

На правах рукописи



ХАСАНОВ ДЖАСУРДЖОН РУСТАМДЖОНОВИЧ

**ЭФФЕКТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ МЕЛЬНИЦЕЙ ЦЕМЕНТНОГО
ПРОИЗВОДСТВА В ПРОТИВОРЕЧИВЫХ УСЛОВИЯХ**

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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Челябинск – 2021

Работа выполнена на кафедре «Автоматика и управление» ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» (ФГАОУ ВО «ЮУрГУ(НИУ)»).

Научный руководитель: Казаринов Лев Сергеевич, доктор технических наук, профессор, заслуженный работник высшей школы РФ, зав. каф. «Автоматика и управление».

Официальные оппоненты: Остроух Андрей Владимирович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Автоматизированные системы управления» ФГБОУ ВО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет».

Рябчикова Елена Сергеевна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизированные системы управления» ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

Ведущая организация: ФГБОУ ВО « Уфимский государственный авиационный технический университет»

Защита диссертации состоится «28» июня 2021 г, в 17-00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.298.03 при ФГАОУ ВО «ЮУрГУ(НИУ)» «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. Ленина 76, ауд. 1007.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» и на сайте <https://www.susu.ru/ru/dissertation/d-21229803/hasanov-dzhasurdzhon-rustamdzhonovich>.

Отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью, просим выслать по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76, ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)», Ученый совет, тел. (351) 267-91-23, факс (351) 267-93-69.

Автореферат разослан «___» _____ 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.298.03
д.т.н., доцент



А.В. Голлай

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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, которое способно улучшить энергетические и качественные показатели при производстве цемента.

Так, производство цемента является энергоемким процессом, 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 электрической энергии. На стадию измельчения клинкера и других добавок приходится примерно от 40 до 50% общего потребления электроэнергии.

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

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., 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, 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. Труды, перечисленных ученых, позволили значительно расширить область знаний о процессе измельчения в шаровых мельницах.

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

Предметом 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 о 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. На основе предложенных новых процедур идентификации и принятия решений разработано новое алгоритмическое обеспечение для автоматизированных систем поддержки принятия решений по оперативному управлению мельницей цементного производства.

Теоретическая значимость. В работе предлагается методика построения автоматизированной системы поддержки принятия решений в задачах оперативного управления процессом измельчения клинкера, которая позволяет принимать эффективные решения в противоречивых постановках задач управления при неопределённости характеристик. Разработанный подход может быть применён и для других аналогичных процессов.

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 (116) страницах основного машинописного текста, включающего (48) рисунков, (7) таблиц и (135) наименований используемой литературы. Общий объем диссертации (116). Диссертационная работа выполнена на кафедре автоматизации и управления Южно-Уральского государственного университета (национальный исследовательский университет).

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность темы, определена цель и задачи работы, объект и предмет исследования, научная новизна, практическая значимость, а также результаты внедрения.

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.

Измельчение клинкера (исходного материала) цемента происходит в основном в шаровых мельницах замкнутого цикла. На рисунке 1 представлена схема замкнутого контура измельчения.

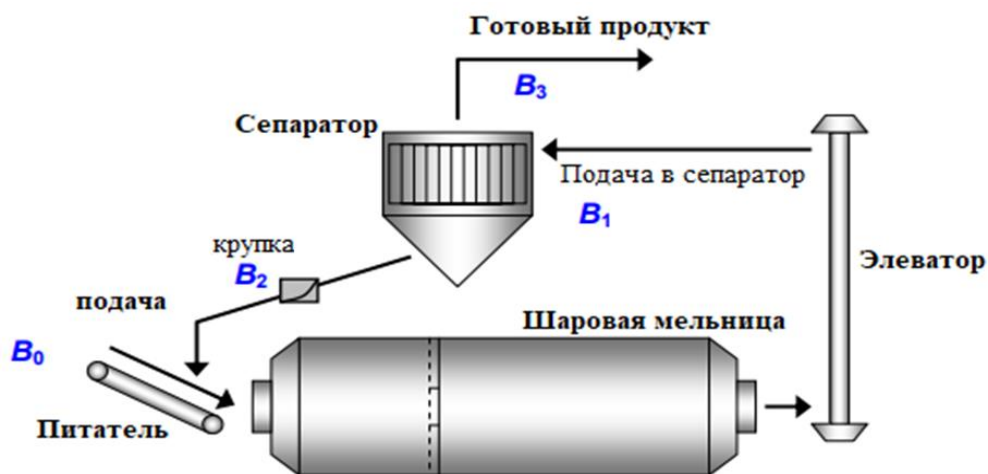


Рис.1. – Замкнутый контур измельчения

Измельчение клинкера в цементной мельнице производится совместно с гипсом, гидравлическими и другими добавками. Совместный помол обеспечивает необходимое перемешивание всех материалов, а высокая однородность цемента является одной из важных гарантий его качества.

Проведен обзор моделей и методов управления для повышения энергоэффективности и качества помола в замкнутом цикле измельчения, таких как: нелинейное прогнозирующее управление, нейроадаптивное управление, управление в скользящем режиме, методы нечетной логики 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 отсутствуют 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:

- подача гипса;
- скорость сепаратора;
- объем крупки;
- удельный расход электроэнергии;
- звук мельницы;
- скорость вращения двигателя мельницы;
- качество помола (Блейн).

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

Структурная схема процесса измельчения клинкера в замкнутом цикле представлена на рисунке 2.

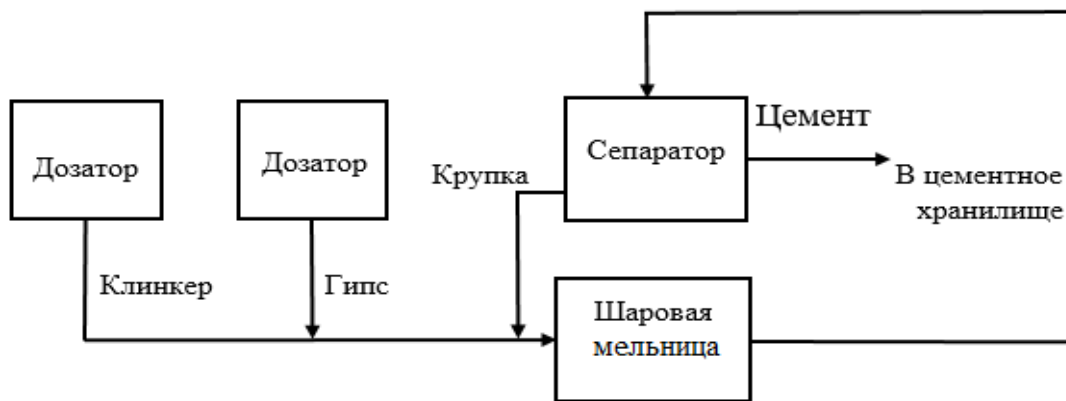


Рис.2. – Структурная схема помола клинкера

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, см²/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:

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

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

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

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 τ_{1i}, τ_{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:

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

Здесь S_T – 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 в 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_T формируется система неравенств

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

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

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

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

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

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

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

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:

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

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:

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

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

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 $y_{i,s}^{HC}$ 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 регуляризующего 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 α_R .

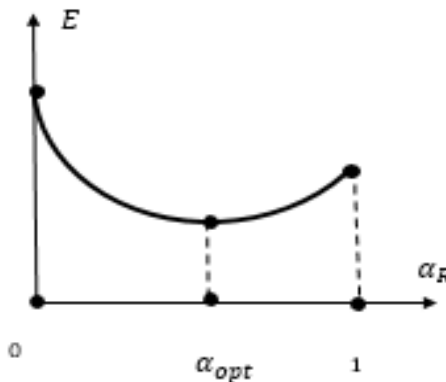


Рис.3. – Выбор коэффициента регуляризации

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.

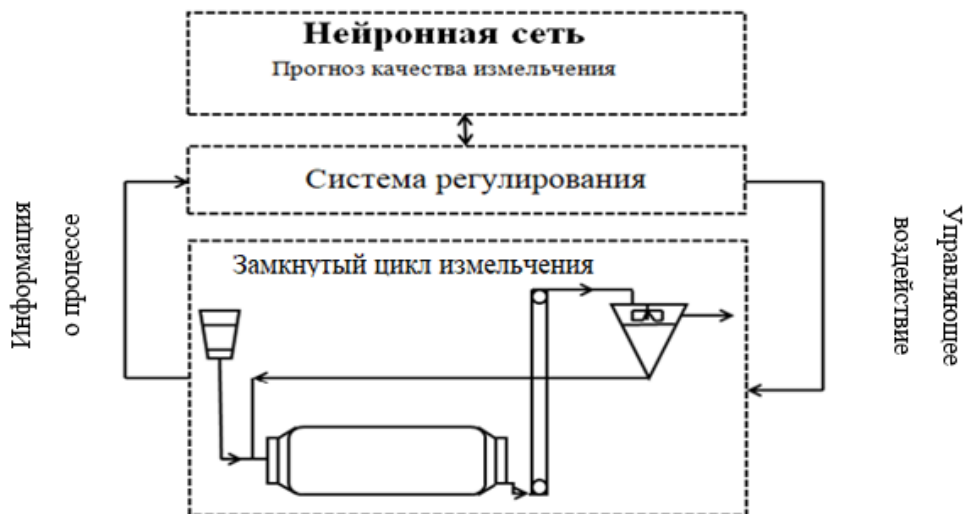


Рис.4. – Структура оперативного управления процессом помола замкнутого цикла

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

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

1. Автоматизированный контроль технологических параметров цикла измельчения:
 1. скорость сепаратора;
 2. звук мельницы в процессе измельчение;
 3. гранулометрический состав продукта измельчения (качества по Блейну) (лаб);

4. скорость вращения двигателя мельницы;
 5. загрузка мельницы дробящей средой;
 6. удельный расход электроэнергии.
2. Автоматизированное управление циклом измельчения:
 1. стабилизация технологических параметров цикла;
 2. оптимизация работы 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. Это достигается за счет регулирования подачи гипса и скорости вращения сепаратора на основе решении многокритериальной задачи с помощью, специализированной системы поддержки принятия решения (СППР).

Уровни АСУ ТП мельницы

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

- уровень технологического процесса;
- контроллерный уровень - контроль и управление технологическим процессом;
- уровень СППР и человеко-машинного интерфейса.

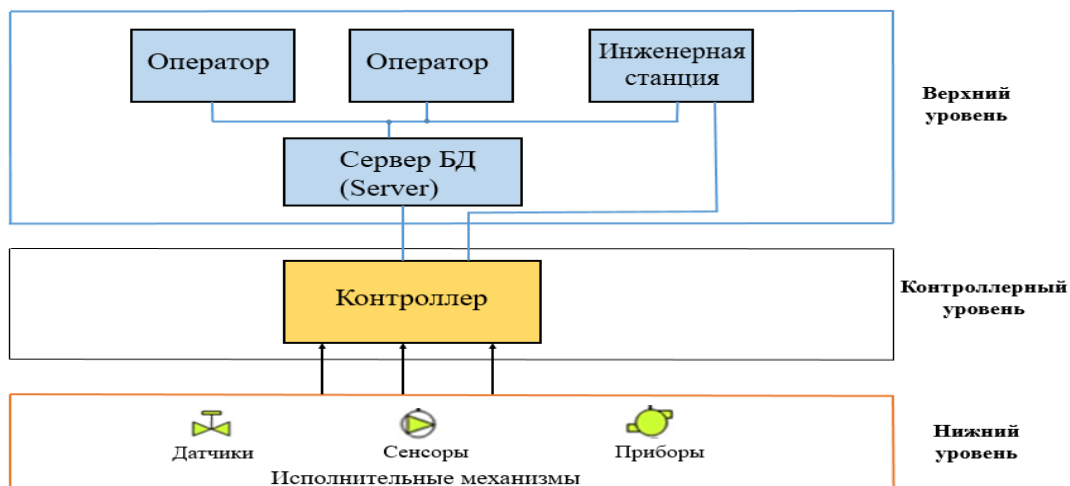


Рис.5. –Уровни АСУ ТП

Автоматизированное рабочее место оператора

Во время управления технологическим процессом на экране АРМа оператора располагается 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, разработанная в данной работе, выполняет роль советчика оператора шаровой мельницы. На основе спрогнозированных значений выходных показателей технологического процесса алгоритм в соответствии с экранной формой определяет параметры загрузки и значение скорости сепаратора, которые рекомендуются задать оператору, чтобы обеспечить оптимальный режим работы шаровой мельницы в замкнутом цикле.

В экранной форме представляются прогнозные значения для каждого выходного показателя при разных определенных значений входных показателей. Также по каждому из выходов системы представлены интервалы допустимых значений. При попадании значения показателя в этот интервал режим работы оборудования считается допустимым, но только относительно данного показателя. Указанные 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 показателей и суммируется построчно. Строка с максимальной суммой соответствует оптимальному режиму: программа выделяет цветом значения входных показателей процесса из этой строки, которые рекомендуются задать оператору.

Далее, если полученные значения существенно не противоречат интуитивному опыту оператора, то полученные решения принимаются. В противном случае должны быть изменены расчеты суммарных весов по каждой строке.

В четвертой главе приведено экспериментальное исследование системы управления замкнутым контуром измельчения.

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').

На опытном заводе был проведен эксперимент цикла измельчения в трубной шаровой мельнице с двумя камерами и с сепаратором. Общее количество экспериментальных данных составило 568 измерений. Фрагмент массива данных приведен в таблице 1.

Таблица 1 – Фрагмент данных, полученных с реального объекта

Подача т/ч	Скорость сепаратора об/мин	Гипс %	Удельный расход электроэнергии кВт*ч/т	Возврат крупки т/ч	Звук мель, дБ	Оборот 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

Была сделана пробная обработка указанных данных с использованием пакета прикладных программ MATLAB Neural Fitting (nftool). Результаты показали, что ошибка настройки нейронной сети является недопустимо большой. Поэтому была использована процедура регуляризации данных на основе метода наименьших квадратов с отсевом нерегулярных данных. Нерегулярные данные оценивались по величине ошибки уклонения от линейной аппроксимации данных в соответствии с алгоритмом по формулам (3) – (5).

На втором этапе расчета было выполнено построение и обучение нейронной сети в GUI интерфейсе Matlab «Neural Fitting» (nftool). Данный прикладной пакет использовался для построения сетей прямого распространения, состоящих из двух слоев. Для скрытого слоя использовалась сигмоидальная функция активации, для выходного слоя – линейная. Структурная схема сети представлена на рисунке 6.

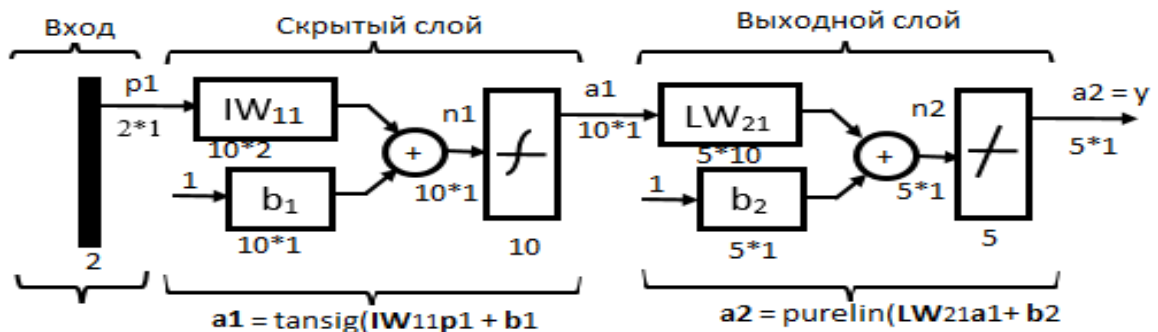


Рис.6. – Структурная схема многослойной нейронной сети

Каждый из входов $p1, p2$ умножается на соответствующий вес $w_{1,1}, w_{1,2}, \dots, w_{1,R}$ весовой матрицы W . Обозначения весовых 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 ко второму нейрону. Чистый вход $n1$ для функции активации получается путем добавления смещения к взвешенным входам.

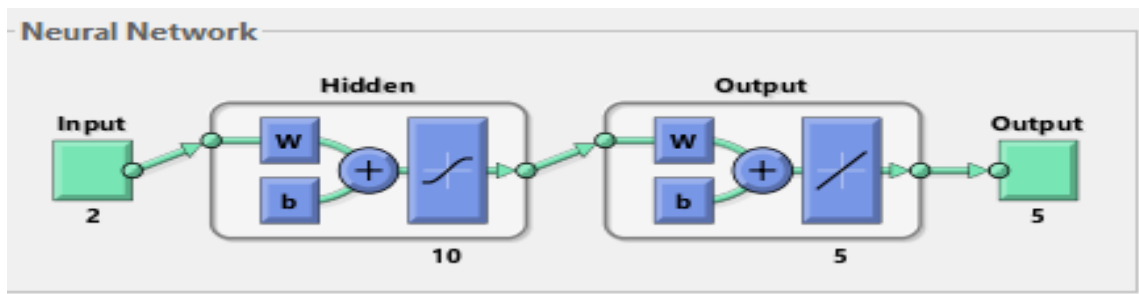


Рис.7. – Структура нейронной сети

В качестве обучающей выборки использовались нормализованные статистические данные. Исходные данные были разделены на три набора: обучающая выборка, выборка для валидации и тестовая выборка, в процентном соотношении 70%, 15%, 15% соответственно.

После обучения нейронной сети необходимо определить качество ее настройки. Одним из таких критериев является отклонение значения на выходе нейронной сети от значения на тестовых данных, которое соответствует значению на входе нейронной сети. Данный показатель можно оценить с использованием гистограммы распределения ошибок нейронной сети. Гистограмма распределения ошибок нейронной сети представлена на рисунке 8.

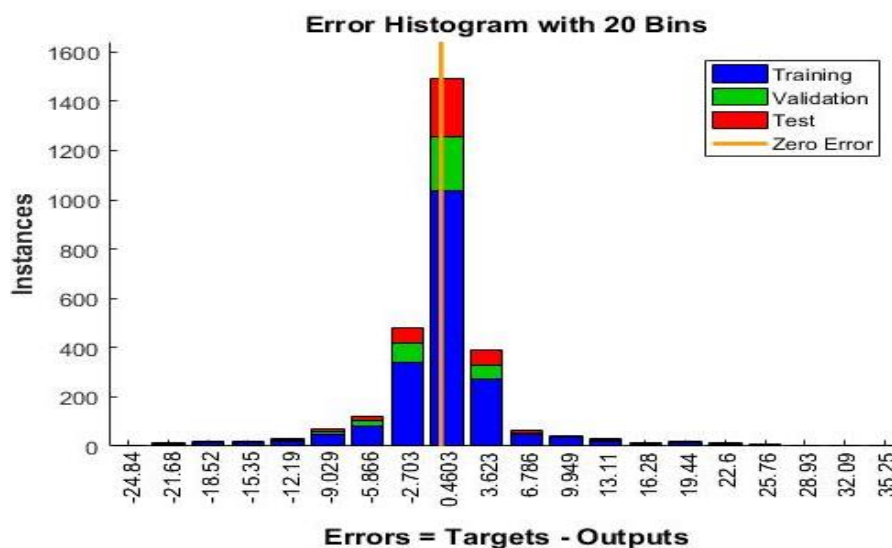


Рис.8. – Гистограмма распределения ошибок нейронной сети

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 9).

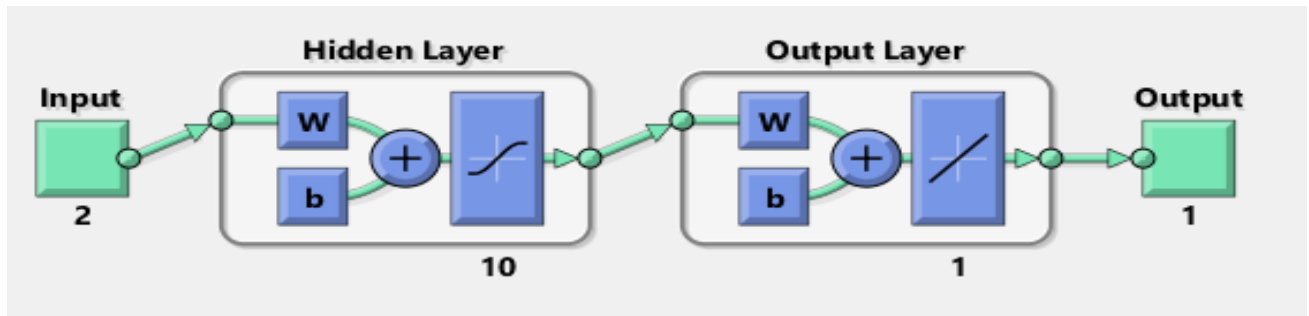


Рис.9. Структура подсетей нейронной сети

Гистограммы распределения ошибок обучения нейронной сети представлены на рисунках 10 – 13

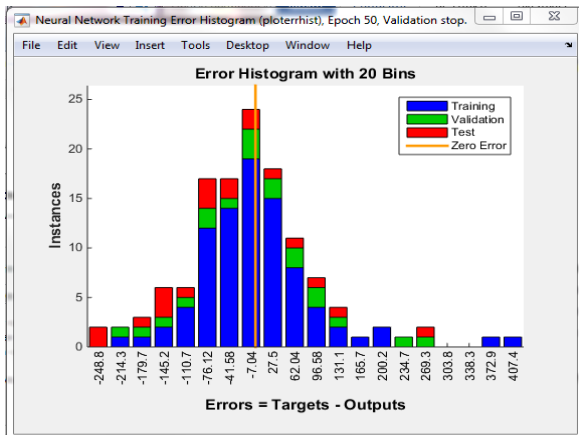


Рис.10. – Гистограмма распределения ошибок нейронной подсети (Выходной показатель: Блейн)

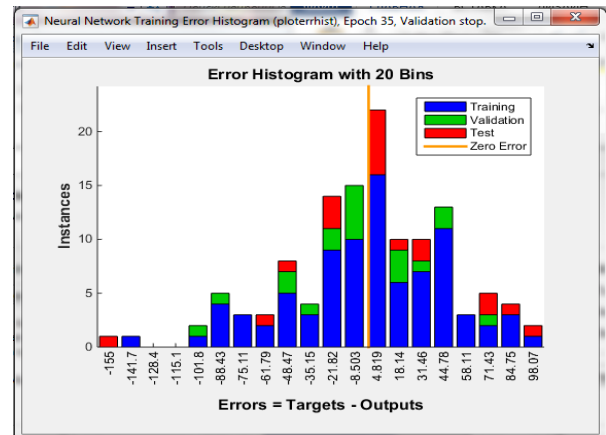


Рис.11. – Гистограмма распределения ошибок нейронной подсети (Выходной показатель: Потребление электроэнергии)

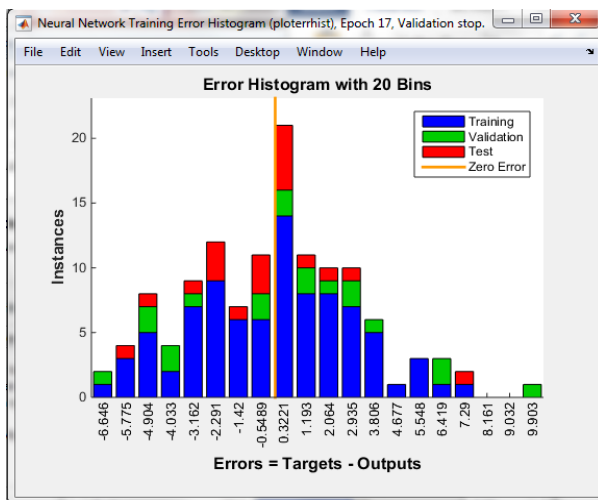


Рис.12. – Гистограмма распределения ошибок нейронной сети (Выходной показатель: Звук мельницы)

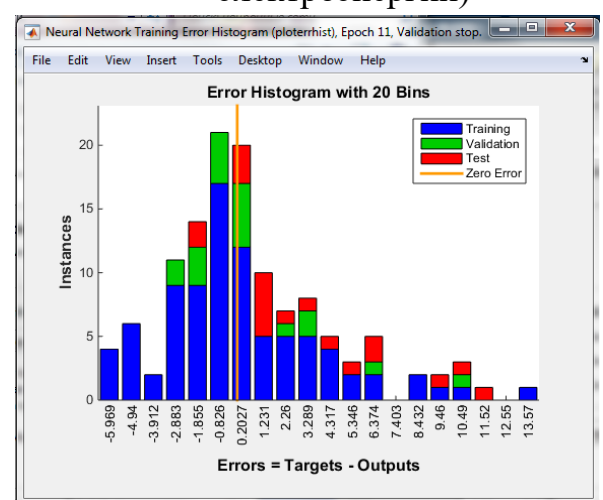


Рис.13. – Гистограмма распределения ошибок нейронной сети (Выходной показатель: Крупка)

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.

На третьем этапе для выбранной локальной совокупности данных на основе формул (7) – (13) был произведен расчет коэффициентов регуляризации. Результаты приведены в таблице 2.

Таблица 2 –Значения среднеквадратических ошибок моделирования на генеральной выборке данных и локальной выборке данных

№	Показатель, единица измерения	Генеральная выборка (568 наблюдений)	Локальная выборка (50 наблюдений)	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 ² / г	0.5	0.4	0.3

Построенные нейронные сети использовались 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.

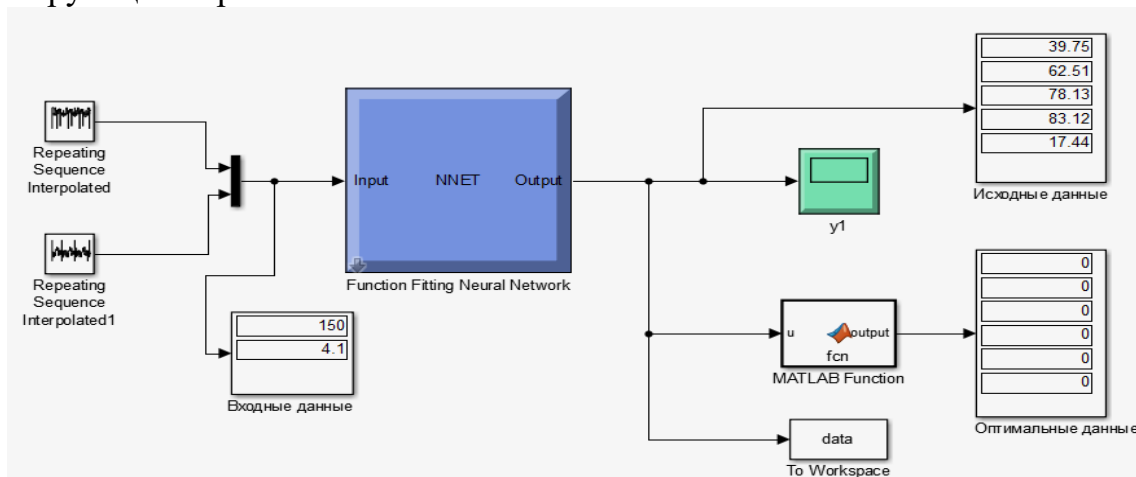


Рис.14. – Компьютерная модель оперативного нейруправления процессом помола шихты при производстве цемента

Принятие оперативных решений

На рисунке 15 представлена экранная форма визуализации параметров интерактивной процедуры принятия решений. Здесь представлены входные параметры процесса помола: подача гипса и скорость сепаратора, выходные параметры: удельный расход электроэнергии, крупка, звук мельницы, скорость вращения двигателя мельницы и Блейн. Выходные параметры рассчитываются, исходя из заданных значений входных параметров с помощью полученных нейронных сетей. В верхней части таблицы задаются максимальные и минимальные диапазоны допустимых вариаций значений выходных параметров, а также их коэффициенты значимости.

Рекомендуемое решение выделено зелёной строкой. Все остальные данные по строкам представляют локальную обучающую выборку, которая приводится для обзора и контроля достоверности полученного решения.

												С
Max												
40,5	α	67	α	85	α	80	α	17,5	α			
Min												
36	0,17	47	0,21	80	0,19	75	0,23	16,5	0,2			
Под. гипс	об. Сеп	Уд.рас.эз	μ	Крупка	μ	Звук. мел	μ	Об.мол	μ	В'.	μ	
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

Рис.15. – Экранная форма визуализации параметров интерактивной процедуры принятия решений

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

Конечный технический результат приведен в таблице 3.

Таблица 3 – 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 ² / г	16,5 – 18	16,8 – 17,5

По результату полученных данных после внедрения АРМ оператора потребление электрической энергии снизилось в диапазонах от 1,4 кВт/ч до 1,8 кВт/ч на тонну.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Анализ существующей практики оперативного управления режимами помола клинкера на цементных заводах показывает, что ряд операций по управлению режимами работы мельницы 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 при оперативном управлении является снижение энергоемкости процесса и обеспечение заданного качества помола за счет рационального выбора текущих значений режимных параметров. 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 уклонения текущего решения от принятого номинала.

4. Разработана интерактивная процедура поддержки принятия решений по многим показателям при противоречивых технических требованиях. Процедура основывается на определении максимально совместных систем взвешенных неравенств, представляющих текущие значения технических требований, предъявляемых к процессу помола. Апробация предложенной процедуры принятия оперативных решений при управлении процессом помола проводилась на реальных данных эксплуатации мельницы цементного завода (г. Исфара). Экспериментальные показали, что снижение потребления электрической энергии составило до 5%.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях из списка ВАК РФ

1. **Хасанов Дж.Р.** Выбор решений при оперативном нейроуправлении процессом помола шихты в цементном производстве / Казаринов Л.С., Хасанов Дж.Р. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2019. Т. 19. № 2. С. 128–138.
2. **Хасанов Дж.Р.** Оптимизации степени загрузки мельницы при производстве цемента/ Казаринов Л.С., Хасанов Дж.Р. // Вестник ПНИПУ. Серия «Электротехника, информационные технологии, системы управления». 2019. Т. 30. № 2. С. 196-210.
3. **Хасанов Дж.Р.** Интерактивный метод нейроуправления процессом измельчения шихты в цементном производстве / Казаринов Л.С., Хасанов Дж.Р.// Вестник Воронежского государственного технического университета. Серия «Информатика, вычислительная техника и управление». 2019. Т. 15. № 6. С.46-53.

В изданиях, индексируемых Scopus и Web of Science

4. **Khasanov. D.R.** Decision Making Process for Operational Neurocontrol of Mixture Grinding in Cement Production with Controversial Setting / Kazarinov. L.S., Khasanov. D.R // International Russian Automation Conference, RusAutoCon. 2019.
DOI: [10.1109/RUSAUTOCON.2019.8867702](https://doi.org/10.1109/RUSAUTOCON.2019.8867702)
5. **Khasanov. D.R.** Interactive Mill Control / Kazarinov. L.S., Khasanov. D.R // IEEE Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research & Practice (PEAMI).2019. pp. 8-12.
DOI: [10.1109/PEAMI.2019.8915096](https://doi.org/10.1109/PEAMI.2019.8915096)

Научные статьи, опубликованные в других изданиях

6. **Khasanov. D.R.** Predictive Neurocontrol of the Grinding Process Clinker in Cement Production / Kazarinov. L.S., Khasanov. D.R // Proceedings of the Scientific-Practical International Conference of Students, Magisters, Phd Students and Young Scientists «Muhandis-2019». 71-79pp.
7. **Хасанов Дж.Р.** Идентификация параметров разгонной характеристики двигателя внутреннего сгорания/ Джалолов У.Х., Юнусов Н.И., Турсунбадалов У.А., Зиёев Ш.Ш., Хасанов Дж.Р. // Вестник ПНИПУ. Серия «Электротехника, информационные технологии, системы управления». 2020. № 35. С. 43-56.