и переработка добываемого может обеспечить не только повышение прибыли обогатительных предприятий, но и экологическую реабилитацию территорий, подверженных негативному воздействию объектов хозяйственной деятельности добывающей и горно-перерабатывающей промышленности. Качественный уровень технологического процесса обеспечивается системой управления. Применение интеллектуальных технологий в системах управления аппаратами обогащения позволит повысить их технологические показатели обогащения с максимизацией прибыли обогатительного производства и минимизацией негативного влияния техногенного сырья на окружающую среду.

Связь диссертационной работы с другими НИР

Диссертационная работа связана с исследованиями по разработке интеллектуальных алгоритмов управления процессами получения ангидрида фосфора (2018–2020 гг) и текущей НИР АР08856867–ОТ–21 «Разработка и испытание интеллектуальных алгоритмов оптимального управления технологическим процессом очистки желтого фосфора в условиях НДФЗ».

Цель работы. Разработать интеллектуальную систему управления, обеспечивающую эффективные режимы работы аппаратов гравитационного обогащения (центробежного концентратора и отсадочной машины).

Основная идея работы. Разработка интеллектуальной системы управления для оптимальных режимов работы аппаратов гравитационного обогащения (максимальное извлечение, максимальное содержание), путем определения выходных переменных процесса с помощью интеллектуальных моделей (алгоритмов) управления. Предлагаемая система способна к интеграции с существующими системами автоматизации обогатительных предприятий.

Задачи исследования. В соответствии с поставленной целью определены следующие научные задачи, которые необходимо решить в настоящей работе:

- исследование математических моделей процессов отсадки и центробежной сепарации;
- определение ключевых переменных процессов гравитационного обогащения;
- анализ существующих систем управления на обогатительных предприятиях Казахстана;
- обработка экспертной информации и составление матриц ПФЭ на основе данных опроса экспертов–технологов;
- разработка интеллектуальных алгоритмов управления;
- создание моделей управления на основе нечеткой логики, нейронных и гибридных сетей;
- проверка адекватности разработанных алгоритмов;
- проведение испытаний алгоритмов в промышленных условиях;
- интеграция разработанных систем в существующие системы управления;

Объект исследования. Объектом исследования являются два аппарата гравитационного обогащения – отсадочная машина сепараторного типа и центробежный концентратор.

Методы исследований. В ходе решения поставленных задач будут использованы теория автоматического управления, методы математического и компьютерного моделирования, теории матриц, оптимального управления, теории статистической обработки данных, методы обработки экспертной информации, искусственного интеллекта. Моделирование производилось с использованием пакетов прикладных программ: Matlab, Excel. Источником данных для пассивного эксперимента использовалась Scada-система отсадочной машины сепараторного типа.

Научная новизна работы

- разработана математическая модель движения частиц концентрата и пустой породы в отсадочной машине сепараторного типа;
- предложена методика обработки экспертной информации при формировании обучающей выборки;
 - произведены синтез и исследование интеллектуальных моделей (алгоритмов) для определения оптимальных значений ключевых переменных процесса гравитационного обогащения;
- предложена методика оценки адекватности разработанных моделей (алгоритмов) с применением данных пассивного эксперимента.

На защиту выносятся следующие научные положения

- универсальная модель движения частиц концентрата и пустой породы;
- методика обработки экспертной информации, которая упрощает процесс получения достоверной базы данных для создания интеллектуальных моделей;
- интеллектуальные модели (алгоритмы) для режимов управления режимами работы обогатительными аппаратами (максимальное извлечение,

максимальная концентрация) для повышения эффективности процесса гравитационного обогащения руды;

– методика оценки адекватности полученных моделей (алгоритмов) с применением данных пассивного эксперимента;

– результаты промышленных испытаний интеллектуальных алгоритмов управления аппаратами гравитационного обогащения.

1 ОПИСАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ГРАВИТАЦИОННОГО ОБОГАЩЕНИЯ РУДЫ

Для реализации поставленной цели исследования необходимо рассмотреть особенности технологического процесса гравитационного обогащения руды и провести анализ состояния проблемы управления данным процессом.

1.1 Описание технологии обогащения руды гравитационным способом

Казахстан занимает первое место в мире по разведанным запасам хрома и обеспечивает 15% мирового объема их добычи. Государственным балансом учтены запасы по 20 месторождениям, 91 % из которых эксплуатируется. Обеспеченность отрасли запасами достигает 80–90 лет, прогнозный потенциал республики в несколько раз превышает разведанные запасы. Основные запасы хромитов располагаются на сравнительно небольшой площади в Западном Казахстане Актюбинской области (месторождения Донское, Миллионное, Алмаз–Жемчужина). Месторождения хромитов также открыты в Костанайской и Восточно–Казахстанской областях [1].

Самым крупным предприятием республики по добычи и переработки хромовых руд является АО "ТНК Казхром", которое обеспечивает весь объем добываемой в Казахстане хромовой руды: так, в 2015 году комбинатом было выпущено 3,579 млн тонн. Сырьевая база предприятия – это более 300 млн тонн подтверждённых и около 800 млн тонн прогнозных запасов руды. Помимо производства кусковой хромовой руды, ГОК осуществляет и переработку накопившихся запасов руд более мелкого класса, для чего им запущены производственные мощности, базирующиеся на инновационных технологиях [2].

Хромсодержащие руды используются в металлургии для производства легированных сталей и огнеупоров. Разработка известных и новых месторождений требует высоких капиталовложений и характеризуется большой технологической трудоемкостью. Известные способы обогащения хромсодержащих руд на начальных переделах и без мокрых способов технологии обогащения не позволяют получить готовую товарную продукцию в виде хромового концентрата с содержанием Cr_2O_3 более 48–50% [3]. Кроме того, нужно отметить, что тонкие и мелкие классы (2–10мм) хромовых руд требуют специального обогащения и до внедрения АО «ТНК Казхром» такой технологии обогащения эти классы руд просто уходили в отвалы, что абсолютно экономически нецелесообразно. В 2009 году ТНК «Казхром» на Фабрике обогащения и окомкования руды Донского ГОКа запустил участок обогащения тонких и мелких классов, производительностью 100 т/час. А в 2014 году данная практика была продолжена и введена вторая линия обогащения такой же производительностью. Концентрат, полученный на данных участках используется для производства хромовых окатышей, которые в свою очередь используются для производства ферросплавов [4].

Тонкие и мелкие классы хромовых руд подвергаются процессам отсадки, сепарации, то есть для их обогащения используются гравитационные методы обогащения. Соответственно основными технологическими агрегатами являются отсадочные машины и концентраторы, которые обладают рядом преимуществ по сравнению с другим аналогичным оборудованием [5].

Отсадочная машина – горная машина, оснащенная специальным оборудованием (решето, камера). Используется для гравитационного обогащения руд в водной среде, путем разделения минералов преимущественно по плотностям. Применяются для извлечения золота, хрома и т.д. Так как единственным расходным материалом является вода, эксплуатация отсадочных машин экономична и экологична [6]. Отсадочные машины для обогащения руд до надежно работают во всем мире и Казахстан не исключение благодаря надёжности и высокой производительности.

Принцип действия концентратора основан на разделении поступающего материала на две фракции «тяжелую» и «легкую» в центробежном поле. Разделение материала на фракции происходит в результате взаимодействия потока промывочной воды, центробежных сил и поля тяжести, действующих на частицу в горизонтально или наклонно вращающемся роторе [7].

Объектами исследования в данной работе являются отсадочная машина сепараторного типа и центробежный концентратор. Основными технологическими параметрами, определяющими эффективность работы данных аппаратов являются процент извлечения полезного компонента (% процент содержания полезного компонента в концентрате и (% процент содержания полезного компонента в хвостах).

В настоящее время гравитационные методы обогащения применяются для переработки каменного угля, железных, хромовых, марганцевых, вольфрамовых, оловянных, золотосодержащих, редкометалльных руд и другого минерального сырья [8].

1.2 Основные особенности гравитационного обогащения руды

Гравитационные методы обогащения известны с древнейших времен и до конца XIX века они являлись единственными методами обогащения полезных ископаемых, так как другие методы практически не применялись [9].

Изначально гравитационным обогащением назывался метод разделения минеральных частиц различной плотности, основанный на их физических свойствах и особенностях их движения в текучих средах под действием силы тяжести и сил сопротивления. В современное понятие гравитационных методов включают также разделение частиц по крупности (классификация) и форме (отсадка слуд). Очевидно, что физические свойства частицы (плотностью, крупностью, формой и т.д) оказывают значительное, нередко решающее влияние на движение частиц в процессе их разделения [10].

На первый взгляд процессы гравитационного обогащения руды достаточно просты и соответственно управление ими для достижения высоких показателей обогащения не представляет особой сложности и интереса. Но глубокий анализ

литературных источников [11, 12], посвященных данному методу обогащения показывает, что это не так.

Свойства среды, в которой происходит обогащение, является важным фактором, характеризующим гравитационное обогащение. Но необходимо учитывать, что если гравитационное обогащение происходит в воде или воздухе, все частицы оседают на дно, то есть разделения практически не происходит. Поэтому необходимо эту массу разрыхлять, например, динамическим воздействием потока среды, чтобы обеспечить возможность относительного движения частиц. Очевидно, чем меньше плотность среды, тем больше должна быть ее скорость, что соответственно усложняет процессы разделения частиц. В этих условиях процесс разделения частиц становится зависим от огромного количества факторов, как от свойств частиц (плотность, крупность, форма и др.), так и от динамических свойств среды обогащения (пульсация, амплитуда и др.) [13].

Вследствии того, что частицы многообразны и обладают индивидуальными свойствами очень сложно выполнить надежное количественное описание гравитационных процессов. Поэтому несмотря на многовековую историю и широкое применение гравитационных методов, их развитие происходит преимущественно путем экспериментирования.

Существует целая теория, которая объясняет механизм и закономерности расслоения неоднородной смеси минеральных зерен по плотности (крупности, форме) в пульсирующем потоке воды, взаимосвязи между гидродинамическими параметрами гравитационных аппаратов и другие (рисунок 1.1) [14].



Рисунок 1.1 – Научные представления о процессах гравитационного обогащения

Теоретические представления отдельных зависимостей носят характер гипотез. Наиболее распространенные гипотезы представлены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Гипотезы закономерностей механизма отсадки

Гипотеза	Сущность	Недостатки
Скоростная гипотеза (П. Риттингер)	Так как скорости и ускорения частиц различной плотности различны за счет действия вертикального пульсирующего потока воды, происходит их разделение.	Рассматривает движение только движение отдельной частицы, без учета того, что отсадка представляет собой массовый процесс
Энергетическая гипотеза (Ф. Майер)	Постель (масса исходного сырья, лежащая на решетке отсадочной машины), как всякая замкнутая механическая система, стремится перейти к более устойчивому состоянию, т.е. к минимуму потенциальной энергии.	Расслоение постели рассматривается только в связи с внутренней потенциальной энергией. Не учитывается внешняя энергия механизм разделения частиц различной плотности.
Статистическая гипотеза (И.М. Верховский)	Постель отсадочной машины рассматривается как массовая система, в которой перемещение отдельных однородных частиц носит случайный характеру действующих масс и носит статистический характер.	Не учитывает физические законы, действующие на частицы постели.
Суспензионная (А.Херста)	Постель отсадочной машины рассматривается как суспензия, в которой разделение по плотности осуществляется по законам, разделению в утяжеленной среде.	Не рассматривает способ и параметры псевдооживления материала и поэтому не позволяет прогнозировать глубину эффективного разделения материала.

Таким образом, все гипотезы имеют определенные недостатки. Именно это и объясняет направление развитие технологии гравитационного обогащения путем экспериментов. И несмотря на то, что данная технология имеет многовековую историю четкого определения закономерностей процесса нет, исследования продолжают.

Одновременно с этим, на технологические показатели обогащения аппаратов гравитационного обогащения оказывают одновременное влияние около 20 факторов, определяемых характеристикой и режимом питания машин, технологическими и гидродинамическими параметрами процесса. Многие из них находятся в сложном взаимодействии между собой и проявляются в различных условиях неоднозначно.

Например, особенностью современной отсадочной машины является большое число управляющих воздействий, к которым относятся нагрузка (G),

расход транспортной и подситной воды (Q_T , Q_P), расход воздуха (Q_B), уровень постели (L_n), частота амплитуда пульсации постели (отсадочного отделения) (f_n , A_n). Входные возмущения связаны в основном с переменным характером свойств сырья. Это – концентрация руды в обогащаемом материале, ситовый и фракционный состав исходной руды [12] ($Q_{ис}$, C , F). Управляющие, возмущающие и выходные переменные отсадочной машины представлены на рисунке 1.2.

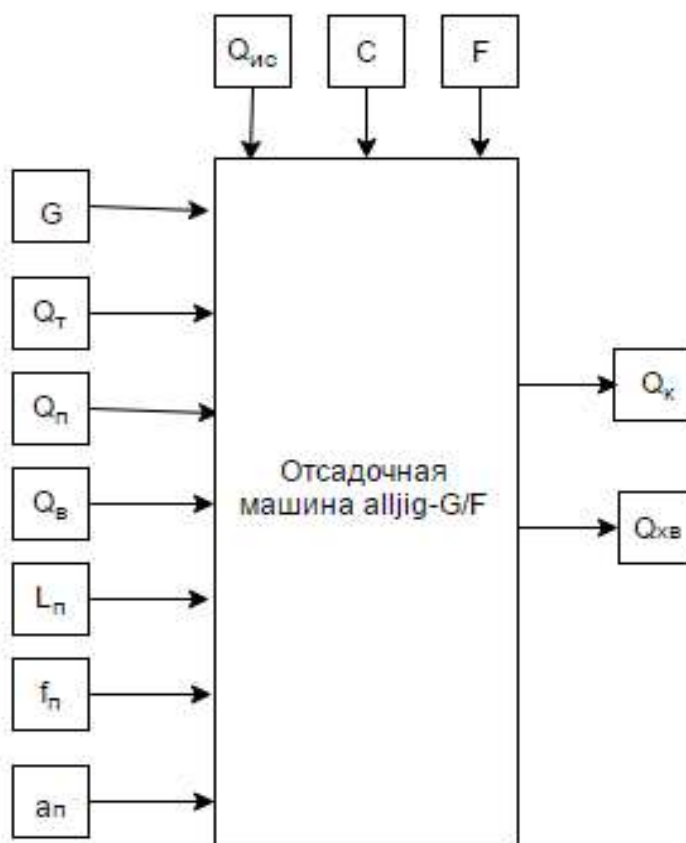


Рисунок 1.2 – Управляющие, возмущающие и выходные переменные отсадочной машины

Таким образом, можно выделить две основные особенности процесса гравитационного обогащения руды:

- 1) отсутствие единого представления о механизме расслоения материала под действием гравитационного поля,
- 2) высокие технологические показатели обогащения в процессе отсадки зависят от многочисленных факторов, как внутренних, связанных с физическими свойствами обогащаемого сырья, так и с внешними, например, технологические переменные, такие как уровень (толщина) естественной постели, частота пульсации, расход подрешетной воды, скорость вращения импеллера и т.п.

1.3 Современное состояние систем управления процессами гравитационного обогащения

Аппараты гравитационного обогащения нашли широкое применение на обогатительных фабриках как Казахстана, так и стран СНГ. Более того, большинство из них оснащены системами автоматического управления, базирующимися на современных средствах автоматизации. Но важным фактором является то, что системы управления данными аппаратами представляют собой системы автоматизации с набором контрольно–измерительного и регулирующего оборудования, обеспечивающего дистанционный контроль. Но принятие решений относительно управления процессом остается за человеком. При этом невозможно добиться максимальных технологических показатели обогащения, так как качество управленческих решений зависит от компетентности технолога. В связи с этим основная идея диссертационной работы является разработка интеллектуальной системы управления процессом гравитационного обогащения.

Основные научные разработки в данной области проводятся для процесса отсадки угольной промышленности [15–19].

В работе [18] рассмотрено применение искусственной нейронной сети (ANN) для оптимизации процесса отсадки мелкосортного коксового угля. Разработанная модель искусственной нейронной сети (ANN) используется для определения воспламеняемости и концентрации золы в концентрате. Архитектура ANN состоит из трех слоев (вход – скрытый – вывод). Алгоритм обратного распространения ошибки (back propagation algorithm) использовался для обучения модели ANN. Было замечено, что предсказанные значения по модели ANN хорошо согласуются с экспериментальными результатами.

Работа [19] посвящена анализу переменных процесса отсадки каменного угля, чтобы установить их влияние на производительность отсадочной машины с точки зрения выхода золы и чистого угля. Используется метод трехфакторного трехуровневого дизайна Vox–Behnken. Было обнаружено, что высота слоя была наиболее значимым параметром, влияющим на качество обогащения каменного угля. Можно снизить содержание золы с 24,32% до 16,55%.

Но применить данные исследования к процессам отсадки руды невозможно, так как процессы не являются идентичными и имеют ряд отличий:

- в процессе отсадки руды обогащаемый материал имеет более мелкий и тонкий класс;
- в процессе отсадки угля в верхнем слое концентрируются частицы полезного компонента, в нижнем – тяжёлые частицы, которые считаются отходами, при отсадки руд, наоборот, в верхнем слое находятся легкие частицы пустой породы (хвосты), в нижнем – концентрируются тяжелые частицы полезного компонента (концентрат);
- значение критерия оптимальности технологического процесса различны.

Таким образом, для повышения показателей обогащения руд необходимы системы управления, учитывающие все особенности технологического процесса и исключают человеческий фактор влияния на него.

Безусловно, в настоящее время в мире ведутся исследования в области как самой технологии, так и интеллектуального управления процессами гравитационного обогащения.

В работе [20] рассмотрен процесс обогащения редкоземельных металлов из месторождения Нечалачо (Канада). Исследования проводились в лаборатории, процесс, включал две различные стадии разделения частиц по силе тяжести – центробежные концентраторы Knelson и Falcon, а затем использовались магнитные сепараторы. Было установлено, что концентратор Knelson с магнитной сепарацией с малой интенсивностью мокрого барабана эффективно концентрирует мелкие классы, а также отбрасывает минералы оксида железа с высоким удельным весом. Исследования были проведены с различными рудами с данного месторождения и при различном сочетании оборудования. Важно отметить, что данное исследование было лабораторным и любое применение его результатов требует дальнейшей проработки.

В работе [21] рассмотрено моделирование и оптимизация параметров для обогащения ультратонких классов хромовой руды методом флокуляции. Хромитные хвосты, образующиеся на заводах по обогащению хромовой руды, содержат значительное количество сверх мелкозернистых частиц. Обычно эти ультра мелкие частицы хрома не могут эффективно обрабатываться с использованием традиционных способов обогащения, из-за ограничений в размере частиц, обрабатываемых этими процессами. Процесс флокуляции может быть одним из альтернативных физико-химических методов для обработки этих сверхмелких частиц. В работе рассмотрен процесс обогащения с использованием хрома и каолина. Исследования проводились на экспериментальной установке Vox Benhenken. Цель исследования: изучить значение рабочих параметров, таких как доза флокулянта, доза диспергатора и рН по откликам процесса селективной флокуляции. Доза рН и флокулянта существенно влияют на процесс селективной флокуляции. Проверка полученных результатов в промышленных условиях не проводилось.

В работе [22,23] рассматривается прогнозирование производительности гравитационного концентратора с использованием искусственных нейронных сетей.

В этом исследовании был использован подход моделирования ANN для прогнозирования производительности стола в зависимости от входных переменных процесса, таких как расход воды на стол (л/мин), угол наклона (градус) и скорость подачи суспензии (л/ч). Прогнозируемое значение, полученное моделью нейронной сети согласуется с экспериментальными значениями с удовлетворительной точностью. Испытание полученных алгоритмов в промышленных условиях не проводилось.

В работе [24] рассмотрены нейронные сети как инструмент работы с небольшими наборами данных экспериментальных или наблюдательных. Искусственные нейронные сети (ANN) обычно рассматриваются как инструменты, которые могут помочь проанализировать причинно-следственные связи в сложных системах в рамках больших данных. Но не менее

важны и инструменты нейронной сети, способные обрабатывать небольшие наборы данных экспериментальных или наблюдательных данных, может помочь в определении основных причинно-следственных факторов, приводящих к изменениям в некоторой переменной, которая определяет поведение сложной системы. В работе описана возможность использования ANN в управлении процессами гравитационного обогащения.

В работе [25] описывается попытка изучения возможности обогащения мелкодисперсных мелочи железной руды в районе Барбила штата Орисса, Индия, с использованием многофазового сепаратора (MGS) после измельчения мелочей –10 мм до размера 75 микрон и подготовки гранул подача 65% содержания Те. Для анализа эффективности обогащения использовался метод математического моделирования искусственной нейронной сети (ANN). Была разработана трехслойная нейронная сеть с обратным распространением ошибки, учитывающая три значимых параметра MGS, главным образом барабанный наклон, скорость барабана и амплитуду пульсации (входные переменные), были оценены показатели обогащения и разделения (выходные переменные). Прогнозируемое значение, полученное ANN хорошо согласуется с экспериментальными значениями.

В работах [26–29] рассмотрен вопрос применения интеллектуальных технологий к процессам флотации. Рассмотрены нейронные, гибридные алгоритмы определения отдельных переменных процесса. В целом создание систем управления не рассматривается.

Таким образом, анализ научной литературы в области применения интеллектуальных технологий применительно к процессам гравитационного обогащения, позволяет сделать следующие выводы:

- исследования, которые проводятся в области технологий гравитационного обогащения, в основном ориентированы на обогащение углей и добываемой руды (не техногенного сырья);
- практически все исследования проводятся в лабораториях, в которых исключены возмущения и неопределенность в технологическом процессе;
- для разработки алгоритмов управления используются один из методов искусственного интеллекта, например, нейронные сети, нет сравнений с другими методами (нечеткой логики и гибридных сетей);
- использование интеллектуальных методов ограничивается локальным прогнозированием ключевой переменной обогащения;
- не обнаружено системного интеллектуального подхода к управлению процессами гравитационного обогащения руды.

1.4 Технологические показатели обогащения при существующих системах управления процессом гравитационного обогащения

Как было указано в разделе 1.3 обогатительные предприятия оснащены системами автоматизации, которые не обеспечивают максимальные показатели обогащения. Для оценки финансовых потерь предлагается проанализировать технологические данные работы одного из объектов исследования – отсадочной

машины сепараторного типа. Данные для расчета взяты из усредненных данных работы гравитационных аппаратов, на примере обогащения хрома. Входным продуктом отсадочной машины является руда класса +2...–10 мм с содержанием хрома около 35%. Выходными продуктами являются концентрат класса +5...–10 мм с содержанием хрома 48%, концентрат класса +0...–5 мм с содержанием хрома 52% и хвосты с содержанием хрома менее 3% (допускается технологическим регламентом).

Данные по количеству входных и выходных продуктов представлены в таблице 1.2. Данные взяты за 3 суток и соответственно, 9 смен.

Таблица 1.2 – Усредненные данные по хвостам 2–10 мм

Сутки	Смена	Количество материала, Q_M , кг	Содержание хрома, Q_{Cr} , %
1	1	16000	6
	2	29000	21,25
	3	42000	9
2	1	33000	7
	2	32000	6
	3	40000	11
3	1	35000	8
	2	29000	12
	3	40000	11

Расчет полных потерь ($Q_{П Cr}$) хрома проведен по формуле:

$$Q_{П} = \frac{Q_M * Q_{Cr}}{100} \quad (1.1)$$

где, Q_M – количество материала, произведенного за смену, [кг]; Q_{Cr} – содержание хрома, [%].

Нужно учесть, содержание хрома в хвостах в количестве 3% считается допустимым технологически регламентом, следовательно при расчете потерь необходимо учитывать:

$$Q'_{Cr} = Q_{Cr} - 3 \quad (1.2)$$

с учетом (11) формула (10) имеет вид:

$$Q_{\Pi'} = \frac{Q_M * Q'_{Cr}}{100} \quad (1.3)$$

где, Q_M – количество материала, произведенного за смену, [кг]; Q'_{Cr} – потери концентрата, [%].

Потери ценного компонента за каждую смену и суммарные потери представлены в таблице 1.3

Таблица 1.3 – Потери концентрата в хвостах

Сутки	Смена	Потери $Q_{\Pi Cr}$, кг
1	1	480
	2	5290
	3	2520
2	1	1320
	2	960
	3	3200
3	1	1750
	2	2610
	3	3200
Суммарные потери, $Q_{\text{Псум Cr}}$, Т		21330

Учитывая, среднюю стоимость хромового концентрата на мировом рынке [30], которая составляет 1140\$ за тонну, средние потери за 1 смену составят:

$$Q_{\$} = \frac{Q_{\text{Псум Cr}} * P_{Cr}}{3} \quad (1.4)$$

где, $Q_{\text{Псум Cr}}$ – суммарные потери хрома за 3 смены, [кг]; P_{Cr} – цена 1 кг хрома, [\$].

Используя формулу 1.4, вычислена стоимость хрома, потерянного при существующей систем управления. Общая сумма составляет $Q_{\text{з}} = 8105$ \$.

Таким образом, анализ усредненных данных показывает, что существующие системы управления не обеспечивают максимально возможные показатели обогащения в аппаратах гравитационного обогащения.

Выводы по первому разделу

В первом разделе приведено описание процессов гравитационного обогащения в отсадочной машине сепараторного типа и центробежном концентраторе. Процессы, протекающие в этих аппаратах обогащения, являются многомерными и многосвязными, принятие управленческих решений остается за человеком. В следствии чего существующие системы управления не способны обеспечить максимальные показатели обогащения. Представлен уровень современного состояния вопроса в области применения интеллектуальных технологий к процессам гравитационного обогащения. По результатам первого разработка и исследование интеллектуальной системы управления процессом гравитационного обогащения руды является актуальной задачей. Ввиду того, что существующие исследования не учитывают специфику процессов гравитационного обогащения руды в реальных производственных условиях и предполагают локальное применение разработанных алгоритмов.

2 АНАЛИЗ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПРОЦЕССОВ ГРАВИТАЦИОННОГО ОБОГАЩЕНИЯ РУДЫ

Для разработки модели движения частиц в гравитационном поле отсадочной машины и определения ключевых переменных процессов гравитационного обогащения в исследуемых аппаратах необходимо рассмотреть их как объекты управления. Произвести анализ существующих математических моделей процессов.

2.1 Математические модели движения частиц в аппаратах гравитационного обогащения

В разделе 1 были указаны особенности процесса разделения руды в гравитационных аппаратах. Качество разделения зависит от многих переменных, которые находятся в неоднозначной зависимости друг от друга. Следовательно, разработать полную математическую модель движения частиц в процессе гравитационного обогащения весьма сложно, тем более, что необходимо учитывать стохастический состав руды, то есть существует неопределенность объемной доли концентрата и пустой породы.

Ниже приведен анализ разработанных математических моделях движения частиц в исследуемых аппаратах обогащения.

2.2 Математические модели движения частиц в отсадочной машине сепараторного типа

В работе [30] рассматривается движение частицы, которая находится в емкости, ограниченной снизу непроницаемой стенкой, в окружении других частиц меньшей плотности.

При решении этой задачи получается следующее аналитическое выражение:

$$n(t, x) = \frac{1}{\sqrt{4\pi Dt}} \left(\exp\left(-\frac{(x-h)^2}{4Dt}\right) + \exp\left(-\frac{(x+h)^2}{4Dt}\right) \right) \exp\left(-\frac{(mg)^2 t}{4k\alpha}\right) \exp\left(-\frac{mg(x-h)}{2k}\right) + \frac{mg}{k} \exp\left(-\frac{mgx}{k}\right) \frac{1}{\sqrt{4\pi Dt}} \int_{-\infty}^{\frac{mgt}{\alpha} = x-h} \exp\left(-\frac{\eta^2}{4Dt}\right) d\eta \quad (2.1)$$

где n – концентрация частиц [м^{-3}]; D – коэффициент макродиффузии; x – горизонтальная координата емкости [м]; t – время [с]; h – вертикальная координата [м]; m – масса частицы [кг]; g – ускорение свободного падения [$\text{м}/\text{с}^2$]; η – коэффициент вязкости среды.

На рисунке 2.1 представлены графики зависимостей, согласно в различные моменты времени, по горизонтальной оси направлена высота емкости с шарами.

Распределение вероятностей местонахождения частицы сначала расплывается, двигаясь вниз, и, в конце концов, преобразуется в распределение Больцмана. Изложенная задача эквивалентна задаче когда множество N частиц с плотностью ρ_0 распределены на одной плоскости на некоторой высоте h . Тогда распределения количества частиц будет описываться кривой, при этом количество частиц будет пропорционально площади фигуры, заключенной внутри области граничащей горизонтальной осью и кривой на рисунке 2.3 [30].

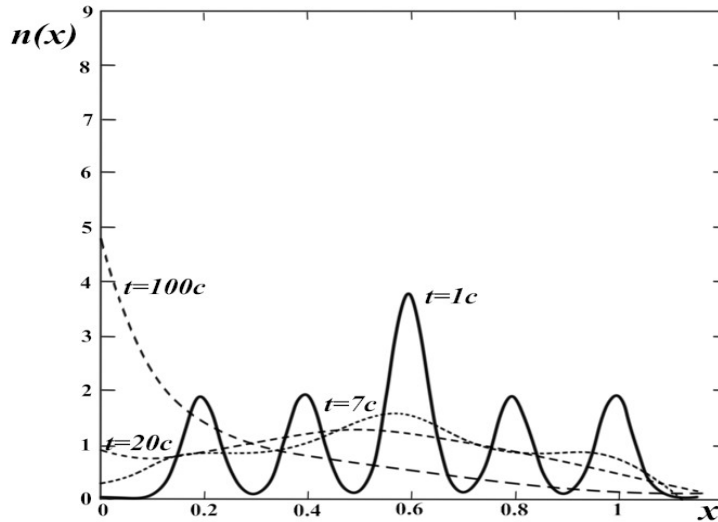


Рисунок 2.1 – Распределения вероятностей нахождения пробной частицы в зависимости от времени в камере отсадочной машины

Но данная модель не учитывает, что добываемые частицы тяжелых минералов, например, хромовая руда находятся в объеме отсадочной постели случайным образом. В данной модели принято допущение, что при условии большого количества частиц концентрата, первоначальное распределение будет приблизительно равномерным. Равномерно распределенная система представлена на рисунке 2.2.

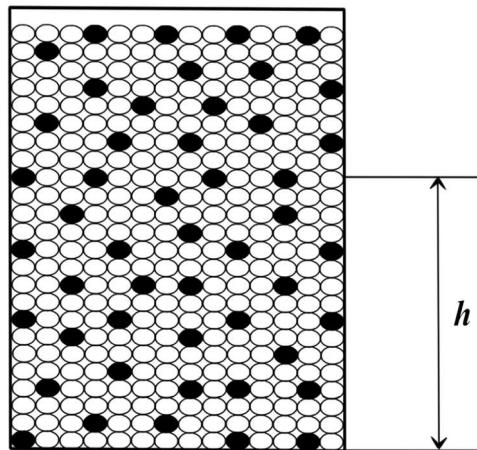


Рисунок 2.2 – Равномерная распределенная система

Для такой системы суммарное распределение будет равно:

$$n(t, x) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N n_i(t, x) \quad (2.2)$$

2.3 Математические модели движения частиц в центробежном концентраторе

Для определения переменных, которыми необходимо управлять в процессе обогащения руды в центробежном концентраторе необходимо проанализировать существующие модели движения частиц внутри этих аппаратов. Воздействия на эти переменные позволят получить более высокие технологические показатели разделения минералов в центробежных сепараторах.

На сегодняшний день учёные уделяют большое внимание изучению гидродинамики потоков в центробежных сепараторах разных конструкций, описанию механизмов разделения минеральных частиц в чаше сепаратора и получению моделей, основанных на расчёте скоростей перемещения частиц в центробежном сепараторе [31].

Анализ литературных источников [32–35] показал, что повышение эффективности разделения минералов в центробежных сепараторах зависит от многих факторов, которые находятся в сложном взаимодействии друг с другом. При математическом моделировании процесса центробежной сепарации необходимо учитывать два фактора разделения руды:

- движение жидкости во вращающемся центробежном поле;
- движение частиц в центробежном поле (свободное);
- движения частиц в центробежном поле (стесненное) [36].

Описание движения жидкости во вращающемся центробежном поле является сложной задачей. В многих работах эта задача решена с помощью модели эффективно–вязкого течения, выражения для расчёта тангенциальной и радиальной скоростей жидкости получены при решении системы дифференциальных уравнений Навье–Стокса с постоянным коэффициентом турбулентной вязкости [36].

В векторной форме уравнение Навье–Стокса имеет вид:

$$\frac{\partial v}{\partial t} = F \frac{1}{\rho} \text{grad}P + \nabla^2 \vec{v}, \quad (2.3)$$

$$\frac{dv}{dt} = \left(\frac{dv_x}{dt} + v_x \frac{dv_x}{dx} + v_y \frac{dv_x}{dy} + v_z \frac{dv_x}{dz} \right) i + \left(\frac{dv_y}{dt} + v_x \frac{dv_y}{dx} + v_y \frac{dv_y}{dy} + v_z \frac{dv_y}{dz} \right) j$$

$$+ \left(\frac{dv_z}{dt} + v_x \frac{dv_z}{dx} + v_y \frac{dv_z}{dy} + v_z \frac{dv_z}{dz} \right) k$$

$$\vec{F} = Xi + Yj + Zk;$$

$$\text{grad } P = \frac{\partial p}{\partial x} i + \frac{\partial p}{\partial y} j + \frac{\partial p}{\partial z} k;$$

$$\nabla^2 v = \left(\frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} \right) i + \left(\frac{\partial^2 v_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial x^2} \right) j$$

$$+ \left(\frac{\partial^2 v_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial x^2} \right) k$$

где ∇ – оператор набла; t – время [с]; ρ – плотность [кг/м³]; P – давление [Па]; \vec{v} – векторное поле скорости; \vec{F} – векторное поле массовых сил.

Такова математическая модель движения жидкости в центробежном поле.

Нахождение величины фактора разделения осуществляется с помощью математической модели свободного движения минеральных частиц.

Автором [37] выполнен анализ восемнадцати формул для расчётов скоростей свободного падения частиц шарообразной формы, выведенных разными авторами, среди которых широко известные формулы Стокса, Аллена, Риттингера, а также новые формулы, такие как формула Богдановича, Меринова, Адамова. Установлено, что наиболее точными и удобными для расчётов являются формулы Меринова, Розенбаума–Тодеса, Богдановича и Адамова [36].

Богдановичем А.В. предложена формула для определения конечных скоростей свободного падения твёрдых шаровых частиц в среде:

$$v = \frac{\vartheta}{d} \frac{A_r}{(17,4 + 0,5\sqrt{A_r} + 0,7^3\sqrt{A_r})} \quad (2.4)$$

где A_r – критерий Архимеда.

$$A_r = d^3 * \frac{(\rho_T - \rho)}{\rho} * \frac{g}{\vartheta^2}, \quad (2.5)$$

где d – диаметр шаровой частицы [м]; ρ_T и ρ – плотности частицы и среды [г/см³]; g – ускорение силы тяжести [м/с²]; ϑ – кинематическая вязкость [м²/с].

Данная формула позволила её автору проанализировать особенности поведения частиц в центробежном поле разной интенсивности, возрастание скоростей падения частиц в котором приводит к росту точности разделения и к повышению производительности обогатительных машин [36].

График позволяет сделать вывод, что ускорение центробежного поля G оказывает большое влияние на процесс центробежной сепарации, так как с увеличением G скорость движения частицы концентрата значительно больше

скорости частицы пустой породы. Соответственно, концентрат достигает выпускных пазов сепаратора значительно быстрее [36].

Но важно отметить, что качественный и гранулометрический состав исходного сырья имеет стохастический характер, следовательно, модели, построенные формулах подобных (2.4), будут весьма приближенными. Кроме того, необходимо учитывать особенности движения пульпы в центробежном сепараторе [35].

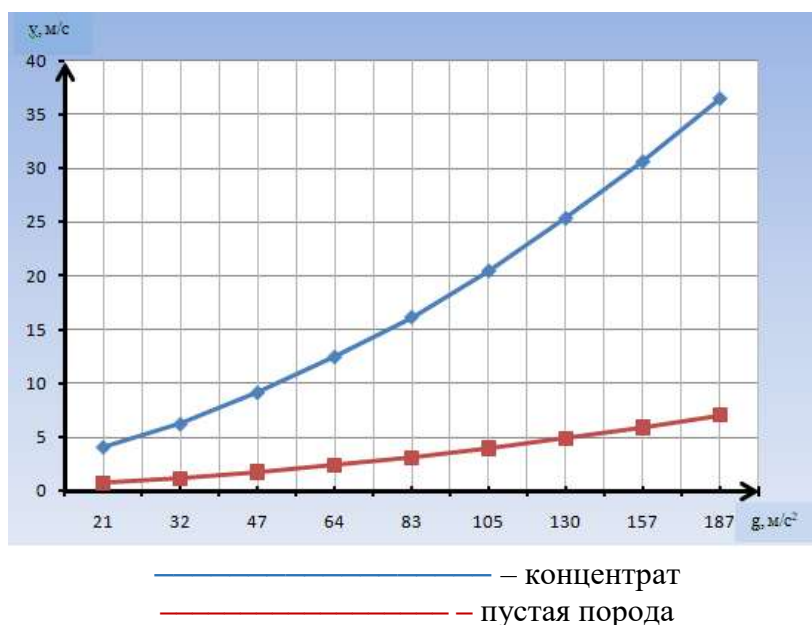
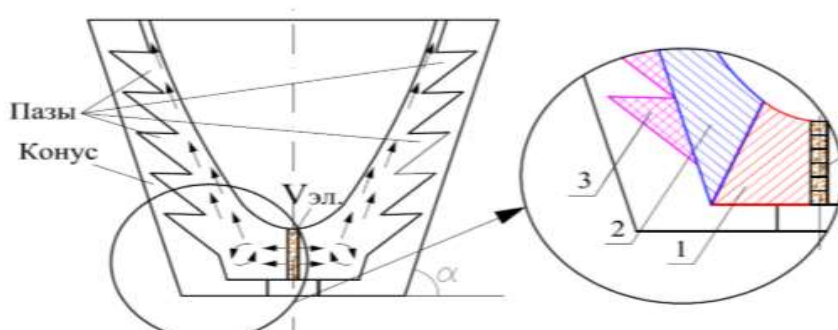


Рисунок 2.3 Скорость движения частиц руды в сепараторе в зависимости от центробежного ускорения

Учитывая гидродинамические особенности движения пульпы в конусе центробежного сепаратора, можно выделить следующие зоны:

- зона горизонтального потока пульпы;
- зона восходящего потока пульпы;
- зона движения частиц в пазах центробежного сепаратора (рисунок 2.4).



1–зона горизонтального потока пульпы; 2 – зона восходящего потока пульпы; 3 – зона движения частиц в пазах

Рисунок 2.4 – Зоны движения частиц в центробежном сепараторе

Подробно движение частиц пульпы в каждой зоне рассмотрены в работе [38]. Там же представлены формулы расчета скоростей свободного и стесненного движения частиц в каждой зоне.

Таким образом, на технологический процесс в центробежном концентрате оказывает влияние множество частиц с разными свойствами, гидродинамика потоков внутри сепаратора, стохастичность состава, поступающей пульпы [39, 40].

2.4 Разработка математической модели движения частиц концентрата и пустой породы руды в отсадочной машине сепараторного типа

В связи с тем, что проанализированные модели имеют ряд допущений и связаны с исследованием движения частиц в лабораторных условиях предлагается разработать и исследовать математическую модель движение частиц концентрата и пустой породы в центробежном поле отсадочной машины, которая позволит определить влияние частоты пульсации на траектории движения частиц концентрата и пустой породы.

Для построения модели предлагается использовать скоростную гипотезу Риттенгера, согласно которой уравнение движения отдельной частицы шарообразной формы может быть представлено в виде:

$$m \frac{dv}{dt} = G_0 \pm P \pm P_i \pm P_M \quad (2.6)$$

где m — масса частицы, [кг]; v — скорость частицы, [м/с]; G_0 — сила тяжести частицы в воде, [Н]; P — сила динамического сопротивления среды при стесненном падении, [Н]; P_i — дополнительная выталкивающая сила, зависящая от ускорения потока воды, [Н]; P_M — сила механического взаимодействия частиц, [Н].

Сила P_i мала по сравнению с силой тяжести частицы G_0 . Поэтому можно допустить $P_i \approx 0, P_M \approx 0$. Иными словами, скоростная гипотеза рассматривает движение частицы под действием всех физических сил, приложенных к ней.

Постель отсадочной машины приводится в колебательное движение с определенной частотой ω_0 и амплитудой a_0 . На перемещение частиц в отсадочном отделении, влияют окружающие частицы, движущиеся под действием внешних периодических сил. Эти частицы имеют кинетическую энергию в соответствии с колебательными движениями среды. На частицу будет действовать следующие силы: F_A — сила Архимеда, F_{mg} — сила тяжести и силы сопротивления F_s . Согласно скоростной гипотезе механизма отсадки F_A допустимо приравнять к 0, но в данной модели она принята к расчету, что повышает точность модели. Баланс сил действующих на данную частицу [41]:

$$ma = F_s + F_A + F_{mg} \quad (2.7)$$

где m — масса частицы, [кг]; a — ускорение частицы [$\text{м}/\text{с}^2$].

Для построения математической модели вводятся следующие обозначения: $a=\dot{x}_2$ — ускорение частицы, $v=x_2$ — скорость частицы, $y=x_1$ — координата частицы в момент времени t . В выражение (2.5) подставляются значения всех сил, в результате получено выражение:

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = \frac{1}{m} (\rho_B g V_q - \frac{m\omega_0}{2\pi} x_2 - 6\pi\eta r_0 x_2 - mg) \end{array} \right\} \quad (2.8)$$

где: m — масса частицы, [кг], ρ_B — плотность воды, [$\text{кг}/\text{м}^3$], V_q — объем частицы, [м^3], g — ускорение свободного падения, [$\text{м}/\text{с}^2$], η — коэффициент вязкости среды, [-], ω_0 — угловая частота колебаний.

Частота пульсации отсадочной машины n связана с угловой частотой колебаний естественной постели ω_0 следующим отношением:

$$n = \frac{\omega_0}{2\pi}. \quad (2.9)$$

При моделировании приняты следующие расчетные данные:

- $\rho_B = 1000 \text{ кг}/\text{м}^3$;
- $V_q = 113 \cdot 10^{-9} \text{ м}^3$;
- $g = 9.8 \text{ м}/\text{с}^2$;
- $\eta = 1 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$;
- $r_0 = 0,0025 \text{ м}$;
- масса частицы концентрата принята – $0,001 \text{ кг}$;
- масса частицы пустой породы – $0,0003 \text{ г}$.

Модель движения частиц в Simulink Matlab представлена на рисунке 2.5.

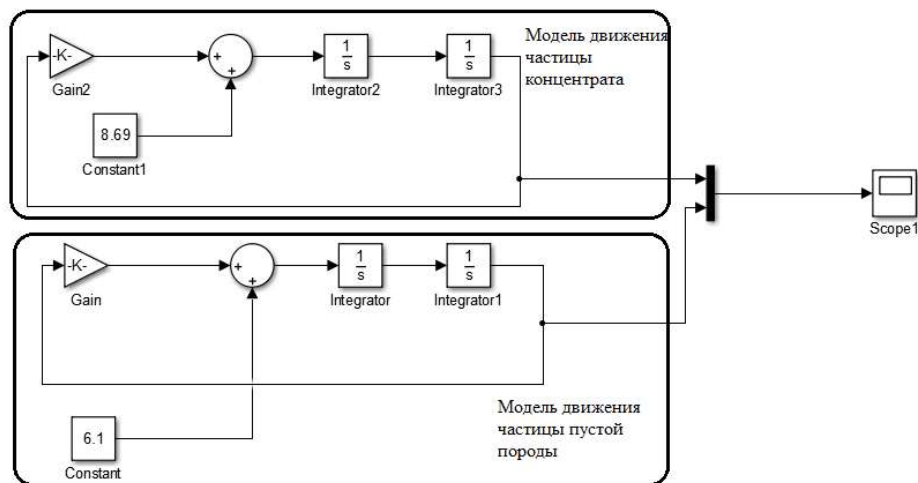


Рисунок 2.5 – Модель для исследования зависимости траектории движения легкой и тяжелой частиц в отсадочной машине.

Нижняя схема моделирует движение легкой частицы (пустая порода), а верхняя – тяжелой (концентрат). Результаты выведены на один график для наглядного представления.

Для исследования влияние частоты пульсации отсадочного отделения ОМ были заданы значения частоты пульсации $n=30, 60, 70, 80 \text{ мин}^{-1}$. В результате моделирования получены графики траектории движения частиц концентрата и пустой породы. В итоге получены графики траектории движения, представленные на рисунках 2.6–2.9.

Введено значение частоты пульсации $n=30 \text{ мин}^{-1}$

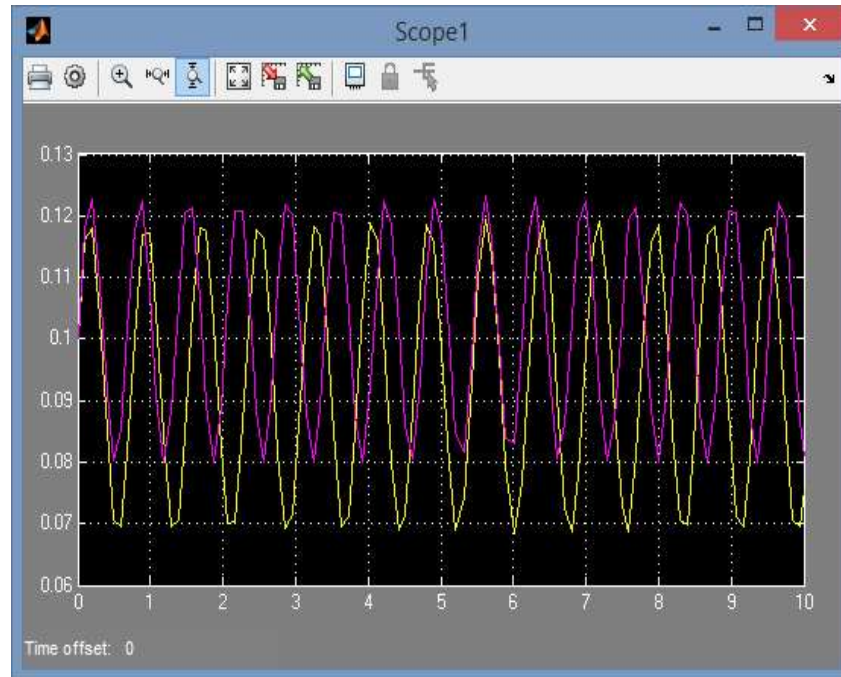


Рисунок 2.6 – Траектория движения частицы при частоте $n=30 \text{ мин}^{-1}$

Введено значение частоты пульсации $n=60 \text{ мин}^{-1}$

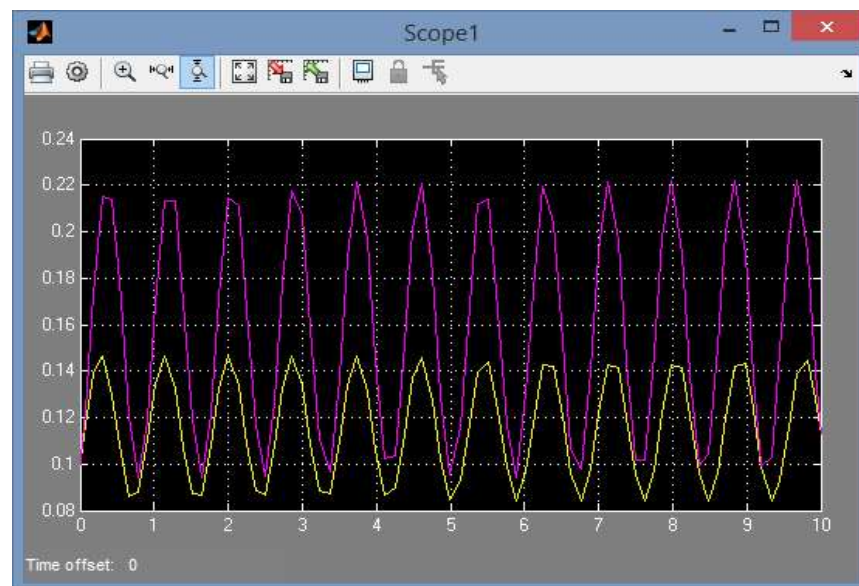


Рисунок 2.7 – Траектория движения частицы при частоте $n=60 \text{ мин}^{-1}$

Введено значение частоты пульсации $n=70 \text{ мин}^{-1}$

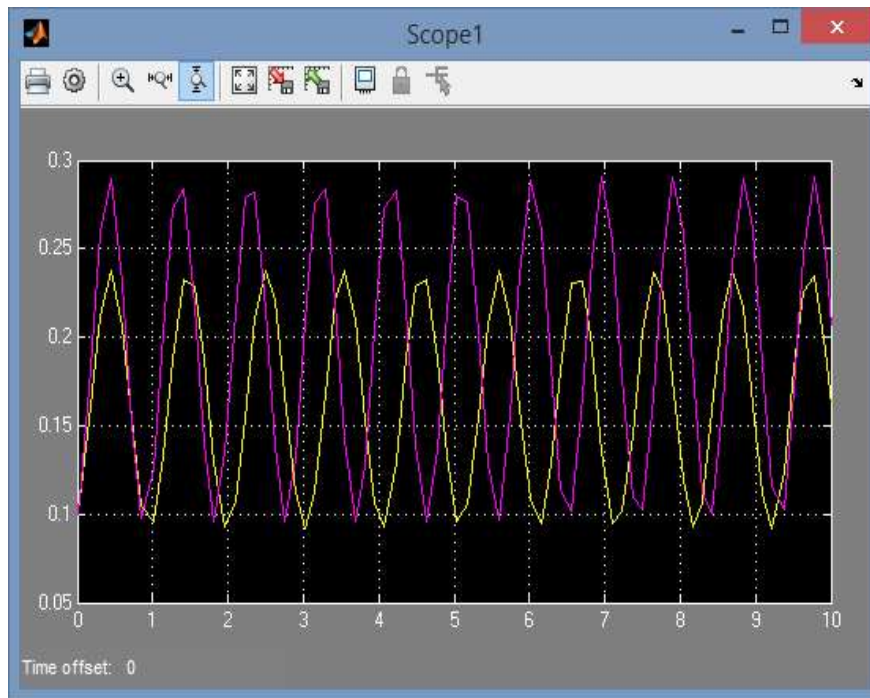


Рисунок 2.8 – Траектория движения частицы при частоте $n=70 \text{ мин}^{-1}$

Введено значение частоты пульсации $n=70 \text{ мин}^{-1}$

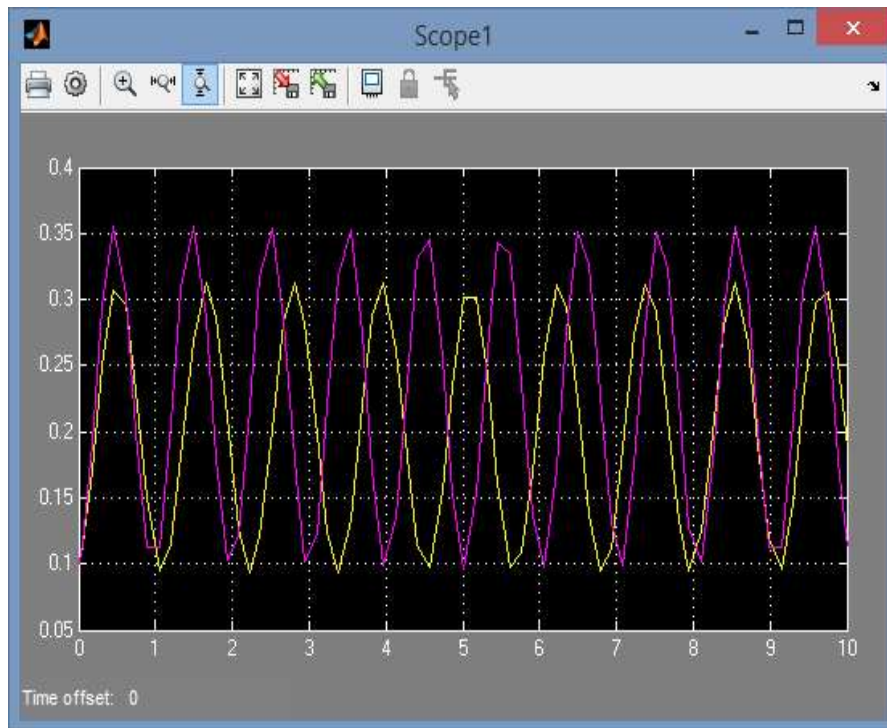


Рисунок 2.9 – Траектория движения частицы при частоте $n=80 \text{ мин}^{-1}$

Анализ полученных графиков показывает, что при низкой частоте пульсации и концентрат и пустая порода остаются на дне отсадочного отделения, соответственно обе фракции попадают в концентрат, снижая его качество. С увеличением частоты пульсации происходит разделение – рисунок 2.6. Легкая частица (график с большей амплитудой) имеет амплитуду колебания около 25 см, при этом тяжелая частица не поднимается выше 14 см, в результате чего легкие с потоком воды уходят в отходы, тяжелые осаживаются и попадают в бункер. Но с увеличением частоты амплитуда обеих частиц увеличивается в соответствии с рисунками 2.7 и 2.8, что приводит к попаданию концентрата в отходы [14].

Модель описывает движение двух частиц. Но так как отсадка является массовым процессом, для повышения показателей обогащения необходимо обратить внимание на соотношение между скоростью падения частиц v , их крупностью d и плотностью δ . Данные соотношения представлены на рисунке 2.9.

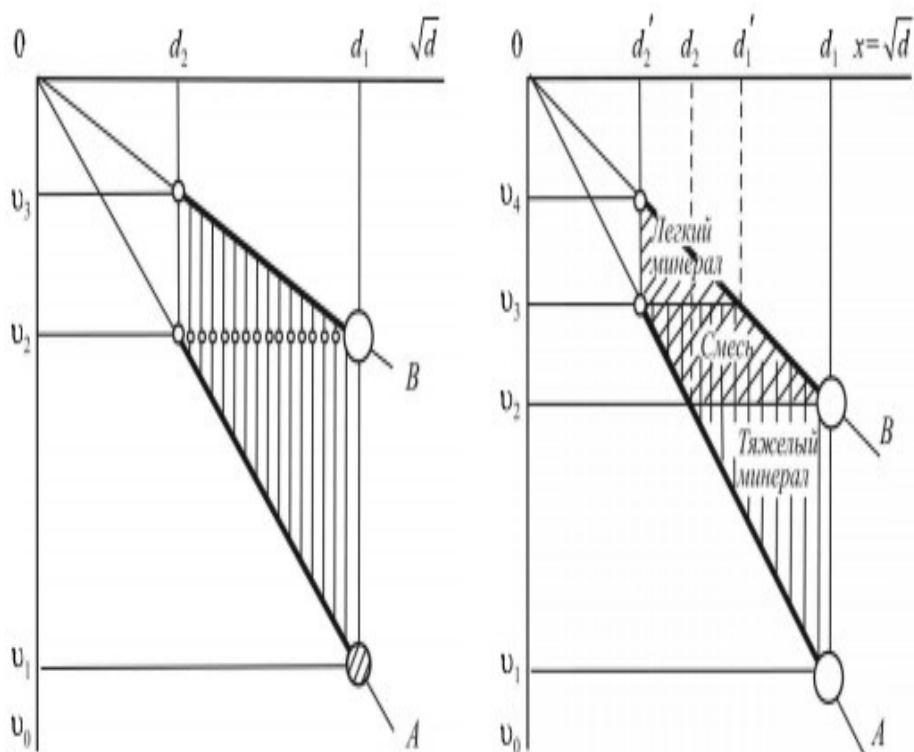


Рисунок 2.9 – Диаграмма скоростей падения зерен двух частиц

На рисунке скорость падения тяжелой частицы отражена прямой A , а легкой — прямой B . Из диаграммы видно, что зерна наибольшего диаметра d_1 двух частиц с плотностями δ_1 и δ_2 будут иметь разные скорости падения. Скорость падения легкой частицы (v) будет меньше скорости падения тяжелой (v_1), а тяжелая частица размером d_2 имеет ту же скорость падения, что и легкая размером d_1 — это равнопадающие частицы.

Вместе с тем тяжелые частицы, которые меньше, чем d_2 , будут иметь меньшие скорости падения, чем v_1 , и выпадут позднее легких размером d_1 . В

результате не будет нужного расслоения, поскольку между слоями легких и тяжелых частиц будет образован промежуточный слой смешанных частиц. Следовательно, для эффективного расслоения частиц необходимо грохочение исходного материала перед отсадкой с модулем, равным коэффициенту равнопадаемости [42].

Иными словами, на отсадочную машину должен поступать материал примерно одного класса крупности. Если обозначить диаметр частиц породы и концентрата d_p и d_k , а их массу соответственно m_p и m_k , то для обеспечения максимальных показателей обогащения, должно выполняться условия для каждой частицы: при $d_p \gg d_k$, $m_k > m_p$.

Таким образом, разработанная математическая модель движения частиц концентрата и пустой породы будет использована для тестирования режимов работы отсадочной машины.

2.5 Характеристика аппаратов гравитационного обогащения как объектов исследования

Объектами исследования в данной работе являются два аппарата гравитационного обогащения:

- отсадочная машина сепараторного типа alljig–G/F;
- центробежный концентратор с постоянной загрузкой С1000.

Предлагается рассмотреть эти аппараты как объекты управления.

Отсадочная машина – аппарат гравитационного обогащения, имеющая в своем составе специальное оборудование (решето, камера, выпускная емкость), принцип действия которой основан на разделении смеси частиц концентрата и пустой породы по плотностям под воздействием пульсирующего потока воды или воздуха.

Отсадочная машина сепараторного типа alljig–G/F применяется для обогащения хромовой руды мелкого класса (+ 2...–10мм). Технологическая схема со вспомогательным оборудованием представлена на рисунке 2.10.

В данной отсадочной машине применяется гидравлическая отсадка, то есть в нее непрерывно подается вода, проходящая через слой руды (постель). Исходный материал (хромовая руда класс 2–10 мм) с содержанием хрома 27–44% по конвейеру поступает в отсадочное отделение 5, которое разделено на три камеры. Первая и вторая камеры имеют полиуретановые сита с ячейками 5 мм и устройство разгрузки, куда осаживается естественная постель; сита третьей камеры имеют искусственную постель. Искусственная постель исключает попадание мелких легких фракций под решето отсадочной машины и как следствие, легкий пустой компонент руды не попадает к тяжелым фракциям концентрата. Пульсации в отсадочном отделении создаются роторно–поршневыми клапанами 3, за счет периодической подачи сжатого воздуха. За счет пульсаций руда разделяется на легкие (хвосты) и тяжелые фракции (концентрат). Легкие вместе с водой уходят через сливной порог по отборнику. Тяжелые осаживаются в отсадочном отделении и через сита (класс 2–5 мм) и устройство разгрузки (по сигналу датчика уровня постели 6), оснащенное

шиберно–ножевой задвижкой (класс 5–10мм), приводимую в действие гидравлическими клапанами 7 попадают в концентрационный бункер отсадочной машины 8. Из бункера через пережимной клапан 9 концентрат, с содержанием хрома 38–55% попадает на конвейер готового продукта. Вспомогательным оборудованием отсадочной машины являются воздуходувка 1 с двигателем 2 мощностью 90 кВт и гидравлический блок питания ГБП с двигателем 11 мощностью 5,5 кВт. Воздуходувка 1 необходима для нагнетания воздуха, который используется роторно–поршневыми клапанами 3 для создания пульсации в отсадочном отделении. Гидравлический блок питания ГБП для питания приводов гидравлических клапанов [43].

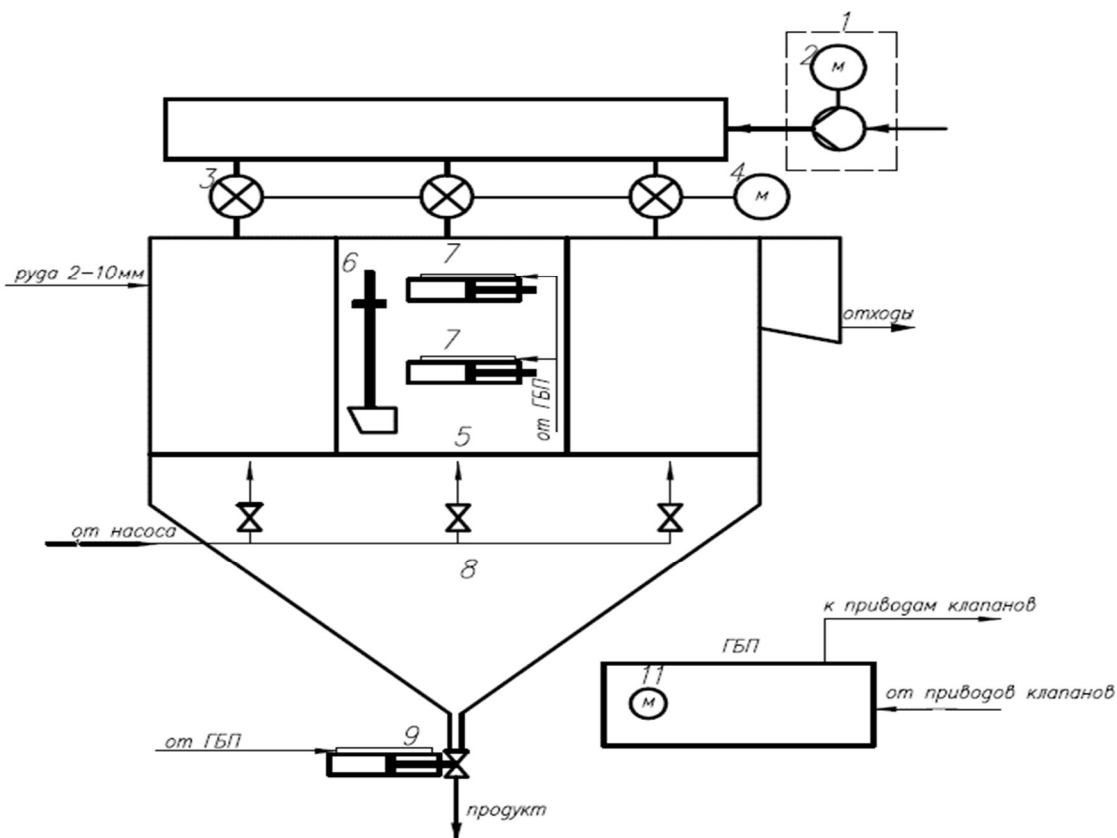


Рисунок 2.10 – Отсадочная машина сепараторного типа

Среднесуточная производительность отсадочной машины сепараторного типа на фабрике обогащения и окомкования руды ДГОК АО «ТНК Казхром» составляет 50 тонн концентрата класса +2...–10.

Центробежный концентратор – аппарат гравитационного обогащения, в котором разделение частиц происходит под действием центробежной силы. Концентратор С1000 – концентратор с постоянной разгрузкой, который не потребляет дополнительной разрыхляющей воды, применяются для извлечения тонких металлов и минералов из хвостов, или для предварительной концентрации питания обогатительных фабрик (как исходных руд, так и старых хвостовых отвалов) [44].

Частицы материала питания подвергаются гравитационной силе до 300 G и разделяются по удельному весу в процессе плавного движения по стенке ротора. Наиболее тяжелая часть постоянно выводится регулируемым потоком через серию разгрузочных воронок и дроссельных форсунок.

Питание в виде пульпы подается через центральную вертикальную питающую трубу и далее ускоряется импеллером (рисунок 2.11). Быстрое разделение материала по удельному весу происходит во время движения материала в зоне миграции под влиянием обширного центробежного поля. Величина этого поля меняется путем изменения скорости вращения ротора с помощью преобразователя частоты.

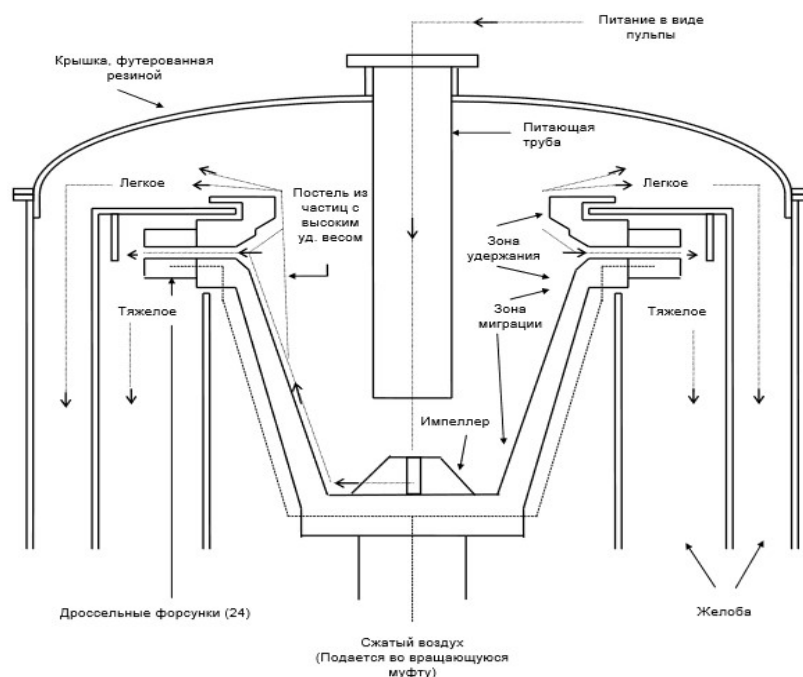


Рисунок 2.11 – Схема процесса обогащения в концентраторе Falcon C1000

В зоне удержания сконцентрированная тяжелая фракция постоянно удаляется через серию портов, равномерно распределенных по окружности ротора. Поток тяжелой фракции контролируется дроссельными форсунками. Тяжелая фракция накапливается в кольцевых желобах, расположенных друг напротив друга в точках разгрузки концентрата. Для разжижения потока тяжелой фракции, который обычно достигает 70% по твердому, в желоб может подаваться вода. Легкая фракция и большая часть воды выходит в верхнюю часть и разгружается во внешний круговой желоб и выводится из машины [44].

2.6 Идентификация ключевых переменных процессов гравитационного обогащения в исследуемых аппаратах

Определение ключевых переменных процессов в исследуемых аппаратах гравитационного обогащения выполнено на основании исследований в разделе 2.1 и 2.2. График зависимости скорости движения частиц руды в сепараторе от

выходных переменных процесса не представляется возможным. Поэтому синтезировать систему управления классическим методом с использованием математической модели процесса не представляется возможным.

Целью настоящей работы является разработка иерархической интеллектуальной системы управления, обеспечивающую эффективные режимы работы аппаратов гравитационного обогащения – отсадочная машина сепараторного типа, центробежный концентратор.

На первом, нижнем уровне управления решается задача идентификации руды по гранулометрическому составу и качественному составу.

В качестве критерия управления нижнего уровня выбрана функция цели:

$$F_I = Q_{d_p \gg d_k} \rightarrow \max, \quad (2.10)$$

где $Q_{d_p \gg d_k}$ – количество руды, в которой диаметр частиц пустой породы значительно больше диаметра частиц концентрата.

Постановка задачи на нижнем уровне управления заключается в следующем: обеспечить классификацию руды перед аппаратом гравитационного обогащения таким образом, чтобы частицы были одного класса крупности. Подготовка материала к обогащению отсадкой заключается в предварительном делении его на классы крупности. Каждый из полученных классов обогащается в отсадочных машинах при своих режимах отсадки. Подготовительные операции осуществляются, как правило, на грохотах с орошением водой надрешетного продукта [45]. Данные операции выполняются имеющимся технологическим оборудованием.

На втором уровне (среднем) решается задача оптимального регулирования ключевых переменных технологического аппарата в соответствии со входными переменными процесса.

Для оптимизации процесса гравитационного обогащения в технологических аппаратах примем критерии максимизации концентрации металла (режим максимального содержания) в готовом концентрате, максимизации производительности (режим максимального извлечения) и минимизации концентрации металла в «хвостах». Следовательно, функции цели в зависимости от режима управления будут иметь следующий вид:

$$F_{II.I} = \begin{cases} C_k \rightarrow \max \\ C_w \rightarrow \min \end{cases} \quad \text{– режим максимального содержания} \quad (2.11)$$

$$F_{II.II} = \begin{cases} Q_k \rightarrow \max \\ C_k \rightarrow \text{const} \\ C_w \rightarrow \min \end{cases} \quad \text{– режим максимального извлечения} \quad (2.12)$$

где C_k – концентрация металла в готовом концентрате, [%]; C_w – концентрация металла в «хвостах», [%]; Q_k – количество готового концентрата, [%].

Постановка задачи на среднем уровне управления сводится к поддержанию ключевых переменных на уровне, обеспечивающем максимум критериев 2.11 при режиме режим максимального содержания и 2.12 при режиме максимального извлечения.

На верхнем уровне системы управления решается задача управления технологическим процессом гравитационного обогащения в целом.

Постановка задачи управления верхним уровнем системы сводиться, к тому, что необходимо найти такие режимы гравитационного обогащения, которые обеспечили бы заданный уровень содержание ценного компонента в концентрате и минимальное содержание металла в «хвостах» при режиме максимального извлечения и максимальное содержание металла в концентрате и минимальное содержание в «хвостах» при режиме максимального содержания.

На этом уровне реализуются с помощью интеллектуальных алгоритмов определяются значения ключевых переменных процесса гравитационного обогащения:

- отсадочная машина (частота пульсации и уровень естественной «постели»);
- центробежный сепаратор (частота вращения импеллера и ширина открытия дроссельных форсунок, степень открытия клапана).

Разработка интеллектуальной системы позволит повысить технологические показатели гравитационного обогащения в приведенных выше аппаратах гравитационного обогащения.

Функционирование системы выглядит следующем образом:

нижний уровень управления –

- необходимо реализовать подачу исходной руды на аппараты гравитационного обогащения идентичного гранулометрического состава;
- идентификацию качественного состава исходной руды путем измерения её концентрации в режиме реального времени;
- идентификацию качественного состава готового концентрата и «хвостов» путем измерения его концентрации в режиме реального времени;

средний уровень управления –

- реализовать регулирование ключевых переменных процесса в заданных пределах.

Учитывая, что аппараты гравитационного обогащения оснащены системами автоматизации, задачи нижнего и среднего уровня не рассматриваются в данном исследовании. Их реализация осуществляется с помощью существующих средств автоматизации обогатительных аппаратов. Предметом исследования является верхний уровень системы. В работе [46] произведено исследование модального и нечеткого регулятора для поддержания заданной частоты пульсации отсадочного отделения.

верхний уровень управления –

– управление процессов гравитационного обогащения в целом, включая задачи АСУТП основного и вспомогательного оборудования;

– осуществление выбора режимов обогащения: максимальное извлечение и максимальное содержание;

– определение значений ключевых переменных процесса с помощью интеллектуальных алгоритмов в зависимости от входных переменных;

Разрабатываемая иерархическая система управления обеспечивает контроль за подготовкой исходного сырья для аппаратов гравитационного обогащения, позволит снизить влияние человеческого фактора на процесс управления процессами гравитационного обогащения, и как следствие, обеспечить высокие технологические показатели обогащения – максимальное содержание металла в готовом концентрате и минимальное содержание в отходах («хвостах»). Интеллектуальные алгоритмы, подобно опытным технологам, на основе анализа входных переменных процесса определяют значения выходных переменных процесса. Кроме этого, на верхнем уровне управления будут разработаны алгоритмы для необходимых режимов работы оборудования – максимальное извлечение и максимальное содержание. Реализация данных режимов работы позволит избежать излишних технологических операций по перемешиванию и транспортировке готового концентрата.

Выводы по второму разделу

Во втором разделе приведен анализ математических моделей объектов исследования – отсадочной машины и центробежного сепаратора. Разработана универсальная модель исследования траектории движения частиц концентрата и пустой породы в гравитационном поле отсадочной машины. С учетом сложности идентификации процессов, протекающих в гравитационных аппаратах предложена разработка интеллектуальной системы управления и выполнена постановка задачи для данной системы.

3. РАЗРАБОТКА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ГРАВИТАЦИОННОГО ОБОГАЩЕНИЯ РУДЫ

В разделе будет рассмотрен синтез интеллектуальных моделей (алгоритмов) управления для верхнего уровня системы управления процессом гравитационного обогащения руды – две модели (алгоритма) управления отсадочной машиной: для режима максимального извлечения и режима максимального содержания, один алгоритм для центробежного сепаратора. Данные алгоритмы позволяют формализовать знания опытных технологов и определить значения регулируемых переменных процесса, при которых будут обеспечены максимальные показатели обогащения гравитационных аппаратов.

Интеллектуальные модели управления будут синтезированы с помощью нечеткой логики, нейронных и гибридных сетей. Для получения базы знаний (обучающей выборки) будет предложена методика, позволяющая избежать излишних операций обработки экспертной информации без потери её достоверности.

3.1 Разработка иерархической структуры интеллектуальной системы управления

Основная идея диссертационной работы заключается в разработке интеллектуальной системы управления процессом гравитационного обогащения руды в гравитационных аппаратах – отсадочной машине и центробежном концентраторе, и интеграции их в существующие системы автоматизации.

Иерархическая структура разрабатываемой системы выглядит следующим образом – рисунок 3.1. На рисунке переменные процесса гравитационного обогащения обозначены следующим образом: Q_p – содержание ценного компонента (концентрация) в исходной руде, поступающей на ОМ, %; $Q_{хв1}$ – концентрация хвостов ОМ, %; $Q_{к1}$ – содержание ценного компонента в концентрате ОМ, %; $Q_{п}$ – содержание ценного компонента (концентрация) в пульпе, поступающей на КЦ, %; $Q_{хв2}$ – содержание ценного компонента в легкой фракции ЦК, %; $Q_{к2}$ – содержание ценного компонента в тяжелой фракции ЦК, %; D – плотность пульпы, поступающей на КЦ, кг/м³; L – уровень естественной постели ОМ, см; n_1 – частота пульсации ОМ, Гц; n_2 – частота вращения КЦ, Гц; d – ширина открытия дроссельных форсунок КЦ, мкм, m – степень открытия клапана подачи питания на КЦ, %.

Нижний уровень интегрированной системы обеспечивает получение входной информации для интеллектуальной системы управления. Аппаратная реализация нижнего уровня представлена контрольно-измерительными приборами такими, как концентратометры рентгенофлуоресцентные цеховыми РКЦ–1М, которые измеряют качественный состав как исходного питания на аппараты гравитационного обогащения, так и готового концентрата и хвостов и плотномером Density Pro. Эти переменные процесса гравитационного обогащения являются входными для интеллектуальных моделей (алгоритмов)

определения ключевых переменных процесса обогащения. Измеренные значения поступают на модули ввода ПЛК Simatic S7–300.

Средний уровень интегрированной системы включает в себя ПЛК Simatic S7–300 и исполнительные механизмы, в виде управляемого электропривода (преобразователи частоты и асинхронные двигатели) и позиционеры клапанов.

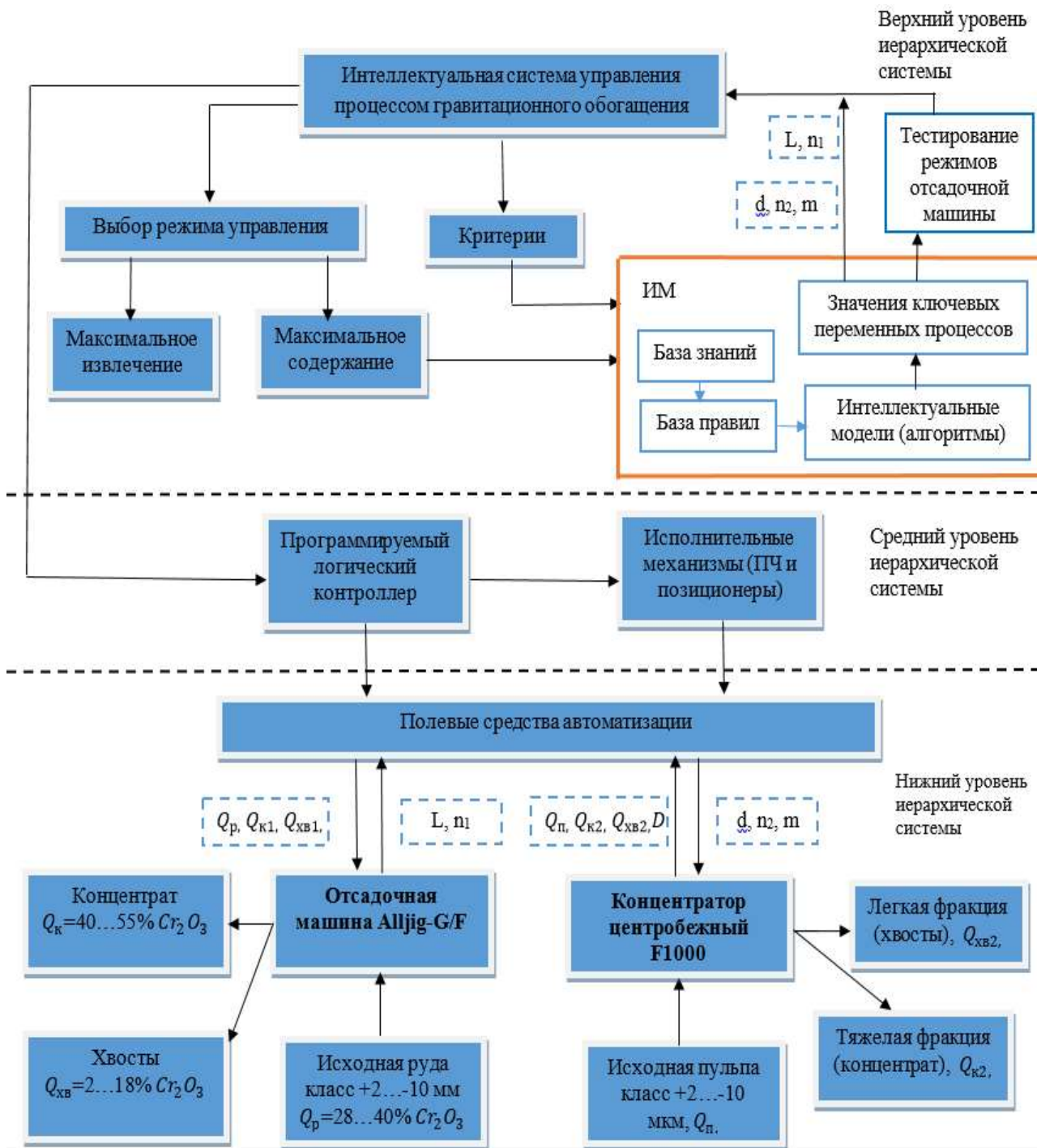


Рисунок 3.1 – Иерархическая интеллектуальная система управления процессом гравитационного обогащения

Функция данных средств автоматизации заключается в следующем. В ОМ частотно–регулируемый электропривод обеспечивает регулирование частоты пульсации, привод гидравлических клапанов необходим для поддержания уровня постели согласно значениям, рассчитанным интеллектуальными алгоритмами. Аналогичным образом в КЦ, где необходимо регулировать частоту вращения импеллера, ширину открытия дроссельных форсунок и степень открытия клапана. ПЛК Simatic S7–300 обеспечивает целостность системы управления, является связующим звеном между интеллектуальными моделями (алгоритмами) и существующей системой автоматизации. Значения ключевых переменных процессов гравитационного обогащения, рассчитанные с помощью интеллектуальных моделей (алгоритмов) посредством ОРС сервера поступают на ПЛК, где согласно программе управления вырабатываются управляющие воздействия. Кроме того, ПЛК управляет работой вспомогательного оборудования и обеспечивает полное функционирование системы управления.

Верхний уровень интегрированной системы предусматривает выбор режимов обогащения и расчет ключевых переменных процесса согласно каждому режиму – рисунок 3.2.

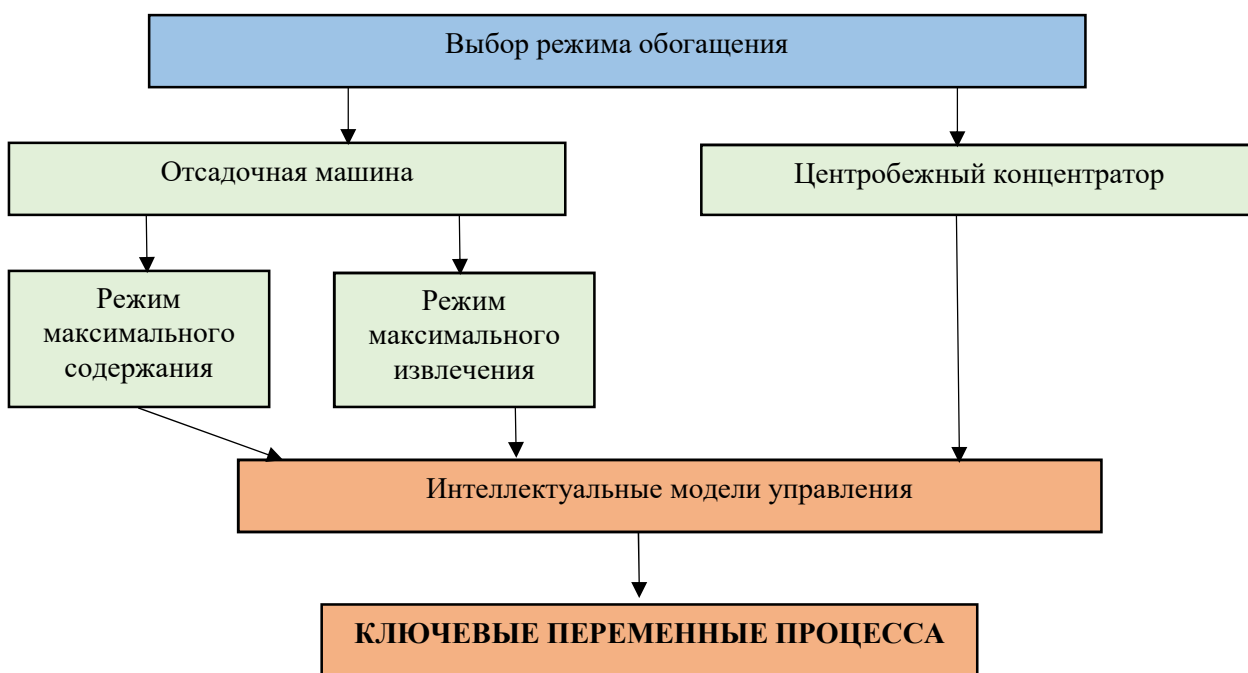


Рисунок 3.2 – Выбор режимов управления

Возможность выбора режима обогащения имеет большую актуальность и экономический эффект. Так как позволяет избежать лишних логистических операций с готовым концентратом и повысить производительность аппаратов гравитационного обогащения. После выбора режима обогащения ИС осуществляет расчет ключевых переменных таким образом, чтобы показатели обогащения были максимально высокими. ИС реализована интеллектуальными алгоритмами, которые в ходе испытаний показали наилучшие результаты.

При настройке ОМ или опробации новых режимов работы может быть использована математическая модель движения частиц и концентрата и пустой породы, разработанная в разделе 2. В структуре интеллектуальной системы представлена блоком «Тестирование режимов работы отсадочной машины». Данная процедура позволяет избежать некачественной настройки аппарата гравитационного обогащения, при котором возможна потеря концентрата.

3.2 Методика создание базы знаний интеллектуальной системы управления процессами гравитационного обогащения

Основной задачей при синтезе интеллектуальных моделей является составление матрицы планирования полного факторного эксперимента (ПФЭ). С помощью данной матрицы создается модель управления объектом или процессом [47]. Метод планирования, представляющий собой процедуру выбора условий проведения всех опытов, представляет собой метод полного факторного эксперимента. В ПФЭ реализуются все возможные сочетания уровней факторов. Число сочетаний (опытов) вычисляется по формуле:

$$m=k^n, \quad (3.1)$$

где n —число факторов (управляемых переменных); k – число уровней.

База данных — важный компонент интеллектуальной системы. Только на основе достоверной базы знаний можно построить качественную систему управления. При формировании ПФЭ–матрицы основным источником информации является эксперт, и для повышения объективности и качества процедуры принятия решений целесообразно учитывать мнения нескольких экспертов. Это обуславливает особые требования к отбору экспертов, в частности к уровню их профессиональной компетентности, поскольку недостаточный уровень экспертной компетентности может привести к грубым ошибкам в данных и необходимости использования сложных вычислительных методов обработки экспертной информации [48].

Весь набор задач для получения достоверных ПФЭ–матриц, базы знаний, обучающей выборки и т. д. можно разделить на два больших класса: с достаточным и недостаточным информационным потенциалом специалистов. При решении задач первого класса специалисты являются качественными и точными источниками информации. Исходя из этого, обобщенное мнение группы экспертов определяется путем усреднения их индивидуальных суждений и близко к истинному [49].

Применительно к задачам второго класса эксперты не могут рассматриваться как достаточно точные измерители. Применение метода усреднения, приемлемого для компетентных экспертов, может привести к ошибкам, поскольку мнение одного эксперта, существенно отличающееся от мнения других, может быть правильным. В связи с этим в данном случае следует

использовать качественную, ресурсоемкую обработку результатов экспертной оценки [50].

Поэтому при создании баз данных для интеллектуальных алгоритмов управления процессом гравитационного обогащения для повышения достоверности экспертной информации была проведена оценка компетентности экспертов и выбраны наиболее компетентные.

Предлагается использовать комбинированный метод оценки компетентности экспертов. При оценке компетентности специалистов учитываются следующие факторы: уровень образования специалиста, опыт работы в горно–обогатительной промышленности, опыт работы на обогатительном аппарате, прохождение курсов повышения квалификации.

Сущность и этапы реализации комбинированного метода заключаются в следующем:

– отбор экспертов n из множества N , через промежуточные уровни, факторов для сравнения;

–при оценке компетентности экспертов необходимо учитывать факторы, определяющие их компетентность в численном выражении.

Например, если уровень образования экспертов–среднее специальное, бакалавриат или магистратура (phD), то вес этого фактора (критерия) для экспертов равен 0; 0,4 и 0,6 соответственно. То же самое относится и к другим факторам (таблица 3.1).

Таблица 3.1 – Профессиональная компетентность экспертов

Факторы	Значение весового коэффициента		
	Средне– техническое	Бакалавр	Магистр или phD
Уровень образования (F_1)	0,2	0,3	0,5
	1 – 5 лет	6 – 8 лет	8 и более
Опыт работы в горно– обогатительной промышленности (F_2)	0,2	0,3	0,5
	1 – 5 лет	6 – 8 лет	8 и более
Опыт работы на обогатительном аппарате (F_3)	0,2	0,3	0,5
	нет	Менее чем 3	3 и более
Прохождение курсов повышения квалификации, (F_4)	0	0,4	0,6

– расчет весового коэффициента i -го эксперта по j -му фактору производится по следующему алгоритму: строится матрица A , определяющая баллы, набранные i -м экспертом по j -му фактору:

$$A = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & a_{2n} \\ a_{m1} & a_{m2} & a_{m3} \end{vmatrix} \quad (3.2)$$

где a_{ij} – баллы, набранные i -м экспертом по j -му фактору; n – количество факторов; m – количество экспертов.

Сумма баллов $SumX_i$, набранных i – м экспертом по всем факторам, рассчитывается по следующей формуле:

$$SumX_i = \sum_{j=1}^n a_{ij} \quad (3.3)$$

Сумма факторных баллов $SumF_j$ для всех экспертов рассчитывается по следующей формуле:

$$SumF_i = \sum_{i=1}^m a_{ij} \quad (3.4)$$

Весовой коэффициент экспертов по всем факторам рассчитывается по следующей формуле:

$$W_i = \frac{\sum_{j=1}^n a_{ij}}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n a_{ij}}, \quad \sum_{i=1}^m = 1. \quad (3.5)$$

Результаты расчета весовых коэффициентов для восьми экспертов с указанием их позиций и 4 факторов приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Весовые коэффициенты для восьми экспертов

Эксперт	Позиция	Факторы – F_j					
		F_1	F_2	F_3	F_4	$SumX_i$	W_i
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Начальник фабрики	0,5	0,5	0,2	0,4	1,6	0,125
2	Главный технолог	0,5	0,3	0,3	0,4	1,5	0,117
3	Начальник участка	0,5	0,5	0,5	0,6	2,1	0,164

Продолжение таблицы 3.2

1	2	3	4	5	6	7	8
4	Зам начальника участка	0,3	0,5	0,5	0,4	1,7	0,133
5	Мастер смены 1	0,3	0,5	0,5	0	1,3	0,102
6	Мастер смены 2	0,3	0,3	0,3	0,4	1,3	0,102
7	Сепараторщик 5 разряд	0,3	0,5	0,5	0,4	1,7	0,133
8	Сепараторщик 4 разряд	0,2	0,5	0,5	0,4	1,6	0,125
$SumF_i$		2,9	3,6	3,3	3,0	12,8	1

На основании таблицы 3.2 эксперты были ранжированы в следующем порядке: Эксперт 3, Эксперт 4, Эксперт 7, Эксперт 1, Эксперт 8, Эксперт 2, Эксперт 5, Эксперт 6.

Для более точной оценки компетентности экспертов на основе таблицы 2 необходимо рассчитать вес экспертов по каждому фактору и ввести их в таблицу 3 используя следующее выражение [51]:

$$\beta_{ij} = \frac{a_{ij}}{SumF_j} = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^m a_{ij}}. \quad (3.6)$$

Для определения суммы весов экспертов по всем факторам используется для расчета следующее выражение:

$$Sum\Delta_i = \sum_{j=1}^n \beta_{ij} \quad (3.7)$$

Весовой коэффициент экспертов для всех факторов рассчитывается по следующему выражению:

$$W_i = \frac{Sum\Delta_i}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \beta_{ij}} = \frac{\sum_{j=1}^n \beta_{ij}}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \beta_{ij}}. \quad (3.8)$$

Далее производится расчет весов экспертов по каждому фактору. Это необходимо для вычисления значения вектора приоритета факторов. В работе предлагается использовать метод иерархического анализа для определения вектора приоритета факторов.

Таблица 3.3– Веса экспертов по каждому фактору

Эксперт	Факторы – F_j					
	F_1	F_2	F_3	F_4	$\text{Sum}\Delta_i$	W_i
1	0,172	0,139	0,061	0,133	0,505	0,126
2	0,172	0,083	0,091	0,133	0,480	0,12
3	0,172	0,139	0,152	0,200	0,663	0,166
4	0,103	0,139	0,152	0,133	0,527	0,132
5	0,103	0,139	0,152	0,000	0,394	0,098
6	0,103	0,083	0,091	0,133	0,411	0,103
7	0,103	0,139	0,152	0,133	0,527	0,132
8	0,069	0,139	0,152	0,133	0,493	0,123
$\text{Sum}F_i$	2,9	3,6	3,3	3,0	4	1

На следующем шаге вычисляется значение вектора приоритета факторов. В работе предлагается использовать метод иерархического анализа для определения вектора приоритета факторов, предложенный в работах [52, 53].

Расчет значений вектора приоритетов факторов поможет выявить специалистов, обладающих наиболее достоверными знаниями о технологическом процессе в отсадочной машине. Для определения компетентности специалистов используются следующие факторы: F_1 – уровень образования; F_2 – опыт работы в перерабатывающей промышленности; F_3 –опыт работы на отсадочной машине; F_4 –прохождение курсов повышения квалификации. С учетом специфики организации бизнес–процессов на обогатительном комбинате была составлена матрица парных сравнений факторов (таблица 3.4).

Подробно процесс составления матриц парных сравнений факторов и вычисления векторов приоритетов приведен в работе [54].

Таблица 3.4– Матрица парных сравнений факторов

Факторы	F ₁	F ₂	F ₃	F ₄	Вектор приоритетов	Нормализованные оценки вектора приоритетов \hat{k}_j
F ₁	1	1	0,333	0,5	0,637	0,1425
F ₂	1	1	0,333	0,5	0,637	0,1425
F ₃	3	3	1	1,5	1,917	0,4289
F ₄	2	2	0,666	1	1,278	0,2859
Sum	7	7	2,333	3,5	4,469	1

Расчет глобальных экспертных коэффициентов на основе приоритета факторов. Для получения глобальных приоритетов GP_j необходимо суммировать нормализованные коэффициенты для каждого из экспертов (таблица 3.4), умноженные на их векторы приоритетов (таблица 3.5):

$$GP_j = \sum_{i=1}^m \beta_{ij} \cdot \hat{k}_j. \quad (3.9)$$

Таблица 3.5– Результаты расчетов глобальных приоритетов

Эксперты	Факторы – F _j				GP _j
	F ₁	F ₂	F ₃	F ₄	
1	2	3	4	5	6
\hat{k}_j	0,1425	0,1425	0,4289	0,2859	
1	0,172	0,139	0,061	0,133	0,10851
2	0,172	0,083	0,091	0,133	0,11339
3	0,172	0,139	0,152	0,200	0,16669
4	0,103	0,139	0,152	0,133	0,1377
5	0,103	0,139	0,152	0,000	0,09968
6	0,103	0,083	0,091	0,133	0,10356

Продолжение таблицы 3.5

1	2	3	4	5	6
7	0,103	0,139	0,152	0,133	0,1377
8	0,069	0,139	0,152	0,133	0,13286
$SumF_i$	2,9	3,6	3,3	3,0	4

Число экспертов n для составления ПФЭ–матрицы, с вероятностью 0,997 и погрешностью выборки не более 7%, равно 3 и рассчитывается по формуле:

$$n = \frac{t^2 \cdot \sigma^2 \cdot N}{\Delta^2 \cdot N + t^2 \cdot \sigma^2}, \quad (3.10)$$

где $t=3$ с вероятностью 0,997; $\sigma^2=0,003397$ – выборочная дисперсия для данных; $N=8$ – структура выборки экспертов; $\Delta=0,07$ – максимальная погрешность выборки.

Таким образом, из таблицы 3.5 были отобраны три эксперта с максимальными значениями глобальных приоритетов: эксперт 3, эксперт 4 и эксперт 7.

Используя методику экспертной оценки компетентности, удалось выделить трех экспертов, знания которых должны быть формализованы в виде базы знаний интеллектуальной системы управления отсадочной машиной. Для этого был проведен опрос в форме интервью. Экспертам были представлены все возможные комбинации входных переменных, и была поставлена задача определить оптимальные значения выходных переменных. В базе знаний реализованы все возможные комбинации уровней факторов. При количестве уровней, равном четырем для каждого фактора, база знаний состоит из $m = 4n$ строк, где n –количество факторов (контролируемых переменных), а m –количество экспериментов [54]. В этом случае $m = 4 \cdot 3 = 12$.

После проведения опроса группы экспертов результаты должны быть обработаны с целью получения обобщенной информации и окончательной ПФЭ–матрицы.

Далее предлагается определить коэффициент компетентности экспертов при оценке выходных переменных (частоты пульса отсадочной машины и уровня слоя). Была получена следующая матрица:

$$A = |a_{ij}|_{2 \times 3} = \begin{vmatrix} 1 & 0.95 & 0.9 \\ 0.5 & 0.45 & 0.45 \end{vmatrix},$$

где 1; 0,95; 0,9 – значения уровня естественной “постели” в нормированном виде, заданные j–м экспертом; 0,5; 0,45; 0,5 – значения частоты пульсаций в нормированном виде, заданные j–м экспертом.

Для расчета используется метод, представленный в работе. Используются формулы [56]:

$$\sum_{i=1}^n C\vec{r} = \lambda_C \vec{r}, \sum_{i=1}^n r_i = 1, \quad (3.11)$$

где $C=A^T A$, \vec{x}, r_i – собственный вектор матриц C , соответствующие максимальным собственным числам матрицы λ_C .

$$C = A^T A = \begin{vmatrix} 1.25 & 1.175 & 1.1250 \\ 1.175 & 1.105 & 1.0575 \\ 1.125 & 1.0575 & 1.0125 \end{vmatrix}$$

Для нахождения собственного вектора матрицы C , соответствующего максимальным собственным векторам и удовлетворяющего свойствам нормализации, предлагается использовать приближенный метод, состоящий в следующем:

- элементы каждой строки умножаются;
- из полученного продукта извлекается корень n –й степени;
- полученные элементы складываются вместе;
- каждый из результирующих элементов делится на результирующую сумму [57].

Коэффициенты компетентности экспертов:

$$\vec{y}_C = \begin{vmatrix} \sqrt[3]{1,25 \cdot 1,175 \cdot 1,125} \\ \sqrt[3]{1,175 \cdot 1,105 \cdot 1,0575} \\ \sqrt[3]{1,125 \cdot 1,0575 \cdot 1,0125} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1.1822 \\ 1.1115 \\ 1.0640 \end{vmatrix} \Rightarrow \vec{x}_C = \begin{vmatrix} 0.342 \\ 0.331 \\ 0.327 \end{vmatrix}$$

Проведенные исследования позволили отобрать наиболее компетентных специалистов, знающих технологический процесс обогащения хрома в отсадочной машине, неоднократно выполнявших настройку этого оборудования в течение смены, и способных определить оптимальные значения выходных переменных для различных комбинаций входных переменных. Полученные коэффициенты экспертной компетентности и глобальные приоритеты экспертов позволяют сделать вывод о том, что отобранные эксперты обладают необходимым объемом знаний и опыта для формирования основы интеллектуальной системы. Важно отметить, что оценки компетентности экспертов практически равны, что подтверждает одинаковый уровень знаний и компетентности в данной области. В связи с этим целесообразно получить

итоговую базу данных путем усреднения индивидуальных мнений экспертов. Это значительно упростит обработку экспертной информации без потери точности. Другими словами, три отобранных эксперта, основываясь на своем производственном опыте, будут определять индивидуально 64 значения скорости пульсации и 64 значения уровня "пласта" в зависимости от комбинации входных переменных (от марки Cr_2O_3 сырой руды, марки Cr_2O_3 хвостов и марки Cr_2O_3 концентратовой фракции). В результате будут получены три ПФЭ–матрицы и для определения окончательной из них будет рассчитано стандартное значение каждой переменной для каждого режима по формуле:

$$v = \sqrt{\frac{v_1 + v_2 + v_3}{3}}, \quad (3.12)$$

где v – результирующее значение выходной переменной, $v_1 \dots v_3$ – значения переменных, заданные экспертами.

Экспертная оценка является наиболее доступным и универсальным методом получения и анализа информации для построения базы знаний интеллектуальных систем управления, особенно в области гравитационного обогащения. При оценивании ключевых переменных использовались знания и опыт нескольких экспертов, наиболее компетентных в рассматриваемой предметной области – гравитационного обогащения.

В условиях производства рудного концентрата очень важно выявить специалистов с максимальным коэффициентом компетентности, которые досконально знают процесс работы оборудования и все возможные режимы его работы. Именно поэтому в данной работе был использован комбинированный метод, включающий в себя метод анализа иерархий факторов и метод оценки коэффициентов компетентности эксперта.

Общее число экспертов составило восемь специалистов завода по обогащению. Есть четыре фактора, которые непосредственно влияют на компетентность экспертов. В результате составляется рейтинг экспертов: эксперт 3, Эксперт 4, эксперт 7, эксперт 1, эксперт 8, эксперт 2, Эксперт 5, эксперт 6.

Расчет глобальных коэффициентов экспертов с учетом приоритета факторов необходим для того, чтобы выявить факторы, оказывающие наибольшее влияние на компетентность экспертов, и таким образом ранжировать экспертов по глобальному приоритету.

Сравнение ранжирования по весовому коэффициенту экспертов по всем факторам W_i , приведенные в таблице 3.2 и глобальным коэффициентам экспертов с учетом приоритета факторов GP_j , представленными в таблице 3.5. Это связано с тем, что факторы F3 и F4 являются более приоритетными при оценке экспертов, работающих на обогатительном оборудовании, в том числе на отсадочной машине. Таким образом, оценка экспертами глобальных приоритетов носит более объективный характер.

Число экспертов, участвовавших в опросе, рассчитанное по формуле 9, составило три человека. Этого вполне достаточно для получения объективной экспертной информации. Отобранные эксперты имеют самые высокие значения глобальных приоритетов.

Коэффициент компетентности экспертов оценивается по степени согласованности их оценок с групповой оценкой объектов. В результате, почти численно одинаковые были получены значения коэффициентов: $\bar{x}_{C1}=0,342$, $\bar{x}_{C2}=0,331$, $\bar{x}_{C3}=0,337$. Это свидетельствует о том, что оценки экспертов согласуются и что истинное значение выходной переменной близко к стандартному значению значений, полученных от экспертов.

Таким образом, при создании каждого из трех алгоритмов результирующая база данных была получена в следствии усреднения баз данных каждого из экспертов. Учитывая, что источником информации являлись компетентные эксперты–технологи, описанный метод позволил избежать большого объема вычислений без потери качества информации в базе знаний [55].

3.3 Синтез интеллектуальных моделей (алгоритмов) системы управления процессом гравитационного обогащения руды

Анализ литературных источников, длительное общение с экспертами–технологами, работающих непосредственно на аппаратах гравитационного обогащения и исследование, представленное в [56] позволяет сделать вывод, что наилучшим вариантом определения оптимальных значений существенных переменных процесса гравитационного обогащения руды являются интеллектуальные алгоритмы, формализующие знания опытных технологов [57]. Схематично процесс синтеза моделей (алгоритмов) представлен на рисунке 3.3.

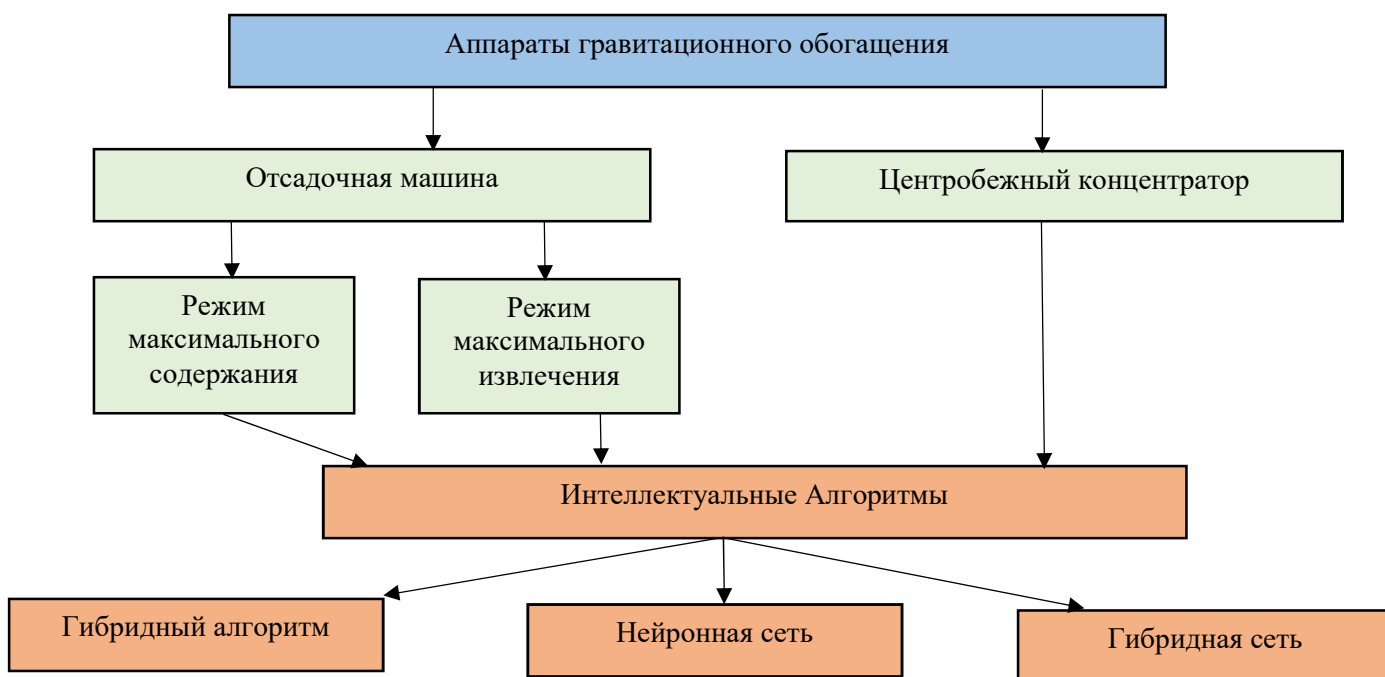


Рисунок 3.3 – Разработка интеллектуальных алгоритмов

Верхний уровень интеллектуальной системы управления процессов гравитационного обогащения предусматривает выбор режимов обогащения в отсадочной машине. Режим обогащения с максимальным содержанием заключается в получении концентрата с максимально возможным содержанием полезного компонента. Режим обогащения с максимальным извлечением – в получении концентрата с максимально возможным количеством при фиксированной концентрации. Целесообразность реализации данных режимов обусловлена технологическим регламентом обогатительных предприятий и запросами потребителей концентрата. Нужно отметить, что доступность выбора режимов позволяет получать готовый концентрат с заданным содержанием, и тем самым избежать ряда технологических операций по транспортировке и смешиванию руды.

3.3.1 Синтез интеллектуальных моделей (алгоритмов) управления процессом гравитационного обогащения в отсадочной машине сепараторного типа

При разработке каждого интеллектуального алгоритма предлагается использовать следующую методологию:

- базы данных для каждого алгоритма получены в следствии усреднения экспертных оценок. Обоснование данного подхода приведено в разделе 3.2;
- произведено нормирование входных и выходных переменных по формуле:

$$\bar{x} = \frac{x - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} \quad (3.13)$$

где \bar{x} – нормализованное значение входной или выходной переменной, x – текущее значение переменной, x_{min}, x_{max} – минимальное и максимальное значение переменной [48].

- разработан алгоритм с применением нечеткой логики fuzzy logic;
- построена нейронная сеть для вычисления оптимальных значений существенных переменных;
- построена гибридная (нейро – нечеткая) сеть для вычисления оптимальных значений существенных переменных.

3.3.1.1 Разработка интеллектуальных алгоритмов управления процессом гравитационного обогащения в отсадочной машине сепараторного типа в режиме максимального содержания.

Предлагается выполнить разработку интеллектуальных алгоритмов с применением нечеткой логики, нейронных и гибридных сетей.

На первом этапе разрабатываются алгоритмы с применением нечеткой логики.

Синтез нечеткой модели управления – алгоритма расчета оптимальных значений существенных переменных процесса гравитационного обогащения выполнен с помощью графических средств системы Matlab согласно следующим этапам, приведенным на рисунке 3.4.



Рисунок 3.4 – Этапы синтеза нечеткого алгоритма

На первом этапе были пронормированы все переменные и получена база знаний для разработки нечеткого алгоритма, данные представлены в таблице 4.6. По формуле 3.13 было вычислено число комбинаций m трех переменных при четырех уровнях оценки, равное $4^3=64$.

Таблица 3.6 – База знаний для разработки нечеткого алгоритма управления в режиме максимального содержания

Содержание Cr_2O_3 в исходной руде, Q_p , %	Содержание Cr_2O_3 в хвостах, $Q_{xв1}$, %	Содержание Cr_2O_3 в концентрате, $Q_{к1}$, %	Уровень «естественной» постели, L , мм	Частота пульсации, n_1 с ⁻¹
1	2	3	4	5
0,00	0,00	0,00	1,00	0,50
0,00	0,31	0,00	1,00	0,25
0,00	0,63	0,00	1,00	0,00
0,00	1,00	0,00	0,83	0,00
0,00	0,00	0,33	0,83	0,50
0,00	0,00	0,67	0,67	0,75
0,00	0,00	1,00	0,50	0,75
0,00	0,31	0,33	1,00	0,00
0,00	0,31	0,67	0,83	0,00

Продолжение таблицы 3.6

0,00	0,63	0,33	1,00	0,00
0,00	0,63	0,67	0,83	0,25
0,00	0,63	1,00	0,50	0,00
0,00	1,00	0,33	0,83	0,00
0,00	1,00	0,67	0,67	0,00
0,00	1,00	1,00	0	0
0,33	0,00	0,00	0,67	0,25
0,33	0,31	0,00	0,50	0,25
0,33	0,63	0,00	0,33	0,00
0,33	0,31	1,00	0,17	0,50
0,33	0,63	0,33	0,50	0,25
0,33	0,63	0,67	0,33	0,25
0,33	0,63	1,00	0,17	0,50
0,33	1,00	0,33	0,00	0,00
0,33	1,00	0,67	0,00	0,25
0,33	1,00	1,00	0,50	0,50
0,67	0,00	0,67	0,17	0,25
0,67	0,00	0,00	0,33	0,00
0,67	0,31	0,00	0,17	0,00
0,67	0,63	0,00	0,17	0,25
0,67	1,00	0,00	0,50	0,50
0,67	0,00	1,00	0,00	0,50
0,67	0,31	0,33	0,33	0,00
0,67	0,31	0,67	0,17	0,00
0,67	0,63	1,00	0,33	0,75
0,67	1,00	0,33	0,17	0,75
0,67	1,00	0,67	0,50	0,50
0,67	1,00	1,00	0,50	0,75
1,00	0,00	0,00	0,33	1,00
1,00	0,31	0,00	0,17	0,75
1,00	0,00	0,33	0,50	0,75
1,00	0,00	0,67	0,33	0,75
1,00	0,00	1,00	0,17	1,00
1,00	0,31	0,33	0,33	1,00
1,00	0,31	0,67	0,33	0,75
1,00	0,31	1,00	0,17	0,75
1,00	0,63	0,33	0,67	0,75
1,00	0,63	0,67	0,50	0,75
1,00	1,00	0,33	0,33	0,50
1,00	1,00	0,67	0,50	0,75
1,00	1,00	1,00	0,33	0,75

На следующем этапе обозначаются лингвистические переменные (таблица 3.7).

Таблица 3.7 – Лингвистические переменные

Входные переменные	Выходные переменные
Содержание Cr_2O_3 в исходной руде (%)	Частота пульсации, с^{-1}
Содержание Cr_2O_3 в хвостах (%)	Уровень естественной постели, мм
Содержание Cr_2O_3 в концентрате (%)	Нарушение технологии обогащения

При построение термов для описания всех лингвистических переменных был использован метод парных сравнений и применена шкала Саати [58]. Методика построения термов, на примере построение терма для лингвистической переменной «Содержание Cr_2O_3 в исходной руде» представлена ниже.

При построении матриц парных сравнений пользуются фундаментальной шкалой предпочтений по девятибальной шкале Саати в соответствии с таблицей 3.8.

Таблица 3.8. Фундаментальная шкала предпочтений

a_{ij}	Пояснения
1	Равная предпочтительность. Значимость элементов одинакова
3	Средняя степень предпочтения. Один элемент немного более значим по сравнению с другим.
5	Существенное предпочтение. Один элемент более значим по сравнению с другим.
7	Сильное предпочтение. Значимость одного элемента над другим очень высокая
9	Абсолютное предпочтение. Максимально возможное различие между двумя элементами
2,4,6,8	Промежуточные степени превосходства.

В целях установления приоритетов критериев применяется метод парных сравнений. В первую очередь строится матрица парных сравнений

$$A = (a_{ij}), i, j = 1, 2, \dots, n \quad (3.14)$$

где $a_{ij} = w_i/w_j$ – уровень преимущества элемента a_i над a_j , w_i – «вес» i -го элемента.

Матрица парных сравнений является диагональной $a_{ii} = 1, i = 1, 2, \dots, n$ и обратно симметричной $a_{ij} = \frac{1}{a_{ji}}, i, j = 1, 2, \dots, n$.

Далее строится матрица парных сравнений следующим образом: например, значение пересечения строки 3 и столбца 1 соответствует 9, что означает о максимальном превосходстве 0,125 над 0 (таблица 2). В таком случае пересечение строки 1 и столбца 3 будет равным 1/9.

Далее вычисляется субнормальное и нормальное нечеткие множества.

Первый шаг – определение геометрического среднего ее элементов по формуле

$$a_i = \left(\prod_{j=1}^n a_{ij} \right)^{\frac{1}{n}}, i = 1, 2, \dots, n. \quad (3.15)$$

Следующим вычисляется значения функции принадлежности субнормального нечеткого множества

$$K_i = \frac{a_i}{\sum_{i=1}^n a_i}, i = 1, 2, \dots, n. \quad (3.16)$$

Функция принадлежности нормализованного нечеткого множества определяется по формуле K_i/K_{max} , где K_i – каждый элемент субнормального нечеткого множества, K_{max} – максимальное значение.

Оценка важности критериев указана на таблице 3.9. Функция принадлежности нечеткого множества приведена на рисунке 3.4.

Таблица 3.9 – Оценка важности критериев

	1	2	3				
	0	0,1	0,125	Произведение a_{ij}	Корень из произведения в n -степени	Субнормальное нечеткое множество	Нормальное нечеткое множество
0	1	1/6	1/9	0,01852	0,26457	0,06114	0,10095
0,1	6	1	1/2	3	1,44225	0,33327	0,55032
0,125	9	2	1	18	2,62074	0,60559	1
Итого					4,32756		

На рисунке представлена половина термина «низкое значение» для лингвистической переменной «Содержание Cr_2O_3 в исходной руде».

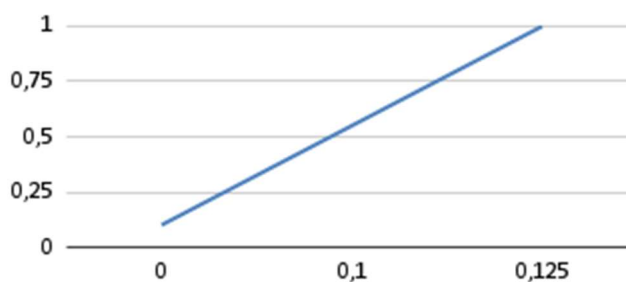


Рисунок 3.5 – Функция принадлежности нечеткого множества

Вторая половина термина строится симметрично. Вследствии, получен полный терм.

Для реализации был выбран алгоритм Mamdani, дающий лучшие результаты при задании экспертами численных оценок [58]. При решении практических задач нечеткого моделирования наибольшее применение нашли простейшие нечеткие числа и интервалы – треугольные и трапециевидные. При этом целесообразность использования трапециевидных нечетких интервалов и треугольных нечетких чисел обуславливается не только простотой выполнения операций над ними, но и их наглядной графической интерпретацией [59,61]. Исследование [66] показывает, что адекватность алгоритмов с треугольными терминами выше, чем с трапециевидными. Поэтому было принято решение производить моделирование с применением треугольных термов.

На рисунке 3.6 представлен Fuzzy Logic Designer для разработки алгоритма вычисления существенных переменных процесса гравитационного обогащения руды в отсадочной машине.

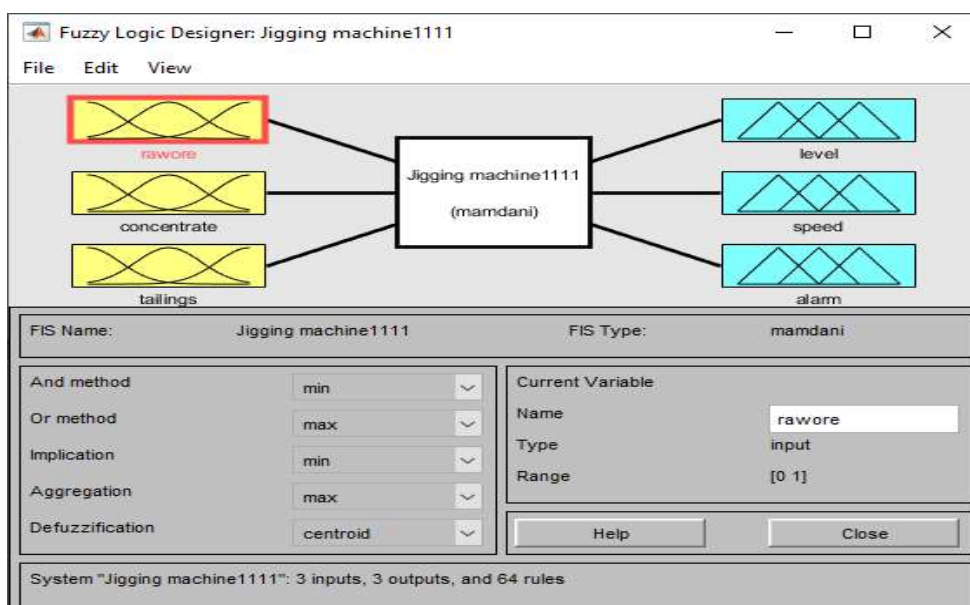


Рисунок 3.6– Графический интерфейс Fuzzy Logic Designer

На рисунке 3.6 показан вид интерфейса редактора правил после задания 64 правил на основе таблицы 3.7.

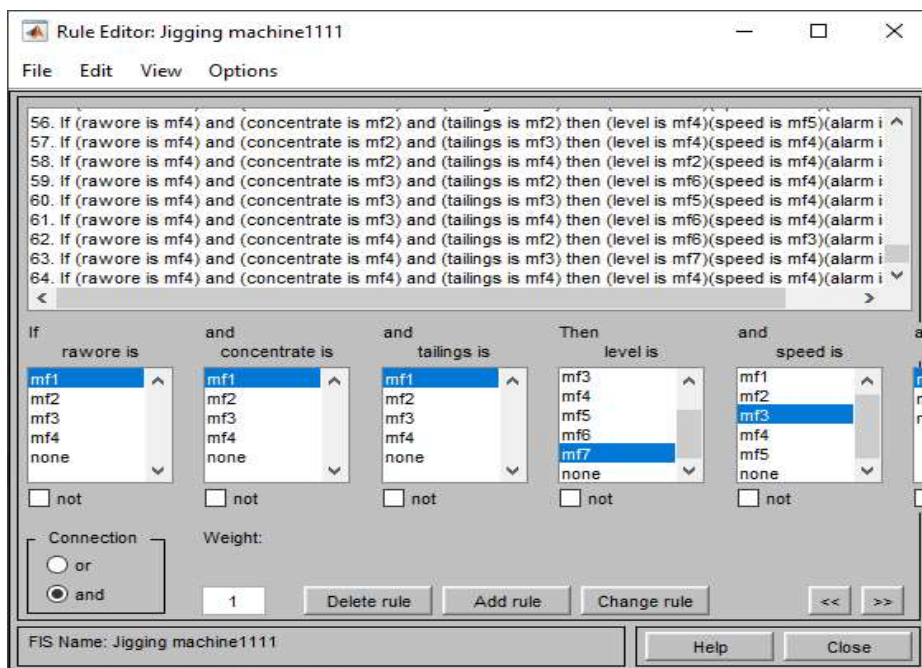


Рисунок 3.7– Графический интерфейс редактора правил

После задания всех правил, в соответствии с выбранным алгоритмом нечеткого вывода – Мамдани, был получен нечеткий алгоритм управления процессом гравитационного обогащения в отсадочной машине в режиме максимального содержания по следующим переменным: частота пульсации, уровень естественной постели и наличие нарушения технологического регламента. Таким образом, алгоритм позволяет определить выходные оптимальные значения при задании входных переменных и спрогнозировать нарушение технологии обогащения, которое ведет к простоям оборудования и браку товарного концентрата. Адекватность полученного алгоритма будет оценена в разделе 4.

На втором этапе предлагается построить нейронную сеть для определения ключевых переменных процесса гравитационного обогащения в отсадочной машине сепараторного типа в режиме максимального содержания.

Однонаправленные многослойные сети сигмоидального типа имеют устоявшееся название многослойный персептрон MLP (MultiLayer Perceptron) [60,62]. На рисунке 3.8 представлен двухслойный персептрон.

Здесь $g_l, l=1, 2, \dots, L$ – выходные сигналы первого слоя нейронов.

Верхние индексы в скобках (m), $m=1, 2, \dots, n$ означают номер слоя нейрона [63,68].

На рисунке 3.7 представлена трехслойная нейронная сеть, где входные сигналы x_1, x_2, \dots, x_N сети составляют входной слой, выходные сигналы первого

нейронного слоя g_1, g_2, \dots, g_L образуют первый скрытый слой, а выходные сигналы y_1, y_2, \dots, y_M – выходной слой [63].

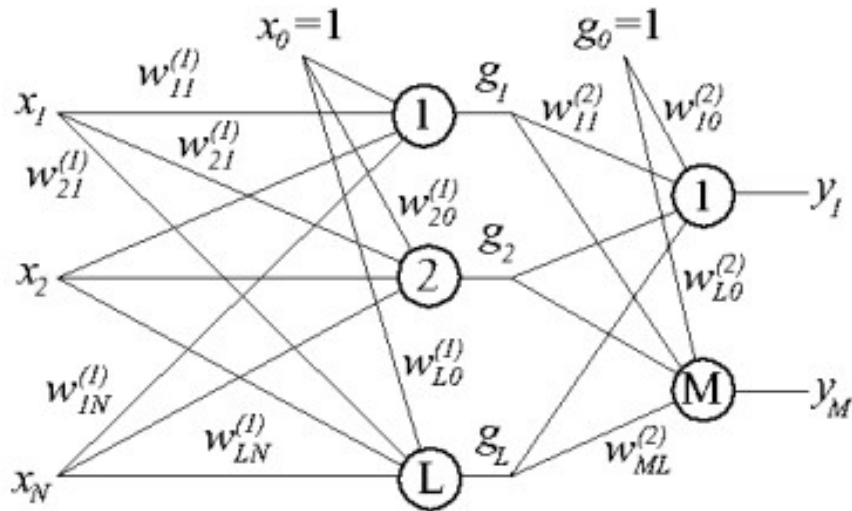


Рисунок 3.8 – Двухслойный перцептрон

Выходные сигналы нейронных слоев рассчитываются по следующим формулам:

$$g_l = f \left(\sum_{j=0}^N w_{lj}^{(1)} \cdot x_j \right), l = 1, 2, \dots, L \quad (3.17)$$

$$y_i = f \left(\sum_{l=0}^L w_{il}^{(2)} \cdot g_l \right) = f \left(\sum_{l=0}^L w_{il}^{(2)} \cdot f \left(\sum_{j=0}^N w_{lj}^{(1)} \cdot x_j \right) \right), i = 1, 2, \dots, M \quad (3.18)$$

Обучение нейронной сети заключается в том, что необходимо правильно подобрать такие значения весовых коэффициентов сети $w_{lj}^{(1)}$ и $w_{il}^{(2)}$, которые смогут обеспечить максимальное совпадение выходного вектора Y^k и эталонного вектора ожидаемых значений D^k при входном векторе X^k .

В случае единичной обучающей выборки $\langle X, D \rangle$ целевая функция согласно работам [64] имеет вид:

$$E(W) = \frac{1}{2} \cdot \sum_{i=1}^N (y_i - d_i)^2 \quad (3.19)$$

В случае множества обучающих пар $\langle X^k, D^k \rangle, k=1, 2, \dots, p$ целевая функция, представленная в работах [62], сумма по всем парам имеет вид:

$$E(W) = \frac{1}{2} \cdot \sum_{k=1}^p \sum_{i=1}^M (y_i - d_i)^2 \quad (3.20)$$

При проектировании нейронной сети необходимо в первую очередь решить вопрос о количестве слоев и количестве элементов (нейронов) в каждом слое. Имеет место компромисс между точностью и обобщающей способностью сети, который можно оптимизировать посредством выбора количества скрытых элементов для данной сети. Количество скрытых элементов с одной стороны должно быть достаточным для того, чтобы решить поставленную задачу, а с другой не должно быть слишком большим, чтобы увеличить время обучения сети [67].

Одним из методов вычисления верхней границы числа нейронов в скрытом слое является теорема Колмогорова.

Согласно данной теореме любая функция n переменных может быть представлена как суперпозиция $2n+1$ одномерных функций. Эта граница h равна удвоенному числу входных элементов i плюс единица [61]:

$$h \leq 2i + 1 \quad (3.21)$$

где i – количество входных переменных.

Проектирование нейронной сети для определения оптимального значения частоты пульсации выполнено на основе теоремы Колмогорова, то есть количество нейронов скрытого слоя принято равное 6, так как $6 < 2 \cdot 3 + 1$ (из формулы (48) $i=3$).

Структура сети представлена на рисунке 3.9.

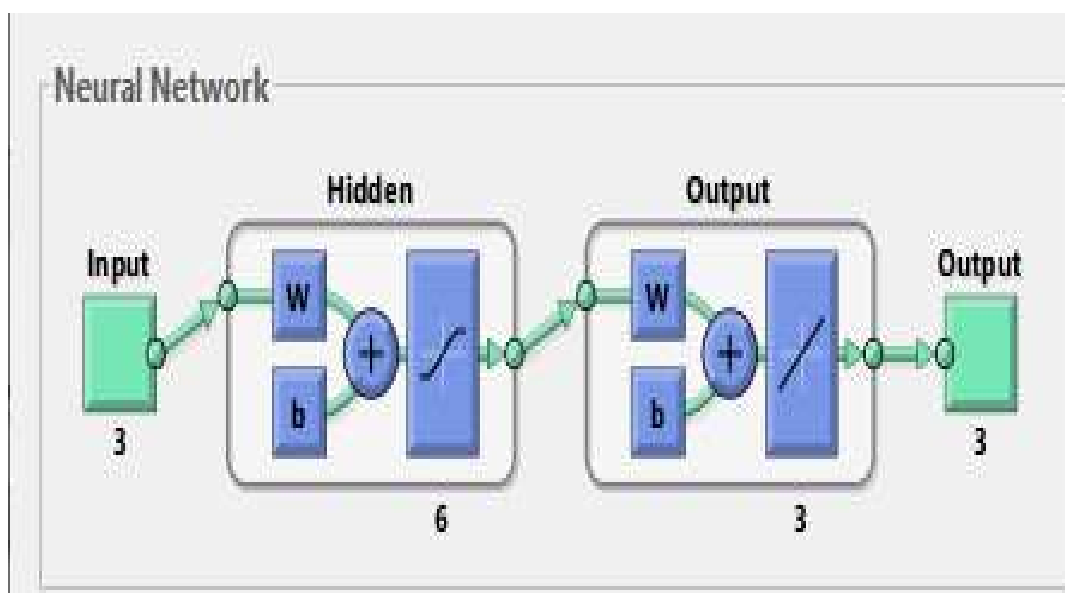


Рисунок 3.9 – Структура нейронной сети

Процедура выбора обучающих выборок представлена на рисунке 3.10

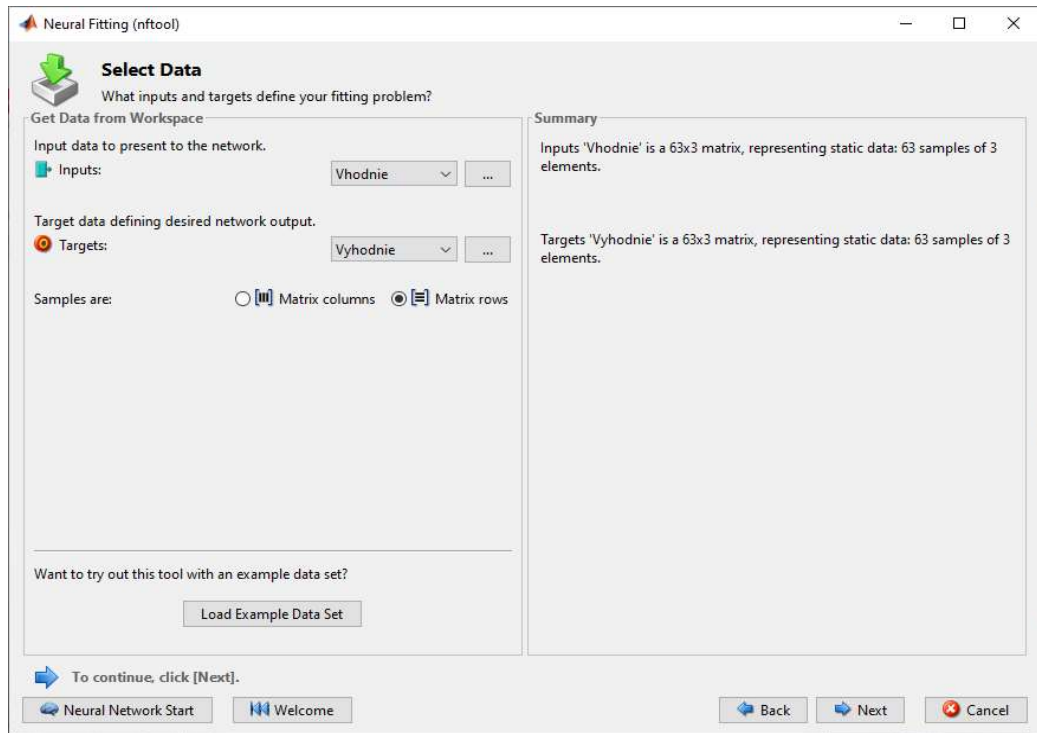


Рисунок 3.10 – Загрузка обучающей выборки

На третьем этапе выполнена разработка гибридной сети для управления процессом гравитационного обогащения в отсадочной машине сепараторного типа в режиме максимального содержания.

Нечеткие нейронные сети дают возможность решать неформализованные задачи, подавая на вход сети различные данные и оценивая выдаваемый результат.

Выходной сигнал в нечеткой продукционной сети Такаги–Сугено–Канга (TSK) [62] рассчитывается следующим образом:

$$y(X) = \frac{\sum_{i=1}^M w_i \cdot y_i(X)}{\sum_{i=1}^M w_i}, \quad (3.22)$$

где: $y(X) = p_{i0} + \sum_{j=1}^N p_{ij} \cdot x_j$ – i -ый полином компонент аппроксимации.

Весовые коэффициенты w_i компонентов сети можно рассчитать по следующей формуле (в данном случае используется рациональная форма функции Гаусса, но можно использовать и другие функции)

$$w_i = \prod_{j=1}^N w_{ij}(x_j) = \prod_{j=1}^N \frac{1}{1 + \left(\frac{|x_j - c_{ij}|}{\sigma_{ij}} \right)^{2b_{ij}}} \quad (3.23)$$

Данным выражениям соответствует пятислойная нечеткая нейронная сеть, которая представлена на рисунке 3.11.

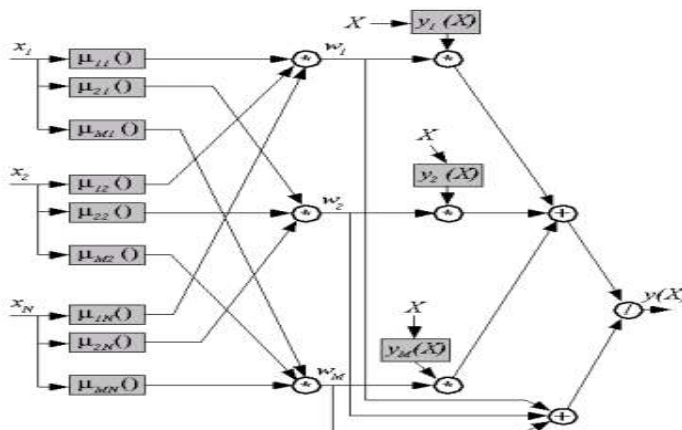


Рисунок 3.11 – Структурная схема нечеткой продукционной сети сети Такаги–Сугено–Канга

Первый слой содержит $N \times M$ узлов, где каждый реализует расчет функции Гаусса с параметрами c_{ij} , σ_{ij} , b_{ij} . В этом слое происходит фаззификация входных переменных сети, где изменяются параметры c_{ij} , σ_{ij} , b_{ij} в процессе обучения сети и он является параметрическим слоем. Второй слой сети не содержит параметров и в нем происходит агрегирование левых частей продукций. В третьем слое происходит генерация полиномиальных функций TSK $y_i(X)$ и умножение их на весовой коэффициент w_i . В процессе обучения сети изменению и настройке подвергаются коэффициенты r_{ij} , $i = 1, 2, \dots, M$; $j = 0, 1, \dots, N$ и он является параметрическим слоем. Общее количество коэффициентов r_{ij} в сети равно $M \times (N + 1)$. В четвертом слое находятся два нейронных сумматора. При помощи первого сумматора рассчитывается взвешенная сумма выходных сигналов $y(X)$ i , а второй рассчитывает сумму весовых коэффициентов w_i , $i = 1, 2, \dots, M$. Данный слой не является параметрическим т.к. в нем нет настройки и изменения параметров сети. В пятом слое производится нормализация весовых коэффициентов. Этот слой также не является параметрическим [63].

Сеть Такаги–Сугено–Канга содержит два параметрических слоя (первый и третий), параметры, которых подлежат изменению и настройке в процессе обучения сети. Параметры первого слоя относятся к нелинейным функциям и называются нелинейными, а параметры третьего слоя – линейными [64].

Общее количество линейных и нелинейных параметров сети TSK рассчитывается следующим образом:

$$M \cdot 3N + M \cdot (N + 1) = M \cdot 4(N + 1). \quad (3.24)$$

Во многих практических приложениях это достаточно большая величина, поэтому для входных переменных x_j используют ограниченный набор функций $\mu(x_j)$, что уменьшает количество нелинейных параметров [68].

Далее приведен синтез нейро–нечеткой сети для определения существенных переменных процесса гравитационного обогащения в отсадочной машине в режиме максимального содержания. Отметим, что здесь приведен пример только лишь одной выходной переменной – уровня «естественной» постели, для расчета остальных выходных переменных производится аналогичные процедуры. Задание каждой входной и выходной переменной в виде нечеткого множества представлено на рисунке 3.12.

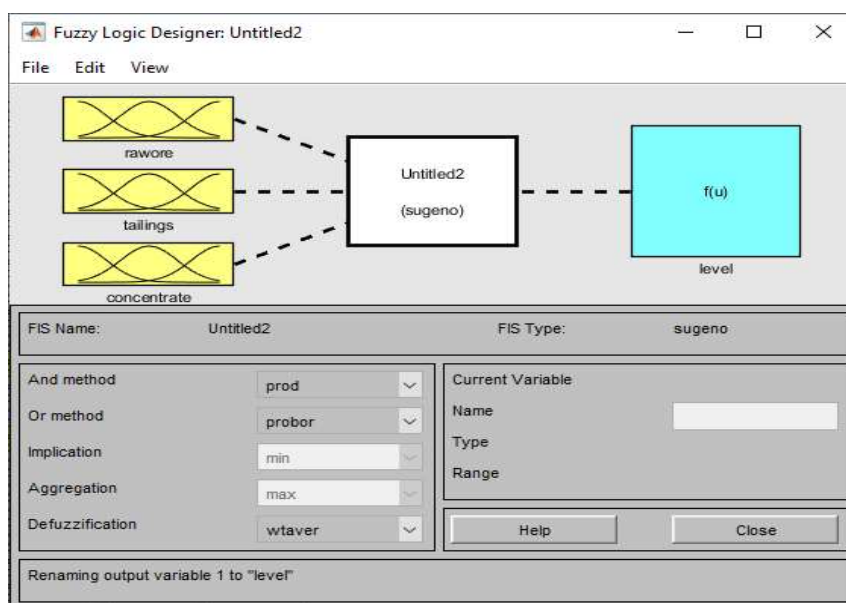


Рисунок 3.12 – Fuzzy logic designer для нейро–нечеткой сети
Процесс обучения нейро–нечеткой сети представлен на рисунке 3.13

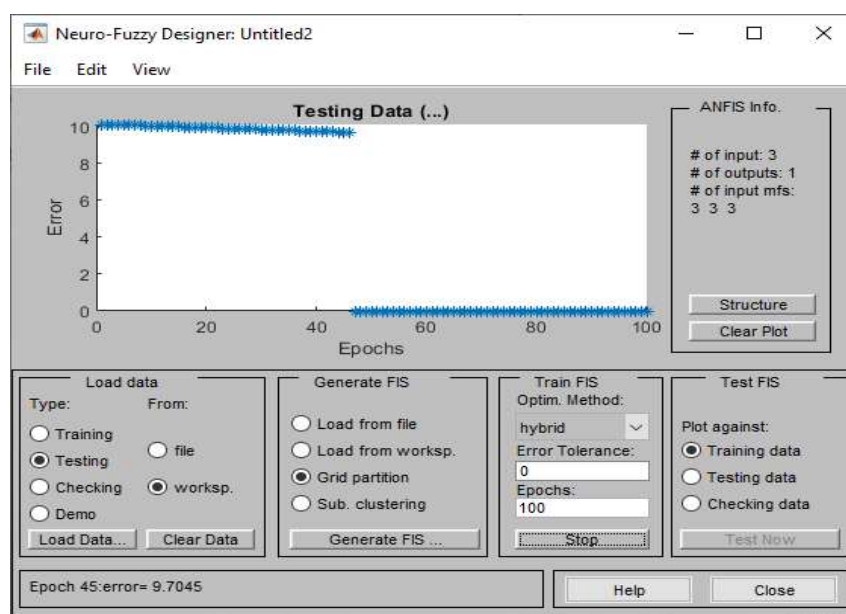


Рисунок 3.13 – Процесс обучения нейро–нечеткой сети

Следующим этапом создания гибридной сети является генерирование структуры системы нечеткого вывода. На данном этапе можно посмотреть архитектуру сети рисунок 3.14

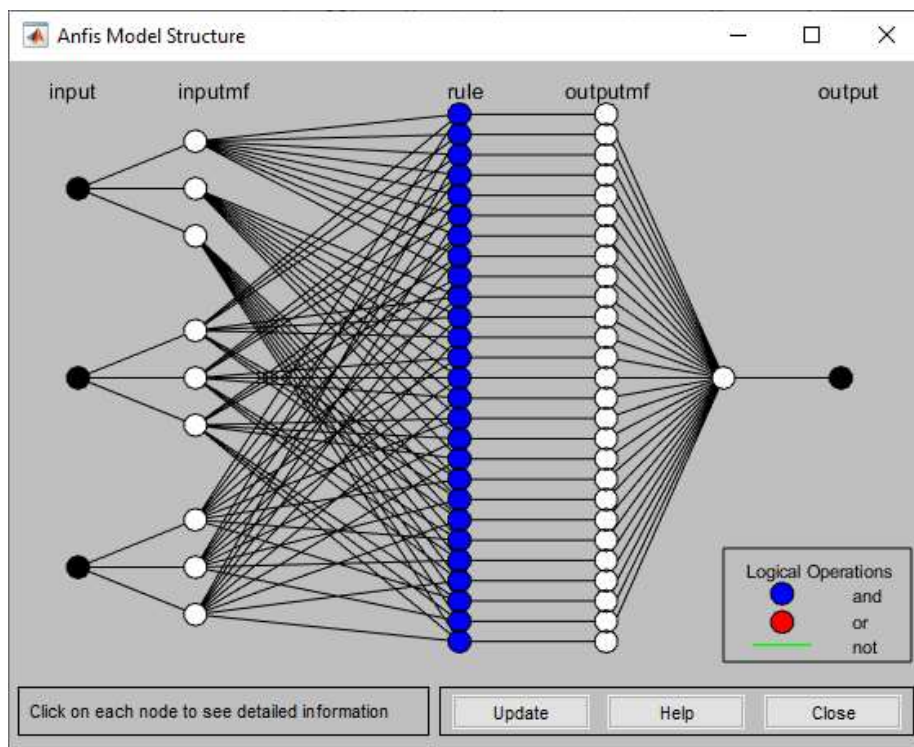


Рисунок 3.14 – Гибридная сеть

Далее происходит процесс обучения сети, по истечении которого необходимо протестировать построенную сеть. Для этого тестовые значения вводятся в в FIS редактор Rule Viewer. Процесс тестирования представлен на рисунке 3.15. Адекватность полученного алгоритма будет оценена в разделе 4.

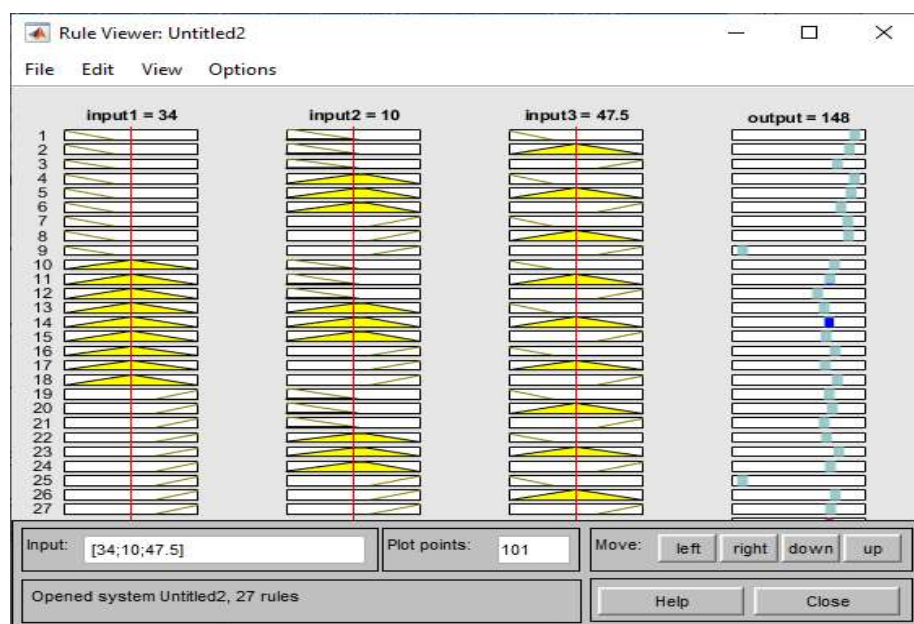


Рисунок 3.15 – Редактор “Rule Viewer” после обучения гибридной сети

3.3.3.2 Разработка интеллектуальных алгоритмов управления процессом гравитационного обогащения в отсадочной машине сепараторного типа в режиме максимального извлечения.

Аналогично процессу обогащения в режиме максимального содержания на первом этапе разработаны алгоритмы управления на основе нечеткой логики.

Синтез нечеткого алгоритма расчета оптимальных значений существенных переменных процесса гравитационного обогащения в отсадочной машине сепараторного типа в режиме максимального извлечения выполнен с помощью графических средств системы Matlab согласно этапам, прописанным в разделе 3.3.3.1.

На первом этапе были пронормированы все переменные и получена база знаний для разработки нечеткого алгоритма таблица 3.10. По формуле 3.13 было вычислено число комбинаций m трех переменных при четырех уровнях оценки, равное $4^3=64$.

Таблица 3.10 – База знаний для разработки нечеткого алгоритма управления в режиме максимального извлечения

Содержание Cr_2O_3 в исходной руде, Q_p , %	Содержание Cr_2O_3 в хвостах, Q_{xb1} , %	Содержание Cr_2O_3 в концентрате, $Q_{к1}$, %	Уровень «естественной» постели, L , мм	Частота пульсации, n_1 c^{-1}
1	2	3	4	5
0,00	0,00	0,00	1,00	0,45
0,00	0,31	0,00	0,9	0,20
0,00	0,63	0,00	0,9	0,00
0,00	1,00	0,00	0,83	0,00
0,00	0,00	0,33	0,83	0,45
0,00	0,00	0,67	0,67	0,70
0,00	0,00	1,00	0,50	0,70
0,00	0,31	0,33	1,00	0,00
0,00	0,31	0,67	0,83	0,00
0,00	0,31	1,00	0,67	0,20
0,00	0,63	0,33	1,00	0,00
0,00	0,63	0,67	0,83	0,17
0,00	0,63	1,00	0,50	0,00
0,00	1,00	0,33	0,83	0,00
0,00	1,00	0,67	0,6	0,00
0,00	1,00	1,00	0	0
0,33	0,00	0,00	0,6	0,20
0,33	0,31	0,00	0,50	0,20
0,33	0,63	0,00	0,33	0,00

1	2	3	4	5
0,33	1,00	0,00	0,50	0,00
0,33	0,00	0,33	0,50	0,25
0,33	0,00	0,67	0,33	0,25
0,33	0,00	1,00	0,17	0,25
0,33	0,31	0,33	0,50	0,50
0,33	0,31	0,67	0,33	0,50
0,33	0,31	1,00	0,17	0,50
0,33	0,63	0,33	0,50	0,25
0,33	0,63	0,67	0,33	0,25
0,33	0,63	1,00	0,17	0,50
0,33	1,00	0,33	0,00	0,00
0,33	1,00	0,67	0,00	0,25
0,33	1,00	1,00	0,50	0,50
0,67	0,00	0,00	0,33	0,00
1,00	1,00	0,00	0	0
1,00	0,00	0,33	0,50	0,75
1,00	0,00	0,67	0,33	0,75
1,00	0,00	1,00	0,17	1,00
1,00	0,31	0,33	0,33	1,00
1,00	0,31	0,67	0,33	0,75
1,00	0,31	1,00	0,17	0,75
1,00	0,63	0,33	0,67	0,75
1,00	0,63	0,67	0,50	0,75
1,00	0,63	1,00	0,33	0,75
1,00	1,00	0,33	0,33	0,50
1,00	1,00	0,67	0,50	0,75
1,00	1,00	1,00	0,33	0,75

На следующем этапе обозначаются лингвистические переменные таблицы 3.11

Таблица 3.11 – Лингвистические переменные

Входные переменные	Выходные переменные
Содержание Cr_2O_3 в исходной руде (%)	Частота пульсации, c^{-1}
Содержание Cr_2O_3 в хвостах (%)	Уровень естественной постели, мм
Содержание Cr_2O_3 в концентрате (%)	

Далее порядок действий аналогичен подпункту 3.2.2.1. В результате получен алгоритм, позволяющий определить выходные оптимальные значения процесса гравитационного обогащения руды в отсадочной машине в режиме максимального извлечения. Адекватность полученного алгоритма будет оценена в разделе 4.

Построение нейронной сети выполнено аналогично пункту 3.3.3.1 с использованием обучающей выборки таблица 3.10. Адекватность полученной модели оценена в разделе 4.

Построение гибридной сети выполнено аналогично пункту 3.2.2.1 с использованием обучающей выборки таблица 3.10. Адекватность полученной модели оценена в разделе 4.

3.3.2 Синтез интеллектуальных моделей (алгоритмов) управления процессом гравитационного обогащения в центробежном концентраторе

Как уже было сказано в разделе 3.2 основой любого адекватного интеллектуального алгоритма является база знаний, обучающая выборка, матрица ПФЭ согласно методики, описанной в разделе 3.2. При построении матрицы ПФЭ для процесса гравитационного обогащения в центробежном концентраторе был формализован опыт технологов–концентраторщиков, работающих на данном технологическом аппарате.

Входные переменные интеллектуального алгоритма управления процессом гравитационного обогащения в концентраторе Falcon C1000:

- плотность пульпы;
- исходная концентрации хрома в пульпе;
- концентрация хрома в хвостах;
- концентрация хрома в готовом продукте.

И еще одна входная переменная была выделена в результате анализа эксплуатационных требований концентраторе Falcon C1000. Рекомендованная плотность питания – 40% по весу, максимальная – 50%. В [35] приведена таблица с целью определения рабочих пределов пропускной способности по твердому веществу. Эта переменная названа как критерий питания.

В результате обработки технологических данных плотности пульпы и исходной концентрации хрома в пульпе, переменная (Q1) была исключена. Так как коэффициент корреляции составил 1. Так же это было подтверждено технологическим персоналом. Иными словами, чем выше содержание хрома в пульпе, тем выше её плотность. Соответственно, переменные дублируют друг друга, не несут информационной нагрузки, а только загружают вычислительные ресурсы системы [14].

Таким образом, при числе уровней равных трем для каждого фактора, матрица ПФЭ состоит из $m=3^n$ строк, где n –число факторов (управляемых переменных), а m – число опытов [48]. В данном случае, для трехуровневых факторов полное число возможных сочетаний числа факторов при четырех входных переменных равно $m=3^4=81$.

При составлении результирующей матрицы ПФЭ использована методика раздел 3.2. В результате была получена матрица, представленная в таблице 3.12

Таблица 3.12 – ПФЭ для центробежного концентратора

Плотность пульпы $Q_p, \%$	Содержание Cr_2O_3 в хвостах $Q_{хв2}, \%$	Содержание Cr_2O_3 в концентрате $Q_{к2}, \%$	Критерий питания P	Частота вращения импеллера $n_2, Гц$	Ширина открытия форсунок $d, мм$	Степень открытия клапана $m, \%$
1	2	3	4	5	6	7
0,00	0,00	0,00	0,00	0,5	0,5	0
0,50	0,00	0,00	0,00	0,5	0,5	0,5
0,00	0,50	0,00	0,00	0,9	0,20	0
0,00	0,00	0,50	0,00	0,6	0,3	0,1
0,00	0,00	0,00	0,50	0,5	0,5	0,3
1,00	0,00	0,00	0,00	0,8	0,7	0,3
0,00	1,00	0,00	0,00	0,4	0,6	0,1
0,00	0,00	1,00	0,00	0,5	0,5	0
0,00	0,00	0,00	1,00	0,3	0,3	0,8
0,50	1,00	0,00	0,00	0,4	0,2	0,5
1,00	0,50	0,00	0,00	0,8	0,5	1
0,00	1,00	0,50	0,00	0,55	0,3	0,1
0,00	0,00	1,00	0,50	0,5	0,5	0,5
1,00	1,00	0,00	0,00	0,9	0,2	0
0,00	1,00	0,50	1,00	0,5	0,4	0,7
0,00	0,00	1,00	1,00	0,3	0,4	0,8
0,00	0,00	0,00	1,00	0,50	0,70	0
0,50	0,00	0,00	0,00	0,50	0,70	0
0,00	0,50	0,00	0,00	0,5	0,5	0
0,00	0,00	0,50	0,00	0,5	0,5	0,5
0,00	0,00	0,00	0,50	0,9	0,20	0
0,10	0,00	0,00	0,00	0,6	0,3	0,1
0,00	1,00	0,00	0,00	0,5	0,5	0,3
0,00	0,00	1,00	0,00	0,8	0,7	0,3
0,00	0,00	0,00	1,00	0,4	0,6	0,1
0,50	1,00	0,00	0,00	0,5	0,5	0
1,00	0,50	0,00	0,00	0,3	0,3	0,8
0,00	1,00	0,50	0,00	0,4	0,2	0,5
0,00	0,00	1,00	0,50	0,8	0,5	1
1,00	1,00	0,00	0,00	0,55	0,3	0,1
0,00	1,00	0,50	0,00	0,5	0,5	0,5

Продолжение таблицы 3.12

1	2	3	4	5	6	7
0,00	0,00	0,00	1,00	0,5	0,5	0,3
0,50	1,00	0,00	0,00	0,8	0,7	0,3
1,00	0,50	0,00	0,00	0,4	0,6	0,1
0,00	1,00	0,50	0,00	0,5	0,5	0
0,00	0,00	1,00	0,50	0,3	0,3	0,8
1,00	1,00	0,00	0,00	0,4	0,2	0,5
0,00	1,00	0,50	0,00	0,8	0,5	1
0,00	0,00	0,10	0,00	0,55	0,3	0,1
0,00	0,00	0,00	1,00	0,5	0,5	0,5
0,50	0,00	0,00	0,00	0,9	0,2	0
0,00	0,50	0,00	0,00	0,5	0,4	0,7
0,00	0,00	0,50	0,00	0,3	0,4	0,8
0,00	0,00	0,00	0,50	0,50	0,70	0
0,10	0,00	0,00	0,00	0,50	0,70	0
0,00	1,00	0,00	0,00	0,5	0,5	0
0,00	0,00	1,00	0,00	0,5	0,5	0,5
0,00	0,00	0,00	1,00	0,9	0,20	0
0,50	1,00	0,00	0,00	0,6	0,3	0,1
1,00	0,50	0,00	0,00	0,5	0,5	0,3
0,00	1,00	0,50	0,00	0,8	0,7	0,3
0,00	0,00	1,00	0,50	0,4	0,6	0,1
1,00	1,00	0,00	0,00	0,5	0,5	0
0,00	1,00	0,50	0,00	0,3	0,3	0,8
0,00	0,00	0,10	0,00	0,4	0,2	0,5
0,00	0,00	0,00	1,00	0,8	0,5	1
0,50	0,00	0,00	0,00	0,55	0,3	0,1
0,00	0,50	0,00	0,00	0,5	0,5	0,5
0,00	0,00	0,50	0,00	0,9	0,2	0
0,00	0,00	0,00	0,50	0,5	0,4	0,7
0,10	0,00	0,00	0,00	0,3	0,4	0,8
0,00	1,00	0,00	0,00	0,50	0,70	0
0,00	0,00	1,00	0,00	0,50	0,70	0
0,00	0,00	0,00	1,00	0,8	0,5	1
0,50	1,00	0,00	0,00	0,55	0,3	0,1
1,00	0,50	0,00	0,00	0,5	0,5	0,5
0,00	1,00	0,50	0,00	0,9	0,2	0
0,00	0,00	1,00	0,50	0,5	0,4	0,7
1,00	1,00	0,00	0,00	0,3	0,4	0,8
0,00	1,00	0,50	0,00	0,50	0,70	0
0,00	0,00	0,10	0,00	0,50	0,70	0
0,00	0,00	0,00	1,00	0,7	0,3	1

На основании данной матрицы ПФЭ производится разработка интеллектуальных алгоритмов управления процессом гравитационного обогащения руды в центробежном концентраторе.

На основе полученной матрицы ПФЭ выполнена разработка алгоритма управления процессом гравитационного обогащения в центробежном сепараторе с применением нечеткой логики.

Лингвистические переменные нечеткого алгоритма управления процессом гравитационного обогащения в центробежном сепараторе обозначены в таблице 3.13.

Таблица 3.13 – Переменные процесса обогащения в концентраторе Falcon C1000

Входная	Выходная
Плотность пульпы, кг/м ³	Частота вращения импеллера, Гц
Концентрация Cr ₂ O ₃ в хвостах, %	Ширина открытия форсунок, мм
Концентрация Cr ₂ O ₃ в готовом продукте, %	Степень открытия клапана, %
Критерий питания	

На рисунке 3.16 представлен Fuzzy Logic Designer для разработки алгоритма управления центробежного концентратора. При разработке каждого термина использовался метод парных сравнений и применена шкала Саати.

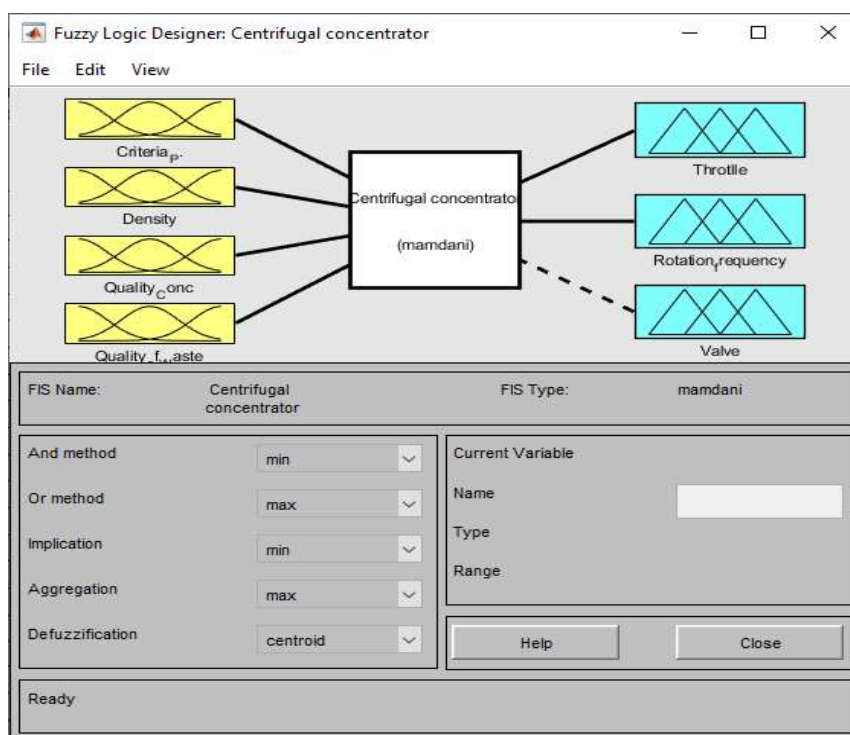


Рисунок 3.16 – Fuzzy Logic Designer

Определены функции принадлежности лингвистических переменных, выбран тип термов – треугольный. Выбор треугольных термов обоснован исследованием [65], ошибка алгоритма с применением данных термов при определении ключевой переменной процесса отсадки была минимальной.

После определения функций принадлежности для каждой лингвистической переменной формируются правила нечеткой продукции, то есть каждому эксперименту соответствует правило продукции вида:

ПРАВИЛО 1: «ЕСЛИ КРИТЕРИЙ ПИТАНИЯ=0 И ПЛОТНОСТЬ=0 И КОНЦЕНТРАЦИЯ КОНЦЕНТРАТА=0 И КОНЦЕНТРАЦИЯ ХВОСТОВ=0 ТО ШИРИНА ОТКРЫТИЯ ФОРСУНОК=0,5, ЧАСТОТА ВРАЩЕНИЯ ИМПЕЛЛЕРА=0,5, СТЕПЕНЬ ОТКРЫТИЯ КЛАПАНА=0,0.

Правила, записаны в Rule Editor Fuzzy Logic программы Matlab. Их общее количество 81.

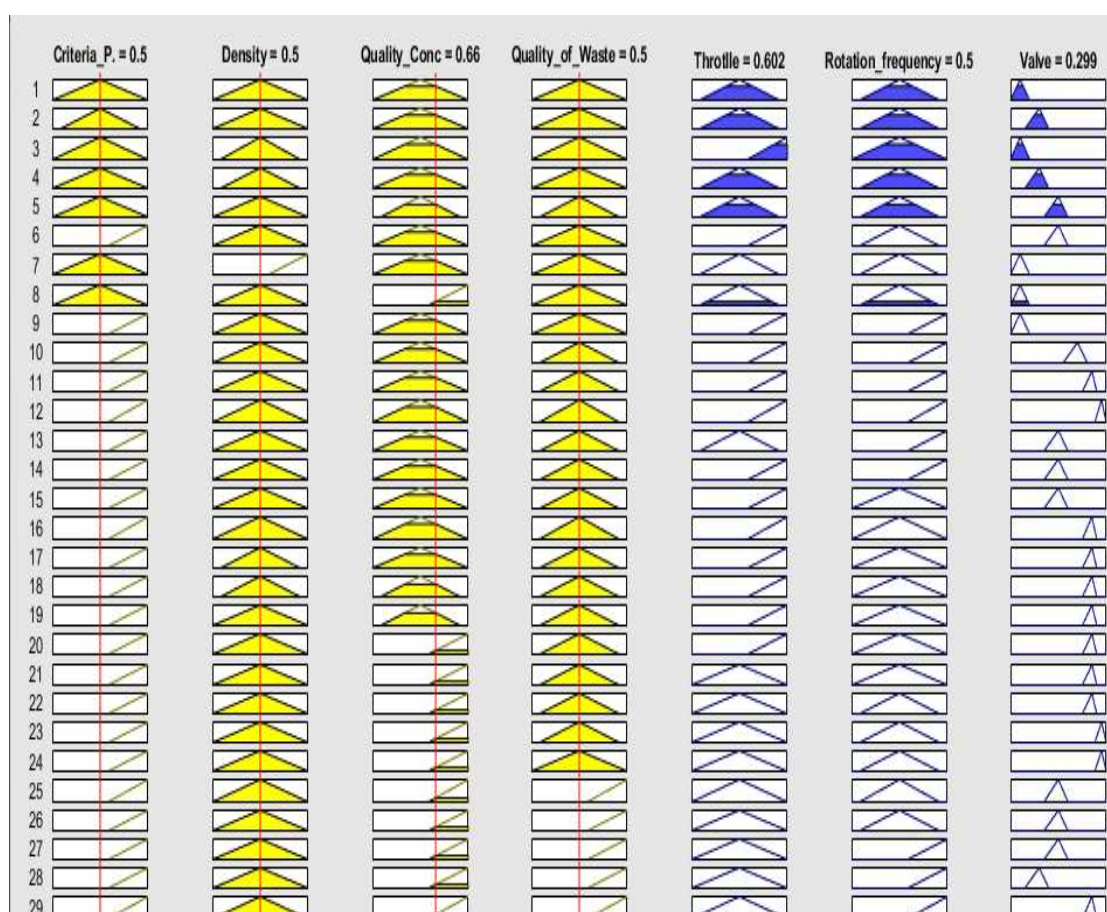


Рисунок 3.17 – Графический интерфейс программы просмотра правил

В результате был получен нечеткий алгоритм определения существенных переменных процесса обогащения в центробежном концентраторе – частоты вращения импеллера, ширины открытия дроссельных форсунок, степени открытия клапана питающей воды. Оценка адекватности представлена в разделе 4.

Построение нейронной сети для управления процессом гравитационного обогащения в центробежном концентраторе выполнена аналогично подпункту 3.3.1. Структура нейронной сети представлена на рисунке 3.18

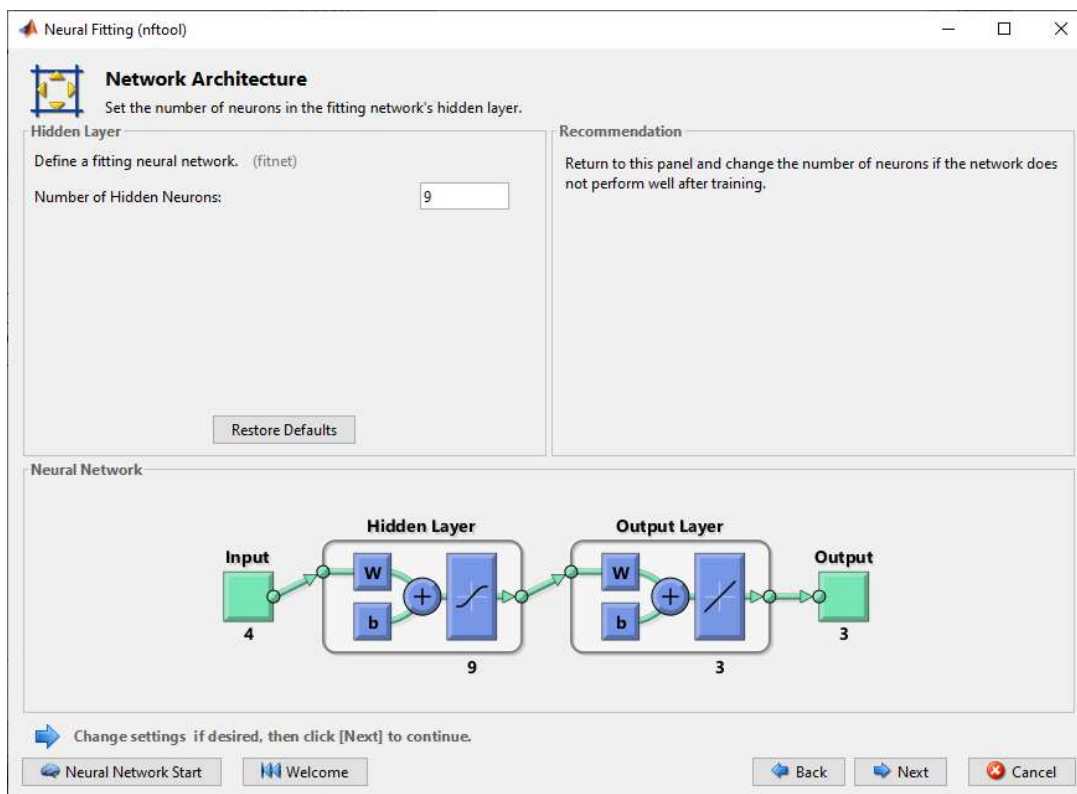


Рисунок 3.18 – Структура нейронной сети для определения ключевых переменных центробежного сепаратора

Построение гибридной сети для управления процессом гравитационного обогащения в отсадочной машине сепараторного типа в режиме максимального содержания.

В основе аппарата гибридных сетей лежат системы с нечеткой логикой и искусственные нейронные сети, в которых выводы делаются на основе аппарата нечеткой логики, но соответствующие функции принадлежности подстраиваются с использованием алгоритмов обучения нейронных сетей, например, алгоритма обратного распространения ошибки. Такие системы не только используют априорную информацию, но могут приобретать новые знания и для пользователя являются логически прозрачными [73].

Для разработки алгоритма определения ключевых переменных процесса обогащения в центробежном концентраторе используется возможности MATLAB. Для этого в MATLAB существует редактор ANFIS, который позволяет создавать или загружать конкретную модель адаптивной системы нейро–нечеткого вывода, выполнять ее обучение, визуализировать ее структуру, изменять и настраивать ее параметры, а также использовать настроенную сеть для получения результатов нечеткого вывода [46]. Рассмотрим построение алгоритма для определения переменной «Частота вращения импеллера».

Отметим, что здесь приведен пример только лишь одной выходной переменной, для расчета остальных выходных переменных производится аналогичные процедуры.

Предварительно подготавливается обучающая выборка, путем загрузки в файл с расширением .dat. Вызывается Anfis Editor командой `anfisedit` в Comand Window Matlab и осуществляется настройка гибридной сети. На рисунке 3.19 показана структура гибридной сети.

Следующим этапом создания гибридной сети является генерирование структуры системы нечеткого вывода.

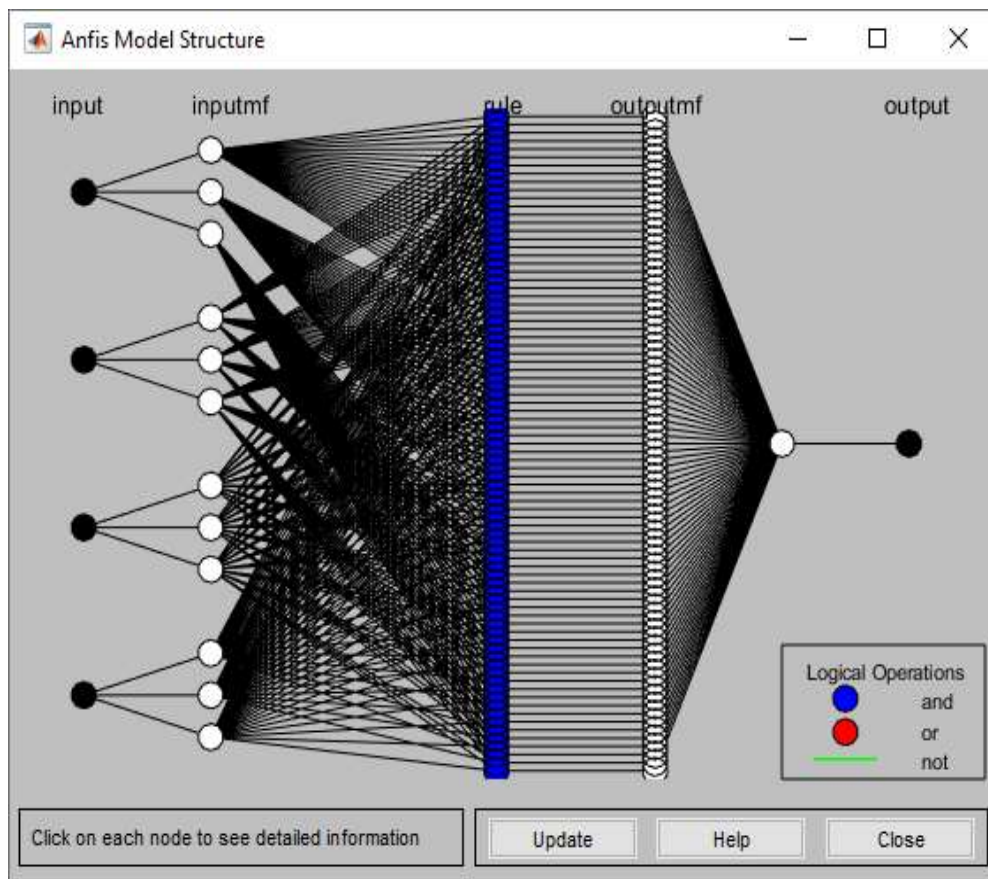


Рисунок 3.19 – Архитектура гибридной сети для определения ключевых переменных центробежного сепаратора

Рисунок 3.18 представляет собой модель с использованием нейро-нечетких алгоритмов. В дальнейшем эту модель можно использовать для расчета выходной переменной при изменениях входных. После этого выбирается метод обучения гибридной сети, т.е. метод оптимизации, количество эпох обучения и допустимая ошибка. После завершения обучения сети ее можно протестировать, загрузить проверочные данные или просмотреть и задать любые допустимые значение в FIS редакторе Rule Viewer, который представлен на рисунке 3.20.

На рисунке 3.20 представлено тестирование модели (алгоритма) управления при значениях входных переменных: плотность пульпы – 0, концентрация Cr_2O_3 в хвостах – 0, концентрация Cr_2O_3 в готовом продукте – 0,5,

критерий питания – 0 и в результате получены получены значение выходной переменной: частота вращения импеллера – 0. Выходные переменные проходят процедуру обратную нормированию для получения значений в физических единицах.

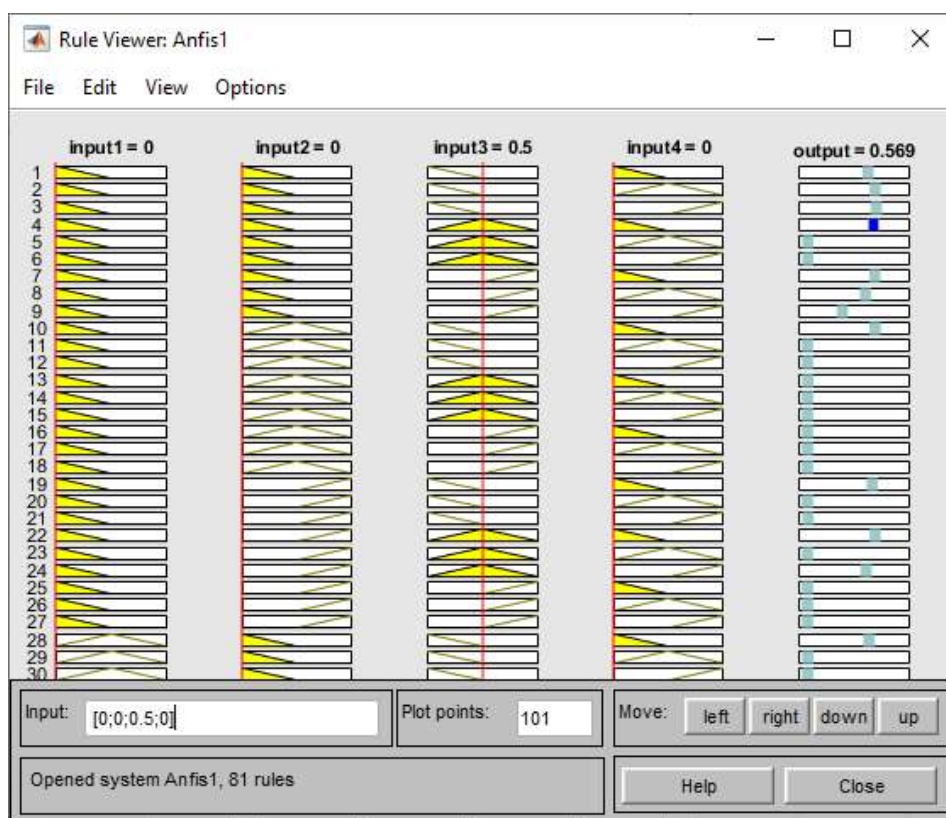


Рисунок 3.20 – Редактор “Rule Viewer” после обучения гибридной сети

Выводы по третьему разделу

В третьем разделе предложена структура интеллектуальной системы управления процессом гравитационного обогащения, которая состоит из трех уровней управления. Определены функции каждого уровня. Предложена методика формирования базы знаний обучающей выборки интеллектуальной системы. Разработаны интеллектуальные алгоритмы для определения ключевых переменных процесса обогащения в исследуемых аппаратах. Реализованы режимы обогащения.

Так как разрабатываемая интеллектуальная система интегрируется в существующую систему автоматизации аппаратов гравитационного обогащения, то нижний и средний уровень представлены аппаратными средствами уже установленными на объектах исследования.

4 ПРОВЕРКА АДЕКВАТНОСТИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ МОДЕЛЕЙ (АЛГОРИТМОВ) УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССАМИ ГРАВИТАЦИОННОГО ОБОГАЩЕНИЯ РУДЫ

В разделе 3 были разработаны интеллектуальные алгоритмы управления процессами гравитационного обогащения с применением нечеткой логики, нейронных и гибридных сетей. Для промышленных испытаний необходимо выбрать наиболее адекватные алгоритмы для каждого процесса, то есть три алгоритма – алгоритм управления гравитационным обогащением в отсадочной машине в режиме максисального извлечения, алгоритм управления гравитационным обогащением в отсадочной машине в режиме максисального содержания, алгоритм управления гравитационным обогащением в центробежном концентраторе.

4.1 Оценка адекватности интеллектуальных моделей (алгоритмов) управления аппаратами гравитационного обогащения

В общем случае под адекватностью понимают степень соответствия модели тому реальному явлению или объекту, для описания которого она строится. Вместе с тем, создаваемая модель ориентирована, как правило, на исследование определенного подмножества свойств этого объекта. Поэтому можно считать, что адекватность модели определяется степенью ее соответствия не столько реальному объекту, сколько целям исследования [72].

В данном случае полезно иметь формальное подтверждение (или обоснование) адекватности разработанной модели. Один из наиболее распространенных способов такого обоснования – использование методов математической статистики [72]. Суть этих методов заключается в проверке выдвинутой гипотезы (в данном случае – об адекватности модели) на основе некоторых статистических критериев.

Оценка адекватности интеллектуальных алгоритмов выполнена с использованием следующих критериев:

- корреляции экспертных и модельных значений (R);
- среднеквадратичной ошибки (Root Mean Square Error);
- средней абсолютной ошибки (Mean absolute percentage error).

Для оценки адекватности полученных алгоритмов была составлена тестовая выборка входных переменных для каждого гравитационного процесса. Выходные переменные были получены в результате опроса экспертов ($Y^Э$) и тестирования полученных алгоритмов ($Y^М$).

Тестирование полученных алгоритмов выполнялось следующим образом.

Графический интерфейс, представленный на рисунке 4.1, представляет нечеткую модель (алгоритм) получения оптимальных значений выходных переменных. В данном случае уровня «естественной» постели (level), частоты пульсации (speed) и нарушение технологии обогащения (alarm). Таким образом, имеется возможность определить выходные оптимальные значения при задании входных переменных из тестовой выборки с помощью нечеткого алгоритма.

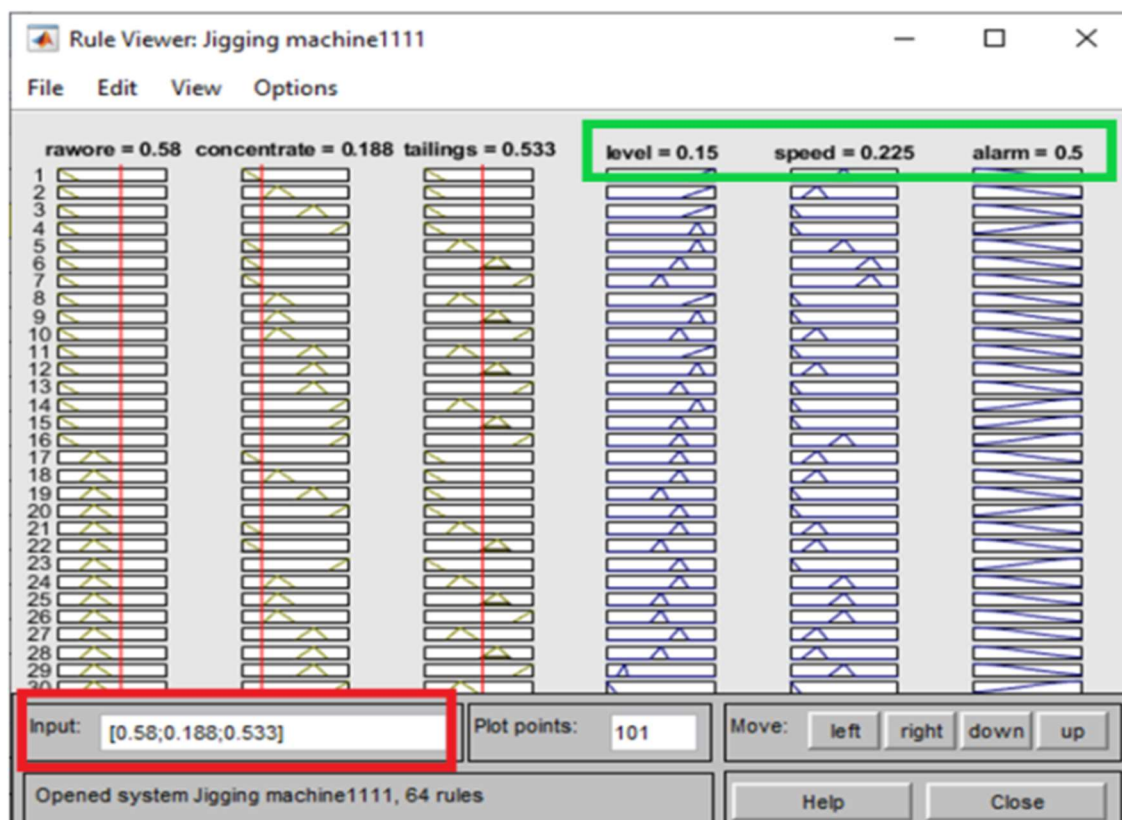


Рисунок 4.1 – Графический интерфейс программы просмотра правил

Для тестирования нейронной сети используем команду `sim`, рисунок 4.2.

```

Command Window
>> sim(net,[0.8;0.2;0.9])

ans =

    0.1199
    0.3833
    0.0009

fx >>

```

Рисунок 4.2 – Тестирование нейронной сети

Для тестирования нейронной сети используем команду `evalfis`, которая позволяет сформировать матрицу выходных переменных на основе тестовой выборки.

В результате для каждого процесса (гравтационное обогащение в отсадочной машине в режиме максисального излучения, гравтационное обогащение в отсадочной машине в режиме максисального содержания, гравтационное обогащение в центробежном концентраторе) были получены

экспертные и тестовые данные. В таблице А.1 приложения А представлен сравнительный анализ данных процесса гравитационного обогащения в отсадочной машине в режиме максисального излучения по каждой выходной переменной и каждому разработанному алгоритму.

Далее производим оценку адекватности алгоритмов по статистическим критериям. Вычислим коэффициент корреляции между экспертными значениями и значениями, полученные по модели (алгоритму), используя формулу:

$$R_{Y^{\text{Э}}Y^{\text{М}}} = \frac{\sum_{i=1}^m (Y_i^{\text{Э}} - \bar{Y}^{\text{Э}})(Y_i^{\text{М}} - \bar{Y}^{\text{М}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^m (Y_i^{\text{Э}} - \bar{Y}^{\text{Э}})^2 \sum_{i=1}^m (Y_i^{\text{М}} - \bar{Y}^{\text{М}})^2}}, \quad (4.1)$$

где $Y_i^{\text{Э}}$ – i -тое значение экспертных данных;

$\bar{Y}^{\text{Э}}$ – среднее значение экспертных данных;

$Y_i^{\text{М}}$ – i -тое значение данных полученных по модели;

$\bar{Y}^{\text{М}}$ – среднее значение данных, полученных по модели.

Вычислим среднеквадратичную ошибку:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{\text{Э}} - Y_i^{\text{М}})^2}{n}}, \quad (4.2)$$

где $Y_i^{\text{Э}}$ – i -тое значение экспертных данных;

$Y_i^{\text{М}}$ – i -тое значение данных полученных по модели;

n – количество значений.

И следующим критерием является средняя абсолютная ошибка, которая вычисляется по формуле:

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Y_i^{\text{Э}} - Y_i^{\text{М}}|, \quad (4.3)$$

где $Y_i^{\text{Э}}$ – i -тое значение экспертных данных;

$Y_i^{\text{М}}$ – i -тое значение данных полученных по модели;

n – количество значений.

Таким образом, используя формулы 4.1–4.3 и таблицы А.1, А.2 приложение А произведем оценку адекватности разработанных интеллектуальных алгоритмов управления процессом гравитационного обогащения .

Результаты оценки адекватности интеллектуальных алгоритмов процесса гравитационного обогащения руды в отсадочной машине в режиме максимального содержания представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Адекватность алгоритмов в режиме максимального содержания

Алгоритм	Нейронная сеть		Нечеткий алгоритм		Гибридный алгоритм	
	L	n	L	n	L	n
Переменная						
Критерий						
R	0,982	0,986	0,96	0,98	0,987	0,9951
RMSE	0,064	0,059	0,082	0,063	0,0563	0,0345
MAPE, %	4,76	4,203	7,4	6,1	3,903	2,711

Таким образом, согласно таблице 4.1 лучшие показатели адекватности имеет алгоритм, построенный на основе нейро–нечеткой (гибридной) модели. Корреляция значений уровня естественной постели, указанных экспертами для тестовой выборки и данных, рассчитанных гибридной сетью представлена на рисунке 4.3.

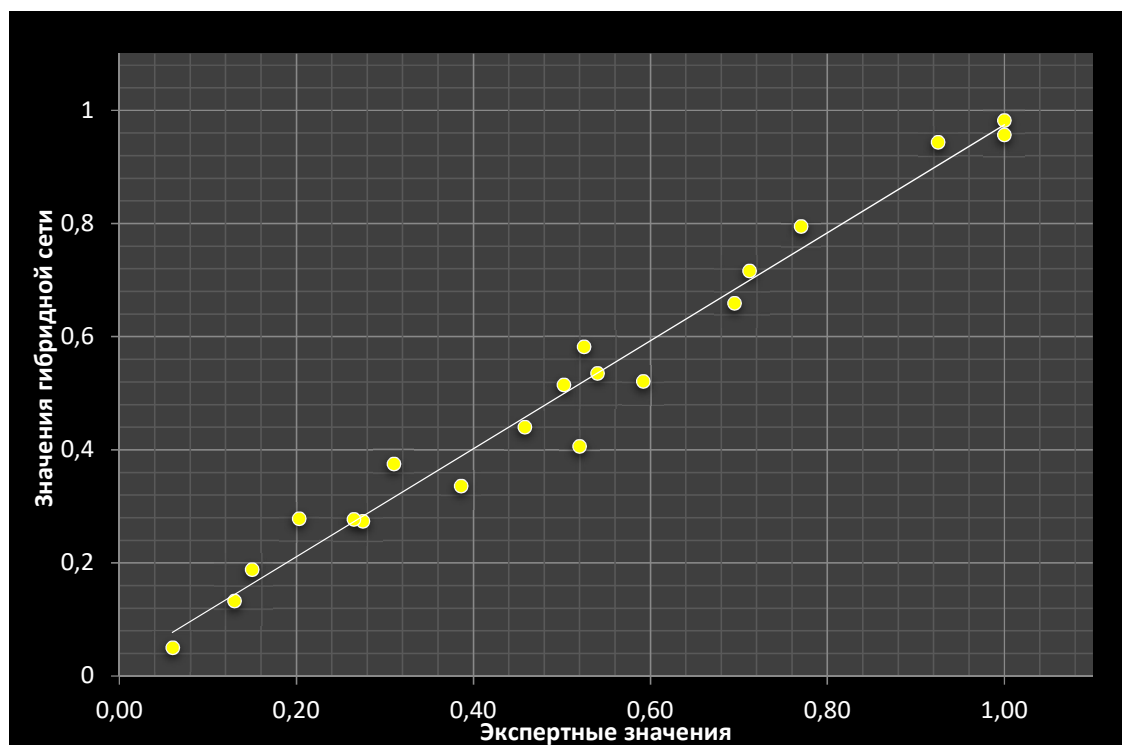


Рисунок 4.3 – Корреляция экспертных значений уровня естественной постели, полученных с помощью нейро–нечеткой сети $R=0.987$

Корреляция значений частоты пульсации, указанных экспертами для тестовой выборки и данных, рассчитанных гибридной сетью представлена на рисунке 4.4.

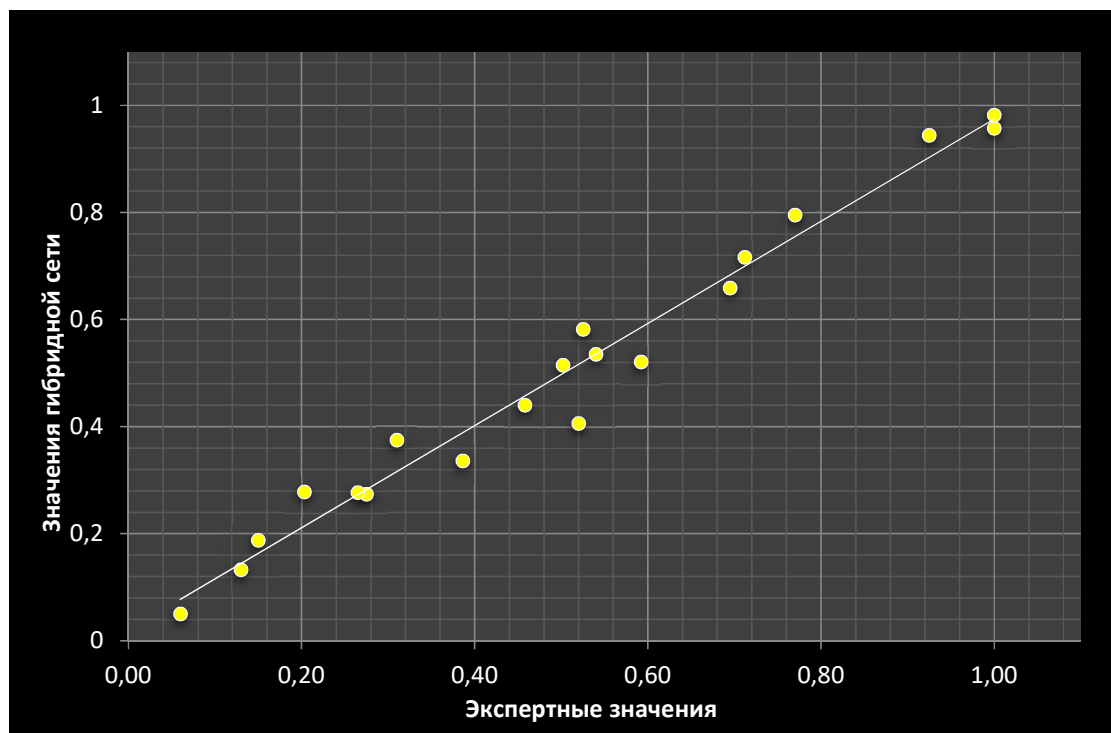


Рисунок 4.4 – Корреляция экспертных значений частоты пульсации и значений, полученных с помощью нейро–нечеткой сети $R=0.9951$

Аналогичным образом, используя таблицы Б.1, Б.2 приложение Б и формулы 4.1–4.3 оценим адекватность интеллектуальных алгоритмов управления процессом гравитационного обогащения в отсадочной машине в режиме максимального извлечения. Результаты занесены в таблицу 4.2.

Таблица 4.2 – Адекватность алгоритмов в режиме максимального извлечения

Алгоритм	Нейронная сеть		Нечеткий алгоритм		Гибридный алгоритм	
	L	n_1	L	n_1	L	n_1
Переменная						
Критерий						
R	0,9868	0,986	0,980	0,9816	0,9931	0,9912
RMSE	0,0490	0,059	0,058	0,0665	0,0356	0,0462
MAPE, %	3,95	4,203	4,575	5,22	2,795	3,49

Таким образом, согласно таблице 4.2 лучшие показатели адекватности имеет алгоритм, построенный на основе нейро–нечеткой (гибридной) модели. Корреляция значений уровня естественной постели, указанных экспертами для тестовой выборки и данных, рассчитанных гибридной сетью представлена на рисунке 4.5.

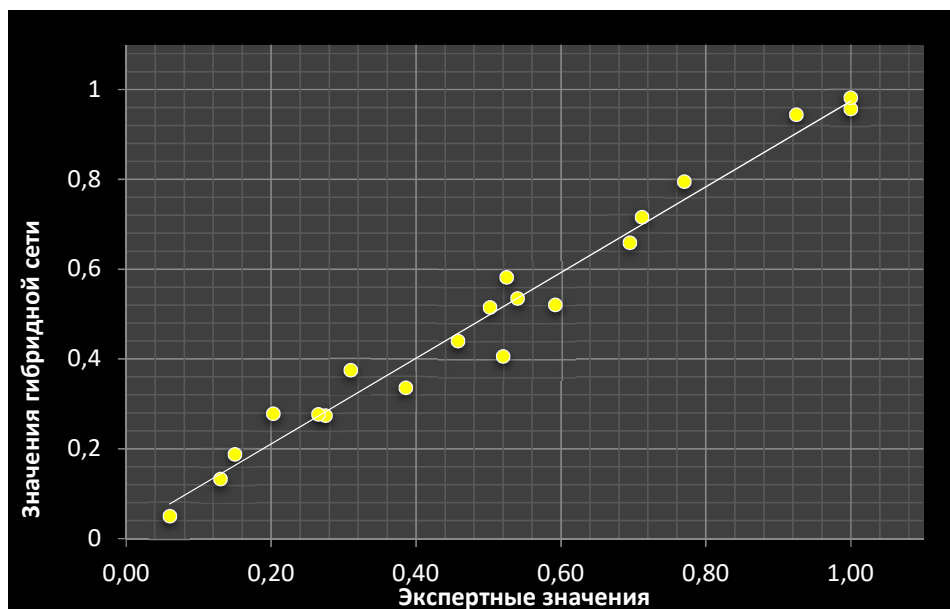


Рисунок 4.5 – Корреляция экспертных значений уровня естественной постели, полученных с помощью нейро–нечеткой сети $R=0.9931$

Корреляция значений частоты пульсации, указанных экспертами для тестовой выборки и данных, рассчитанных гибридной сетью представлена на рисунке 4.6.

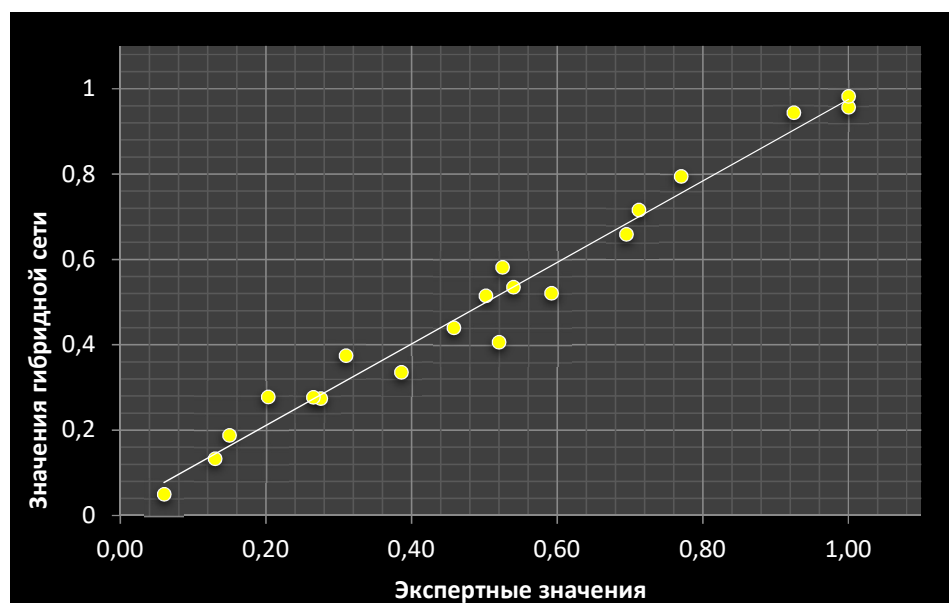


Рисунок 4.6 – Корреляция экспертных значений частоты пульсации и значений, полученных с помощью нейро–нечеткой сети $R=0.9912$

На основе данных результатов исследования выполнена публикация [69].

Далее проводится оценка адекватности интеллектуальных алгоритмов гравитационного обогащения в центробежном сепараторе. Данные представлены в таблицы В.1, В.2 приложение В. Используя формулы 4.1–4.3, получены следующие результаты – таблица 4.3.

Таблица 4.3 – Адекватность алгоритмов управления центробежным концентратом

Алгоритм	Нечеткий			Нейронная сеть			Нейро–нечеткая сеть		
	n ₂	d	m	n ₂	d	m	n ₂	d	m
Переменная									
Критерий									
R	0,945	0,95	0,972	0,94	0,965	0,954	0,979	0,968	0,987
RMSE	0,083	0,048	0,055	0,09	0,066	0,221	0,032	0,047	0,044
MAPE, %	4,035	4,25	4,76	4,78	5,22	8,55	2,395	3,73	3,385

Таким образом, согласно таблице 4.3 лучшие показатели адекватности имеет алгоритм, построенный на основе нейро–нечеткой (гибридной) модели. Корреляция значений частоты вращения импеллера, указанных экспертами для тестовой выборки и данных, рассчитанных гибридной сетью представлена на рисунке 4.7.

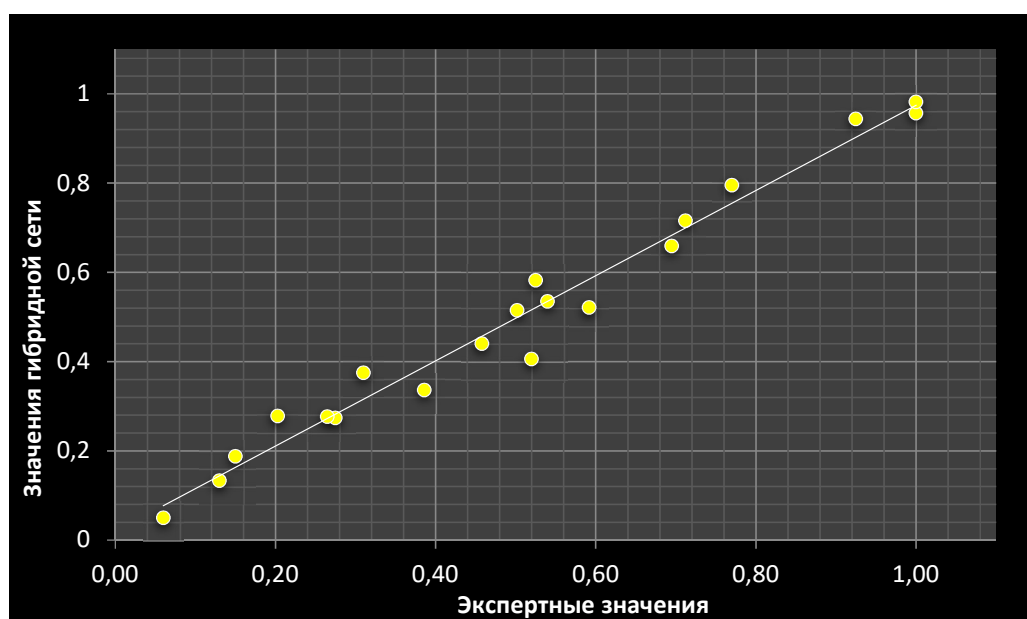


Рисунок 4.7 – Корреляция экспертных значений уровня естественной постели, полученных с помощью нейро–нечеткой сети R=0.9892

Корреляция значений ширины открытия форсунок, указанных экспертами для тестовой выборки и данных, рассчитанных гибридной сетью представлена на рисунке 4.8.

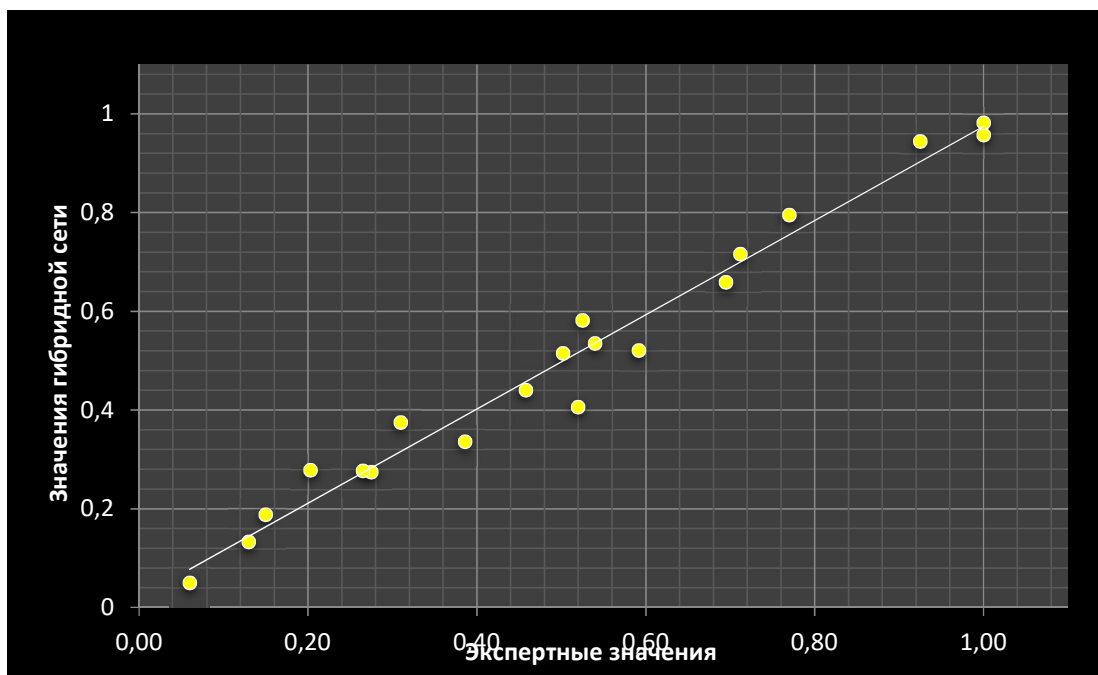


Рисунок 4.8 – Корреляция экспертных значений ширины открытия форсунок и значений, полученных с помощью нейро–нечеткой сети $R=0.9879$

Корреляция значений степени открытия клапана подачи воды, указанных экспертами для тестовой выборки и данных, рассчитанных гибридной сетью представлена на рисунке 4.9.

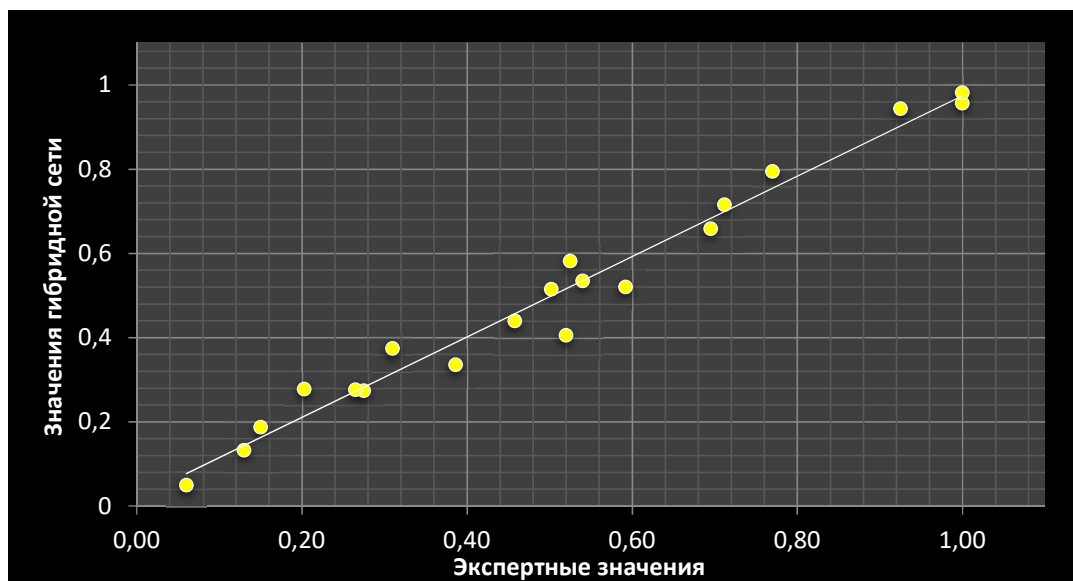


Рисунок 4.9 – Корреляция экспертных значений ширины открытия форсунок и значений, полученных с помощью нейро–нечеткой сети $R=0.9871$

Таким образом, сравнивая статистические критерии адекватности по каждой выходной переменной различных режимов работы гравитационных аппаратов и каждому интеллектуальному методу, можно сделать вывод, минимальное значение средней абсолютной ошибки расчета переменных процесса гравитационного обогащения имеет нейро–нечеткая гибридная сеть. В результате оценки адекватности нейро–нечеткого алгоритма, ни по одной переменной нет превышения средней абсолютной ошибки (МАРЕ) значения более 5%.

Нечеткие нейронные сети наделены всеми достоинствами обычных нейронных сетей, а так же системой нечеткого вывода и нечеткой логикой. Они позволяют разрабатывать и представлять модели систем с помощью нечетких правил, которые обладают наглядностью и простотой представления. Преимуществом нечетких нейронных сети заключается в распараллеливании обработки информации и способности самообучаться, создавая обобщения, которые способны получать обоснованный результат на основании данных, которые не участвовали и не встречались в процессе обучения сети. Это преимущество нечетких нейронных сетей позволяет решать сложные, а порой и масштабные задачи, которые на сегодняшний день являются трудноразрешимыми [71, 73]. К таким задачам можно отнести оценку выходных переменных процесса гравитационного обогащения руда, в котором наблюдается сложная взаимосвязь входных и выходных переменных. Оценка адекватности интеллектуальных алгоритмов процессом гравитационного обогащения показывает обоснованность применения нейро–нечетких алгоритмов для решения данной проблемы.

4.2 Методика проведения промышленного эксперимента для проверки интеллектуальных моделей (алгоритмов) управления процессом гравитационного обогащения

На основании исследований, проведенными в подразделе 4.1 сделан вывод, что наибольшей адекватностью обладают интеллектуальные алгоритмы, построенные на основе гибридных, нейро–нечетких систем. В результате эти алгоритмы выбраны для следующего этапа проверки адекватности – промышленного эксперимента.

Теория предполагает, что эксперимент может быть пассивным и активным.

При пассивном эксперименте информация об исследуемом объекте накапливается путем пассивного наблюдения, то есть информацию получают в условиях обычного функционирования объекта.

Активный эксперимент позволяет быстрее и эффективнее решать задачи исследования, но более сложен, требует больших материальных затрат и может помешать нормальному ходу технологического процесса. Спланировать и реализовать активный эксперимент в условиях обогатительной фабрики весьма сложно. В первую очередь, это связано с тем, что обогащение это непрерывный и многостадийный процесс технологический процесс, ориентированный на получение качественного концентрата в максимальном количестве. Любые

экспериментальные исследования нарушают технологический процесс, как минимум могут привести к потере производительности. Соответственно, добиться разрешения руководства обогатительных предприятий на проведение экспериментов весьма сложно. Поэтому в ходе второго этапе проверки алгоритмов предложена следующая методика, основанная на методологии пассивного экспериментирования, но позволяющая извлечь достаточно достоверную информацию.

Методология пассивного экспериментирования предполагает проведение большой серии опытных исследований с поочередным варьированием значений входных переменных x и анализом результатов измерений выходной переменной y (лабораторный эксперимент или эксперимент на пилотной установке). К пассивному эксперименту принято относить также и сбор опытных данных в режиме эксплуатации промышленной установки – промышленный эксперимент [74].

Промышленный эксперимент был проведен с учетом особенностей работы аппарата гравитационного обогащения руды. Так как методология проверки адекватности моделей (алгоритмов) в ходе промышленного эксперимента идентична, будет рассмотрен эксперимент с использованием алгоритма управления процессом гравитационного обогащения руды в отсадочной машине сепараторного типа в режиме максимального извлечения.

Эксперимент был выполнен в пять этапов:

- регистрация оперативных данных процесса гравитационного обогащения в отсадочной машине – концентрации Cr_2O_3 в исходной руде Q_p , – концентрации Cr_2O_3 в хвостах Q_{xb1} , – концентрации Cr_2O_3 в товарном концентрате $Q_{к1}$, уровень «естественной» постели L , частоты пульсации – n_1 на реальном объекте;

- моделирование процесса гравитационного обогащения в среде Matlab в режиме реального времени;

- анализ оперативных данных процесса гравитационного обогащения в отсадочной машине;

- сравнение значений выходных переменных процесса (уровень «естественной» постели L , частоты пульсации – n_1) на реальном объекте и значений полученных по модели в один и тот же момент времени;

- построения графиков зависимости критериев оптимальности процесса гравитационного обогащения ($Q_{к1}$, Q_{xb1}) от разности реальных и модельных значений.

Данная методика позволяет провести тестирование интеллектуальных алгоритмов без активного вмешательства в технологический процесс, что исключает риск нарушения технологии и потери готового продукта, и как следствие, значительно упрощает решение организационных вопросов с персоналом промышленных предприятий при проведении эксперимента.

Источником оперативных данных о значениях переменных процесса является Scada-система отсадочной машины, которая благодаря архивации (трендам) позволяет получить значения переменных в необходимые моменты

времени. Изменение переменной «Уровень естественной постели» во времени, представлен на рисунке 4.10.



Рисунок 4.10 – Тренд переменной «Уровень естественной постели»

Таким образом получены данные всех входных и выходных переменных процесса обогащения в отсадочной машине. На рисунке 4.11 схематично представлена отсадочная машина сепараторного типа с входными и выходными переменными, которые измеряются датчиками.

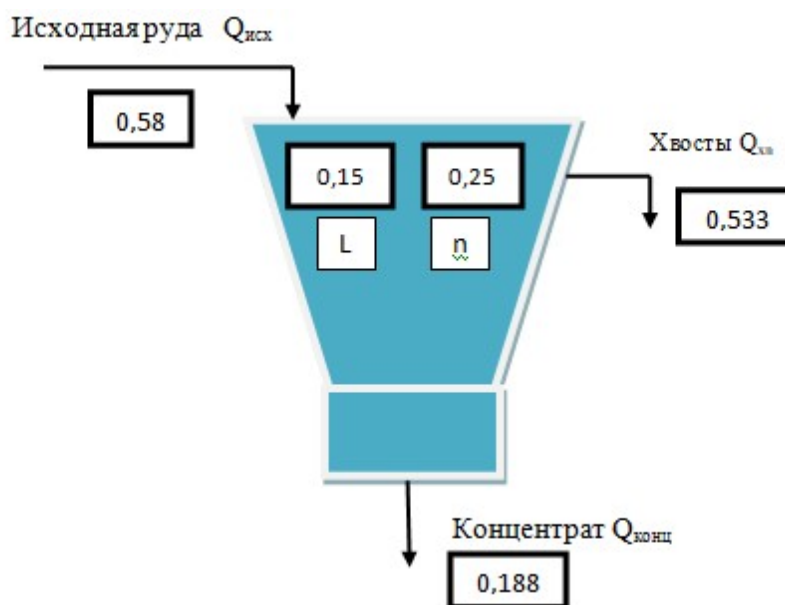


Рисунок 4.11 – Измерение входных и выходных параметров отсадочной машины

Входные данные с датчиков с периодом дискретизации 5 минут забивались в Rule Viewer (рисунок 4.12) с целью получения выходных значений. Время и рассчитанные значения фиксировались.

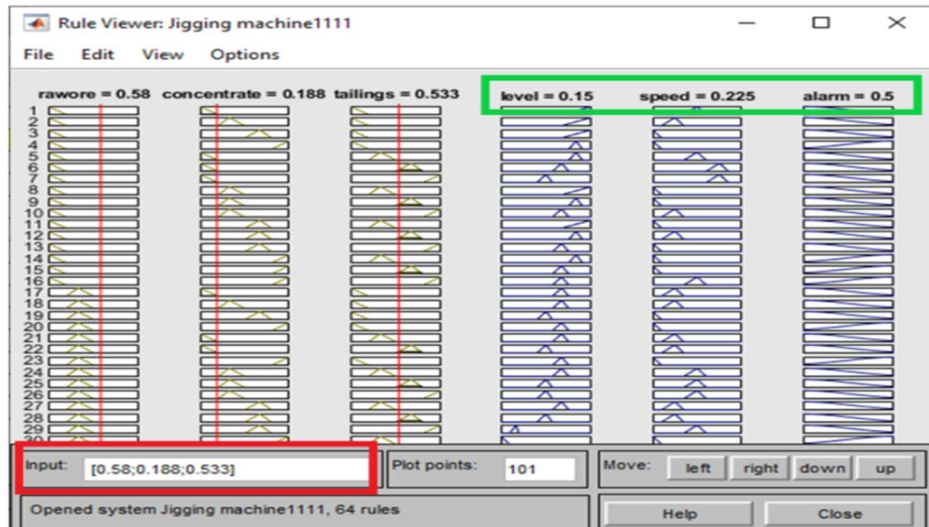


Рисунок 4.12 – Тестирование нейро–нечеткого алгоритма

Для сравнения текущих значений и значений, определенных алгоритмом, необходимы данные были получены из производственных трендов. Кроме того, была учтена временная диаграмма работы отсадочной машины сепараторного типа, которая была представлена на рисунке 4.13. Диаграмма показывает время обработки исходной руды в отсадочной машине, то есть запаздывание выхода концентрата и хвостов от подачи исходной руды. При анализе данных это является существенным, так необходимо оценивать входные переменные модели в разные моменты времени с учетом t_0 , t_1 , t_2 .

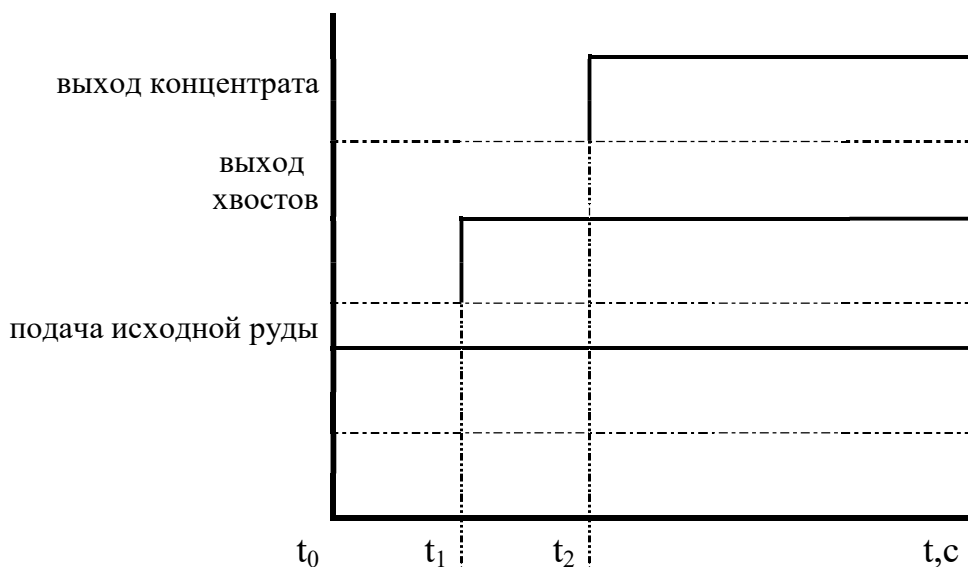


Рисунок 4.13 – Временная диаграмма работы отсадочной машины

Промышленный эксперимент проводился в течении 8-часовой рабочей смены. Так как данные фиксировались с периодом в 5 минут, за это время было получено 96 комбинаций входных и выходных переменных с реального обогащительного аппарата – отсадочной машины L_R и n_R и соответственно, вычислено 96 значений уровня «естественной» постели L_A , частоты пульсации – n_A . Фрагмент данных из 30 наблюдений представлен в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Данные промышленного эксперимента

Q_p	Q_{xbl}	Q_{kl}	L_R	L_A	n_{1R}	n_{1A}
32,30	4,00	53,90	180	179	45,00	45,00
36,80	15,00	39,00	180	185	45,00	38,00
30,10	4,00	52,40	180	178	45,00	50,00
28,70	4,10	50,90	190	187	40,00	40,00
28,00	7,00	45,00	190	185	40,00	38,00
28,00	12,50	40,00	190	190	40,00	38,00
32,30	7,40	45,00	175	185	45,00	42,00
30,20	7,20	46,10	175	184	45,00	44,00
31,40	7,12	43,50	175	180	45,00	48,00
28,50	4,20	52,13	190	187	40,00	41,00
33,60	2,00	55,40	190	191	40,00	40,00
29,50	5,50	50,40	190	186	40,00	41,00
34,60	9,07	43,71	165	171	48,00	45,00
36,90	6,20	46,50	165	168	48,00	51,00
35,40	4,20	48,40	165	169	48,00	45,00
32,50	5,10	50,00	170	172	45,00	47,00
32,00	10,10	44,60	170	178	45,00	40,00
32,00	9,40	45,00	170	175	45,00	40,00
30,80	7,70	47,12	170	172	45,00	42,00
33,10	8,40	43,36	160	168	50,00	41,00
29,50	7,20	45,00	160	170	50,00	42,00
35,40	5,50	48,20	160	165	50,00	47,00
33,20	4,20	52,40	165	164	55,00	53,00
33,70	4,50	51,90	165	162	55,00	52,00

Далее был построен график зависимости:

$$F_1 = Q_{\text{конц}}(|L_R - L_A|), \quad (4.4)$$

где $|L_R - L_A|$ – разность между текущим значением уровня естественной постели и значением, вычисленном с помощью алгоритма при одинаковых входных переменных, [см]; $Q_{\text{конц}}$ – содержание Cr_2O_3 в товарном концентрате, [%].

Зависимость содержания Cr_2O_3 в товарном концентрате от разности модельных и текущих значений уровня естественной постели представлена на рисунке 4.14.

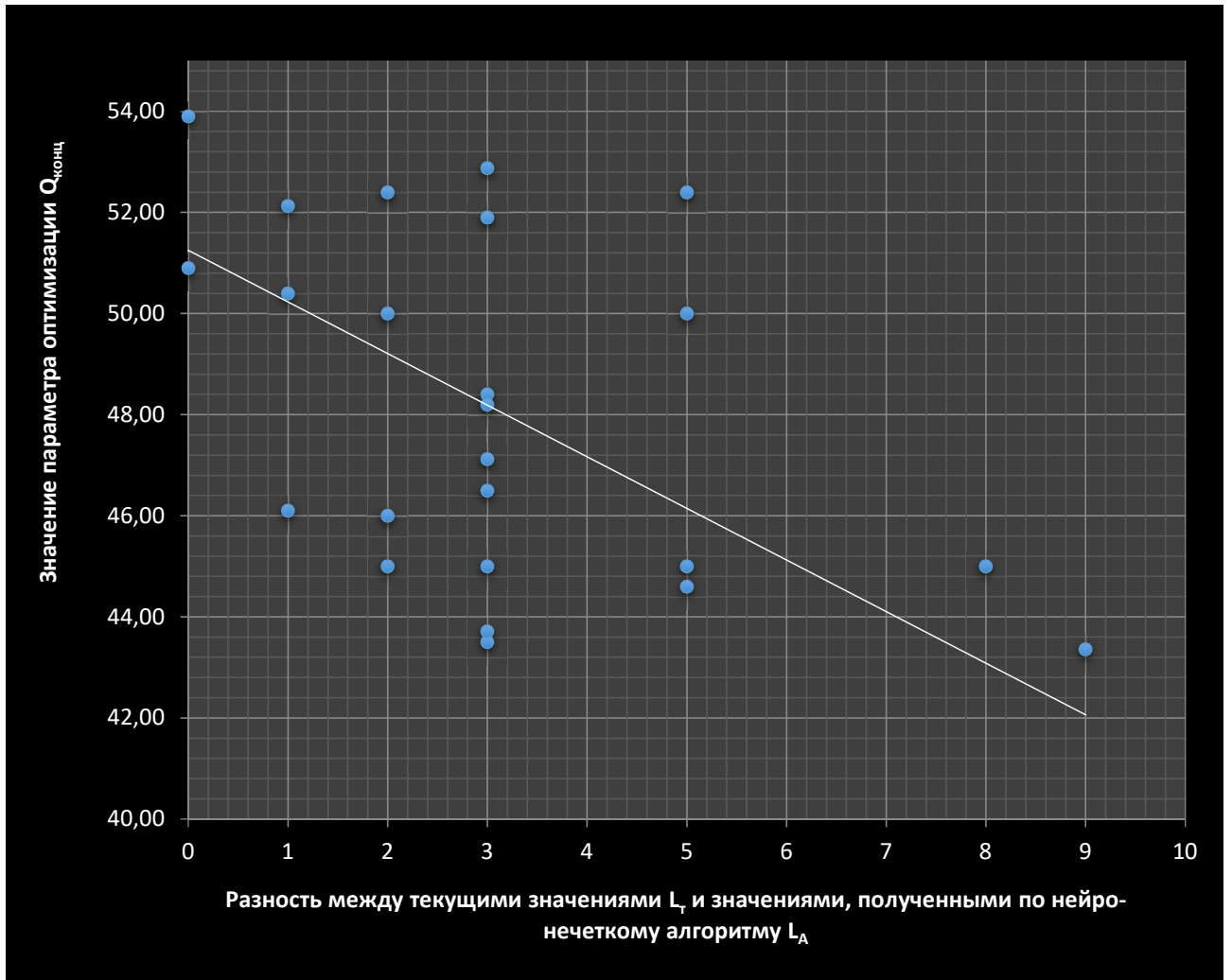


Рисунок 4.14 – Зависимость концентрации $Q_{\text{конц}}$ от разности модельных и текущих значений уровня естественной постели

Аналогично была получена зависимость содержания Cr_2O_3 в товарном концентрате от разности между текущим значением частоты пульсации и значением, вычисленном с помощью модели управления при одинаковых входных переменных:

$$F_1 = Q_{\text{конц}}(|n_{1R} - n_{1A}|), \quad (4.5)$$

где $|n_{1R} - n_{1A}|$ – разность между текущим значением частоты пульсации и значением, вычисленном с помощью алгоритма при одинаковых входных переменных.

Зависимость содержания Cr_2O_3 в товарном концентрате от разности модельных и текущих значений частоты пульсации представлена на рисунке 4.15

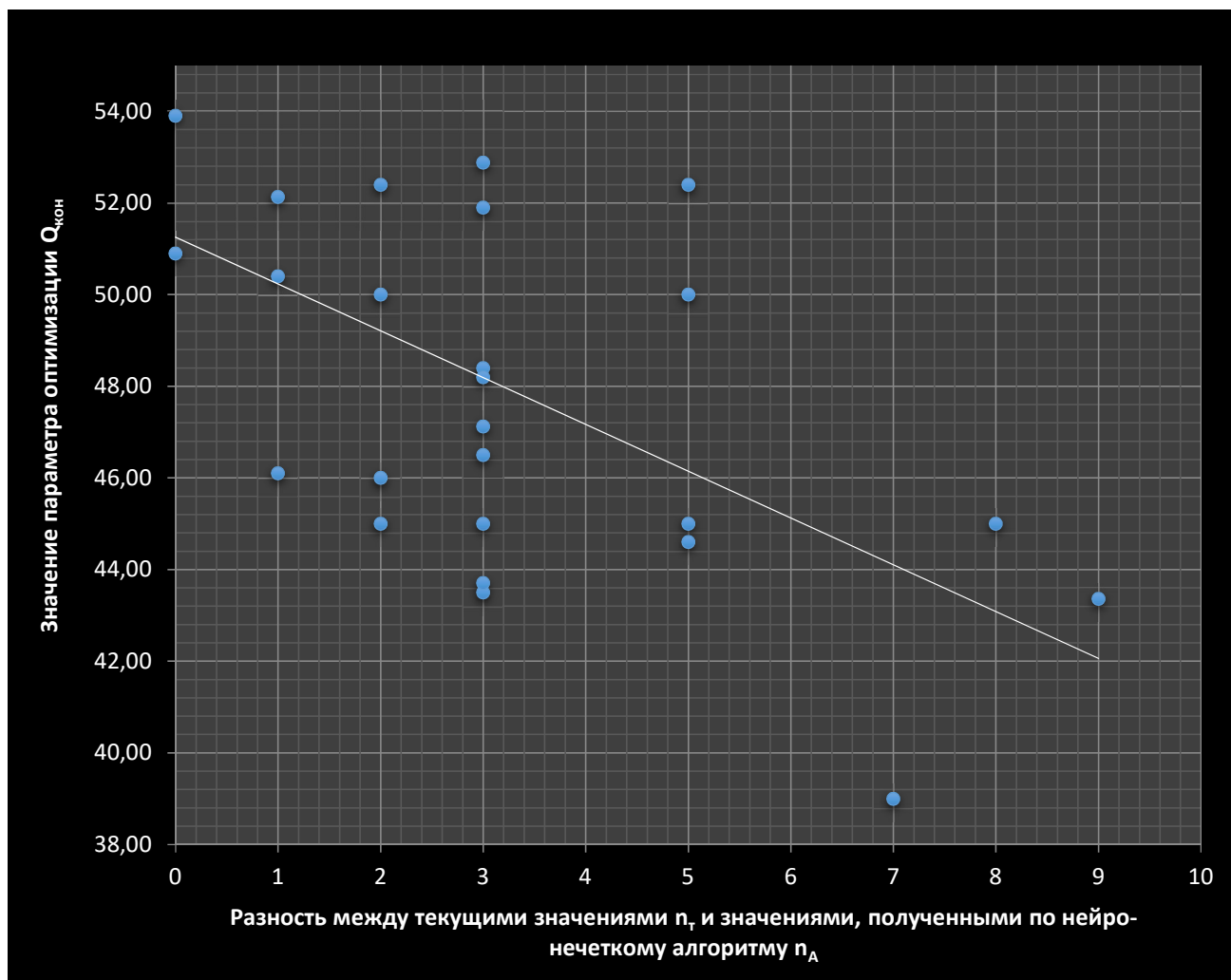


Рисунок 4.15 – Зависимость концентрации $Q_{конц}$ от разности модельных и текущих значений уровня естественной постели

Таким образом, исследование, проведенное в течении промышленного эксперимента показало, что чем меньше текущие значения ключевых переменных процесса отличаются от значений, рассчитанных по нейро-нечеткому (гибридному) алгоритму, тем выше показатели обогащения (содержание Cr_2O_3 в концентрате).

Выводы по четвертому разделу

В пятом разделе выполнена оценка адекватности синтезированных моделей управления, которая проводилась в два этапа. На первом были использованы методы математической статистики с использованием следующих критериев:

- корреляции экспертных и модельных значений (R);

- среднеквадратичной ошибки (Root Mean Square Error);
- средней абсолютной ошибки (Mean absolute percentage error).

Выбран алгоритм, расчетные значения которого минимально отличались от экспертных – гибридный алгоритм.

Предложена методика проведения промышленного эксперимента в реальных производственных условиях без активного вмешательства в технологический процесс. Используя данную методику интеллектуальные алгоритмы прошли второй этап тестирования. В результате проведенных исследований выяснено, что чем меньше текущие значения ключевых переменных процесса отличаются от значений, рассчитанных по нейро–нечеткому (гибридному) алгоритму, тем выше показатели обогащения (содержание Cr_2O_3 в концентрате).

5 ИНТЕГРАЦИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ В СУЩЕСТВУЮЩИЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ ОБОГАТИТЕЛЬНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

В разделе 4 синтезированные алгоритмы (модели) управления прошли тестирование и для интеллектуальной системы управления выбраны гибридные алгоритмы. Ниже рассмотрены мероприятия по интеграции интеллектуальной системы управления в существующие системы автоматизации обогатительных предприятий.

В настоящее время обогатительные предприятия Казахстана имеют высокий уровень автоматизации. Практически повсеместно используются современные ПЛК и средства контроля и управления. В связи с этим основным требованием к разработанной система интеллектуального управления является способность к интеграции с действующими системами автоматизации обогатительных предприятий. Данное требование реализуется следующим образом.

Входные переменные ИСУ измеряются существующими датчиками концентромерами и плотномерами, алгоритмы управления реализуются существующими контроллерами Simatic S7–300, задание на которые посредством OPC сервера поступает из ПО Matlab. Управляющее воздействие поступает на исполнительные механизмы: частотные преобразователи и клапаны.

5.1 Интеграция интеллектуальных (алгоритмов) управления с ПЛК системы автоматизации аппаратов гравитационного обогащения

Для реализации интеллектуальных алгоритмов управления, разработанных в системе автоматизации их необходимо загрузить в плк. Таким образом будет выполнена интеграция интеллектуальных алгоритмов в существующую систему автоматизации. Для интеграции была использована технология OPC, который используется в качестве связующего звена между средой моделирования и контроллером. Передача данных между средой моделирования и сервером поддерживается на уровне Simulink, имеющим своем составе библиотеку OPC Toolbox, позволяющую сконфигурировать OPC клиент. Передача данных между контроллером и сервером поддерживается на уровне драйверов, которые в данном случае входят в состав дистрибутива OPC сервера [48].

Этапы настройки работы сервера с контроллером представлен на рисунке 5.1

Объект OPC Read выполняет функцию чтения значения указанного тэга сервера. Программный объект включает в себя 3 входа — V, Q, T. На выход V (value) поступает непосредственно значение, на выход Q (quality) — его показатель качества, на выход T (timestamp) — время последнего обновления тэга [46].

Управление уровнем естественной постели и частотой пульсации в ОМ и частота вращения импеллера, ширина открытия форсунок, степень открытия клапана необходимо для содания оптимального процесса обогащения, осуществляется при помощи контроллера S7–300.



Рисунок 5.1 – Настройка работы OPC-сервера

Для расчета необходимых значений этих переменных используются алгоритмы нейро–нечеткой логики интеллектуальной системы управления. На рисунке 5.2 приведена схема передачи данных между контроллером и ПО Matlab. Данные о состоянии входных переменных (плотность пульпы, концентрация Cr_2O_3 в хвостах, концентрация Cr_2O_3 в готовом продукте, расчет критерия питания для концентратора и содержание Cr_2O_3 в исходной руде, содержание Cr_2O_3 в хвостах, содержание Cr_2O_3 в концентрате для ОМ) передаются из сервера в программу Matlab по средствам технологий передачи данных OPC.

В этом случае OPC является связующим звеном между средствами измерения и исполнительными механизмами существующих систем автоматизации и синтезированными интеллектуальными алгоритмами.

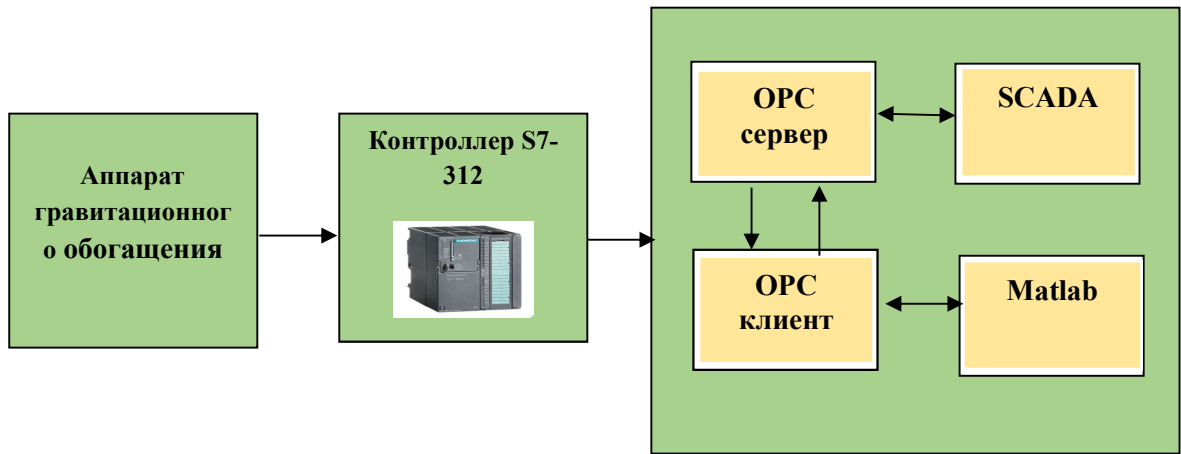


Рисунок 5.2 – Схема передачи данных между контроллером и ПО Matlab

На следующем этапе производится расчет значений выходных переменных. Для этого применяются алгоритмы нейро-нечеткой логики, которые показали лучшие результаты адекватности в подразделе 4.1. На рисунке 5.3 представлен фрагмент программы управления ОМ в Matlab.

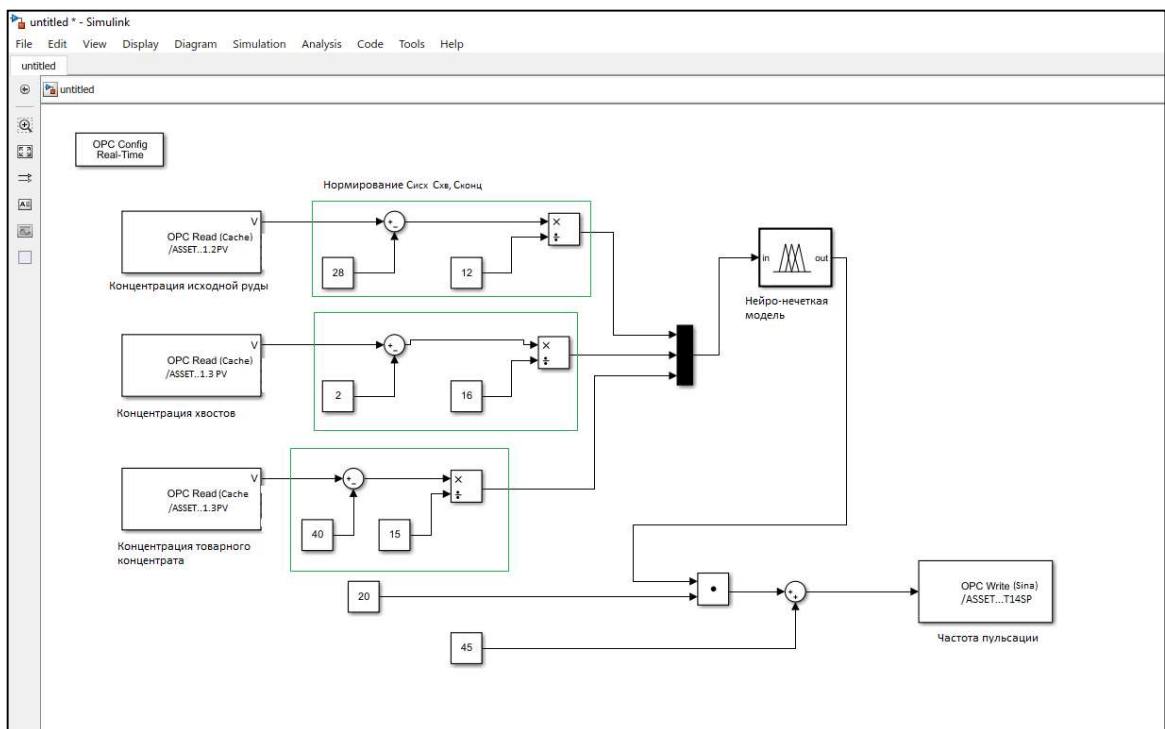


Рисунок 5.3 – Фрагмент программы, реализованной в Matlab

В данной программе входными величинами являются содержание Cr_2O_3 в исходной руде, содержание Cr_2O_3 в хвостах, содержание Cr_2O_3 в концентрате, значения которых берутся из сервера. Далее производится приведение этих

переменных к нормальному виду — величина от 0 до 1. Преобразованные данные поступают в блок «fuzzy logic controller», который представляет собой блок нейро–нечеткой логики и производит расчет необходимых значений уровня естественной постели и частоты пульсации по соответствующим правилам. Эти значения передаются в блоки PID–регуляторов контроллера S7–300. Данные рассчитанные значения являются для PID–блоков заданием.

Испытания проводились на обогатительной фабрики ТОО «Восход–Хром», акт представлен в приложении Е. Процесс испытаний представлен на рисунке 5.4.



Рисунок 5.4 – Испытание интеллектуальных моделей (алгоритмов) в промышленных условиях

В результате чего разработанная интеллектуальная система показала свою работоспособность и корректность выбранных алгоритмов управления. Выходные данные, рассчитанные с помощью нейро–нечеткого алгоритма, обеспечивают оптимальный режим обогащения, исключая потерю концентрата. Система может быть использована как в качестве рекомендаций оперативному персоналу так и самостоятельно.

5.2 Функциональные схемы автоматизации аппаратов гравитационного обогащения

В основе информационного обеспечения разработанной интеллектуальной системы управления используются средства автоматизации действующих систем. Иными словами, входные переменные система получает с датчиков, выходные переменные подаются на исполнительные механизмы, которые предусмотрены существующей системой автоматизации аппаратов гравитационного обогащения. ФСА отсадочной машины представлена на рисунке 5.5.

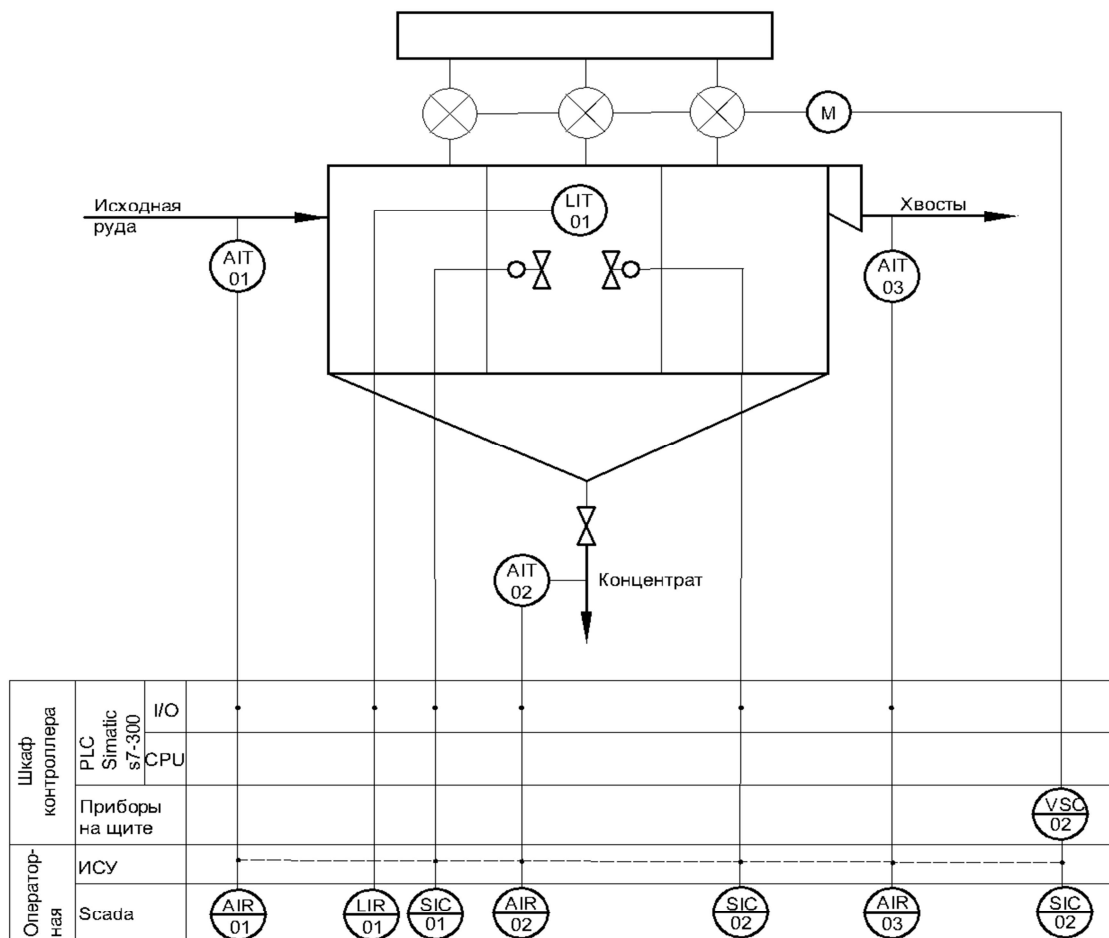


Рисунок 5.5 – Функциональная схема отсадочной машины

Информация о содержании Cr_2O_3 в исходной руде, в хвостах и концентрате измеряется концентромерами рентгенофлуоресцентными цеховыми РКЦ–1М (поз. AIT01, AIT02, AIT03) и поступает на модули ввода котроллера Simatic S7–300. Функциональные блоки программы CPU контроллера интегрированы со средой Matlab, где реализованы интеллектуальные алгоритмы и обеспечивается расчет оптимальных значений ключевых переменных. Данные поступают в функциональные блоки программы CPU контроллера, где вырабатываются управляющие воздействия, которые посредством модулей вывода передаются на исполнительные механизмы (преобразователь частоты электродвигателя и гидравлические клапаны поз. VSC02 и SIC01, SIC02).

ФСА центробежного концентратора представлена на рисунке 5.6.

Информация о содержании Cr_2O_3 в питании концентратора (исходная пульпа), в хвостах и концентрате измеряется концентраторами рентгенофлуоресцентными цеховыми РКЦ-1М (поз. АIT04, АIT05, АIT06) и поступает на модули ввода контроллера Simatic S7-300. Функциональные блоки программы CPU контроллера интегрированы со средой Matlab, где реализованы интеллектуальные алгоритмы и обеспечивается расчет оптимальных значений ключевых переменных. Данные поступают в функциональные блоки программы CPU контроллера, где вырабатываются управляющие воздействия, которые посредством модулей вывода передаются на исполнительные механизмы (преобразователь частоты электродвигателя импеллера и воздушные клапаны поз. VSC03 и SIC04, SIC06 и клапан питания SIT01). Воздушные клапаны в зависимости от давления поданного воздуха, обеспечивают степень открытия дроссельных заслонок.

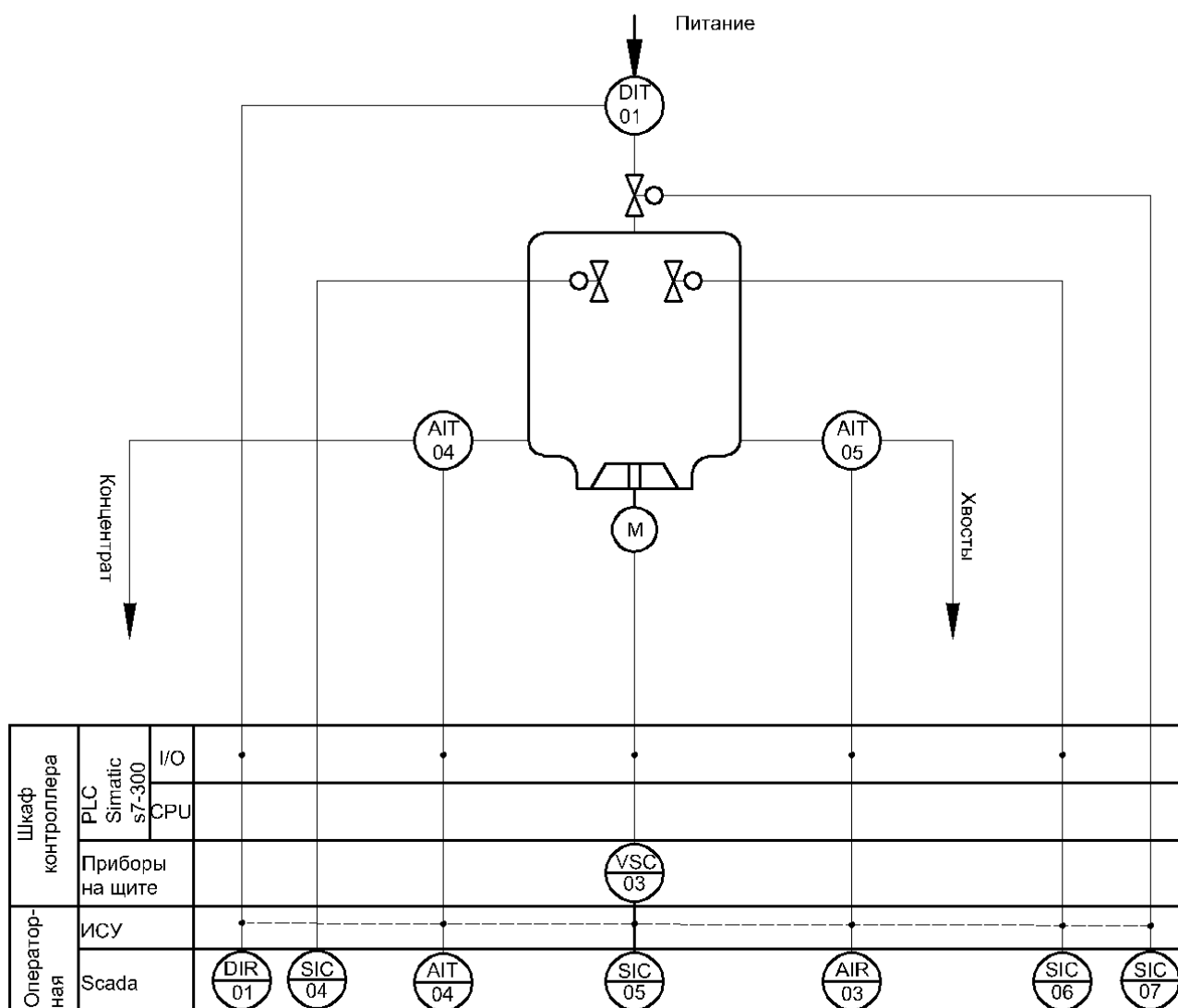


Рисунок 5.6– Функциональная схема центробежного концентратора

В общем виде интеграция ИС в системы автоматизации, существующие системы автоматизации выглядит следующим образом, пунктиром выделена система автоматизации, которыми оснащены современные системы и аппараты обогащения. ОРС сервер является связующим звеном между интеллектуальными алгоритмами определения ключевых переменных и средствами автоматизации. Интеллектуальные алгоритмы используют информацию с датчиков в качестве входных переменных, рассчитывают оптимальные значения (выходные переменные), которые становятся заданием для запрограммированных в ПЛК контуров регулирования. Структура интеллектуальной системы представлена на рисунке 5.7.

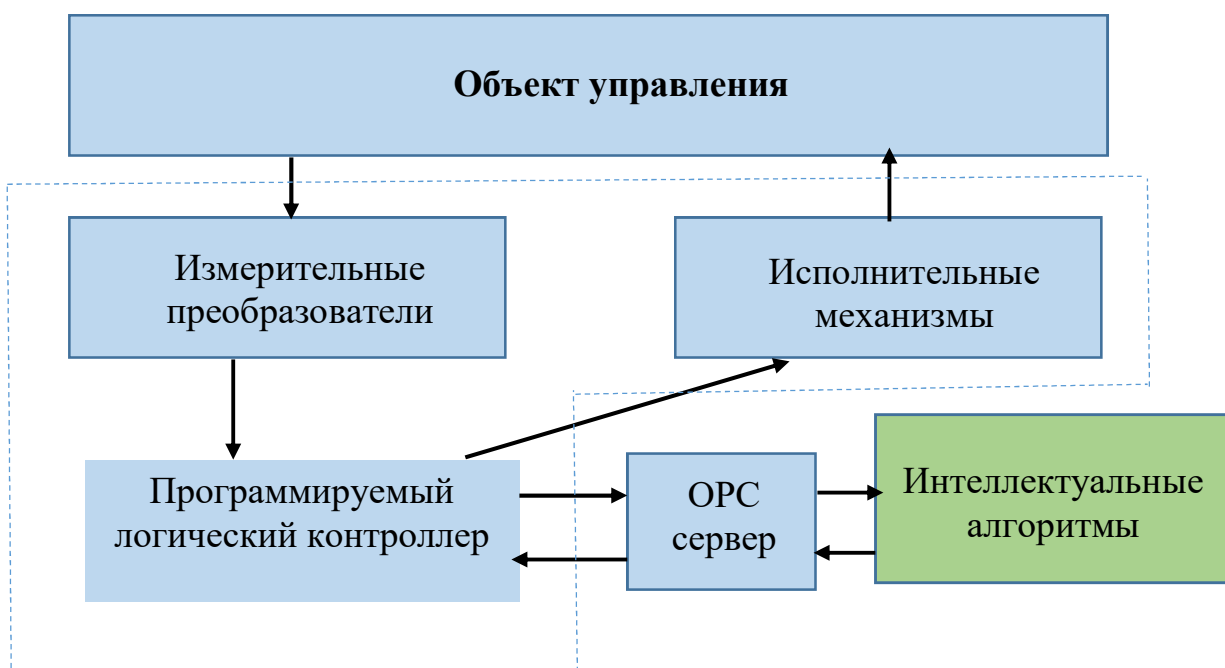


Рисунок 5.7 – Структура интеллектуальной системы

Выводы по пятому разделу

В пятом разделе представлены мероприятия по интеграции разработанной ИС в существующие системы автоматизации обогатительных предприятий. На примере использования ПЛК Simatic S7–300 показана интеграция ПО Matlab, где реализованы интеллектуальные алгоритмы и ПЛК. Разработанные ФСА аппаратов обогащения определяют функционирование интегрированной интеллектуальной системы управления процессом гравитационного обогащения в целом. Представлена структурная схема интеграции ИС в существующие системы автоматизации предприятий обогащения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Краткие выводы по результатам диссертационного исследования.

В данной работе описана разработка интеллектуальной системы управления процессов гравитационного обогащения с использованием двух аппаратов обогащения – отсадочной машины сепараторного типа и центробежного концентратора; разработана модель движения частиц концентрата и пустой породы в гравитационном поле отсадочной машины; разработаны интеллектуальные определения ключевых переменных процессов обогащения для каждого аппарата гравитационного обогащения; проведены промышленные испытания разработанных алгоритмов. В рамках исследования получены следующие результаты:

1) исследован технологический процесс гравитационного обогащения на современных аппаратах гравитационного обогащения, проанализированы особенности технологического процесса как объекта управления. Приведен анализ существующего состояния систем управления обогатительных предприятий, обоснована актуальность темы исследования;

2) разработана математическая модель движение частиц концентрата и пустой породы различных руд в отсадочной машине, которая позволяет моделировать движение частиц в зависимости от частоты пульсации; определены ключевые переменные технологического процесса в исследуемых аппаратах гравитационного обогащения;

3) разработана иерархическая структура интеллектуальной системы управления с учетом существующих средств автоматизации исследуемых аппаратов гравитационного обогащения;

4) предложена методика разработки обучающей выборки для интеллектуальных алгоритмов на основе глобальных приоритетов, которая позволяет выявить наиболее компетентных экспертов–технологов для создания базы знаний путем усреднения их мнений без потери достоверности информации;

5) синтезированы интеллектуальные модели (алгоритмы) с применением нечеткой логики, нейронных и гибридных сетей, оценена адекватность полученных моделей управления;

6) предложена методика проведения промышленных испытаний в ходе пассивного эксперимента, позволяющая оценивать корректность разработанных алгоритмов;

7) представлены мероприятия по интеграции интеллектуальных алгоритмов управления в существующие системы автоматизации предприятий, на примере исследуемых аппаратов гравитационного обогащения.

Оценка полноты решения поставленных задач. В результате выполнения данной работы были решены следующие задачи:

– выполнен анализ, выявлены особенности процессов гравитационного обогащения;

– выявлены проблемы в существующих системах автоматизации;

- определены ключевые переменные управления процессом гравитационного обогащения в технологических аппаратах;
- разработана модель движения частиц концентрата и пустой породы;
- разработана структура интеллектуальной системы управления;
- синтезированы модели (алгоритмы) управления для двух технологических режимов – максимальное содержание и максимальное извлечение, выполнен анализ их корректности и определены алгоритмы, которые будут включены в интеллектуальную систему;
- проведены промышленные испытания разработанной интеллектуальной системы;
- разработаны мероприятия по интеграции интеллектуальных алгоритмов в существующие системы автоматизации обогатительных предприятий.

Рекомендации и исходные данные по конкретному использованию результатов

Практическая значимость проведенных исследований заключается в следующем:

- предложенная интеллектуальная система управления аппаратами гравитационного обогащения, обеспечивающая максимальные показатели обогащения в зависимости от заданного режима, которая может интегрирована в существующие системы автоматизации обогатительных предприятий с минимальными финансовыми затратами.
- разработанные интеллектуальные алгоритмы могут использоваться как автономная экспертная система при управлении процессом гравитационного обогащения в качестве советника технологическому персоналу.

Оценка экономической эффективности технологии

Анализ оперативных данных показывает, что существующие системы управления не обеспечивают максимально возможные показатели обогащения в аппаратах гравитационного обогащения, потери концентрата составляют в среднем 7%.

На основании проведенных испытаний разработанная интеллектуальная система управления дает адекватные результаты при различных режимах работы аппаратов обогащения, исключает человеческий фактор влияния на технологический процесс и обеспечивает максимальные показатели обогащения. Таким образом, повышает производительность аппаратов на 7% и следовательно, повышение прибыльности обогатительного производства.

Кроме того, разработанная система способна к интеграции в существующие системы автоматизации с минимальными финансовыми затратами.

Оценка научного уровня выполнения работы в сравнении с лучшими достижениями в данной области. На основании выполненных исследований получены следующие новые результаты:

- разработанная математическая модель движения частиц концентрата и пустой породы руды может быть применена для исследования режимов работы процесса отсадки различных руд;

– разработана методика построения базы знаний для интеллектуальных систем с использованием оценки глобальных приоритетов экспертов, которая позволяет выявить наиболее компетентных экспертов. В результате чего уменьшается объем обработки экспертной информации без потери ее достоверности;

– синтезированы и исследованы интеллектуальные модели (алгоритмы) управления процессом гравитационного обогащения;

– предложена методика проведения испытания интеллектуальных алгоритмов в промышленных условиях без активного вмешательства в технологический процесс.

По результатам, полученным в процессе диссертационного исследования выполнено 11 публикаций (ПРИЛОЖЕНИЕ Г) в которых проведена апробация результатов исследования, в том числе в совместных монографиях, посвященных вопросам ресурсосберегающих технологий в горно-обогатительной промышленности, кроме того, проведены исследования за период научно-исследовательской стажировки (ПРИЛОЖЕНИЕ Д) и испытания на реальном обогатительном предприятии (ПРИЛОЖЕНИЕ Е). Таким образом, полученных результаты достоверны и практически применимы.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Forbes Kazakhstan, 2015 электронная версия на сайте https://forbes.kz/stats/ostatochnyie_yavleniya.
- 2 Е. Сагиндиқов Ақтүбінская область: ставка на инновации // Казахстан. – 2006, №2 // <http://investkz.com/journals/47.html>. 10.10.18
- 3 В.С. Лисин, Ю.С. Юсфин Ресурсно-экологические проблемы XXI века и металлургия // М.: Высшая школа, 1996. – 447 с.
- 4 Виды продукции предприятий группы ERG // <https://www.erg.kz/ru/content/deyatel-nost/vidy-produkcii-predpriyatii-gruppy>. 10.10.19.
- 5 Справочник по обогащению руд: Подготовительные процессы // М.: Недра, 1982. 366 с.
- 6 В. Н. Шохин, А. Г. Лопатин Гравитационные методы обогащения // М.: Недра, 1993 (1980). 350 с.
- 7 A. Graffari, Farzanegan An investigation on laboratory Knelson concentrator separation performance: part 2: two-component feed separation modelling // Miner.Eng.-2017.-112 PP.114-124
- 8 В. З. Козин, Е. Ф. Цыпин, Н. Ф. Меринов Новые теоретические решения и развитие технологии и техники обогащения полезных ископаемых // Известия вузов. Горный журнал. 2002. № 3. С. 116-130.
- 10 Т.Г. Фоменко Гравитационные процессы обогащения полезных ископаемых // М.: Недра, 1966. С.425
- 11 В.М. Авдохин Обогащение углей: Учебник для вузов: В 2 т. // М.: Издательство «Горная книга», 2012. — Т. 1. Процессы и машины. — 424 с.: ил.
- 12 Р.О. Берт Технология гравитационного обогащения. // М.: Недра, 1990 – 574 с.
- 13 М.В. Верхотуров Гравитационные методы обогащения: учеб. для вузов // 3-е изд – М.: МАКС Пресс, 2006. – 352 с.
- 14 Б.А. Сулейменов, А. Смолаж Е.А. Кулакова Моделирование процесса отсадки хромовой руды на основе скоростной гипотезы Риттенгера // Вестник ВКГТУ им. Серикбаева. – 2020. №1. – С. 146-152.
- 15 В.Г. Ульянов, Н.Е. Пахомов Разработка системы автоматического управления режима процесса гравитационного разделения в пневматических отсадочных машинах // Горный информационно-аналитический бюллетень №10, 2016. – С. 117-122.
- 16 Kumar Shravan, R.Venugopal Performance analysis of jig for coal cleaning using 3D response surface methodology // International Journal of Mining Science and Technology. – 2017. – Vol 27. – № 2. P. 333–337.
- 17 Alok Tripathy, Lopamudra Panda, A.K. Sahoo, S.K. Bisvval, R.K. Owari, A.K. Sahu Statistical optimization study of jiggling process on beneficiation of fine size high ash Indian non-coking coal // Advanced Powder Technology. – 2016. – Vol 21. – № 4. P.1219-1224

18 Lopamudra Panda, A.K. Sahoo. A. Tripathy. S.K. Biswal. A.K. Sahu Application of artificial neural network to study the performance of jig for beneficiation of non-coking coal // Fuel. – 2012. – Vol 87. – № 2. P 383–390.

19 F.Boylu, E. Talı, T. Çetinel. M.S. Celik. Effect of fluidizing characteristics on upgrading of lignitic coals in gravity based air jig // International Journal of Mineral Processing. – 2014. – Vol 129. – № 3. P 27-35.

20 Adam Jordens, Chris Marion, Ray Langlois, Tassos Grammatikopoulos, Neil A. Rowson, Kristian E. Waters, Beneficiation of the Nechalacho rare earth deposit. Part 1: Gravity and magnetic separation // Minerals Engineering. – 2016. – Vol 87. – № 2. P 457 – 463.

21 L. Panda, P.K. Banerjee, S.K. Biswal, R. Venugopal, N.R. Mandre. Modelling and optimization of process parameters for beneficiation of ultrafine chromite particles by selective flocculation // Separation and Purification Technology. – 2014. – Vol 37. – № 2. P 256 – 263.

22 Panda Lopamudra, Tripathy Sunil Kumar. Performance prediction of gravity concentrator by using artificial neural network-a case study // International Journal of Mining Science and Technology. – 2016. – Vol 48. – № 4. P 461 – 465.

23 Ram Chandra Chaurasia, Suresh Nikkam Application of Artificial Neural Network to Study the Performance of Multi Gravity Separator (MGS) Treating Iron Ore Fines // Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering. – 2015. – Vol 10. – № 1. P 13– 25.

24 Murthy YR, Tripathy SK, Kumar CR. Chrome ore beneficiation challenges & opportunities-a review // Min Eng. – 2014. – Vol 24. – № 2. P 377 – 383.

25 T. J. Stich, , J. K. Sporre, T. Velasco The application of artificial neural networks to monitoring and control of an induction hardening process // Journal of Industrial Technology – 2015. – Vol 16. – № 1. P 1– 11.

26 M. Massinaei, and R. Doostmohammadi Modeling of bubble surface area flux in an industrial rougher column using artificial neural network and statistical techniques // Minerals Engineering. – 2015. – Vol 23. – № 1. P 83– 90.

27 F. Nakhaei , M. R. Mosavi, A. Sam., Y. Vaghei Recovery and grade accurate prediction of pilot plant flotation column concentrate: Neural network and statistical techniques // International Journal of Mineral Processing – 2012. – Vol 110. – № 3. P 140 –154.

28 F. Nakhaei, M. R. Mosavi, and A. Sam Recovery and grade prediction of pilot plant flotation column concentrate by a hybrid neural genetic algorithm // International Journal of Mining Science and Technology. – 2017. – Vol 23, – №2. – P. 69-77.

29 F. Nakhaei, and M. Irannajad Comparison between neural networks and multiple regression methods in metallurgical performance modeling of flotation column // Physicochemical Problems of Mineral Processing . – 2013. – Vol 49, – №2. – P. 255- 266.

30 Слепцова, Е.С. Математическое моделирование процесса концентрации тяжелых частиц в постели отсадочной машины // Наука и образование.- 2014.- №3.- С. 239-245.

31 Е.А. Фалей Исследование закономерностей и разработка технических решений турбулентной центробежной сепарации минерального сырья // дис. канд. техн. наук: 25.00.13. – Екатеринбург, 2014. – 175 с.

32 Ю.П. Морозов, И.Х. Хамидулин, Е.А. Фалей, В.Ю. Черкасов Накопительные технологии гравитационного извлечения золота при обогащении сульфидных руд // Известия вузов. Горный журнал. – 2013. – № 7. – С. 102-106

33 В.В. Тютюнин Динамика минеральных частиц в центробежном поле при гравитационном обогащении: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 25.00.13. – Иркутск, 2009. – 22 с.

34 A. Graffari, Farzanegan. An investigation on laboratory Knelson concentrator separation performance: part 1: retained mass modeling// Miner.Eng.-2017.-Vol.112 P.57-67

35 Н.Ф. Меринов Закономерности движения минеральных зёрен в гравитационном поле // Обогащение руд. – 2006. – № 4. – С. 24-29.

36 Е. Кулакова, Б.А. Сулейменов Разработка интеллектуального алгоритма управления центробежным концентратором FALCON C1000 // Вестник КазНУ. – 2020. Vol. 137. - №1. – С. 440-449.

37 А.М. Васильев Анализ формул скорости свободного падения частиц шарообразной формы // Обогащение руд. – 2015. – № 2. – С. 22-26.

38 Г.М. Косой, В.В. Сапешко Динамика движения твёрдых частиц во вращающихся турбулентных потоках // Теорет. основы хим. технологии. – 1980. – Т. 14. – № 3. – С. 452-458.

39 А.В. Богданович, А.М. Васильев Исследование работы гравитационных сепараторов для обогащения тонкозернистых материалов // Обогащение руд. – 2005. – № 1. – С. 12-15.

40 A. Graffari, Farzanegan. An investigation on laboratory Knelson concentrator separation performance: part 2: two-component feed separation modelling // Miner.Eng. – 2017. – Vol.112. – P.114-124

41 Л.В. Никифорова, А.Н. Матвеев и др. Математическое моделирование процесса отсадки // Математические заметки СВФУ. – 2014. – Т. 21. №1. С.15-21.

42 Тихонов О.Н. Закономерности эффективного разделения минералов в процессах обогащения полезных ископаемых // М.: Недра, 1984. 208 с.

43 Каталог ООО «ХАЦЕМАГ АЛМИНЕРАЛ»// <https://allmineral.ru/oborudovanie/alljig>. 12.10.19.

44 Концентраторы «ФАЛКОН» МОДЕЛЬ C1000 Инструкция по установке и эксплуатации.

45 Б. В. Казевальтер Теоретические основы гравитационных процессов обогащения полезных ископаемых. М.: Недра, 1979. 295 с.

46 В.А. Suleimenov, Ye. Kulakova Synthesis modal and fuzzy regulators to maintain the frequency of pulsation of jigging machine // The 16th International Scientific Conference “Information Technologies and Management”. – 2018. – Vol.1. – P.51-52.

- 47 В. А. Suleimenov, Ye.Kulakova // Resource-saving technologies of raw-material base development in mineral mining and processing Multi-authored monograph, Petrosani, Romania, 2020, P. 198-224.
- 48 Б.А. Сулейменов, Ж.Ж. Омирбекова, А.Б. Сулейменов, Интеллектуальные системы управления технологическими процессами: Алматы, Шикула, 2017.
- 49 Т. Саати Принятие решений. Метод анализа решений. М.: Радио и связь, 1993. С.276.
- 50 А. Н. Павлов, Б.В. Соколов Методы обработки экспертной информации: учебно-метод. пособие, СПб., 2005, С.42.
- 51 Е.С. Никул Алгоритм формализации знаний экспертов. Активные вопросы исследования общественных и технических систем: Таганрог, 2011.
- 52 N. Nikzad–Khasmakhi, M.A. Balafar, M. Reza Feizi–Derakhshi The state-of-the-art in expert recommendation systems // Engineering Applications of Artificial Intelligence 2019. – Vol. 82. – P. 126-147.
- 53 Ulku Ozturka, S. Ilker Birbilb, Kadir Cicekc Evaluating navigational risk of port approach manoeuvrings with expert assessments and machine learning // Ocean Engineering.- 2019. – Vol. 192. – P. 348-356.
- 54 Б.Г. Литваг Экспертная информация. Методы получения и анализа М: Радио и связь, 2015.
- 55 Ye. Kulakova, В. Suleimenov Creation the knowledge base of the intelligent control system for gravitational enrichment process using expert information processing methods // Вестник КазНИТУ. – 2020. – Vol. 141. –№5 – P. 348-356.
- 56 Y. Kulakova , В. Suleimenov. The prospects for the use of intelligent systems in the processes of gravitational enrichment // Informatyka, Automatyka, Pomiarы w Gospodarce i Ochronie Środowiska. – 2019.- Vol.9 -№2 – P.46-49.
- 57 В. А. Suleimenov, N Toktasynova, Ye.Kulakova Energy and resource-saving technologies of developing the raw-material base of mining regions. Multi-authored monograph, Petrosani, Romania, 2021, P. 239-276.
- 58 А.А. Усков Системы с нечеткими моделями объектов управления. Монография. – Смоленск: СФРУК, 2013. – 153 с.: ил.
- 59 Д. А. Поспелова, Нечеткие множества в системах управления и искусственного интеллекта М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит. 1986.
- 60 Г.Э. Яхьяева, Нечёткие множества и нейронные сети М.: Интернет-Университет Информационных Технологий. 2006. - 316 с.
- 61 В.В. Борисов Нечеткие модели М.: Горячая линия-Телеком, 2007. – 284с.
- 62 С. Хайкин Нейронные сети: полный курс, 2-е издание: Пер. с англ. / С. Хайкин. М.: Вильямс, 2006. – 1104 с.: ил.
- 63 С. Осовский, Нейронные сети для обработки информации М.: Финансы и статистика, 2002. – 344 с.
- 64 Olexander N. Romanyuk, Andrzej Smolarz, Ye. Kulakova Modification of existing methods of visualization of offset face skin structure // Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering. – 2020. – Vol. 11456.– P.11456-13.

65 Б.А. Сулейменов, Е. Кулакова Интеллектуальная подсистема для определения оптимальной частоты пульсации отсадочной машины // IV Международная научно-практическая конференция «Интеграция научного сообщества перед глобальными проблемами современности». – 2019. – Vol.1– С. 226-232.

66 B A Suleimenov, Ye. Kulakova Intelligent subsystem for determining the optimum pulsation frequency of a jiggling machine // The 16th International Scientific Conference “Information Technologies and Management”. – 2018. – Vol.1– С. 49-50.

67 И.С. Суровцев Нейронные сети Воронеж: ВГУ, 1994. – 224 с.

68 R. Fuller Neural Fuzzy Systems: AboAkademi University, 1995.

69 Ye. Kulakova, W. Wójcik, B. Suleimenov, A. Smolarz, Comparison of intelligent control methods for the ore jiggling process // International journal of electronics and telecommunications. 2021 Vol 67, No 3. PP.363-368.

70 Г.Э. Яхьяева Нечеткие множества и нейронные сети: М.: Интернет-Университет Информ. Технологий: Бином. Лаборатория знаний, 2012.-315с.

71 А. Пегат Нечеткое моделирование и управление М.: Бином. Лаборатория знаний, 2009. С. 798.

72 К. К. Васильев, М. Н. Служивый. Математическое моделирование систем связи: учебное пособие // Ульяновск : УлГТУ, 2008.– 170 с.

73 М.А. Хорохорин, Применение распределенных информационных систем для оценки живучести нечетких графов // Информация и безопасность. - 2012.- Том 15. - № 2. - С. 245-248.

74 Г.Е. Белай, В.В. Дембовский, О.В. Саценко Организация металлургического эксперимента: М.: Металлургия, 1993. – 256 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Тестирование интеллектуальных моделей (алгоритмов) управления отсадочной машиной в режиме максимального содержания

Таблица А1 – Тестирование интеллектуальных алгоритмов определение переменной «Уровень «естественной» постели, L»

Содержание Cr_2O_3 в исходной руде	Содержание Cr_2O_3 в хвостах	Содержание Cr_2O_3 в концентрате	Экспертное значение $L^Э$	Нечеткий алгоритм L^F	Нейронная сеть L^{NN}	Гибридная сеть L^{GN}
0,1	0	0	0,95	0,94	0,9	0,92
0,1	0,35	0	0,95	0,93	0,93	0,95
0,1	0,63	0	0,95	0,93	0,9	0,93
0,1	1	0	0,8	0,78	0,85	0,8
0,1	0	0,33	0,8	0,82	0,82	0,68
0,1	0	0,67	0,6	0,7	0,7	0,6
0,1	0	1	0,5	0,5	0,5	0,5
0,1	0,35	0,33	0,97	0,9	0,79	0,97
0,1	0,35	0,67	0,83	0,78	0,78	0,9
0,1	0,31	1	0,67	0,65	0,65	0,7
0,1	0,63	0,33	1	0,95	0,95	1
0,1	0,63	0,67	0,83	0,85	0,85	0,83
0,1	0,63	1	0,5	0,57	0,57	0,5
0,7	0,31	0	0,1	0,22	0,25	0,1
0,7	0,7	0	0,1	0,15	0,15	0,1
0,7	1	0	0,5	0,46	0,46	0,55
0,7	0	1	0	0,15	0,15	0
0,7	0,31	0,33	0,33	0,43	0,5	0,4
0,7	0,31	0,67	0,17	0,25	0,25	0,19
0,9	0,63	0,67	0,6	0,52	0,46	0,65
0,9	0,63	1	0,4	0,42	0,42	0,38
0,9	1	0,33	0,4	0,39	0,39	0,45
0,9	1	0,67	0,52	0,48	0,48	0,52
0,9	1	1	0,33	0,35	0,35	0,43
0,9	0,31	1	0,2	0,15	0,15	0,12

Таблица А2 – Тестирование интеллектуальных моделей (алгоритмов) определение переменной «Частота пульсации, n»

Содержание Cr_2O_3 в исходной руде	Содержание Cr_2O_3 в хвостах	Содержание Cr_2O_3 в концентрате	Экспертное значение L^{\ominus}	Нечеткий алгоритм n^F	Нейронная сеть n^{NN}	Гибридная сеть n^{GN}
0,1	0	0	0,52	0,5	0,5	0,53
0,1	0,35	0	0,27	0,3	0,3	0,25
0,1	0,63	0	0,1	0	0	0,1
0,1	1	0	0,15	0,15	0,15	0,14
0,1	0	0,33	0,55	0,55	0,55	0,53
0,1	0	0,67	0,75	0,75	0,75	0,78
0,1	0	1	0,75	0,68	0,68	0,78
0,1	0,35	0,33	0,1	0,1	0,1	0,15
0,1	0,35	0,67	0,05	0,05	0,05	0,02
0,1	0,31	1	0,15	0,15	0,15	0,15
0,1	0,63	0,33	0,2	0,2	0,2	0,16
0,1	0,63	0,67	0,25	0,25	0,25	0,24
0,1	0,63	1	0	0,1	0,1	0,1
0,7	0,31	0	0	0,15	0,15	0,05
0,7	0,7	0	0	0	0,05	0,03
0,7	1	0	0	0,02	0,02	0
0,7	0	1	0,25	0,25	0,25	0,25
0,7	0,31	0,33	0,25	0,25	0,25	0,22
0,7	0,31	0,67	0	0	0	0,1
0,9	0,63	0,67	0	0,1	0	0
0,9	0,63	1	0,25	0,25	0,25	0,25
0,9	1	0,33	0,25	0,25	0,25	0,25
0,9	1	0,67	0,25	0,25	0,25	0,25
0,9	1	1	0,5	0,5	0,45	0,5
0,9	0,31	1	0,5	0,5	0,5	0,5
0,1	0	0	0,52	0,5	0,5	0,53
0,1	0,35	0	0,27	0,3	0,3	0,25

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Тестирование интеллектуальных моделей (алгоритмов) отсадочной машиной в режиме максимального извлечения

Таблица Б1 – Тестирование интеллектуальных алгоритмов определения переменной «Уровень «естественной» постели, L»

Содержание Cr_2O_3 в исходной руде	Содержание Cr_2O_3 в хвостах	Содержание Cr_2O_3 в концентрате	Экспертное значение $L^Э$	Нечеткий алгоритм L^F	Нейронная сеть L^{NN}	Гибридная сеть L^{GN}
0,1	0	0	0,92	0,96	1	0,93
0,1	0,35	0	0,92	0,94	1	0,92
0,1	0,63	0	0,92	0,82	0,82	0,9
0,1	1	0	0,78	0,78	0,78	0,8
0,1	0	0,33	0,78	0,78	0,78	0,82
0,1	0	0,67	0,56	0,66	0,66	0,59
0,1	0	1	0,56	0,56	0,56	0,66
0,1	0,35	0,33	0,9	0,9	0,9	0,82
0,1	0,35	0,67	0,8	0,78	0,78	0,85
0,1	0,31	1	0,6	0,56	0,56	0,6
0,1	0,63	0,33	0,9	1	1	0,95
0,1	0,63	0,67	0,8	0,68	0,68	0,78
0,1	0,63	1	0,45	0,5	0,5	0,45
0,7	0,31	0	0	0,05	0,05	0,12
0,7	0,7	0	0	0,1	0,1	0,05
0,7	1	0	0,45	0,52	0,55	0,5
0,7	0	1	0	0	0	0
0,7	0,31	0,33	0,3	0,3	0,3	0,33
0,7	0,31	0,67	0,1	0,1	0,2	0,18
0,9	0,63	0,67	0,5	0,56	0,6	0,6
0,9	0,63	1	0,3	0,36	0,39	0,23
0,9	1	0,33	0,3	0,28	0,28	0,3
0,9	1	0,67	0,45	0,5	0,5	0,47
0,9	1	1	0,28	0,32	0,25	0,28
0,9	0,31	1	0	0,1	0,1	0,1

Таблица Б2 – Тестирование интеллектуальных моделей (алгоритмов) определения переменной «Частота пульсации, n»

Содержание Cr_2O_3 в исходной руде	Содержание Cr_2O_3 в хвостах	Содержание Cr_2O_3 в концентрате	Экспертное значение $L^Э$	Нечеткий алгоритм n^F	Нейронная сеть n^{NN}	Гибридная сеть n^{GN}
0,1	0	0	0,48	0,5	0,48	0,47
0,1	0,35	0	0,2	0,3	0,2	0,21
0,1	0,63	0	0	0,1	0	0,05
0,1	1	0	0,1	0,1	0,1	0,12
0,1	0	0,33	0,5	0,6	0,5	0,55
0,1	0	0,67	0,68	0,68	0,68	0,65
0,1	0	1	0,68	0,68	0,68	0,7
0,1	0,35	0,33	0	0	0	0,1
0,1	0,35	0,67	0,05	0,05	0,05	0,06
0,1	0,31	1	0,15	0,1	0,15	0,15
0,1	0,63	0,33	0	0,1	0	0
0,1	0,63	0,67	0,2	0,25	0,2	0,2
0,1	0,63	1	0	0	0,1	0
0,7	0,31	0	0	0	0,15	0,1
0,7	0,7	0	0	0	0	0
0,7	1	0	0	0	0,13	0,08
0,7	0	1	0,3	0,3	0,33	0,3
0,7	0,31	0,33	0	0	0	0
0,7	0,31	0,67	0	0	0	0
0,9	0,63	0,67	0,2	0,2	0,2	0,2
0,9	0,63	1	0,18	0,18	0,18	0,18
0,9	1	0,33	0,3	0,3	0,3	0,3
0,9	1	0,67	0,2	0,2	0,2	0,2
0,9	1	1	0,5	0,5	0,5	0,5
0,9	0,31	1	0,5	0,5	0,5	0,5
0,1	0	0	0,48	0,5	0,48	0,47
0,1	0,35	0	0,2	0,3	0,2	0,21

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Тестирование интеллектуальных моделей (алгоритмов) управления центробежным концентратором

Таблица В.1 - Тестирование интеллектуальных моделей (алгоритмов) определения переменной «Частота вращения импеллера»

Плотность пульпы $Q_p, \%$	Содержание Cr_2O_3 в хвостах $Q_{хв}, \%$	Содержание Cr_2O_3 в концентрате $Q_{кон}, \%$	Критерий питания Р	Экспертное значение $n^Э$	Нечеткий алгоритм n^F	Нейронная сеть n^{NN}	Гибридная сеть n^{GN}
0,1	0,2	0	0	0,45	0,5	0,49	0,42
0,5	0,2	0	0	0,45	0,52	0,47	0,44
0,2	0,5	0	0	0,85	0,8	0,88	0,87
0,85	0	0,5	0	0,75	0,68	0,7	0,8
0,1	0	0,2	0,5	0,5	0,45	0,45	0,51
1	0	0	0	0,8	0,78	0,8	0,68
0,2	0,8	0	0	0,4	0,44	0,34	0,45
0	0	1	0	0,5	0,5	0,5	0,5
0	0	0,2	1	0,3	0,3	0,39	0,31
0,5	1	0	0	0,45	0,47	0,45	0,45
0,5	0	0	0	0,3	0,32	0,3	0,3
0	0,5	0	0	0,5	0,65	0,54	0,5
0,2	0	0,5	0	0,55	0,63	0,52	0,57
0	0	0	0,5	0,55	0,5	0,45	0,52
0,1	0	0	0	0,55	0,65	0,55	0,5
0	0	1	0	0,55	0,68	0,59	0,55
0	0	0	1	0,83	0,83	0,73	0,83
0,5	1	0	0,8	0,55	0,55	0,51	0,56
1	0,5	0	0	0,5	0,5	0,5	0,45
0,15	1	0,5	0	0,9	0,9	0,84	0,89
0	0	1	0,5	0,5	0,5	0,52	0,48
1	0,8	0	0	0,3	0,32	0,24	0,38
0	1	0,5	0	0,5	0,51	0,55	0,53
0,2	0	0,1	0,9	0,5	0,54	0,4	0,47
0	0	0	1	0,7	0,73	0,61	0,75
0,1	0,2	0	0	0,45	0,5	0,49	0,42
0,5	0,2	0	0	0,45	0,52	0,47	0,44

Таблица В.2 - Тестирование интеллектуальных моделей (алгоритмов) определения переменной «Ширина открытия форсунок»

Плотность пудлы $Q_{пл}, \%$	Содержание Cr_2O_3 в хвостах $Q_{хв}, \%$	Содержание Cr_2O_3 в концентрате $Q_{кон}, \%$	Критерий питания Р	Экспертное значение	Нечеткий алгоритм d^F	Нейронная сеть d^{NN}	Гибридная сеть d^{GN}
0,1	0,2	0	0	0,55	0,45	0,5	0,52
0,5	0,2	0	0	0,55	0,5	0,5	0,53
0,2	0,5	0	0	0,12	0,1	0,1	0,1
0,85	0	0,5	0	0,3	0,32	0,32	0,32
0,1	0	0,2	0,5	0,5	0,52	0,52	0,52
1	0	0	0	0,7	0,75	0,75	0,72
0,2	0,8	0	0	0,6	0,57	0,57	0,54
0	0	1	0	0,5	0,65	0,65	0,65
0	0	0,2	1	0,36	0,46	0,46	0,46
0,5	1	0	0	0,2	0,22	0,2	0,2
0,5	0	0	0	0,4	0,44	0,44	0,44
0	0,5	0	0	0,8	0,85	0,85	0,85
0,2	0	0,5	0	0,8	0,83	0,83	0,79
0	0	0	0,5	0,5	0,52	0,52	0,52
0,1	0	0	0	0,5	0,58	0,48	0,48
0	0	1	0	0,7	0,73	0,73	0,73
0	0	0	1	0,5	0,54	0,54	0,54
0,5	1	0	0,8	0,3	0,4	0,4	0,38
1	0,5	0	0	0,5	0,52	0,55	0,55
0,15	1	0,5	0	0,2	0,22	0,22	0,22
0	0	1	0,5	0,4	0,44	0,4	0,4
1	0,8	0	0	0,4	0,3	0,3	0,33
0	1	0,5	0	0,67	0,77	0,65	0,67
0,2	0	0,1	0,9	0,67	0,67	0,67	0,65
0	0	0	1	0,43	0,5	0,5	0,5
0,1	0,2	0	0	0,55	0,45	0,5	0,52
0,5	0,2	0	0	0,55	0,5	0,5	0,53

Таблица В.3 - Тестирование интеллектуальных моделей (алгоритмов) определения переменной «Степень открытия клапана»

Плотность пульпы $Q_{пл}, \%$	Содержание Cr_2O_3 в хвостах $Q_{хв}, \%$	Содержание Cr_2O_3 в концентрате $Q_{кон}, \%$	Критерий питания Р	Экспертное значение	Нечеткий алгоритм m^F	Нейронная сеть m^{NN}	Гибридная сеть m^{GN}
0,1	0,2	0	0	0,1	0,15	0,22	0,12
0,5	0,2	0	0	0,3	0,23	0,1	0,3
0,2	0,5	0	0	0	0,1	0,15	0,05
0,85	0	0,5	0	0,6	0,68	0,66	0,62
0,1	0	0,2	0,5	0,3	0,18	0,23	0,25
1	0	0	0	0,3	0,22	0,43	0,22
0,2	0,8	0	0	0	0,2	0,11	0,2
0	0	1	0	0,2	0,32	0,24	0,22
0	0	0,2	1	0,4	0,4	0,34	0,4
0,5	1	0	0	0,5	0,5	0,52	0,5
0,5	0	0	0	0,8	0,8	0,84	0,8
0	0,5	0	0	0	0,05	0,12	0,03
0,2	0	0,5	0	0	0,07	0,09	0,1
0	0	0	0,5	0	0,12	0,1	0,12
0,1	0	0	0	0,5	0,53	0,5	0,53
0	0	1	0	0	0,13	0,14	0,13
0	0	0	1	1	0,98	0,89	0,98
0,5	1	0	0,8	0,1	0,14	0,1	0,1
1	0,5	0	0	0,5	0,51	0,5	0,5
0,15	1	0,5	0	0	0	0,1	0
0	0	1	0,5	0,7	0,73	0,77	0,73
1	0,8	0	0	0,8	0,78	0,68	0,78
0	1	0,5	0	0	0,1	0,15	0
0,2	0	0,1	0,9	0	0,17	0,18	0,17
0	0	0	1	1	0,88	0,93	0,88
0,1	0,2	0	0	0,1	0,15	0,22	0,12
0,5	0,2	0	0	0,3	0,23	0,1	0,3

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Список публикаций

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН
СӘТБАЕВ УНИВЕРСИТЕТІ

СПИСОК НАУЧНЫХ ТРУДОВ
КУЛАКОВОЙ ЕЛЕНА АЛЕКСАНДРОВНЫ
специальность: 6D070200 – «Автоматизация и управление»

№ п/п	Наименование	Характер издания	Выходные данные	Количество стр.	Соавторы
1	2	3	4	5	6
Статьи в международных рецензируемых научных журналах, входящие в БД Scopus/Web of Science					
1	Comparison of intelligent control methods for the ore jigging process (article).	Печатный/ Электронный	International journal of electronics and telecommunications (IJET). Vol 67, №3, 2021, pp. 363-368, ISSN:2081-8491/e-ISSN:2300-1933.	6	W. Wojcik, B. Suleimenov, A. Smolarz.
Статьи в изданиях, рекомендованных Комитетом по обеспечению качества в сфере образования и науки МОН РК					
2	Моделирование процесса отсадки хромовой руды на основе скоростной гипотезы Риттенгера (статья).	Печатный/ Электронный	Вестник ВКПТУ им. Серикбаева. Том 87, №1, 2020, стр.146-152, ISSN 1561-4212.	6	Б. Сулейменов, А.Смолаж
3	Разработка интеллектуального алгоритма управления центробежным концентратором ТЛ1 СОН С1000 (статья).	Печатный/ Электронный	Вестник КазНПТУ. Том 137, №1, 2020, стр. 440-449, ISSN 1680-9211.	9	Б.Сулейменов
4	Creation the knowledge base of the intelligent control system for gravitational enrichment process using expert information processing methods (статья).	Печатный/ Электронный	Вестник КазНПТУ. Том 141, №5, 2020, стр. 590-597, ISSN 1680-9211	7	В.А. Suleimenov

«11» ноября 2021 г.

Автор работ

Главный ученый секретарь



(Handwritten signatures)

Е. А. Кулакова

К.В. Турмагамбетова

ОРИСНА Р

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН
СӘТБАЕВ УНИВЕРСИТЕТІ

Статьи, опубликованные в других научных журналах и изданиях

5	The prospects for the use of intelligent systems in the process of gravitational enrichment (статья).	Печатный/ Электронный	Informatyka, Automatyka, Pomiarы w Gospodarce i Ochronie Środowiska (IAPGOŚ), Vol 9, №2, 2019, стр. 46-50, ISSN: 2083-0157/eISSN: 2391-6761	4	В.А. Suleimenov
6	Resource-saving technologies of raw-material base development in mineral mining and processing (раздел книги)	Печатный/ Электронный	Multi-authored monograph, 2020, Petrosani, Romania, pp. 198-224, ISBN 978-973-741-694-0	25	В.А. Suleimenov
7	Energy and resource-saving technologies of developing the raw-material base of mining regions (раздел книги)	Печатный/ Электронный	Multi-authored monograph, Petrosani, Romania, 2021, pp. 239-276, ISBN 978-973-741-733-6.	37	В.А. Suleimenov N. Toktasynova
Международные научно-практические конференции					
8	“Modification of existing methods of visualization of offset face skin structure” (статья).	Печатный/ Электронный	Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering, Volume 11456, 2020, pp.11456-13, ISSN 0277-786X	3	Olexander N, Romanyuk, Sergey V, Andrzej Smolarz
9	Интеллектуальная подсистема для определения оптимальной частоты пульсации отсадочной машины (статья).	Печатный/ Электронный	IV Международная научно-практическая конференция «Интеграция научного сообщества перед глобальными проблемами современности». Том 1, 2019, стр.226-232, ISBN: 978-601-267-055-4	7	Б.Сулейменов

«11» ноября 2021 г.

Автор работ

Главный ученый секретарь



(Handwritten signatures)

Е. А. Кулакова

К.В. Турмагамбетова

ОРИСНА Р

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН
СӘТБАЕВ УНИВЕРСИТЕТІ

10	Synthesis modal and fuzzy regulators to maintain the frequency of pulsation of jiggling machine (тезис).	Печатный/ Электронный	The 16th International Scientific Conference "Information Technologies and Management", Vol 1, 2018, стр. 51-52, ISSN 1691-2489.	1	B A Suleimenov
11	Intelligent subsystem for determining the optimum pulsation frequency of a jiggling machine (тезис).	Печатный/ Электронный	The 16th International Scientific Conference "Information Technologies and Management", Vol 1, 2018, стр. 49-50, ISSN 1691-2489.	1	B A Suleimenov

«11» *наурыз* 2021 г.

Автор работ

Главный ученый секретарь



[Handwritten signature]

Е. А. Кулакова

К.В. Турмагамбетова

орисна *[Handwritten signature]*

ПРИЛОЖЕНИЕ Д
Справка об исследованиях в период стажировки



LUBLIN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY
Faculty of Electrical Engineering & Computer Science
Institute of Electronics and Information Technology

ul. Nałęczowska 38A, 20-018 Lublin, Poland; tel.: +48 81 538 43 09; fax: +48 81 538 43 12; e-mail: iei@pobub.pl; http://iei.pobub.pl



СПРАВКА
о выполнении научно-экспериментальных работ диссертационного
исследования
докторанта 2-го года обучения ИИТТ НАО КазНУТУ им. К.И.
Сатпаева
специальности 6D070200 — Автоматизация и управление
Кулаковой Елены Александровны
по теме «Разработка интеллектуальной системы управления
процессом гравитационного обогащения руды»

Данная справка подтверждает, что в период прохождения научной стажировки с 04.06.2019 г. по 05.07.2019 г. в Люблинском политехническом университете, г. Люблин (Польша) докторантом Кулаковой Е.А. проведены следующие научно-экспериментальные работы в рамках диссертационного исследования:

1. Разработана математическая модель движения частиц концентрата и пустой породы в гравитационном поле отсадочной машины. Адекватность модели проверена на эмитационном оборудовании.
2. Исследованы режимы работы отсадочной машины – режим максимального извлечения и режим максимального содержания. Разработаны матрицы ПФЭ для данных режимов.
3. Разработаны интеллектуальные алгоритмы для определения ключевых переменных процесса обогащения в отсадочной машине в режиме максимального содержания. Проведены исследование с использованием симмулятора ПЛК S7-300 Siemens.

Директор Института Электроники
и Информационных Технологий

Waldemar Wojcik

POLITECHNIKA LUBELSKA
Instytut Elektroniki i Techniki Informacyjnej
20-018 Lublin, ul. Nałęczowska 38A
tel. 81 53 84 209, fax 81 53 84 212

DYREKTOR
Instytutu Elektroniki i Techniki Informacyjnej
Prof. dr hab. inż. Waldemar Wojcik

ПРИЛОЖЕНИЕ Е

Акт испытания интеллектуальных алгоритмов

Ф2-АХО

«ВОСХОД ХРОМ» ЖШС
Қазақстан Республикасы,
Ақтөбе облысы, Хромтау ауданы,
Оңғар а. Булак көш. 16
Тел: +7 (71336) 27-9-70
Факс: +7(71336) 27-9-79



ТОО «ВОСХОД ХРОМ»

Республика Казахстан
Хромтауский район
п. Оңғар, э.л. Булак, 16
Тел: +7 (71336) 27-9-70
Факс: +7(71336) 27-9-79

«ВОСХОД ХРОМ» LLP

Ongar st., Bulak st., 16,
Khrontau district, Aktobe oblast,
Republic of Kazakhstan
tel: +7 (71336) 27-9-70
fax: +7(71336) 27-9-79
Email: vskhod@vskhod-oriol

АКТ

об испытании интеллектуальных алгоритмов управления процессом гравитационного обогащения руды

Мы, нижеподписавшиеся, составили настоящий акт о том, что разработанные интеллектуальные алгоритмы управления процессом гравитационного обогащения руды прошли имитационные испытания на хромитовой руде и показали удовлетворительные для практического применения результаты и способны к интеграции в существующую систему автоматизации предприятия.

Разработанные алгоритмы управления могут быть использованы в системе оптимального управления процессом гравитационного обогащения руды.

От КазННТУ имени К.И. Сатпаева

Профессор кафедры Автоматизация и управление
Б. Сулейменов
« 26 » _____ 2020 г.

Докторант кафедры Автоматизация и управление

Е. Кулакова

« _____ » _____ 2020 г.

От ТОО «Восход-Хром»

И.о. начальника Обоганительной фабрики

ТОО «Восход-Хром»

Нейман А.Г.
« 26 » _____ 2020 г.

Главный энергетик

«Восход-Хром»

А.В. Нехращенко
« _____ » _____ 2020 г.



ISO 9001:2015, ISO 14001:2015,
ISO 45001:2018



CERTIFIED IMS-0289/A