

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего  
образования

«Южно- Уральский государственный университет

(национальный исследовательский университет)»

Высшая школа электроники и компьютерных наук

Кафедра «Автоматика и управление»

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

Заведующий кафедрой АиУ

\_\_\_\_\_ /Л.С. Казаринов/

\_\_\_\_\_ 2020 г.

Энергоэффективное управление мельницей цементного производства в  
противоречивых условиях

Научно- квалификационная работа (диссертация)

Научный руководитель:

д.т.н., профессор зав. кафедрой АиУ

\_\_\_\_\_ /Л.С. Казаринов/

\_\_\_\_\_ 2020 г.

Автор работы:

аспирант группы КЭ-4801

\_\_\_\_\_ /Д.Р. Хасанов/

\_\_\_\_\_ 2020 г.

Челябинск, 2020

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	5
1. АНАЛИЗ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ ПОМОЛА .....	11
1.1. Технология измельчения в цементной промышленности .....	11
1.2. Расположение цементного завода и компоненты .....	11
1.3. Потребление энергии на цементном заводе .....	11
1.3.1. Измельчение сырья .....	12
1.3.2. Обжиг клинкера .....	13
1.3.3. Финишная измельчение .....	14
1.4. Основные научно - технические достижения в области тонкого измельчения материалов .....	16
1.5. Повышение эффективности измельчения в шаровой мельнице замкнутого цикла .....	18
1.6. Замкнутый цикл измельчение .....	19
1.6.1. Работа замкнутого контура измельчения .....	20
1.7. Классификация .....	23
1.8. Конфигурация и эксплуатация сепаратора высокой эффективности .....	28
1.9. Целью данной научно-квалификационной работы является повышение энергоэффективности процессов измельчения цементного клинкера, работающих в замкнутом цикле, за счет управления технологического процесса с использованием искусственной нейронной сети при неопределенности исходных данных. ....	33
2. ОПЕРАТИВНОЕ НЕЙРОУПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ ПОМОЛА ШИХТЫ В ЦЕМЕНТНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ ПРИ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ .....	35

2.1. Оперативное нейроуправление контуром измельчения шихты.....	35
2.2. Решение задачи рационального выбора параметров загрузки мельницы.....	37
2.3. Интерактивный метод нейроуправления контуром измельчения .....	41
2.4. Исследование системы управления замкнутого контура измельчения .....	42
2.4.1. Сбор и анализ данных.....	42
2.4.2. Контур измельчения на опытном заводе.....	42
2.5. Искусственные нейронные сети .....	52
2.6. Алгоритм обратного распространение ошибки для настройки многослойный нейронных сети с использованием регуляризации некорректного поставленного задач.....	53
2.6.1. Метод обучения обратному распространению .....	53
3. АСУ ТП ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ШИХТЫ .....	56
3.1. Исследование цикл измельчения как объекта управления.....	56
3.2. Уровни АСУ ТП.....	57
3.2.1. Уровень технологического процесса (нижний уровень).....	58
3.2.2. Уровень контроля и управления технологического процесса (контроллерный уровень).....	61
3.2.3. Уровень человеко-машинного интерфейса (верхний уровень) .....	61
3.3. Моделирование АСУ .....	61
3.4. Концептуальная модель.....	62
3.5. Разработка структурной и функциональной схем управления замкнутого контура измельчение с целью интеграции разработанных решений в АСУ ТП	64
3.5.1. Построение функциональной системы.....	65
3.6. Информационно-логическая модель.....	68
3.6.1. Операции управления, выполняемые с использованием БД.....	70

3.6.2. Проверка достоверности исходных данных .....	70
4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЗАМКНУТОГО КОНТУРА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ .....	72
4.1. Сбор и анализ данных.....	72
4.2. Контур измельчения на опытном заводе .....	72
4.4. Результаты исследований с использованием моделей в виде нейронной сети .....	73
4.4.1. Эталонная модель .....	73
Заключение .....	88
Список литературы .....	90

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы исследования.** На сегодняшний день цементная промышленность считается одной из наиболее динамичных отраслей экономики РФ. Более 75% опрошенных компаний которое занимаются производством цемента уделяют внимание повышению энергоэффективности использования имеющихся производственных мощностей и их модернизации.

Таким образом, в условиях постоянного роста тарифов на энергоносители актуальной задачей является разработка научно – обоснованных энергоэффективных система управление которое способен улучшить показателей при производстве цемента.

Производство цемента является энергоемким процессом, требующим энергозатрат в размере 850 - 1100 кВтч / т произведенного цемента. Тепловая энергия при производстве цемента составляет примерно 90% от общего удельного расхода энергии при использовании основных источников топлива, от угля, мазута до альтернативных остаточных видов топлива, таких как биомасса, отходы животного происхождения и выброшенные шины. Электроэнергия составляет оставшиеся 10% от общего удельного потребления энергии. Выбор источника топлива в первую очередь основан на стоимости. Электрическая энергия, потребляемая в обычном процессе производства цемента, обычно составляет 95 - 110 кВтч / т. Процесс дробления и измельчения цементного сырья и готового цемента составляет 70% от общей электрической энергии. Из них на стадию измельчения клинкера и других добавок приходится примерно от 40 до 50% общего потребления электроэнергии.

Несмотря на высокое удельное потребление энергии, трубчатые шаровые мельницы с двумя отсеками с воздушным классификатором в замкнутом контуре используются для окончательного измельчения цемента в течение более 100 лет из-за их высокой надежности и благоприятных физических и химических свойств цементного продукта, таких как более узкое распределение частиц по размерам. К сожалению, шаровые мельницы являются одними из самых низких показателей энергоэффективности среди всех мельниц. Шаровые мельницы страдают от

значительных потерь энергии (примерно 98%) в виде тепла из-за трения и столкновения в падающей массе шаров, которая передает входную энергию в неконцентрированный слой частиц. Многочисленные удары необходимы для эффективного разрушения. В связи с высокой потребностью в энергии и низкой энергоэффективностью обычного измельчения в шаровой мельнице цементная промышленность постоянно ищет новые способы снижения потребления энергии за счет улучшения конструкции мельницы и конфигурации контура.

В последние годы использование альтернативных видов топлива значительно возросло, однако потенциал для дальнейших улучшений все еще существует. В цементе восстановление клинкера во время измельчения готового цемента путем замены некоторыми конкретными материалами, имеющими свойства, сходные с клинкером (такими как известняк, пуццолан и доменный шлак), остается ключевым приоритетом. В этой области уже достигнут значительный прогресс. Тем не менее, соответствующие материалы ограничены их региональной доступностью.

При выполнении данной работы были рассмотрены научные труды следующих отечественных и зарубежных ученых, работы которых отражали вопросы энергоэффективности при измельчении шихты в цементном производстве, таких как: А.А. Романович, С. Зиннера, В.З. Партона, М.Б. Генералова, С.Г. Ходокова, Д. Броек, Г.П. Черепанова, Р.А. Родина, К. Шонерта, D. Touil, S. Belaadi, E. Worrel, D.W. Fuersteneau, J.A. Herbst, K. Shoji, W.S. Choi, J. Bhattu, D. Fortsch и другие. Изучение трудов, перечисленных ученых позволили расширить область знаний о процессе измельчения в шаровых мельницах.

Несмотря на технические новации последних десятилетий, которые направлены на повышение эффективности технологических процессов, на цементных заводах неуклонно растет общее энергопотребление за счет более высоких темпов производства, повышения тонкости цемента и более строгих требований по охране окружающей среды.

Разработка систем управления, направленных на снижение энергозатрат на процесс помола в шаровых мельницах замкнутого цикла, является актуальной задачей.

**Предмет исследования** составляют модели, алгоритмы и метод управления процессом помола клинкера в замкнутом контуре измельчения.

**Целью данной научно-квалификационной (диссертация) работы** является повышение энергоэффективности процессов измельчения цементного клинкера, работающих в замкнутом цикле, за счет управления технологического процесса с использованием искусственной нейронной сети.

Для достижения поставленной цели были сформулированы и решались следующие основные задачи:

1. Описание технологического процессов измельчения клинкера.
2. Оперативное нейроуправление процессом помола шихты в цементном производстве при неопределенности исходных данных
3. Разработка алгоритма обратного распространения ошибки для настройки многослойной нейронной сети с использованием регуляризации некорректно поставленных задач
4. Сбор и анализ экспериментальных данных на опытном заводе
5. Апробация разработанной системы управления на примере измельчения цементного клинкера в шаровых мельницах замкнутого цикла.

**Методы исследования.** При решении поставленных задач использовались следующие методы: математического моделирования, современной теории управления, аппарат нейронных сетей, а также методы проектирования систем автоматического управления.

**Научная новизна** работы заключается в следующем:

1. Разработан алгоритм идентификации модели процесса измельчения клинкера цементного производства при неопределенности исходных данных с использованием нейронных сетей и регуляризации поставленной задачи

2. Разработан метод оперативного принятия решений по управлению мельницей цементного производства при наличии множества противоречивых технических требований к значениям режимных параметров.

3. Предложена интерактивная процедура использования разработанных методов принятия решений в практике оперативного управления мельницей цементного производства.

**Основная теоретическая значимость.** В работе предлагается методика построения систем управления процессом измельчения клинкера, которая позволяет учесть неопределённость в знаниях и статистическую неопределённость, что приведёт к повышению эффективности функционирования системы управления. Разработанный подход может быть применён и для других аналогичных процессов.

**Практическая значимость заключается в:**

- повышении энергоэффективности процесса помола клинкера за счет применение искусственной нейронной сети.

- разработанная система управления позволяет повысить эффективность функционирования технологического процесса измельчения за счет улучшения управления контуром измельчения.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. алгоритм идентификации модели процесса измельчения клинкера цементного производства при неопределенности исходных данных с использованием нейронных сетей и регуляризации поставленной задачи
2. метод оперативного принятия решений по управлению мельницей цементного производства при наличии множества противоречивых технических требований к значениям режимных параметров.
3. Интерактивная процедура использования разработанных методов принятия решений по оперативному управлению мельницей цементного производства.



**Достоверность результатов исследования** обеспечивается корректностью и непротиворечивостью результатов работы положения теории АСУ, методам искусственных нейронных сетей, выводов и рекомендаций соответствует современным требованиям и подтверждается положительными результатами промышленных испытаний в условиях реального производства на ООО «Дюккерхофф Коркино Цемент» и ООО «Цементный завод имени Б. Самадов» г. Исфара.

**Апробация работы.** Основные положения и результаты научно-квалификационной (диссертация) работы были представлены и обсуждены на конференции (международной научно-технической конференции «International Russian Automation Conference, RusAutoCon. 2019» в городе Сочи, «IEEE Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research & Practice (PEAMI)» в Магнитогорск и «Proceedings of the Scientific-Practical International Conference of Students, Magisters, Phd Students and Young Scientists «Muhandis-2019»» в город Душанбе).

**Соответствие диссертации паспорту научной специальности.**

Научно-квалификационная (диссертация) исследования соответствуют паспорту по областям исследования п.4 – «Теоретические основы и методы математического моделирования организационно-технологических систем и комплексов, функциональных задач и объектов управления и их алгоритмизация», п.15 – «Теоретические основы, методы и алгоритмы интеллектуализации решения прикладных задач при построении АСУ широкого назначения (АСУТП, АСУП, АСТПП и др.)», п.16 – «Теоретические основы, методы и алгоритмы построения экспертных и диалоговых подсистем, включенных в АСУТП, АСУП, АСТПП и др».

**Публикации.** По материалам научно-квалификационной (диссертация) работы опубликовано 6 работ, среди них 3 в журналах, рекомендованных ВАК России и 2

статьи в международных журналах, индексируемых в базах данных Scopus и Web of Science.

**Структура и объем работы.** Научно- квалификационная (диссертация) работа состоит из введения, четырех глав и заключения, изложенных на (88) страницах основного машинописного текста, включающего (32) рисунков и (13) таблиц, (16) графиков, список используемой литературы из (113) наименований. Общий объем диссертации (100).

Глава 1 содержит обзор литературы по краткому обзору мировой цементной промышленности, современным технологиям, используемым в процессе помола, и ключевым факторам, связанным с качеством цемента.

В главе 2 освещается применение интеллектуальных систем для управление технологического процесса помола клинкера

В главе 3 представлено автоматизированная система управления технологическим процессом измельчения шихты

В главе 4 приведено экспериментальное исследование системы управления замкнутого контура измельчения

# **1. АНАЛИЗ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ ПОМОЛА**

## **1.1. Технология измельчения в цементной промышленности**

В настоящее время известны различные новые технологии, которые позволяют цементной промышленности работать более эффективно. Эти технологии доступны для различных компонентов, включая мельницы, печи и конвейерный транспорт. Большинство этих технологий требуют установки нового оборудования и обеспечивают среднюю экономию электроэнергии от 1 до 5 кВт/ч на тонну. Однако эти установки являются дорогостоящими и требуют длительного простоя производства. Период окупаемости этих установок часто превышает 10 лет.

Другой подход к достижению экономии энергии заключается в улучшении систем управления. Эти системы оптимизируют работу конкретных компонентов, обеспечивая тем самым стабильную и оптимальную работу. Может быть достигнута экономия от 1,4 кВт/ч до 6 кВт/ч на тонну.

Ниже для более глубокого анализа энергопотребления на протяжении всего процесса производства цемента, этот процесс разделим на различные независимые операционные блоки, выполняющие определенные функции в процессе производства цемента.

## **1.2. Расположение цементного завода и компоненты**

Известняк является основным сырьем, используемым для производства цемента. Лучшее понимание работы и взаимозависимости различных блоков может быть достигнуто путем следования маршруту, по которому известняк следует в процессе производства.

## **1.3. Потребление энергии на цементном заводе**

Различные подразделения формируют основные строительные блоки любого цементного завода. Эти подразделения являются функциональными единицами, которые выполняют определенные функции во время производства цемента. На

большинстве цементных заводов дубликаты этих блоков размещаются параллельно друг другу, чтобы упростить графики технического обслуживания и снизить производственные потери при остановках. Каждый из этих блоков требует различных форм энергии для работы.

### 1.3.1. Измельчение сырья

Процесс дробления состоит из набора дробилок различной тонкости для уточнения размера частиц для дальнейшей обработки. В большинстве случаев дробильный контур состоит из первичной, вторичной и третичной дробилки. Такая схема постепенно уменьшает размер частиц известняка посредством процесса дробления, просеивания и повторного дробления.

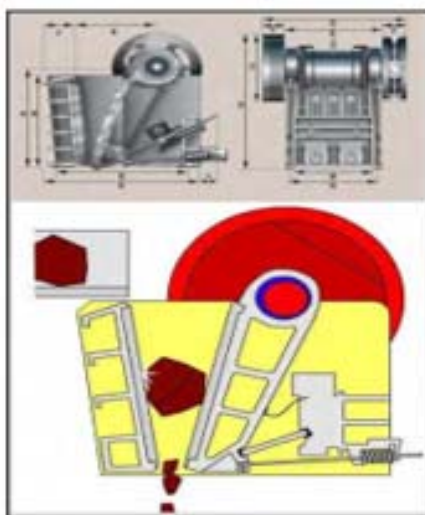
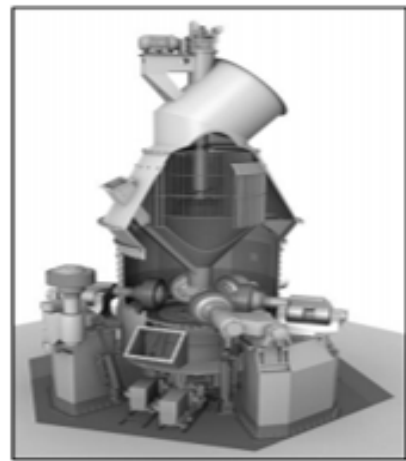


Рисунок 1.1. Работа щековой дробилки.

Необработанный известняк восстанавливается и транспортируется из груды сырья в контур измельчения, известный как сырьевая мельница, где размер частиц уменьшается до тонко контролируемого порошка, известного как сырая мука. В качестве сырьевых мельниц используются различные типы мельниц, в том числе шаровые и вертикальные валковые мельницы.



а)



б)

Рисунок 1.2. а) Горизонтальная шаровая мельница б) Вертикальная валковая мельница

В данном этапе потребление энергии составляет 20% от всей энергии для производство цемента.

### 1.3.2. Обжиг клинкера

Процесс прокаливания происходит в большой вращающейся трубе, которая называется печью. Печь представляет собой керамическую футерованную металлическую трубу постоянного диаметра от двух до шести метров. Длина этих труб также может варьироваться от сорока до восьмидесяти метров. Сырье подается во вращающуюся печь с температурой от 13000 до 1,5500 ° С [1]. Эта температура спекания создает новый продукт, который определяется как клинкер, показанный на рисунке 1.3.



Рисунок 1.3. Вращающаяся печь для цементной промышленности

Несмотря на то, что печь является крупнейшей движущейся частью оборудования на цементном заводе, это не самая энергоемкая, используя только 25% энергии завода [2].



Рисунок 1.4. Клинкер (слева) и готовый цемент (справа)

### **1.3.3. Финишная измельчение**

Конечный цементный продукт обычно получают, когда клинкер измельчают, как правило, с 5% гипса. Целью процесса измельчения является получение тонкого порошка с размером проходящих частиц 80% (d80) 30-40 микрон.

Системы измельчения в цементной промышленности играют важную роль в распределении частиц по размеру и форме частиц. Это влияет на реакционную способность клинкера и температурную зависимость дегидратирующего гипса, который измельчается вместе с клинкером. Эти факторы влияют на свойства цементного раствора, такие как потребность в воде, начальное и конечное время схватывания и развитие прочности[3].

Шаровые мельницы используются в качестве основного оборудования для измельчения готового цемента уже более 100 лет. Шаровые или трубчатые мельницы строятся диаметром до 6,0 м и длиной до 20 м; На сегодняшний день мощность привода достигает 10000 кВт при стабильной работе, а обслуживание шаровой мельницы относительно простое. Стоимость обслуживания и капитальные затраты относительно низкие по сравнению с другими технологиями. Из-за высокого уровня эксплуатационной надежности и

доступности (~ 95%) шаровые мельницы остаются наиболее часто применяемым отделочным шлифовальным агрегатом на цементных заводах. Производство портландцемента обычно завершается с использованием шаровой мельницы с двумя отделениями, как показано на рисунке 1.5. Первый отсек или камера 01 известен как грубая камера, а во втором отсеке материал тонко измельчен. Между двумя отсеками имеется классификационная диафрагма, которая экранирует мелкую форму грубого материала.



Рисунок 1.5. Двухсекционная трубчатая шаровая мельница. А- отсек 01, В- отсек 01/02 и разделительная диафрагма.

Обычно на цементных мельницах продукт измельчается в сухом виде в шаровой мельнице с относительно более широким распределением частиц по размерам; следовательно, необходимо эксплуатировать шаровую мельницу в замкнутом контуре с классификатором размера с эффективным или резким разрезом сепаратора. Это особенно актуально, когда образуется высокий уровень мелочи, когда смеси имеют низкий индекс работы связующего или измельчающие материалы, которые имеют тенденцию к агломерации из-за эффекта перемалывания. Циркуляционные нагрузки колеблются от 100% до 600%, которые устанавливаются на основе измельчаемости нового сырья, размера реза и требуемой тонкости продукта в зависимости от достижения достаточной прочности цемента [4 - 6].

#### **1.4. Основные научно - технические достижения в области тонкого измельчения материалов**

В производстве вяжущих материалов, различных строительных смесей и изделий одним из наиболее энергоёмких является процессы дробления и помола исходного сырья, на которые расходуется около 10% всей мировой электроэнергии [7]. При этом расход электроэнергии значительно возрастает с увеличением дисперсности полученного продукта [8].

Известно [7,9,10], что расход электроэнергии, Дж/т, составляет:

- для дробления -- 10 – 21;
- для тонкого помола – 360-3600.

Поэтому совершенствование управление технологического процесса тонкого помола с целью снижения электроёмкости процесса является актуальным [11].

Известно, что при производстве цемента, ежегодный объем которого в мире все возрастает и в настоящее время превышает 2,5 млрд т, на процессы данного помола сырьевых и цементных материалов, осуществляемые главным образом в шаровых мельницах, затрачивается до 70% от всей электроэнергии процесса получения цемента [11- 13].

Вопросами разработки нового и повышения эффективности существующего помольного оборудования занимались многие ученые и практики как у нас в стране, так и за рубежом [14-29].

В развитых странах измельчение цемента производится в основном на барабанные шаровые мельницы замкнутого цикла. Семейство современных барабанные шаровые мельницы, изготавливаемых зарубежными фирмами Японии, Германии, Чехии, США, Дании представлено разными параметрами, включающими более 60 типоразмеров.

Автор [30] в своей работе приводит, что применение вертикальной мельницы в двухстадийном измельчении снижает удельный расход электроэнергии на 19%. Это установка работала перед шаровой мельницей. Вертикальная мельница



адаптируется для измельчения цементного клинкера с производительностью до 300 т/ч [31, 32].

В результате исследований, проведенных в Германии, установлено: вертикальная мельница может быть использована для предварительного измельчения клинкера перед тонким помолом в трубной мельнице, капитальные вложения на сооружение двухвалковой мельницы на 25% выше, чем шаровой, а удельный расход энергии ниже на 10...20% [30, 33]. Аналогичный вывод сделан в работах [34, 35].

Следует отметить, что зарубежные авторы в своих выводах противоречат друг другу: в одних работах [36, 37] указывается, что вертикальные мельницы при помоле клинкера работают хуже, чем шаровые, а в других работах [38, 39] наоборот. Так, в работах [39-42] вертикальную мельницу рекомендуется использовать только на первой стадии помола, причем в валковую мельницу должна подаваться клинкер размером менее 20 мм.

Таким образом из приведенного анализа [33, 35, 37, 38, 40-54] следует, что вертикальные мельницы применяются чаще всего для измельчения сырьевых компонентов. Из-за высокого абразивного износа и малой часовой производительности эти мельницы для помола клинкера не рекомендуется [30].

В отечественной цементной промышленности наиболее типичным примером является барабанные шаровые мельницы, которая применяется как при одностадийном, так и двухстадийном измельчения в открытом и замкнутом циклах. Поэтому исследования этой мельницы для установления методов управления и оптимизации процессов измельчения различных цементов в конкретных условиях действующих и проектируемых заводов, несомненно, представляет актуальную задачу для цементной промышленности [55].

### **1.5. Повышение эффективности измельчения в шаровой мельнице замкнутого цикла**

Окончательное измельчение цемента является наиболее энергоемкой частью производственного процесса, потребляющего почти 40% электрической

энергии[56-57]. На среднем энергопотреблении станции 110 кВтч / т (электрическая энергия) использование может быть разбито по каждому основному процессу потребления, как показано в рисунке 1.6. Цементные шлифовальные контуры работают более эффективно в закрытых контурах. Теперь, благодаря внедрению высокоэффективных сепараторов по размеру, можно получить более точный продукт по размеру частиц, что улучшит качество цемента. Конфигурация сепаратора может быть организована по-разному, но обычно это связано с сохранением тепла путем возврата или рециркуляции чистого горячего воздуха из процесса измельчения.

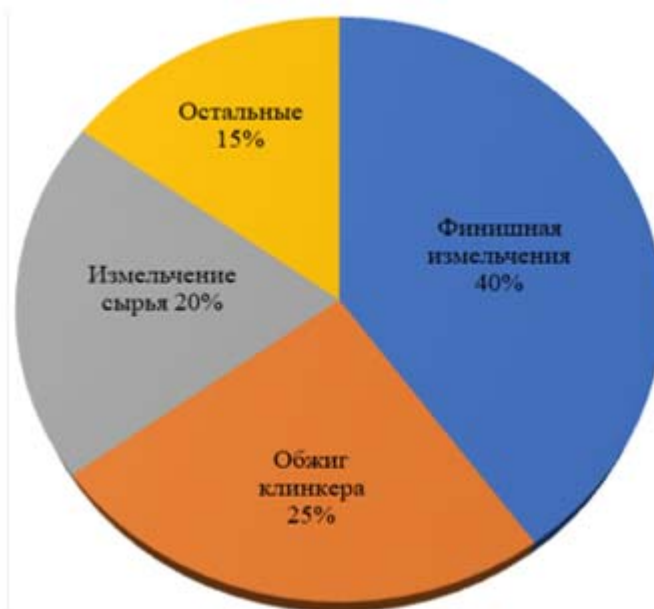


Рисунок. 1.6. Распределение энергии среди оборудования для производства цемента.

Несмотря на то, что печь является крупнейшей движущаяся часть оборудования на цементном заводе, это не самая энергоемкий, используя только 25% энергии завода. Наиболее энергоемким процессом производства цемента является финишный помол, который потребляет в среднем 40% всей энергии, необходимой для производства тонны цемента [2, 58]. Такое высокое значение может быть оправдано тем фактом, что значительное количество энергии, подаваемой двигателем мельницы, выделяется в виде тепла, создаваемого трением в

измельчающей среде. Кроме того, потребность в энергии измельчения гиперболически возрастает с увеличением крупности частиц цемента[2].

### 1.6. Замкнутый цикл измельчение

Идея о том, что цементный завод никогда не работает в одиночку, но всегда в контуре, уже была внедрена ранее. Даже самая простая форма цепи, разомкнутая цепь, требует дополнения системой подачи, системой транспортировки материала, вентиляторами, фильтрами камер и т.д. эксплуатация мельницы.

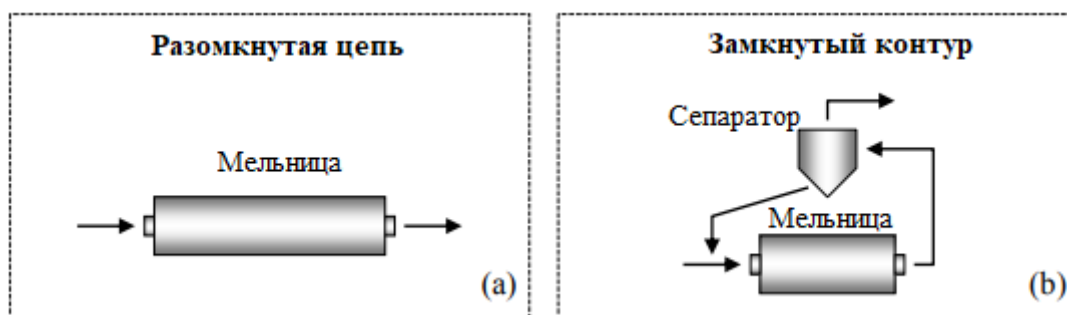


Рисунок 1.7. Различные типы схем измельчения цемента.

В открытом помольном контуре, показанном на рисунке 1.7 (а), клинкер подается в мельницу, и выгруженный материал непосредственно становится конечным продуктом. Поскольку весь материал клинкера должен быть уменьшен в размере всего за один проход, в установках с разомкнутой цепью преобладают более длинные трубные мельницы и имеют отношение длины к диаметру от 3,0 до 6,0. Разомкнутый контур имеет тенденцию к перемалыванию и практически не контролирует измельчение, так как его единственными регулируемые параметры процесса являются скорость подачи и поток воздуха через мельницу.

При измельчения в замкнутом контуре достигается гораздо более высокая эффективность и лучшее управление процессом. Основной принцип работы замкнутого контура состоит в том, чтобы приложить силы измельчения только к крупным частицам и разгрузить мелкие частицы, как только они уменьшатся до требуемого размера. Для этого в замкнутых контурах используются сепараторы и требуются более короткие мельницы ( $L / D 2,8-3,5$ )[59-62].

В наиболее распространенном замкнутом контуре, показанном на рисунке 1.7(b), клинкер вместе с добавками сначала поступает в шаровую мельницу, после чего измельченный материал разделяется сепаратором на две фракции. Более грубая фракция отправляется обратно на мельницу для дополнительного цикла измельчения, тогда как более мелкая фракция становится конечным продуктом.

Остальная часть обсуждения будет посвящена замкнутому контуру измельчения, показанному на рисунке 1.7(b). Будучи наиболее распространенной схемой, применяемой в цементной промышленности [53], она внедрена на пилотном цементном заводе и позволила получить полевые данные, использованные в этой диссертации.

### **1.6.1. Работа замкнутого контура измельчения**

Замкнутый цикл измельчения состоит из четырех основных частей оборудования: питатель, мельница, элеватор и сепаратор. Подробная схема измельчения показывающей ее компоненты, показана на рисунке 1.8. Поток материала через контур был описан ранее [63-70].

В то время как мельница выполняет шлифовальные работы, сепаратор удаляет более мелкие частицы из разгрузки мельницы и предотвращает их перетирание, тем самым экономя энергию. Извлекая часть материала из процесса измельчения, сепаратор создает свободное пространство внутри мельницы, позволяя большему количеству свежего клинкера поступать в мельницу, и, таким образом, увеличивает производительность. Работа контура характеризуется несколькими

параметрами, которые тщательно контролируются на заводе[71].

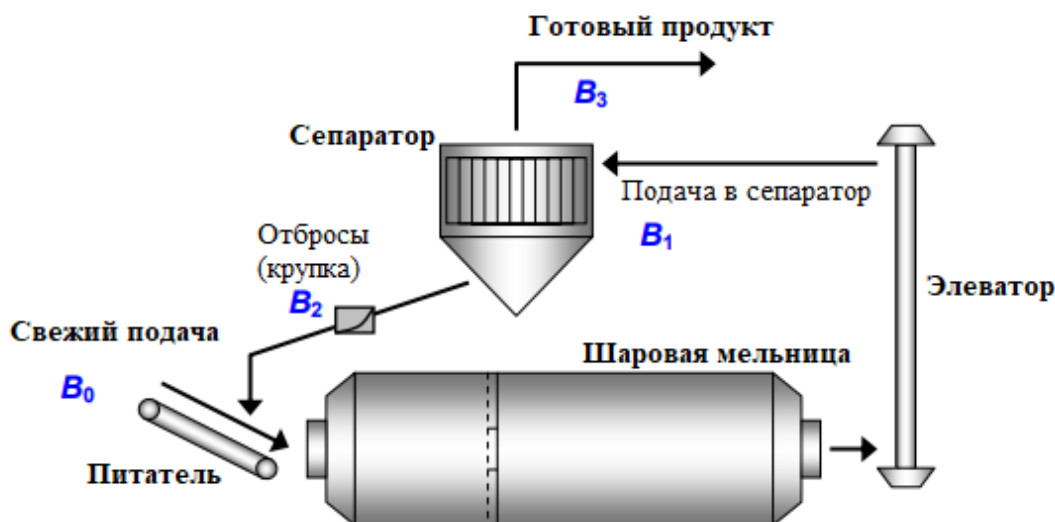


Рисунок 1.8. Замкнуты контур измельчения

Скорость свежего сырья,  $V_0$ , является мерой производительности и равна скорости потока готового продукта (цемента),  $V_3$ . Из-за баланса массы, эти два значения должны быть равны, так как внутри цепи не происходит ни накопления, ни образования нового материала. В установившемся режиме скорость подачи также определяет степень заполнения мельницы, которая, влияет на эффективность измельчения трубчатой шаровой мельницы. Весовые дозаторы должны регулярно калиброваться для обеспечения надежных и точных сигналов скорости подачи клинкера и его добавок.

Потребляемая мощность двигателя мельницы является отличным показателем нагрузки мельницы. Чем больше материала попадает в мельницу, тем труднее двигателю вращать мельницу и тем выше энергопотребление. Будучи наиболее требовательным к энергопотреблению узлом цементного завода в целом и контура измельчения, в частности, использование мощности мельницы на тонну производимого цемента также является окончательным показателем эффективности процесса измельчения[72-75].

Чтобы оценить состояние заполнения отсеков мельницы во время работы, микрофоны устанавливаются рядом с каждым отсеком. Несмотря на общий шум, сопровождающий процесс измельчения, эти чувствительные микрофоны способны уловить изменения в звуке мельницы. Пустая мельница будет издавать

более громкий звук, в то время как повышенное количество клинкера ослабит шум лязга, вызванный мелющей средой, и приведет к более низким значениям в децибелах.

Мощность двигателя элеватора является еще одним показателем загрузки мельницы. Элеватор несет весь поток материала, производительность мельницы В3, которая состоит из совокупной массы потоков как свежего сырья (В0), так и потоков отбракованного сепаратора (В2). При регулировке работы контура в попытке увеличить производительность, следует внимательно следить за мощностью двигателя элеватора на предмет возможной перегрузки. Недостаточная мощность установленного двигателя может помешать увеличению производительности мельницы.

Скорость ротора сепаратора является важным параметром в управлении характеристиками тонкости цемента[76-77]. Увеличение скорости вращения ротора повысит тонкость конечного продукта и увеличит расход отбракованного вещества В2, так как больше частиц будет возвращаться обратно в мельницу. Система привода ротора имеет собственную мощность, которая определяет максимально возможную скорость вращения ротора[78-81].

Воздух, проходящий через сепаратор, обычно подается отдельным вентилятором и регулируется заслонкой с дистанционным управлением. Достаточное количество воздуха в зоне классификации имеет решающее значение для адекватного разделения, поскольку процесс классификации происходит, когда частицы материала полностью взвешены в воздухе. Более высокий поток воздуха внутри сепаратора будет переносить больше частиц большего размера в мелкий поток. Это уменьшит тонкость продукта и уменьшит расход брака, В2.

Расход отбракованного вещества, В2, является важным параметром процесса замкнутого контура измельчения и обычно измеряется ударным расходомером. При постоянной скорости подачи свежей сырье В0 любые изменения расхода отбраковки В2 будут влиять на производительность мельницы В3. Это изменит отношение производительности к скорости подачи свежего сырья, определенной

как нагрузка рециркуляции. Наконец, тонкость измельченного продукта существенно влияет на рабочие характеристики цемента.

## 1.7. Классификация

Классификация - это особый процесс, применяемый в системах измельчения, который позволяет разделить измельченный материал на несколько продуктов, различающихся по свойствам. Это выполняется так называемыми разделителями или классификаторами.

Функции сепаратора в системе помола цемента, его общие конструкции и методы оценки его производительности приведены ниже. Применение сепараторов в контурах фрезерной обработки на месте будет описано позже.

В цементной промышленности классификация измельченного материала основана на размере частиц. Цель этого процесса состоит в том, чтобы отделить более крупные частицы от более мелких, чтобы более крупные частицы можно было дополнительно измельчить для достижения требуемой тонкости без чрезмерного измельчения более мелких частиц.

Для того, чтобы разделить материал на фракции желаемого размера, должна быть применена какая-то разделяющая сила (см. Рисунок 1.9). Экран (сито) является самой простой формой разделителя размеров и может использоваться для выполнения этой работы. Однако он плохо подходит для обработки больших количеств непрерывного потока материала, типичного для цементной промышленности. Наиболее распространенным средством достижения непрерывной классификации является воздушный сепаратор, в котором частицы суспендируются и диспергируются в воздухе при разделении на фракции [1,3,56,57].

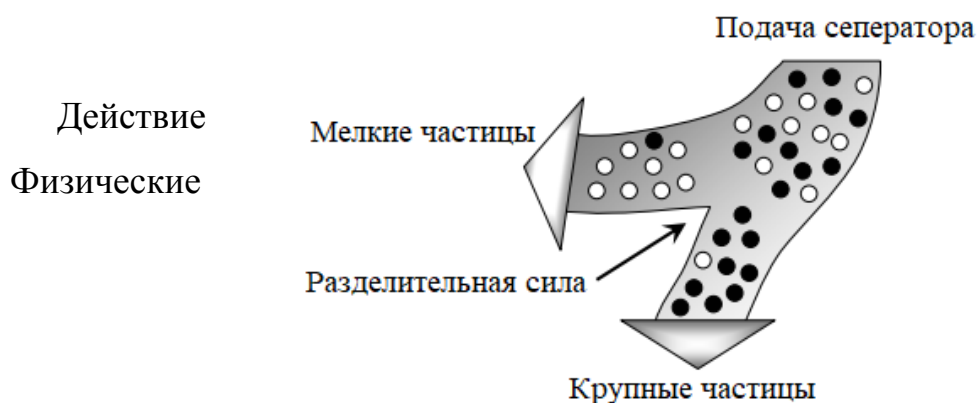


Рисунок.1.9.  
разделяющей силы.  
силы, которые

могут быть использованы в процессе классификации воздуха, включают:

- сила тяжести
- аэродинамическое сопротивление
- центробежная сила
- сила столкновения

Движение частицы в зоне разделения, где на нее действуют альтернативные физические силы, является основой для классификации воздуха. Различные силы зависят от размера частицы по-разному. Сепараторы никогда не используют только одну классифицирующую силу, а скорее используют комбинацию сил, которая позволяет им создавать уклон к частицам определенного размера и, таким образом, достигать классификации.

В общем, сепараторы можно разделить на две группы: статические и динамические. Динамические сепараторы имеют движущуюся часть, а статические единицы - нет. Наиболее распространенные сепараторы, используемые в цементной промышленности, перечислены в таблице.

Таблица. Наиболее распространенные воздушные сепараторы, используемые в цементной промышленности.

Классифицирующее оборудование	Тип	Классифицирующие силы
Циклон	Статический	Перетаскивание / гравитация
Статический сепаратор	Статический	Перетаскивание / гравитация / центробежный
V-сепаратор	Статический	Перетаскивание / гравитация / столкновение
Роторный сепаратор	Динамический	Перетаскивание / сила тяжести / Центробежный / Столкновение



Независимо от типа используемого сепаратора классификация состоит из нескольких основных этапов. Сначала подаваемый материал транспортируется в зону разделения либо через загрузочный желоб (воздушный затвор), либо с помощью газа-носителя. Поскольку разделение происходит, когда частицы материала находятся во взвешенном состоянии, воздух также транспортируется в зону разделения, либо внутренним, либо внешним вентилятором [82-85]. Затем классификация в зоне разъединения происходит вследствие действия сил, перечисленных выше. Наконец, отделенные фракции должны быть удалены из сепаратора. Мелкие частицы обычно удаляются вместе с воздушным потоком, тогда как крупные частицы транспортируются в основном под действием силы тяжести.

Важно признать, что воздушная классификация не создает какой-либо новой площади поверхности материала, то есть не выполняет дополнительного шлифования. Это только делит существующий поток материала на две фракции: низкая и высокая по площади поверхности.

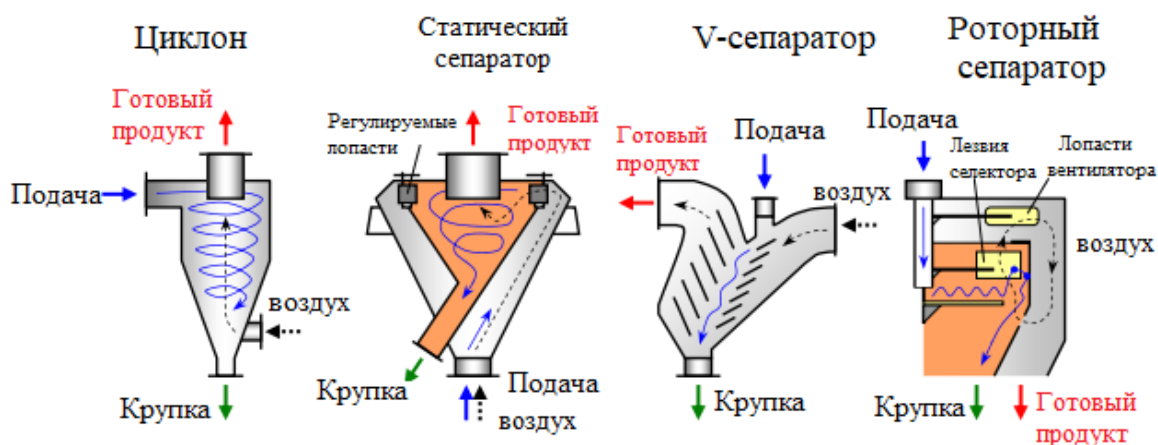


Рисунок.1.10. Схемы наиболее распространенных воздушных сепараторов.

Основным типом сепаратора является циклон. Материал подается в конический цилиндр, где поддерживается восходящий поток газа (воздуха). Две частицы действуют на частицы в противоположных направлениях: аэродинамическое сопротивление (вверх) и гравитация (вниз). Когда размер частиц становится

меньше, сила тяжести, пропорциональная массе частицы (т.е. кубу среднего диаметра), будет уменьшаться быстрее, чем сила сопротивления, которая пропорциональна площади поперечного сечения частицы (т.е. квадрату среднего диаметра). Если частица достаточно мала (и легка), она будет унесена с воздушным потоком в качестве конечного продукта, тогда как более крупные (и, следовательно, более тяжелые) частицы будут падать вниз[86-92].

Теоретически, если действующие силы уравниваются друг друга, частица будет неопределенно подвешена внутри циклона. Размер частиц, для которого достигается баланс между силой тяжести и сопротивлением, называется размером среза. Частицы такого размера имеют равные шансы стать тонким продуктом и быть отбракованными как грубые частицы. Геометрические характеристики цилиндра и скорость воздушного потока определяют тонкость конечного продукта и рассчитаны на определенный размер реза.

Циклон является самым простым сепаратором и не обеспечивает достаточных средств для контроля качества продукта: для этого доступны только изменения расхода воздуха. Статический сепаратор имеет улучшенную конструкцию и использует регулируемые направляющие лопатки для контроля тонкости[93-95].

Исходный материал подается в статический сепаратор воздушным потоком через вертикальный канал. Затем поток поступает во внутренний конус через ряд регулируемых лопастей, которые придают вихревое движение частицам. В зависимости от угла наклона лопаток возникает большая или меньшая центробежная сила, вызывающая гравитацию определенного диапазона частиц во внутренний конус. Оставшиеся мелкие частицы вымываются из блока через центральную трубку и становятся конечным продуктом [3,56]

Размер разреза статического сепаратора контролируется углом направляющих лопаток и скоростью воздуха. Если угол регулируемых лопаток увеличивается от радиального (в диапазоне 0-60 градусов), индуцированные тангенциальные скорости увеличиваются, и большее количество частиц в конечном итоге падает во внутренний конус, т.е. конечный продукт, переносимый воздухом поток становится прекраснее. Это также увеличивает перепад давления на статическом

сепараторе. Регулировка лопаток обычно выполняется вручную в течение периода проверки сепаратора. Положение лопастей остается неизменным во время операции. Удлинение центральной трубки обеспечит более тонкий конечный продукт[6].

V-сепаратор был разработан специально для работы с роликовыми прессами. Подача вводится в V-сепаратор около вершины и падает через ряд наклонных пластин. Воздух нагнетается в сепаратор и удаляет мелкие частицы из каскадного материала. Разделительная зона - это зона между пластинами и рядом перегородок. Здесь более мелкие частицы уносятся аэродинамическим сопротивлением воздушного потока, а более крупные частицы под действием силы тяжести выбрасываются с перегородок в отбраковываемый поток.

Контроль тонкости V-сепаратора осуществляется только с помощью скорости воздуха. Этот тип сепараторов может обеспечить только классификацию сырого материала и обычно сопровождается дополнительным сепаратором.

Сепараторы роторного типа в последнее время стали стандартом для новых установок. Последние разработки роторных сепараторов используют все четыре классифицирующие силы. Это позволяет очень точно настроить взаимодействие между силами, что гарантирует меньший возможный размер реза (более тонкий продукт) и повышенную общую эффективность процесса классификации. Гравитация и аэродинамические силы действуют в динамических сепараторах, как и раньше, тогда как центробежная сила создается вращающимся ротором, что также вызывает столкновение с более крупными частицами. Одним из основных преимуществ роторных классификаторов является то, что разделительное действие можно контролировать во время работы.

Роторные сепараторы прошли несколько этапов развития. Самые первые, ставшие общепринятыми в цементной промышленности, включали вентилятор и ротор селектора, прикрепленные к одному и тому же валу друг над другом. В этих сепараторах лопасти вентилятора создают внутренний поднимающийся вихрь воздуха, который поднимает и уносит мелкие частицы, в то время как более

крупные частицы отбрасываются к внутренней стенке под действием центробежных сил лопастей селектора, расположенных под вентилятором.

Основным недостатком этого конкретного сепаратора является трудность регулирования центробежного действия лопастей селектора независимо от потока воздуха, создаваемого вентилятором, поскольку они прикреплены к одному валу. Несколько модификаций этого устройства были адаптированы, включая перемещение вентилятора вниз по течению от области, где происходит классификация.

## **1.8. Конфигурация и эксплуатация сепаратора высокой эффективности**

Сегодня современный уровень в роторных классификаторах представлен высокоэффективным сепаратором. Высокоэффективный сепаратор установлена на пилотной установке, где были собраны полевые данные для этой работы, и с этого момента она станет основной темой обсуждения.

Высокоэффективный сепаратор обычно оснащен цилиндрическим ротором сепаратора, который приводится в действие независимым приводом и имеет множество радиальных лопастей, равномерно распределенных по краю ротора. Вокруг ротора расположены неподвижные направляющие лопатки, расположенные под углом, чтобы создать завихрение воздуха вокруг ротора. Разделительная зона расположена между лопастями ротора и направляющими лопатками.

Забор воздуха обеспечивается внешним вентилятором. Воздух поступает в корпус сепаратора через один или несколько впускных отверстий и вращается направляющими лопатками в том же направлении, что и вращающийся ротор. Равномерное распределение поступающего воздуха обеспечивается тщательной конструкцией воздухозаборников и направляющих лопаток. Ротор усиливает скорость воздуха, поскольку периферийная скорость клетки ротора намного выше, чем тангенциальная скорость воздуха, выходящего из направляющих лопаток. Воздух проходит через разделительную зону, собирает мелкие частицы и

выходит из центра ротора. Выходной воздуховод забирает воздух и мелкие частицы либо сверху, либо снизу сепаратора, в зависимости от конструкции.

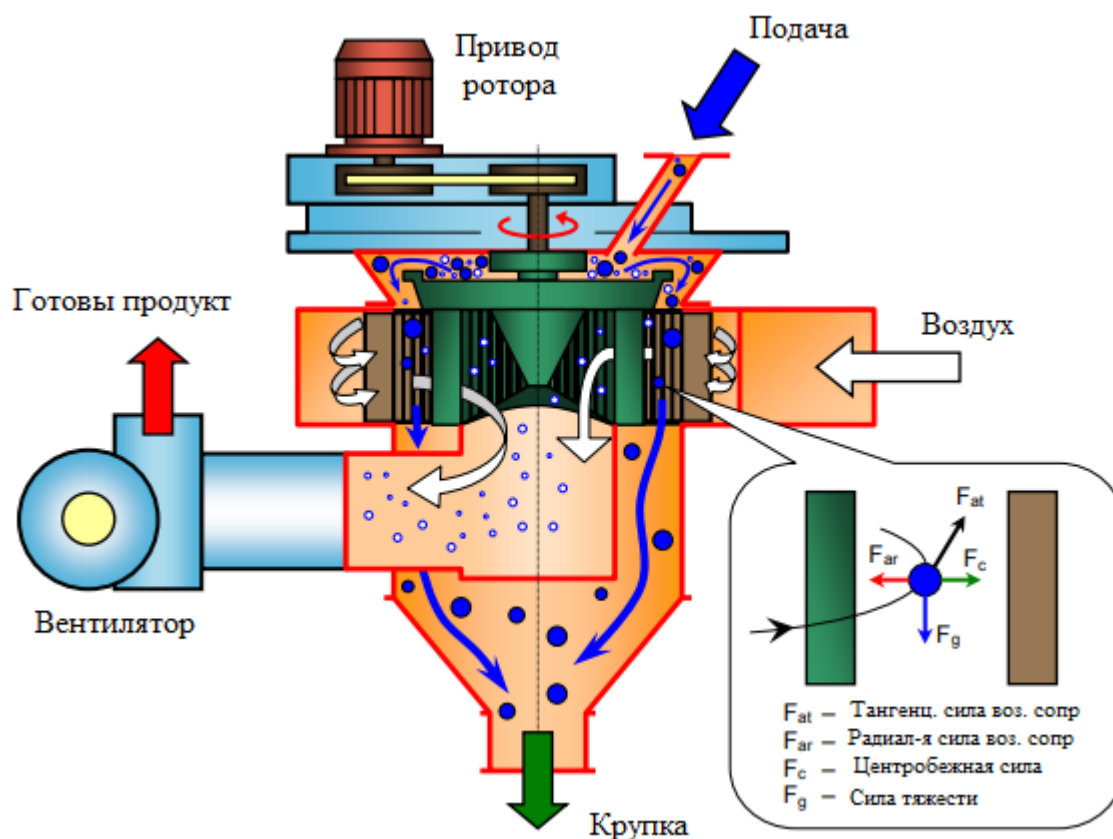


Рисунок.1.11. Внутреннее расположение высокоэффективного сепаратора.

Поток материала внутри ВЭС показан на рисунок 1.11 и состоит из нескольких этапов. Сначала подача сепаратора направляется на вращающуюся дисперсионную плиту, расположенную сверху ротора клетки. Когда он падает, материал начинает спиральное движение, вызванное начальным вращением дисперсионной пластины ротора и высокоскоростным завихрением воздуха, выходящего из направляющих лопаток. Затем материал равномерно распределяется центробежной силой в кольцевой зазор между ротором и направляющими лопатками и образует тонкую цилиндрическую завесу в зоне классификации.

Здесь отдельные частицы подвергаются воздействию четырех сил:

1. Воздух переносит материал примерно со скоростью вращения ротора;
2. Радиальная сила воздушного сопротивления пытается вытянуть материал внутрь ротора;

3. Центробежная сила пытается подтолкнуть материал к направляющим лопаткам;
4. Сила тяжести тянет материал вниз.

Поскольку материал в зоне классификации всегда находится примерно на одном и том же радиусе вращения, центробежная сила остается постоянной во всех областях. Кроме того, поскольку воздух и материал распределены равномерно по всей классифицирующей зоне, радиальная скорость воздуха и сила сопротивления довольно постоянны во всех частях зоны. Из-за всего этого условия размера среза (или условия баланса сил) являются равномерными вокруг ротора, независимо от того, где частица находится в зоне классификации [6]. Это значительно повышает эффективность процесса классификации.

Мелкие частицы переносятся воздушным потоком в центр ротора и выходят вместе с вытяжкой воздуха. Крупные частицы выталкиваются в направлении направляющих лопаток и непрерывно промываются свежим поступающим воздухом. Это помогает отделить любой мелкий материал, который агломерировал в крупные частицы, и значительно улучшает восстановление мелких частиц [6]. Продолжая индуцированное спиральное движение, более крупные частицы в конечном итоге достигают дна зоны классификации, падают вниз и выбрасываются со дна сосуда. Частицы курса образуют отбрасывающий поток (также называемый возвратными, измельченными или хвостами) и обычно предназначены для дальнейшего измельчения в мельнице.

Покидая сепаратор, более мелкий материал все еще находится в суспензии и должен быть извлечен из воздушного потока. Отстойная камера, циклон, фильтр (камера) или их комбинация могут выполнять восстановительные действия.

Поскольку ротор приводится в действие отдельным приводом, а воздушный поток создается внешним вентилятором, высокоэффективный сепаратор позволяет независимо регулировать центробежную силу, отвечающую за выброс грубых частиц, и аэродинамическую силу сопротивления, унося мелкие частицы внутрь ротора. Более того, направление силы аэродинамического сопротивления больше не совпадает с силой тяжести. Фактически, и сопротивление, и

центробежные силы действуют в плоскости, перпендикулярной направлению силы тяжести. Следовательно, обе силы разделения, действующие на обе фракции по размеру, могут контролироваться независимо, в отличие от использования силы тяжести, которая ранее применялась для сортировки крупных частиц и не может быть полностью управляемой. Это объясняет, как принцип, используемый в высокоэффективный сепаратор, способствует общей улучшенной эффективности сепараторов этого типа.

Посмотрев, как работает высокоэффективный сепаратор, давайте рассмотрим корректировки, которые можно внести, чтобы повлиять на тонкость продукта. Эти два параметра могут быть изменены:

- скорость ротора
- воздушный поток

Если скорость ротора увеличивается, центробежная сила также увеличивается. Только очень мелкие частицы будут переноситься внутри ротора воздушным потоком. Тонкость конечного продукта будет увеличена. Если воздушный поток увеличивается, аэродинамическая сила сопротивления также увеличивается. Воздушный поток сможет переносить более крупные частицы через зону разделения, чем раньше, и тонина конечного продукта будет уменьшаться. Скорость вращения ротора и поток воздуха влияют на тонкость в противоположных направлениях, поскольку центробежные силы и силы сопротивления действуют также в противоположных направлениях.

Хотя приведенные выше утверждения в целом верны, из опыта цементного завода известно, что эти два параметра имеют некоторый уклон в сторону различных аспектов характеристики тонкости, а именно: значение площади поверхности Блейна и процентное содержание материала, оставшегося на сите № 325. Если отклонение от заданной крупности незначительно, но регулировка сепаратора все еще необходима, рекомендуется изменить скорость ротора в ответ на изменение значения Блейна, а воздушный поток - в ответ на значение сита № 325 процент сохранен.

Это тоже можно объяснить, рассмотрев природу разделяющих сил. Скорость вращения ротора влияет на центробежную силу, которая отвечает за сортировку более крупных частиц и пропорциональна кубу диаметра частиц. Увеличение скорости вращения ротора оказывает существенное влияние на более крупные частицы ( $\sim x^3$ ), так что в конечном продукте в конечном итоге окажутся только ультратонкие частицы с большой площадью поверхности (величина Блейна). С другой стороны, воздушный поток определяет силу сопротивления, которая отвечает за перенос мелких частиц внутрь клетки ротора и пропорциональна квадрату диаметра частиц. Увеличение скорости воздушного потока не так сильно влияет на крупные частицы ( $\sim x^2$ ), так что на собранную площадь поверхности можно не сильно влиять, хотя влияние будет достаточным, чтобы его можно было увидеть по увеличенному проценту материала, оставшегося на поверхности. 325 (45 мкм) сита, т.е. конечный продукт становится более грубым.

На современном цементном заводе все перечисленные параметры процесса регистрируются в форме электронных сигналов, которые затем доставляются в диспетчерский пункт завода и хранятся в большой базе данных процесса, называемой историей данных процесса. Данная система может быть запрошена как в табличной, так и в графической форме для получения значений процесса в течение определенного периода времени. Это значительно облегчает обратный анализ процесса измельчения.

**1.9. Целью данной научно-квалификационной работы** является повышение энергоэффективности процессов измельчения цементного клинкера, работающих в замкнутом цикле, за счет управления технологического процесса с использованием искусственной нейронной сети при неопределенности исходных данных.

Для достижения поставленной цели были сформулированы и решались следующие основные задачи:

1. Проведение анализа технологических процессов измельчения клинкера.



2. Разработка алгоритма оперативного нейроуправления процессом помола шихты в цементном производстве при неопределенности исходных данных.
3. Разработка алгоритма обратного распространение ошибки для настройки многослойный нейронных сетей с использованием регуляризации некорректно поставленных задач.
4. Сбор и анализ экспериментальных данных на опытном заводе.
5. Апробация разработанной системы управления на примере измельчения цементного клинкера в шаровых мельницах замкнутого цикла.

## **2. ОПЕРАТИВНОЕ НЕЙРОУПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ ПОМОЛА ШИХТЫ В ЦЕМЕНТНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ ПРИ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ**

### **2.1. Оперативное нейруправление контуром измельчения шихты**

Рассматриваемое оперативное нейруправление контуром измельчения моделируется в среде MATLAB/Simulink с использованием встроенного пакета Neural Network и набора инструментов. Предлагаемая метод очень удобен для пользователя, и операторы могут видеть результаты с помощью графиков для лучшего управления системой. Основная цель оперативного нейруправления контуром измельчения - максимально приблизить установку к проектным значениям путем расчета оптимальных заданных значений в соответствии со свойствами подачи и условиями работы мельницы. Преимущества оперативного нейруправления контуром измельчения перед обычными стратегиями контроля:

(1) оперативное нейруправление может контролировать несколько параметров одновременно, в то время как оператор диспетчерской не может контролировать несколько параметров в такое короткое время и обрабатывать переменные одновременно.

(2) оперативное нейруправление обновляется каждый час в соответствии с рабочими данными мельницы (ввод переменных в контроллер). Таким образом контур измельчения будет иметь плавную кривую для каждой выходной (манипулирующей) переменной (то есть скорости подачи, скорости крупки, удельный расход электроэнергии, тонкость по Блейну и мощность двигателя мельницы).

(3) оперативное нейруправление поддерживает производительность мельницы очень близко к ее проектным значениям (с точки зрения пропускной способности) посредством оперативного мониторинга его рабочего состояния. Но люди-операторы всегда беспокоятся о состоянии перегрузки мельницы, поэтому они обычно эксплуатируют мельницу ниже ее оптимальных проектных значений.

Нейронные сети обладают целым рядом свойств, привлекательных с точки зрения их практического использования на процессах измельчения и классификации:

- высокое быстродействие за счёт использования параллелизма обработки информации;
- толерантность к ошибкам: работоспособность сохраняется при повреждении значительного числа нейронов;
- способность к обучению, программирование вычислительной системы заменяется обучением.



Рисунок 2. Структура системы управления процессом помола замкнутого цикла

Эффективное управление процессом имеет большое значение для увеличения пропускной способности контура измельчения и качества конечного продукта, а также для значительного сокращения производственных затрат, особенно в отношении потребления энергии, составляющего высокий процент таких затрат [56]. Обратная связь в таких системах управления используется для корректировки неточностей, связанных с внешними помехами и неточностью математической модели объекта управления. Регулятор полагается на эмпирическую модель процесса для того, чтобы предсказать дальнейшее его

поведение, основываясь на предыдущих значениях переменных состояния [2,56,57].

## 2.2. Решение задачи рационального выбора параметров загрузки мельницы

Особенность задачи выбора рационального выбора параметров загрузки мельницы состоит в том, что число управляющих факторов не велико, а количество ограничений значительно превышает число управляющих факторов.

Действительно, в качестве управляющих факторов мы будем рассматривать величину загрузки мельницы  $x_1$  - клинкер,  $x_2$  - гипс и  $x_3$  - добавки. Выходными параметрами являются множество показателей  $\{y_i\}$  согласно таблице 2. Ограничения на показатели

$$a_i \leq y_i \leq b_i; \quad (1)$$

На основе построения эмпирических зависимостей с использованием метода наименьших квадратов и нейронных сетей можно получить

$$y_i = h_i(x_1, x_2, x_3) \quad (2)$$

С учетом (1) и (2) можно получить

$$a_i \leq h_i(x_1, x_2, x_3) \leq b_i; \quad i = 1, 2, 3 \dots \quad (3)$$

В итоге рациональный выбор параметров загрузки мельницы состоит в формальном решении системы неравенств (3).

Для решения система неравенств приводится к канонической форме

$$h_i(x_1, x_2, x_3) - b_i \leq 0 \quad (4a)$$

$$a_i - h_i(x_1, x_2, x_3) \leq 0 \quad (4b)$$

Формально неравенство (4) можно писать в следующем виде

$$f_i(x_1, x_2, x_3) \leq 0 \quad (5)$$

В общем случае система неравенств (5) являются несовместные. Поэтому решение задачи выбора рационального выбора параметров загрузки мельницы математический сводится к решению системы несовместных неравенств.

(6)

Здесь  $I_{\text{нер}}$  - множества значений индексов неравенств соответственно;  $x$  - вектор искомых параметров;  $f_i(x)$  - монотонные, непрерывные и дифференцируемые

функции. Необходимо определить максимально совместную подсистему неравенств (6) по критерию

$$\max_{(x)} C(x), \quad C(x) = \Phi(\mu(x)), \quad (7)$$

где  $\mu$  - вектор, составленный из характеристических функций  $\mu_i$  неравенств ( $\mu_i = 1$ , если  $i$ -е неравенство выполняется, в противном случае  $\mu_i = 0$ );  $\Phi(\mu)$  - монотонная положительно определенная числовая функция булевых переменных  $\mu$ .

В частном случае критерий (7) имеет вид

$$C(x) = \sum_{j=1}^m \alpha_j \mu_j(x), \quad (8)$$

где  $\alpha_j$  - весовые коэффициенты, удовлетворяющие условиям

$$\forall_j \alpha_j \geq 0, \quad \sum_{j=1}^m \alpha_j = 1,$$

Решение системы неравенств (6) по критерию (8) позволяет выделить среди всех максимально совместных подсистем системы (6) такую подсистему, которая обладает максимальным суммарным весом. Другими словами, в данном случае выделяется максимально совместная подсистема, наиболее важная с точки зрения решаемой предметной задачи. При равенстве весов решение задачи (6), (8) выделяет максимально совместную подсистему с максимальным числом неравенств. В общем случае, когда рассматривается задача (6), (7), соответствующее решение позволяет выделить максимально совместную структуру неравенств, оптимальную по обобщенному критерию (6) [96].

Содержательная интерпретация рассмотренного выше алгоритма поиска оптимальных решений в противоречивых условиях состоит в следующем.

На начальном этапе лицо, принимающее решения (ЛПР), формулирует набор технических условий, которым должно удовлетворять искомое решение. Понимая, что не все желательные условия могут быть выполнены, ЛПР формулирует предпочтения, определяющие желательность выполнения отдельных условий, а также общую целевую функцию, которая количественно выражает степень выполнения поставленных условий в целом.

С математической точки зрения целевая функция представляет собой отображение

$$\mu \xrightarrow{\phi_1} C, \mu = (\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n)^T,$$

где

$$\mu_j = \begin{cases} 1, & \text{если } y \in D_j; \\ 0, & \text{если } y_j \notin D_j; \quad j = 1, 2, \dots, n. \end{cases}$$

Здесь каждое  $j$ -е условие описывается вектором своих параметров  $Y_j$ . Само техническое условие представляется в виде области допустимых значений параметров  $D_j$ . Характеристическая функция условия  $\mu_j$  определяет факт принадлежности вектора параметров соответствующей области допустимых значений  $D_j$ .

Далее, основываясь на методе ветвей и границ, осуществляется глобальный поиск оптимального решения поставленной задачи. Однако полученное решение в общем случае может не оправдывать ожидания ЛПР. Часть поставленных условий при этом не будут выполнены и реальное значение целевой функции  $CP(x_n)$  будет меньше ожидаемого. Поэтому полученное решение  $x_1^{opt}$  будет являться частным.

Дальнейшее развитие процесса решения задачи может осуществляться на основе двух подходов.

Первый подход основывается на переводе недостигнутых ограничений в разряд частных целевых функций. В результате может быть поставлена задача оптимизации, в которой ограничениями выступают выполненные ограничения, а

в качестве целевой функции используется обобщенная целевая функция, составленная из частных целевых функций недостигнутых ограничений. В результате решения подобной задачи оптимизации будут определены величины ограничений, необходимые для непротиворечивой постановки задачи выбора решений.

Необходимо отметить, что в общем случае каждое ограничение отражает определенный аспект рассмотрения реального объекта оптимизации, за которым стоят специальные теории и технические решения. Поэтому постановка задачи снятия частных ограничений приводит к соответствующим задачам специальных научно-практических исследований.

Второй подход основывается на следующем.

После получения частного решения ЛПР стремится достичь невыполненные ограничения в том виде, в каком они были поставлены, и сосредоточит на этой цели свое внимание. В результате изменится структура предпочтений ЛПР, соответственно изменится и целевая функция задачи:

$$\mu \xrightarrow{\phi_2} C.$$

Решение поставленной задачи с измененной структурой целевой функции позволит получить следующее оптимальное решение  $x_2^{opt}, x_2^{opt}$ , для которого уже будут выполняться ранее не выполнившиеся условия. Однако и это решение в общем случае также будет частным, так как не все условия поставленной задачи будут выполняться [2,96,97].

Процесс изменения структуры целевой функции и повторные решения задачи могут итеративно повторяться до тех пор, пока на совокупности полученных частных решений  $\{x_1^{opt}, x_1^{opt}, x_2^{opt}, x_2^{opt}, \dots\}$  не будут выполнены все поставленные условия.

Дальнейшее движение вперед основывается на неформальном содержательном изучении данной совокупности частных решений с целью исследования возможности их логического объединения в целостную систему. В общем случае полученные частные решения противоречат друг другу, характеризуются

несовместимыми свойствами. Поэтому объединить их можно лишь на абстрактном уровне путем отвлечения от несовместимых свойств и выдвижения на этой основе общей объединяющей идеи. Последующая разработка выдвинутой идеи должна опираться на всю совокупность знаний в рассматриваемой предметной области и представлять собой сложную интеллектуальную операцию синтеза конкретного решения. В результате подобной интерактивной процедуры можно прийти к синтетическому решению, логически объединяющему свойства, которые в начале были несовместимыми[96].

### **2.3. Интерактивный метод нейроруавления контуром измельчения**

Схема предлагаемого метода нейроруавления изображена на рисунке 2.1. Данные собираются каждый час с помощью измерительных приборов (который регулируется в зависимости от колебаний рабочего состояния мельницы), и нейронный сеть использует эти данные для оценки рабочего состояния мельницы, если требуется какое-либо контрольное действие, нейросеть определяет того, какую уставку следует изменить и определяет значения изменений. Рассчитанные уставки вводятся в контроллер. Для стабильного подачи материала в мельнице необходимо оптимизировать этот процесс. Контроллер автоматически рассчитывает процентное соотношение этих компонентов и определяет определённую тонну с каждого компонента. Следовательно, мельница будет работать в более стабильном состоянии при сохранении максимальной производительности.

Основными целями оперативное нейроруавление являются: стабилизация работы мельницы, максимизация производительности мельницы, снижение удельного энергопотребления, корректировка содержания твёрдого сырья в требуемом интервале и недопущение ошибок персонала.

Нейроруавление строится на основе обучение нейронной сети с учителем, в роли которого выступает опытный оператор мельницы[98-106], реализующий эффективное управление процессом измельчение. Контроллер, построенный на основы нейронной сети, должен работать в реальном времени и отражать текущее состояние процесса измельчение. Выбор решений при решении задачи



оперативного управления с использованием нейронной сети относится к классу многокритериальных задач[96,97].

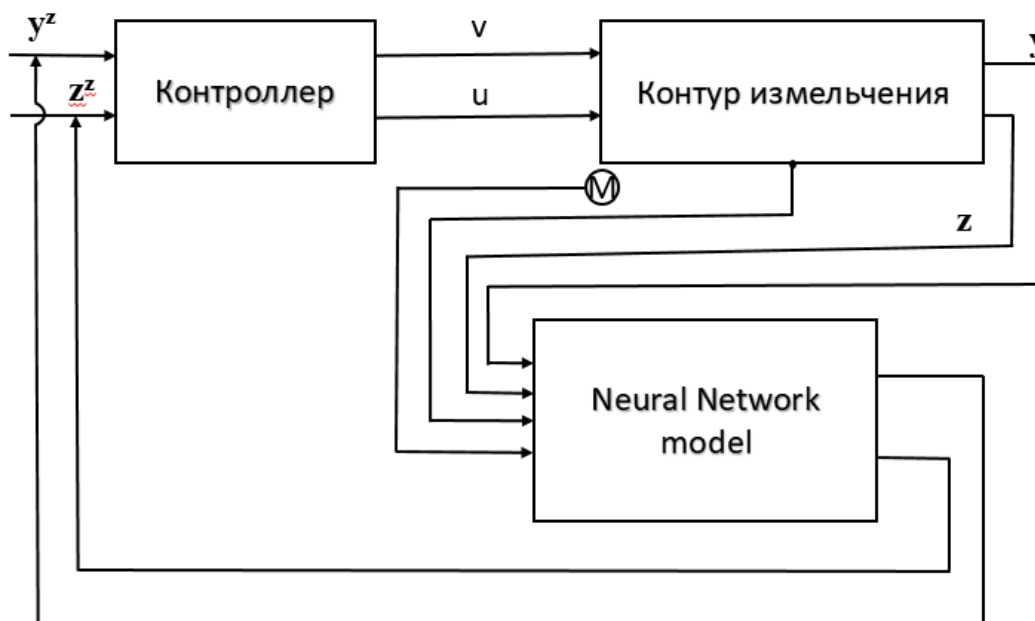


Рисунок 2.1. Схема метод нейрууправления контуром измельчения шихты в цементном производстве.

Целью управления является окончательное регулирование новой схемы нейрууправления, как показано на скорости продукта  $y$  и загрузке мельницы  $z$  при желаемых заданных значениях  $y^z$  и  $z^z$ , воздействуя на скорость потока  $u$  (гипса) и скорость сепаратора  $v$ , Контроллер должен предотвращать засорение мельницы и быть устойчивым к неопределенности моделирования.

## 2.4. Исследование системы управления замкнутого контура измельчения

### 2.4.1. Сбор и анализ данных

Для определения компьютерного модели для контура измельчения, анализ материальных потоков является важным этапом. Эксперимент для выборки из материальных потоков контура измельчения была выполнено на опытном заводе.

Было произведен анализ классификатора на изменение скорости потока, скорость вращения ротора классификатора, возврат крупки, соотношение гипс в клинкер, определена тонкость помола по Блейну ( $D'$ ).

## 2.4.2. Контур измельчения на опытном заводе

На опытном заводе где было провидена эксперимент цикл измельчения происходила в трубной шаровой мельницы с двумя камерами и в сепараторе. Данные по резульатом цикл измельчения в замкнутом контуре представлено в таблице 2.1.

Таблица 2.1. Реальные данные полученные в производстве (в течение 12 часов)

Подача т/ч	Скорость сепаратор а об/мин	Гипс %	Возврат крупки т/ч	Звук мельниц ы	Мотор %	Блейн (D')
90	150	4,1	59	82	79,3	16,8
90	148	4	63	83,3	79,1	16,9
90	148	4	68	81,9	79,3	16,7
90	148	3,8	69	82,7	79,3	16,6
90	145	4	67	85,4	75,8	16,5
90	142	4	68	90	75	17
90	140	4,1	68	87,7	76,7	16,9
90	138	4,1	56	86,9	81,7	16,7
90	135	4,1	62	84	80,4	16,7
90	135	3,6	40	83,4	78,8	18,5
90	135	3,6	40	82,1	79,1	18,2
90	135	3,6	56	82,9	79,2	17,6

Для тестирования моделей нейронных сетей в качестве выходного параметра используем скорость потока  $u$  (гипс) и скорость сепаратора  $v$ . Регулируя этих параметры с помощью нейронной сети повышаем качества продукт и стабильного работы мельницы при производства цемента. Для этого надо рассматривать зависимостей гипса и скорость сепаратора с остальными параметрами.

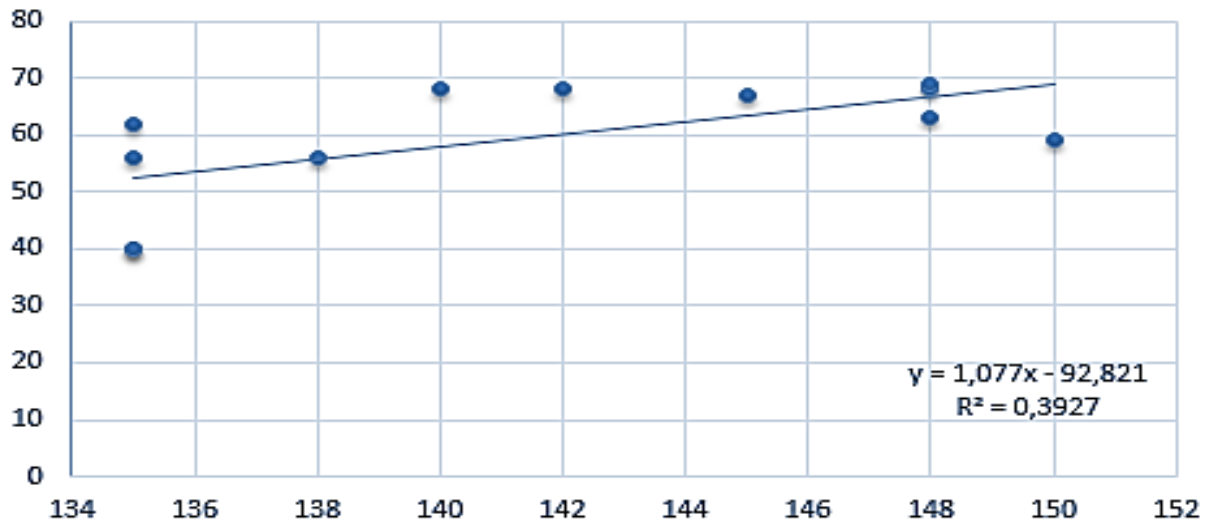


График 2.1. Сравнения зависимости скорость сепаратора к крупка

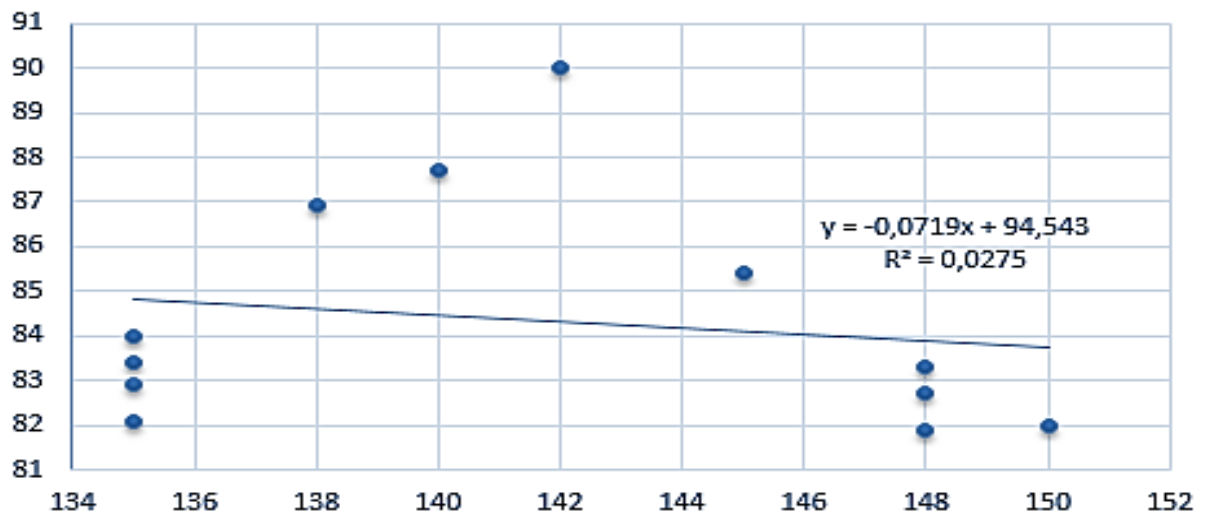


График 2.2. Сравнения зависимости скорость сепаратора к звук мельницы

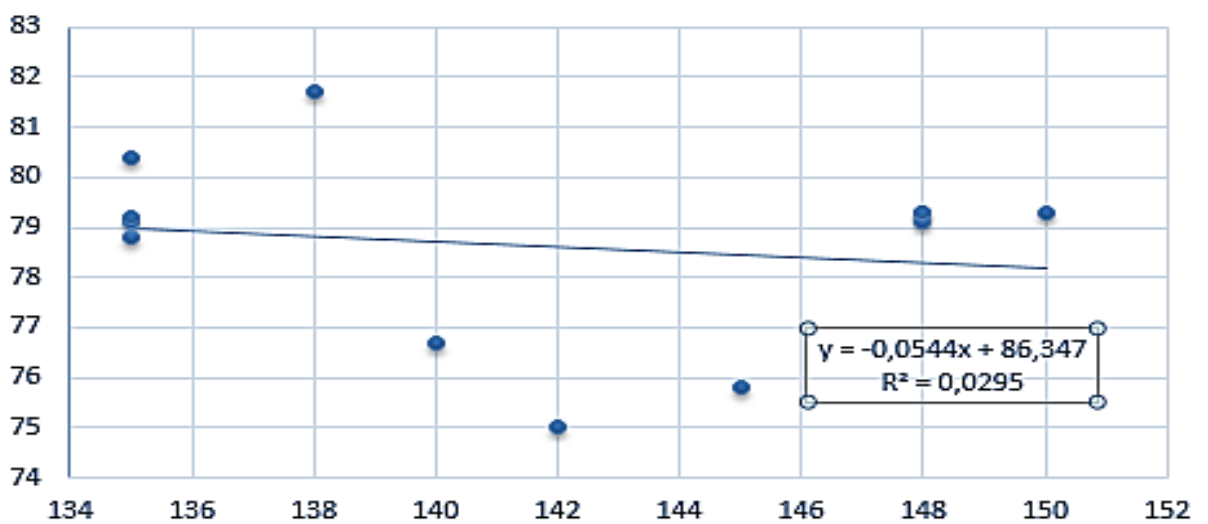


График 2.3. Сравнения зависимости скорость сепаратора к мотор мельницы

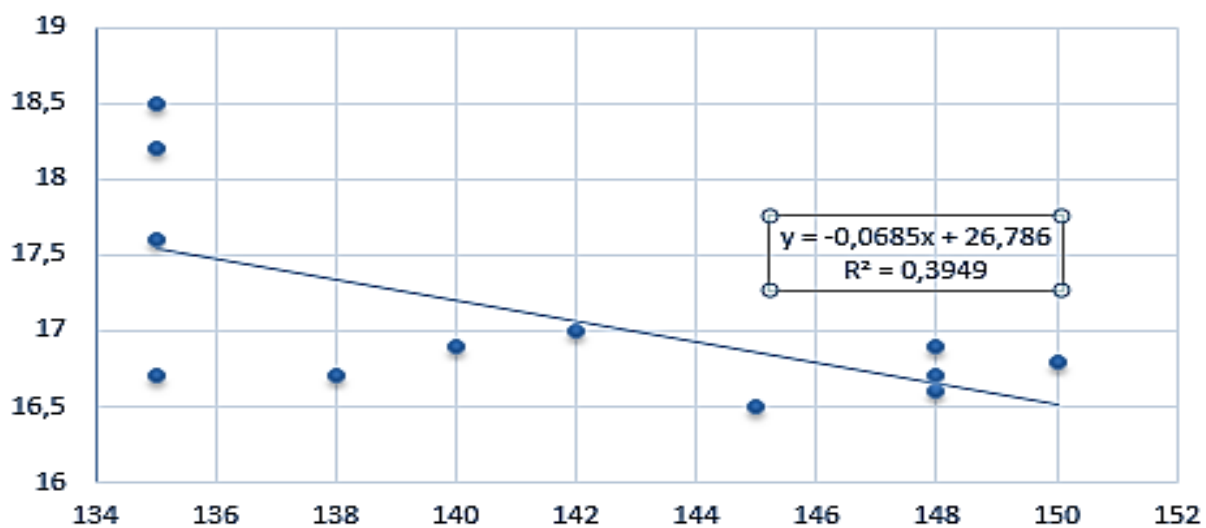


График 2.4. Сравнения зависимости скорость сепаратора к Блейн (D')

Также рассматриваем зависимость гипса.

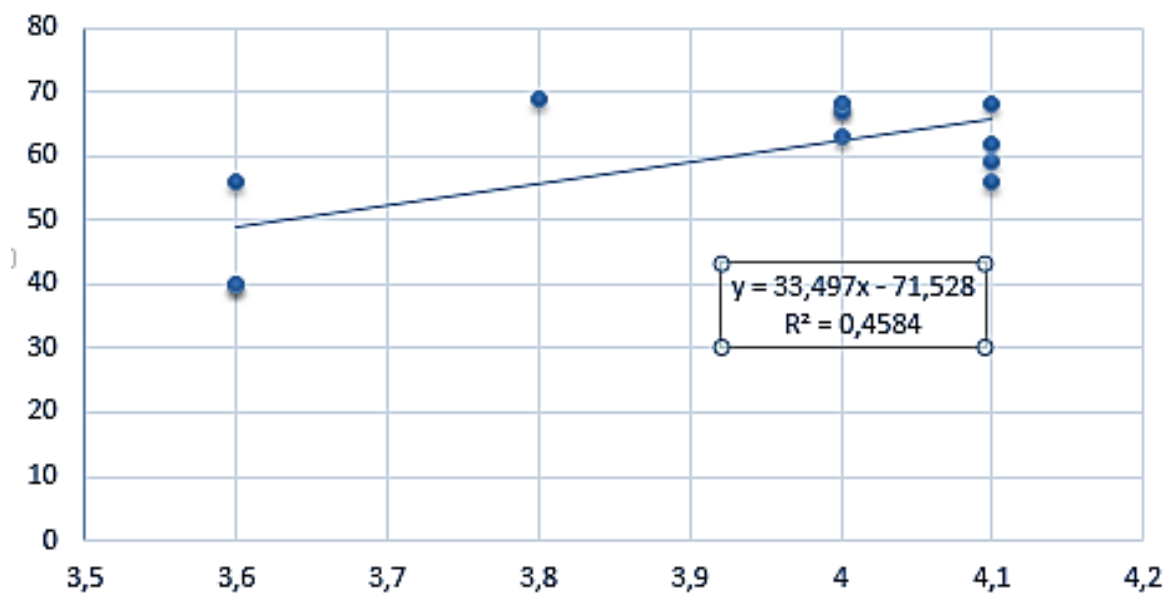


График 2.5. Сравнения зависимости гипс к крупке

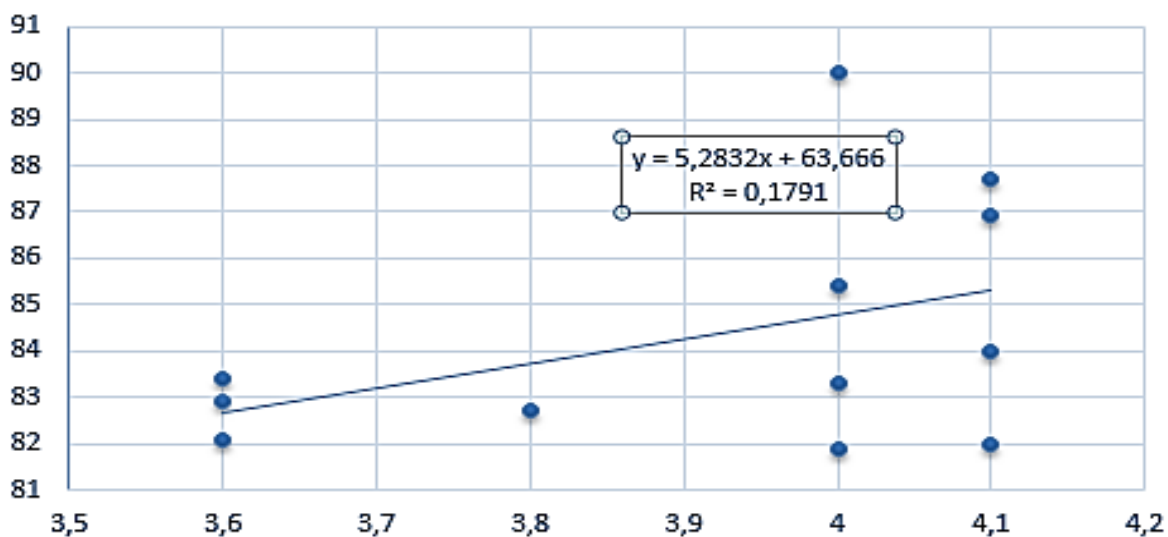


График 2.6. Сравнения зависимости гипс к звук мельницы

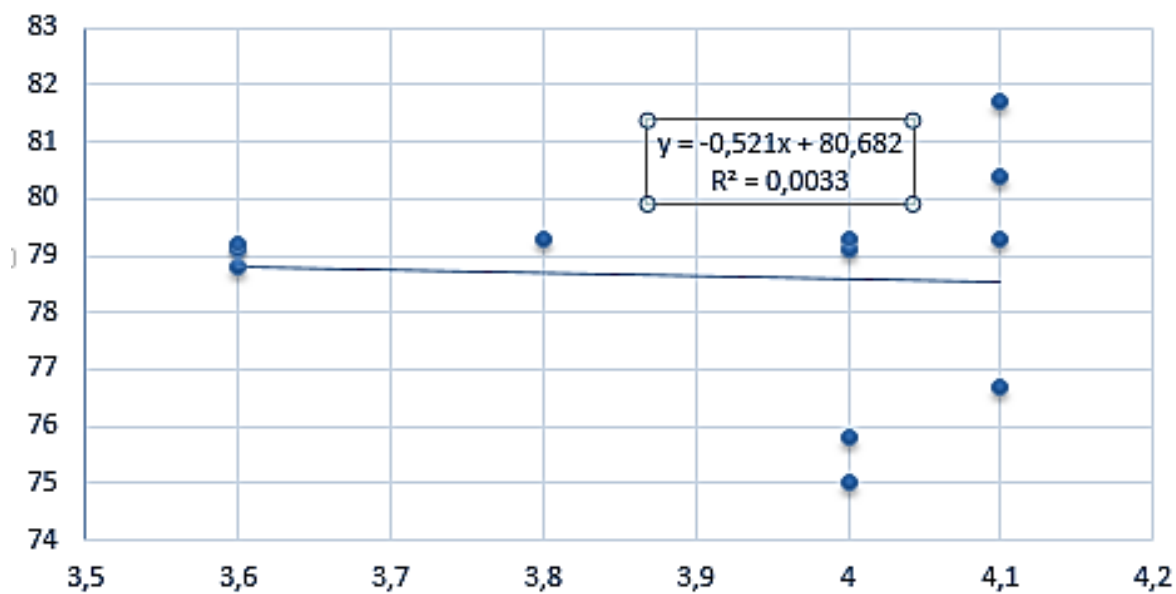


График 2.7. Сравнения зависимости гипс к мотор мельницы

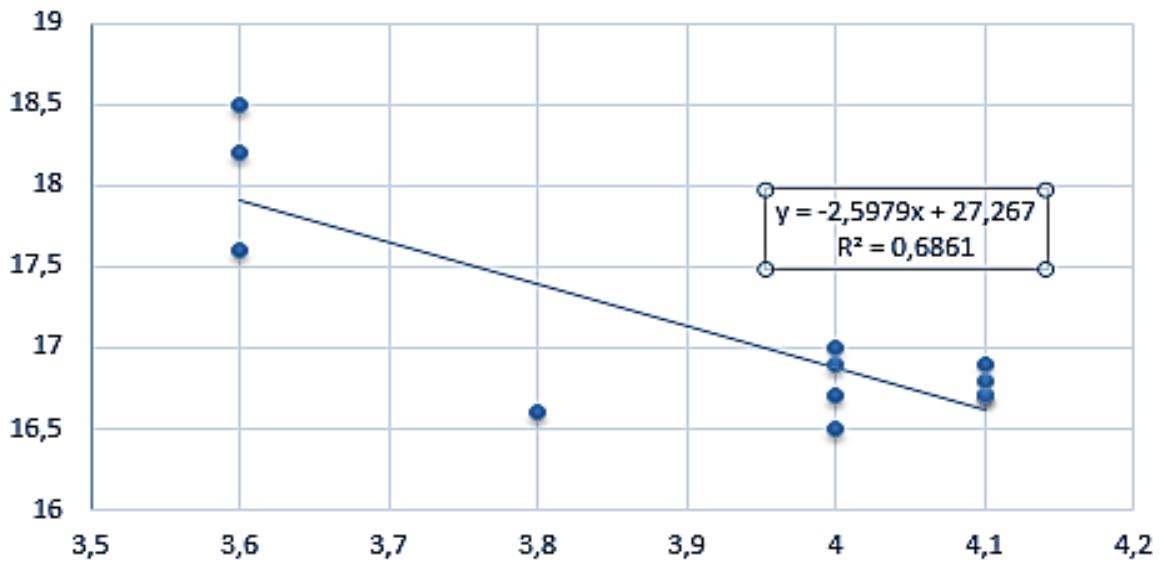


График 2.8. Сравнения зависимости гипс к Блейн (D')

Значения регрессии R измеряют корреляцию между результатами и целями. Значение R, равное 1, означает близкие отношения, 0 - случайные отношения. Как видим из графиков значение R во всех графиков не превышает 0.68 это означает, что реальные данные без нормализации не зависят друг от друга.

**Нормализация:**

Важно, чтобы данные были нормализованы. В противном случае важные переменные процесса, не попадут в нужном диапазоне и сеть их не использует. Для нормализации данных в исследование используется следующий уравнение (2.4.1). В предыдущий таблица показана реальные данные полученные в производстве, таблица 2.2. данные после нормализации.

$$y_r = a b x \tag{2.4.1}$$

$$a = \frac{\sum x^2 - \frac{(\sum x)^2}{n}}{\sum x^2 - \frac{(\sum x)^2}{n}}, \tag{2.4.2}$$

$$b = \frac{\sum x y - \frac{(\sum x)(\sum y)}{n}}{\sum x^2 - \frac{(\sum x)^2}{n}}. \tag{2.4.3}$$

Таблица 2.2. Данный после нормализации

Подача т/ч	Скорость сепаратора об/мин	Гипс %	Возврат крупки т/ч	Звук мельницы	Мотор %	Блейн (D')
90	150	4,1	62,5	83,09	78,13	17,4
90	148	4	62,3	83,14	78,15	17,4
90	148	4	62,3	83,14	78,15	17,4
90	148	3,8	62,3	83,14	78,15	17,4
90	145	4	61,9	83,21	78,18	17,4
90	142	4	61,5	83,28	78,20	17,4
90	140	4,1	61,2	83,32	78,22	17,4
90	138	4,1	61,0	83,37	78,24	17,4
90	135	4,1	60,6	83,44	78,27	17,4
90	135	3,6	60,6	83,44	78,27	17,4
90	135	3,6	60,6	83,44	78,27	17,4
90	135	3,6	60,6	83,44	78,27	17,4

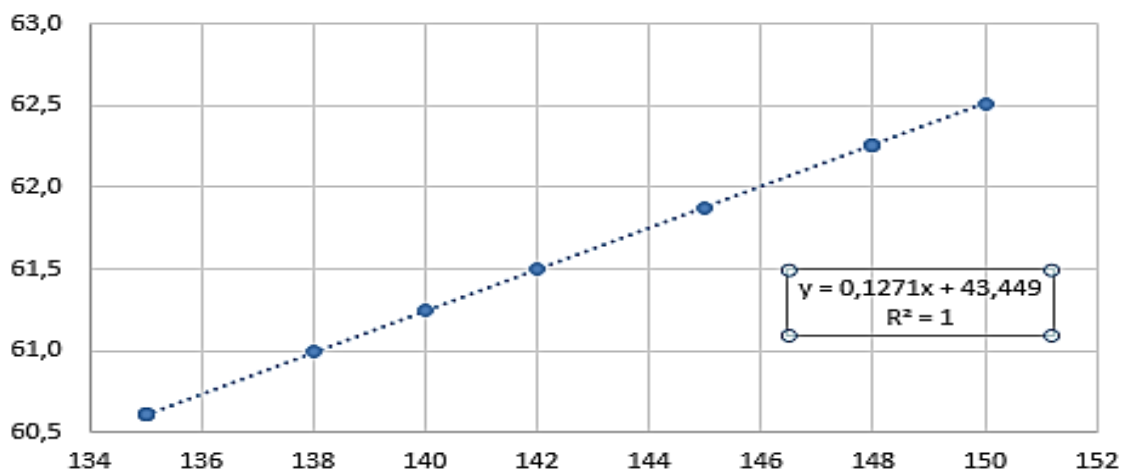


График 2.9. Сравнения зависимости скорости сепаратора к крупке после нормализации данных

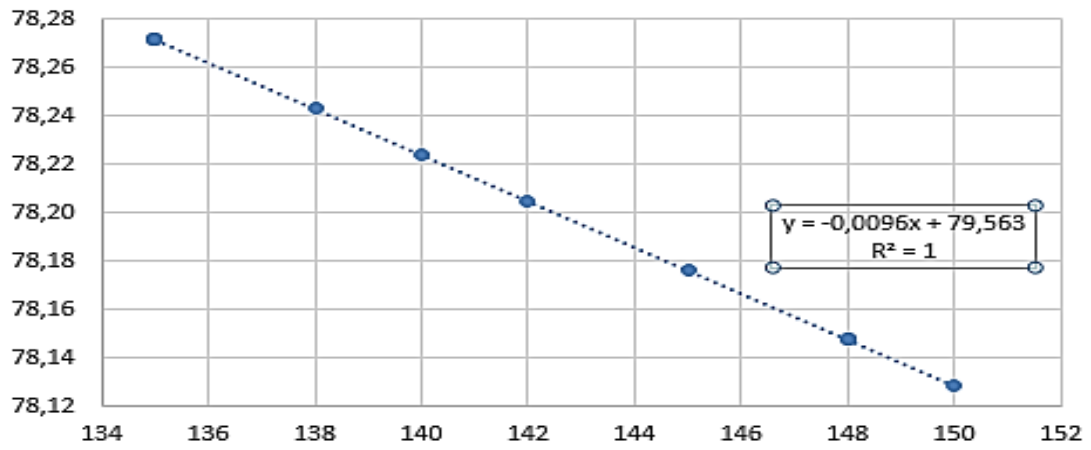


График 2.10. Сравнения зависимости скорости сепаратора к мотор после нормализации

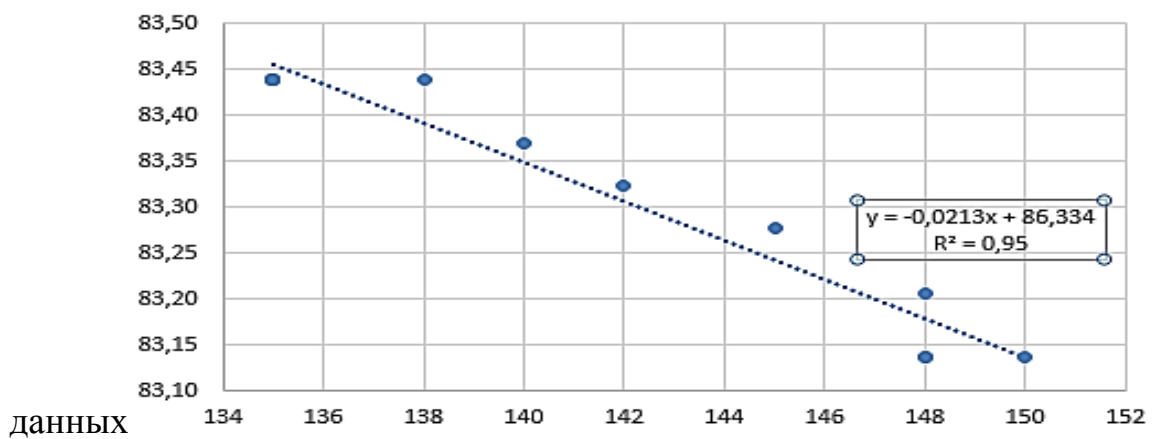


График 2.11. Сравнения зависимости скорости сепаратора к звук мельницы после нормализации данных

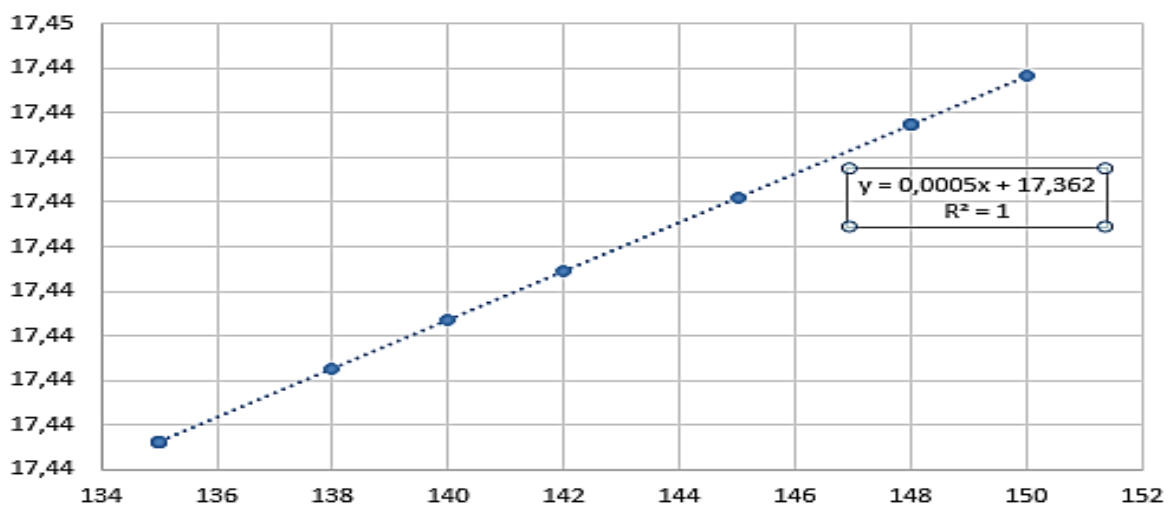




График 2.12. Сравнения зависимости скорость сепаратора к Блейну (D') после нормализации данных

Рассматриваем зависимость гипса с другими параметрами помола после нормализации данных.

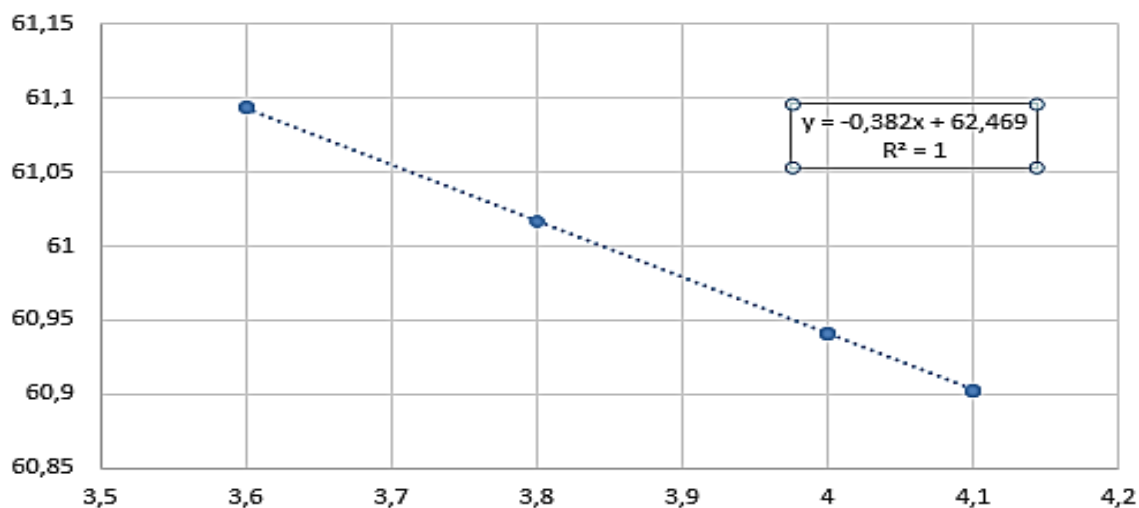


График 2.13. Сравнения зависимости гипс к крупке после нормализации данных

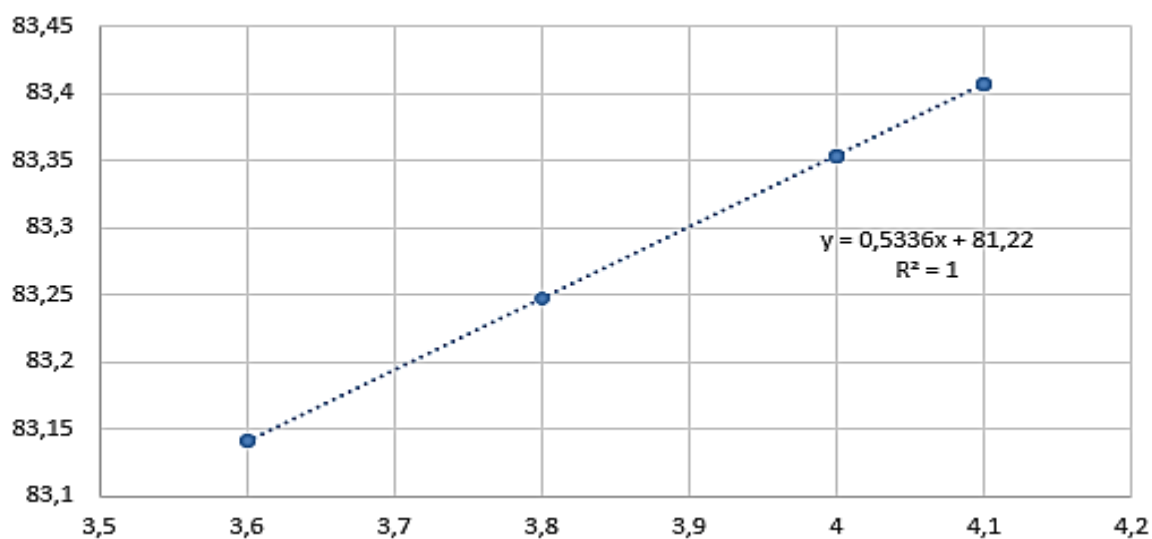


График 2.14. Сравнения зависимости гипс к звук мельницы после нормализации данных

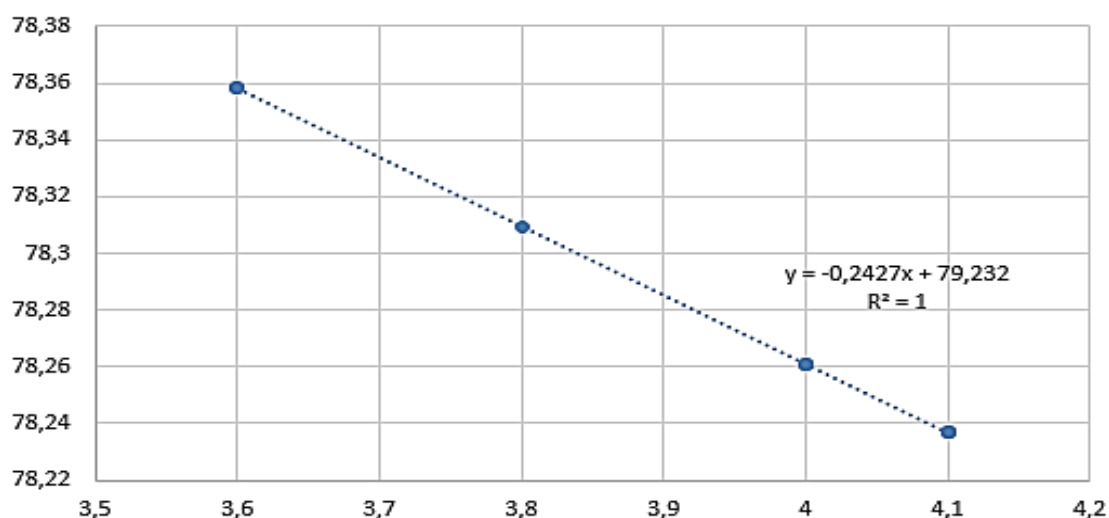


График 2.15. Сравнения зависимости гипс к мотор мельницы после нормализации данных

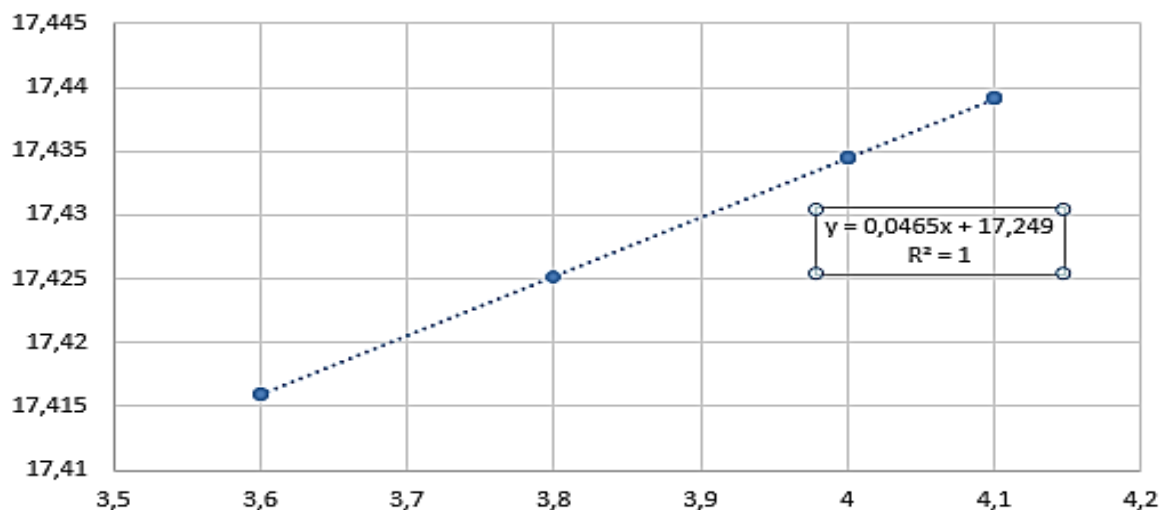


График 2.16. Сравнения зависимости гипс к Блейну (D') после нормализации данных

## 2.5. Искусственные нейронные сети

В нейронной сети существует множество архитектур, которые можно использовать для выполнения различных типов функций. Есть разновидность нейронной сети с высокой эффективностью и сильной функцией, обобщающей с точки зрения скорости обучения и простоты структуры[107]. Входной слой должен получать входные данные или данные обучения, а затем отправляет эти данные в скрытый слой. Скрытый слой расположен между входным и выходным

слоями, где обработка данных выполняется в этих слоях. Впоследствии последний уровень - это нейронные сети выходного уровня. Этот слой производит окончательный вывод сети. Выходные данные, которые были получены из этой нейронной сети, могут быть записаны как в уравнении (2.5.1).

$$a^3 = f^3(w^3 \square^2(w^2 \square^1(w^1 p + b^1) + b^2) + b^3) \quad (2.5.1)$$

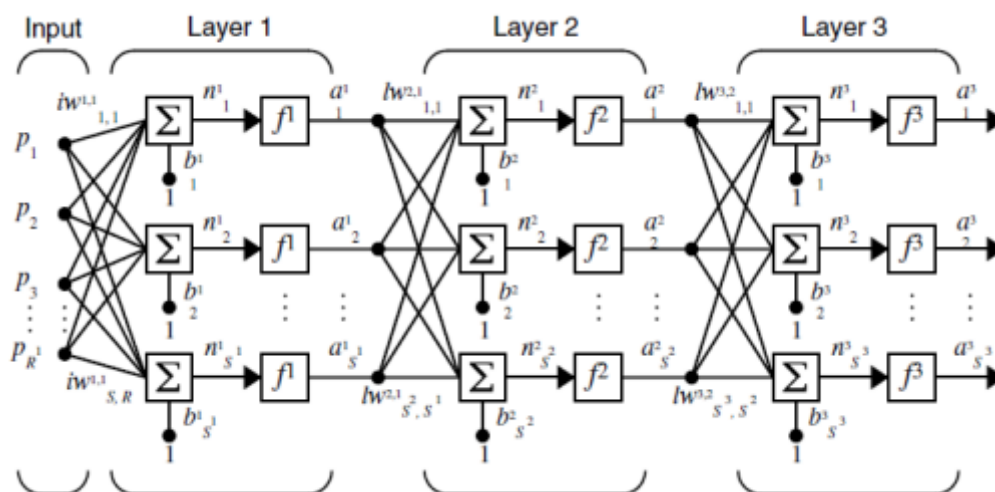


Рисунок 2.3. Трехслойная прямая нейронная сеть.

В нейронной сети  $a$  - выход сети,  $f$  - передаточная функция, используемая в каждом слое,  $w$  - вес. Это можно упростить до уравнения (2.5.1), где в этом уравнении есть три уравнения, которые представляют количество слоев.

## 2.6. Алгоритм обратного распространение ошибки для настройки многослойной нейронных сети с использованием регуляризации некорректного поставленного задач.

### 2.6.1. Метод обучения обратному распространению

При разработке контроллера нейронной сети необходим метод обучения для обучения нейронной сети [108-110]. Один из самых популярных методов обучения - алгоритм обратного распространения. Алгоритм обратного распространения может быть использован для обучения нейронной сети с прямой связью. Алгоритм обратного распространения - это контролируемый метод обучения, который использует набор данных пар входных / целевых данных для обучения сети. В процессе обучения сети сеть получает входные и выходные данные.

Следовательно, входные слои получают входные данные, а выходные слои в сети получают целевые данные. Нейронная сеть может иметь один или несколько скрытых слоев. Ошибка сети может быть рассчитана с использованием входных / целевых данных. Алгоритм обратного распространения работает как метод обучения, чтобы уменьшить или минимизировать ошибки сети. Метод обучения обратному распространению начинается со случайного значения веса и смещения. Затем это значение корректируется для получения оптимальной производительности сети. В этот момент сеть снизила ошибки до минимального значения. После успешного завершения обучения сеть была обучена, чтобы иметь возможность обрабатывать любые новые входные данные, чтобы найти правильные выходные данные[58]. Для расчета значения ошибки использовалось уравнение (2.6.1).

$$E_{\text{tot}} = 0.5 \sum_k (y_k - \hat{y}_k)^2, \quad (2.6.1)$$

где  $\hat{y}_k$  - требуемый выходной сигнал сети;  $y_k$  - наблюдаемый выходной сигнал.

Комбинированный вход в нейронный элемент (НЭ) сети осуществляется на основе обычного суммирования

$$a_k = \sum_j w_{kj} x_j, \quad (2.6.2)$$

где  $w_{kj}$  - весовые коэффициенты передачи сигналов из  $j$ -х НЭ в  $k$ -е НЭ;  $x_j$  - выходные сигналы  $j$ -х НЭ.

Для настройки НС оценивается производная ошибки сети по вариациям настраиваемых весов.

$$\frac{\partial E_{\text{tot}}}{\partial w_{kj}}, \quad (2.6.3)$$

При наличии быстрого возмущения обычная постановка задачи настройки нейронной сети  $V_k^E$  по критерию  $E_{tot}^2$  выхода является некорректной, так как настраиваемые веса быстро колеблются под воздействием различных возмущений. Поэтому задача настройки нейронной сети является актуальной.

Дополнительные критерии

$$\min_{\{W\}} \sum_k \sum_j (v_k^E - v_k^H)^2. \quad (2.6.4)$$

где  $v_k^E$  - это веса, определяемые глобальной выборкой данных на основе известных алгоритмов настройки нейронных сетей.  $v_k^H$  - определяется на основе локальной выборки данных в текущем времени (онлайн).

Рассмотрим настройку нейронной сети от минимизации ошибки. Таким образом, общий критерий настройки нейронной сети имеет вид.

$$\min_{\{W\}} ((1 - \alpha_R) E_{tot}^2 + \alpha_R R) \quad \alpha_R - \text{коэффициент}$$

регуляризации

$$\begin{aligned} W_{js} &= W_{js-1} - \gamma(1 - \alpha) \delta x_{js} + \alpha(W_{js-1} - v_{js}^H) \\ W_{js} - \alpha W_{js} &= W_{js-1} - \gamma(1 - \alpha) \delta x_{js} + \alpha v_{js}^H \\ W_{js}(1 - \alpha) &= W_{js-1} \end{aligned}$$

$\gamma^{-1}$  - коэффициент усреднения  $\gamma = \frac{1}{T}$

$$\begin{aligned} W_{js} &= W_{js-1} - \gamma(W_{js-1} - v_{js}^H) \\ W_{js} &= v_{js}^H \\ W_{js} &= W_{js-1} \end{aligned}$$

### **3. АСУ ТП ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ШИХТЫ**

#### **3.1. Исследование цикл измельчения как объекта управления**

Технологические и технико-экономические показатели работы завода во многом определяются процессом измельчения, на долю которого приходится около 15% общего объема информации, используемой при автоматическом контроле и управлении технологическим процессом переработки материала[111, 112]. При автоматизации процессов измельчения необходимо решать ряд задач:

1. Автоматический контроль технологических параметров цикла измельчения:
  1. скорость сепаратора;
  2. звук мельницы в процесс измельчение;
  3. гранулометрического состава продукта измельчения (качества по Блейну);
  4. скорость вращения двигателя мельницы;
  5. загрузки мельницы дробящей средой;
  6. циркуляционных нагрузок цикла измельчения.
2. Автоматическое управление циклом измельчения:
  1. Стабилизацией технологических параметров цикла;
  2. Оптимизацией работы цикла.

Зачем нужна автоматизация процессов измельчения? С одной стороны, автоматизация данного процесса предназначена для поддержания требуемых режимов измельчения и классификации в условиях изменяющегося качества измельчаемого сырья и других условий измельчения (загрузки мелющих тел, скорость сепаратора, циркуляционной нагрузки и прочее). С другой,

автоматизация – снижение издержек производства и максимизация прибыли. Оба мнения справедливы, поэтому следует учитывать, как мнение технологов, так и мнение инвесторов, поскольку они не противоречат, а взаимно дополняют друг друга.

Уровень автоматизации процессов измельчения сильно отличается на различных предприятиях: от практически нулевого уровня до достаточно развитых систем интеллектуальной оптимизации процесса. Наиболее типичные задачи автоматизации, решаемые посредством введения контуров стабилизации соответствующих технологических параметров в порядке уменьшения их распространенности:

- стабилизация расхода шихты в мельницу;
- стабилизация соотношения «параметров измельчение» посредством подачи гипса в мельницу;
- стабилизация соотношения «параметров измельчение» посредством скоростью сепаратора;

В 95% случаев автоматизация процессов измельчения этим и ограничивается.

Целью создания автоматизированной системы является повышение эффективности функционирования технологического комплекса за счет улучшения системы регулирования и контроля подачи гипса и скорость сепаратора в мельницу замкнутого цикла.

Условием достижения поставленной цели является улучшение качества и оперативности обработки информации в процесс измельчение шихты в цементном производстве.

От этапа к этапу менялись и функции человека (оператора/диспетчера), призванного обеспечить регламентное функционирование технологического процесса. Расширяется круг задач, решаемых на уровне управления; ограниченный прямой необходимостью управления технологическим процессом набор задач пополняется качественно новыми задачами, ранее имеющими вспомогательный характер или относящиеся к другому уровню управления.

## 3.2. Уровни АСУ ТП

АСУ ТП подразделяется на 3 уровня:

- уровень технологического процесса (нижний уровень);
- уровень контроль и управления технологического процесса (контроллерный уровень);
- уровень человеко-машинного интерфейса (верхний уровень).

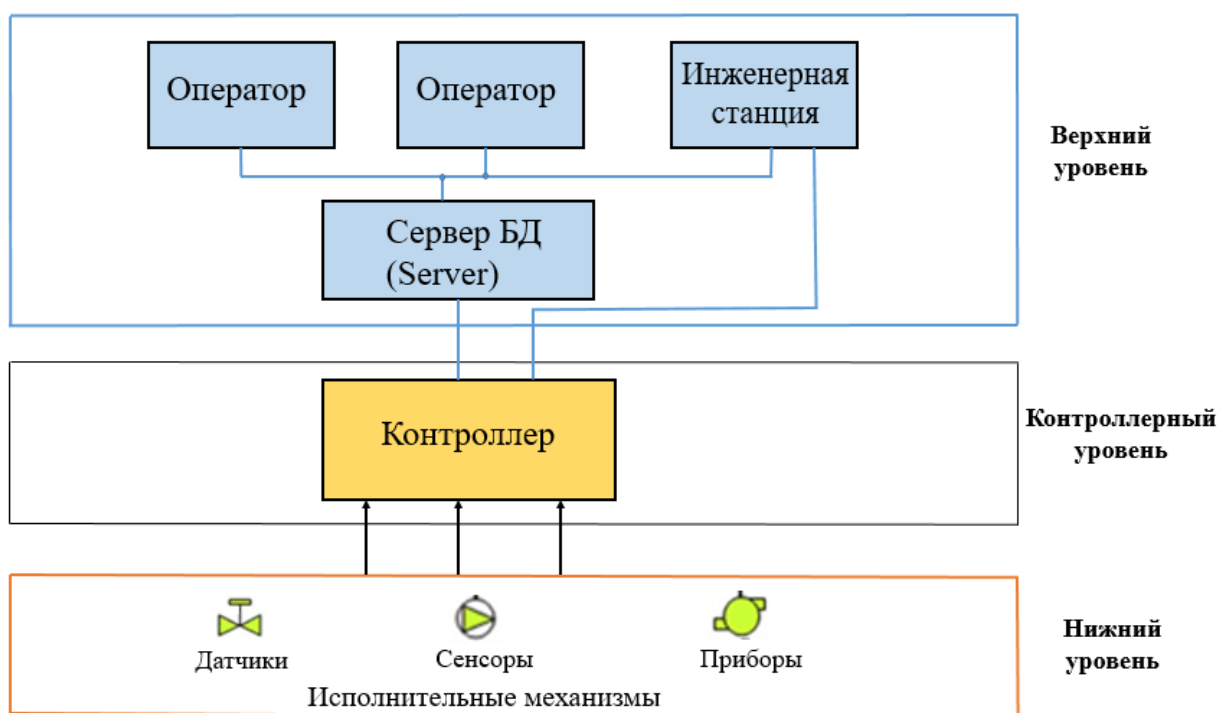


Рисунок 3.1. Уровни АСУ ТП

### 3.2.1. Уровень технологического процесса (нижний уровень)

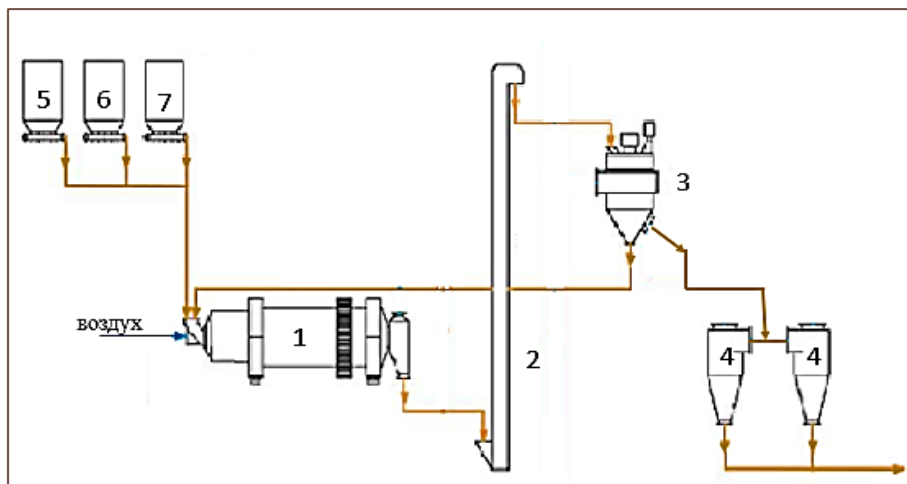
Нижний уровень формирует первичную информацию, которая обеспечивает работу всей АСУ ТП. На этот уровень адресно поступают и реализуются управляющие воздействия АСУ ТП. Оборудование нижнего уровня составляют первичные преобразователи (датчики), исполнительные органы (сенсоры, приборы) и механизмы.

Датчик - устройство, преобразующее физические параметры технологического процесса в электрические сигналы, поступающие в дальнейшем на контроллер.

Исполнительный орган – орган, воздействующий на технологический процесс путем изменения пропускной способности.



Исполнительный механизм - устройство, преобразующее электрические сигналы в физические воздействия, осуществляющее управление параметрами технологического процесса в автоматическом или ручном режиме.



- 1 - шаровая мельница
- 2 - элеватор
- 3 - сепаратор
- 4 - циклон сепаратора
- 5 - клинкер
- 6 - гипс
- 7 - добавки

Т  
ИП  
ИЧ  
НА  
Я  
СХ  
ЕМ

а помола цемента представлена на рисунке 3.2, который состоит из шаровой мельницы с одним отсеком в замкнутом цикле с воздушным классификатором. Поток сырья (обычно клинкера и гипс) подается во вращающуюся мельницу, под бункерами установлено погрузочные ленты которой имеет измерительные датчики (тензодатчики) для измерения весового потока. Тензодатчики измеряет весового потока и отправляет информации в сервер для дальнейшего обработки.

того как  
в мельницу  
частиц  
результате

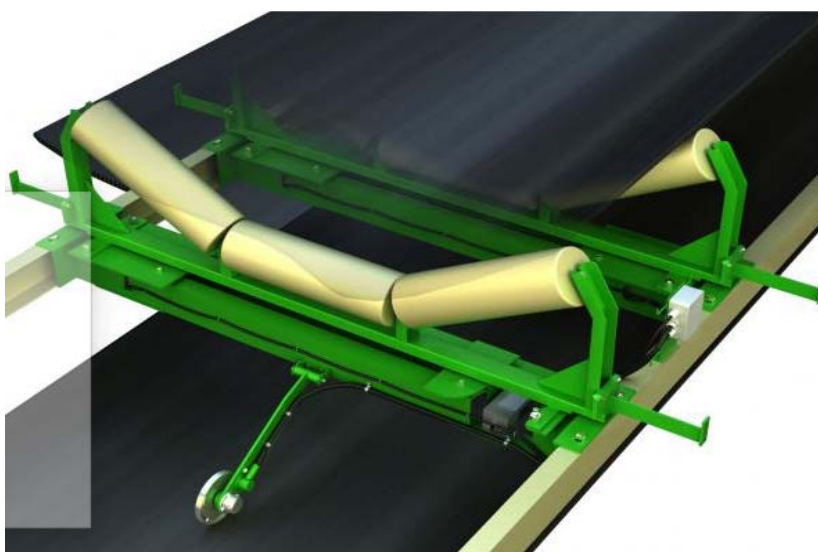


Рисунок 3.3.  
Тензодатчик  
После  
сырья подается  
шарики  
осуществляют  
разрушение  
материала в  
разрушения и /

или истирания звуковые датчики (иногда называют электронные уши) собирают

информации о процессе измельчения и передает в сервер для обработки. Для вращения мельницы используется двигатель. Двигатель является одним из частью контура измельчения, поэтому скорость вращения и расход электроэнергии в процесс измельчения измеряется с помощью измерительных приборов для дальнейшего управления. На другом конце выходной поток или поток мельницы поднимается ковшовым элеватором на классификатор, который разделяет материал на две части: поток продукта и отклоненный поток который рециркулирует на вход мельницы. Каждый два часа из готового продукта берут пробу в лаборатории для определение качества цемента и результаты вносятся в электронную таблицу.

Таблица 3.1. Данные анализа лаборатории по % гипсов в цементе

Зона	значени	8:0	9:0	10:0	11:0	12:0	13:0	14:0	15:00	16:0	17:0	18:00	ср	3.2.2. Уров ень контр оля и управ ления техно логич	
3+	3,3	3,4													
2+	3,0	3,2													
1-	2,5	2,9	2,7		2,64	2,84	2,79			2,8		2,7	2,7		
2-	2,2	2,4													
3-	1,9	2,1													
	5	9	3							3		2	6		

### еского процесса (контроллерный уровень)

Контроллер, построенный на основы нейронной сети, должен работать в реальном времени и отражать текущее состояние процесса измельчение [18, 19]. Данные собираются каждый час с помощью измерительных приборов (который регулируется в зависимости от колебаний рабочего состояния мельницы), и нейронный сеть использует эти данные для оценки рабочего состояния мельницы, если требуется какое-либо контрольное действие, нейросеть определяет того, какую уставку следует изменить и определяет значения изменений. Рассчитанные

уставки в виде экранной форме предлагается оператору для дальнейшего действие[19].

### **3.2.3. Уровень человеко-машинного интерфейса (верхний уровень)**

В данном уровне все информации о процессом измельчение переставляется в виде экранном форме, операторы наблюдает за процессом измельчение если необходимо какой-то изменение, то они вводят изменение в систему.

### **3.3. Моделирование АСУ**

Основой разработки АСУ является построение моделей производственных процессов, а также процессов сбора и обработки информации о ходе этих процессов. Общая цель моделирования подчинена цели любых естественно – научных исследований – прогнозировать результаты предстоящих экспериментов.

Создание автоматизированной системы управления технологическим процессом измельчения является одним из этапов реконструкции цементных заводов. АСУ ТП процесса измельчения предназначена для выполнения следующих задач:

1. управления технологическим процессом измельчения и классификации, шихты на различных стадиях;
2. непрерывного измерения, контроля и регулирования технологических параметров;
3. диагностики и контроля состояния оборудования цеха измельчения.

### **3.4. Концептуальная модель**

Построение концептуальной (содержательной) модели конкретного объекта является первым этапом моделирования. Основным содержанием этого этапа является переход от словесного описания к его математической модели.

Процесс измельчения как управляемый объект

Как управляемый объект, замкнутый цикл измельчения характеризуется следующими параметрами (рисунок. 3.1):

1. входные:
  - клинкер С;

- гипс  $G$ ;
- влажность  $\varphi$ ;
- температура исходной материал  $T$ ;
- частота вращения мельницы  $n$ ;
- циркуляционная нагрузка  $R$ ;
- скорость сепаратора  $SS$ ;

## 2. выходные:

- качества по Блейну ( $D'$ )
- гранулометрический состав  $C_x$ ;
- мощность, потребляемая электроприводом мельницы  $P$ ;

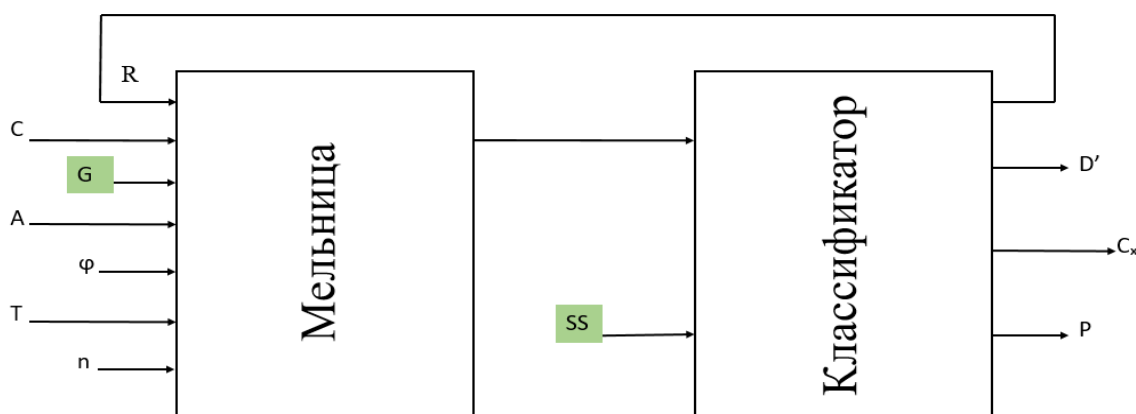


Рисунок 3.4. Структура замкнутого цикла измельчения

Управляющими воздействиями могут служить: подача гипса  $G$ ; и скорость сепаратора  $SS$ .

Построена систему управления процессом измельчения воздействием на подачу гипса и скорость сепаратора, т.е. регулировать и контролировать параметры  $G$  и  $SS$ , а также следить за состоянием оборудования.

Контроль загрузки барабана мельницы материалом, и циркулирующая нагрузка замкнутого цикла измельчения – естественные индикаторы, отражающие ход процесса измельчения и реагирующие на изменение всех параметров цикла.

Степень загрузки мельницы рудой наиболее просто контролировать по уровню шума, производимого мелющими телами в зоне их падения. При уменьшении уровня загрузки уровень шума возрастает, при увеличении – уменьшается.

Техническая реализация контроля наиболее проста при использовании амплитуды шумового сигнала. В этом случае в состав датчика входят микрофон, выпрямительная приставка, сглаживающий фильтр и выходной делитель напряжения. Датчик устанавливается вблизи мельницы в зоне падения шаров со стороны разгрузочной цапфы. Звуковые колебания воспринимаются микрофоном, преобразующим звуковые колебания в э.д.с. шумового сигнала. Ток выпрямляется, сглаживается и используется в системе контроля и регулирования.

Недостаток этого метода контроля – чувствительность датчика к внешним звуковым помехам, например, от работающих рядом мельниц. Для устранения этого недостатка динамик или микрофон, воспринимающие шум мельницы, заключаются в специальный корпус с тройной звукопоглощающей решеткой на входе.

Итак, первая задача – стабилизация уровня загрузки барабана мельницы шихтой с воздействием на частоту вращения привода. Этот метод оправдывает себя, когда гранулометрический состав и физико-механические свойства исходной руды сравнительно постоянны. Основное преимущество этого принципа управления – простота технической реализации. Использование его при автоматическом управлении дает увеличение производительности измельчительного агрегата до 10%.

### **3.5. Разработка структурной и функциональной схем управления замкнутого контура измельчения с целью интеграции разработанных решений в АСУ ТП**

Для интеграции разработанных в данной диссертационной работе автоматизированных решений по повышению эффективности процесса измельчения в АСУТП предлагается произвести описание основных взаимодействий между наиболее важными подсистемами комплекса замкнутого измельчения средством построения структурно – логической схемы АСУТП.

Управление комплексом замкнутого измельчения осуществляется операторами через операторские станции, на которых технологический процесс отображается в виде мнемосхем. Графиков и сообщений. При этом контроллер

опрашивает состояние приборов измерения, проводит все стадии предварительной обработки сигналов, выполняет необходимые расчеты, передает актуальную информацию в выходные блоки. Система визуализации запрашивает информацию о ходе процесса для архивирования и визуализации, записывает данные для длительного хранения, выводит информацию о состоянии технологического объекта на экран, сообщает в особой форме о выходе технологического параметра за рамки допустимого. Кроме этого, система визуализации позволяет пользователю осуществлять оперативное управление технологическими механизмами непосредственно с операторской станции. При этом управляющие воздействия, команды, заданные значения и т.п. передаются в контроллер. Обмен данными между контроллером и системой визуализации происходит посредством локальной сети Industrial Ethernet. Архивы данных передаются разработанные программы, где производится их обработка с последующей идентификацией, т.е. адаптацией объекта.

### 3.5.1. Построение функциональной системы

Обеспечение нормального функционирования системы включает в себя функции, ориентированные на решение задач управления, документального обоснования (оценки и обработки данных о технологических параметрах и аварийных ситуациях), контроля, направленного на предотвращение и устранение аварийных режимов работы модуля, анализ причин отклонения.



Рисунок 3.6. Процесс измельчения

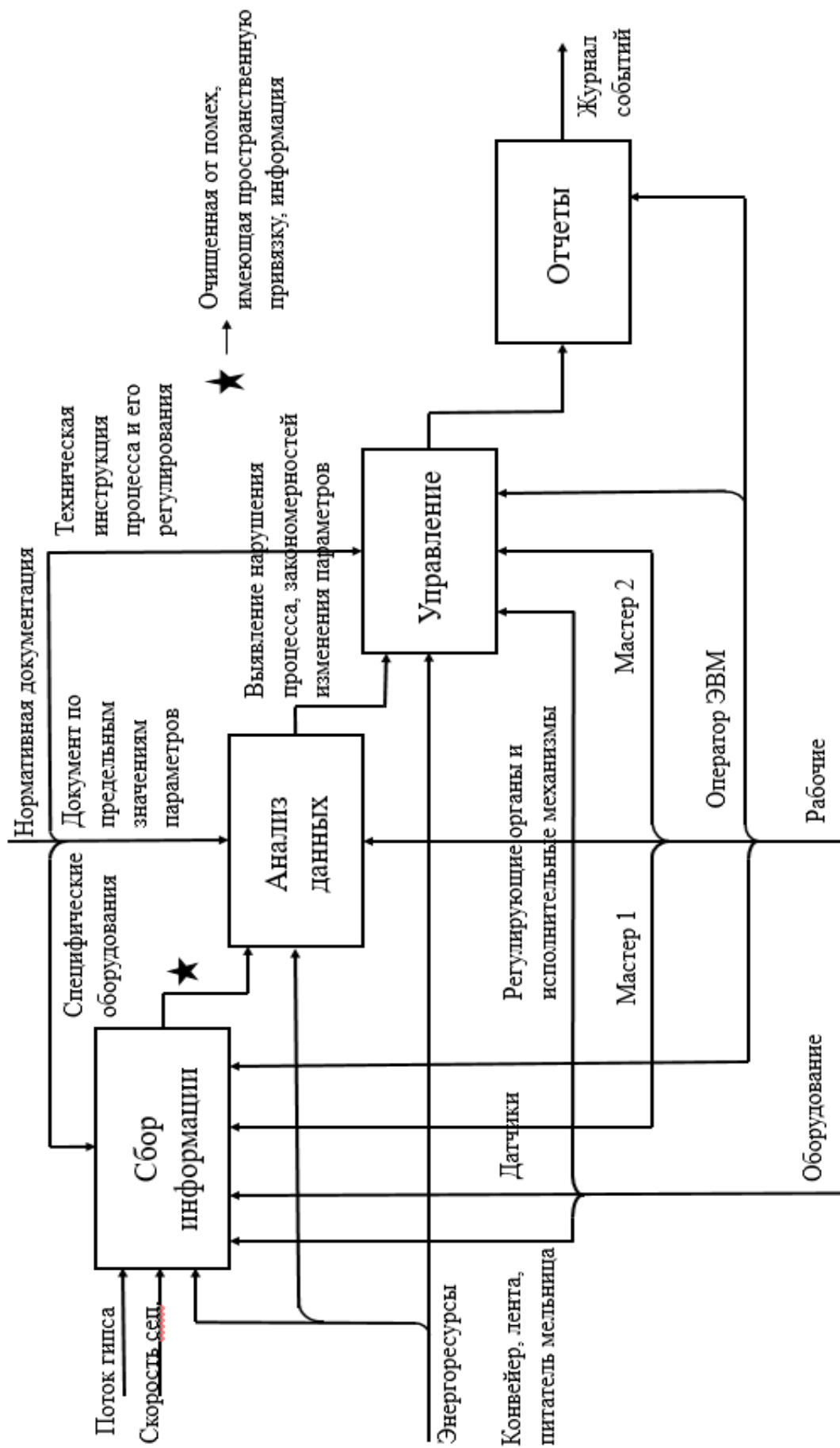


Рисунок 3.6.1. Мониторинг процесс измельчения

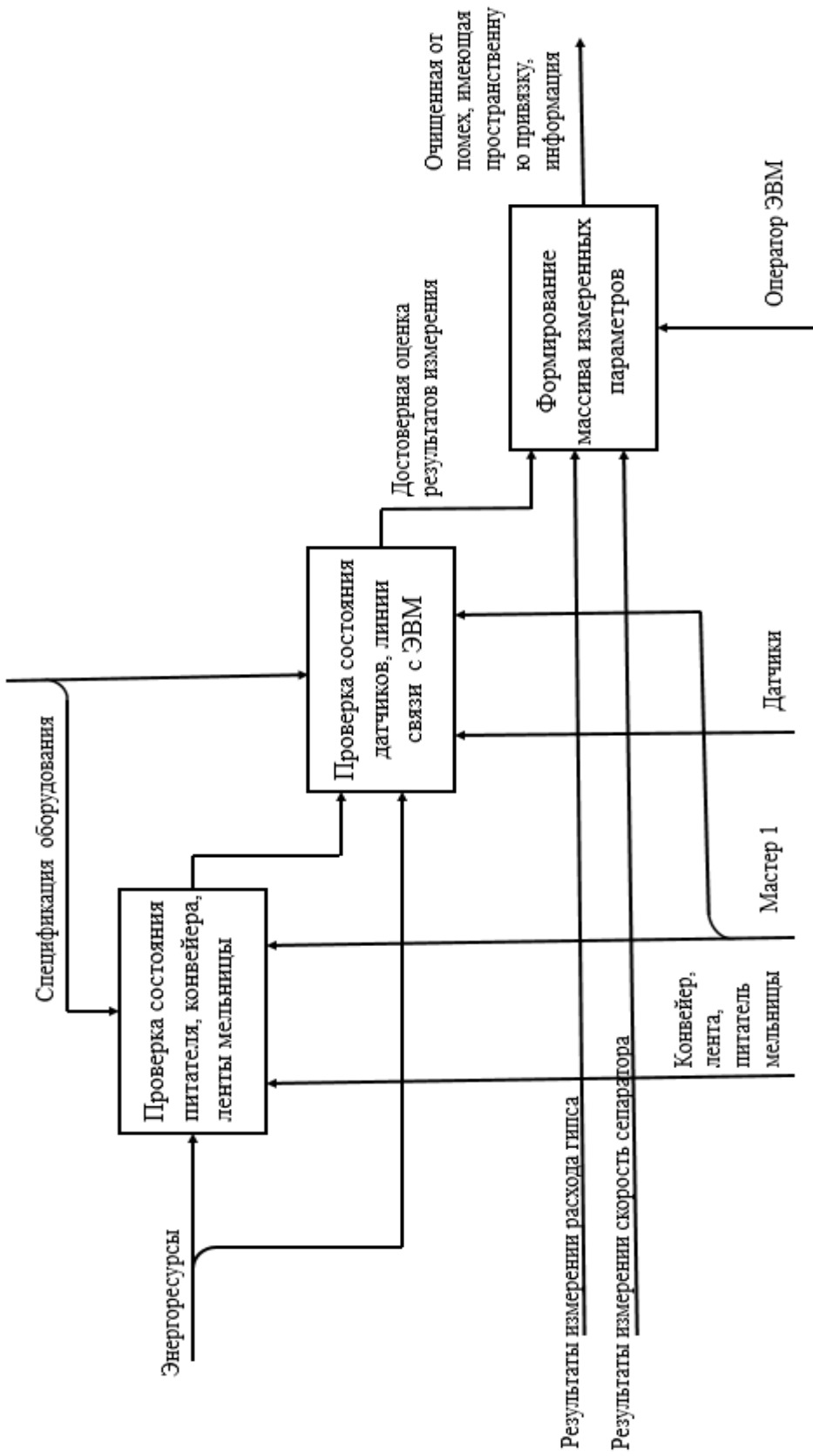


Рисунок 3.6.2. Сбор информации



Мониторинг процесса осуществляется с периодичностью 60мин с использованием датчиков. Он включает в себя контроль потока гипса и скорость сепаратора. Под мониторингом понимается не только сбор информации об объекте управления, но и регулировании параметров системы.

Анализ процесса включает в себя непосредственно диагностику процесса, осуществляемую с применением средств автоматизации с известной степенью достоверности, фиксацию выхода контролируемого параметра за допустимые границы и анализ возникновения причин аварийных и предаварийных ситуаций.

Документирование осуществляет сбор всей идущей информации с последующим отбором и хранением ее.

Инфологическая модель является семантической моделью данных, т.е. переходом от функциональной модели к базе данных и показывает, какой информацией должно быть обеспечено выполнение конкретных функций.

### **3.6. Информационно-логическая модель**

Для систематизации и уменьшения объема данных о процессе нужно рассмотреть природу соответствующей информации. Наиболее важные параметры, используемые в обработке измерений, включают в себя:

- Указатели на данные измерений (идентификатор);
- Адрес входного порта измерительной информации;
- Интервал выборки;
- Коэффициенты перерасчета сигнала;
- Параметры датчика;
- Пороговые значения (полоса гистерезиса с первым и вторым сигнальными пределами);
- Результат измерений до и после обработки.

Параметры описания объектов хранятся в БД процесса, которая представляет собой центральный элемент программного обеспечения управляющей системы. БД для автоматизированного управления процессом содержит для обработки следующей информации:

- Параметры всех датчиков и исполнительных механизмов;
- Параметры для расчета производных величин;
- Определение возможных событий и соответствующих им реакций управляющих воздействий
- Плановые показатели.

Доступ к БД процесса, запросы и протоколы

Доступ к информации, содержащейся в БД, выполняется с помощью трех основных операций, которые могут комбинироваться, - выбора, проекции и сортировки.

Выбор (selection) определяет операцию для извлечения из базы данных только записей, удовлетворяющих заданным критериям. В нашей системе должны быть:

- Выборка по сигналу датчика т.е. выборка параметра расхода гипса и параметра скорость сепаратора);

Проекция (projection) – это список интересующих полей записи БД.

Сортировка (sorting) означает упорядочение выбранных записей в соответствии с критерием.

Сочетание трех основных операций порождает большое число вариантов обработки и анализа данных.

Операция по извлечению информации из БД называется запросом.

Формирование протоколов

Важнейшей функцией системы управления является быстрое выявление недопустимых режимов и оповещение об этом оператора. Каждое изменение состояния, классифицированное как предупреждение, должно быть зафиксировано специальном файле – журнал событий – с указанием времени события.

Важной составляющей работы является техническое обслуживание приборов и оборудования:

- Подготовка к запуску;
- Поверка состояния;

- Замена изношенных приборов;
- Калибровка датчиков;

Очевидным решением является подготовка графиков планового обслуживания на определенный период, исходя из информации хранящейся в БД процесса.

### **3.6.1. Операции управления, выполняемые с использованием БД**

В зависимости от режима работы различаются исполнительные команды:

- Автоматический – управление с ЭВМ. В данной системе управления в БД хранятся указания на автоматические действия, которые выполняются в определенных ситуациях. Специальная таблица БД указывает, при каком значении некоторого параметра вызывается исполнительная команда.
- Ручной – управление мастером на местном щите.

### **3.6.2. Проверка достоверности исходных данных**

Для данной системы достоверность играет большую роль, так как ошибки во входных данных могут привести к некорректным управляющим действиям:

1. проверяем состояние оборудования;
2. величина входного сигнала лежит в пределах рабочего диапазона датчика и расходомера.

Во избежание аварийных ситуаций определяют полосу гистерезиса вокруг порогового значения. Аварийный сигнал генерируется только тогда, когда входная величина превысит второе пороговое значение. Для того чтобы сбросить аварийный сигнал, входная величина должна снова пересечь первое пороговое значение. Новый аварийный сигнал может быть выработан после того, как второй порог будет достигнут снова.

Построение графиков

Построение графика изменений сигнала во времени или как функции сигнала позволяют выявить некоторые интересные детали:

1. исключительные или необычные возмущения;
2. потерю значений;
3. периодические колебания.

В процессе измельчения руды важно учитывать, контролировать и регулировать ряд параметров для нормального режима предприятия. Для этого создаются информационные системы управления.

В данной работе я рассмотрела систему управления процесса измельчения воздействием на подачу исходной руды в цикл и расхода воды в мельницу под воздействием.

Система позволяет:

- регистрацию и сохранение параметров процесса в БД;
- контроль за состоянием оборудования и приборов, контролирующих и регулирующих параметры процесса;
- выявление предаварийных и аварийных ситуаций;
- регулирование параметров с помощью мастера (ручной способ на местном щите) или оператора ЭВМ (автоматический: на ЭВМ).

## **4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЗАМКНУТОГО КОНТУРА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ**

### **4.1. Сбор и анализ данных**

Для определения компьютерного модели для контура измельчения, анализ материальных потоков является важным этапом. Эксперимент для выборки из материальных потоков контура измельчения была выполнено на опытном заводе.

Было произведен анализ классификатора на изменение скорости потока, скорость вращения ротора классификатора, возврат крупки, соотношение гипс в клинкер, определена тонкость помола по Блейну ( $D'$ ).

## 4.2. Контур измельчения на опытном заводе

На опытном заводе где было провидена эксперимент цикл измельчения происходила в трубной шаровой мельницы с двумя камерами и в сепараторе. Данные по результатам цикл измельчения в замкнутом контуре представлено в таблице 4.1.

Таблица 4.1. Данные полученные с реального объекта

Подача т/ч	Скорость сепаратора об/миин	Гипс %	Возврат крупки т/ч	Звук мель.	Мотор %	Блейн (D')
90	150	4,1	59	82	79,3	16,8
90	148	4	63	83,3	79,1	16,9
90	148	4	68	81,9	79,3	16,7
90	148	3,8	69	82,7	79,3	16,6
90	145	4	67	85,4	75,8	16,5
90	142	4	68	90	75	17
90	140	4,1	68	87,7	76,7	16,9
90	138	4,1	56	86,9	81,7	16,7
90	135	4,1	62	84	80,4	16,7
90	135	3,6	40	83,4	78,8	18,5
90	135	3,6	40	82,1	79,1	18,2
90	135	3,6	56	82,9	79,2	17,6

## 4.4. Результаты исследований с использованием моделей в виде нейронной сети

MATLAB Neural Network Toolbox используется для создания, обучения и тестирования моделей нейронных сетей. Это возможно, потому что в сетях инструментов есть объектно-ориентированное представление. Представление позволяет определять различные архитектуры, даже сложные.

Для обучения и тестирования моделей нейронных сетей в качестве выходного параметра используем скорость потока  $u$  (гипс) и скорость сепаратора  $v$ .

Регулируя данный параметров с помощью нейронной сети, повышаем качества продукт при производства цемента.

В качестве средства наблюдения за производительностью модели, выходные данные сети (прогнозируемые) по сравнению с целевым выходом наносятся на график для наборов обучения и тестирования. Этот график дает визуальную оценку того, насколько хорош прогноз. Кроме того, изменение сетевых ошибок от итерации к итерации и итерации наилучшего результата сети дается графиком, помеченным как производительность проверки. Кроме того, параметры обучения и среднеквадратичные ошибки (фактические не нормированные) представлены в табличной форме.

#### 4.4.1. Эталонная модель

Как известно, качество помола и потребление ресурсов зависит от многих факторов, такие как перегруз мельницы, скорость сепаратора, объем подачи, процентное соотношение гипс к клинкеру и т.д. Для решение данного проблемы рассматриваем соотношение скорость сепаратора и объем гипса с другими параметрами которое было нормализовано с помощью метод наименьших квадратов и было обучено нейронный сеть.

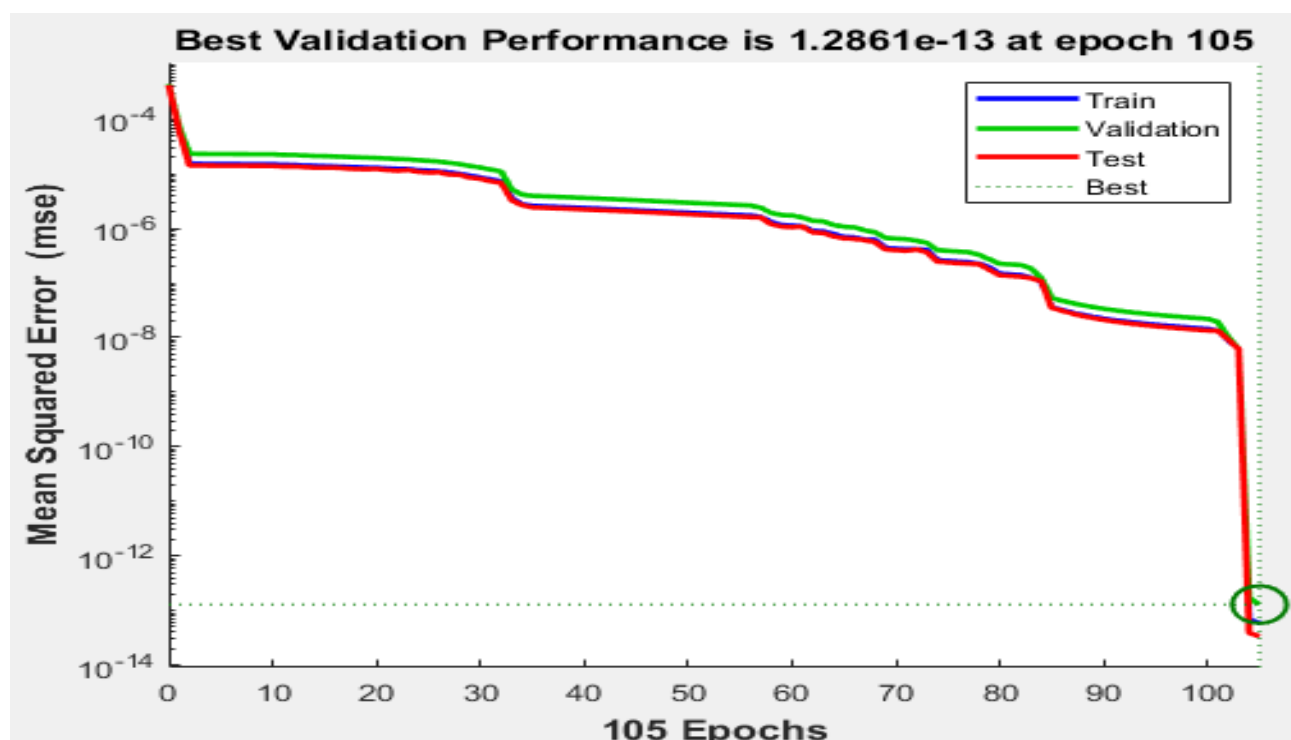


Рисунок 4.2. Проверка производительности эталонной сети, соотношение оборот сепаратора к Блейну(D')

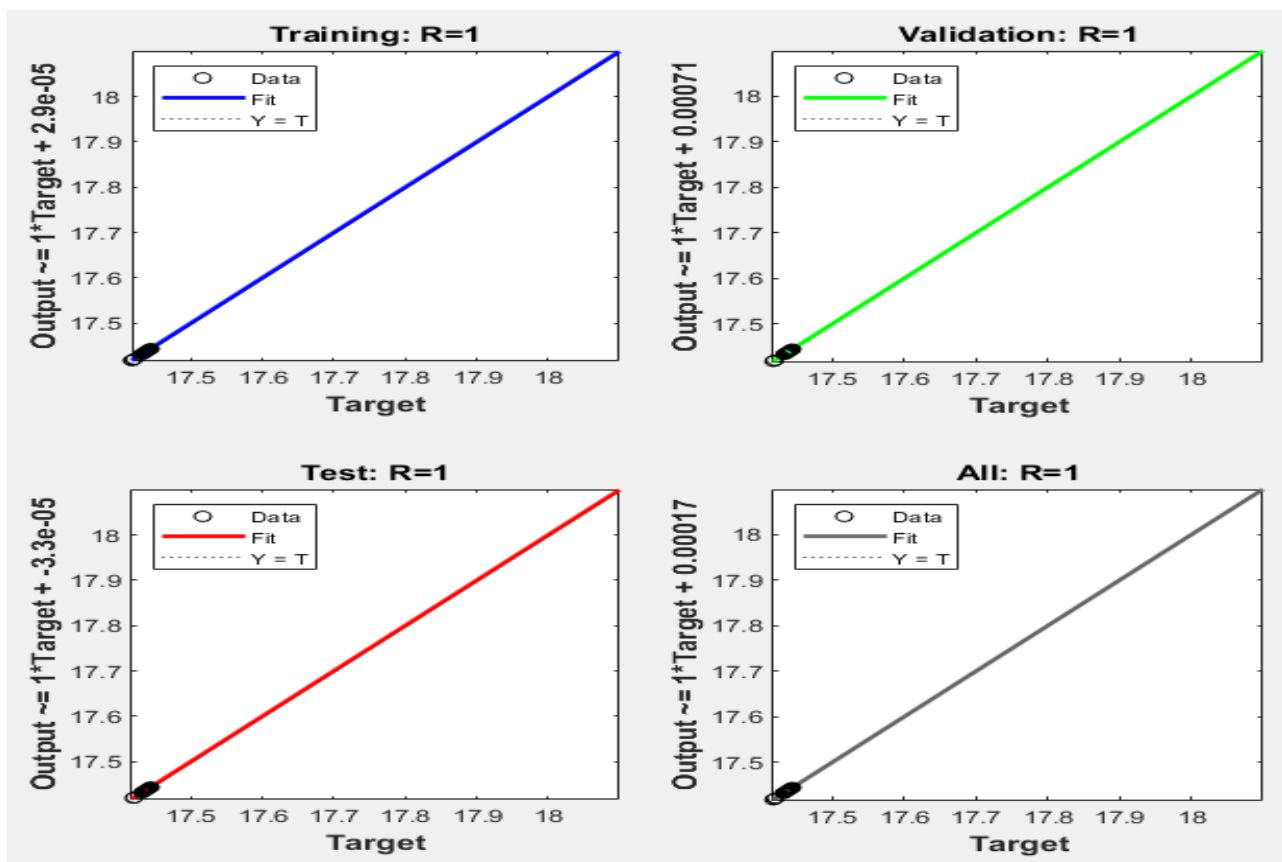


Рисунок 4.2.1. Проверка параметра обучения

Таблица 4.2. Параметры обучения эталонной сети

Параметры обучения	
Эпоха	105 Итерации
Время итераций (сек.)	0:00:06
Производительность	5.88
Градиент	2.18
Проверочные проверки	6

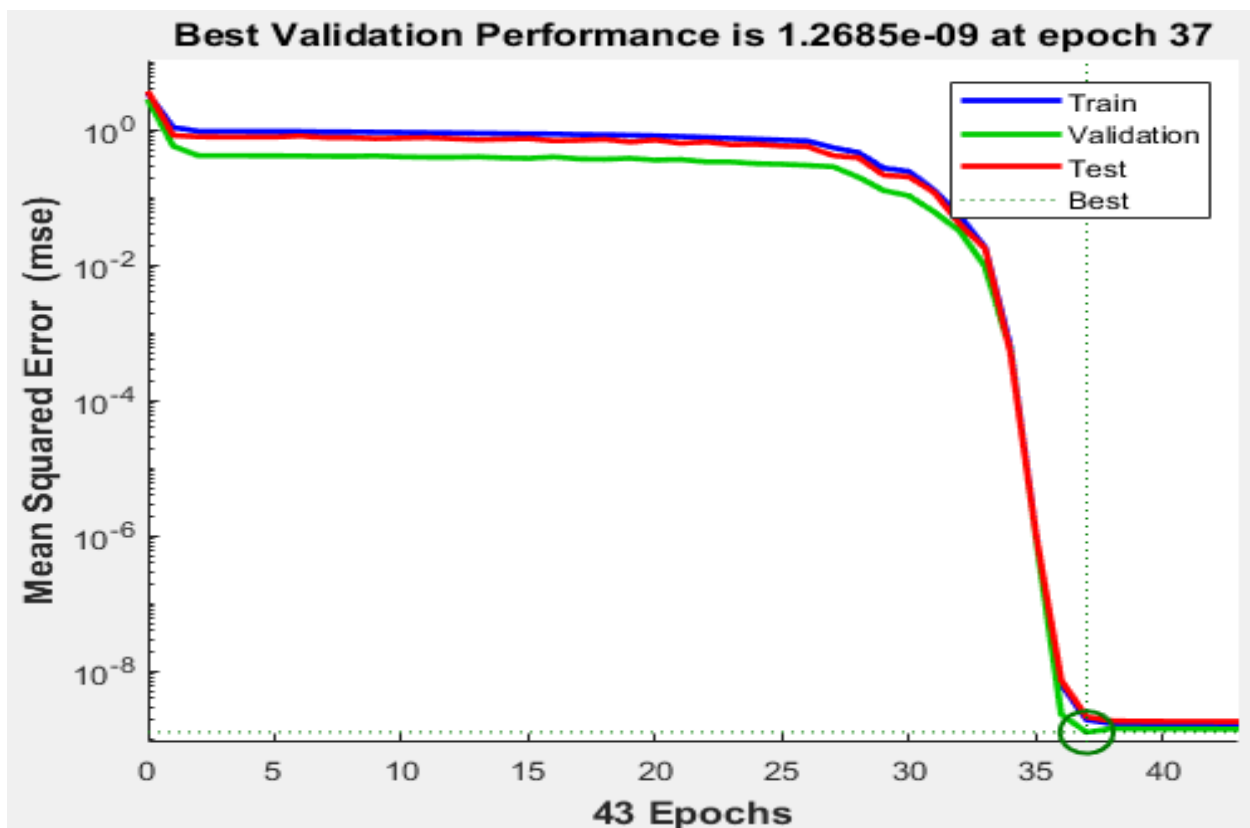


Рисунок 4.3. Проверка производительности эталонной сети, соотношение оборот сепаратора к крупке



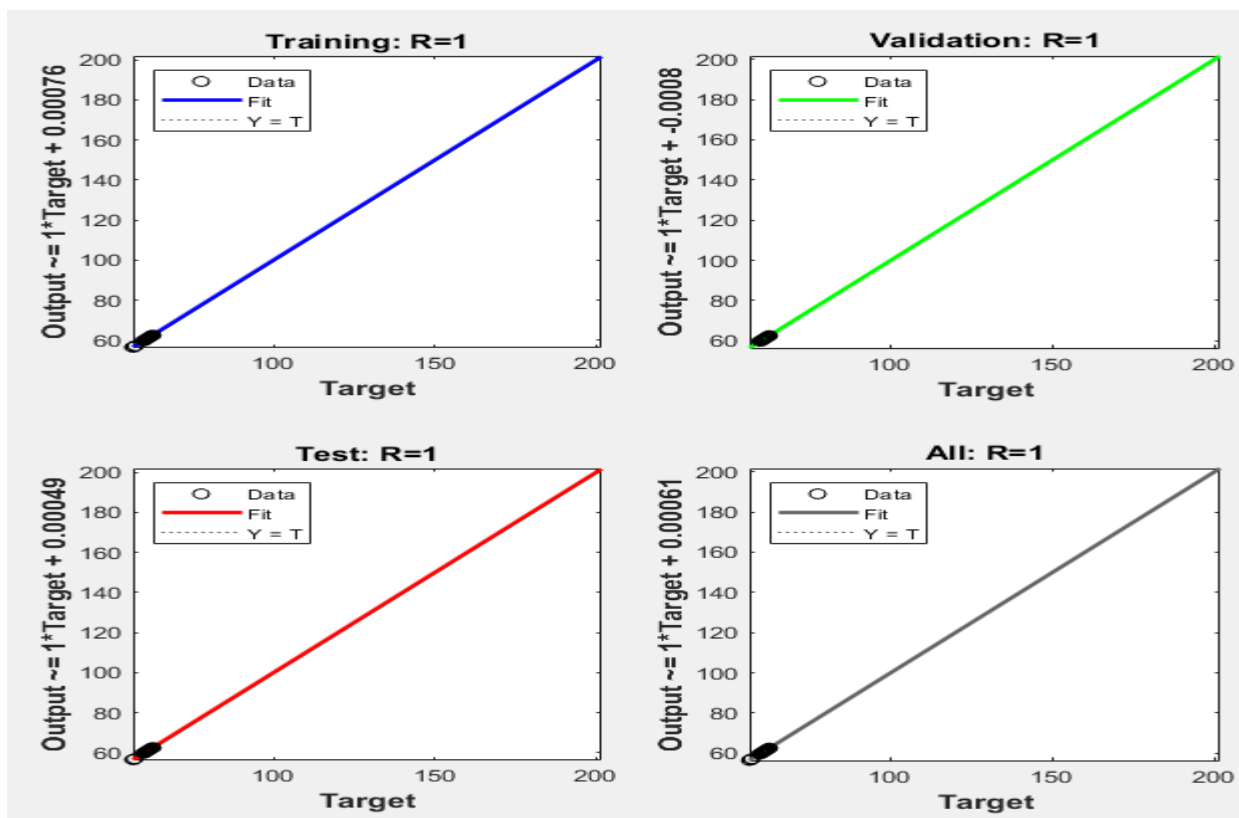


Рисунок 4.3.1. Проверка обучения

Таблица 4.3. Параметры обучения эталонной сети

Параметры обучения	
Эпоха	43 Итерации
Время итераций (сек.)	0:00:02
Производительность	3.53
Градиент	32.8
Проверочные проверки	6

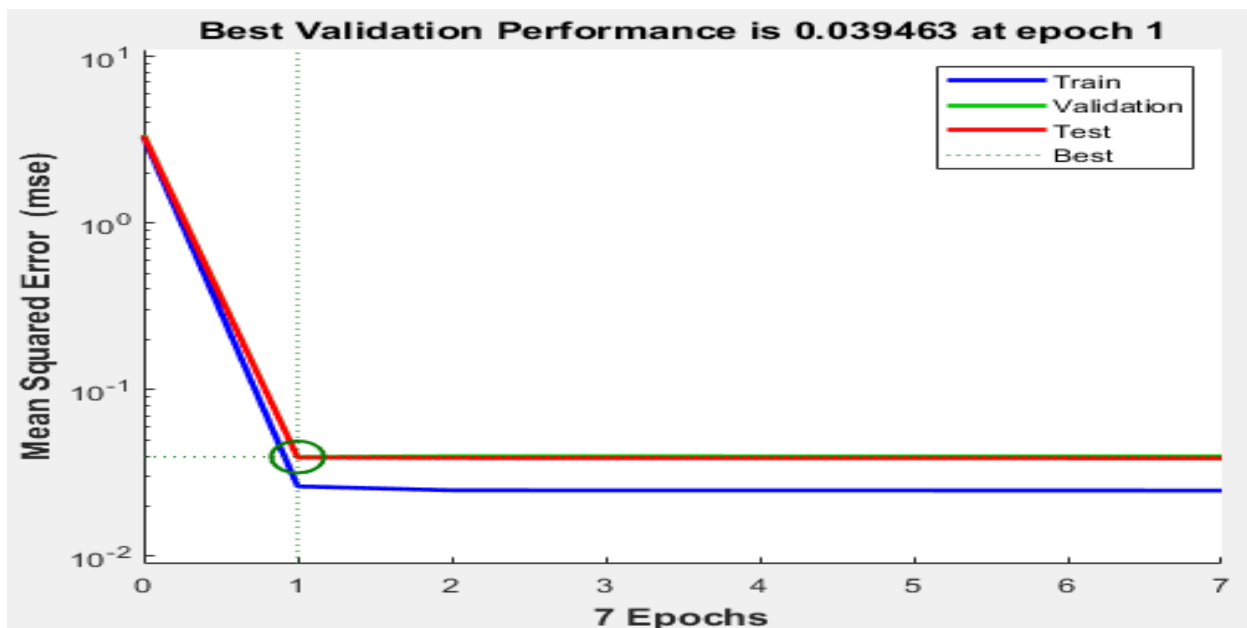


Рисунок 4.4. Проверка производительности эталонной сети, соотношение оборот сепаратора к звук мельницы

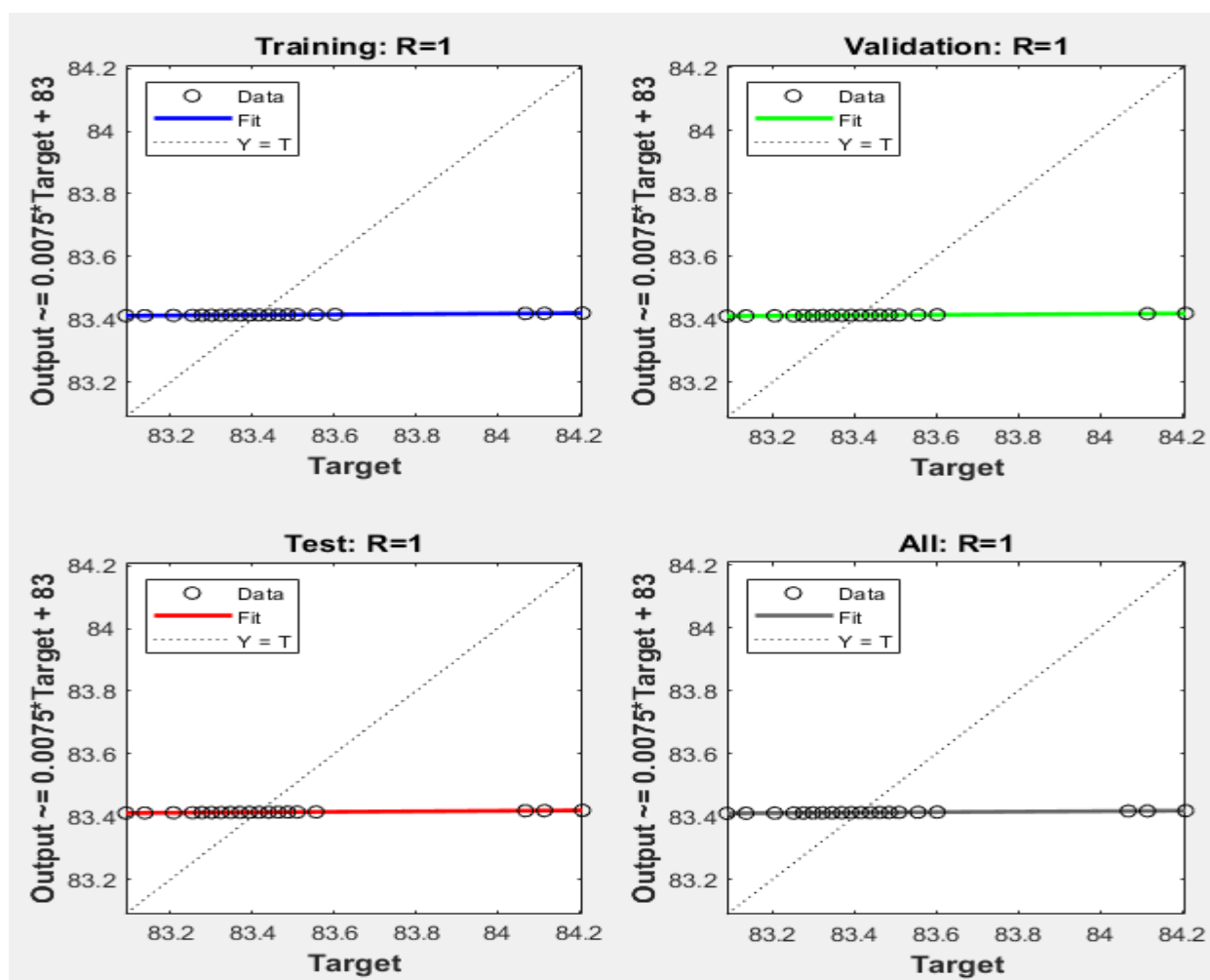


Рисунок 4.4.1. Проверка обучения таблицы

ица 4.4. Параметры обучения эталонной сети

Параметры обучения	
Эпоха	7 Итерации
Время итераций (сек.)	0:00:03
Производительность	3.27
Градиент	6.85
Проверочные проверки	6

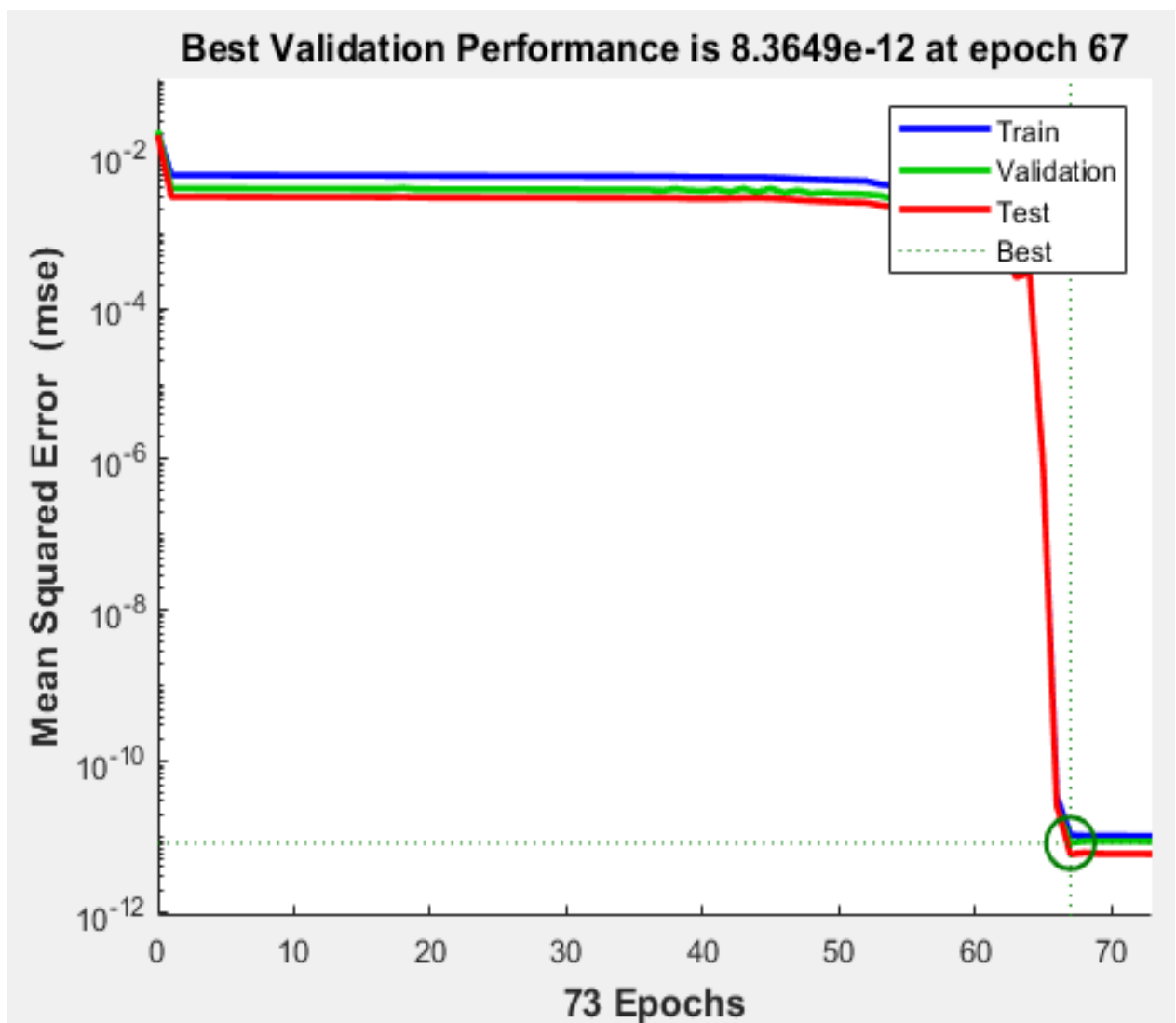


Рисунок 4.5. Проверка производительности эталонной сети, соотношение оборот сепаратора к мотор мельницы

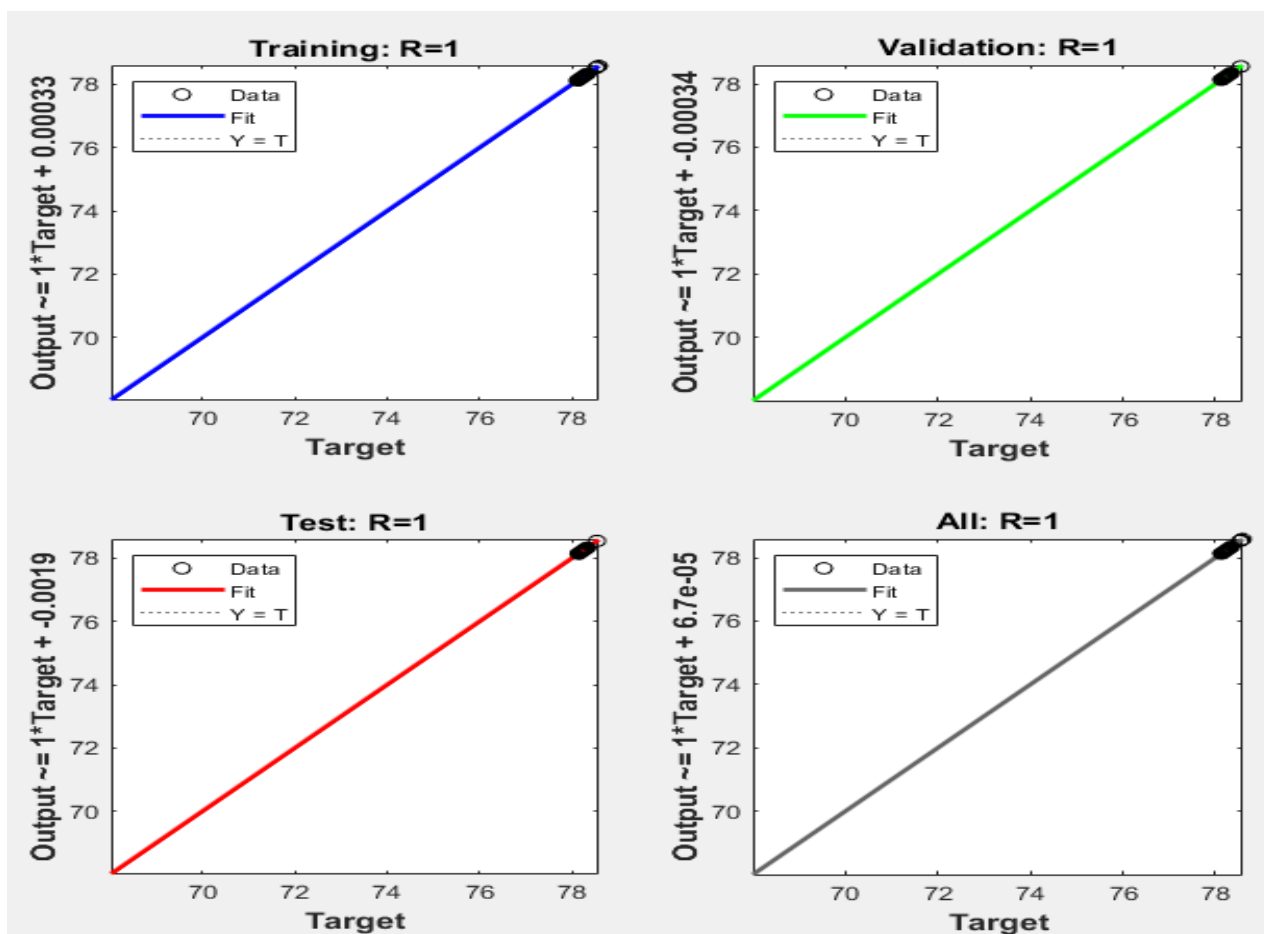


Рисунок 4.5.1. Проверка обучения

Таблица 4.5. Параметры обучения эталонной сети

Параметры обучения	
Эпоха	73 Итерации
Время итераций (сек.)	0:00:03
Производительность	0.0223
Градиент	0.203
Проверочные проверки	6

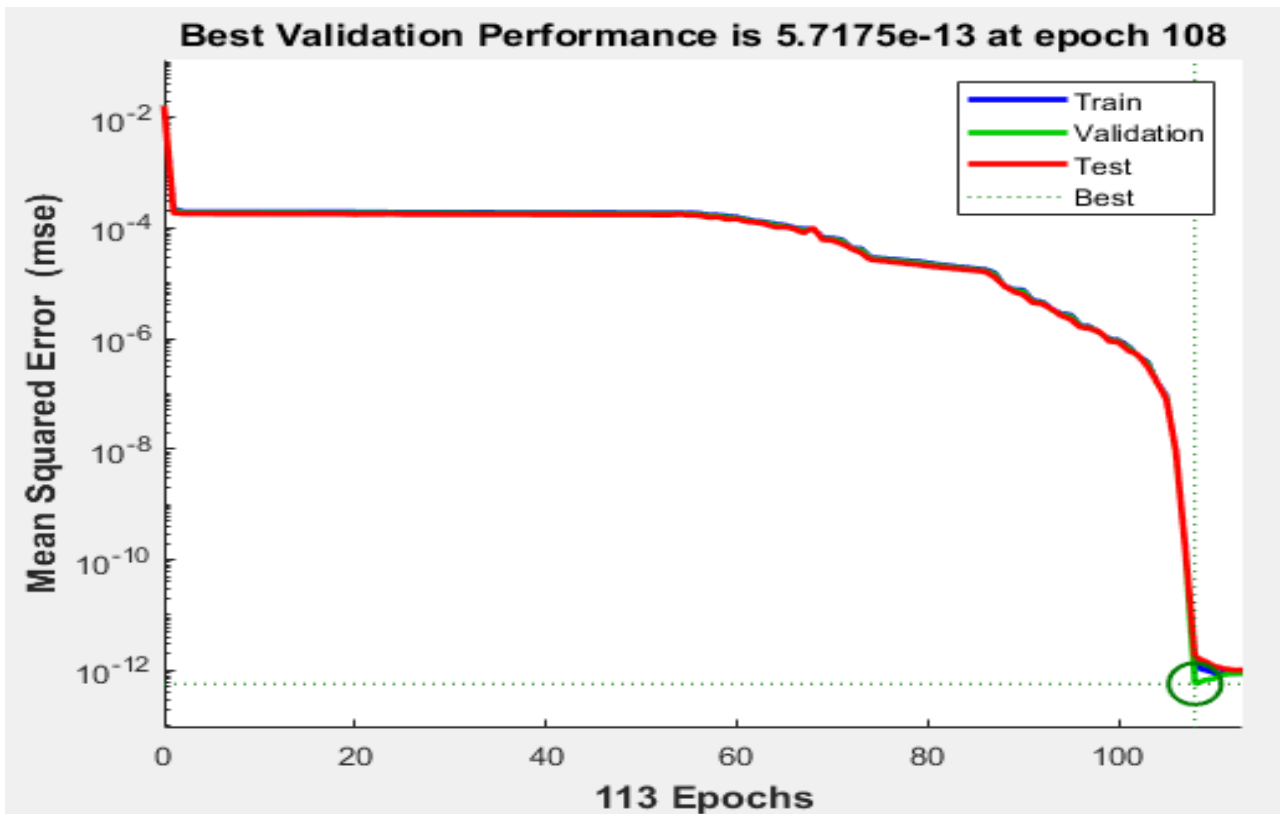


Рисунок 4.6. Проверка производительности эталонной сети, соотношение гипса к Блейну(D') с нормализованными данными

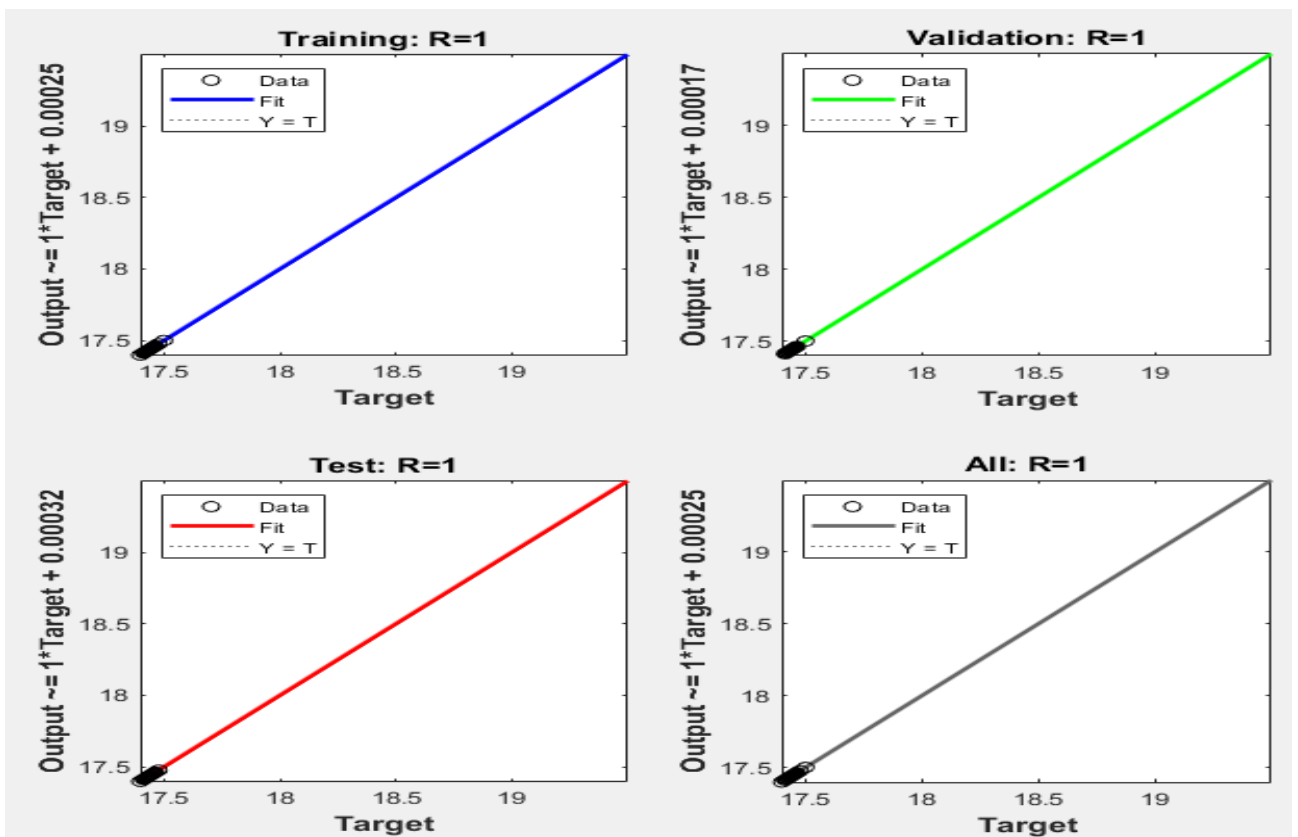


Рисунок 4.6.1. Проверка обучения

Таблица 4.6. Параметры обучения эталонной сети

Параметры обучения	
Эпоха	113 Итерации
Время итераций (сек.)	0:00:01
Производительность	0.0164
Градиент	0.0429
Проверочные проверки	5

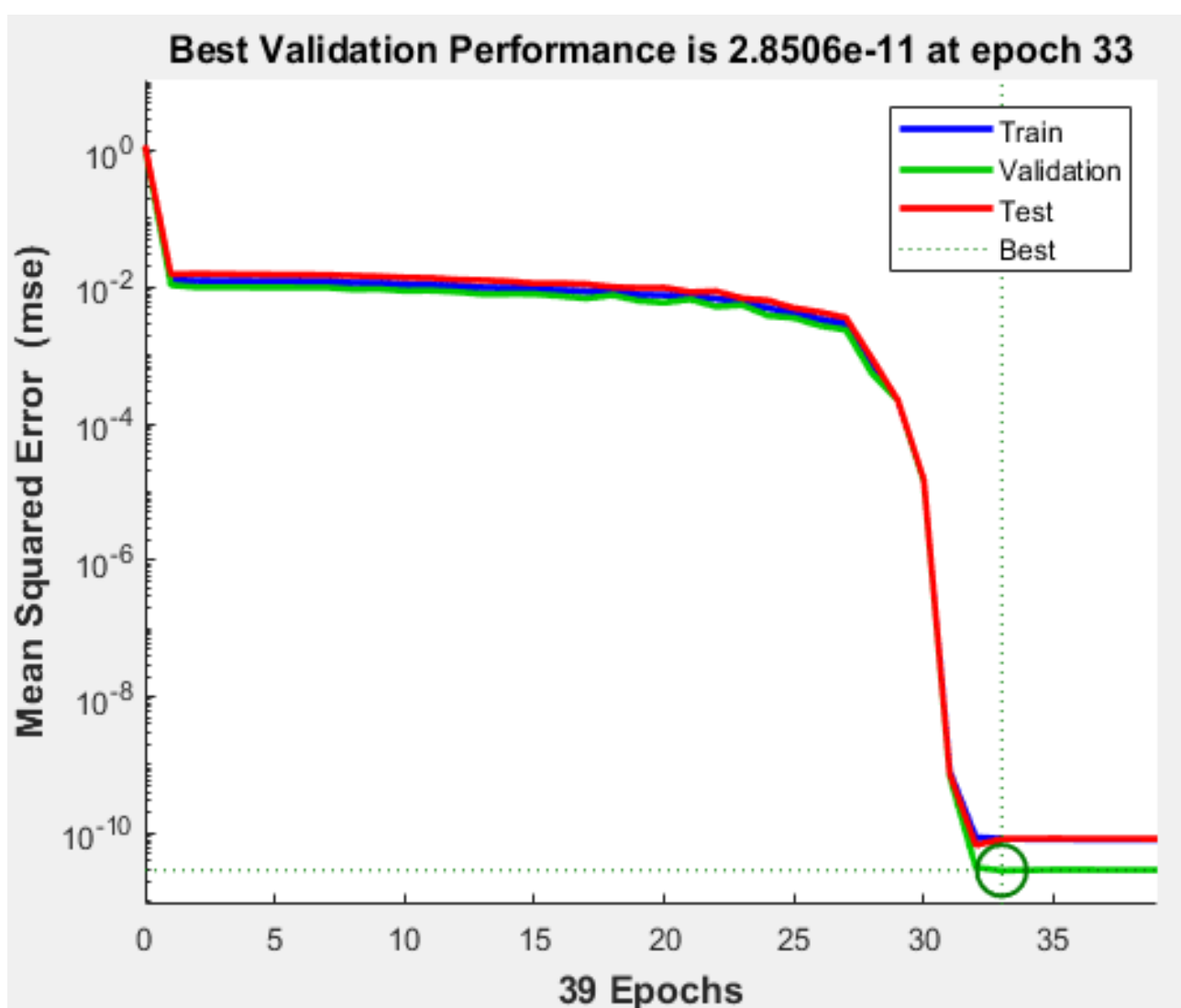


Рисунок 4.7. Проверка производительности эталонной сети, соотношение гипса к крупке

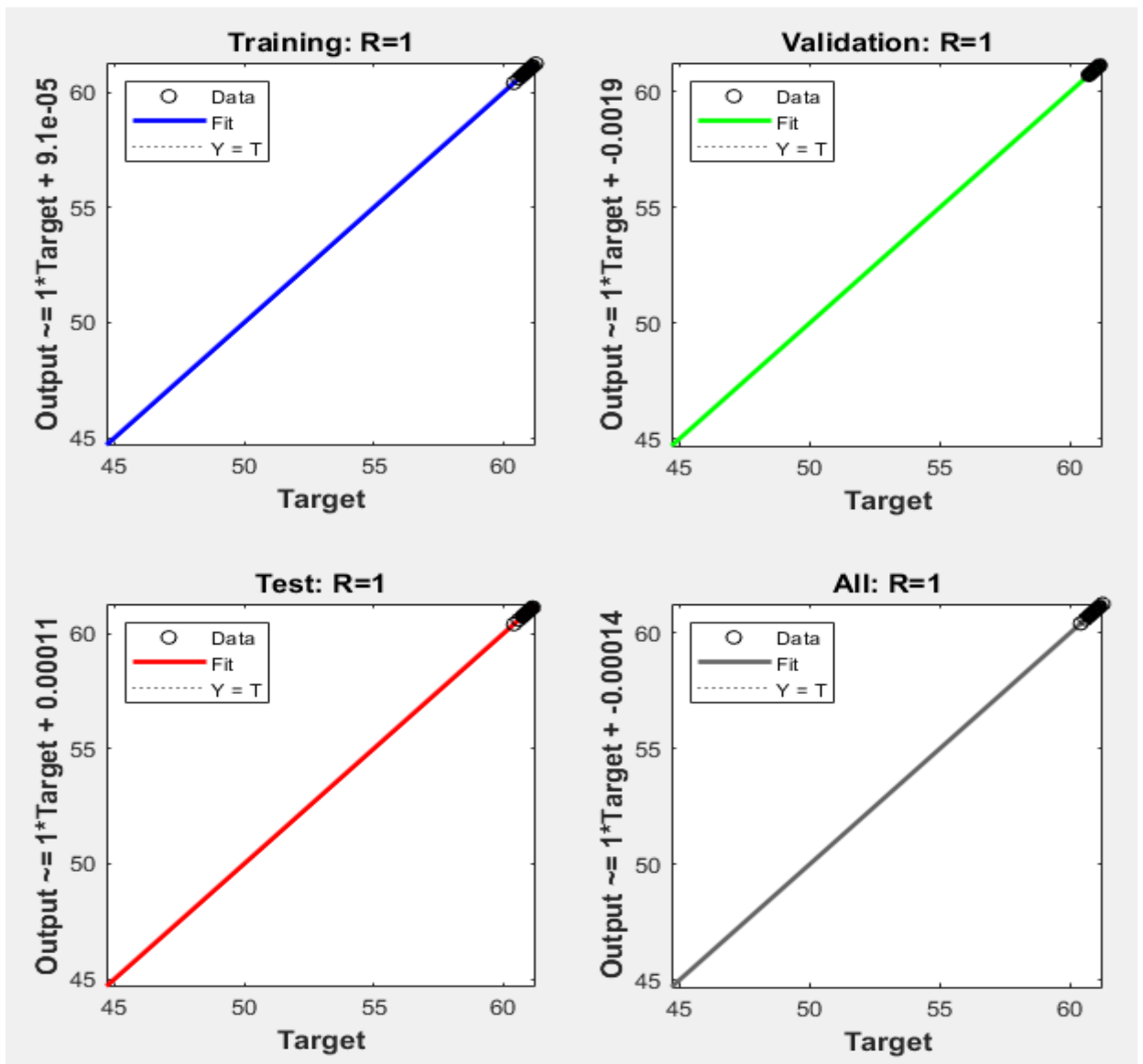


Рисунок 4.7.1. Проверка обучения

Таблица 4.7. Параметры обучения эталонной сети

Параметры обучения	
Эпоха	39 Итерации
Время итераций (сек.)	0:00:01
Производительность	1.17
Градиент	2.93
Проверочные проверки	6

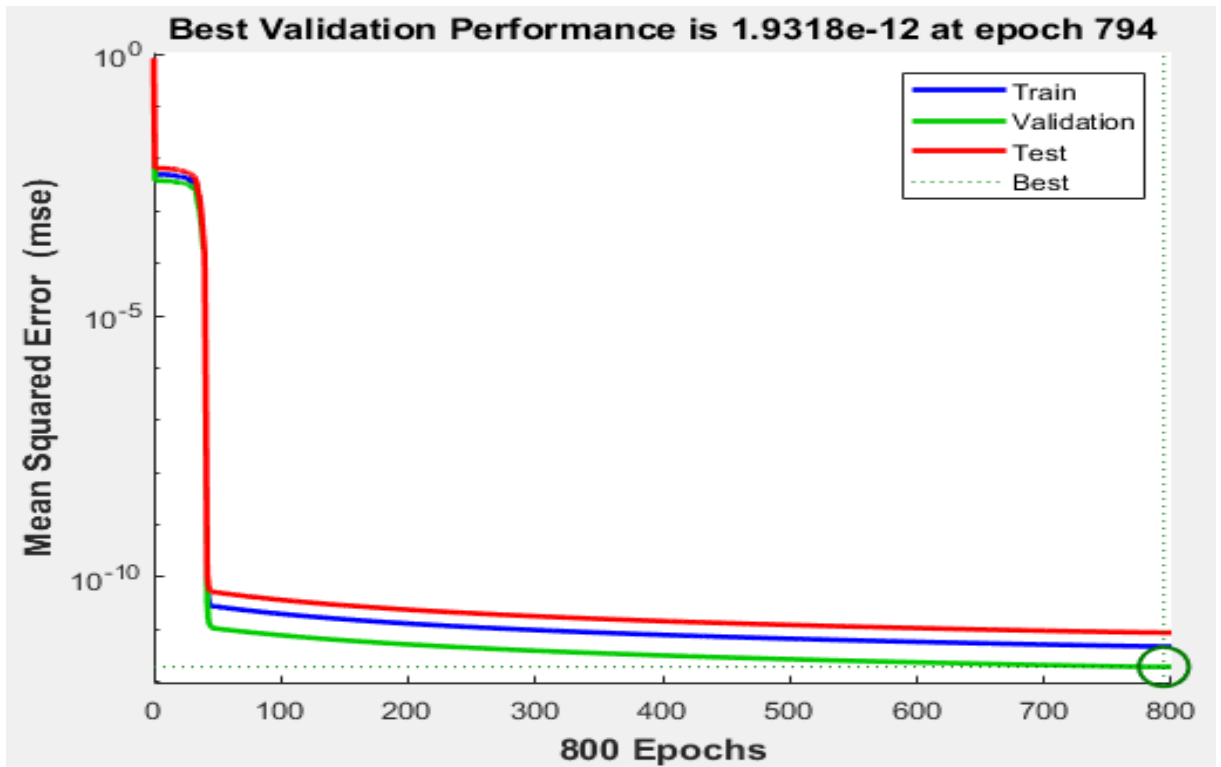


Рисунок 4.8. Проверка производительности эталонной сети, соотношение гипса к мотор мельницы

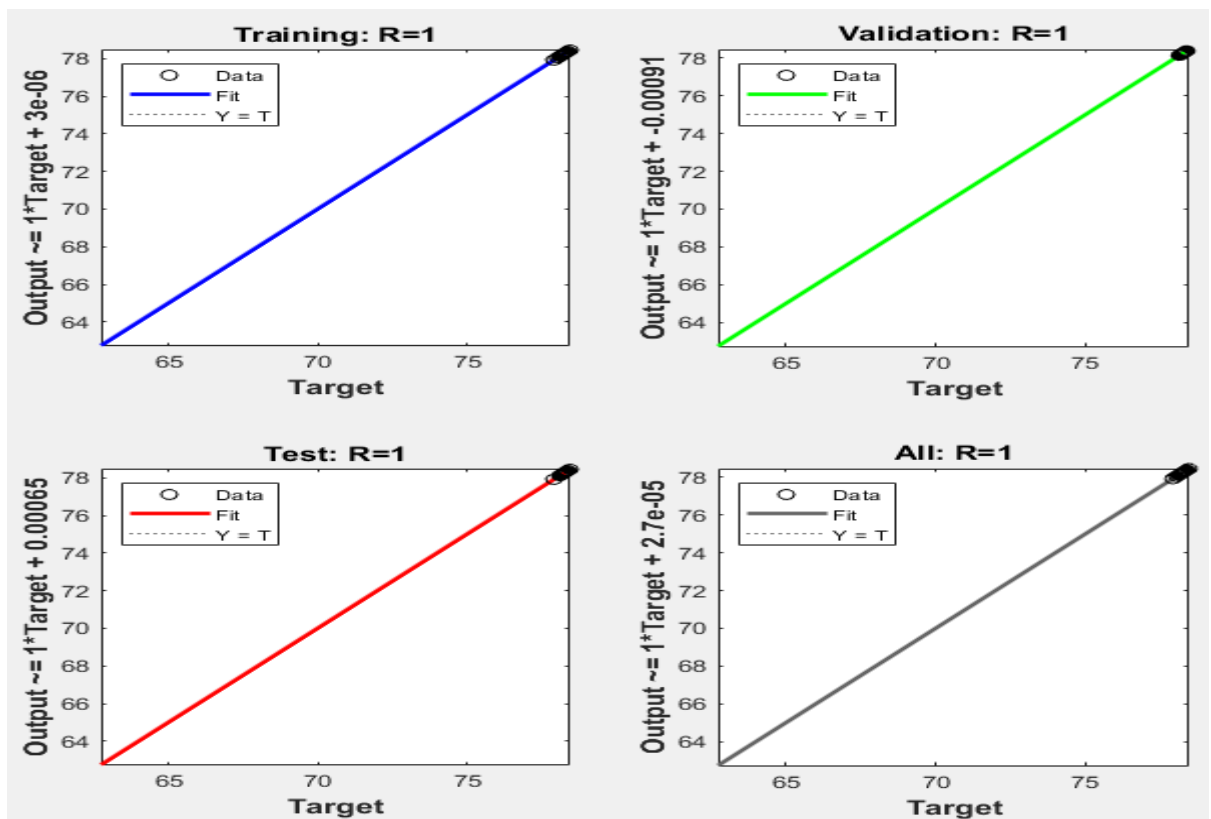


Рисунок 4.8.1. Проверка обучения



Таблица 4.8. Параметры обучения эталонной сети

Параметры обучения	
Эпоха	800 Итерации
Время итераций (сек.)	0:00:10
Производительность	0.840
Градиент	1.56
Проверочные проверки	6

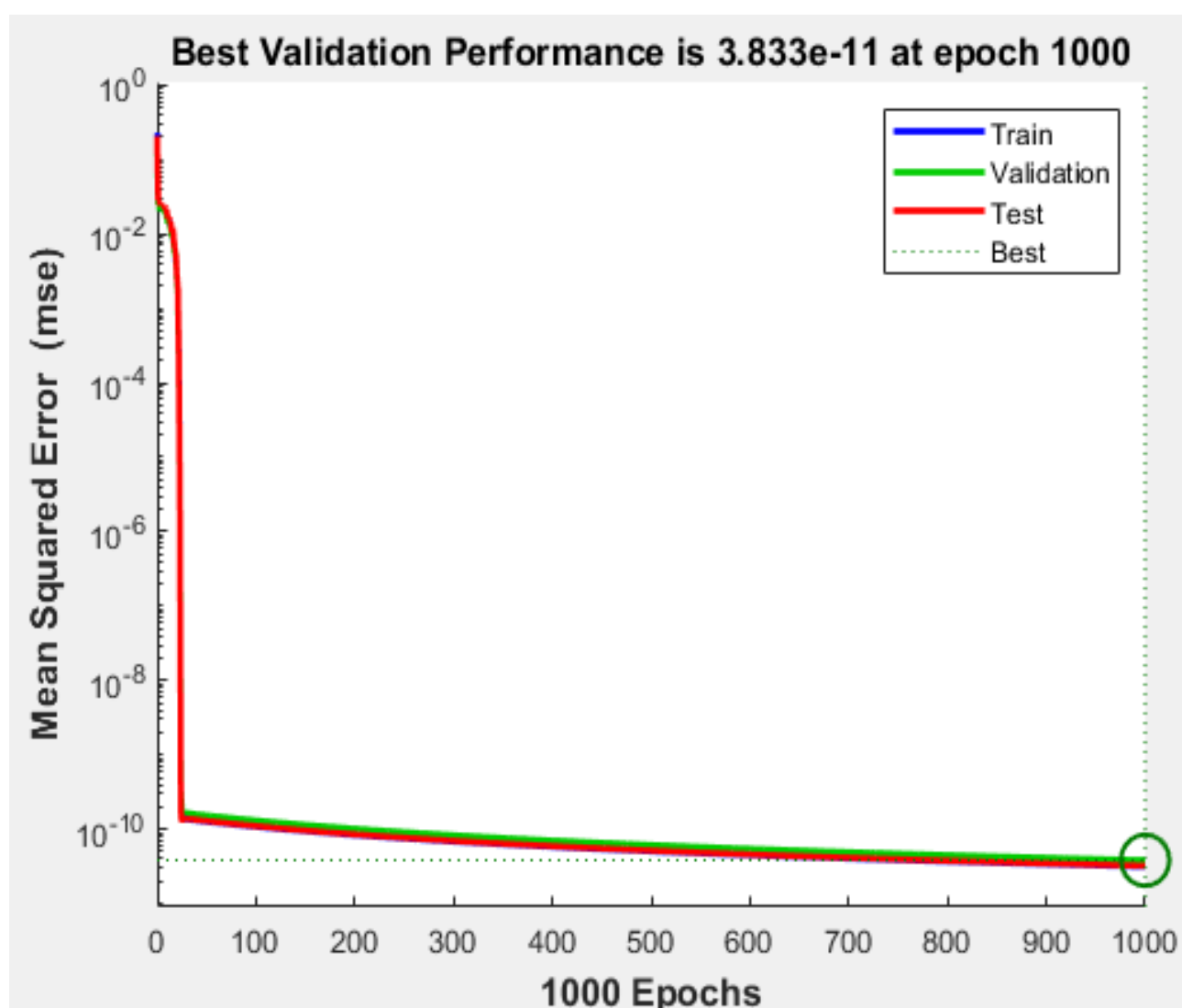


Рисунок 4.9. Проверка производительности эталонной сети, соотношение гипса к звук мельницы

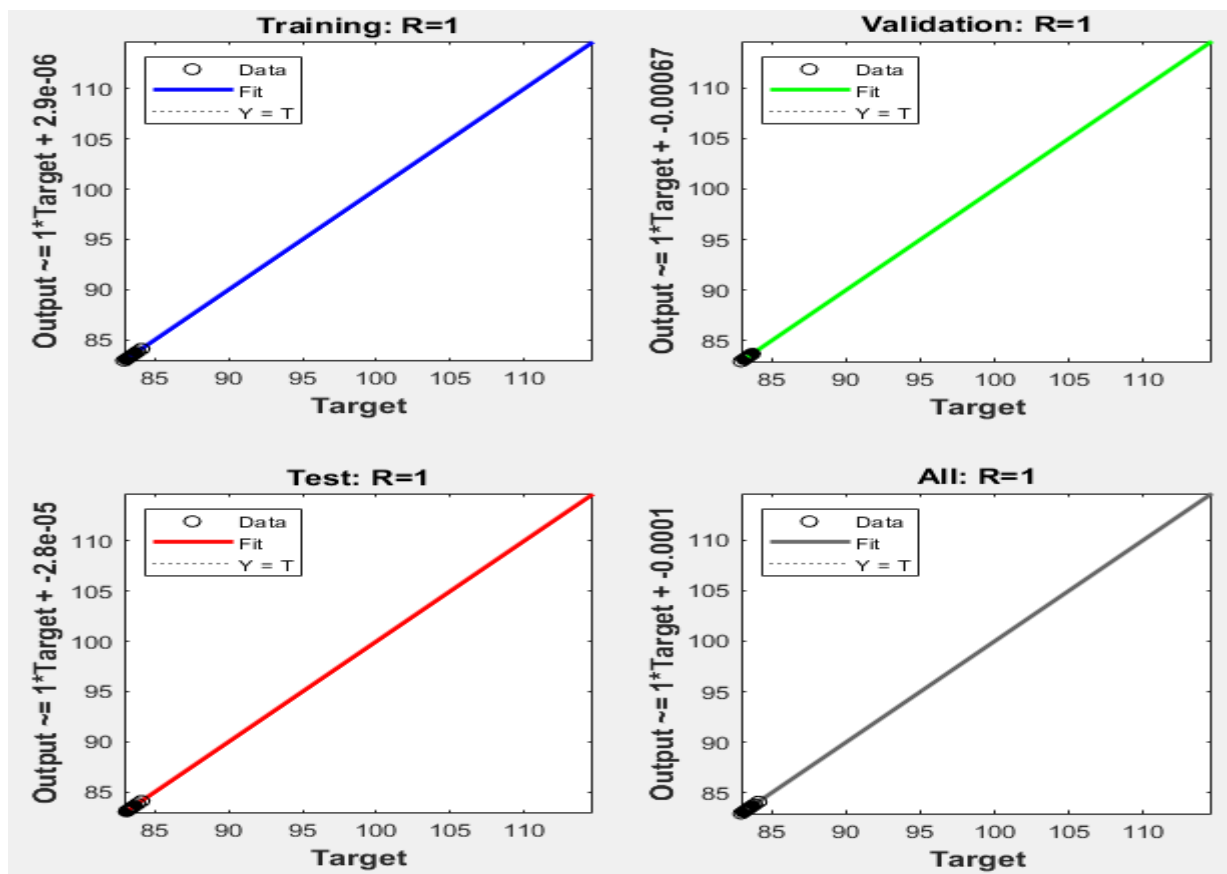


Рисунок 4.9.1. Проверка обучения

Таблица 4.9. Параметры обучения эталонной сети

Параметры обучения	
Эпоха	1000 Итерации
Время итераций (сек.)	0:00:06
Производительность	0.228
Градиент	1.68
Проверочные проверки	6

Визуально осматривая эти графики, выясняется, что некоторые модели лучше прогнозируют производительность, чем другие. Кроме того, на графике производительности проверки минимальная ошибка в наборе тестов происходит вокруг итерации наилучшей производительности проверки. Эта точка итерации

отмечена кружком. Таким образом, сеть, перенастраиваемая в этот момент, будет лучше распознавать новые экземпляры.

Нейронный сеть, должен работать в реальном времени и отражать текущее состояние процесса измельчение[2]. Данные собираются каждый час с помощью измерительных приборов и нейронный сеть использует эти данные для оценки рабочего состояния мельницы, если требуется какое-либо контрольное действие, нейросеть определяет того, какую уставку следует изменить и определяет значения изменений[2, 97]. Рассчитанные уставки в виде экранной форме предлагается оператору для дальнейшего действие таблица 4.10.

Таблица 4.10. Пример экранной формы оператора

		max		max		max		max		
		67	$\alpha$	85	$\alpha$	80	$\alpha$	17,5	$\alpha$	
		min		min		min		min		
		47	0,17	80	0,29	75	0,23	16,5	0,31	с
Гипс	Об. Сеп	Крупка		Звук. мел		Об.мот		D'		
4,1	150	59	1	82	1	80,3	0	16,8	1	0,77
4	148	68	0	83,3	1	79,1	1	16,9	1	0,83
3,8	148	69	0	81,9	1	79,3	1	16,7	1	0,83
4	142	68	0	82,7	1	79,3	1	16,5	1	0,83
4,1	138	56	1	85,4	0	75,8	1	16,9	1	0,71
4,1	135	62	1	90	0	75	1	16,7	1	0,71
3,7	132	40	0	87,7	0	76,7	1	18,5	0	0,23
3,7	132	40	0	86,9	0	81,7	0	18,2	0	0
3,8	135	56	1	84	1	80,4	0	17,6	0	0,46
3,7	135	49	1	83,4	1	80,1	0	17,2	1	0,77
3,6	135	71	0	82,1	1	79,1	1	17,5	1	0,83
3,6	135	59	1	82,9	1	79,2	1	17,3	1	1
3,6	135	55	1	83,3	1	79	1	16,8	1	1
3,6	135	72	0	86,1	0	74	0	17,1	1	0,31
3,6	135	55	1	85	1	75,9	1	17,6	0	0,69
3,7	135	53	1	85,7	0	76,1	1	17,4	1	0,71
4	135	55	1	78,3	0	80,4	0	17,2	1	0,48
4	135	54	1	81,3	1	78,5	1	17,6	0	0,69
3,8	138	47	1	80,7	1	78,8	1	17,7	0	0,69
4	135	42	0	84	1	80,4	0	17,4	1	0,6
4	135	50	1	79,3	0	78,8	1	16,9	1	0,71
3,8	133	48	1	78,1	0	79,1	1	17,3	1	0,71
3,8	133	49	1	78,3	0	79,2	1	17,4	1	0,71
3,8	133	47	1	78,1	0	79	1	17,4	1	0,71

где  $max$  и  $min$  допустимые значение каждого параметра,  $\alpha$ - весовые коэффициенты,  $S$ - целевая функция.



Рисунок 4.10. SCADA система

## Заключение

Анализ существующей практики оперативного управления режимами помола клинкера на цементных заводах показывает, что ряд операций по управлению режимами работы мельницы помола в настоящее время недостаточно автоматизированы. Это приводит к снижению эффективности технологического процесса помола клинкера. Так как процесс помола клинкера является энергоемким, то одной из центральных задач здесь стоит снижение энергоемкости процесса за счет рационального выбора текущих значений режимных параметров при оперативном управлении. Данная задача в настоящее время решена недостаточно вследствие высокой степени неопределенности данных эксплуатации и противоречивости связей базовых режимных параметров процесса помола.

Для решения указанной задачи в работе предложен метод поддержки принятия решений по оперативному управлению мельницей цементного производства при неопределенности исходных данных и противоречивых технических требований к процессу помола.

С этой целью в работе предложена процедура регуляризации постановки задачи идентификации технологического процесса помола при неопределенности данных эксплуатации. Процедура регуляризации состоит в нормализации данных за счет выявления нерегулярных данных и удаления их из обучающей выборки. Кроме того, в алгоритме решения задачи идентификации с помощью нейронной сети предложена модификация алгоритма настройки сети с введением дополнительного условия минимизации отклонения текущего решения от принятого номинала.

Разработана интерактивная процедура поддержки принятия решений по многим показателям при противоречивых технических требованиях. Процедура основывается на определении максимально-совместной системы взвешенных неравенств, представляющих текущие значения технических требований, предъявляемых к процессу помола. Апробация предложенной процедуры

принятия оперативных решений при управлении процессом помола проводилась на реальных данных эксплуатации мельницы цементного завода (г. Коркино). Расчеты показали, что снижение потребления электрической энергии составляет до 5%.

## Список литературы

1. Bhattu, J. Innovations in Portland Cement Manufacturing/ J. Bhattu, Illinious, USA: Portland Cement Association, 2011. 773-790.
2. Казаринов Л.С. Выбор решений при оперативном нейроуправлении процессом помола шихты в цементном производстве / Л.С. Казаринов, Дж.Р. Хасанов// Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2019. Т. 19. № 2. С. 128–138.
3. Celik, I. B. The effects of particle size distribution and surface area upon cement strength development/ I. B. Celik // Powder Technology, 2009. 188(3), 272–276.
4. Duda, W.H., Cement Data Book. London, UK: Macdonald & Evans London, - 1976. 130-258.
5. Bentz, D. P. Effects of cement particle size distribution on performance properties of Portland cement-based materials/ D. P. Bentz//. Cement and Concrete Research, 29(10), -1999. 1663–1671.
6. Benzer, H., Ergun, L., Lynch, A. J., Oner, M., Gunlu, A., Celik, I. B., & Aydogan, N.. Modelling cement grinding circuits. Minerals Engineering, 14(11), -2001. 1469–1482.
7. Романович А.А. Определение режима работы измельчителя с устройством для деагрегации агрессивных материалов/ А.А. Романович // Сборник научных трудов SWORLD. Одесса 2013. – Вып. 2. – Том 7. – С. 92-99.
8. Унковская Е.О. Анализ помольных агрегатов и возможности их совершенствования / Е.О. Унковская, Т.А. Косенко, Ю.А. Кучеров // Брянск. 2019. 16-22 с.
9. Гридчин А.М. Повышение эффективности дорожного строительства путем использования анизотропного сырья/ А.М. Гридчин // – М.: Изд. Ассоциация строительных вузов. 2006. -486 с.

10. Редькии Г.М. Нестационарное анизотропное математическое моделирование неоднородностей систем минерального сырья/ Г.М. Редькии // – М.: Изд-во Ассоциация строительных вузов, 2007. 499 с.
11. Романович А.А. Энергосберегающие агрегаты для измельчения материалов цементного производства с анизотропной текстурой: дис. ... доктора технических наук: 05.02.13 / Романович Алексей Алексеевич. Белгород, -2014. - 398 с.
12. Богданов В.С. Барабанные мельницы с поперечно- продольными движением мелющих тел: автореф. дис. д-ра техн. наук: 05.02.16/ Богданов Василий Степанович; Белгород. технол. инс-т строит. материалов. – Белгород.- 1986. -48 с.
13. Пироцкий В.З. Цементные мельницы: технологическая оптимизация/ В.З. Пироцкий // – СПб: Изд-во ЦПО «Информатизация образования», -1999. -145 с.
14. Griffiths A. The phenomena of Rupture und Plot in solids/ A. Griffiths //-1920. Vol 221.A 587. 163-198.
15. Kohan William, Y. North American roll crusher installation documents inerised ball efficiney// Pit and Quarry: -1988. №10. p-21-22 /192/174
16. More Than 250 Roller Mills from Polysius in Use Worldwide // World Cement, - 2003.-Vol. 34.-№4.- R. 15.
17. Sakata T. One-kill-one-mill system wt Osaka Cement / T. Sakata, K. Mataymto // Zement-Kalk - Gips. -1983. 2. -P. 75-80.
18. Schonert K. Roller press installation is the tops at Denver Conference. IEEE cement industry technical conference XXXI/ K. Schonert // World Cement. 1989. - №7.-p. 196-201
19. Андреев С. Е. Дробление, ископаемых / С.Е. Андреев, В.А. Петров, В.В. Зверович // М. : Недра. -1980. 415с.



20. Акунон В.И. Струйные мельницы. 2-е изд/ В.И. Акунон // - М.: Машиностроение -1967. -257с.
21. Баловнев В.И. Оборудование интенсифицирующего действия для измельчения дорожно– строительных материалов: обзорная информация/ В.И. Баловнев, В.А. Алферов, Л.А. Храма // - М.: ЦПИИТЭсмтроймаш, 1989. С 44.
22. Богданон В.С Трубные шаровые мельницы с внутренним ремнецом/ В.С. Богданов, В.С. Севостьянов, В.С. Платонов// и др. Цемент 1989 - 1. С. 15-16.
23. Вердиян М.А. Трубные мельницы с четким секционированием / М.Л. Вердиян, Е.Н. Головин, А.И. Лесихина и др.// Цемент. 1987. N 7. С. 20- 21.
24. Дуда В. Цемент //- М.: Стройиздат 1981. 464с.
25. Кафаров В.В. Системный анализ процессов химических технологий. Процессы измельчения и смешивания сыпучих материалов/ В.В. Кафаров, И.Н. Дөрөхон, С Ю. Арутювов// М. Наука, 1985. 40с.
26. Механическое оборудование предприятий строителных материалов, изданий и конструкций / С.Г. Силепок, А. А. Борщевский, М.Н. Горбовец и др.//- М: Машиночторониие, 1990. 306-329с.
27. Пироцкий В.3. Состояние и направление развития техники измельчения в интенсификации процессов помола цемента / В.3. Пироцкий //Обзор. Информация ВНИИЭСМ. 1973. 65 с.
28. Родин Р. А. Физическая сущность процесса разрушения крупных горных пород/ Р. А. Родин // Изв, вузов Горный журнал. 091.-№11. 12-20с.
29. Ходоков Г. С. Физика измельчения / Г. С. Ходоков// -М. Наука, 1972. - 307с.
30. Шарапов Р. Р. Научные основы создания технологических систем помола цемента на основе шаровых мельниц замкнутого цикла: диссертация ... доктора технических наук: 05.02.13 / Шарапов Рашид Ризаевич; - Белгород, 2009. - 429 с.

31. Хинце, И. О. Турбулентность, ее механизм и теория / И. О. Хинце// - М.: Физматгиз, 1963. -680 с. – ISBN
32. Шахмагон, Н. В. Помол цемента в валковых мельницах / Н. В. Шахмагон, Р. С. Ливман / Цемент. -1985.-№10.-С. 18-20.
33. Штрассер, З. Современное состояние технологии помола от фирмы KHD Humboldt Wedag AG. /З. Штрассер // Цемент и его применение. - 2002.-№1.- С. 27-30.
34. A proven competitive advantage for grinding // World cement. 2003.-Vol. 34. №4. - P. 35.
35. Ackte, W. Neues Antriebssystem mit Planetenreibe für Walzenschulmühlen /W/ Ackte //Zement-Kalk -Gips. 1983.-B. 36. – J.2.- P. 87-91.
36. Duda, W.H. Cement Data Book, Bauverlag. Wiesbaden, 1978. «Nordberg grinding mills» / W. H. Duda // Materialy firmy Nordberg- Division of Rex Chainbelt Inc, Milwaukee, 1971.
37. Krufger, W Evaluation of crushing and grinding system for three different types of raw material / W. Krufger // The New cement and, technology conference. Anaheim, California, May 21-24, 1984. -New York, 1984. P. 1-21.
38. Loesche, E. Experience with roller mill on abrasive materials / E. Loesche, Guenter // Thriebe Cement Ind. Techn. cont., Vancouver, May 23-27, 1982.- New York, 1982. - P. 1-15.
39. Mathieu, E U. Erste versuchergebnisse zur vermahlung von Zement klinker auf pendelmuhlen/ E. U. Mathieu // Zement Kalk- Gips. 1983.-B. 36.- №2. -S.62-64.
40. Merik, G. P. Influence du broyage et la mode de conservation/ G. P. Merik // 7 Congress international dela chimie des cements. - Paris, 1980. -Vol. - P. 1-41.
41. Motek, H. Vorzitzkleinerung in Kienkemahlantagen / H. Motek, F. Huwald // Zement- Kalk - Gips.-1984.- B. 37.-№11.-S. 569-576.

42. Musialik, M. Kierunki rozwoju techniki mielenia w przemyśle cementowym/ M. Musialik // Cement, wapno, gips. 1980. №11.-S.304-307
43. Onuma, E. 0-SEPA a new high- performance air-classifier / E. Onuma, T. Furukawa // World Cement.-1982.- 10.-P. 13-24
44. Patent No 3305339 DDR. Verfahren und Vorrichtung zur Kontinuerlichen druckzerk Hnerung spoden mahl -gutes/Gemer L., Zisselmar R., Kellerwessel H.- 1983.
45. Patent's 3301166, DDR. Pendeimuhle tir Uberdruchbentieb (Einblasmiihle), augn fiir Unterdruckbetrieb Geeiggnet. Neuman Esser Maschinen-Fabric/ Rucker O.- 1983.
46. Salewski, G. Grinding Technology for the Future / G. Salewski // World Cement. November.- 2003.-№11. P. 139-143.
47. Schramm, R. Verfahrenstechnische Optimierung von Kugcirohrmiihlen / R. Schramm // Tonindustrie- Zeitund und Keramische Rundschau. -1983. -№4. -S. 246-251.
48. Stroiber, W. Comminution Technology and Energy consumption. Part 1/ W. Stroiber // Cement International. - 2003.-№2.-P. 44-52.
49. Stroiber, W. Comminution Technology and Energy consumption. Part 2/ W. Stroiber // Cement International. - 2003.-№6.-P. 90-97.
50. Unger, W. Geqenuberstellung von Pendelund Schiisselmiihlen / W. Unger // Zement- Kalk- Gips.-1983.-Vol. 36.-№2. -S. 57-62.
51. Verch, H. Zementmahlung in einer Walmiihle mit ausserem materialumlauf / H. Verch, Y. Vhimarn, F. Feiqe /13 Szilikatipes Szilikattud. konferzija Budapest, 1-5 JUN, 1981/ Budapest, 1981.-S.330-336.
52. Stroiber, W. Comminution Technology and Energy consumption. Part 2/ W. Stroiber // Cement International. - 2003.-№6.-P. 90-97.

53. Unger, W. Gegenuberstellung von Pendelund Schiisselmiihlen / W. Unger // Zement- Kalk- Gips.-1983.-Vol. 36.-№2. -S. 57-62.

54. Verch, H. Zementmahlung in einer Walmiihle mit ausserem materialumlauf / H. Verch, Y. Vhimarn, F. Feiqe /13 Szilikatipes Szilikattud. konferzija Budapest, 1-5 JUN, 1981/ Budapest, 1981.-S.330-336.

55. Ведрицкий В.В. Разработка методики оценки энергетической эффективности процесса измельчения в шаровых барабанных мельницах: диссертация ... кандидата технических наук: 05.02.13/ Ведрицкий, Виталий Владимирович.

- Белгород, 2005. - 162 с.

56. J. Bhattu. Innovations in Portland Cement Manufacturing/ J. Bhattu, F. Miller and S. Kosmatka. CD-ROM: SP400, Portland Cement Association, Skokie, USA .2004.-155 pp.

57. Mehta P. Concrete: structure, properties, and materials, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, NJ. 1986. -450 pp.

58. Полещенко Д. А. Повышение эффективности управления чашевым окомкователем путем совершенствования алгоритмов экстремального регулирования : диссертация... кандидата технических наук : 05.13.06/ Полещенко Дмитрий Александрович// Старый Оскол, 2007 161 с. РГБ ОД, 61:07-5/2820.

59. Биннер Й. Технолгия измельчения и классификация шлака Й. Биннер, Р. Ассмус Е.В. Щеголяев //Цемент и его применение. 2006.- 5,- С.31-36.

60. Богданов В. С. О возможности продольных переменный трубных мельниц с наклонными перегородками / В.С. Богданов, Н.Д. Воробьев, В.С. Платонов и др. // Цемент. 1985. 12. С. 17-19.

61. Богданав В.С. Расчет энергетических параметров взаимодействия мелющих тел в шаровых барабанных мелиницах / В.С. Богданов, Н.Т. Воробьев, Н.Ю. Ельцов и др. //Цемент. 1990. - №12.-С 10-1.

62. Богданов В.С. Трубные шаровые мельницы с внутренним рециклом/ В.С. Богданов, В.С. Севостьянов, В.С. Платонов и др. //Цемент. 1989. -1. С. 15-16.
63. Шарапов, Р.Р. Современное оборудование для классификации мела/ Р. Р. Шарапов, В. Б. Герасименко // Проблемы производства и использования мела в промышленности и сельском хозяйстве: сб. докл. Между-нар. науч.-практ. конф. БелГТАСМ, Белгород, 2001 г.- Белгород, 2001. - С. 106-109.
64. Шаранов, Р. Р. Формирование зернового состава цемента в системе замкнутого цикла измельчения / Р. Р. Шарапов // Известия высших учебных заведений, Северокавказский регион. Технические науки. 2008.- 1.- С. 15-16.
65. Шарапов, Р. Р. Шаровые мельницы замкнутого цикла / Р. Р. Шарапов// Белгород: Изд-во БГТУ, 2008. 270 с.
66. Шарапов, Р. Р. Повышение производительности шаровых мельниц замкнутого цикла измельчения /Р. Р. Шаранов // Известия высших учебных заведений. Северокавказский регион. Технические науки. 2007. -№4.-С. 78-81.
67. Шарапов, Р. Р. Энергетические параметры работы шаровых мельниц замкнутого цикла измельчения /Р.Р. Шарапов // Известия высших учебных заведений. Северокавказский регион. Технические науки. 2007. -№3.-С. 82-86.
68. Шинкоренко, С. Г. Уравнение для расчета гранулометрического состава продуктов измельчения / С. Г. Шинкоренко // Обогащение руд черных металлов,- 1978. -№6.- С. 114-123.
69. Шишкин, С. Ф. Расчет процесса измельчения в замкнутом цикле / С. Ф. Шишкин, С. М. Техов // Химия и химическая технология. -1991. -Т.34. выл. 3.-С. 117-119.
70. Штрассер, З. Современное состояние технологии помола от фирмы KHD Humboldt Wedag AG. З. Штрассер //Цемент и его применение. 2002. -№1.-С. 27-30.

71. Chokhnelidze A. Analysis of Cement Production Process and Review of Control Strategies and Methods/A. Chokhnelidze, F. Lempoge, Brown-Acquaye William// Moscow -2014. P.45.

72. Aeroplex Fluidised bed opposed YRT Mills // Tiz -Fachberichte Rohstoff - Engeneering. - 1991.- Vol. 105.-№12.-P. 907-909.

73. Albeck, J. Infuence of the Process Technology on production of market oriented cement /J Albeck, G. Kirchner // Zement Kalk - Gips. 1993. - Vol. 46. -№10.-P. 615-626.

74. Beke, B. Grinding body size and hardening of cement. Mahl - korpergrosse und Zeraenterhartung, Cement Technology /B. Beke// London: March/April. 1973.

75. Bellwinkel, A. Neuzeitliche Mahlanlagen / A. Bellwinkel // Zement Kalk Gips. - 1959.-№2.-P.41-55.

76. Шарапов, Р. Р. Влияние на качественные характеристики готового продукта параметров помольной системы замкнутого цикла / Р. Р. Шарапов, д. М. Апиенко, А. Л. Уваров, А. А. Брусов// М-Белгород, 2008. -С. 115-117.

77. Шарапов, Р. Р. Влияние на процесс измельчения в шаровых мельницах замкнутого цикла измельчения аспирационного режима / Р. Р. Шарапов // Известия высших учебных заведений. Северокавказский регион. Технические науки. -2008. №2. - С. 75-77.

78. Пироцкий, В. 3. Технологическая система измельчения для высокодисперсных компонентных цементов / В. 3. Пироцкий // Цемент. -1992. - №3.- С. 85-91.

79. Пироцкий, В. 3. Технологические системы измельчения (ТСИ) клинкера: характеристики и энергоэффективность / В. 3. Пироцкий, В. С. Богданов// Цемент и его применение. -1998. -№6.-С. 12-16.

80. Пироцкий, В. 3. Технология измельчения клинкера и добавок / В. 3. Пироцкий. -М.: НИИЦемент, 1992. Вып. 103. -210 с.

81. Пироцкий, В. З. Экспериментальное исследование схем измельчения и свойств цементов с добавками / В. З. Пироцкий, Г. М. Пилова// НИИЦемент, 1986. -Вып. 90. С. 60-68.

82. Шарапов, Р. Р. PSZ новая сепарационная система / Р. Р. Шарапов, В. А. Уваров, И. А. Овчинников // Междунар. Интернет-конференция БГТУ им. В. Г. Шухова, Белгород, 2003 г. Белгор. гос. технол. ун-т. Белгород, 2003. -С. 205-207.

83. Шарапов, Р. Р. Новое оборудование для разделения мела / Р. Р. Шарапов, В. А. Уваров, И. А. Овчинников // Междунар. Интернет-конференция БГТУ им. В. Г. Шухова, Белгор. гос. технол. ун-т. - Белгород, 2003.

84. Шарапов, Р. Р. Новое оборудование для разделения порошков РР. Шарапов, В. А. Уваров, И. А. Овчинников / Энергосберег. технол. комплексы и оборуд. для произв. строит. материалов : Межвуз. сб. статей / Белгор. гос. технол. ун-т. Белгород, 2003. С. 284-288

85. Шарапов, Р. Р. Новый воздушный сепаратор для разделения порошков/ Р.Р. Шарапов, В.А. Уваров, И.А. Овчинников // Межвузовс. сб. статей Белгор, гос. технол. ак. строит. материалов: Белгород, 2002 С.

86. Шарапов, Р. Р. Восстановление матрицы классификации по экспериментальным данным / Р. Р. Шарапов, В.А. Уваров, Д.М. Анненко, П.С. Борин // Машины и аппараты для производства строительных материалов: Межвуз. сб. статей / Белгор. гос. технол. ун-т. Белгород, 2008. - С. 132-135.

87. Крыхтин, Г. С. Работа шаровой загрузки в цементной мельнице при помоле предварительно измельченного клинкера / Г. С. Крыхтин// НИИЦемент, 1960.- Вып. VII. -С. 20-24.

88. Крюков, Д. К. Футеровки шаровых мельниц / Д. К. Крюков, — М. Машиностроение, 1965. -185 с.

89. Лапшин, А.Б. Технология обеспыливания в производстве цемента / А. Б. Лапшин. -Новороссийск: Стромэкология, 1995. —150 с. -ISBN

90. Линч, А. Дже. Циклы дробления и измельчения. Моделирование, оптимизация, проектирование и управление А. Дж. Линч. - М. Недра, 1981. -343 с. – ISBN

91. Логинов, В. П. Электрические измерения механических величин /В. Н. Логинов// -М.: Энергин, 1976, — 104 с.

92. Мизонов, В. Е. Об одном подходе к описанию кинетики измельчения / В. Е. Мизонов, Е. Бернье, С. В. Абрамов, Е. В. Барочкин // Химия и химическая технология. 1999. -Т. 42.-№4.- С. 124-126.

93. Мизонов, В. Е. Аэродинамическая классификация порошков / В. Е. Мизонов, С. Г. Ушаков. М.: Химия, 1989. - 160 с. – ISBN.

94. Каманский, А. Д. Влияние аспирации на производительность цементных мельниц / А. Д. Каманский, С. Д. Кастрицкий // Цемент. –М., 1951. - № 2. - С. 14-18.

95. Михалёва, З. А. Методы и оборудование для переработки сыпучих материалов и твердых отходов / З. А. Михалёва, Д. А. Копчев, В. П. Таров //Тамбов: ГОУ ВПО ТГТУ, 2002. - 64 с.

96. Казаринов, Л.С. Оптимизации степени загрузки мельницы при производстве цемента / Л.С. Казаринов, Дж.Р. Хасанов // Вестник ПНИПУ. Серия «Электротехника, информационные технологии, системы управления». - 2019.- Т. 30, № 2. – С. 196-210.

97. Казаринов Л.С. Интерактивный метод нейроруления процессом измельчения шихты в цементном производстве/ Л.С. Казаринов, Дж.Р. Хасанов // Вестник Воронежского государственного технического университета. Серия «Информатика, вычислительная техника и управление». 2019. Т. 15. № 6. С.46-53.

98. С. Ciganek. Two-parameter control system for a cement grinding process/ С. Ciganek, K. Kreysa// Translat. Zement-Kalk-Gips. 1991. 202–206.



99. V. Van Breusegem. An industrial application of multivariable linear quadratic control to a cement mill circuit/ V. Van Breusegem, L. Chen, G. Bastin, V. Wertz, V. Werbrouck, C. De. Pierpont// IEEE Trans. Ind. Appl. 32. 1996. 670–677.

100. V. Van Breusegem. Multivariable linear quadratic control of a cement mill: an industrial application/ V. Van Breusegem, L. Chen, V. Werbrouck, G. Bastin, V. Wertz// Contr. Eng. Practice 2. 1994. 605–611.

101. Boulvin M. Modeling, simulation and evaluation of control loops for a cement grinding process/ M. Boulvin, C. Renotte, A. Vande Wouwer, M. Remy, S. Tarasiewicz, P. Cesar// in: Proceedings of European Control Conference (CD-ROM), Brussels, Belgium, July 1997, Paper TH-E-H4.

102. Исмоилов М.И. Проблемы автоматизации предприятия по производству цемента / М.И. Исмоилов, Ф.С. Пиров // Методы и модели прикладной информатики: межвуз сб. науч. тр. МАДИ(ГТУ). М., 2009. с. 116–119.

103. Magni L. Multivariable nonlinear predictive control of cement mills/ L. Magni, G. Bastin, V. Wertz// IEEE Trans. Contr. Syst. Technol. 7. 1999. 502–508.

104. Grogard F. Robust stabilization of a nonlinear cement mill model/ F. Grogard, F. Jadot, L. Magni, G. Bastin, R. Sepulchre, V. Wertz// IEEE Trans. Autom. Contr. 46 (4) 2001. 618–623.

105. Hadizadeh M. A plant-scale validated MATLAB-based fuzzy expert system to control SAG mill circuits/ M. Hadizadeh, A. Farzanegan, M. Noaparast. // Journal of Process Control 70 2018. 1–11.

106. Kandasamy W.B.V. Control of grinding circuit in cement industries using fuzzy expert system/ W.B.V. Kandasamy, N.R. Neelakantan, S. Ramathilagam// Int. Conf. Anal. Discret. Struct. 2002.156-163.

107. Ие Наунг. Модель нейрорегулятора для управления синхронным двигателем с постоянными магнитами/ Ие Наунг, Щагин Анатолии Васильевич, Зо Мин Кхайнг// Москва- 2018. 59-66 с.

108. Ramasamy M. Control of ball mill grinding circuit using model predictive control scheme/ M. Ramasamy, S.S. Narayanan, C.D.P. Rao// J. Process Control 15 2005. 273–283.

109. Subbaraj D.P. Evolutionary design of intelligent controller for a cement mill process/ D.P. Subbaraj, P.S.G. Anand// *Int. J. Comput. Appl.* 1 2010. 111–120.
110. Chen X. An improved control strategy for ball Mill grinding circuits/ X. Chen, J. Yang, S. Li, Q. Li// in: *LSMS/ICSEE 2010, Part I, LNCS 6328, 2010*, pp. 409–415.
111. Chai T. Multiple models and neural networks based decoupling control of ball mill coal-pulverizing systems/ T. Chai, L. Zhai, H. Yue// *J. Process Control* 21 2011. 351–366.
112. Zhou P. Intelligence-based supervisory control for optimal operation of a DCS-controlled grinding system/ P. Zhou, T. Chai, J. Sun// *IEEE Trans. Control Syst. Technol.* 21 2013. 162–175.
113. Costea C.R. Control system architecture for a cement mill based on fuzzy logic/ C.R. Costea, H.M. Silaghi, D. Zmaranda, M.A. Silaghi// *Int. J. Comput. Commun. Control.* 10. 2015. 165–173.