

На правах рукописи



**ПОРХАЛО ВАСИЛИЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ**

**АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ОБЖИГА КЛИНКЕРА  
НА ОСНОВЕ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ  
ДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ  
ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ПЕЧИ**

Специальность 05.13.06 – «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами» (строительство)

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Белгород – 2012

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова»

- Научный руководитель – доктор технических наук,  
профессор Рубанов Василий Григорьевич
- Официальные оппоненты – Жусубалиев Жаныбай Турсунбаевич,  
доктор технических наук, профессор,  
Юго-Западный государственный  
университет, профессор кафедры  
вычислительной техники
- Мишунин Вадим Васильевич,  
кандидат технических наук, доцент,  
Белгородский государственный  
национальный исследовательский  
университет, начальник управления  
научной и инновационной деятельности
- Ведущая организация – Воронежский государственный  
университет инженерных  
технологий

Защита состоится 18 мая 2012 г. в 12:30 на заседании диссертационного совета Д 212.014.04 при Белгородском государственном технологическом университете им. В.Г. Шухова по адресу:  
308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46, БГТУ им. В.Г. Шухова, главный корпус, ауд. 242.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова.

Автореферат разослан «17» апреля 2012 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

В.А. Уваров

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность.** В настоящее время в России производство цемента в основном производится во вращающихся обжиговых печах, работающих по «мокрому» способу производства. Важнейшую роль в производстве цемента по «мокрому» способу играет обжиг клинкера, на процесс обжига приходится около 80% от общих энергозатрат, связанных с производством цемента. Поэтому исследования по интенсификации и оптимизации производства клинкера были и остаются актуальными.

Уровень автоматизации на существующих вращающихся печах для обжига еще не отвечает состоянию развития техники управления, контроль за состоянием печи осуществляется в основном аналоговыми измерительными средствами. В то же время на печах с уже существующим техническим комплексом по автоматизации все еще очень существенную роль в управлении играет человек, на которого возлагаются функции принятия решения на основе информации формируемой на пульте управления, при этом возможны ошибки в силу человеческого фактора.

Интенсификация процесса обжига в основном должна быть направлена на обеспечение рационального режима обжига материала в печи, что достигается за счет снижения энергозатрат при одновременном обеспечении качества продукта на требуемом уровне. Сформулированные условия могут быть выполнены благодаря построению системы управления полностью или частично повторяющей функции человека, помогающей оператору управлять процессом обжига, вовремя корректировать режимы обжига, поддерживать параметры на требуемом уровне.

**Цель и задачи работы.** Целью диссертационной работы является повышение эффективности процесса обжига клинкера за счет оптимизации управления обжигом с помощью разработанной автоматизированной системы управления, локальные подсистемы которой реализуют управление вращающейся цементной печью.

Поставленная цель достигается путем решения следующих **основных задач**:

- разработка математической модели динамики процесса обжига и теплообмена в печи на основе реальных технологических параметров, характеризующих переменные состояния объекта управления;
- построение математической модели печи как распределенного объекта, состоящего из нескольких зон преобразования материала, пригодной для решения задачи оптимизации теплообмена по компенсационному признаку;
- разработка локальных подсистем управления с использованием принципов каскадности и связности;

- параметрический синтез оптимальной системы управления печи обжига как распределенного объекта.

**Научную новизну работы** составляют:

- математическая модель динамики процесса обжига и теплообмена в печи, построенная на основе корреляционных методов применяемых к реальным технологическим параметрам, характеризующим переменные состояния объекта управления;
- математическая модель печи как распределенного объекта, состоящего из нескольких зон преобразования материала, допускающая возможность оптимизации теплового режима печи;
- разработанная советуемая автоматизированная система управления, состоящая из локальных подсистем, построенных по принципам оптимальности, каскадности и автономности.

**Практическая значимость работы** заключается в:

- повышении эффективности процесса обжига клинкера за счет внедрения инновационных технологий процесса управления, благодаря параметрической оптимизации процесса и сочетанию эффектов локальных подсистем в единой советуемой системе.
- оригинальном программном приложении расчета и идентификации параметров модели по статистической информации о реальных процессах в печи, которое может применяться для идентификации сложных объектов управления.

**Внедрение результатов исследований:**

- предложенный подход и структура алгоритмов рекомендованы для внедрения в рамках соглашения между БГТУ им. В.Г. Шухова и ОАО «Осколцемент», где проведены испытания оптимальных режимов на печи обжига №1, которые выявили эффективность предложенных алгоритмов управления процессом обжига;
- отдельные элементы автоматизированной системы управления в форме локальных подсистем приняты к внедрению на ОАО «Себряковцемент»;
- алгоритмы и программы внедрены в учебном процессе в рамках реализации учебного плана подготовки специалистов по специальности 220301.

**На защиту выносятся:**

- 1) математическая модель динамики процесса обжига и теплообмена в печи, построенная на основе корреляционных методов применяемых к реальным технологическим параметрам, характеризующим переменные состояния объекта управления;
- 2) математическая модель печи как распределенного объекта, состоящего из нескольких зон преобразования материала, допускающая возможность оптимизации теплового режима печи;

- 3) автономная система управления по двум переменным – температуре отходящих газов и содержанию  $CO_2$ ;
- 4) каскадная система регулирования технологического параметра – тока нагрузки главного привода с внутренней обратной связью по температуре отходящих газов;
- 5) оптимальная система поддержания свободной окиси кальция по распределенным переменным, представляющим собой температуру в каждой зоне печи;
- 6) разработанная советуемая автоматизированная система управления, состоящая из локальных подсистем, построенных по принципам оптимальности, каскадности и автономности.

**Апробация работы.** Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на Международной научно-практической конференции «Инновационные материалы и технологии» – XX научные чтения (Белгород: 2011), на Международной научно-практической конференции «Математические методы в технике и технологиях» – ММТТ-23 (Смоленск: 2010) и ММТТ-24 (Киев: 2011), на второй Международной научно-технической конференции «КНИТ-2011» (Белгород: 2011), на Всероссийской научной школе «Микроэлектронные информационно-управляющие системы и комплексы» (Новочеркасск: 2011), на научно-практическом семинаре «Применение современных средств управления для автоматизации промышленных объектов» (Белгород, 2010).

**Публикации.** Основные результаты диссертации опубликованы в 12 работах: 3 статьи опубликованы в журналах, рекомендованных ВАК РФ [1–3], 9 докладов – в трудах конференций [4–11], получено регистрационное свидетельство на программный продукт [12].

**Личный вклад соискателя** в работах, опубликованных в соавторстве состоит в следующем: [2,7,8] – разработана математическая модель обжига клинкера как модели взаимосвязного объекта; в [1,12] – предложен программный продукт для идентификации сложных объектов, обладающих свойством связности; в [4] – получена автономная система управления обжигом клинкера, в [5,6] – каскадная система; в [8,9] – сделан анализ состояния проблем интенсификации и управления вращающимися печами и предложены методы управления процессом обжига, в [10] – разработана система поддержания свободной окиси кальция по распределенным переменным.

**Методы исследования.** В работе при решении задач были использованы методы статистической динамики, теории автоматического управления, теории теплообмена, теории систем и системного анализа, методы математического моделирования. Численное моделирование выполнено на ПЭВМ с использованием пакета MATLAB.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех разделов и заключения, изложенных на 136 страницах машинописного текста, включая список использованной литературы из 70 наименований, и двух приложений.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследований, отмечены научная новизна, практическая значимость и внедрение результатов работы, сформулированы положения, которые выносятся на защиту.

**В первой главе** приведен анализ теплотехнологического агрегата, представляющего собой цементную печь обжига клинкера, как объекта управления. Сделан анализ методов идентификации цементного производства и существующих моделей процесса обжига. Рассмотрено состояние проблемы интенсификации и управления вращающейся печи обжига клинкера на основе трудов И.Б. Гинзбурга, В.В. Тимашова, Я.Е. Гельфанда, изучены подходы таких ученых как: В.К. Классен, И.Г. Лугинина, П.В. Беседин, П.А. Трубаев, И.Н. Борисов. На основании выводов, сделанных из проведенного анализа, сформулированы задачи исследования, решение которых приводит к достижению поставленной цели.

**Вторая глава** посвящена разработке математической модели процесса обжига клинкера во вращающейся печи на основе корреляционных методов анализа реальных сигналов, представлению печи как модели взаимосвязного объекта и оценке адекватности полученной модели.

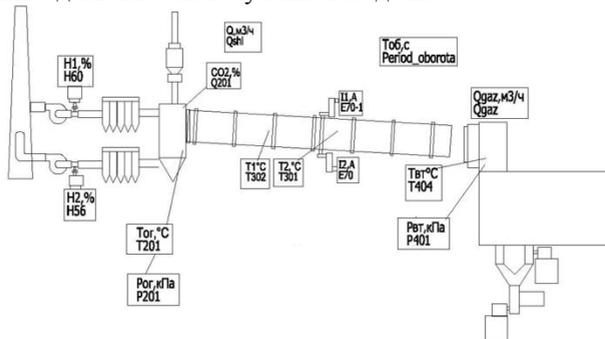


Рис.1. Значимые измеряемые и управляемые сигналы печи обжига

Сущность метода получения динамических характеристик объекта состоит в том, что если в нормальных условиях работы воздействие, приложенное ко входу исследуемой системы, может рассматриваться как стационарная случайная функция, то определяя корреляционную функцию

$R_Q(\tau)$  входа  $Q(\tau)$  и взаимную корреляционную функцию  $R_{Qq}(\tau)$  между входом  $Q(\tau)$  и выходом  $q(\tau)$  можно найти динамику объекта в форме весовой характеристики  $w(t)$ , поскольку существует связь, установленная Винером-Хинчиным:

$$R_{Qq}(\tau) = \int_0^{\infty} R_Q(\tau - \lambda) \cdot w(\lambda) d\lambda. \quad (1)$$

Решая интегральное уравнение относительно  $w(\lambda)$ , находим импульсную переходную функцию  $w(t)$ , а по ней и передаточную функцию  $W(s)$ .

Задача идентификации объекта решалась путем выполнения следующих этапов:

- запись случайных процессов на входе и выходе объекта;
- определение вероятностных характеристик случайных сигналов;
- определение динамических характеристик объекта  $w(t)$  и  $W(s)$ .

В результате обработки экспериментальных данных найдены оценки вероятностных характеристик сигналов в форме:

$$R_Q^*(k\Delta\tau) = \frac{1}{n-k} \sum_{i=1}^{n-k} (Q_i - m_Q^*)(Q_{i+k} - m_Q^*); \quad R_{Qq}^*(k\Delta\tau) = \frac{1}{n-k} \sum_{i=1}^{n-k} (Q_i - m_Q^*)(q_{i+k} - m_q^*);$$

где  $Q_i = Q[i]$ ,  $q_i = q[i]$  – значения случайного сигнала в  $i$ -ом сечении,  $m_Q^*$  и  $m_q^*$  – оценки математического ожидания, а  $R_Q^*$  и  $R_{Qq}^*$  – оценки корреляционной и взаимной корреляционной функции случайных процессов  $Q[n]$  и  $q[n]$  соответственно,  $n$  – дискретное время. Шаг дискретизации равен 1 мин.

Для пары параметров (расход шлама, нагрузка на 1-й электродвигатель) приведены графики в пакете MATLAB оценок автокорреляционной и взаимной корреляционной функции, представленные на рис. 2.

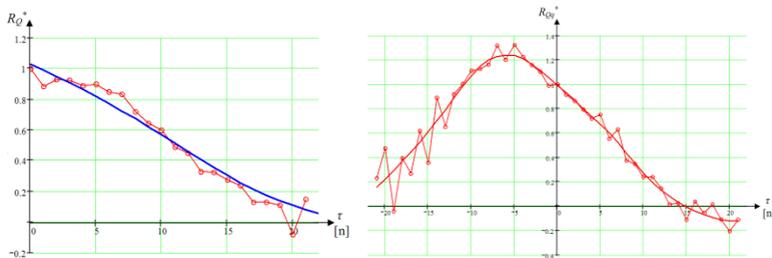


Рис.2. Оценка автокорреляционной и взаимной корреляционной функции по каналу расход шлама – нагрузка на 1-й электродвигатель

С целью применения численного метода решения интегрального уравнения Винера-Хинчина (1) последнее сводилось к системе алгебраических уравнений с числом уравнений, равным количеству полученных ординат

корреляционных функций. При этом интеграл в уравнении (1) представляем конечной суммой:

$$R_{Q\tau}^*(k\Delta\tau) = \sum_{n=0}^N w(k\Delta\tau) \cdot R_Q^*(k\Delta\tau - n\Delta\tau)\Delta\tau,$$

позволяющей перейти к матричной форме вида

$$W = A^{-1}Q,$$

где матрица  $W$  характеризует вектор весовой характеристики объекта,  $A$  – квадратная матрица значений автокорреляционной функции, а  $Q$  – матрица значения взаимной корреляционной функции.

Для получения решения в виде вектора значений импульсной функции в среде MATLAB применялись алгоритмы для выборки данных, численного решения системы уравнений, матричных вычислений и аппроксимации, реализация которых осуществлялась с применением оригинального программного продукта, разработанного автором. Переходная характеристика  $h(t)$ , используемая для определения передаточной функции объекта управления, найдена на основе весовой характеристики  $w(t)$ .

Наличие переходной характеристики, полученной в результате обработки экспериментальной информации, дало возможность определить динамику объекта управления в области комплексного переменного, применяя метод площадей, когда передаточная функция представима полиномом

$$W(s) = \frac{K}{1 + A_1s + A_2s^2 + \dots},$$

и задача определения  $W(s)$  по известной  $h(t)$  состоит в вычислении коэффициентов  $A_1, A_2, A_3, \dots$ :

$$A_1 = \int_0^{\infty} xdt; \quad A_2 = \int_0^{\infty} x(A_1 + \frac{-t}{1})dt; \quad A_3 = \int_0^{\infty} x(A_2 + \frac{-t}{1}(A_1 + \frac{-t}{2}))dt, \dots$$

С целью уточнения степени приближения, т.е. ограничения порядка полинома знаменателя использован метод колебательного звена, параметры которого  $\xi$  – степень затухания и  $T_0$  – постоянная времени звена определялись путем программной интерпретации графического способа, в котором применялись следующие соотношения:

$$\xi = \frac{1}{\sqrt{(\pi/\ln(h_m - 1))^2 + 1}}; \quad T_0 = \frac{t_1}{\left(\pi + \arctg \frac{\ln(h_m - 1)}{\pi}\right) \sqrt{\left(\frac{\ln(h_m - 1)}{\pi}\right)^2 + 1}}.$$

где  $h_m$  – максимальное значение переходной характеристики,  $t_1$  – момент времени, когда переходная характеристика в первый раз пересекает линию установившегося режима. Сравнительная оценка результатов показала хорошее приближение для разных видов звеньев.

Анализ цементной печи как модели многосвязного объекта управления позволяет выделить следующие значимые управляемые и измеряемые параметры (рис.3):  $Q_{газ}$  – количество газа (топлива), подаваемого в печь;  $H_1, H_2$  – положение шиберов дымососов;  $T_{от}, P_{от}$  – температура и давление отходящих газов;  $CO_2$  – концентрация углекислого газа в отходящих газах;  $T_1, T_2$  – температура материала в зоне подогрева и кальцинирования;  $I_{нагр}$  – нагрузка на главном приводе печи;  $T_{вт}, P_{вт}$  – температура и давление вторичного воздуха;  $Q_{шл}$  – количество подаваемого шлама;  $t_{об}$  – время оборота печи.

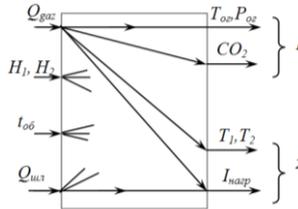


Рис.3. Представление печи обжига как модели взаимосвязного объекта

Были получены передаточные функции, отражающие взаимосвязь между измеряемыми и управляющими параметрами, в таблице 1 приведены передаточные функции по одному из управляющих параметров – расходу газа на обжиг.

Таблица 1.

Передаточные функции по параметру расход газа

Управляющий параметр – Расход газа ( $Q_{газ}$ ),  $м^3/ч$

Управляемый параметр	Получаемая передаточная функция
Температура в зоне кальцинирования (Т301), °С	$W(s) = \frac{0.005215}{63.45s^2 + 9.739s + 1} \left[ \frac{°C \cdot ч}{м^3} \right];$
Температура в зоне подогрева (Т302), °С	$W(s) = \frac{0.009338}{1.587s^2 + 2.212s + 1} \left[ \frac{°C \cdot ч}{м^3} \right];$
Нагрузка на 1-й электродвигатель (Е70-1), А	$W(s) = \frac{0.001539}{81s^2 + 8.29s + 1} e^{-15s} \left[ \frac{А \cdot ч}{м^3} \right];$
Нагрузка на 2-й электродвигатель (Е70), А	$W(s) = \frac{0.002164}{47.77s^2 + 12.73s + 1} e^{-14s} \left[ \frac{А \cdot ч}{м^3} \right];$
Температура отходящих газов в пылесадит. камере (Т201), °С	$W(s) = \frac{0.01938}{0.9254s^2 + 1.149s + 1} \left[ \frac{°C \cdot ч}{м^3} \right];$
Концентрация $CO_2$ в отходящих газах (Q201), %	$W(s) = \frac{6.219 \cdot 10^{-5}}{9.678s^2 + 4.082s + 1} e^{-s} \left[ \frac{\% \cdot ч}{м^3} \right];$
Разреженность отходящих газов в пылесадит. камере (Р201), кПа	$W(s) = \frac{-0.01234}{12.87s^2 + 5.647s + 1} e^{-9s} \left[ \frac{кПа \cdot ч}{м^3} \right].$

Проверка адекватности динамических моделей, описанных передаточными функциями из представленной таблицы, реальному объекту осуществлялась на основе сравнения вероятностных характеристик (математического ожидания и дисперсии) выходных случайных сигналов модели и реального объекта при подаче на их входы одного и того же случайного воздействия. Для полученных передаточных функций математические ожидания отличаются не более чем на 7%, а дисперсии не более чем на 20%, что подтверждает адекватность полученных моделей.

**В третьей главе** были синтезированы подсистемы управления печью на основе принципов оптимальности, автономности и каскадности.

Основой построения систем связанного регулирования является принцип автономности. Применительно к объекту с двумя входами и выходами понятие автономности означает взаимную независимость выходных координат при работе двух замкнутых систем регулирования. Для конструирования многосвязной системы обжига клинкера в печи были определены два входных параметра ( $Q_{gaz}$  и  $H$ ), в качестве выходных параметров взяты температура отходящих газов и содержание  $CO_2$ . Структура автономной системы управления процессом обжига представлена на рис. 4.

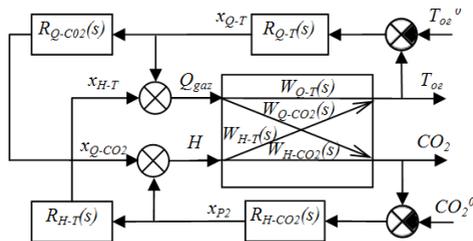


Рис.4. Автономная система управления печи обжига клинкера по двум переменным

Здесь передаточная функция  $W_{Q-T}(s)$  отражает взаимосвязь между входным  $Q_{gaz}$  и выходным параметром  $T_{oe}$ , а  $W_{H-CO_2}(s)$  – взаимосвязь между положением шибера дымососа  $H$  и содержанием в отходящих газах  $CO_2$ . Передаточные функции  $W_{Q-CO_2}(s)$  и  $W_{H-T}(s)$  отражают перекрестные каналы соответственно их обозначениям, также введены регуляторы для прямых  $R_{Q-T}(s)$ ,  $R_{H-CO_2}(s)$  и перекрестных каналов  $R_{Q-CO_2}(s)$ ,  $R_{H-T}(s)$ . Дальнейшая задача сводится к синтезу данных регуляторов по передаточным функциям прямых и взаимосвязанных каналов.

Моделирование системы управления осуществлялось в среде Simulink пакета MATLAB (рис.5). В основные контуры включены ПИ-регуляторы, настройки которых по каждому контуру были получены с помощью метода итераций.

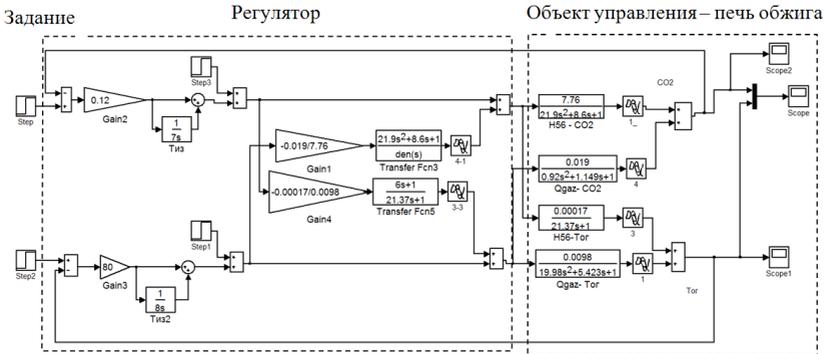


Рис.5. Модель автономной системы управления печью в среде Simulink

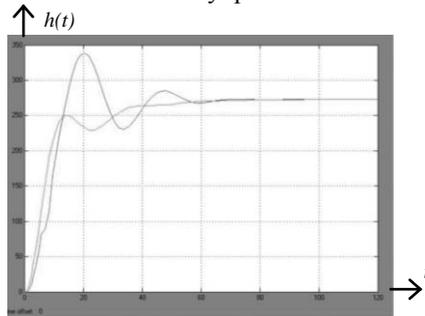


Рис.6. Графики переходных характеристик системы

Результаты моделирования при подаче ступенчатого возмущения по двум каналам регулирования ( $H_1$  – содержание  $CO_2$  и  $Q_{gaz}$  – температура отходящих газов  $T_{oz}$ ) представлены на рис.6, данная двусвязная система является устойчивой, перегулирование не превышает 20%, и обеспечивается удовлетворительная компенсация перекрестных связей, что иллюстрируют переходные процессы. Полученные результаты дают нам основание рекомендовать данную систему для управления обжигом клинкера.

Учитывая то, что вращающаяся печь обжига клинкера является распределенным в пространстве объектом, в котором можно выделить несколько зон обработки материала и то, что материал по печи перемещается в течение нескольких часов, можно заключить, что печь как объект управления обладает большой инерционностью.

При анализе математической модели печи были выявлены следующие закономерности: в выходных параметрах печи есть группа параметров, реагирующих сравнительно быстро на входные воздействия  $Q_{gaz}$  и  $H_1$  (группа параметров 1 на рис.4), группа параметров, реакция которых сравнительно медленная по отношению к тем же входным воздействиям (группа параметров

2 на рис.4). Это свойство указывает на возможность синтеза системы управления на основе каскадных систем, где быстродействие по одному параметру должно быть выше быстродействия по другому.

Располагая полученными передаточными функциями по каналам управления «количество газа, подаваемого в печь  $Q_{gaz}$ » – «температура отходящих газов  $T_{oz}$ » и «количество газа, подаваемого в печь  $Q_{gaz}$ » – «нагрузка на главном приводе  $I_n$ »:

$$W_{Q_{gaz}-T_{oz}}(s) = \frac{0.0098}{19.98s^2 + 5.423s + 1} e^{-s}, W_{Q_{gaz}-I_n}(s) = \frac{0.001539}{81s^2 + 8.29s + 1} e^{-8s},$$

для объекта управления синтезирована каскадная система, модель которой в среде Simulink пакета MATLAB представлена на рис.7.

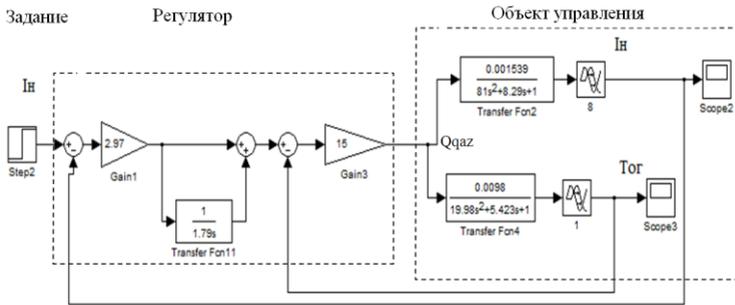


Рис.7. Модель системы управления печью в среде Simulink пакета MATLAB

Переходный процесс для каскадной системы с оптимальными настройками регулятора во внешнем и внутреннем контуре представлен на рис.8.

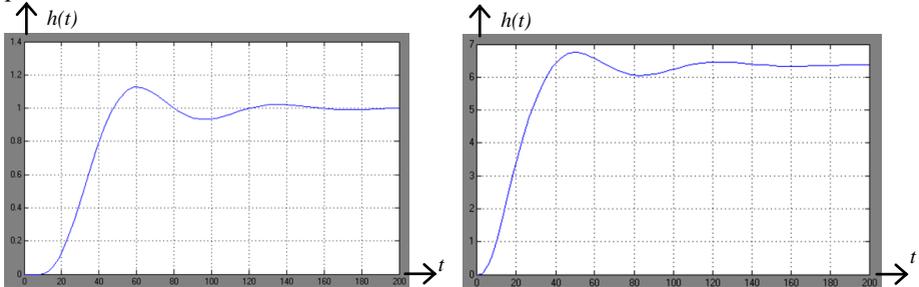


Рис.8. Переходные процессы для каскадной системы во внешнем и внутреннем контуре полученные в среде Simulink пакета MATLAB

Как видно из таблицы и графиков переходного процесса, наилучшими показателями качества обладает каскадная система управления печью обжига

с настройками регулятора по полному расчету. Причем расчет регуляторов методом итераций при последующих шагах дает небольшое изменение искомых величин, что указывает на сходимость расчетов. Рассчитанные показатели качества сведены в таблицу 2.

Таблица 2

Сводная таблица показателей качества

Показатели	Каскадная (внутр. контур)	Каскадная (внешн.контур)	Одноконтурная
Перерегулирование	16%	6,25%	35%
Время регулирования	145	130	150
Степень затухания	0,75	0,875	0,72
Макс. дин. отклонение	1,16	6,8	1,36

Полученные результаты моделирования дают основание утверждать, что применение каскадного принципа для управления печью обжига как инерционным распределенным объектом дает лучшие результаты, чем при создании нескольких одноконтурных систем, следовательно, такой принцип управления является предпочтительным.

Решение задачи оптимизации теплообмена в печи по компенсационному признаку с целью получения минимума содержания свободной окиси кальция требует представления модели печи в виде распределенных в пространстве, примыкающих друг к другу зон преобразования материала. В этом случае целесообразно осуществить декомпозицию печи на  $n$  зон по количеству контролируемых переменных. На каждом участке последовательной цепи моделей происходят физико-химические преобразования материала, отражаемые модельными переменными в форме оператора преобразования, причем контролируемая переменная на выходе предыдущей зоны влияет на последующие зоны печи вплоть до выхода объекта (рис. 9).

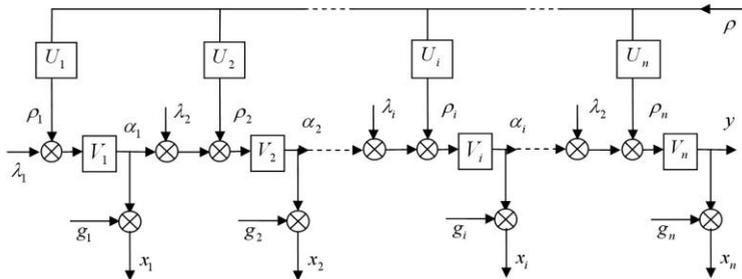


Рис. 9. Структурная схема модели процесса обжига с разбивкой на зоны

На структурной схеме декомпозиционного представления печи как сложного объекта управления приняты следующие обозначения для  $i$ -ой зоны печи:  $\lambda_i(t)$  – физико-химические свойства материала, которые проявляются в  $i$ -ой зоне и воспринимаются в форме контролируемой переменной, формируемой прибором первичной информации (температура материала);  $\rho_i(t)$  – количество тепла, подводимое в  $i$ -ю зону;  $\alpha_i(t)$  – входная переменная  $i$ -ой зоны, характеризующая физико-химические свойства материала, например содержание свободной окиси кальция на выходе зоны;  $y(t)$  – выходная переменная печи.

На основании анализа в литературе лабораторно полученных данных по изменению свободной окиси кальция в материале в зависимости от температуры, а также динамики процесса движения материала в печи, были получены передаточные функции каждой из зон печи по каналу «температура материала – содержание свободной окиси кальция» –  $V_i(s)$  и каналу «количество теплоты на обжиг – температура материала» –  $U_i(s)$ . Синтезирована система управления в среде Simulink (рис.10) и найдены операторы управления с применением принципа оптимальности по компенсационному признаку, целью которой является минимум выходной переменной.

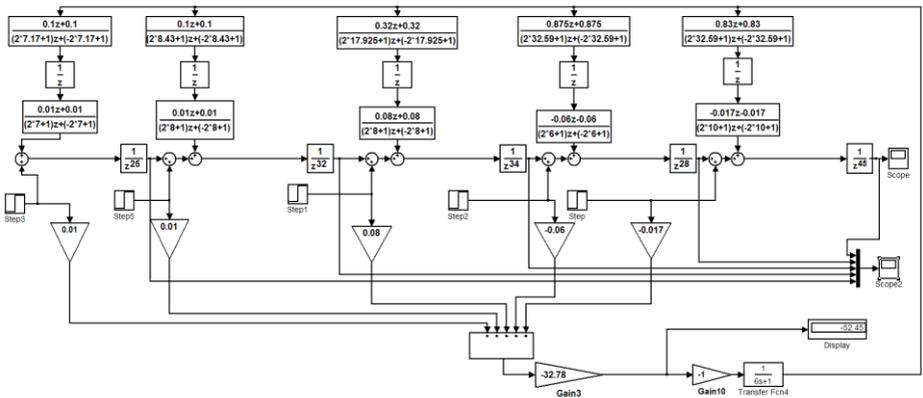


Рис.10. Модель системы, обеспечивающей компенсацию взаимосвязи контролируемых переменных

Полученная система управления промоделирована в среде Simulink пакета MATLAB. В третьей зоне было положено детерминированное возмущение, характеризующее изменение температуры материала. Результаты

моделирования при детерминированном ступенчатом возмущении приведены на рис. 11.

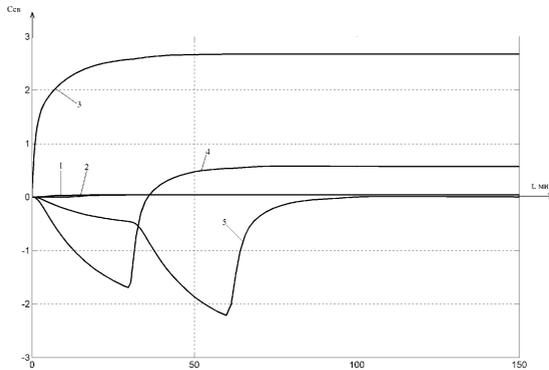


Рис. 11. Графики изменения содержания свободной окиси кальция в материале (1– 5 зоны)

Как видно, система управления обеспечивает стремление выходной переменной к минимальному значению, при этом компенсация возмущения происходит путем изменения подачи топлива. При построении системы управления целесообразно ограничиться 3-мя зонами преобразования материала, так как именно, начиная с зоны декарбонизации и заканчивая зоной спекания, происходит интенсивное изменение содержания свободной окиси кальция в клинкере.

**В четвертой главе** на основе полученных теоретических результатов разработана советующая система автоматизированного управления, состоящая из локальных подсистем, построенных по принципам оптимальности, каскадности и автономности.

Для процедуры идентификации параметров модели было написано приложение в расширении среды MATLAB – GUI (Graphical User Interfaces), которое позволяет разрабатывать свои приложения с возможностью использования функций среды MATLAB.

Приложение (рис.12) содержит кнопки загрузки входного и выходного сигналов, компоненты задания интервалов данных, графики входного и выходного сигнала, инструменты выбора метода расчета корреляционных функций (с аппроксимацией или без), компоненты задания степени полинома аппроксимации корреляционных функций, графики корреляционной и взаимной корреляционной функции, графики импульсной и переходной функции, а также другие компоненты, применяемые для настройки расчетов. Получение решения уравнения Винера-Хинчина в виде вектора значений импульсной функции в MATLAB осуществляется встроенными функциями.

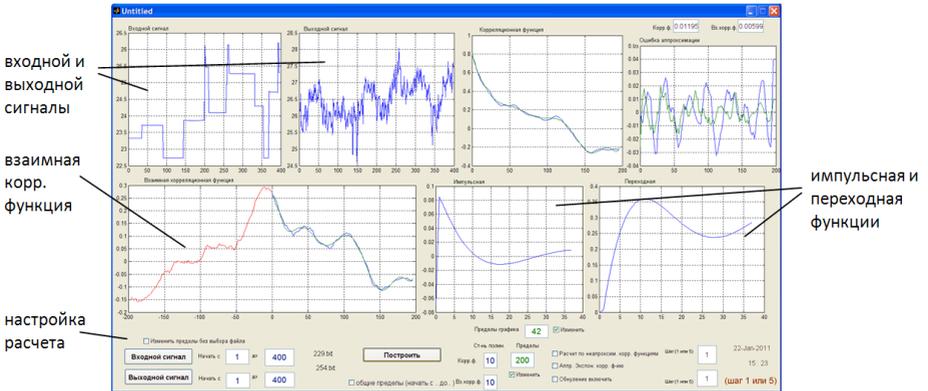


Рис.12. Форма приложения для идентификации модели

На основании теоретических результатов синтеза локальных подсистем, изложенных в третьей главе, написана программная реализация автоматизированной системы управления с применением SCADA-технологии в среде Good Help на языке FBD. На рис.13 показана структура каскадной подсистемы управления током нагрузки главного привода. Была разработана структура микропроцессорной системы, выбраны контроллеры и технические средства автоматизации, построена функциональная схема автоматизации печи обжига.

Реализация советующей автоматизированной системы управления привела к объединению каскадной подсистемы поддержания тока нагрузки, автономной подсистемы поддержания концентрации  $CO_2$  и подсистемы оптимизации  $CaO_{св}$  в одну советующую систему управления (рис.14).

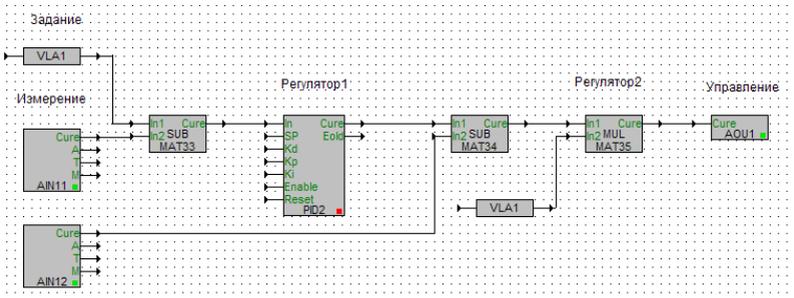


Рис.13. Структура программы на языке FBD для каскадной системы



2. Построена математическая модель печи как распределенного объекта, состоящего из нескольких зон преобразования материала, на основе которой проведена параметрическая оптимизация теплового режима печи.
3. Разработан алгоритм и программа идентификации структуры и параметров модели по экспериментальным данным, пригодная для широкого использования для идентификации других сложных объектов управления.
4. Получены условия автономности связанной системы управления и предложена структура автономной системы управления по двум переменным – температуре отходящих газов и содержанию  $CO_2$ .
5. Показана целесообразность применения каскадной системы регулирования тока нагрузки главного привода вращающейся печи обжига клинкера в связи с наличием переменных, изменяющихся с существенно различной скоростью, и синтезирована структура каскадной системы, используемой в качестве подсистемы советующей системы.
6. Решена задача оптимизации теплообмена в печи по компенсационному признаку и предложена структура системы, обеспечивающая минимум свободной окиси кальция.
7. Разработана структура микропроцессорной системы автоматизации, обеспечивающей выбор и стабилизацию оптимальных рабочих режимов обжига клинкера.
8. Разработана советующая система управления теплообменом в печи, состоящая из локальных подсистем, построенных по принципам оптимальности, каскадности и автономности.

### **СПИСОК НАУЧНЫХ ТРУДОВ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

1. Рубанов, В. Г. Применение среды MATLAB и расширения GUI для идентификации сложного объекта / В. Г. Рубанов, **В. А. Порхало** // Известия ТулГУ. – 2011. – Вып. 6. – Ч. 2. – С.14 – 20.

2. Рубанов, В. Г. Получение математической модели обжига клинкера с применением статистических методов / В. Г. Рубанов, **В. А. Порхало** // Научные ведомости Белгор. гос. ун-та. – 2010. – № 7 (78). – выпуск 14/1. – С. 80 – 88.

3. **Порхало, В.А.** Информационные представления адаптивного трехпозиционного алгоритма для его аппаратных и программных реализаций / В.А. Порхало, А.Г. Бажанов, В.З. Магергут //Научные ведомости Белгор. гос. ун-та. – 2011. – № 1 (96). – выпуск 17/1. – С. 162–168.

4. **Порхало, В. А.** Проектирование каскадной системы управления печью обжига клинкера / В. А. Порхало, В. Г. Рубанов // Инновационные материалы и технологии (XX научные чтения): сб. тр. Междунар. науч.-практ. конф.,

Белгород, 11–12 окт. 2011 г. / Белгор. гос. технол. ун-т. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2011. – Ч. 2. – С. 74–78.

5. Рубанов, В. Г. Проектирование системы управления печью обжига клинкера как многосвязного объекта. / В. Г. Рубанов, **В. А. Порхало** // Компьютерные науки и технологии: сб. тр. II Междунар. науч.-техн. конф., Белгород, 3–7 окт. 2011 г. / Белгор. гос. нац. исслед. ун-т. – Белгород: Изд-во НИУ «БелГУ», 2011. – С. 339–342.

6. Рубанов, В. Г. Автономная двусвязная система управления печью обжига / В. Г. Рубанов, **В. А. Порхало** // Микроэлектронные информационно-управляющие системы и комплексы: сб. докл. Всерос. науч. шк., Новочеркасск, 5–7 сен. 2011 г. / Юж.-Рос. гос. техн. ун-т. – Новочеркасск: Изд-во ЮРГУ «НПИ», 2011. – С. 91–95.

7. **Порхало, В. А.** Математическая модель обжига клинкера как многосвязного объекта / В. А. Порхало, В. Г. Рубанов // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-24 [текст]: сб. Трудов XXIV Междунар. науч. конф.: в 10 т. Т. 6. Секция 6,7 / под общ. ред. В.С. Балакирева. – Киев: Национ. техн. ун-т Украины «КПИ», 2011. С. 83–85.

8. **Порхало, В. А.** Получение математической модели обжига клинкера на основе решения уравнения Винера-Хопфа / В.А. Порхало, В.Г. Рубанов // Математические методы в технике и технологиях: сб. тр. XXIII Междунар. науч. конф., Саратов, 22–25 июня 2010 г. / Саратов. гос. техн. ун-т. – Саратов, 2010. – Т.10. – С. 132–135.

9. Магергут, В. З. Повышение эффективности работы вращающейся печи с применением комбинированных методов управления / В. З. Магергут, В. Г. Рубанов, А. Г. Бажанов, **В. А. Порхало**, А. С. Копылов // Сб. трудов XXIII Междунар. науч. конф. «Математические методы в технике и технологиях» (ММТТ-23). Том 10. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т – 2010. – С.41–45.

10. Бажанов, А. Г. Повышение эффективности работы вращающейся печи с применением комбинированных методов управления / А. Г. Бажанов, **В. А. Порхало**, А. С. Копылов // Сборник докладов участников программы «УМНИК». Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова – 2010. – С. 6–14.

11. Рубанов, В. Г. Управление качеством обжига с применением современных средств автоматизации / В. Г. Рубанов, **В. А. Порхало** // Цемент Известь Гипс (специальный выпуск) – 2009. – №4. – С. 141–144.

12. **Порхало, В. А.** Программа адаптивного трехпозиционного регулирования с насыщением / В. А. Порхало, А. Г. Бажанов, В. З. Магергут // Свидетельство Российской Федерации о государственной регистрации программы для ЭВМ. Заявитель и правообладатель Белгор. гос. технол. ун-т им. В.Г. Шухова. – № 2011616238 от 09.08.2011.

Подписано в печать 16.04.12      Формат 60x84/16.  
Усл. печ. л. 1.2 Тираж 100 экз. Заказ №

---

Отпечатано в Белгородском государственном технологическом  
университете им. В.Г. Шухова,  
308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46

