

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования «Южно-Уральский государственный университет  
(национальный исследовательский университет)»

На правах рукописи



Хасанов Джасурджон Рустамджонович

## ЭФФЕКТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ МЕЛЬНИЦЕЙ ЦЕМЕНТНОГО ПРОИЗВОДСТВА В ПРОТИВОРЕЧИВЫХ УСЛОВИЯХ

05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и  
производствами (промышленность)

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук, профессор  
Казаринов Лев Сергеевич

Челябинск – 2021

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ .....	5
ВВЕДЕНИЕ .....	6
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ ПОМОЛА .....	13
1.1. Технология измельчения в цементной промышленности.....	13
1.2. Этапы производства цемента и основное оборудование цементного завода .....	13
1.2.1. Измельчение сырья.....	13
1.2.2. Обжиг клинкера.....	15
1.2.3. Финишное измельчение .....	16
1.3. Обзор основных научно - технических достижений в области тонкого измельчения материалов.....	17
1.4. Повышение эффективности измельчения в шаровой мельнице замкнутого цикла .....	19
1.5. Замкнутый цикл измельчения.....	20
1.5.1. Процесс измельчения в замкнутом контуре .....	21
1.6. Классификация .....	24
1.7. Конфигурация и эксплуатация сепаратора высокой эффективности....	27
1.8. Управление замкнутым контуром измельчения .....	30
1.9. Основная цель и задачи исследований в данной работе .....	36
ГЛАВА 2. ОПЕРАТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ ПОМОЛА ШИХТЫ В ЦЕМЕНТНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ ПРИ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ.....	38

2.1. Процедура идентификации характеристик процесса помола клинкера на основе оптимальной регуляризации задачи.....	38
2.2. Построение и обучение нейронных сетей.....	46
2.3. Оперативное нейроуправление контуром измельчения шихты .....	49
2.4. Исследование системы управления замкнутого контура измельчения..	51
2.4.1. Сбор и анализ данных .....	51
2.4.2. Контур измельчения на опытном заводе.....	51
2.5. Настройка нейронных сети на нормализованных генеральных данных	61
2.7. Процедура принятия оперативных решений на основе метода ограничений для задачи рациональной загрузки мельницы.....	66
Выводы к главе 2.....	73
<b>ГЛАВА 3. АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ШИХТЫ.....</b>	<b>74</b>
3.1. Процесс измельчения, как объект управления.....	74
3.2. Уровни АСУ ТП мельницы.....	75
3.2.1 Уровень технологического процесса.....	76
3.2.2. Контроллерный уровень.....	78
3.2.3. Уровень человеко-машинного интерфейса.....	79
3.3. Мониторинг процесса измельчения .....	79
3.4. Автоматизированное рабочее место оператора.....	82
3.5. Процедура принятия решений при оперативном управлении .....	83
Выводы к главе 3.....	85
<b>ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЗАМКНУТОГО КОНТУРА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ .....</b>	<b>86</b>

4.1. Сбор и анализ данных .....	86
4.2. Результаты исследований с использованием моделей в виде нейронной сети.....	86
4.2.1. Построение и обучение нейронной сети.....	87
4.3. Реализация оперативного нейроуправления помолом клинкера мельницей в производстве цемента по данным ООО «Дюккерхофф Коркино Цемент» и ООО «Цементный завод имени Б. Самадова» г. Исфара. ....	94
Выводы к главе 4.....	97
<b>Общие выводы .....</b>	<b>98</b>
<b>Список литературы .....</b>	<b>99</b>
<b>Приложение А. Результаты внедрения научной работы на ООО «Цементный завод имени Б. Самадова» г. Исфара .....</b>	<b>113</b>
<b>Приложение Б. Результаты внедрения научной работы в учебный процесс Таджикского технического университета имени академика М.С. Осими.....</b>	<b>115</b>

## ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

РФ – Российская Федерация

АСУ – автоматизированная система управления

ВЭС – высокоэффективный сепаратор

SMC – sliding mode control

ЛПР – лицо, принимающее решения

НЭ – нейронный элемент

АСУ ТП – автоматизированная система управления технологическим процессом

АРМ – автоматизированное рабочее место

SCADA – supervisory control and data acquisition

АСППР – Автоматизированная система поддержки принятия решений

ВЦН – взвешенные целевые неравенства

ВЦО – взвешенные целевые ограничения

ТУ – технические условия

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы исследования.** Цементная промышленность является одной из наиболее динамичных отраслей экономики РФ. При этом компании, которые занимаются производством цемента, уделяют большое внимание снижению себестоимости производства.

В этой связи в условиях постоянного роста тарифов на энергоносители актуальной задачей является разработка научно – обоснованных систем эффективного управления, которые способны улучшить энергетические и качественные показатели при производстве цемента.

Так, производство цемента является энергоёмким процессом [1], требующим больших энергозатрат в размере 850-1100 кВт·ч/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 кВт·ч/т. Процесс дробления и измельчения цементного сырья и готового цемента составляет 70% от общей потребляемой 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 обладают 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, которые передают входную энергию в неконцентрированный слой частиц. Многочисленные удары необходимы для эффективного разрушения частиц клинкера.

В связи с высокой потребностью в энергии и низкой энергоэффективностью шаровые мельницы для измельчения цемента в цементной промышленности постоянно ищут новые способы снижения потребления энергии за счет улучшения конструкции мельницы и конфигурации контура управления.

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

При измельчении цемента в шаровых мельницах учитываются различные параметры, такие как: подача материала, скорость вращения мельницы, скорость сепаратора, повторный помол (крупка), звук мельницы, тонкость готового продукта, удельный расход электроэнергии и др.

Потребление энергии тесно связано с обеспечением качественных показателей выходного продукта – цемента. Такими показателями являются: тонкость помола (Блейн), крупка, подача гипса и др. Так, чем тоньше помол, тем больше затраты электрической энергии. Кроме того, оператор мельницы в процессе помола должен поддерживать в рамках технологических допусков подачу гипса, обороты сепаратора, крупку, удельный расход электроэнергии, звук мельницы и скорость вращения двигателя мельницы.

В результате оперативное управление мельницей является задачей исследования операций, которая должна решаться по множеству показателей в противоречивых условиях. Улучшение одного показателя приводит к ухудшению

других показателей. Для решения такой задачи использовать свертку критериев качества не целесообразно, так как теряется технический смысл показателей. В результате возникает проблема в оперативном режиме отслеживать индивидуально каждый показатель в реальном времени.

Другой проблемой является задача идентификации характеристик мельницы в реальном времени. Коэффициент передачи мельницы нелинейно зависит от размера частиц размалываемого материала, поэтому возникает проблема построения адекватной модели мельницы, которая с одной стороны должна настраиваться по усредненным характеристикам, с другой стороны она должна отслеживать текущие характеристики мельницы. Построение такой модели представляет собой сложную проблему. В литературе в настоящее время считается перспективным использование нейронных сетей. Однако здесь возникает проблема оперативного учета характеристик процесса, которые быстро изменяются в динамике помола.

При выполнении диссертационной работы были рассмотрены научные труды отечественных и зарубежных ученых, в работах которых отражены вопросы энергоэффективности и качества при измельчении шихты, а также вопросы идентификации процесса помола в цементном производстве. Здесь следует отметить работы А.А. Романовича, С. Зиннера, Р.Р. Шарапов, 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, Greg Martin, A.V. Topalov и другие.

Международный обзор цемента показал, что в мире наблюдается линейный рост спроса на цемент, и в ближайшие годы ожидается его усиление. Следовательно, исследователи и специалисты должны уделять особое внимание к оптимизации энергопотребления процессов для заданных технических характеристик продукта. В этих условиях задача снижения потребления электрической энергии приходит противоречие с показателями качества конечной продукции с одной стороны, с другой стороны снижает себестоимость и улучшает экологические показатели, что приводит к противоречивым



постановкам задач оперативного управления. В этой связи разработка методов и алгоритмов оперативного управления процессами помола в противоречивых условиях с учетом требований, направленных на снижение энергозатрат в шаровых мельницах замкнутого цикла, является актуальной задачей.

**Объектом исследования** является шаровая мельница цементного производства.

**Предметами исследования** являются модели, алгоритмы и методы управления процессом помола клинкера в замкнутом контуре измельчения шаровой мельницы цементного производства в противоречивых условиях.

**Целью данной диссертационной работы** является повышение эффективности процессов измельчения цементного клинкера при повышенных требованиях к качеству помола и энергоемкости за счет организации оперативного управления технологическим процессом с использованием специализированной искусственной нейронной сети и автоматизации принятия решений в противоречивых условиях.

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

1. Анализ эффективности технологических процессов измельчения клинкера в шаровых мельницах цементного производства.
2. Разработка метода нормализации генеральной совокупности данных на технологическом процессе помола клинкера цементного производства на основе выделения максимально совместных подсистем данных.
3. Разработка процедуры регуляризации задачи идентификации технологического процесса помола клинкера цементного производства на основе оптимального согласования решений генеральной нейросетевой модели и локальных моделей процесса при противоречивых исходных данных.
4. Разработка интерактивной процедуры принятия эффективных решений на основе оптимального согласования значений показателей процесса помола при противоречивых условиях.

5. Сбор и анализ экспериментальных данных на опытных заводах ООО «Дюккерхофф Коркино Цемент» и ООО «Цементный завод имени Б. Самадова» г. Исфара.
6. На практических примерах апробация разработанной системы поддержки принятия решения в задачах оперативного управления измельчения цементного клинкера в шаровых мельницах замкнутого цикла.

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

**Научная новизна** работы заключается в следующем:

1. Предложена нормализация генеральной совокупности данных о технологическом процессе помола клинкера цементного производства на основе выделения максимально совместных подсистем данных.
2. Предложена процедура регуляризации задачи идентификации технологического процесса помола клинкера цементного производства на основе оптимального согласования решений генеральной нейросетевой модели и локальных моделей процесса при противоречивых исходных данных.
3. Предложена интерактивная процедура принятия эффективных решений на основе оптимального согласования значений показателей процесса помола при противоречивых условиях.
4. Алгоритмы автоматизированной системы поддержки принятия решений по оперативному управлению мельницей цементного производства.

**Теоретическая значимость.** В работе предлагается методика построения автоматизированной системы поддержки принятия решения в задачах оперативного управления процессом измельчения клинкера, которая позволяет принимать эффективные решения в противоречивых постановка задач управление при неопределённости характеристик.

**Практическая значимость** работы заключается в повышении эффективности процесса помола клинкера при заданных показателях качества за счет применения разработанной искусственной нейронной сети для оперативной идентификации процесса помола при неопределенности данных и специального интерактивного алгоритма принятия решений по оперативному управлению в противоречивых условиях.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Нормализация генеральной совокупности данных о технологическом процессе помола клинкера цементного производства на основе выделения максимально совместных подсистем данных.
2. Процедура регуляризации задачи идентификации технологического процесса помола клинкера цементного производства на основе оптимального согласования решений генеральной нейросетевой модели и локальных моделей процесса при противоречивых исходных данных.
3. Интерактивная процедура принятия эффективных решений на основе оптимального согласования значений показателей процесса помола при противоречивых условиях.
4. Алгоритмы автоматизированной системы поддержки принятия решений по оперативному управлению мельницей цементного производства.

**Достоверность результатов исследования** обеспечивается корректностью и непротиворечивостью результатов работы положениям теории АСУ, методам искусственных нейронных сетей. Выводы и рекомендации соответствуют современным требованиям и подтверждаются положительными результатами промышленных испытаний в условиях реального производства на ООО «Дюккерхофф Коркино Цемент» и ООО «Цементный завод имени Б. Самадова» г. Исфара.

**Апробация работы.** Основные положения и результаты диссертационной работы были представлены и обсуждены на международных научно-технических конференциях: «International Russian Automation Conference, RusAutoCon. 2019» в

городе Сочи, «IEEE Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research & Practice (PEAMI)», в г. Магнитогорске и «Proceedings of the Scientific - Practical International Conference of Students, Magisters, Phd Students and Young Scientists «Muhandis-2019»» в городе Душанбе.

**Публикации.** По материалам диссертации опубликовано 6 работ, среди них 3 в журналах, рекомендованных ВАК России и 2 статьи в международных журналах, индексируемых в базе данных Scopus и Web of Science.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав и заключения, изложенных на (97) страницах основного машинописного текста, включающего (48) рисунков, (7) таблиц и (135) наименований используемой литературы. Общий объем диссертации (116). Диссертационная работа выполнена на кафедре автоматике и управления Южно-Уральского государственного университета (национальный исследовательский университет).

**В первой главе** проведен обзор литературы по достижениям науки в области мировой цементной промышленности, современным технологиям, используемым в процессе помола, и ключевым факторам, связанным с энергоэффективностью управления и качеством цемента.

**Во второй главе** описано применение искусственных нейронных сетей для управления контуром измельчения клинкера в шаровых мельницах замкнутого цикла.

**В третьей главе** представлена автоматизированная система управления технологическим процессом измельчения шихты.

**В четвертой главе** приведено экспериментальное исследование системы управления замкнутого контура измельчения.

Автор выражает глубокую благодарность научному руководителю, доктору технических наук, профессору Казаринову Льву Сергеевичу за помощь в работе над диссертацией и участие в выполнении отдельных этапов работы.

# ГЛАВА 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 при выполнении работ при модернизации. 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 достигнуто снижение потребления электрической энергии в диапазонах от 1 кВт·ч до 2 кВт·ч на тонну.

## 1.2. Этапы производства цемента и основное оборудование цементного завода

Ниже, для обзора энергопотребления и функциональных характеристик процесса производства цемента, этот процесс делится на различные функциональные этапы, на которых используется специальное оборудование.

### 1.2.1. 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.

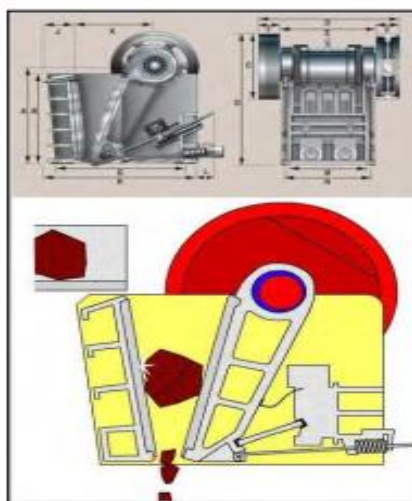
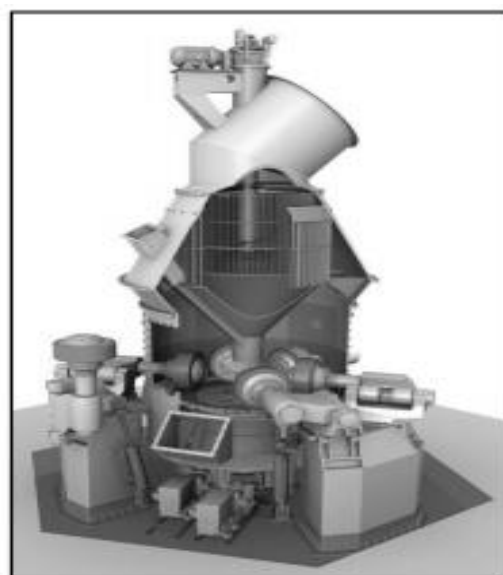


Рисунок 1.1. Работа щековой дробилки.

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 производства цемента.

### 1.2.2. 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 1300 до 1550 °С. Эта температура спекания создает новый продукт, который определяется как клинкер, показанный на рисунке 1.3.

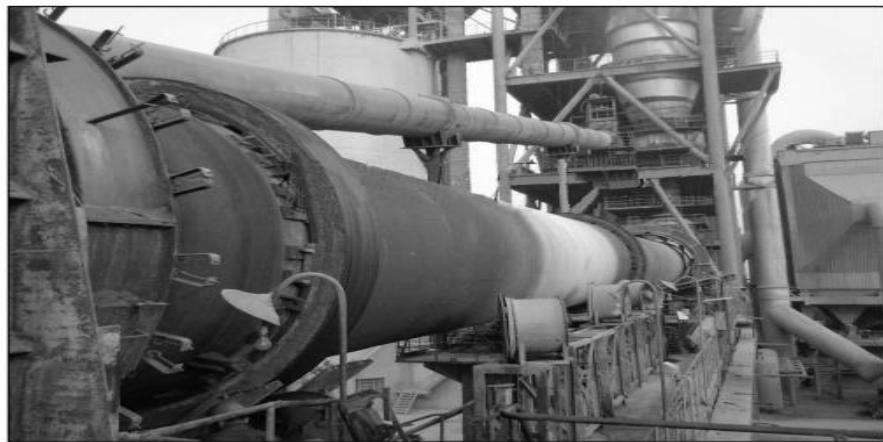


Рисунок 1.3. Вращающаяся печь для цементной промышленности

Несмотря на то, что печь является крупнейшей движущейся частью оборудования на цементном заводе, она использует только 25% энергии завода [2].



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

### 1.2.3. Финишное измельчение

Конечный цементный продукт обычно получают в результате измельчения клинкера, 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].

На протяжении более 100 лет в качестве основного оборудования для измельчения готового цемента используются шаровые мельницы. Шаровые или трубчатые мельницы построены до 6,0 м в диаметре и до 20 м в длину. Из-за высокой эксплуатационной надежности и доступности шаровые мельницы остаются наиболее распространенным чистовым блоком на цементных заводах [4]. В производстве портландцемента обычно используют двухкамерные шаровые мельницы, как показано на рисунке 1.5. На первой камере происходит грубое измельчение, а на второй камере получается материал мелкого измельчения.



Рисунок 1.5. Трубчатая шаровая мельница с двумя отсеками. А-отсек 01, В-отсек 01/02 и разделительная диафрагма [4].



Управление шаровой мельницей с замкнутым контуром осуществляется эффективным классификатором на основе сепаратора. Это особенно верно, когда происходит фаза, в которой комбинации имеют низкий рабочий индекс связующих или измельчающих материалов, которые склонны к агломерации из-за эффекта измельчения. Масса циркуляции колеблется от 100% до 600% в зависимости от требуемой тонкости продукта, в зависимости от декомпозиции нового сырья, и достаточной прочности цемента [4 - 6].

### 1.3. Обзор основных научно - технических достижений в области тонкого измельчения материалов

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

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

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

Поэтому совершенствование управления технологического процесса тонкого помола с целью снижения электроёмкости процесса является актуальным [8].

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 [7-13].

Вопросами разработки нового и повышения эффективности существующего помольного оборудования занимались многие ученые и практики, как у нас в стране, так и за рубежом [7,14-28].

В развитых странах помол цемента в основном производится в барабанных шаровых мельницах с замкнутым контуром. Семейство современных барабанных шаровых мельниц, производимых иностранными компаниями Японии, Германии, Чехии, Соединенных Штатов и Дании, представлено различными параметрами, включая более 60 размеров [29].

Шарапов Р. Р. [30] в своей работе приводит, что применение вертикальной мельницы в двухстадийном измельчении снижает удельный расход электроэнергии на 19%. Эта установка работала перед шаровой мельницей. Вертикальная мельница адаптируется для измельчения цементного клинкера с производительностью до 300 т/ч [30 - 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 должен 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 [31].

Наиболее типичным примером в отечественной цементной промышленности являются барабанные шаровые мельницы, используемые как для одноступенчатого, так и для двухступенчатого помола в открытых и

замкнутых циклах. Таким образом, исследования этой мельницы для управления и оптимизации процессов измельчения различных цементов, в определенных условиях существующих и спроектированных заводов, несомненно, является реальной проблемой для цементной промышленности [55].

#### 1.4. Повышение эффективности измельчения в шаровой мельнице замкнутого цикла

Окончательное измельчение цемента является наиболее энергоемкой частью производственного процесса, то есть измельчение цементного клинкера, потребляющего почти 40% электрической энергии [56-57]. На среднем энергопотреблении станции (основные оборудование для производства цемента) 110 кВт•ч/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.

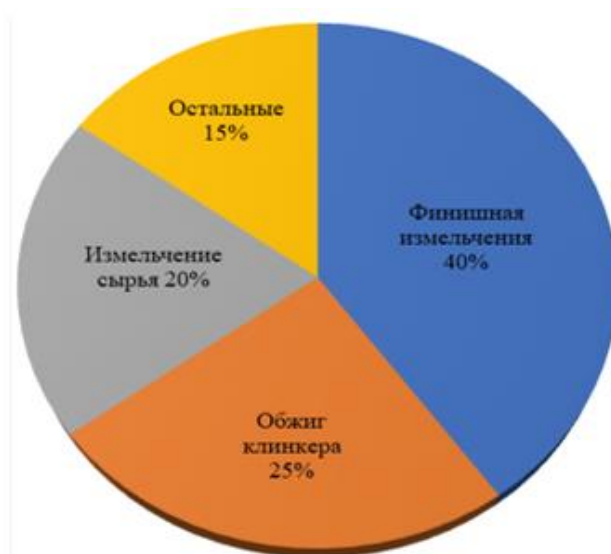


Рисунок. 1.6. Распределение энергии среди оборудования для производства цемента.

Как уже указывалось ранее, несмотря на то, что печь является крупнейшей движущейся частью оборудования на цементном заводе, это не самое энергоемкое оборудование, оно использует 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 увеличивается возрастает с увеличением крупности частиц цемента [2].

### 1.5. Замкнутый цикл измельчения

По принципу реализации технологического процесса измельчения цемента существует подразделение на замкнутый и разомкнутый конуры производства цемента (рис. 1.7).

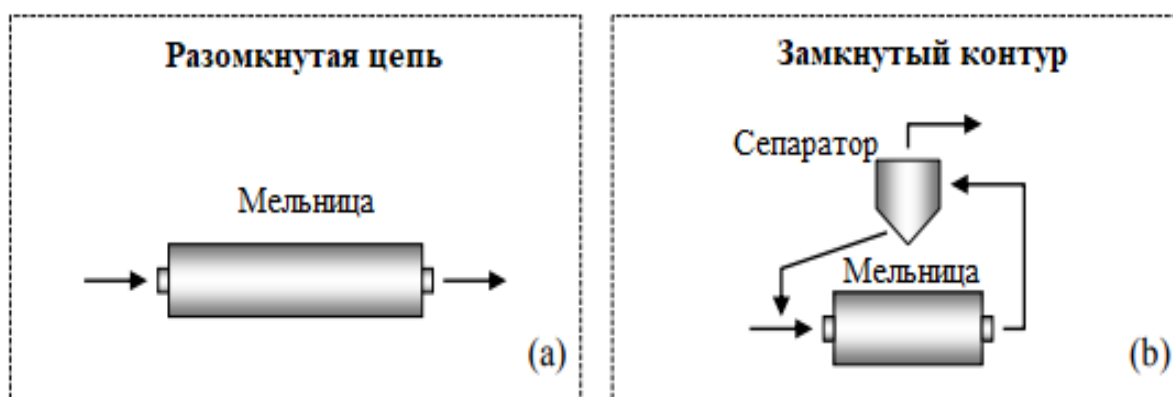


Рисунок 1.7. Различные типы схем измельчения цемента

В разомкнутом 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 параметрами процесса являются скорость подачи и поток воздуха через мельницу.

При измельчении 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 применяются сепараторы совместно с короткими мельницами ( $L / D 2,8-3,5$ ) [59-62].

В настоящее время производство цемента по замкнутому циклу измельчения является наиболее востребованным (рис. 1.7.b). Сепаратор отделяет грубую фракцию измельченного в шаровой мельнице клинкера для повторного цикла измельчения в мельнице. Мелкая фракция является конечным продуктом [71].

#### 1.5.1. Процесс измельчения в замкнутом контуре

Основными компонентами схемы производства цемента по замкнутому циклу являются питатель, мельница, элеватор и сепаратор (рис. 1.8). Технологический процесс производства цемента по замкнутому циклу описан в работах [63-71].

В то время как мельница выполняет шлифовальные работы, сепаратор удаляет более мелкие частицы из разгрузки мельницы и предотвращает их перетирание, тем самым экономя энергию. Экономия электрической энергии обуславливается тем, что сепаратор отсеивает мелкую фракцию на входе в шаровую мельницу, тем самым предотвращая перетирания мелкой фракции. Отсеивая мелкую фракцию 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].

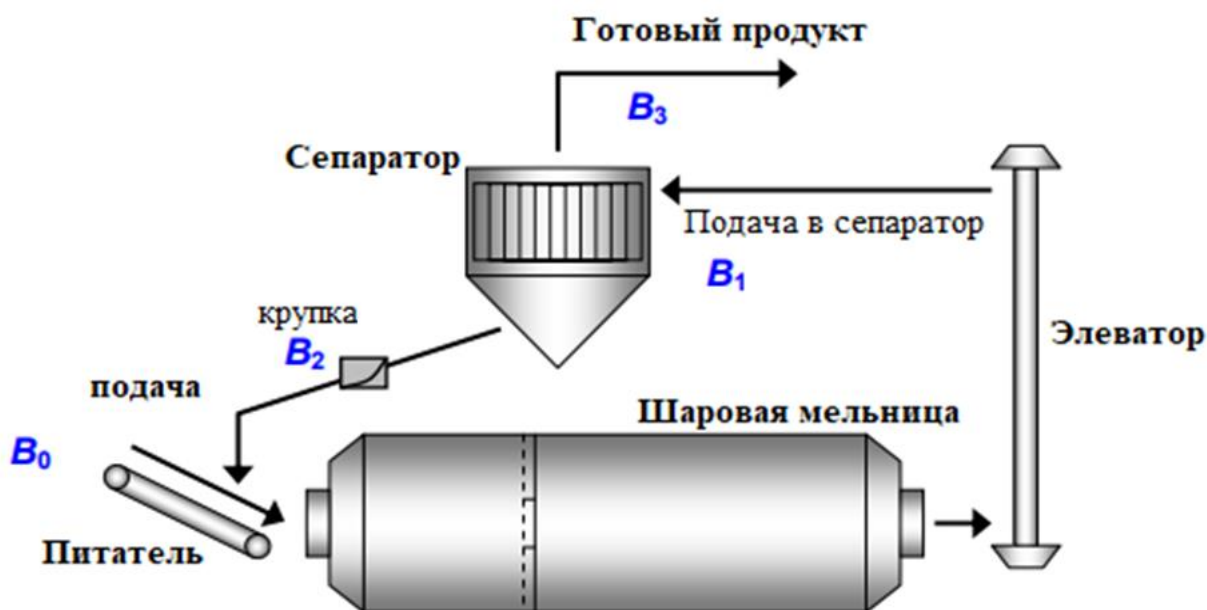


Рисунок 1.8. Замкнутый контур измельчения

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 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 с помощью звуковой информации во время работы, соответствующие 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, вызванный мелющей средой и приведет к более низким значениям в децибелах.

Мощность двигателя элеватора является еще одним показателем загрузки мельницы. При этом производительность мельницы равна величине  $V_3$ , которая состоит из совокупной массы потоков как свежего сырья ( $V_0$ ), так и потоков отбракованного сепаратора ( $V_2$ ).

Скорость ротора сепаратора является важным параметром в управлении характеристиками тонкости цемента [76-77]. Увеличение скорости вращения ротора повышает тонкость конечного продукта и увеличивает расход отбракованного вещества  $V_2$ , так как больше частиц будут 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 частицы большего размера в мелкий поток. Это уменьшит тонкость продукта и уменьшит расход брака  $V_2$ .

Расход отбракованного вещества  $V_2$  является важным параметром процесса замкнутого контура измельчения и обычно измеряется расходомером. При постоянной скорости подачи свежего сырья  $V_0$  любые изменения расхода отбраковки  $V_2$  будут влиять на производительность мельницы  $V_3$ . Это изменит отношение производительности к скорости подачи свежего сырья, определенной как нагрузка рециркуляции. Наконец, тонкость измельченного продукта существенно влияет на рабочие характеристики цемента.

## 1.6. 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 сепараторами (классификаторами).

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 [56]. 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].

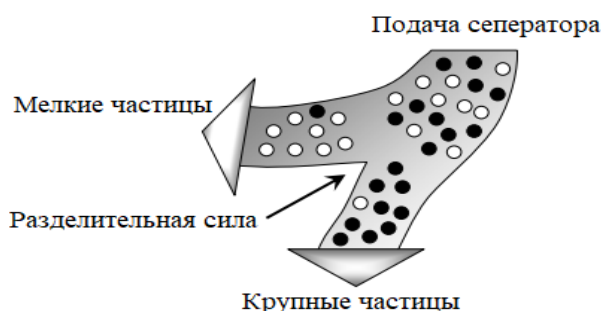


Рисунок.1.9. Действие разделяющей силы.

Физические силы, которые могут быть использованы в процессе классификации воздуха, включают:

- силу тяжести;
- аэродинамическое сопротивление;



- центробежную силу;
- силу 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, перечислены в таблице 1.

Таблица 1.

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.

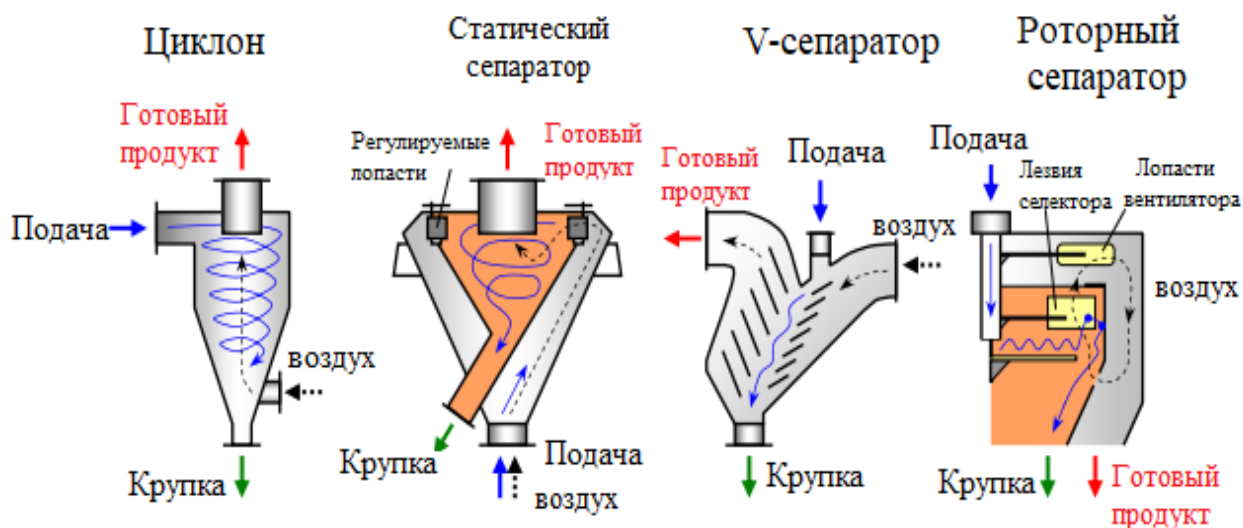


Рисунок 1.10. Схемы наиболее распространенных воздушных сепараторов.

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 [86-95].

Теоретически, если действующие силы уравниваются друг друга, частица будет неопределенно подвешена внутри циклона. Размер частиц, для которых 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 среза.

### 1.7. Конфигурация и эксплуатация сепаратора высокой эффективности

Сегодня современный уровень в роторных классификаторах представлен высокоэффективными сепараторами.

Высокоэффективные сепараторы обычно оснащаются 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 [56].

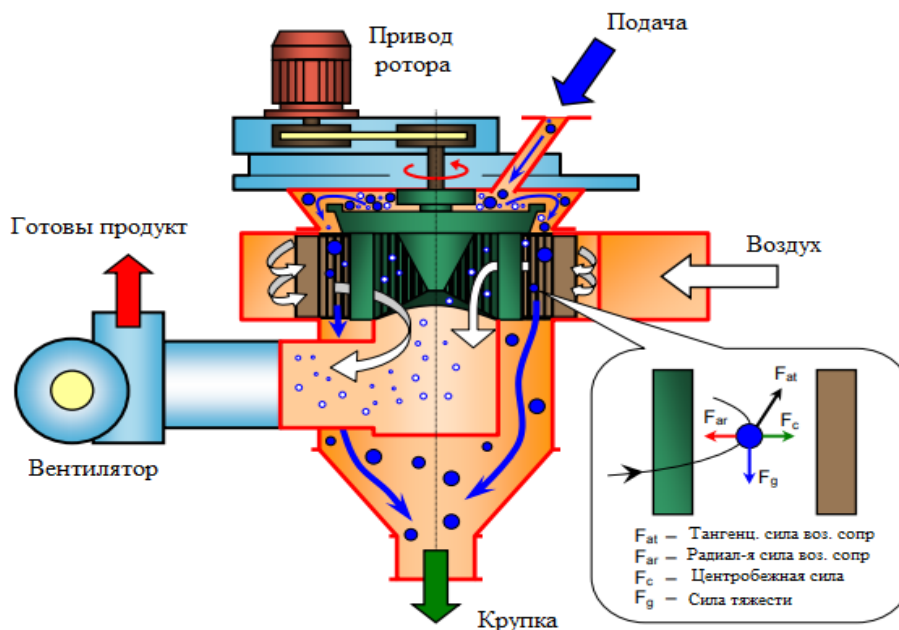


Рисунок 1.11. Внутреннее расположение высокоэффективного сепаратора.

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 крупками) 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 [6].

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.

### 1.8. Управление замкнутым контуром измельчения

Рассмотрим далее современное состояние автоматизации управления замкнутым контуром измельчения.

В настоящее время на практике процессы измельчения все еще часто работают в ручном режиме или в ограниченных пределах, с использованием простых моноварибельных контроллеров [96]. В течение последних десятилетий было предложено несколько подходов к управлению, включая методы линейного многопараметрического управления [97,98]. В последнее время усилия исследователей были сосредоточены на контроллерах, которые могут предотвратить засорение мельницы. Линейные контроллеры, основанные на линейном приближении процесса измельчения, стабильны и эффективны только в пределах указанной номинальной рабочей точки. Существующие нарушения (например, изменения в измельчаемость сырья) могут привести мельницу к новой рабочей точке, где контроллер не может стабилизировать установку.

В попытке решить эту проблему в недавнем исследовании была разработана упрощенная нелинейная модель схемы измельчения, которая способна реалистично воспроизводить явление закупоривания и контроллер обратной связи по состоянию на основе стратегии нелинейного прогнозирующего управления [99]. Хотя предлагаемая система имеет большую область стабильности по

сравнению с линейными контроллерами, риск забивания не был полностью исключен. В более поздней работе [100], используя модель контура помола, предложенную в [99], предложил надежный нелинейный контроллер с обратной связью по состоянию, который способен предотвратить засорение мельницы.

Методы управления с использованием классических контроллеров, предложенных в [96-100], могут быть эффективными только в том случае, если взаимосвязь между переменными может быть правильно определена и смоделирована. Хорошо известно, что измельчение материала зависит от многих факторов, включая геометрию мельницы, скорость, распределение размера шаров, измельчаемость материала и гранулометрию. Из-за внутренней сложности процесса разработка точной модели контура помола цемента является непростой задачей, поэтому динамическое моделирование процессов измельчения все еще остается открытой областью [101].

В работе [102] предложено нейроадаптивный контроль контура помола цемента. Модель нейронной сети контура помола цемента используется для прогнозирования скорости потока продукта и загрузки в мельнице за один шаг вперед. В работе решается только проблема засорения мельницы.

В работе [103] применяется управление с прогнозированием на один шаг вперед. Прогноз осуществляется с применением нейронной сети. Настройка нейронной сети основывается на управлении с помощью скользящего режима (SMC – Sliding Mode Control). Данный метод обладает нечувствительностью к внешним возмущениям и неопределенностям. Однако управление на основе применения скользящих режимов обладает релейным законом управления при быстром переключении режимов, что обуславливает появление высокочастотных помех (чаттер) [104].

Управляющие контроллеры процесса помола образуют первый уровень автоматизации процесса помола. Второй уровень автоматизации процесса помола реализуется в виде программного обеспечения рабочей станции (АРМ) оператора мельницы. В настоящее время на втором уровне автоматизации реализованы в основном функции мониторинга режимных параметров процесса помола.

Функции управления режимными параметрами, как правило, осуществляются вручную с использованием соответствующих органов управления. Поэтому разработка и применение автоматизированных систем поддержки принятия решений (СППР) для управления технологическими процессами в реальном времени является одним из перспективных направлений для осуществления автоматизации управления сложными технологическими процессами [105].

---

На системном уровне автоматизации управления процессами дробления исходных материалов в цементном производстве в отличие от уровня контроллеров одной из актуальных задач в настоящее время здесь является разработка систем поддержки принятия решений по оперативному управлению процессами.

В общем плане для задач управления процессами широкого плана, в том числе и технологическими процессами, задача автоматизированной поддержки принятия управляющих решений возникла достаточно рано в 70-х – 80-х годах. Это было связано с появлением автоматизированных рабочих мест операторов и рабочих станций операторов на базе компьютерной техники. Появление персональных компьютеров и рабочих станций на системном уровне АСУ позволило поставить новые задачи управления процессами. Если задачами базового уровня автоматизации (уровня контроллеров) были измерение, стабилизация и автоматическое регулирование режимных параметров, то на системном уровне автоматизации в связи с развитием вычислительной техники уже можно было ставить и решать задачи технико-экономического уровня – повышение эффективности ведения процесса, например, минимизации потребления ресурсов при заданных качественных показателях продукции.

Постановка новых задач управления технико-экономического уровня стимулировало разработку специализированных систем поддержки принятия решений (СППР) в различных отраслях производства. Так можно указать следующие системы:



– СППР «Вектор», аналитический аппарат которой основан на скалярных свертках векторного критерия выбора решений, алгоритмы поиска решений основываются на релаксационных методах решения экстремальных задач (Растрингин Л.А.);

– СППР «Criterium», аналитический аппарат выбора решений которой базируется на построении дерева целей;

– СППР «Expert choice», здесь аналитический аппарат выбора решений базируется на анализе предпочтений критериев выбора [105];

– СППР «Мурсар», здесь выбор решений основывается на построении функций полезности, при этом учитываются факторы неопределенности и риска выбора решений;

– СППР «Dismor», система поддержки принятия решений, в которой выбор многокритериальных решений основывается на методе ограничений (Михалевич В.С., Волкович В.Л.), и др.

Что касается истории развития СППР, то начальная история изложена в работе Keen P.G.W. [106].

В настоящее время СППР используется в металлургии, в строительстве и в других отраслях промышленности. Описание соответствующих СППР содержится в работах авторов: Казаринов Л.С. [107], Кузенков А.Н. [108], Павлов А.В. [109], Рей У. [110], Реклейтис Г. [111], Сучков А.В. [112], Сафонов К.А. [105], Спирин Н.А. [113], Циркин А.М. [114], Barbasova T.A. [115], Kazarinov L.S. [116], Shnayder D.A. [117] и др.

В данной работе базовым подходом к выбору многокритериальных решений принят метод ограничений. Основанием подобного выбора служит то обстоятельство, что по мнению автора для управления режимными параметрами технологических процессов с практической точки зрения наиболее подходящим для производственных условий является метод ограничений. Дело в том, что технические условия на режимные параметры технологических процессов на

практике, как правило, задаются в виде допусков. С математической точки зрения допуски являются ограничениями на области допустимых значений режимных параметров. При этом решение экстремальных задач можно интерпретировать как интерактивную процедуру последовательного ужесточения допусков. Подобная постановка задач оптимизации в производственных условиях воспринимается как естественная.

Первоначально мысли об организации интерактивных процедур многокритериального выбора решений были высказаны академиком АН УССР Глушковым В.М. [118]. Академик Глушков указал, что при решении экстремальных задач технико-экономического содержания значительно больший эффект на практике дает преодоление ограничений задачи, чем просто нахождение экстремума целевой функции [119]. В соответствии с данным положением им была предложена методология выбора решений, которая была названа «Displan». В рамках данной методологии было разработано соответствующее программное обеспечение.

Дальнейшее развитие данной методологии получило академика Глушкова в Институте кибернетики АН УССР в работах Михалевича В.С и Волковича В.Л. [120]. Формальные методы математического программирования, ориентированные на решение задач в противоречивой постановке, были предложены в работах И.И. Еремина и В.Д. Мазурова [121-123]. Для адаптивных систем управления подход на основе решения рекуррентных целевых неравенств развивался в работах В.А. Якубовича [126,127].

Управлению качеством промышленных изделий на основе распознавания образов посвящена работа Л.И. Тягунова, Э.Г. Карапетяна, Р.Г. Мирзоева [128] и др. Управлению качеством промышленных изделий на основе распознавания образов посвящена работа Л.И. Тягунова, Э.Г. Карапетяна, Р.Г. Мирзоева [128] и др.

Решение задач интерактивного принятия решений, адаптации и самоорганизации на основе использования обобщённого метода целевых

неравенств [129] в дальнейшем будем называть *метод целевых ограничений*, или сокращенно – *метод ограничений*.

Применение СППР для управления режимами работы мельницы цементного производства вызывает серьезные сложности связанные с необходимостью идентификации процесса помола.

Коэффициенты передачи мельницы нелинейно зависят от размера частиц размалываемого материала, поэтому возникает проблема построения адекватной модели, которая с одной стороны должна настраиваться по усредненным характеристикам, с другой стороны она должна отслеживать текущие характеристики мельницы. Построение такой модели представляет собой сложную проблему. В литературе в настоящее время считается перспективным использование нейронных сетей. Основным преимуществом предлагаемого метода является то, что нет необходимости заранее разрабатывать точную физическую модель контура измельчения. Вместо этого нейронная сеть будет настраиваться под объект в режиме онлайн по данным статистики эксплуатации.

Обзор моделей и методов управления и использованием нейронных сетей был проведен в пункте 1.8. данной работе. Для повышения энергоэффективности и качества помола в замкнутом цикле измельчения, были рассмотрены такие подходы как: нелинейное прогнозирующее управление, нейроадаптивное управление, управление нечеткой логики, управление в скользящем режиме, управление с использованием экспортных систем и др.

Недостатки рассмотренных методов:

1. Для указанных выше моделей на основе нейронных сетей требуются большие статистические данные за длительный период.

2. В средствах автоматизации в управлении процессом помола отсутствует процедуры принятия решений по многим показателям в противоречивых условиях.

В работе предлагаются следующие методы решения поставленных задач, устраняющие перечисленные недостатки:

1. Метод идентификации моделей замкнутого цикла измельчения на основе двух типов статистических данных;

- генеральной статистики;
- локальной статистики на текущий момент времени на основе метода регуляризации.

2. Метод эффективного принятия решений на основе явного представления текущих значений показателей при противоречивых условиях:

### 1.9. Основная цель и задачи исследований в данной работе

Основываясь на анализе отечественной и зарубежной литературы и результатах собственных исследований, можно сделать определенные выводы и сформулировать цель и задачи исследования.

Цель исследования-повысить эффективность и качество процессов измельчения цементного клинкера, работающих в замкнутом цикле, за счет управления технологическим процессом с использованием искусственной нейронной сети при неопределенности исходных данных.

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

1. Анализ эффективности технологических процессов измельчения клинкера в шаровых мельницах цементного производства.
2. Разработка метода нормализации генеральной совокупности данных на технологическом процессе помола клинкера цементного производства на основе выделения максимально совместных подсистем данных.
3. Разработка процедуры регуляризации задачи идентификации технологического процесса помола клинкера цементного производства на основе оптимального согласования решений генеральной нейросетевой модели и локальных моделей процесса при противоречивых исходных данных.

4. Разработка интерактивной процедуры принятия эффективных решений на основе оптимального согласования значений показателей процесса помола при противоречивых условия.
5. Сбор и анализ экспериментальных данных на опытных заводах ООО «Дюккерхофф Коркино Цемент» и ООО «Цементный завод имени Б. Самадова» г. Исфара.
6. На практических примерах апробация разработанной системы поддержки принятия решения в задачах оперативного управления измельчения цементного клинкера в шаровых мельницах замкнутого цикла.

## ГЛАВА 2. ОПЕРАТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ ПОМОЛА ШИХТЫ В ЦЕМЕНТНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ ПРИ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ

### 2.1. Процедура идентификации характеристик процесса помола клинкера на основе оптимальной регуляризации задачи

Процедура решения задачи идентификации состоит из следующих этапов:

- формирование и нормализация генеральной совокупности данных о технологическом процессе помола клинкера;
- построение нейросетевой нелинейной модели технологического процесса помола на нормализованной генеральной выборке данных;
- построение оперативной коррекции решений нейросетевой модели на локальных выборках данных на основе оптимальной регуляризации решения задачи для текущего времени.

Структурная схема технологического производства цемента по замкнутому циклу приведена на рисунке 2.1.

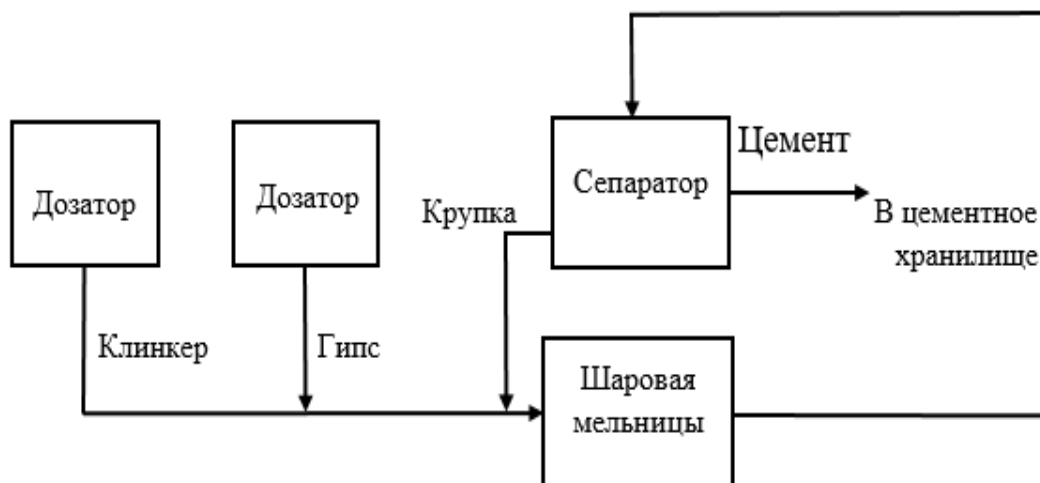


Рисунок 2.1. Структурная схема помола клинкера

Показатели, используемые для оценки качества и эффективности управления технологическим процессом помола клинкера:

- крупка – объем сырья, поступившего на повторный помол в мельницу;
- расход электроэнергии;
- Блейн – показатель тонкости помола сырья;

- звук мельницы – показатель пропорциональный уровню загрузки мельницы;
- скорость вращения двигателя мельницы;
- циркулирующая нагрузка – масса циркулирующей крупки.

Для решения задачи оперативного управления мельницей будем использовать математические модели каналов управления в виде передаточных функций со следующими входами и выходами:

входы:

- подача сырья, т/ч;
- скорость сепаратора, об/мин.

выходы:

- Блейн, см<sup>2</sup>/г;
- потребление электроэнергии, кВт·ч/т;
- звук мельницы, дБ;
- скорость вращения двигателя мельницы, об/мин;
- крупка, т/ч.

Динамическая модель для каждого выхода имеет вид:

$$y_i = K_{1i}h_{1i} + K_{2i}h_{2i}, i = 1, 2, \dots, 5; \quad (1a)$$

$$h_{1i} = \left( \frac{e^{-\tau_{1i}s}}{(1 + T_{11,i}s)(1 + T_{12,i}s)} \right) u_1; \quad (1b)$$

$$h_{2i} = \left( \frac{e^{-\tau_{2i}s}}{(1 + T_{21,i}s)(1 + T_{22,i}s)} \right) u_2. \quad (1c)$$

Здесь  $y_i$  – выходные показатели,  $u_1, u_2$  – входные параметры;  $K_{1i}, K_{2i}$  – коэффициенты передачи от входных параметров к выходным показателям соответственно. Динамика рассматриваемых процессов во времени здесь описывается величинами  $h_{1i}(t), h_{2i}(t)$ . Данные величины в статике совпадают со статическими значениями входных параметров:  $h_{1i,ст} = u_{1,ст}, h_{2i,ст} = u_{2,ст}$ . В

динамике процессы  $h_{1i}(t)$ ,  $h_{2i}(t)$  характеризуются временами запаздывания  $\tau_{1i}, \tau_{2i}$  и постоянными времени  $T_{11,i}, T_{12,i}, T_{21,i}, T_{22,i}$  соответственно.

В соответствии с технологической инструкцией мастер мельницы после выполнения корректирующих действий на основе изменения входных параметров должен убедиться, что коррекция процесса прошла в правильном направлении. Такое условие обусловлено высокой степенью неопределенности характеристик мельницы и служит целям обеспечения безопасности и эффективности управления рабочими режимами. С учетом данного ограничивающего условия в дальнейшем относительно быстрые переходные процессы режимных параметров мы рассматривать не будем. Рассмотрению будут подлежать лишь относительно медленные нестационарные процессы, которые характеризуются нестационарными значениями коэффициентов передач:

$$\{K_{1i,s}, K_{2i,s}; i = 1, 2, \dots, 5; s \in S_r\}, \quad (2)$$

Здесь  $S_r$  – множество статистических наблюдений за режимными параметрами и показателями мельницы в процессе ее эксплуатации.

Определение коэффициентов передач (2) осуществляется в три этапа:

- 1) формирование генеральной совокупности регулярных данных о рабочих режимах и показателях мельницы;
- 2) построение модели связи входных параметров и выходных показателей рабочих режимах путем настройки нейронной сети на генеральной совокупности данных;
- 3) построение уточненной модели связи входных параметров и выходных показателей на локальной выборке данных.

**Первый этап** состоит в том, что собираются все сведения о режимах работы мельницы. Это данные карт рабочих режимов, технологических испытаний, нормативов работы оборудования, технологических инструкций. Вся эта информация обобщается в виде таблиц, номограмм, формул, которые в совокупности дают общее представление о функционировании мельницы. Вся полученная информация составляет генеральную совокупность данных.



Генеральная совокупность данных является противоречивой, так как сведения из разных источников в общем случае содержат данные разной степени достоверности по разным причинам. Подход к нормализации данных в данной работе состоит в том, что среди рассматриваемых данных ставится задача выделения регулярных данных, удовлетворяющих определенным признакам. Здесь используется следующий признак регулярности данных.

*Признак регулярности:* данные в рамках определенных допусков отражают общий характер их связи, установленной в рамках соответствующей области технологических знаний. Формально данную связь можно определить в виде дискриминантной функции:

$$\underline{y}_i \leq f_i(\mathbf{c}_i; u_1, u_2) \leq \overline{y}_i, \quad i = \overline{1, 5}; \quad (3a)$$

$$\underline{u}_1 \leq u_1 \leq \overline{u}_1, \quad (3b)$$

$$\underline{u}_2 \leq u_2 \leq \overline{u}_2. \quad (3c)$$

Здесь  $\underline{y}_i, \overline{y}_i$  – нижняя и верхняя границы допустимых значений дискриминантной функции,  $\underline{u}_1, \underline{u}_2; \overline{u}_1, \overline{u}_2$  – нижние и верхние границы допустимых значений входных параметров;

$\mathbf{c}_i$  – вектор структурных параметров зависимости  $f_i(\mathbf{c}_i; u_1, u_2)$ .

В общем случае зависимости (3a) могут иметь различный характер: линейный, квадратичный, логарифмический и др. Например, линейная зависимость будет иметь вид:

$$f_i(\mathbf{c}_i; u_1, u_2) = c_{i0} + c_{i1}u_1 + c_{i2}u_2.$$

Процедура распознавания регулярных данных состоит в следующем.

На генеральной выборке данных  $S_r$  формируется система неравенств

$$\underline{y}_{i,s} - f_i(\mathbf{c}_i; u_{1,s}, u_{2,s}) \leq 0: \mu_{i,s}; \quad (4a)$$

$$f_i(\mathbf{c}_i; u_1, u_2) - \overline{y}_i \leq 0: \nu_{i,s}; \quad (4b)$$

$$i = \overline{1, 5}; \quad s \in S_r. \quad (4c)$$

Здесь  $\mu_{i,s}, \nu_{i,s}$  – характеристические функции соответствующих неравенств, принимающие булевы значения 1, 0. Когда характеристические функции

неравенств равны 1, то неравенства выполняются. В противном случае – не выполняются.

Ставится задача: определить допустимые значения векторов структурных параметров  $\mathbf{c}_i$ , определяющих максимально совместную подсистему неравенств (4) по критерию

$$\max_{\{\mathbf{c}_i\}} \left( \sum_i \sum_s (\mu_{i,s} + \nu_{i,s}) \right). \quad (5)$$

Решение задачи (5) осуществляется в интерактивном режиме, при котором границы неравенств (4) максимально расширяются без потери признака регулярности данных. В результате будет получена максимально совместная подсистема регулярных данных  $S_p$ . Данное множество  $S_p$  будет подмножеством генеральной совокупности данных  $S_p \subseteq S_r$ .

Решение задачи (4) осуществляется на основе сочетания градиентного метода поиска решения с переборным алгоритмом.

Градиентный метод поиска решения основывается на рекуррентном соотношении следующего вида

$$\begin{aligned} \mathbf{c}_{i,k} &= \mathbf{c}_{i,k-1} - \gamma \left( \sum_i \sum_s \left( -(e_{1,k-1})^+ + (e_{2,k-1})^+ \right) \text{grad} f_i(\mathbf{c}_{i,k-1}; u_{1,s}, u_{2,s}) \right), \\ e_{1,k-1} &= \underline{y}_{i,s} - f_i(\mathbf{c}_{i,k-1}; u_{1,s}, u_{2,s}), \\ e_{2,k-1} &= f_i(\mathbf{c}_{i,k-1}; u_1, u_2) - \overline{y}_i. \end{aligned}$$

На основе градиентного метода находится исходная совместная подсистема неравенств. Далее она последовательно расширяется путем последовательного подключения несовместных неравенств. Если при этом подключении несовместное неравенство станет совместным, то оно включается в расширенную совместную подсистему неравенств. Решение систем неравенств осуществляется до получения максимально совместной подсистемы.

В простом случае, когда тестируются только бинарные связи параметров типа:

$$y = c_0 + c_1 u,$$

решение может быть получено аналитически на основе метода наименьших квадратов.

В этом случае регулярные данные удовлетворяют следующим условиям

$$\left( \underline{y}_i \leq y_{i1,s}(u_{1,s}) \leq \overline{y}_i \right) \cup \left( \underline{y}_i \leq y_{i2,s}(u_{2,s}) \leq \overline{y}_i \right), \quad i = \overline{1, 5}; \quad s \in S_r; ;$$

где

$$y_{i1,s} = c_{0,i1} + c_{1,i1}u_{1,s}, \quad y_{i2,s} = c_{0,i2} + c_{1,i2}u_{2,s}.$$

Неизвестные коэффициенты зависимостей считаются по общим формулам метода наименьших квадратов:

$$y_s \approx c_0 + c_1 u_s; \quad y_{cp} = (1/N) \sum_s y_s; \quad u_{cp} = (1/N) \sum_s u_s; \quad \Delta y_s = y_s - y_{cp};$$

$$\Delta u_s = u_s - u_{cp}; \quad c_0 = y_{cp}; \quad c_1 = \sum_s \Delta y_s \Delta u_s / \sum_s \Delta u_s \Delta u_s.$$

**На втором этапе** на нормализованной генеральной выборке данных настраиваются нейронные сети, в общем случае нелинейные

$$y_i^{HC} = F_i^{HC}(\mathbf{w}_i^{HC}; u_1, u_2), \quad i = 1, 2, \dots, 5; \quad (6)$$

где  $\mathbf{w}_i^{HC}$  – настраиваемые веса нейронной сети.

**На третьем этапе** осуществляется коррекция решений нейронных сетей на локальных выборках данных.

Локальные выборки данных представляет собой массивы ошибок сетей при заданных локальных входных данных:

$$\{\Delta y_{i,s}; u_{1,s}, u_{2,s}; s \in I_L\}_t, \quad i = 1, 2, \dots, 5 \quad (7)$$

$$\Delta y_{i,s} = y_{i,s}^{\phi} - y_{i,s}^{HC}, \quad s \in I_L, \quad (8)$$

где  $\Delta y_{i,s}$  – отклонения фактических значений выходных показателей в  $S$ -ом реальном наблюдении  $y_{i,s}^{\phi}$  от результатов расчета значений выходных показателей  $y_{i,s}^{НС}$  с помощью нейронных сетей для значений входных данных  $u_{1,s}, u_{2,s}$ .

Предположим, что факторные коррекции являются линейными:

$$\Delta y_i^{кор} = a_{i0}u_0 + a_{i1}u_1 + a_{i2}u_2, \quad i = 1, 2, \dots, 5; \quad u_0 = 1. \quad (9)$$

В этом случае среднеквадратические ошибки коррекции имеют вид

$$E_{кор\ i}^2 = 0.5 \sum_s (\Delta y_{i,s}^{кор} - a_{i0}u_{0,s} - a_{i1}u_{1,s} - a_{i2}u_{2,s})^2. \quad i = 1, 2, \dots, 5. \quad (10)$$

Ставится задача определить неизвестные коэффициенты  $a_{i0}, a_{i1}, a_{i2}$  зависимостей (9) по критериям минимума среднеквадратических ошибок (10).

Особенностью поставленной задачи является то, что она решается на локальной выборке данных. При этом информация, которую несет с собой локальная выборка может быть недостаточной для однозначного решения задачи. Поэтому для устойчивого и однозначного решения поставленной задачи введем дополнительное условие для коэффициентов коррекции в виде регуляризирующего ограничения.

$$R_{кор}^2 = 0,5 \sum (a_0^2 + a_1^2 + a_2^2). \quad (11)$$

В итоге постановка задачи минимизации ошибки коррекции преобразуется в задачу минимизации сложного критерия

$$Q_R = (1 - \alpha_R)E_{кор}^2 + \alpha_R R_{кор}^2. \quad (12)$$

В соответствии с известными условиями оптимальности для метода наименьших квадратов оптимальное решение здесь определяется на основе решения системы линейных алгебраических уравнений:

$$(1 - \alpha_R) \sum_{j=0}^2 c_{ij} a_j + \alpha_R a_i = (1 - \alpha_R) d_i, \quad i = 1, \dots, 5 \quad (13)$$

$$c_{ij} = \sum_s u_{i,s} u_{j,s}; \quad d_i = \sum_s \Delta y_{i,s} u_{i,s}.$$

Проблемным вопросом здесь является выбор коэффициента регуляризации  $\alpha_R$ .

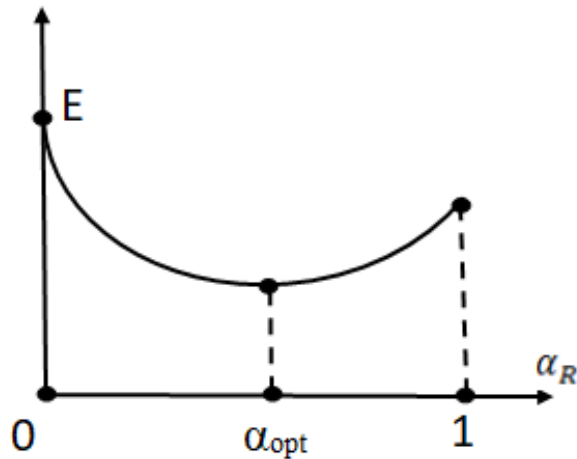


Рисунок 2.2. Выбор коэффициента регуляризации

Коэффициент регуляризации оказывает непосредственное влияние на точность прогноза. Так при  $\alpha_R = 0$  решение задачи (12), (13) вырождается в метод наименьших квадратов без регуляризации. Этот метод дает минимальную ошибку представления зависимости (9) только на обучающей выборке данных. Однако обучающая выборка здесь имеет локальный характер. Для оценки прогнозирующих свойств полученного решения необходима дополнительно локальная поверяющая выборка данных, не связанная с обучающей. Вследствие локального характера здесь обучающей выборки можно постулировать при таком решении повышенную ошибку на поверяющей выборке. Однако именно ошибка на поверяющей выборке служит оценкой прогнозирующих свойств полученной корректирующей зависимости.

С другой стороны, при  $\alpha_R = 1$ , решение будет тривиальным и равным нулю. В этом случае на поверяющей выборке будет представлено решение от нейронной сети, настроенной на генеральной выборке по критерию минимальной ошибки.

Налицо здесь противоречие. Поэтому выбор значения коэффициента регуляризации следует выполнять на компромиссной основе, например, когда при заданном коэффициенте регуляризации достигается минимальное значение ошибки на локальной поверяющей выборке. Это является оптимальным решением поставленной задачи выбора коэффициента регуляризации.

## 2.2. Построение и обучение нейронных сетей

На начальном этапе построения алгоритмов идентификации значения параметров модели в реальном времени с начала для оценки номинальных значения параметров на больших объемах данных были использованы стандартные программы нейронных сетей. С этой целью были созданы нейронные сети, состоящие каждая из четырех подсетей. Каждая подсеть обобщала статистику по каждому из выходов модели построение и обучать нейронные сети осуществлялось в GUI интерфейсе Matlab «Neural Network Toolbox». Данный прикладной пакет используется для построения нейронных сетей прямого распространения, состоящих из двух слоев. Для скрытого слоя используется сигмоидальная функция активации, для выходного слоя – линейная. Количество нейронов во всех подсетях одинаковое и равно двум.

В качестве обучающей выборки используем статистические данные за длительный период. Фрагмент таких данных представлен в таблице 2. Исходные данные делят на три набора: обучающая выборка, выборка для валидации и тестовая выборка, в процентном соотношении 70%, 15%, 15% соответственно.

Для обучения данных нейронных сетей в условиях задачи идентификации используется нелинейный алгоритм Левенберга - Марквардта. Алгоритм позволяет оптимизировать параметры нелинейной регрессионной модели. Для оценки качества оптимизации применяется среднеквадратичная ошибка модели на обучающей выборке. Оптимизация параметров происходит посредством последовательного приближения заданных начальных условий к искомому локальному оптимуму.

Фрагмент статистических данных

Подача т/ч	Скорость сепаратора об/мин	Гипс %	Удельный расход электроэнергии кВт*ч/т	Возврат крупки т/ч	Звук мель.	Мотор %	Блейн (D')
120	150	4,1	38	59	82	79,3	16,8
120	148	4	38,1	63	83,3	79,1	16,9
120	148	4	38,3	68	81,9	79,3	16,7
120	148	3,8	38	69	82,7	79,3	16,6
120	145	4	41	67	85,4	75,8	16,5
120	142	4	43	68	90	75	17
120	140	4,1	41,2	68	87,7	76,7	16,9
120	138	4,1	39	56	86,9	81,7	16,7
120	135	4,1	39,1	62	84	80,4	16,7
120	135	3,6	42	40	83,4	78,8	18,5

Задача состоит в определении весовых коэффициентов, которые соответствуют минимальной ошибке сети

$$E_D = \sum_{s=1}^N (y_s - f(\mathbf{w}, \mathbf{x}_s))^2. \quad (14)$$

При этом на каждом шаге итерации осуществляется уточнение значений вектора весовых коэффициентов –  $\mathbf{w} := \mathbf{w} + \Delta\mathbf{w}$ , с учетом условия.

$$f(\mathbf{w} + \Delta\mathbf{w}, x) \approx f(\mathbf{w}, x) + J\Delta\mathbf{w}, \quad (15)$$

где  $J$  – матрица коэффициентов линеаризации функции  $f(\mathbf{w}, x)$ , в точке  $\mathbf{w}$ .

Приращение  $\Delta\mathbf{w}$  находится из необходимого условия минимума функции

$$E_D = |y - f(\mathbf{w} + \Delta\mathbf{w})|^2, \quad (16)$$

где

$$f(w + \Delta w) = [f(w + \Delta w, x_1), \dots, f(w + \Delta w, x_N)]^T. \quad (17)$$

В результате для нахождения  $\Delta w$  необходимо решить систему нелинейных уравнений

$$\Delta w = (J^T J)^{-1} J^T (y - f(w)). \quad (18)$$

Матрица  $J^T J$  может оказаться существенно вырожденной. Для устранения данного недостатка ввел параметр регуляризации  $\lambda \geq 0$ . В итоге выражение (18) преобразуется следующим образом

$$\Delta w = (J^T J + \lambda I)^{-1} J^T (y - f(w)), \quad (19)$$

где  $I$  – единичная матрица.

Параметр регуляризации назначается на каждой итерации работы алгоритма. Если значение ошибки  $E_D$  быстро убывает, то при малом значении  $\lambda$  алгоритм вырождается в алгоритм Гаусса-Ньютона.

Алгоритм настройки сети с использованием соотношения (19) на генеральной совокупности данных позволяет получить средние значения весовых коэффициентов  $w_{cp}$ . На их основе с помощью нейронной сети можно оценивать средние значения выходной функции сети при заданных входных данных

$$y_{cp}^* = f(w_{cp}, x). \quad (20)$$

Для решения задач оперативного управления наряду со средним значением выходной функции целесообразно также знать текущую оценку отклонения выходной функции  $\Delta y^*$  от средней оценки  $y_{cp}^*$ :

$$y^* = y_{cp}^* + \Delta y^*. \quad (21)$$

Данную задачу можно решить на основе использования дополнительной нейронной сети, ориентированной на оценку текущих отклонений выходной функции от средних значений.



После обучения нейронной сети необходимо определить качество настройки нейронной сети. Одним из таких критериев является отклонение значения на выходе нейронной сети от значения из тестовых данных, которое соответствует значению на входе нейронной сети. Данный показатель можно оценить с использованием гистограммы распределения ошибок нейронной сети (Рисунков 4.10 – 4.13).

### 2.3. Оперативное нейроуправление контуром измельчения шихты

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

1) оперативное нейроуправление 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 нейроуправление обновляется каждый час в соответствии с рабочими данными мельницы.

3) оперативное нейроуправление поддерживает производительность мельницы очень близко к ее проектным значениям [130] (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 [56].

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 [131].

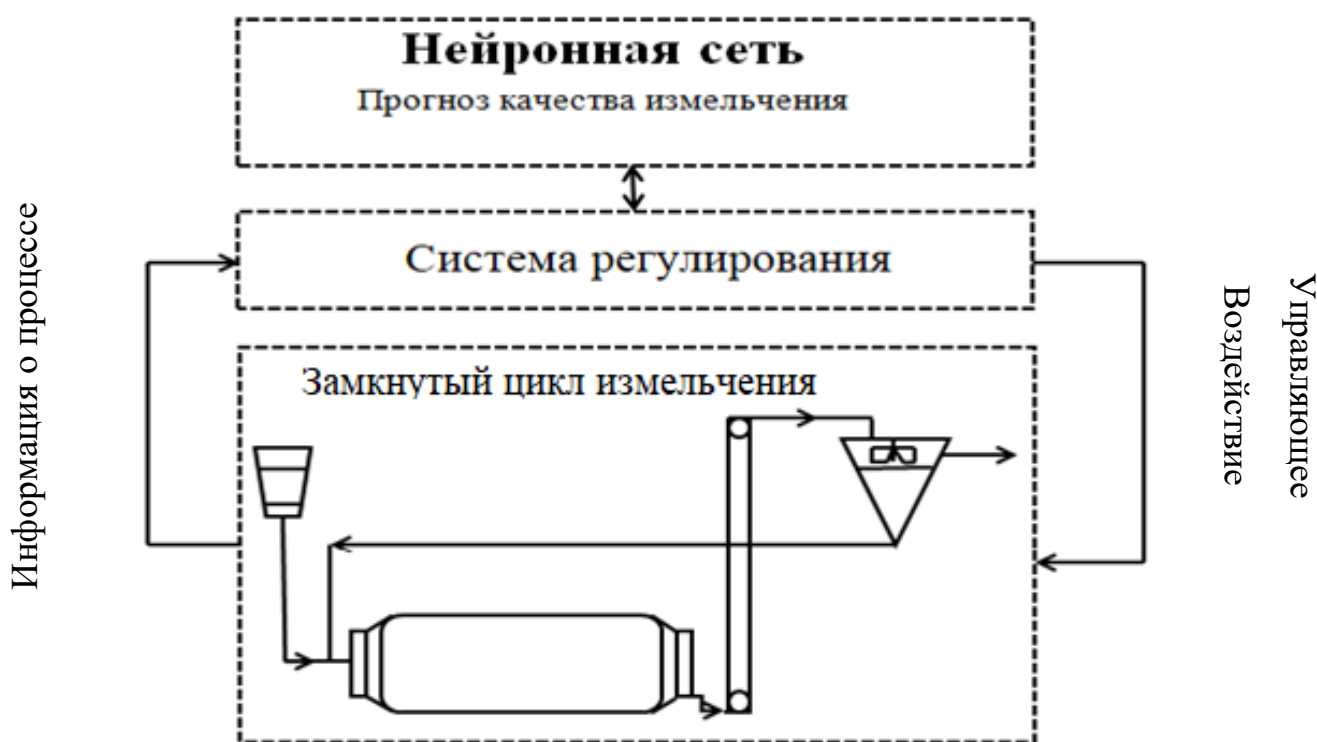


Рисунок 2.3. Структура системы управления процессом помола замкнутого цикла

Эффективное управление процессом имеет большое значение для увеличения пропускной способности контура измельчения и качества конечного продукта, так, как приводит к значительному снижению производственных издержек [57]. Обратная связь в таких системах управления используется для исправления неточностей, связанных с внешним вмешательством и неточностью математической модели объекта управления. Регулятор полагается на

эмпирическую модель процесса для прогнозирования дальнейшего поведения переменных состояния на основе предыдущих значений [132].

## 2.4. Исследование системы управления замкнутого контура измельчения

### 2.4.1. Сбор и анализ данных

Определение компьютерной модели для контура измельчения, анализ материальных потоков, является важным этапом. Эксперимент для выборки из материальных потоков контура измельчения был выполнен на опытном заводе.

Был проведен анализ процесса помола на изменение скорости потока, скорости вращения ротора классификатора, возврата крупки, удельного расхода электроэнергии, соотношения гипса в клинкере, скорости вращения двигателя мельницы, и определена тонкость помола по Блейну ( $D'$ ).

### 2.4.2. Контур измельчения на опытном заводе

В работе проведен опытный эксперимент по оценке качества измельчения клинкера в системе: двухкамерная трубная мельница с сепаратором. Данные по результатам цикла измельчения в замкнутом контуре представлены в таблице 2.

Для тестирования моделей нейронных сетей в качестве входного параметра используем скорость подача гипса  $u_1$  и скорость сепаратора  $u_2$ . Регулируя эти параметры с помощью нейронной сети повышаем качество продукта и стабильной работы мельницы при производстве цемента. Для этого надо рассматривать зависимость гипса и скорость сепаратора с остальными параметрами.

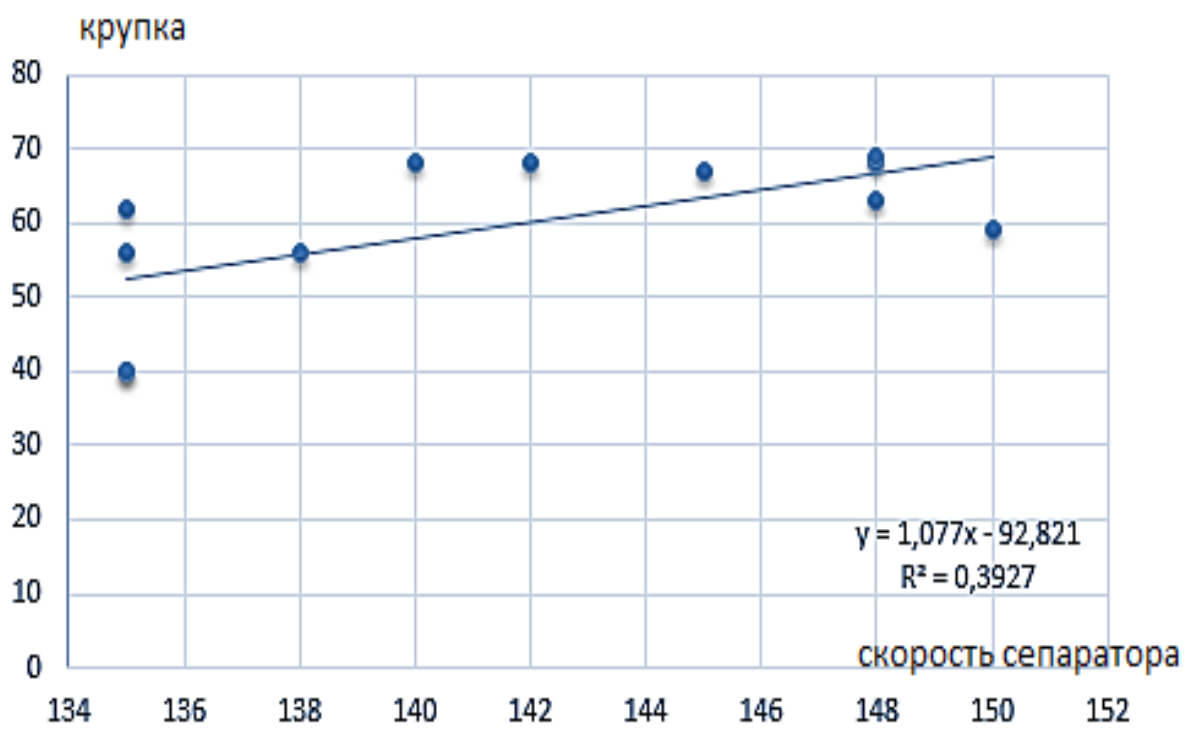


Рисунок 2.1. График зависимости выхода крупки от скорости сепаратора

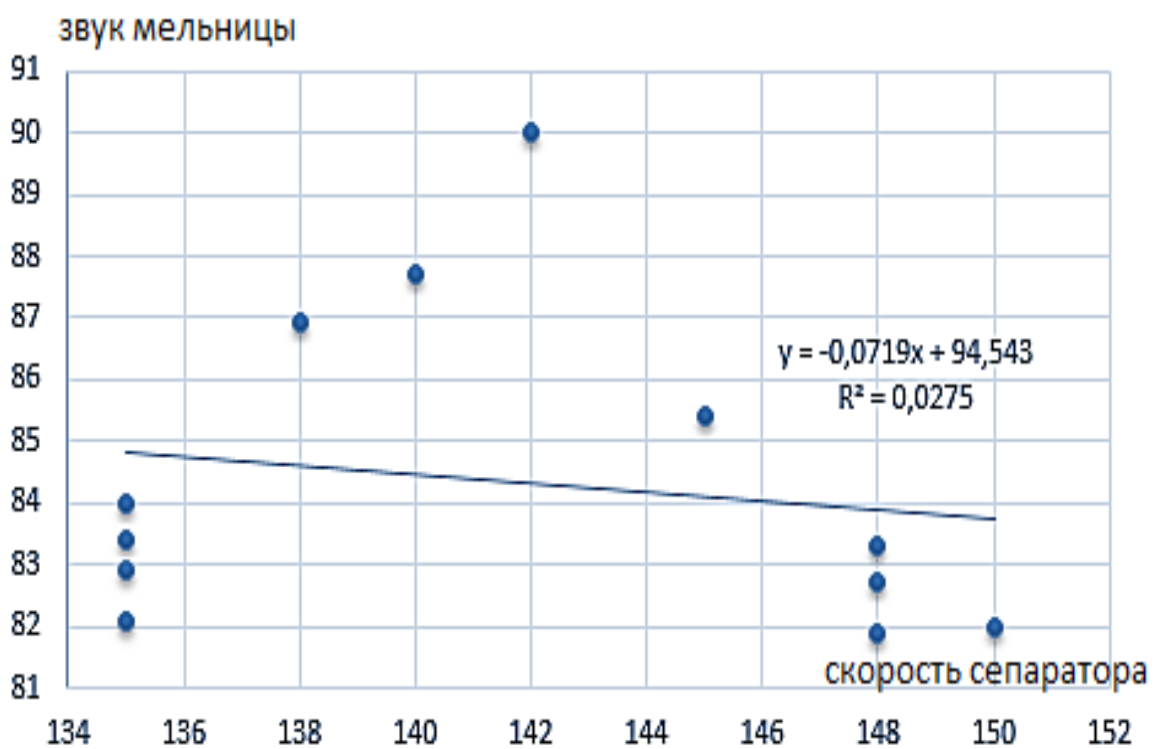


Рисунок 2.2. График зависимости звук мельницы от скорости сепаратора

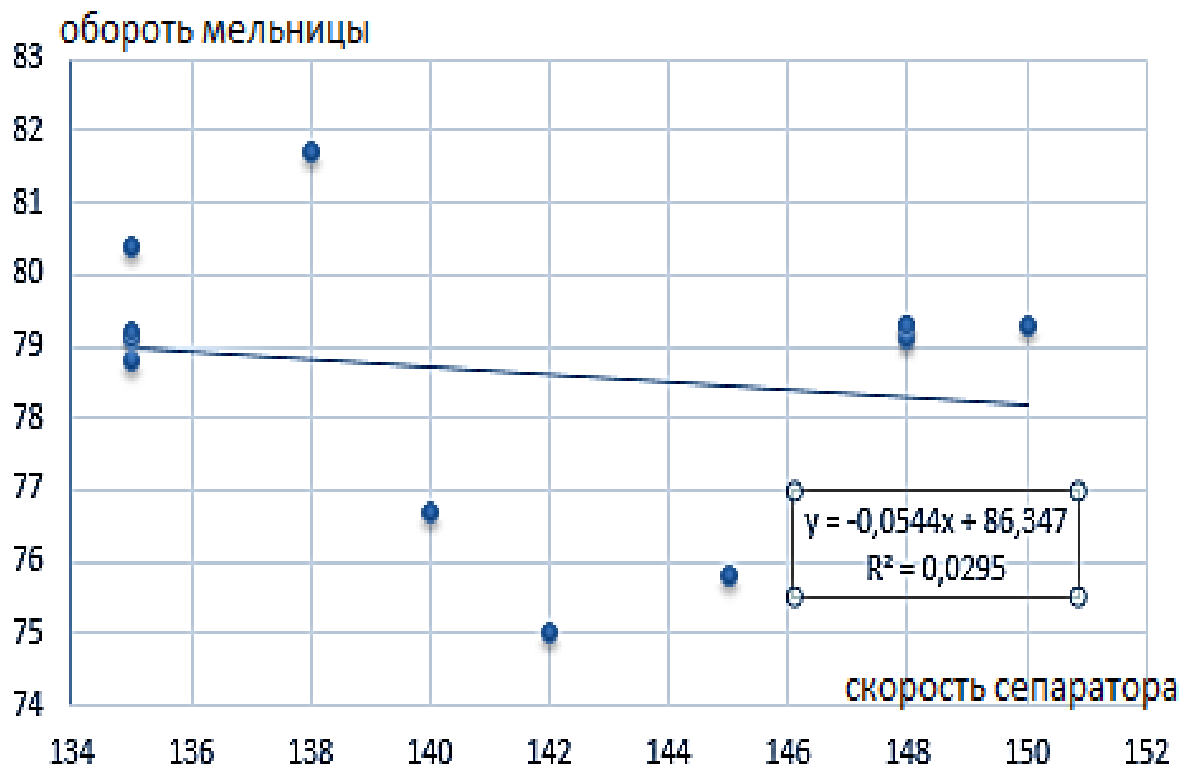


Рисунок 2.3. График зависимости обороты мельницы от скорости сепаратора

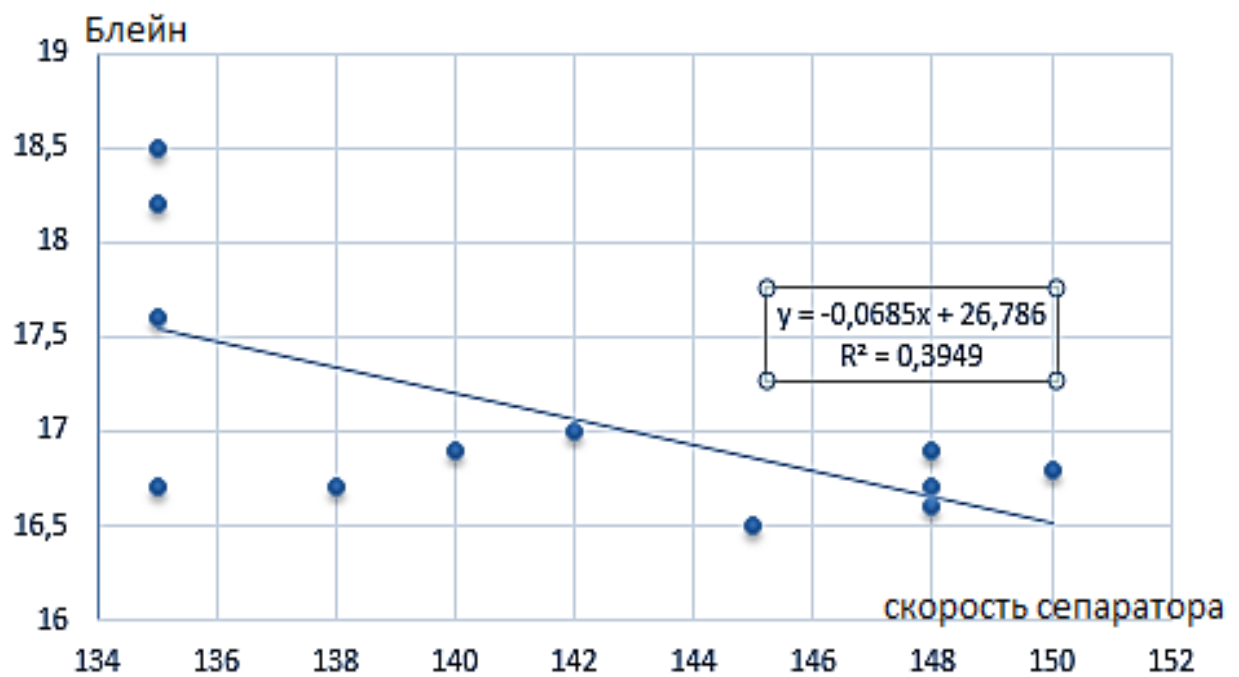


Рисунок 2.4. График зависимости Блейн (D') от скорости сепаратора

Также рассматриваем зависимость подачи гипса.

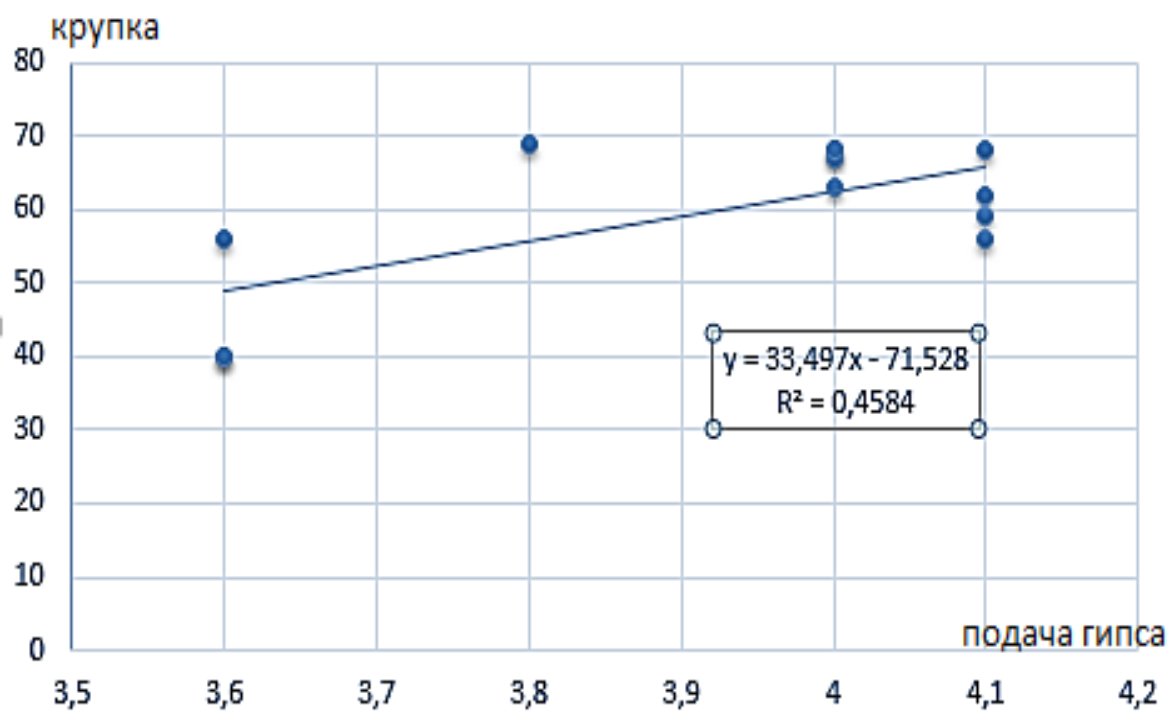


Рисунок 2.5. График зависимости выхода крупки от величины подачи гипса

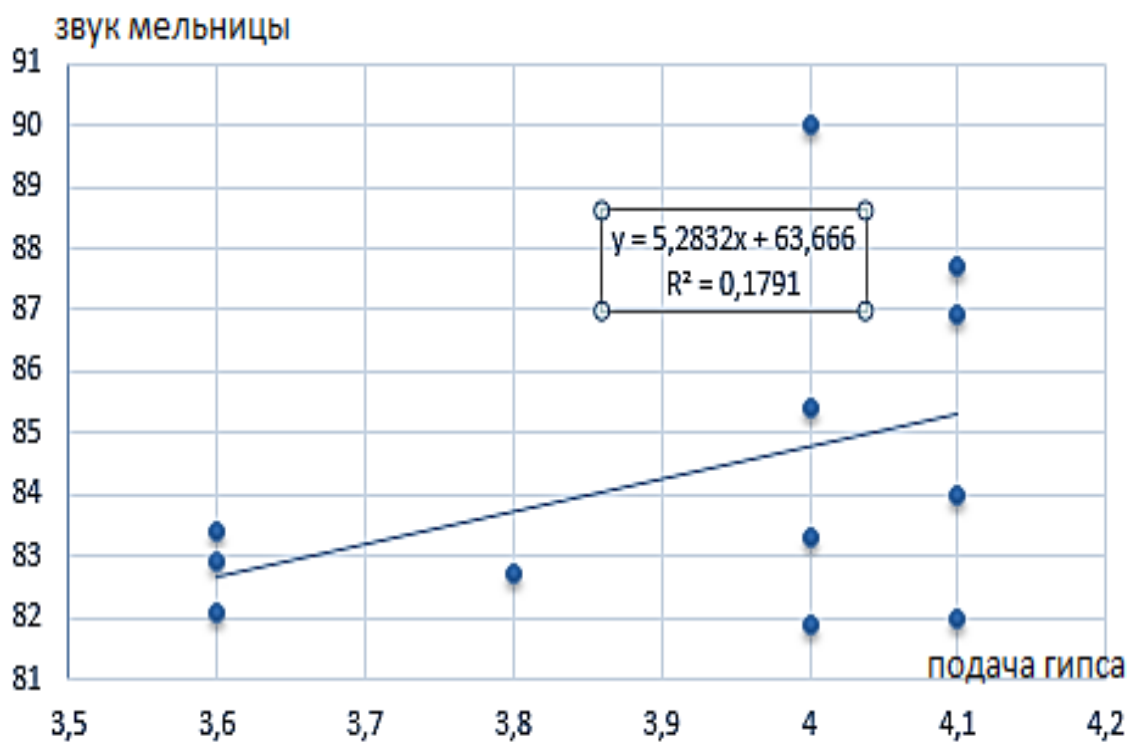


Рисунок 2.6. График зависимости звука мельницы от подачи гипса

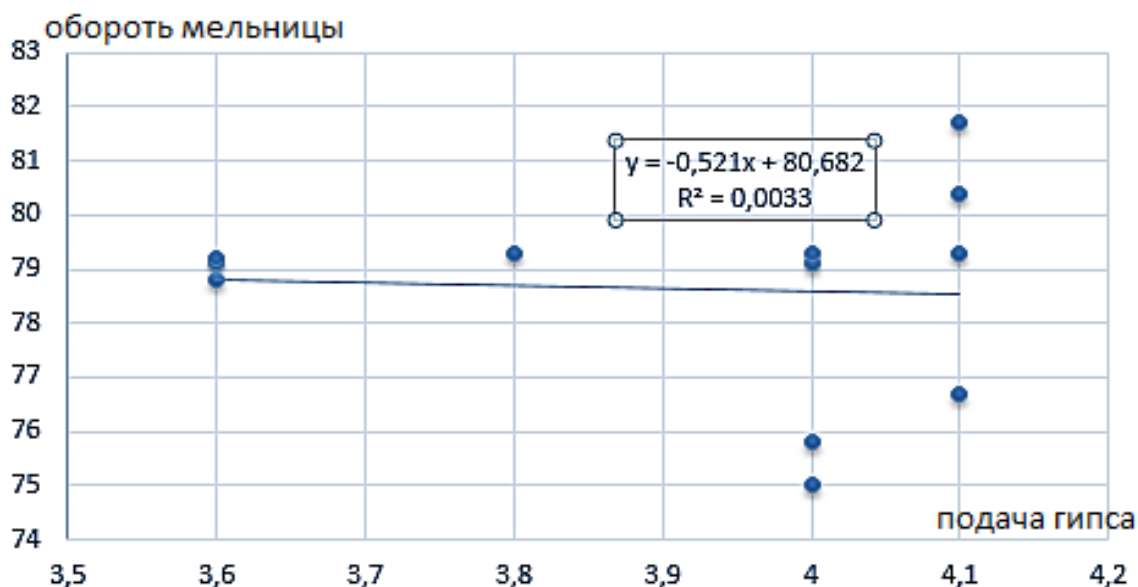


Рисунок 2.7. График зависимости обороты мельницы от подачи гипса

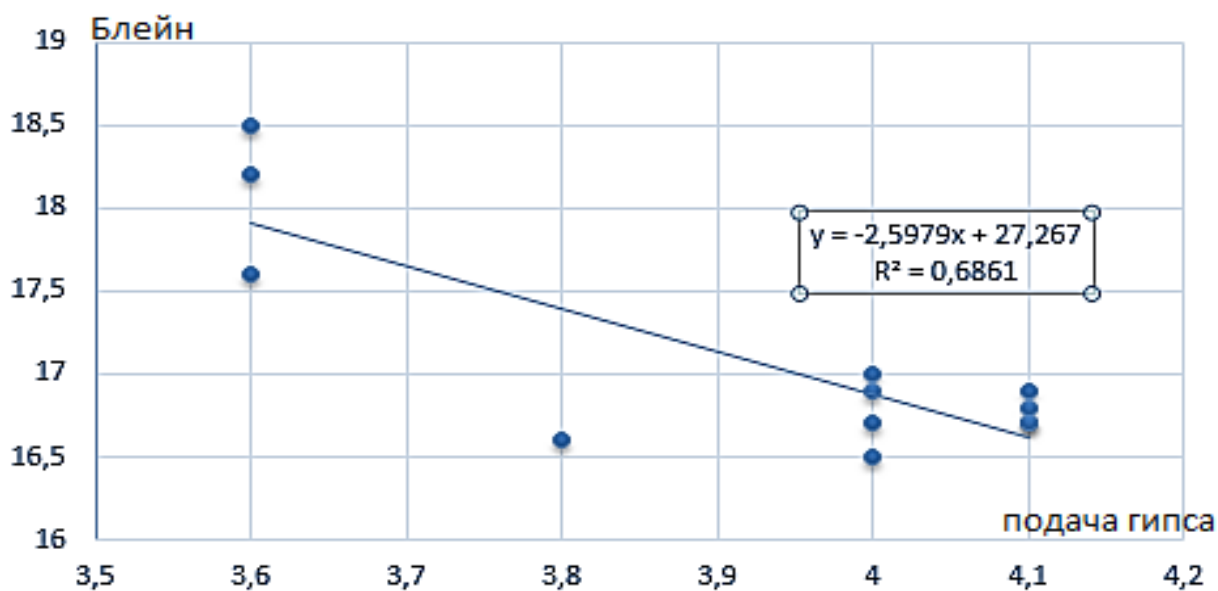


Рисунок 2.8. График зависимости Блейн (D') от подачи гипса

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 графиках 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 нужный диапазон и сеть их не использует. Для нормализации данных в исследовании используется метод наименьших

квадратов. В предыдущей таблице показаны реальные данные, полученные в производстве, таблица 3 данные после нормализации.

Частный случай решения задачи построения дискриминантных функций.

$$\left( \underline{y}_i \leq y_{i1,s}(u_{1s}) \leq \overline{y}_i \right) \cup \left( \underline{y}_i \leq y_{i2,s}(u_{2s}) \leq \overline{y}_i \right), \quad (22)$$

$$y_{i1} = a_1 + b_1 u_1, \quad y_{i2} = a_2 + b_2 u_2 \quad (23)$$

$$a_i = \frac{\sum y_i \sum u_s^2 - \sum u_s \sum u_s y_i}{N \sum u_s^2 - \sum u_s \sum u_s}, \quad (24)$$

$$b_i = \frac{N \sum u_s^2 y_i - \sum u_s \sum y_i}{N \sum u_s^2 - \sum u_s \sum u_s}. \quad (25)$$

Таблица 3.

Данные после нормализации

Подача т/ч	Скорость сепаратор а об/мин	Гипс %	Удельный расход электроэнергии и кВт*ч/т	Возврат крупки т/ч	Звук мель.	Мотор %	Блейн (D')
120	150	4,1	39,75	62,5	78,13	83,14	17,44
120	148	4	39,78	62,3	78,15	83,14	17,44
120	148	4	39,78	62,3	78,15	83,14	17,44
120	148	3,8	39,78	62,3	78,15	83,21	17,44
120	145	4	39,83	61,9	78,18	83,28	17,44
120	142	4	39,89	61,5	78,20	83,32	17,44
120	140	4,1	39,92	61,2	78,22	83,37	17,44
120	138	4,1	39,96	61,0	78,24	83,44	17,44
120	135	4,1	40,01	60,6	78,27	83,44	17,44
120	135	3,6	40,01	60,6	78,27	83,44	17,44



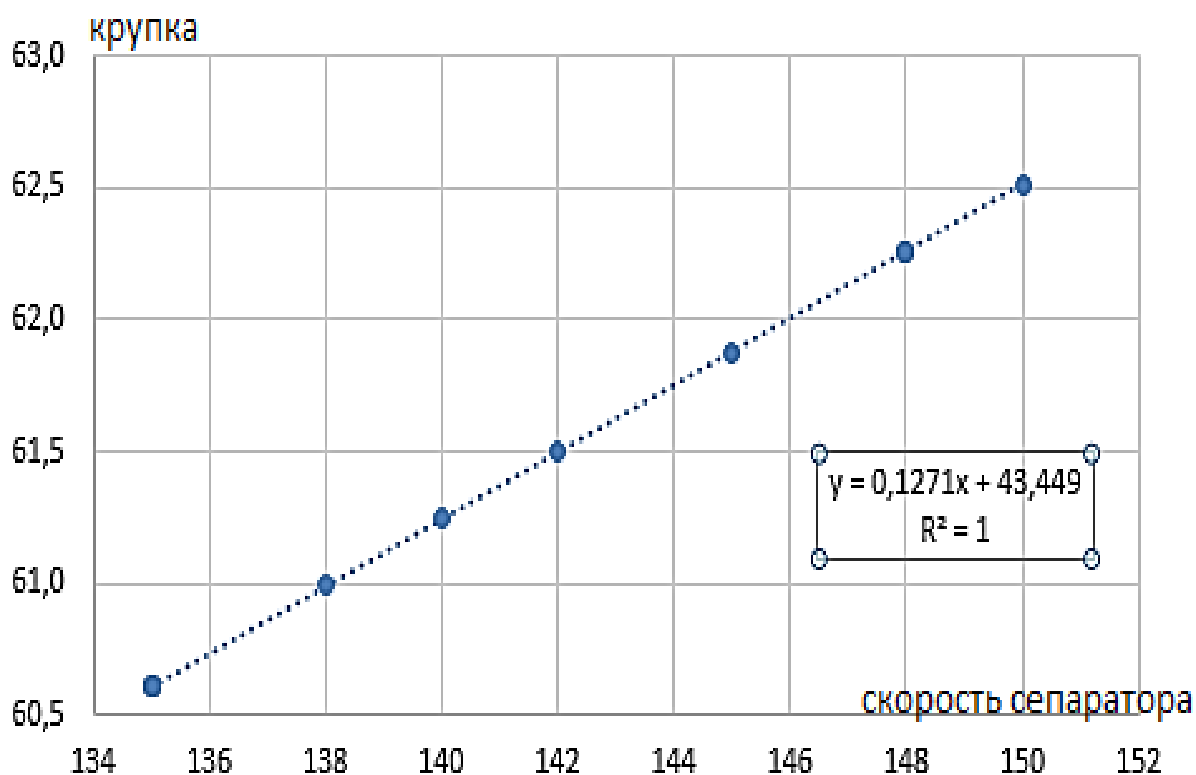


Рисунок 2.9. График зависимости крупки от скорости сепаратора после нормализации данных

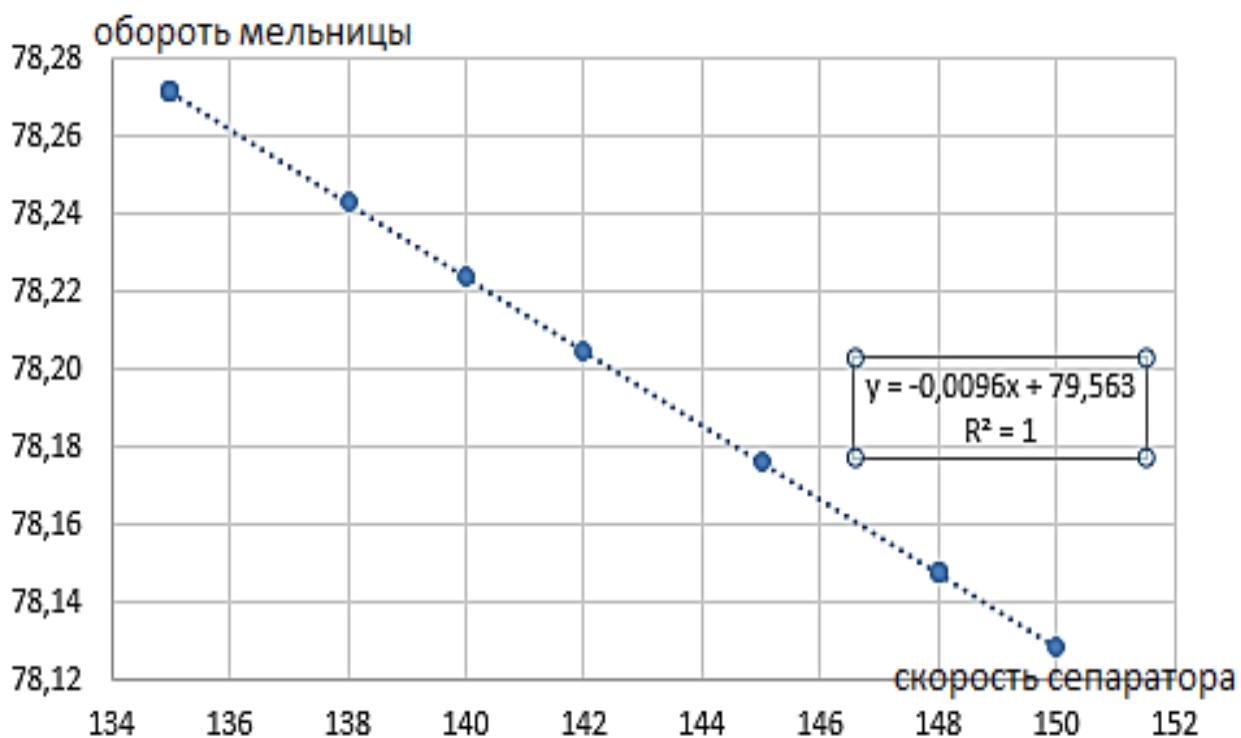


Рисунок 2.10. График зависимости обороты мельницы от скорости сепаратора после нормализации данных

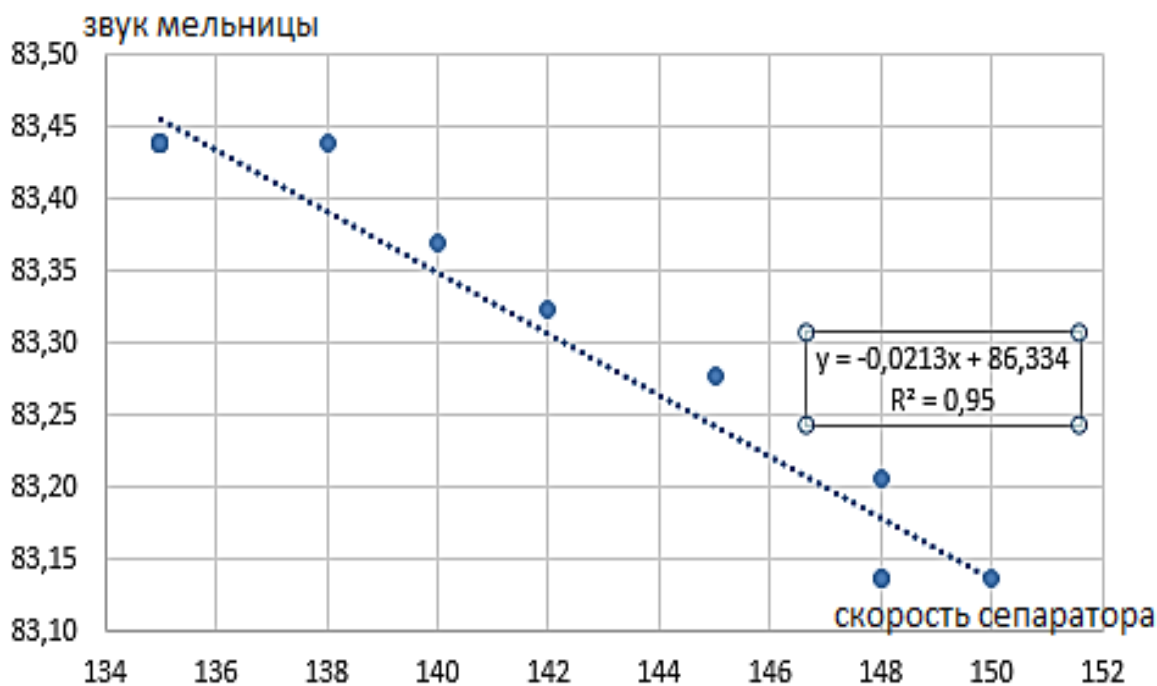


Рисунок 2.11. График зависимости звук мельницы от скорости сепаратора после нормализации данных

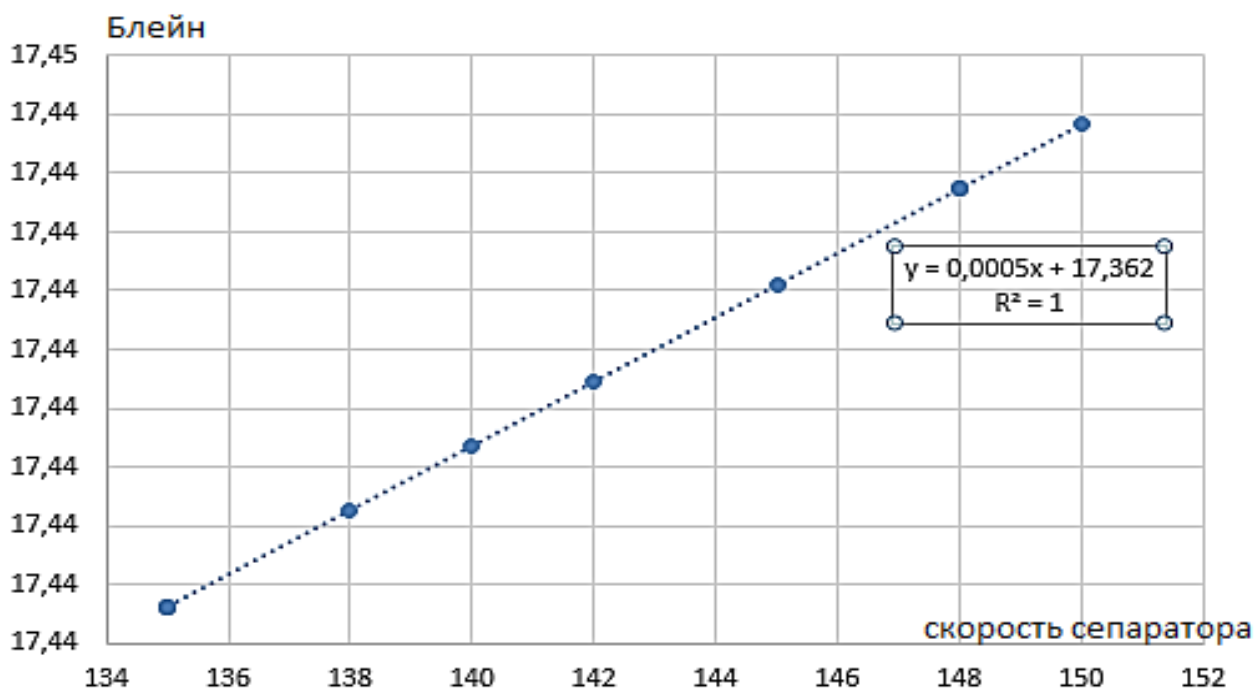


Рисунок 2.12. График зависимости степени тонкости помола (Блейн, D') от скорости сепаратора после нормализации данных

Рассматриваем зависимость подача гипса с другими параметрами помола после нормализации данных.

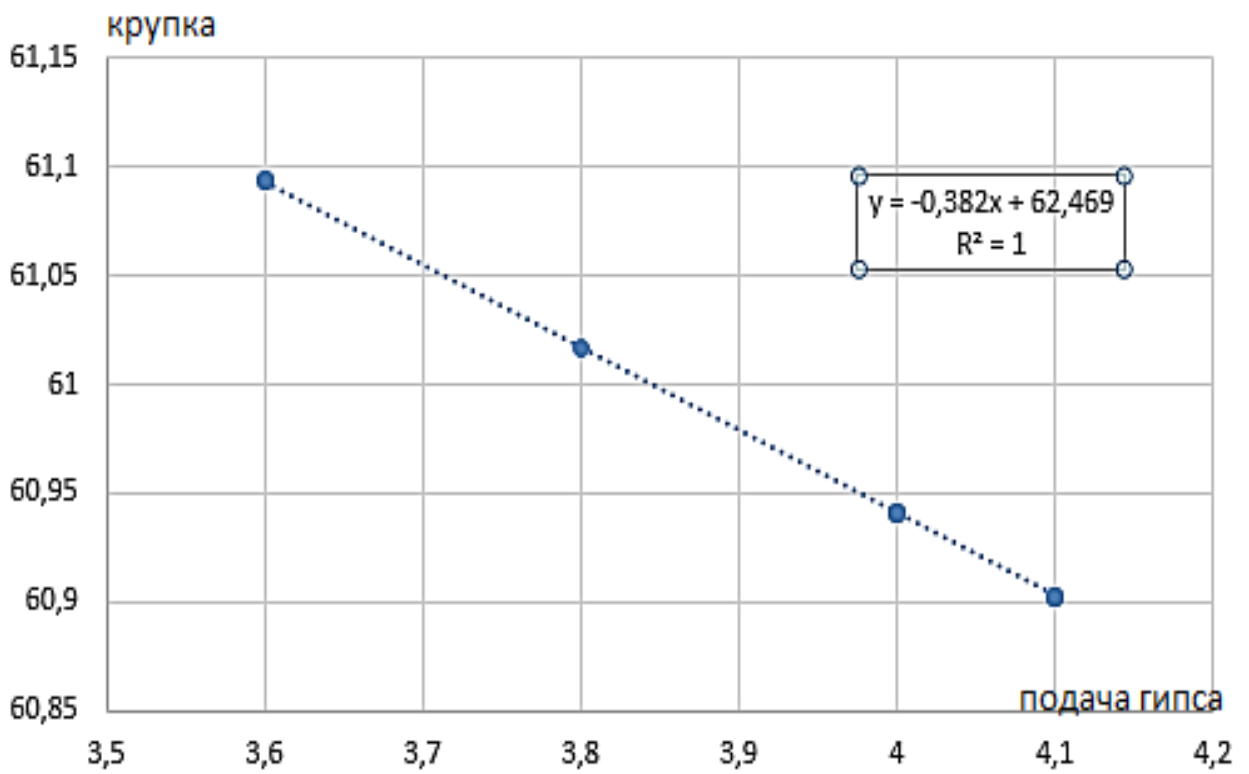


Рисунок 2.13. График зависимости крупки от подачи гипса после нормализации данных

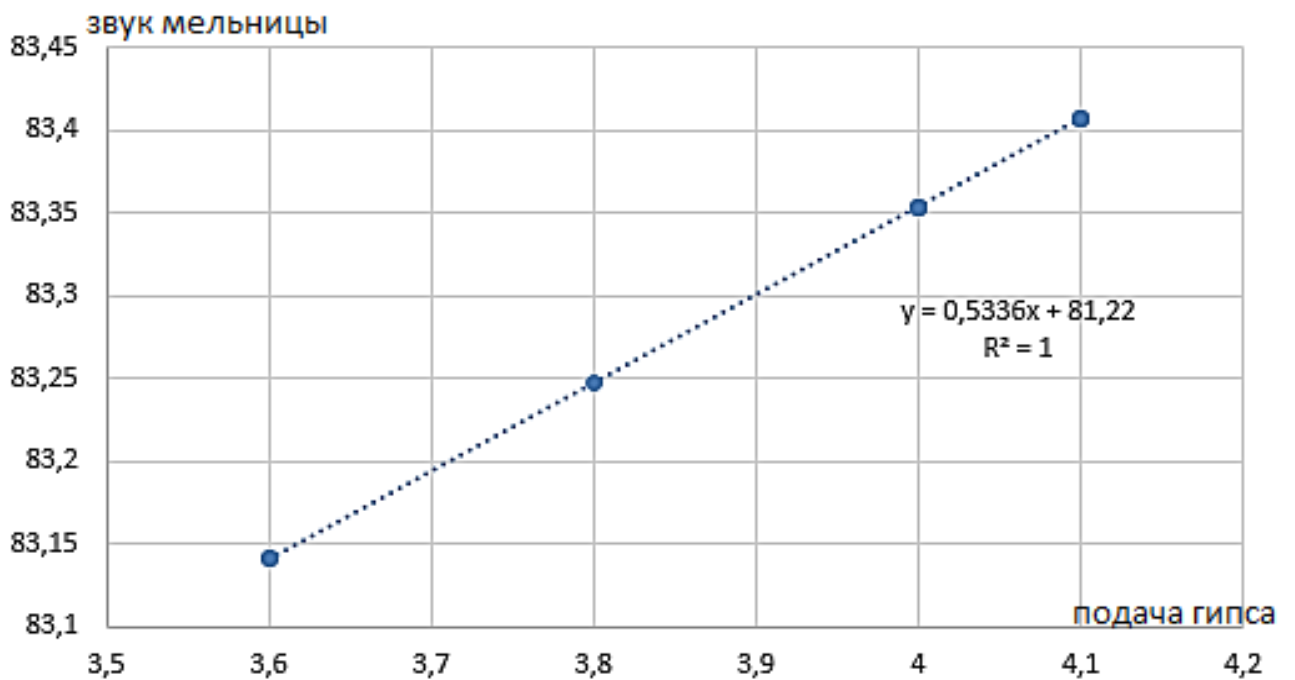


Рисунок 2.14. График зависимости звук мельницы от подачи гипса после нормализации данных

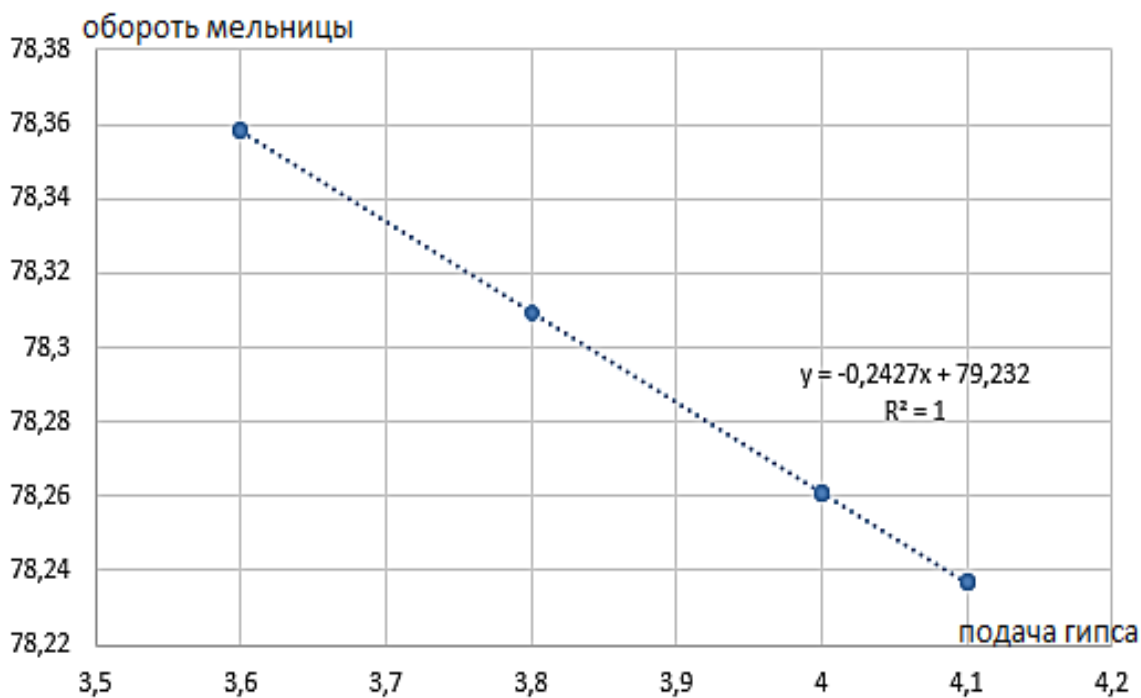


Рисунок 2.15. График зависимости оборот мельницы от подачи гипса после нормализации данных

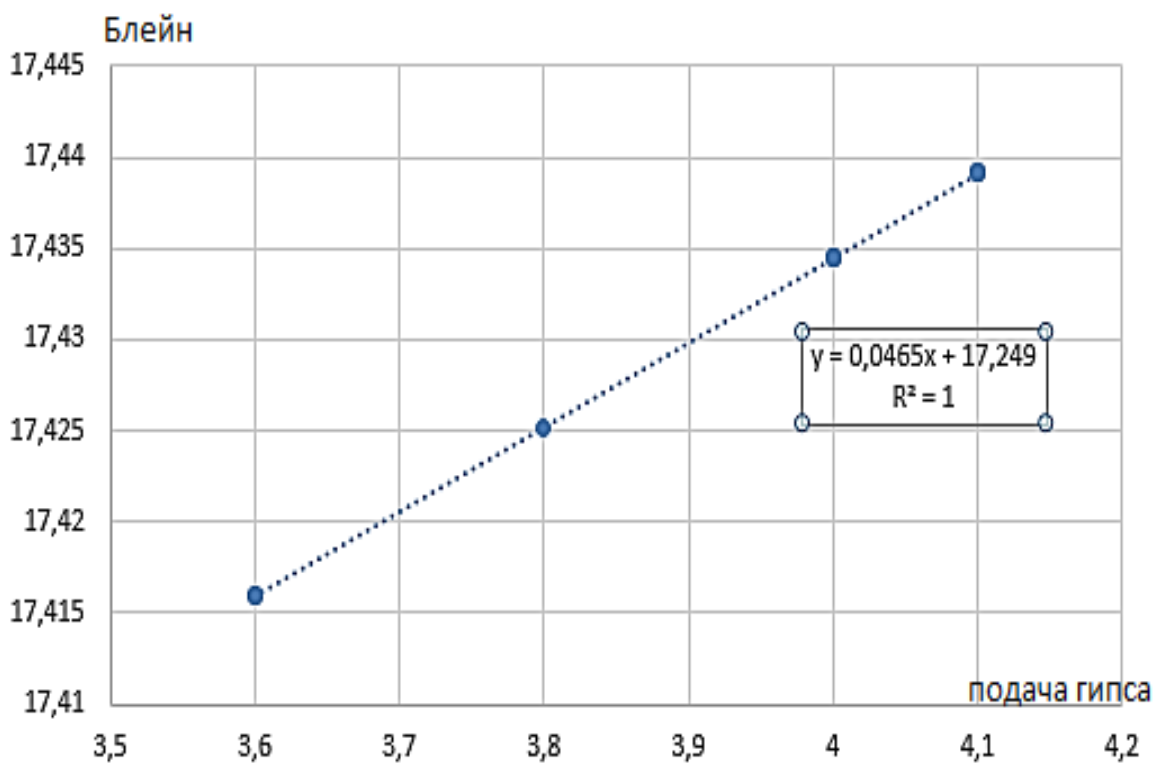


Рисунок 2.16. График зависимости степени тонкости помола (Блейн, D') от подачи гипса после нормализации данных

## 2.5. Настройка нейронных сети на нормализованных генеральных данных

Вторим этапом предлагаемое методики является настройка нейронных сети на нормализованных генеральных данных. Для решение данной задачи могут быть использованы различные нейронные сети. В данное работе прилагается алгоритм настройки сети на основе модифицированного метода обратного распространение ошибки, который учитывает наличие двух статистических данных: генеральный совокупности данных и локальных текущих данных.

Постановки задач идентификации реальных объектов на основе использования нейронных сетей с учетом локальной текущей статистики в общем случай является некорректной. Это возникает, например, в случае, если необходимая информация для устойчивого решения задачи отсутствует в обучающей выборке данных. Такая постановка задачи является типовой для задач оперативного управления. В задачах оперативного управления нестационарными объектами, параметры которых могут меняться в существенных пределах в течении короткого промежутка времени, необходим специальный алгоритм настройки. В этих случаях необходимо производить регуляризацию постановки задачи настройки нейронной сети.

Подобный алгоритм может быть построен, например, на основе решения задачи минимизации следующего квадратичного критерия точности:

$$\min_{\{w_{kj}\}} Q_T, \quad Q_T = (1 - \alpha_R) E_{\text{вых}}^2 + \alpha_R Q_R, \quad (26a)$$

$$Q_R = 0,5 \sum_k \sum_j (w_{kj} - w_{kj}^{cp})^2. \quad (26b)$$

Здесь  $E_{\text{вых}}^2$  – среднеквадратическая ошибка нейронной сети,  $Q_R$  – регуляризирующая функция,  $w_{kj}$  – текущие настраиваемые веса нейронной сети,  $w_{kj}^{cp}$  – усредненные значения весов, определяемые на большой выборке данных при номинальных технических условиях,  $\alpha_R$  – удельный вес квадратичных

уклонений текущих значений весов  $w_{kj}$  нейронной сети от их номинальных значений  $w_{kj}^{cp}$ :  $\alpha_R \in [0, 1]$ .

$E_{\text{Вых}}^2$  – среднеквадратическую ошибку нейронной сети будем представлять в виде

$$E_{\text{вых}}^2 = 0,5 \sum_k (y_{ok} - y_k)^2, \quad (27)$$

где  $y_{ok}$  – требуемый выходной сигнал сети;  $y_k$  – наблюдаемый выходной сигнал.

Предположим, что комбинированный вход в нейронный элемент сети осуществляется на основе обычного суммирования

$$a_k = \sum_j w_{kj} x_j, \quad (28)$$

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 необходимо оценивать производную ошибки сети по вариациям настраиваемых весов. С этой целью вычисление ошибки сети будем осуществлять по формуле сложного дифференцирования

$$\frac{\partial E_{\text{вых}}^2}{\partial w_{kj}} = \frac{\partial E_{\text{вых}}^2}{\partial y_k} \frac{\partial y_k}{\partial a_k} \frac{\partial a_k}{\partial w_{kj}}. \quad (28)$$

Из (27) следует

$$\frac{\partial E_{\text{вых}}^2}{\partial y_k} = -(y_{ok} - y_k). \quad (29)$$

Положим выходные функции НЭ в общем виде

$$y_k = f_k(a_k). \quad (30)$$

Отсюда

$$\frac{\partial y_k}{\partial a_k} = f'_k(a_k) \quad (31)$$

Из (28) следует

$$\frac{\partial a_k}{\partial w_{kj}} = x_j \quad (32)$$

Обозначим

$$\delta_k = \frac{\partial E_{\text{вых}}^2}{\partial y_k} \frac{\partial y_k}{\partial a_k} \quad (33)$$

Из (29), (31) следует

$$\delta_k = -f'_k(a_k)(y_{ok} - y_k) \quad (34)$$

В итоге частная производная по настраиваемым весам будет иметь вид

$$\frac{\partial E_{\text{вых}}^2}{\partial w_{kj}} = \delta_k x_j \quad (35)$$

Для настройки весов воспользуемся градиентным методом. В этом случае формула коррекции весов будет иметь вид

$$\Delta w_{kj} = -\gamma \delta_k x_j \quad (36)$$

Формула коррекции весов (36) используется для выходных НЭ сети. Для скрытых элементов сети данная формула не применима, так как для них не определена величина ошибки сети. В методе обратного распространения ошибки для скрытых элементов сети используется специальная формула для оценки величины  $\delta$  сети:

$$\delta_j = f'_j(a_j) \sum_k \delta_k w_{kj} \quad (37)$$

Смысл формулы (37) состоит в том, что оценка  $\delta_j$  для  $j$ -го НЭ принимается взвешенной суммой оценок  $\delta_k$  для следующего за ним  $k$ -го слоя НЭ. При этом вес каждой оценки  $\delta_k$  принимается пропорциональным весу сигнальной связи  $w_{kj}$ . На этой основе ошибка выходного слоя, как бы

«отображается» на предшествующий скрытый слой. В этом и состоит суть метода обратного распространения ошибки.

В итоге формула коррекции весов для скрытых слоев будет иметь вид

$$\Delta w_{ji} = -\gamma \delta_j x_i. \quad (36)$$

В целом процедура коррекции весов носит итерационный характер, распространяясь по слоям от выхода нейронной сети к ее входу.

Настройка нейронной сети по критерию (37) происходит в два этапа.

На первом этапе формируется база данных большой выборки, соответствующая номинальным режимам функционирования рассматриваемого объекта управления. Здесь необходимо отметить, что объекты управления, например, в технике, как правило, характеризуются обширной предысторией изучения. Эти знания состоят из данных, полученных на основе ранее проведенных экспериментальных и теоретических исследований, практики эксплуатации, физических законов, моделирования и иных источников достоверной информации. Предположим, что эти данные в совокупности являются достаточно полными и определяют в совокупности корректную постановку задачи настройки нейронной сети. В этом случае настройка нейронной сети осуществляется при значении коэффициента регуляризации  $\alpha_R = 0$ , например, по выше рассмотренному критерию

$$\min_{\{w_{kj}\}} E_{\text{вых}}^2, \quad E_{\text{вых}}^2 = 0,5 \sum_k (y_{0k} - y_k)^2, \quad (38)$$

где  $y_{0k}$  – требуемый выходной сигнал сети,  $y_k$  – наблюдаемый выходной сигнал. В результате настройки определяются номинальные значения весов  $w_{kj}^{cp}$  нейронной сети.

На втором этапе настройка нейронной сети осуществляется уже в оперативном режиме на текущих данных по критерию (37). С этой целью используется градиентный метод минимизации критерия (37) по рекуррентным формулам



$$w_{kj,s} = w_{kj,s-1} - \gamma \frac{\partial Q_T(w_{kj,s-1})}{\partial w_{kj}}, \quad s = 1, 2, \dots \quad (39a)$$

$$\frac{\partial Q_T(w_{kj,s-1})}{\partial w_{kj}} = (1 - \alpha_R) \frac{\partial E_{\text{вых}}^2(w_{kj,s-1})}{\partial w_{kj}} + \alpha_R (w_{kj,s-1} - w_{kj}^{cp}). \quad (39b)$$

Критическим моментом здесь является вычисление величины  $E_{\text{вых}}^2$  – среднеквадратической ошибки нейронной сети.

Так как объем оперативных данных является ограниченным, то среднеквадратическая ошибка определяется на основе выражения

$$E_{\text{вых}}^2 = 0,5 M_t \left\{ \sum_k (y_{0k} - y_k)^2 \right\}. \quad (40)$$

Здесь – оператор усреднения оперативных данных во времени. Оператор усреднения (40) может быть реализован разными способами.

Так оператор усреднения может быть реализован по формуле

$$M_t \{ \Delta y(t_r) \} = \frac{1}{n_\phi} \sum_t \Delta y(t_{r-t}), \quad (41a)$$

или рекуррентным выражением

$$M_t \{ \Delta y(t_r) \} = \frac{n_\phi}{n_\phi + 1} M_t \{ \Delta y(t_{r-1}) \} + \frac{1}{n_\phi + 1} \Delta y(t_r), \quad r = 1, 2, \dots \quad (41b)$$

В любом случае частная производная от (40) с учетом (28) – (35) будет иметь вид

$$\frac{\partial E_{\text{вых}}^2}{\partial w_{kj}} = M_t \left\{ - \sum_k (y_{0k} - y_k) \frac{\partial y_k}{\partial w_{kj}} \right\} = M_t \left\{ - \sum_k (y_{0k} - y_k) f'(a_k) x_j \right\} \quad (42)$$

Как и ранее вводим обозначения

$$\delta_k = -f'_k(a_k)(y_{0k} - y_k). \quad (43)$$

В итоге для (31) будем иметь

$$\frac{\partial E_{\text{вых}}^2}{\partial w_{kj}} = M_t \{ \delta_k x_j \}. \quad (44)$$

По аналогии с (37) – (39) здесь могут быть введены соотношения для промежуточных слоев сети

$$w_{ji,s} = w_{ji,s-1} - \gamma \frac{\partial Q_T(w_{ji,s-1})}{\partial w_{ji}}, \quad s = 1, 2, \dots \quad (45a)$$

$$\frac{\partial Q_T(w_{ji,s-1})}{\partial w_{ji}} = (1 - \alpha_R) \frac{\partial E_{вых}^2(w_{ji,s-1})}{\partial w_{ji}} + \alpha_R (w_{ji,s-1} - w_{ji}^{cp}). \quad (45b)$$

Рекуррентные соотношения (45), если они сходятся, дают корректное решение рассматриваемой задачи в оперативном режиме.

## 2.7. Процедура принятия оперативных решений на основе метода ограничений для задачи рациональной загрузки мельницы

Процедура принятия оперативных решений с технической точки зрения математически формулируется как задача согласования технических условий, которые математически представляются в виде системы неравенств

$$y_i^{\min} \leq y_i \leq y_i^{\max}, \quad (46)$$

$$y_i = f_i(x), \quad i \in I_{нер}. \quad (47)$$

Если система неравенств (46) – (49) является совместной, то поставленная задача согласования технических условий является разрешимой. В противном случае технические условия являются несовместными, и задача их согласования в обычном смысле решения не имеет. Постановка задачи согласования технических условий (46) – (47) в этом случае считается противоречивой.

Выделим из системы ограничений (46) технические условия, которые существенно препятствуют решению поставленной задачи. С этой целью назначим техническим условиям (46) определенные веса, которые отражают степень важности удовлетворения соответствующего условия [118]:

$$y_i^{\min} \leq y_i \leq y_i^{\max} : \alpha_i,$$

$$\alpha_i \geq 0, \quad \sum_{i \in I_{\text{нер}}} \alpha_i = 1, \quad i \in I_{\text{нер}}; \quad (48)$$

где  $\alpha_i$  – веса технических условий,  $I_{\text{нер}}$  – индексное множество условий (48).

Введем показатель, который характеризует степень совместности технических условий (48)

$$C = \sum_{i \in I_{\text{нер}}} \alpha_i \mu_i, \quad (49)$$

где  $\mu_i$  – характеристическая функция  $i$ -го технического условия ( $\mu_i = 1$ , если техническое условие  $y_i^- \leq y_i \leq y_i^+$  выполняется, и  $\mu_i = 0$  в противном случае).

В силу соотношений (47) показатель (48) определен на векторе значений режимных параметров  $\mathbf{x}$  :

$$C(\mathbf{x}) = \sum_{i \in I_{\text{нер}}} \alpha_i \mu_i(\mathbf{x}), \quad (50)$$

На основе введенного показателя (50) согласование системы взвешенных технических условий (48) – (47) можно представить, как решение экстремальной задачи [118]

$$\max_{(\mathbf{x})} C(\mathbf{x}). \quad (51)$$

Если система взвешенных технических условий (48) - (47) совместна, то

$$\max_{(\mathbf{x})} C(\mathbf{x}) = C(\mathbf{x}_{\text{доп}}) = 1, \quad (52)$$

при этом веса технических условий на решение не влияют.

Иначе обстоит дело при несовместной системе технических условий. В этом случае решение экстремальной задачи (51) выделяет максимально-совместную подсистему технических условий

$$y_i^{\min} \leq y_i \leq y_i^{\max} : \alpha_i, \quad i \in I_{\text{нер}}^{\max} \quad (53)$$

для которых  $\mu_i(\mathbf{x}_{\text{доп}}) = 1$ . Здесь  $I_{\text{нер}}^{\max}$  – индексное множество выделенной максимально-совместной подсистемы технических условий [118].

Смысл максимально-совместной подсистемы (52) состоит в том, что она определяет допустимое решение задачи, удовлетворяющее наиболее важным условиям. При этом условия, которые противоречат полученному решению, из критерия (51) исключаются по признаку  $\mu_i = 0$ .

Согласование противоречивых технических условий решаемой задачи может быть получено с использованием различных подходов [133].

Наиболее просто согласование рассматриваемых условий осуществляется на основе метода уступок. При этом, например, в качестве допустимых принимаются значения режимных параметров объекта управления, которые получаются в результате решения задачи (51):

$$y_{i,\text{доп}} = f_i(\mathbf{x}_{\text{доп}}), \quad i \in I_{\text{нер}} \setminus I_{\text{нер}}^{\max}. \quad (54)$$

В общем случае процедура согласования технических условий решаемой задачи может осуществляться в интерактивном режиме, когда на каждом шаге согласования осуществляются определенные уступки по ограничениям (48), а также изменяются веса ограничений. При этом, соответственно, решается задача (51), которая формально дает ответ на вопрос: является согласуемая постановка задачи противоречивой или нет? В итоге указанная процедура приводит к согласованной постановке задачи выбора решения. В общем случае разрешение противоречий осуществляется на основе интерактивной процедуры принятия решений [118].

---

Применительно к решению задачи оперативного управления мельницы особенностью задачи 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 подачи гипса  $u_1$  и  $u_2$  - число оборота сепаратора. Выходными параметрами являются множество показателей: удельный расход электроэнергии, крупка, звук мельницы, скорость вращения мельница, Блейн. Ограничения на показатели

$$a_i \leq y_i(u_1, u_2) \leq b_i; \quad (55)$$

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

$$y_i = h_i(u_1, u_2), \quad (56)$$

С учетом (57) и (58) можно получить

$$a_i \leq h_i(u_1, u_2) \leq b_i; \quad i \in 1, \dots, 5 \quad (57)$$

В итоге рациональный выбор параметров загрузки мельницы состоит в формальном решении системы неравенств (57).

Для решения, система неравенств приводится к канонической форме

$$h_i(u_1, u_2) - b_i \leq 0, \quad (58a)$$

$$a_i - h_i(u_1, u_2) \leq 0, \quad (58b)$$

Формально неравенство (60) можно написать в следующем виде

$$f_i(u_1, u_2) \leq 0, \quad (59)$$

В общем случае система неравенств (59) являются несовместные. Поэтому решение задачи выбора рационального выбора параметров загрузки мельницы математически сводится к решению системы несовместных неравенств.

$$f_i(u_i) \leq 0, \quad i \in I_{\text{нер}} \quad (60)$$

Здесь  $I_{\text{нер}}$  - множество значений индексов неравенств соответственно;  $u_i$  - вектор искомых параметров;  $f_i(u_i)$  - монотонные, непрерывные и дифференцируемые функции. Необходимо определить максимально совместную подсистему неравенств (60) по критерию

$$\max_{(u_1, u_2)} C(u_1, u_2), \quad C(u_1, u_2) = \Phi(\mu(u_1, u_2)), \quad (61)$$

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 (61) имеет вид

$$C(u_1, u_2) = \sum_{i=1}^5 \alpha_i \mu_i(u_1, u_2), \quad (62)$$

где  $\alpha_i$  - весовые коэффициенты, удовлетворяющие условиям

$$\forall_i \alpha_i \geq 0 \quad \sum_{i=1}^5 \alpha_i = 1. \quad (63)$$

Решение системы неравенств (61) по критерию (63) позволяет выделить среди всех максимально совместных подсистем системы (61) 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 (63), (61) выделяет максимально совместную подсистему с максимальным числом неравенств. В общем случае, когда рассматривается задача (61), (62), соответствующее решение позволяет выделить максимально совместную структуру неравенств, оптимальную по обобщенному критерию (61) [134].

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

$$\mu \xrightarrow{\phi_1} C, \mu = (\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n)^T, \quad (64)$$

где

$$\mu_j = \begin{cases} 1, & \text{если } y \in D_j; \\ 0, & \text{если } y_j \notin D_j; \end{cases} \quad j = 1, 2, \dots, n. \quad (65)$$

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  $y_j$ , 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  $C^P(\ell_n)$  будет меньше ожидаемого  $C_{\max}^{\text{ож}}$ . Поэтому полученное решение  $u_1^{\text{opt}}$  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 сосредоточить на этой цели свое внимание. В результате изменится структура предпочтений ЛПР, соответственно изменится и целевая функция задачи:

$$\mu \xrightarrow{\Phi_2} C. \quad (66)$$

Решение поставленной задачи с измененной структурой целевой функции позволит получить следующее оптимальное решение  $u_2^{opt}$ , 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, 135].

Процесс изменения структуры целевой функции и повторные решения задачи могут итеративно повторяться до тех пор, пока на совокупности полученных частных решений  $\{u_1^{opt}, u_2^{opt}\}$  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 [135].

## Выводы к главе 2

1. Предложена процедура идентификации процесса помола шихты в цементном производстве, состоящая из трех этапов: на первом этапе происходит нормализации генеральной совокупности данных, на втором этапе - настройка нейронных сети на нормализованных генеральной совокупности данных, на третьем этапе коррекции полученного решения задачи на основе метода регуляризации. Подобный подход позволяет решать некорректно поставленные задачи в оперативном управлении с использованием нейронных сетей.

2. Для настройки нейронных сети при некорректных исходных данных предложен алгоритм обратного распространения ошибки с использованием регуляризации некорректно поставленных задач, позволяющий корректно решать задачу идентификации зависимостей параметров и показателей помола в оперативном режиме.

3. Предложено решение задачи рационального выбора параметров загрузки мельницы с применением процедуры принятия оперативных решений методом взвешенных целевых ограничений.

## ГЛАВА 3. АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ШИХТЫ

### 3.1. Процесс измельчения, как объект управления

Процесс измельчения является одним из центральных процессов, которые определяют технико-экономические показатели работы цементного завода. Достаточно сказать, что около 15-20% общего объёма информации при решении задач автоматизированного управления цементным производством приходится на процесс измельчения.

В процессе автоматизированного измельчения требуется решать ряд ниже перечисленных задач.

**А) Автоматизированный контроль технологических параметров цикла измельчения:**

1. скорость сепаратора;
2. звук мельницы в процесс измельчения;
3. гранулометрический состав продукта измельчения (качества по Блейну);
4. скорость вращения двигателя мельницы;
5. загрузка мельницы дробящей средой;
6. удельный расход электроэнергии;

**Б) Автоматизированное управление циклом измельчения:**

1. стабилизация технологических параметров цикла;
2. оптимизация работа цикла:
  - максимальный выход готового продукта, удовлетворяющий показателям качества;
  - минимум потребления электрической энергии.

Прежде всего необходимо отметить, что многие предприятия цементной промышленности в настоящее время охвачены автоматизацией в основном

первого уровня и ограничиваются решением задач посредством введения контуров стабилизации:

- расхода сырья в мельницах;
- пропорций параметров измельчения за счет подач гипса и регулирования скоростей вращения сепаратора.

В более 90% случаев на этом и ограничивается автоматизация процесса измельчения.

Решение задач повышения эффективности функционирования технологического комплекса в целом можно достичь за счет мероприятий по автоматизации процесса помола на втором уровне. Это достигается за счет регулирования подачи гипса и скорости вращения сепаратора на основе решении многокритериальной задачи с помощью, специализированной СППР.

### 3.2. Уровни АСУ ТП мельницы

Мероприятия по повышению эффективности управления процессом измельчения шихты в мельницы подразделяются на 3 уровня:

- уровень - технологического процесса;
- контроллерный уровень - контроль и управления технологическим процессом;
- уровень человеко-машинный интерфейса, СППР.

На рисунке 3.2.1. схематически представлены уровни автоматизации технологического процесса помола.

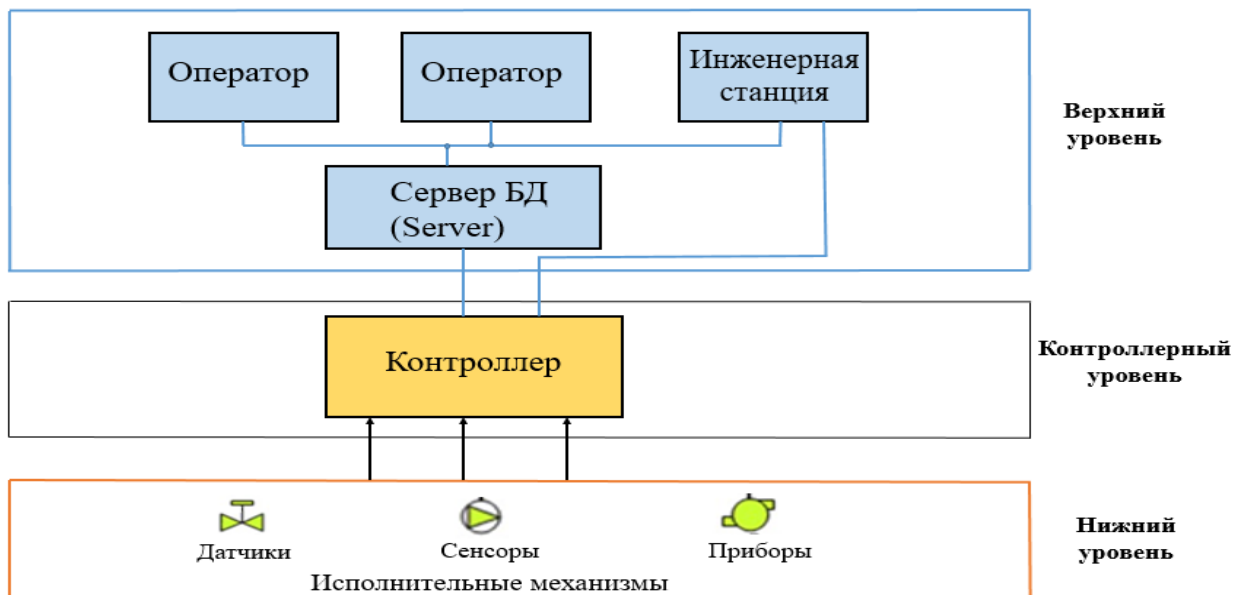


Рисунок 3.1. Уровни АСУ ТП

### 3.2.1. Уровень технологического процесса

На нулевом уровне автоматизации (уровень технологического процесса используется исполнительные механизмы).

Оборудованиями данного уровня являются первичные преобразователи датчики, сенсоры, приборы и механизмы.

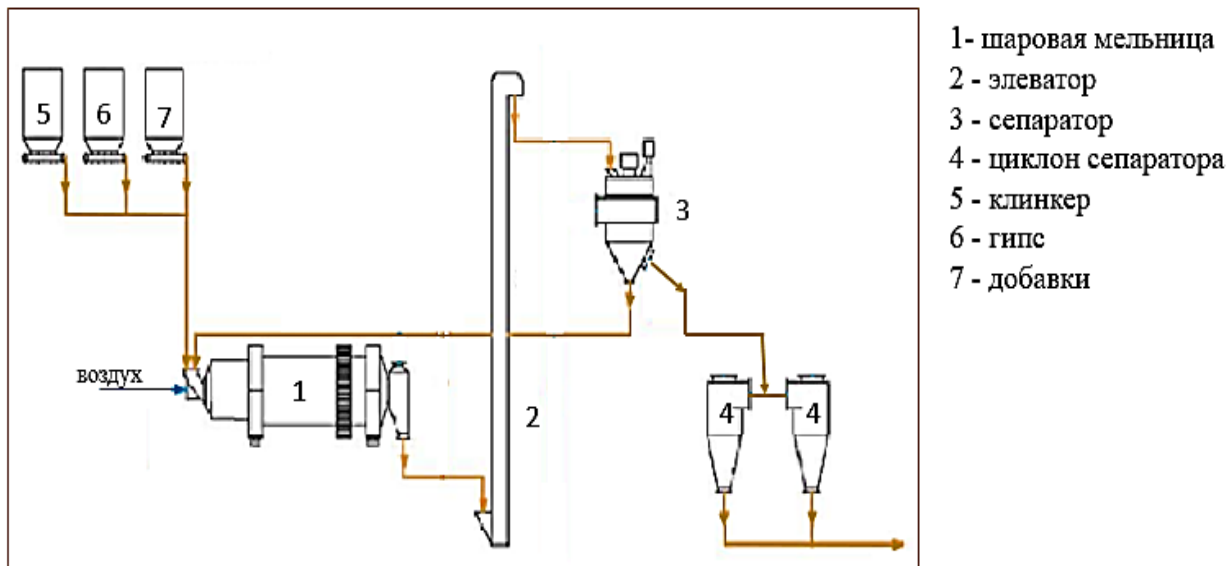


Рисунок 3.2. Замкнутый цикл измельчения

На рисунке 3.2. приведена общепринятая схема помола цемента, состоящая из шаровой мельницы, элеватора, сепаратора, бункеров и дозаторов.

Принцип работы осуществляется следующим образом поток сырья (обыкновенный клинкер или гипс) поступает во шаровую мельницу для замера весового потока используются (тензодатчики). Полученная информация о весе передается в сервер для дальнейшей обработки.

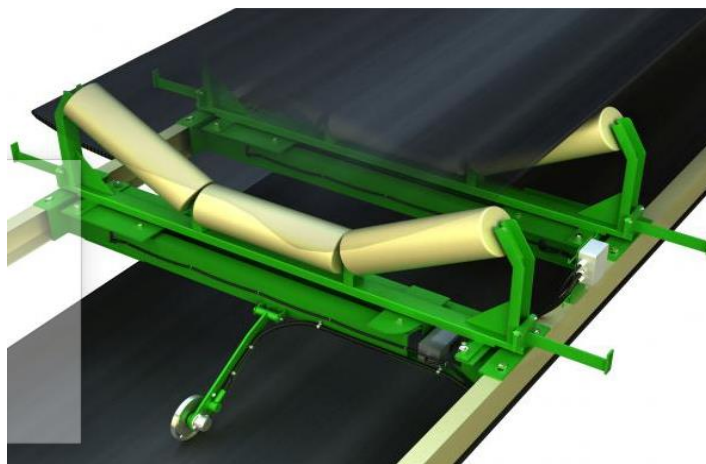


Рисунок 3.3. Тензодатчик

Поступившая сырье в шаровую мельницу измельчается с помощью шаров в результате разрушения частиц. В ходе разрушения издаются звуки, которые улавливаются так называемыми датчиками «электронные уши», полученную информацию данные датчики передают на следующий уровень для дальнейшей обработки. Вращения мельниц осуществляется за счёт электродвигателей. Учитывая, что электродвигатель является одним из основной частью шаровой мельницы необходимость контроля расхода электроэнергии и скорости вращения стоит на приоритетном месте, для которых предусмотрен измерительный прибор, выполняющий эти действия.

Измельченный материал с помощью элеватора транспортируется в сепаратор. В свою очередь в сепараторе измельченный материал разделяется на две фракции. Более крупные фракции возвращаются в шаровую мельницу для повторного помола, тонкие же фракции выходят в качестве готовой продукции.

Каждые два часа из готового продукта берут пробу в лаборатории для определения качества цемента и результаты вносятся в электронную таблицу.

Таблица 3.1

Данные анализа лаборатории по % гипсов в цементе

Зона	значение		8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	ср
3+	3,3	3,45												
2+	3,0	3,29												
1-	2,5	2,99	2,73		2,64		2,84		2,79		2,83		2,72	2,76
2-	2,2	2,49												
3-	1,95	2,19												
Ввод значения			2,73		2,64		2,84		2,79		2,83		2,72	2,76

Красная зона (3±) – если результат анализа попадает в данную строку, то оператору необходимо останавливать производство и в следствие недостатки либо избытки гипса в состав готового продукта уточнять причину.

Серая зона (2±) – при попадании результата анализа в данную строку оператор убавит или прибавит подачу гипса в мельницу.

Зеленная зона (1-) – означает что, подача гипса стабильна в пределах допуска.

### 3.2.2. Контроллерный уровень

Контроллер применяется для регулировки подачи материала. Как уже говорилось, подаваемый материал в шаровую мельницу состоит из: клинкера (75%), гипса (5%) и других добавок (20%) (например, для производства портландцемента). При изменении одного из параметров контроллер должен автоматический регулировать процентное соотношение с другими параметрами.

### 3.2.3. Уровень человеко-машинного интерфейса

На уровне человеко-машинного интерфейса происходит визуализация необходимых данных о значениях параметров процесса помола. По результатам данной работе прилагается дополнительно использовать специализированную систему поддержки принятия решений по оперативному управлению режимами работы мельницы (СППР процесса помола). На данном уровне информация о процессе измельчения представляется в виде соответствующей экранной формы, операторы наблюдают за процессом измельчения, если необходимо какое-то изменение, то они вводят изменение в систему.

### 3.3. Мониторинг процесса измельчения

Автоматический контроль и мониторинг являются частью АСУ ТП. Мониторинг процессам измельчения происходит в реальном времени в качестве устройства мониторинга применяют датчики. Он включает в себя контроль потока гипса, скорость сепаратора, повторного помола, удельный расхода электроэнергии, звук мельницы, оборот двигателя мельницы и качество продукта (Блейн). Мониторинг представляется не только в качестве сбора информации о состоянии объекта, но и для контроля режимных параметров технологического процесса.

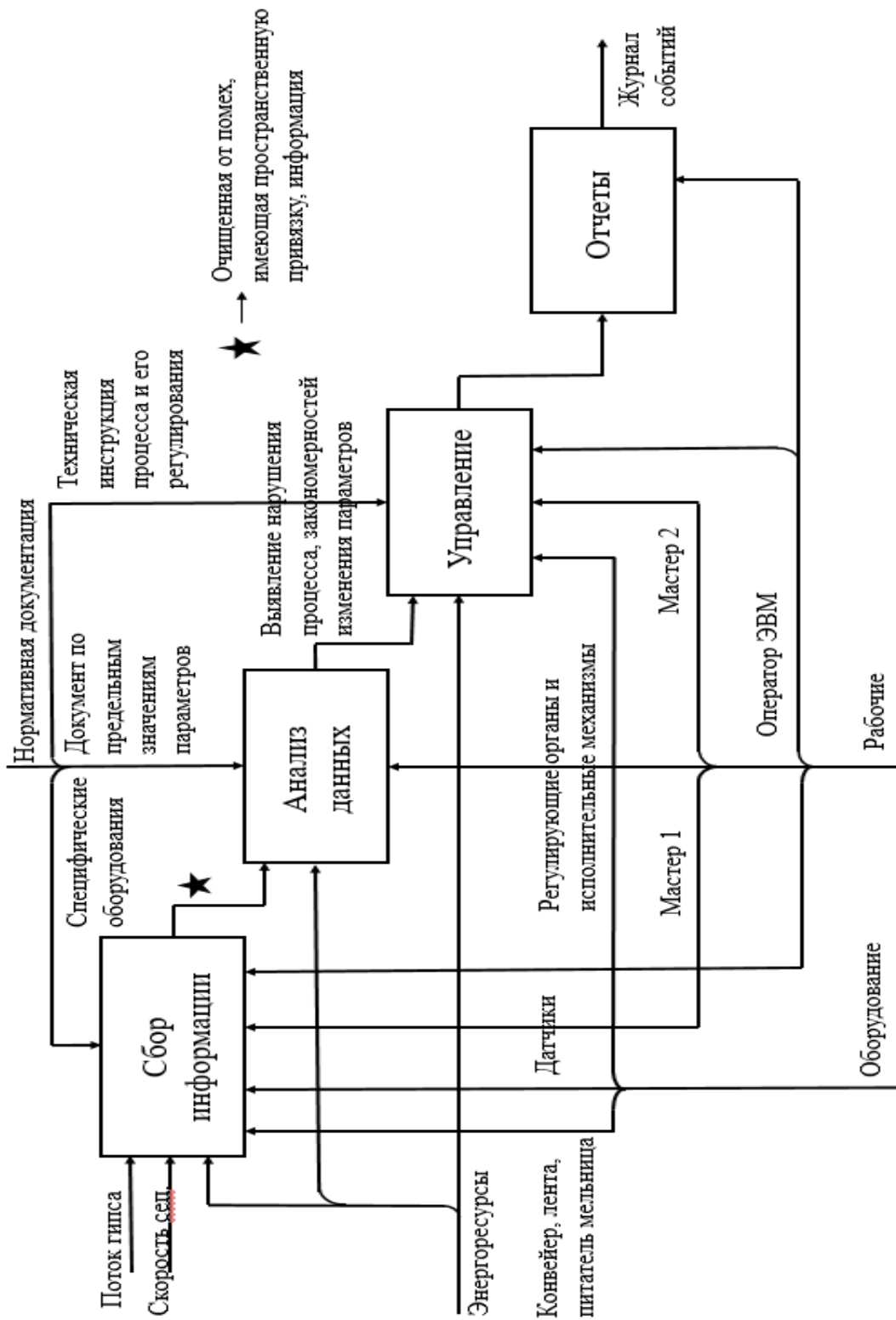


Рисунок 3.4. Сбор информации



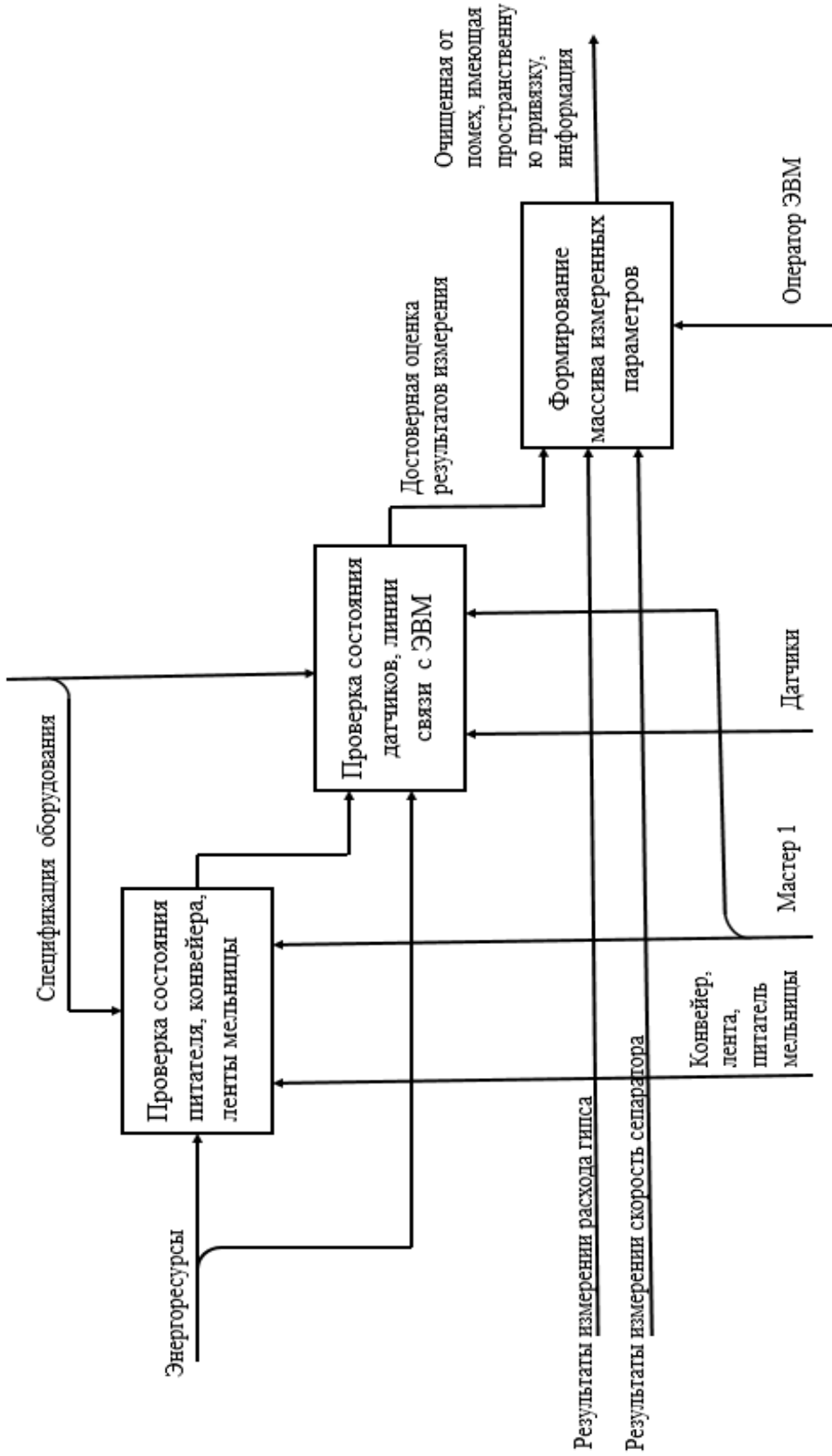


Рисунок 3.5. Мониторинг процесс измельчения

### 3.4. Автоматизированное рабочее место оператора

#### Функциональные возможности АРМ оператора

Рабочие места оператора используются для контроля всех операций системы, а также для выполнения управляющих воздействий и настройки параметров. Эти рабочие станции операторов обычно называют «клиентами», поскольку они получают свои текущие и исторические данные с «серверного» компьютера. Обычно имеется несколько рабочих станций оператора, каждая из которых содержит все графические изображения процесса и отображение исторических тенденций для системы. Пользователи системы SCADA могут войти в систему через эти рабочие станции.

Некоторые из операций, выполняемых с помощью рабочих станций Оператора, перечислены ниже; более подробная информация об отображениях, необходимых для этих действий, будет предоставлена позже в этой главе:

- вход в систему и выход из нее с использованием паролей и имен пользователей;
- отображение процесса вызова для просмотра операций в системе;
- включение режимов управления различным оборудованием в системе; например, ручной и автоматический режимы, ввод оборудования в эксплуатацию или отключение;
- изменение параметров уставки с соответствующим допуском безопасности;
- выполнение действий ручного управления для оборудования, таких как запуск / остановка и открытие / закрытие;
- просмотр исторических трендов и перенос данных в другие файлы для экспорта;
- просмотр текущей сводки сигналов тревоги для определения условий, требующих внимания;
- просмотр сводки тревог / событий для просмотра хронологической последовательности событий.

Рабочие места оператора обеспечивают пользовательский интерфейс для системы SCADA. Пользователи могут осуществлять контроль над оборудованием, а также вызывать дисплеи, которые показывают текущую и историческую информацию о любом аспекте системы SCADA.

Во время управления технологическим процессом на экране АРМа оператора располагается общая экранная форма. Она помогает человеку-оператору легче воспринимать информацию об основных показателях процесса и упрощает процесс управления, поэтому экранная форма должна содержать только ту информацию, которая необходима оператору, чтобы не перегружать его лишними данными.

Экранная форма СППР, разрабатываемая в данной работе, выполняет роль советчика оператора шаровой мельницы. На основе спрогнозированных значений выходных показателей технологического процесса, алгоритм прописанный в экранной форме определяет параметры загрузки и значение скорости сепаратора, рекомендуется задать оператору, чтобы обеспечить оптимальный режим работы шаровой мельницы в замкнутом цикле.

### 3.5. Процедура принятия решений при оперативном управлении

На начальном этапе лицо, принимающее решения (ЛПР), формулирует набор 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.

В экранную форму загружаются прогнозные значения для каждого выходного показателя при разных определенных значениях входных показателей. Кроме того, здесь располагаются оценки экспертов, с помощью которых определяется коэффициент значимости для каждого выходного показателя. Также по каждому из выходов системы представлены интервалы значений, при

попадании значения показателя в этот промежуток режим работы оборудования считается оптимальным, но только относительно одного показателя. Данные интервалы задаются технологами предприятия. Для нахождения оптимального режима по всем показателям программа составляет матрицу, состоящую из нулей и единиц («0», если значение показателя не попало в интервал, «1» если попало). Далее составленная матрица построчно умножается на вектор коэффициентов значимости и суммируется построчно. Строка с максимальной суммой соответствует оптимальному режиму: программа выделяет цветом значения входных показателей процесса из этой строки, которые рекомендуется задать оператору. Определение оптимальное значение представлено на рисунок 3.6.

Далее если полученные значения соответствуют ожиданиям оператора алгоритм принятия решения заканчивается. В противном случае должны быть изменены расчет суммарного веса по каждой строке.

<u>Max</u>										
67	<b>α</b>	38,6	<b>α</b>	85	<b>α</b>	80	<b>α</b>	17,5	<b>α</b>	
<u>Min</u>										
47	<b>0,17</b>	36	<b>0,21</b>	80	<b>0,19</b>	75	<b>0,23</b>	16,5	<b>0,2</b>	
C										
Крупка	<b>μ</b>	<u>Уд.рас.эз</u>	<b>μ</b>	<u>Звук. мел</u>	<b>μ</b>	<u>Об.мот.</u>	<b>μ</b>	<b>D'</b>	<b>μ</b>	
59	<b>1</b>	38	<b>1</b>	82	<b>1</b>	80,3	<b>0</b>	16,8	<b>1</b>	<b>0,56</b>
68	<b>0</b>	38,1	<b>1</b>	83,3	<b>1</b>	79,1	<b>1</b>	16,9	<b>1</b>	<b>0,62</b>
69	<b>0</b>	38,3	<b>1</b>	81,9	<b>1</b>	79,3	<b>1</b>	16,7	<b>1</b>	<b>0,62</b>
68	<b>0</b>	38	<b>1</b>	82,7	<b>1</b>	79,3	<b>1</b>	16,5	<b>1</b>	<b>0,62</b>
56	<b>1</b>	41	<b>0</b>	85,4	<b>0</b>	75,8	<b>1</b>	16,9	<b>1</b>	<b>0,6</b>
62	<b>1</b>	43	<b>0</b>	90	<b>0</b>	75	<b>1</b>	16,7	<b>1</b>	<b>0,6</b>
40	<b>0</b>	41,2	<b>0</b>	87,7	<b>0</b>	76,7	<b>1</b>	18,5	<b>0</b>	<b>0,23</b>
40	<b>0</b>	39	<b>0</b>	86,9	<b>0</b>	81,7	<b>0</b>	18,2	<b>0</b>	<b>0</b>
56	<b>1</b>	39,1	<b>0</b>	84	<b>1</b>	80,4	<b>0</b>	17,6	<b>0</b>	<b>0,36</b>
49	<b>1</b>	42	<b>0</b>	83,4	<b>1</b>	80,1	<b>0</b>	17,2	<b>1</b>	<b>0,56</b>
71	<b>0</b>	42,1	<b>0</b>	82,1	<b>1</b>	79,1	<b>1</b>	17,5	<b>1</b>	<b>0,62</b>
59	<b>1</b>	38,3	<b>1</b>	82,9	<b>1</b>	79,2	<b>1</b>	17,3	<b>1</b>	<b>1</b>
55	<b>1</b>	38,5	<b>1</b>	83,3	<b>1</b>	81	<b>0</b>	16,8	<b>1</b>	<b>0,77</b>
72	<b>0</b>	38,1	<b>1</b>	86,1	<b>0</b>	74	<b>0</b>	17,1	<b>1</b>	<b>0,2</b>
55	<b>1</b>	39	<b>0</b>	85	<b>1</b>	75,9	<b>1</b>	17,6	<b>0</b>	<b>0,59</b>
53	<b>1</b>	39,4	<b>0</b>	85,7	<b>0</b>	76,1	<b>1</b>	17,4	<b>1</b>	<b>0,6</b>
55	<b>1</b>	40,1	<b>0</b>	78,3	<b>0</b>	80,4	<b>0</b>	17,2	<b>1</b>	<b>0,37</b>
54	<b>1</b>	40	<b>0</b>	81,3	<b>1</b>	78,5	<b>1</b>	17,6	<b>0</b>	<b>0,59</b>
47	<b>1</b>	42	<b>0</b>	80,7	<b>1</b>	78,8	<b>1</b>	17,7	<b>0</b>	<b>0,59</b>
42	<b>0</b>	42,7	<b>0</b>	84	<b>1</b>	80,4	<b>0</b>	17,4	<b>1</b>	<b>0,39</b>
50	<b>1</b>	43	<b>0</b>	79,3	<b>0</b>	78,8	<b>1</b>	16,9	<b>1</b>	<b>0,6</b>
48	<b>1</b>	41,9	<b>0</b>	78,1	<b>0</b>	79,1	<b>1</b>	17,3	<b>1</b>	<b>0,6</b>
49	<b>1</b>	38,7	<b>0</b>	78,3	<b>0</b>	79,2	<b>1</b>	17,4	<b>1</b>	<b>0,6</b>
47	<b>1</b>	38,5	<b>1</b>	78,1	<b>0</b>	79	<b>1</b>	17,4	<b>1</b>	<b>0,6</b>

Рисунок 3.6. Определение оптимальное значение

### Выводы к главе 3

1. Проведено исследование цикла измельчения как объекта управления для автоматизации технологического процесса помола клинкера в замкнутом цикле. На основе проведенного исследования разработана автоматизированное рабочее места оператора мельницы в цементном производстве.

2. Для решения задач эффективного управления процессом измельчения клинкера в шаровых мельницах замкнутого цикла предложена интерактивная процедура принятия управляющих решений, основанная на формировании текущих требований к значениям режимных параметров, определяемых в автоматизированной СППР на основе идентификации характеристик процесса с использованием нейронной сети в режиме реального времени.

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

### 4.1 Сбор и анализ данных

Исходным этапом построения компьютерной модели контура измельчения является анализ материальных потоков. С этой целью в качестве источников данных служили данные эксплуатации и экспериментов с мельницами следующих заводов: ООО «Дюккерхофф Коркино Цемент» и ООО «Цементный завод имени Б. Самадова» г. Исфара.

На экспериментальных данных был произведен анализ классификаторов на изменение объемов подачи гипса, скорости вращения роторов классификаторов, возврат крупки, соотношение гипс–клинкер, удельный расход электроэнергии, звук мельницы и определена тонкость помола по Блейну ( $D'$ ).

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

Обработка результатов экспериментальных исследований проводилась с использованием пакета прикладных программ MATLAB Neural Fitting (nftool).

Отдельные задачи анализа, в частности, предварительная обработка данных на основе метода наименьших квадратов решалась с использованием MExcel. Такие же программные средства использовались в экспериментальных исследованиях на заводе ООО «Цементный завод имени Б. Самадова» г. Исфара.

Для обучения и тестирования моделей нейронных сетей в качестве входных параметров использовалась скорость подачи  $u_1$  (гипс) и скорость сепаратора  $u_2$ . После настройки нейронная сеть использовалась для прогноза значений выходных параметров при изменении входных данных.

#### 4.2.1. Построение и обучение нейронной сети

Строить и обучать нейронные сети будем в GUI интерфейсе Matlab «Neural Fitting» (nftool). Данный прикладной пакет используется для построения нейронных сетей прямого распространения, состоящих из двух слоев. Для скрытого слоя используется сигмоидальная функция активации, для выходного слоя – линейная. Структурная схема сети представлена на рисунке 4.1.

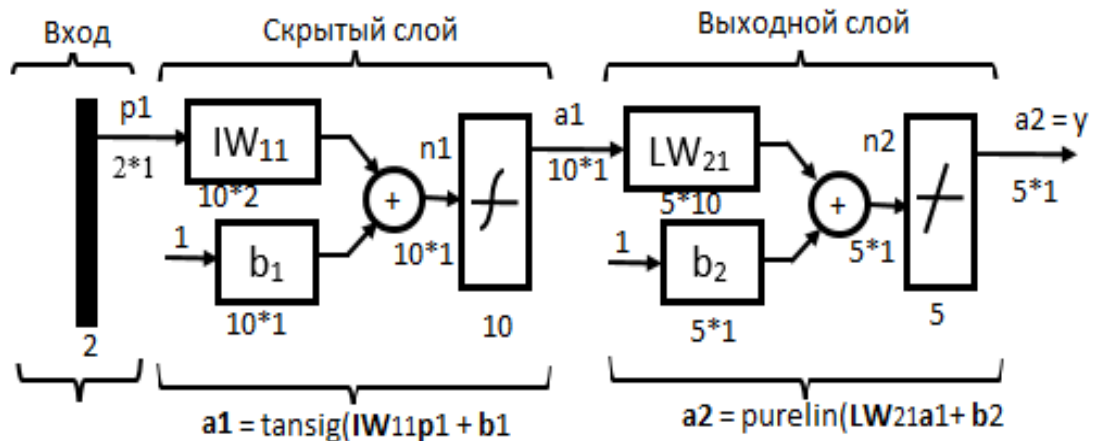


Рисунок 4.1. Структурная схема многослойной нейронной сети

Каждый из входов  $p_1, p_2$  умножается на соответствующий вес  $w_{1,1}, w_{1,2}, \dots, w_{1,R}$  весовой матрицы  $W$ . Обозначения весовые матрицы  $IW_{11}, LW_{21}$  (*Input Weight, Layer Weight*) можно пояснить следующим образом:  $IW_{11}$  представляет связь от первого входа к первому нейрону,  $LW_{21}$  представляет связь от первого входа к второму нейрону. Чистый вход  $n_1$  для функции активации получается путем добавления смещения к взвешенным входам.

Для первого скрытого слоя  $p$  задается как вход, а выход слоя -  $a_1$ , который, в свою очередь, задается как вход для второго скрытого слоя, что дает окончательный результат  $a_2$ .

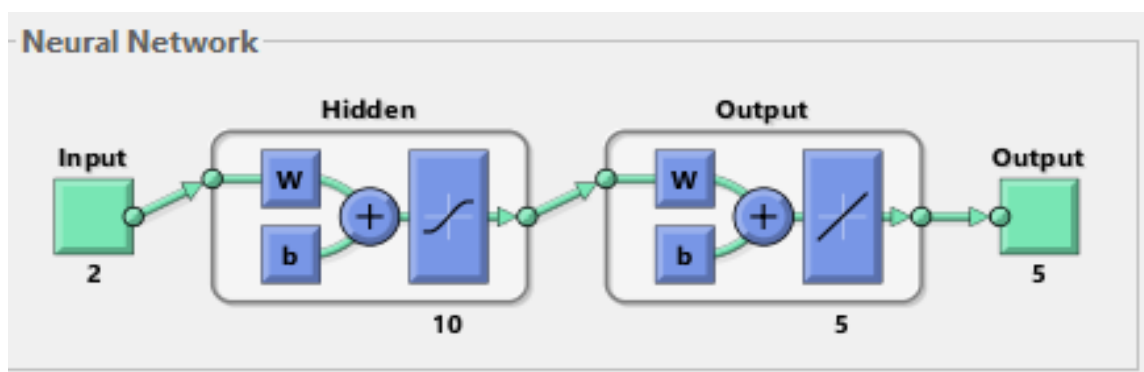


Рисунок 4.2. Структура нейронной сети

В качестве обучающей выборки используем статистические данные. Пример таких данных представлен в таблице 4.1. Исходные данные разделены на три набора: обучающая выборка, выборка для валидации и тестовая выборка, в процентном соотношении 70%, 15%, 15% соответственно. Общая число данных составляет 568 наблюдении с сентября по декабрь 2020 год включительно

Таблица 4.1.

Нормализованные генеральные статистические данные (фрагмент)

Подача т/ч	Скорость сепаратора об/мин	Гипс %	Удельный расход электроэнергии и кВт*ч/т	Возврат крупки т/ч	Звук мель.	Мотор %	Блейн (D')
120	150	4,1	39,75	62,5	78,13	83,14	17,44
120	148	4	39,78	62,3	78,15	83,14	17,44
120	148	4	39,78	62,3	78,15	83,14	17,44
120	148	3,8	39,78	62,3	78,15	83,21	17,44
120	145	4	39,83	61,9	78,18	83,28	17,44
120	142	4	39,89	61,5	78,20	83,32	17,44
120	140	4,1	39,92	61,2	78,22	83,37	17,44
120	138	4,1	39,96	61,0	78,24	83,44	17,44
120	135	4,1	40,01	60,6	78,27	83,44	17,44
120	135	3,6	40,01	60,6	78,27	83,44	17,44



Для обучения нейронных сетей будем использовать алгоритм Левенберга-Марквардта. Рассматриваемый алгоритм применяется для определения локальных оптимумов искомых параметров нелинейной модели. Валидация полученного решения в данном алгоритме Левенберга-Марквардта определяется основывается на определении среднеквадратических ошибок полученной модели.

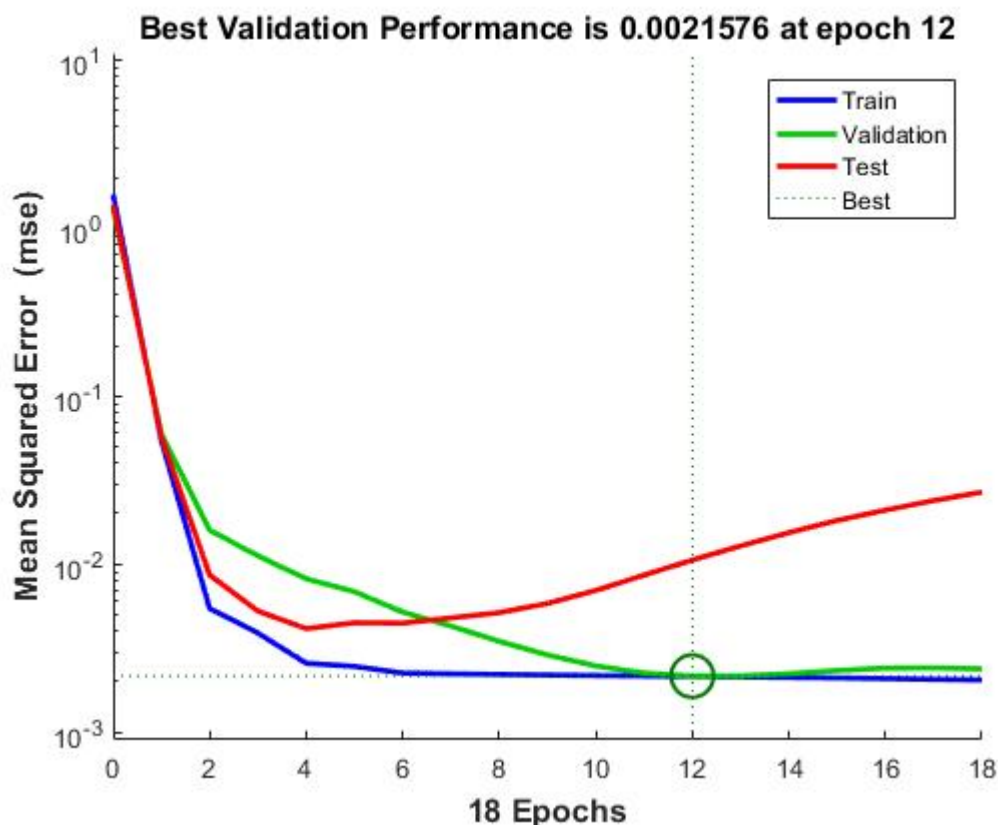


Рисунок 4.3. Зависимость среднеквадратических отклонений на интервале обучения

После обучения нейронных сетей необходимо определить качество настройки нейронной сети. Одним из таких критериев является отклонение значения на выходе нейронной сети от значения из тестовых данных, которое соответствует значению на входе нейронной сети. Данный показатель можно оценить с использованием гистограмм распределения ошибок нейронной сети. Гистограмма распределения ошибок нейронной сети представлена на рисунке 4.4.

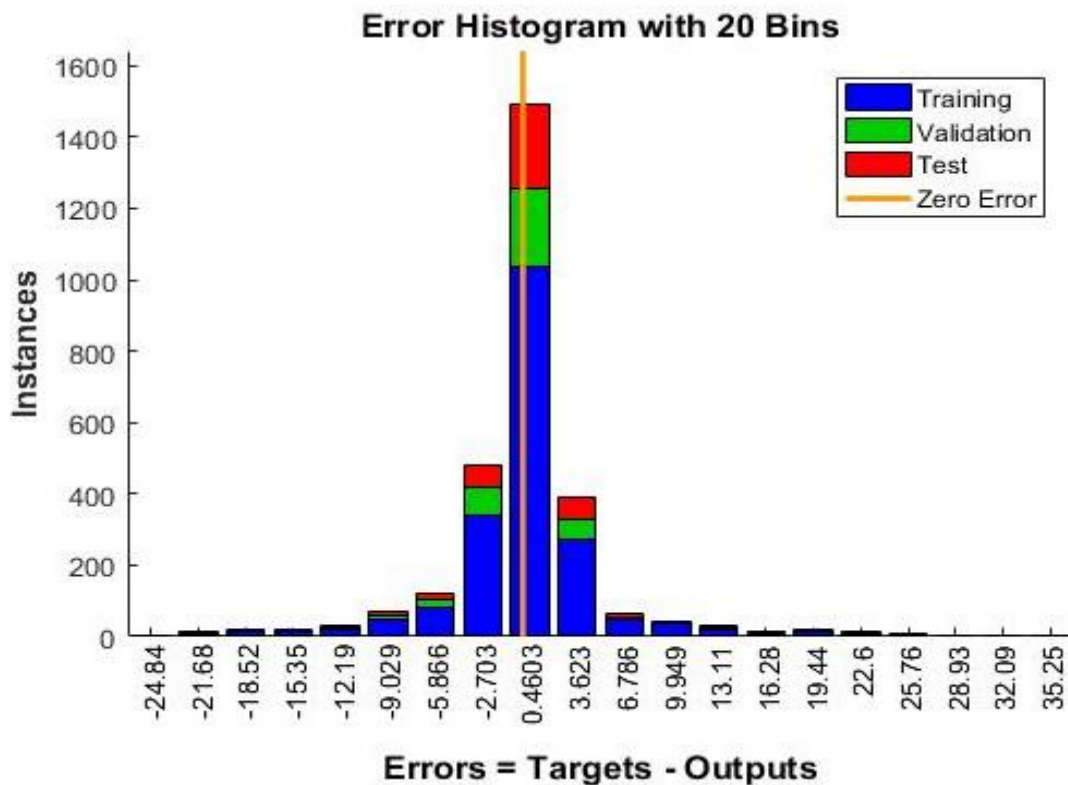


Рисунок 4.4. Гистограмм распределения ошибок нейронной сети

Создадим нейронную сеть, состоящую из четырех подсетей. Каждая подсеть будет обобщать статистику по каждому из выходов модели. Количество нейронов во всех подсетях одинаковое и равно двум (Рисунок 4.5).

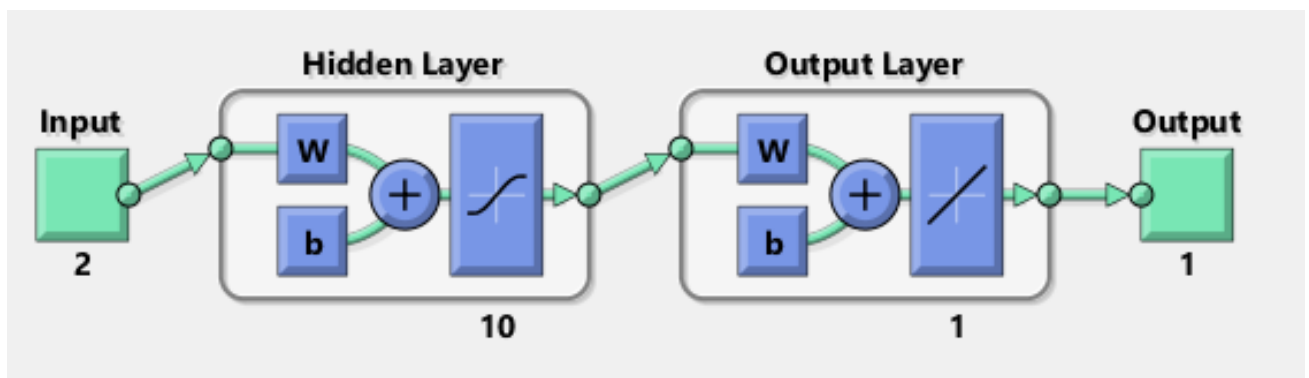


Рисунок 4.5. Структура подсетей нейронной сети

Гистограммы распределения ошибок обучения нейронной сети представлены на рисунках 4.6 – 4.9

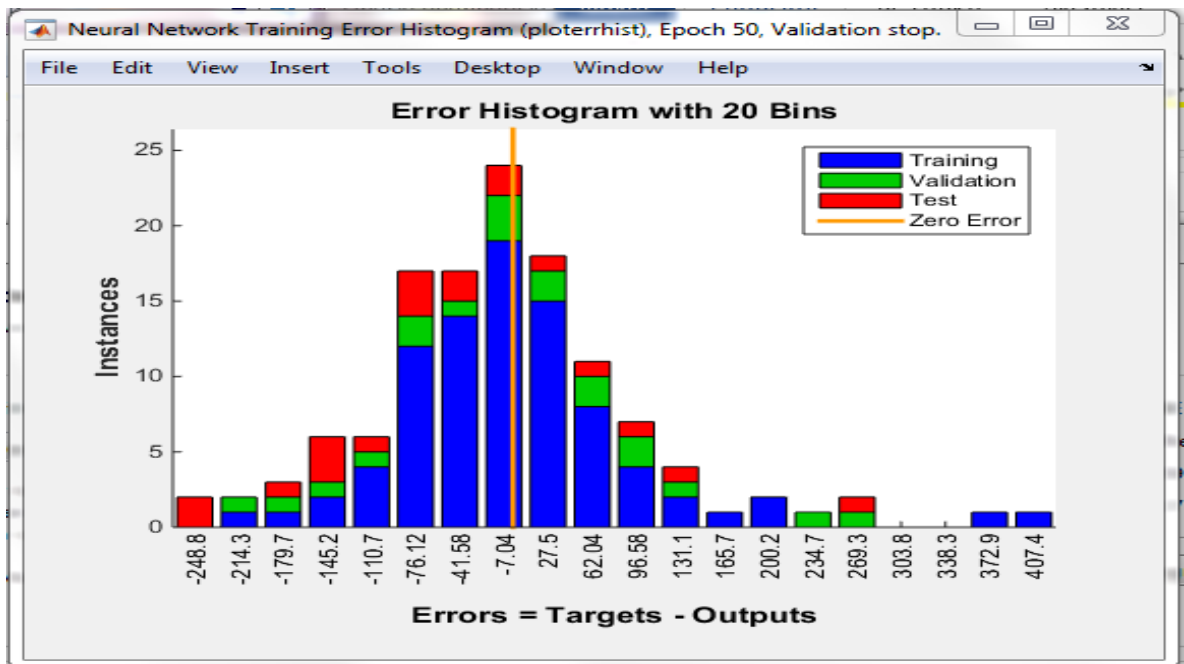


Рисунок 4.6. Гистограмма распределения ошибок нейронной подсети (Выходной показатель: Блейн)

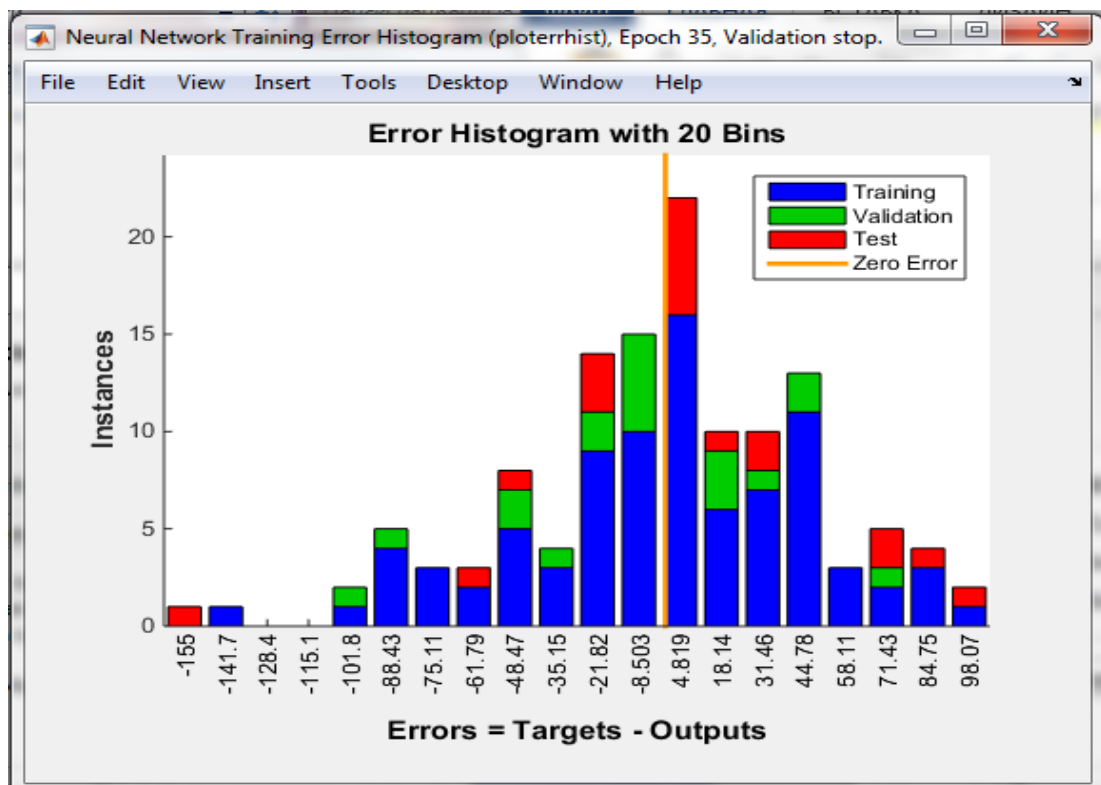


Рисунок 4.7. Гистограмма распределения ошибок нейронной подсети (Выходной показатель: Потребление электроэнергии)

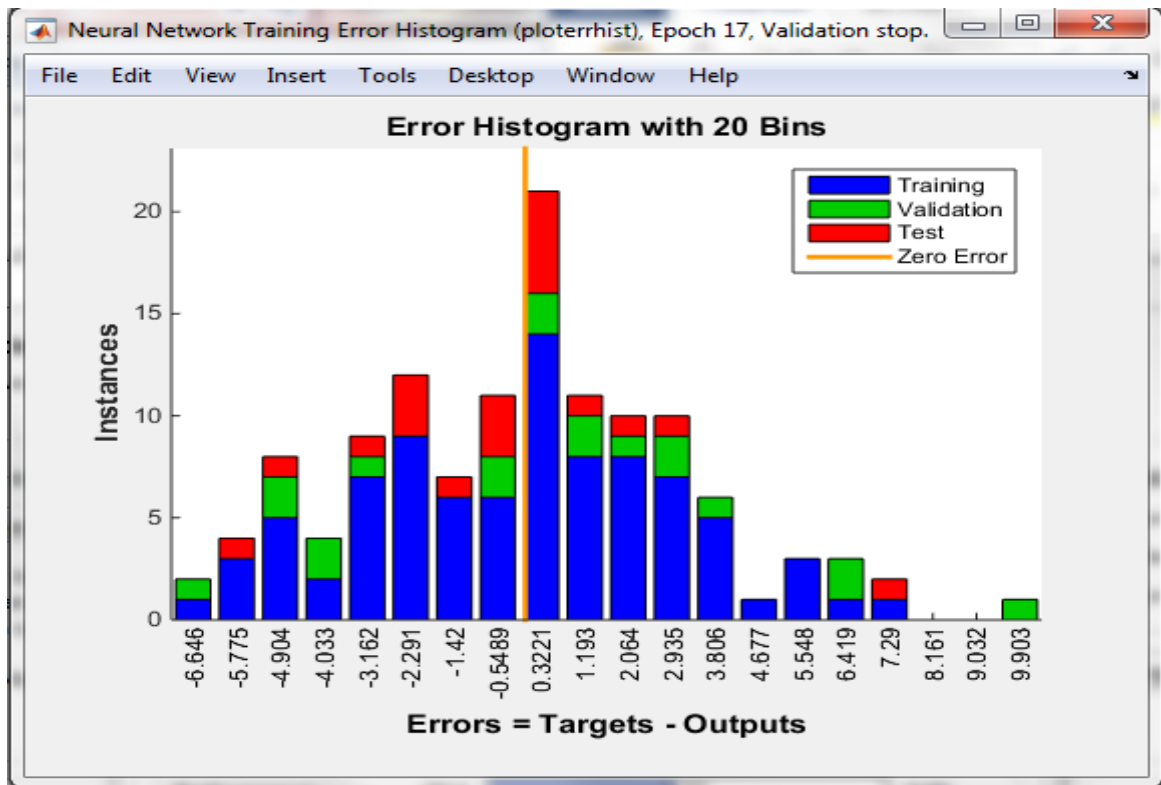


Рисунок 4.8. Гистограмма распределения ошибок нейронной сети  
(Выходной показатель: Звук мельницы)

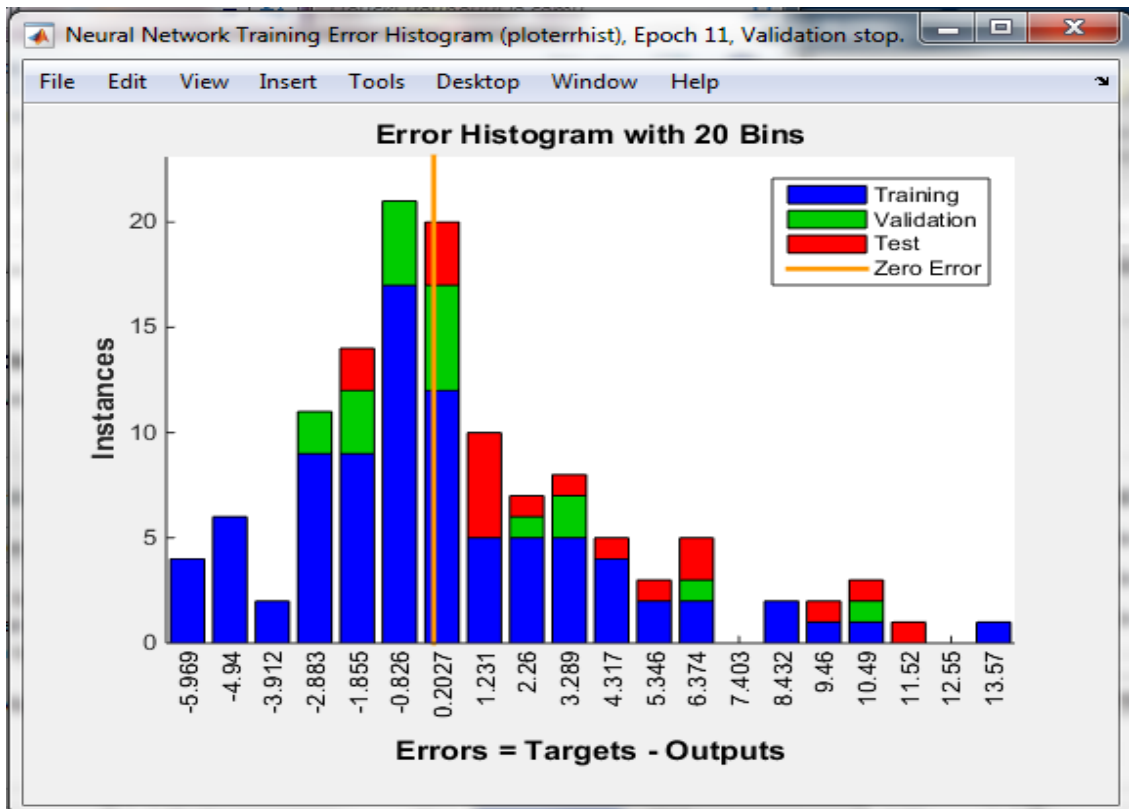


Рисунок 4.9. Гистограмма распределения ошибок нейронной сети  
(Выходной показатель: Крупка)

Из рисунков видно, что основная часть данных имеет ошибку меньше или равную 5%, следовательно, нейронные сети построены и обучены правильно. Гистограмма распределения ошибок дает представление о распределении ошибок и так называемых «выбросах» данных, то есть точках, которые обрабатываются сетью хуже всего.

Одним из таких критериев является отклонение значения на выходе нейронной сети от значения из тестовых данных, которое соответствует значению на входе нейронной сети.

Трети этап построения моделей состоял в проведении корректирующих расчетов с целью уменьшение ошибок моделирования с использованием метода регуляризации. Результаты расчетов моделирование представлены на таблице 4.2.

Таблица 4.2.

Значения среднеквадратических ошибок моделирования  
на генеральной выборке данных и локальной выборке данных

№	Показатель, единица измерения	Генеральная выборка (568 наблюдение)	Локальная выборка (50 наблюдение)	Значения параметра регуляризации $\alpha_{\text{опт}}$
1	Удельный расход электроэнергии кВт*ч/т	1.6	1.5	0.3
2	Крупка, т / ч	10.08	9.3	0.4
3	Звук мельницы, дБ	2.77	2.4	0.4
4	Скорость вращения мельницы, об/мин (%)	2.01	1.8	0.3
5	Блейн, см <sup>2</sup> / г	0.5	0.4	0.3

Построенные нейронные сети используются в качестве модельных представлений передаточных свойств мельницы по каналам управления выходными параметрами процесса помола. Они входят как составная часть автоматизированной системы поддержки принятия решений (АСППР) при управлении режимными параметрами мельницы. При этом выбор требуемых значений управляющих параметров осуществляется исходя из заданных значений

выходных параметров. Выбор входных параметров осуществляется на основе интерактивной процедуры принятия решений, основанной с математической точки зрения на решении системы несовместных взвешенных неравенств. Решение неравенств осуществляется методом фильтрующих ограничений.

#### 4.3. Реализация оперативного нейрорегулирования помолом клинкера мельницей в производстве цемента по данным ООО «Дюккерхофф Коркино Цемент» и ООО «Цементный завод имени Б. Самадова» г. Исфара

Основные этапы производства цемента на данном предприятии:

- 1) разработка, добыча, доставка и обогащение исходных материалов;
- 2) приготовление клинкера;
- 3) помол клинкера и получение цемента.

Для обеспечения качества и однородности помола, измельчение клинкера в мельнице производится с гипсом и основными добавками.

На рисунке 4.10 представлена экранная форма визуализации параметров интерактивной процедуры принятия решений. Здесь представлены входные параметры процесса помола: подача гипса и скорость сепаратора, выходные параметры: крупка, расход электроэнергии, Блейн, звук мельницы. Выходные параметры рассчитываются, исходя из заданных значений входных параметров с помощью полученных нейронных сетей. В таблице выше задаются максимальные и минимальные диапазоны допустимых вариаций значений выходных параметров, а также их коэффициенты значимости.

Вся указанная выше информация позволяет сформулировать конкретную постановку задачи выбора решений по критерию

$$\max_{(u_1, u_2)} C(u_1, u_2), \quad C(u_1, u_2) = \sum_{i=1}^5 \alpha_i \mu_i(u_1, u_2); \quad \alpha_i = \sum_j \beta_{ij} / \sum_j \beta_{ij}; \quad (4.1)$$

$$a_i \leq y_i(u_1, u_2) \leq b_i; \quad \mu_i; \quad i \in 1, \dots, 5 \quad (4.2)$$

$$y_i(u_1, u_2) = f_{НС,i}(u_1, u_2). \quad (4.3)$$

Здесь  $u_1, u_2$  - входные параметры;  $y_i(u_1, u_2)$  - выходные параметры;  $f_{НС,i}(u_1, u_2)$  - вычислительная функция  $i$ -ой нейронной сети;  $a_i, b_i$  - ограничения значений выходных параметров;  $\mu_i$  - характеристическая функция  $i$ -го неравенства;  $\alpha_i$  - вес  $i$ -го неравенства;  $\beta_{ij}$  - оценка важности  $i$ -го неравенства, данная  $j$ -ым экспертом.

												С
Max												
40,5	$\alpha$	67	$\alpha$	85	$\alpha$	80	$\alpha$	17,5	$\alpha$			
Min												
36	0,17	47	0,21	80	0,19	75	0,23	16,5	0,2			
Под. тип	об. Сеп	Уд. рас. ээ	$\mu$	Крупна	$\mu$	Звук. мел	$\mu$	Об. мот	$\mu$	D'	$\mu$	
4,1	150	38	1	59	1	82	1	80,3	0	16,8	1	0,56
4	148	38,1	1	68	0	83,3	1	79,1	1	16,9	1	0,79
3,8	148	38,3	1	69	0	81,9	1	79,3	1	16,7	1	0,79
4	142	38	1	68	0	82,7	1	79,3	1	16,5	1	0,79
4,1	138	41	0	56	1	85,4	0	75,8	1	16,9	1	0,43
4,1	135	43	0	62	1	90	0	75	1	16,7	1	0,43
3,7	132	41,2	0	40	0	87,7	0	76,7	1	18,5	0	0,23
3,7	132	39	1	40	0	86,9	0	81,7	0	18,2	0	0,17
3,8	130	39,1	1	56	1	84	1	80,4	0	17,6	0	0,36
4	135	42	0	49	1	83,4	1	80,1	0	17,2	1	0,39
3,6	137	42,1	0	71	0	82,1	1	79,1	1	17,5	1	0,62
4	130	40,1	1	60	1	83,55	1	78,32	1	17,43	1	1
3,6	135	41	0	55	1	83,3	1	79	1	16,8	1	0,83
3,6	135	38,1	1	72	0	86,1	0	74	0	17,1	1	0,37
3,6	135	39	1	55	1	85	1	75,9	1	17,6	0	0,59
3,7	135	39,4	1	53	1	85,7	0	76,1	1	17,4	1	0,6
4	135	40,1	1	55	1	78,3	0	80,4	0	17,2	1	0,37
4	135	40	1	54	1	81,3	1	78,5	1	17,6	0	0,59
3,8	138	42	0	47	1	80,7	1	78,8	1	17,7	0	0,42
4	135	42,7	0	42	0	84	1	80,4	0	17,4	1	0,39
4	135	43	0	50	1	79,3	0	78,8	1	16,9	1	0,43
3,8	133	41,9	0	48	1	78,1	0	79,1	1	17,3	1	0,43
3,8	133	38,7	1	49	1	78,3	0	79,2	1	17,4	1	0,6
3,8	133	37	1	47	1	78,1	0	79	1	17,4	1	0,6

Рисунок.4.10. Экранная форма визуализации параметров интерактивной процедуры принятия решений

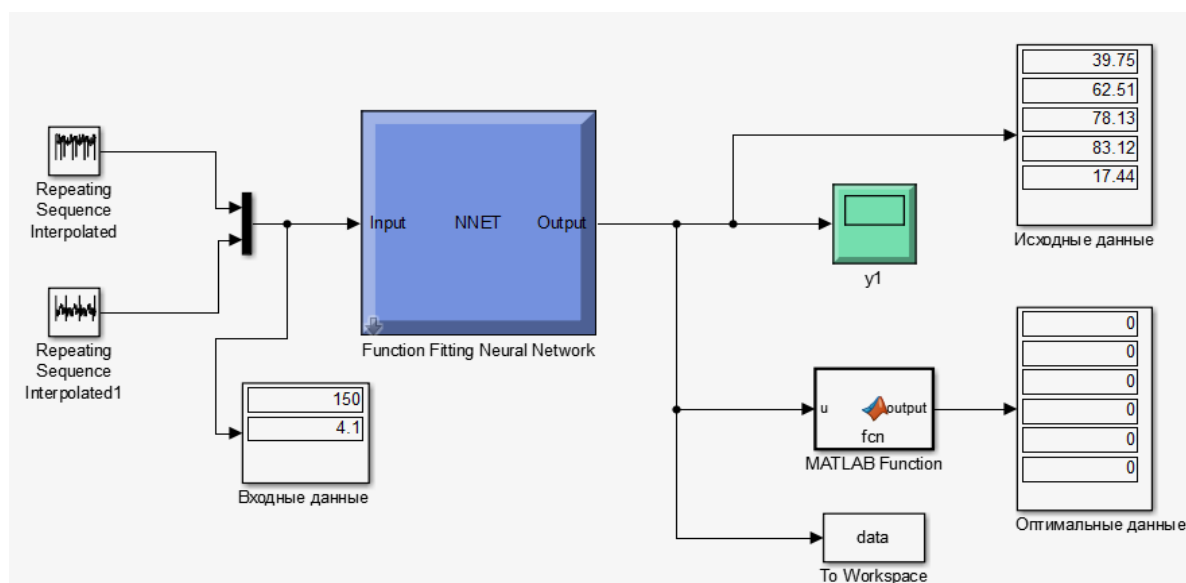


Рисунок 4.11. Компьютерная модель оперативного нейруправления процессом помола шихты при производстве цемента

Выбор энергоэффективного решения достигается за счет усиления технического требования по потреблению электрической энергии при сохранении других технических требований допустимыми. Техническому требованию по потреблению электрической энергии придается максимальный вес.

Конечный технический результат приведено в таблицы 4.2. По результату решения численной задачи можно снизить потребление электрической энергии в диапазонах от 1,4 кВт/ч до 1,8 кВт/ч на тонну.

Таблица 4.2.

Основные показатели и результаты АРМ оператора

Показатель, единица измерения	Результаты полученные «до» и «после» внедрение АРМ оператора	
	До	После
Удельный расход электроэнергии кВт*ч/т	38 – 43	36,5 – 41,2
Крупка, т / ч	37 – 98	40 – 65
Звук мельницы, дБ	70 – 90	75 – 85
Скорость вращения мельницы, об/мин (%)	74 – 82	75 – 80
Блейн, см <sup>2</sup> / г	16,5 – 18	16,8 – 17,5





Рисунок 4.12. SCADA система управления мельницей цементного производства

#### Выводы к главе 4

1. Проведен анализ экспериментальных данных на опытных заводах ООО «Дюккерхофф Коркино Цемент» и ООО «Цементный завод имени Б. Самадова» г. Исфара.

2. Произведены работы по апробации алгоритма оперативного управления мельницей цементного производства с использованием разработанный СППР на основе метода взвешенных целевых ограничений. По результатам экспериментальных работ было показано, что с помощью, разработанной СППР достигается снижение потребления электрической энергии до 5%.

## Общие выводы

1. 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.

2. 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.

3. 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.

4. Разработана интерактивная процедура поддержки принятия решений по многим показателям при противоречивых технических требованиях. Процедура основывается на определении максимально-совместной системы взвешенных неравенств, представляющих текущее значение 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. Исфара). Экспериментальные показали, что снижение потребления электрической энергии составило до 5%.

## Список литературы

1. Хахлев П.А. Совершенствование конструкции ступенчатой футеровки и исследование процесса измельчения в шаровой барабанной мельнице 05.02.13/ Хахлев П.А. // Машины, агрегаты и процессы (строительство и ЖКХ) дис. ... канд. техн. наук. Белгород – 2017.192 с.
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. Sixto Humberto Aguero. Process analysis and energy efficiency improvement on portland limestone cement grinding circuit/ Sixto Humberto Aguero// Mining Engineering the university of British Columbia (Vancouver) April 2015. 130 -137.
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 / А.А. Романович // . Белгород, -2014. -398 с.
12. Богданов В.С. Барабанные мельницы с поперечно- продольным 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 / Т. Sakata, К. 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/ К. 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.: ЦПИИТ Эсмстроймаш, 1989. С 44.

22. Богданов В.С Трубные шаровые мельницы с внутренним ремнем/ 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 строительных материалов, изданий и конструкций / С.Г. Силепок, А. А. Борщевский, М.Н. Горбовец и др.//- М: Машиностроение, 1990. 306-329с.
27. Пироцкий В.З. Состояние и направление развития техники измельчения в интенсификации процессов помола цемента / В.З. 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. Ведрицкий В. В. Разработка методики оценки энергетической эффективности процесса измельчения в шаровых барабанных мельницах: диссертация ... кандидата технических наук: 05.02.13. - Белгород, 2005. - 162 с.: ил. РГБ ОД, 61 05-5/2744
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. Анненко Д. М. Исследование процессов формирования зернового состава цемента в шаровых мельницах замкнутого цикла: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.13 / Анненко Д. М.; - Белгород, 2009. - 193 с.
32. Шахмагон, Н. В. Помол цемента в валковых мельницах / Н. В. Шахмагон, Р. С. Ливман / Цемент. -1985. -№10. -С. 18-20.

33. Штрассер, 3. Современное состояние технологии помола от фирмы KHD Humboldt Wedag AG. /3. 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. – Л.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. O-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 Kontinyerluchen druckzerk Hnerung spoden mahl -gutes/Gemer L., Zisselmar R., Kellerwessel H.- 1983.

45. Patent's 3301166, DDR. Pendeimuhle tir Uberdruckbetrieb (Einblasmiihle), augn fiir Unterdruckbetrieb Geeignet. 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- Zeitung 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. Geqenuberstellung 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. Chokhanelidze A. Analysis of Cement Production Process and Review of Control Strategies and Methods A. Chokhanelidze, F. Lempoge, Brown-Acquaye William// Moscow -2014. P.45.

57. Чохонелидзе А. Н. Разработка системы автоматизированного управления для замкнутой цепью измельчения с использованием метода управления с прогнозирующими моделями / А. Н. Чохонелидзе, Л. В. Форгор , Браун-Аквей// интернет-журнал науковедение. - Москва, 2014. 127 с.

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

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

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

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

75. 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.

76. 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.

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

78. Несмеянов Н.П. Способ регулирования процесса получения цемента заданного класса прочности в мельнице дискретно-непрерывного действия Н.П. Несмеянов, В.В. Ведрицкий, А.М. Вердиян, Р.Т. Лукманов, С.И. Перунов/ патент на изобретение ru 2250203 с1, 20.04.2005. заявка № 2004113623/03 от 06.05.2004

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

80. Пироцкий, В. З. Технология измельчения клинкера и добавок / В. З. 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. Овениникон // 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. техпол. 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. C.Ciganek, K. Kreysa, Two-parameter control system for a cement grinding process, *Translat. Zement-Kalk-Gips* (1991) 202-206.

97. V. Van Breusegem, L. Chen, G. Bastin, V. Wertz, V. Werbrouck, C. de Pierpont, An industrial application of multivariable linear quadratic control to a cement mill circuit, *IEEE Trans. Ind. Appl.* 32 (1996) 670 677.

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

99. L. Magni, G. Bastin, V. Wertz, Multivariable nonlinear predictive control of cement mills, *IEEE Trans. Contr. Syst. Technol.* 7 (1999) 502-508.

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

101. Казаринов Л.С. Интерактивный метод нейрорувления 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.

102. M.I. Jordan, Forward models: supervised learning with a distal teacher. *Cognitive Sci.* 16 (1992) 307 354.

103. Topalov, A.V. Neural network modeling and control of cement mills using a variable structure systems theory based on-line learning mechanism / A.V. Topalov, O. Kaynak // *Journal of Process Control*. – 2004. – V. 14. – P.581–589.

104. Забихифар Сейедхассан Адаптивное управление робототехническими системами с использованием нейронных сетей и скользящих режимов: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.05 / Забихифар Сейедхассан; [Место защиты: Моск. гос. техн. ун-т им. Н.Э. Баумана]. - Москва, 2018. – 143 с.

105. Сафонов К.А. Система поддержки принятия решений при автоматизации проектирования организационно-технологической подготовки строительного производства: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.12 Н. Новгород, 2002 109 с.

106. Keen P.G.W. Decision Support Sustersms: The next decades /P.G.W. Keen// Decision Support Sustersms, 1987. –vol. 3. –pp. 253–265.

107. Казаринов Л.С., Барбасова Т.А. Регуляризация некорректно поставленных задач упреждающего управления в энергосберегающих технологиях/ Л.С. Казаринов, Т.А. Барбасова// Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2013. – Т. 11. – №1. – С. 5-15.

108. Кузенков А.Н. Система поддержки принятия решения в производстве цемента /А.Н. Кузенков, С.А. Федосин // В сборнике: новые информационные технологии и системы. сборник научных статей XIII международной научно-технической конференции. 2016. с. 384-387.

109. Павлов А.В. Решение технологических задач в доменном производстве с использованием модельных систем поддержки принятия решений /А.В. Павлов, А.А. Полинов, Н.А. Спиринов, О.П. Онорин, В.В. Лавров, И.А. Гуринов // Сталь. 2019. №3. С. 13–20.

110. Рей У. Методы управления технологическими процессами /У. Рей// –М.: Мир, 1983. –368 с.

111. Реклейтис Г. Оптимизация в технике/ Г. Реклейтис, А. Рейвиндран, К. Рэгсдел: в двух книгах – М.: Мир, 1986. –350 с. (кн. –1), – 320 с. (кн. 2).

112. Сучков А.В. Проблемы построения системы поддержки принятия решений для доменного производства/ А.В. Сучков // Вестник Воронежского государственного технического университета. –2009. – Т.5. –№10. –С. 72–81.

113. Спиринов Н.А. Научные проблемы создания интеллектуальных систем управления технологическими процессами в пирометаллургии на основе концепции "индустрия 4.0"/ Н.А. Спиринов, В.Ю. Рыболовлев, В.В. Лавров, И.А. Гуринов, Д.А. Шнайдер, А.В. Краснобаев// Metallurg. 2020. № 6. С. 71-76.

114. Циркин А.М. оптимальное управление технологическими процессами/ А.М. Цинкин //–М.: Энергоатомиздат, 1986. –227 с.

115. Barbasova, T.A. A Multilevel Resource-Saving Blast Furnace Process Control/ T.A. Barbasova // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2021. – Т. 21, № 1. – С. 136–146.

116. Kazarinov L.S., Shnayder D.A., Barbasova T.A. Multilayered approach to model predictive industrial process control // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2016. – Т. 16. – № 1. – С. 137-144.

117. Shnayder, D.A., Barbasova, T.A., Lapteva, Y.V. Enhancing blast furnace control efficiency based on self-organizing Kohonen neural networks // Proceedings - 2018 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2018, номер статьи 8728725.

118. Казаринов Л.С. Упреждающее управление энергетической эффективностью предприятий/Л.С. Казаринов, Т.А. Барсабова// Вестник южно-уральского государственного университета. серия: компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. 2012. № 35 (294). с. 85-97.

119. Глушков, В.М. О диалоговом методе решения оптимизационных задач / В.М. Глушков // Кибернетика. – 1975. – № 4.

120. Михалевич, В.С. Вычислительные методы исследования и проектирования сложных систем / В.С. Михалевич, В.Л. Волкович. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1982.

121. Еремин, И.И. О несовместных системах линейных неравенств. – ДАН СССР. – 1961. – 138

122. Мазуров, В.Д. О построении комитата системы выпуклых неравенств / В.Д. Мазуров // Кибернетика. – 1967. – № 2.

123. Еремин, И.И. Нестационарные процессы математического программирования / И.И. Еремин, В.Д. Мазуров. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1979.

124. Ablow, C.M. Inconsistent homogeneous linear inequalities / C.M. Ablow, D.J. Kaylor // Bul. Amer. Math. Soc. – 1965. – 71. – № 1.

125. Расстригин, Л.А. Метод коллективного распознавания / Л.А. Расстригин, Р.Х. Эренштейн. – М.: Энергоиздат, 1981.

126. Якубович, В.А. Рекуррентные конечно-сходящиеся алгоритмы решения систем неравенств / В.А. Якубович // Доклады АН СССР. – 1966. – Т. 166. – № 6. – С. 1308–1311.

127. Якубович, В.А. К теории адаптивных систем / В.А. Якубович // Доклады АН СССР. – 1968. – Т. 182. – № 3. – С. 518–521.

128. Тягунов, Л.И. Управление качеством промышленных изделий / Л.И. Тягунов, Э.Г. Карапетян, Р.Г. Мирзоев. – Л.: Издательство Ленингр. ун-та, 1977. – 120 с.

129. Казаринов Л.С. Системы. Управление и познание: аналитические очерки / Л.С. Казаринов. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2017. – 496 с.

130. Кузнецов П.В, Алгоритм создания информационной нейро-модели для целей оптимизации управления технологическими процессами измельчения и классификации/ П.В. Кузнецов, В.Н. Богатиков, А.Е. Пророков // Сборник научных трудов 2010. 112–115.

131. Мединцев В. Г. Алгоритмизация выбора тактики лечения сердечно-сосудистых поражений на основе оптимизационно-прогностического моделирования: дис. ... канд. Техн. Наук: 05.13.01. – Воронеж, 2005. – 175 с.

132. Самотылова С.А. Разработка виртуальных анализаторов для системы управления массообменными технологическими процессами производства метил-трет-бутилового эфира: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.06 / Самотылова Светлана Александровна; [Место защиты: ФГБУН Институт автоматки и процессов управления Дальневосточного отделения Российской академии наук], 2020.

133. Казаринов Л.С. Введение в методологию системных исследования и управления/ Л.С. Казаринов. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, Издать Т. Лурье, 2008. –344 с.

134. Абалдова С.Ю. Прогнозирование состояния системы менеджмента качества промышленного предприятия с использованием аппарата искусственных нейронных сетей/ С.Ю. Абалдова, Т.Н. Елина// Известия высших учебных заведений. серия: экономика, финансы и управление производством. 2013. № 3 (17). с. 70-75.

135. 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.



**Приложение А. Результаты внедрения научной работы на ООО «Цементный завод имени Б. Самадова» г. Исфара**

**УТВЕРЖДАЮ**

Исполнительный директор  
ООО «Цементный завод  
имени Б. Самадова»



г. Исфара

Рахимов А.Р.

» ноября 2020 г

**АКТ ВНЕДРЕНИЯ**

Результатов диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук Хасанова Джасурджона Рустамджоновича на тему «Эффективное управление мельницей цементного производства в противоречивых условиях»

Комиссия:

Шодиев Гайрат Рузибоевич

Тухтаев Баходур Хайдархучаевич

рассмотрев результаты диссертационного исследования Д.Р. Хасанова на тему «Эффективное управление мельницей цементного производства в противоречивых условиях» (специальность 05.13.06 - Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (промышленность) и их внедрение в практику ООО «Цементный завод имени Б. Самадов» г. Исфара) комиссия отмечает:

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.


Комиссия считает, что предложенные соискателем Хасановым Д.Р. в рамках диссертационного исследования методы и алгоритмы направлены на решение актуальной задачи цементного производства – создание автоматизированной системы поддержки принятия решений по оперативному управлению процессом помола клинкера. Положительными особенностями предложенных методов и алгоритмов является то, что они позволяют производить в реальном времени численные расчеты по коррекции режимных параметров процесса помола, например, с точки зрения снижения энергоемкости процесса при заданном качестве готового продукта. Расчеты, проведенные в работе на экспериментальных данных, показывают, что существуют резервы снижения энергоемкости по потреблению электрической энергии до 5%.

Согласовано:

Начальник производства

 Шодиев Г.Р.

и.о. Главного технолога

 Тухтаев Б.Х.

Приложение Б. Результаты внедрения научной работы в учебный процесс  
Таджикского технического университета имени академика М.С. Осими



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ ТАДЖИКИСТАН

ТАДЖИКСКИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
имени академика М.С. Осими

734042, Душанбе, просп. академиков Раджабовых, 10, Тел.: (992 37) 221-35-11, Факс: (992 37) 221-71-35,  
E-mail: ttu@ttu.tj, Web: www.ttu.tj

«УТВЕРЖДАЮ»  
Ректор ТТУ им. акад. М.С. Осими  
К. Давлатзода  
« 21 » 2020г.



А К Т

**о реализации научных результатов, полученных в диссертации Хасанова Джасурджон Рустамджоновича на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.06 - «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами» (промышленность) на тему: «Эффективное управление мельницей цементного производства в противоречивых условиях»**

Мы, нижеподписавшиеся, комиссия в составе председателя комиссии – проректора по учебной работе, к.т.н., доцента Саъдуллозода Ш.С., членов комиссии: начальника учебно-методического управления к.т.н., доцента Фохакова А.С., заведующего кафедрой “Автоматизация технологических процессов и производств” (производство строительных материалов) к.т.н., и.о. доцента Бандишоевой Р.М., к.т.н., доцента Юнусова Н.И., к.т.н., доцента Джалолова У.Х. составили настоящий акт, о том, что материалы диссертационной работы аспиранта Хасанова Джасурджон Рустамджоновича, представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности **05.13.06 - «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами» (промышленность)**, имеют теоретическую и практическую значимость заключающееся в разработке методики построения систем управления процессом измельчения клинкера, которая позволяет учесть информативную и статистическую неопределённость данных об объекте управления. Разработанная система управления с применением искусственной нейронной сети, при наличии множества противоречивых технических требований к значениям режимных параметров приведёт к повышению эффективности функционирования системы оперативного управления мельницей цементного производства. Особую ценность представляют разработанные алгоритмы идентификации модели



процесса измельчения клинкера, интерактивные методы принятия решений по оперативному управлению объектом.

Учитывая научное и практическое значение работы, основные его достижения рекомендуется использовать в учебном процессе в лекционных занятиях по курсам «Методы и алгоритмы синтеза автоматических регуляторов», «Автоматизация технологических процессов и производств», «Технические средства автоматизации и управления», «Технология производства строительных материалов», «Средства автоматизации и управления» для бакалавров и магистров специальности 530101 - Автоматизация технологических процессов и производств.

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ КОМИССИИ  
Проректор по учебной работе

  
Саъдуллозода Ш.С.

ЧЛЕНЫ КОМИССИИ:

Начальник учебно-методического  
Управления

Зав. кафедрой «АТП и П»

К.т.н., доцент кафедры «АТП и П»

К.т.н., доцент кафедры «АТП и П»



Фохаков А.С.

Бандишоева Р.М.

Юнусов Н.И.

Джалолов У.Х.

Подписи Саъдуллозода Ш.С., Фохакова А.С., Бандишоевой Р.М., Юнусова Н.И., Джалолова У.Х.

ЗАВЕРЯЮ

Начальник ОК СР ТТУ имени  
академика М.С. Осими





Шарипова Д.