

Порхало В. А., аспирант,  
Рубанов В. Г., д-р тех. наук, проф.,  
Шаптала В. Г., д-р тех. наук, проф.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

## АВТОМАТИЗАЦИЯ ПЕЧИ ОБЖИГА КЛИНКЕРА НА ОСНОВЕ КАСКАДНОЙ И МНОГОСВЯЗНОЙ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

porhalo@mail.ru

Выделены значимые управляемые и управляющие параметры технологического объекта печь обжига клинкера, построена автономная система многосвязного объекта и каскадная систем управления, проведено моделирование, переходные процессы отражают достаточное качество обработки возмущений.

**Ключевые слова:** клинкер, обжиг, печь, управление, каскадная система, многосвязный объект.

В промышленности строительных материалов имеется большое количество технологических процессов, где необходимо управлять сложными многосвязными объектами, а их системы регулирования оказываются взаимосвязанными[1]. Многосвязными называются объекты с несколькими входами и выходами, взаимно связанными между собой. В тех случаях, когда в рамках одноконтурных АСР не удается достичь в объекте требуемых показателей качества регулирования той или иной технологической величины прибегают к построению более сложных систем, например, каскадных, автономных систем, систем с переменной структурой, систем с бесконечно большим коэффициентом усиления и др.

Одним из таких сложных многосвязных объектов в промышленности строительных материалов является цементная печь обжига клинкера. Если проанализировать цементную печь как взаимосвязанный объект управления, можно выделить следующие значимые управляющие и управляемые сигналы (рис.1):  $Q_{газ}$  – количество газа(топлива), подаваемого в печь;  $H_1, H_2$  – положение шиберов дымососов;  $T_{ог}, P_{ог}$  – 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[2,3].

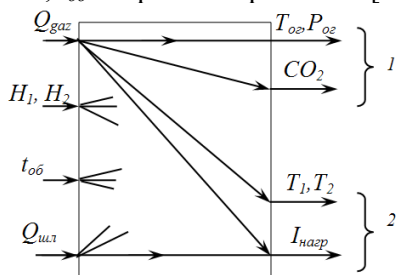


Рис.1. Представление печи обжига как взаимосвязанного объекта

Основой построения систем связанного регулирования является принцип автономности. Применительно к объекту с двумя входами и выходами понятие автономности означает взаимную независимость выходных координат  $y_1$  и  $y_2$  при работе двух замкнутых систем регулирования. По существу, условие автономности складывается из двух условий инвариантности: инвариантности первого выхода  $y_1$  по отношению к сигналу второго регулятора  $x_{p2}$  и инвариантности второго выхода  $y_2$  по отношению к сигналу первого регулятора  $x_{p1}$ .

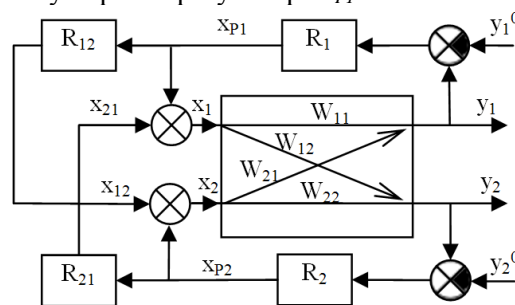


Рис.2. Автономная система регулирования двух координат

При этом сигнал  $x_{p1}$  можно рассматривать как возмущение для  $y_2$  а сигнал  $x_{p2}$  – как возмущение для  $y_1$ . Тогда перекрестные каналы играют роль каналов возмущения (рис.2). Для компенсации этих возмущений в систему регулирования вводят динамические устройства с передаточными функциями  $R_{12}(s)$  и  $R_{21}(s)$ , сигналы от которых поступают на соответствующие каналы регулирования или на входы регуляторов.

Передаточные функции компенсаторов  $R_{12}(s)$  и  $R_{21}(s)$ , определяемые из условия автономности, будут зависеть от передаточных функций прямых и перекрестных каналов объекта и будут равны:

$$R_{12}(s) = \frac{W_{12}(s)}{W_{22}(s)}; \quad R_{21}(s) = \frac{W_{21}(s)}{W_{11}(s)}. \quad (1)$$

При анализе сложных объектов их можно представлять передаточными функциями как дробно-рационального, так и дробно-

иррационального вида[4], в настоящей работе мы ограничиваемся представлением математической модели в дробно-рациональной форме. Для синтеза автономной системы печи обжига необходимо определиться с количеством используемых входных и выходных параметров. Как показал опыт работы операторов печи обжига, рациональным режимом функционирования печи является такой, когда количество подаваемого шлама и время оборота печи поддерживают на одном уровне, а управление осуществляется с помощью изменения количества подаваемого топлива и степени открытия шиберов дымососа. Причем шиберы  $H_1$  и  $H_2$  можно объединить в один параметр, поскольку управление тягодутьевым производится одним из них, а второй подстраивается чтобы поток был одинаковым.

Таким образом для конструирования многосвязной системы имеем два входных параметра ( $Q_{gaz}$  и  $H_1$ ), остается подобрать такое же количество выходных параметров. По степени значимости и были выбраны температура отходящих газов и содержание  $CO_2$ .

С целью получения математической модели статистические данные работы цементной печи для разных каналов были сняты на предприятии ЗАО «Осколцемент». Как показал анализ данных, исследуемые процессы относятся к классу эргодических случайных стационарных процессов в соответствии с определением стационарности в широком смысле. В связи с этим для решения задачи получения математической модели по статистическим данным во временной области было использовано уравнение Винера-Хопфа.

Ниже представлены передаточные функции по каналам управления  $Q_{gaz}$  и  $H_1$ , для измеряемых сигналов  $T_{oz}$ ,  $CO_2$ :

$$W_{H1-CO2}(s) = \frac{7.76}{21.9s^2 + 8.6s + 1} e^{-s},$$

$$W_{Qgaz-CO2}(s) = \frac{0.019}{0.92s^2 + 1.149s + 1} e^{-4s};$$

$$W_{Qgaz-Tor}(s) = \frac{0.0098}{19.98s^2 + 5.423s + 1} e^{-s},$$

$$W_{H1-Tor}(s) = \frac{0.00017}{21.37s^2 + 1} e^{-3s}.$$

Сконструированная двухсвязная автономная система управления показана на рис.3.

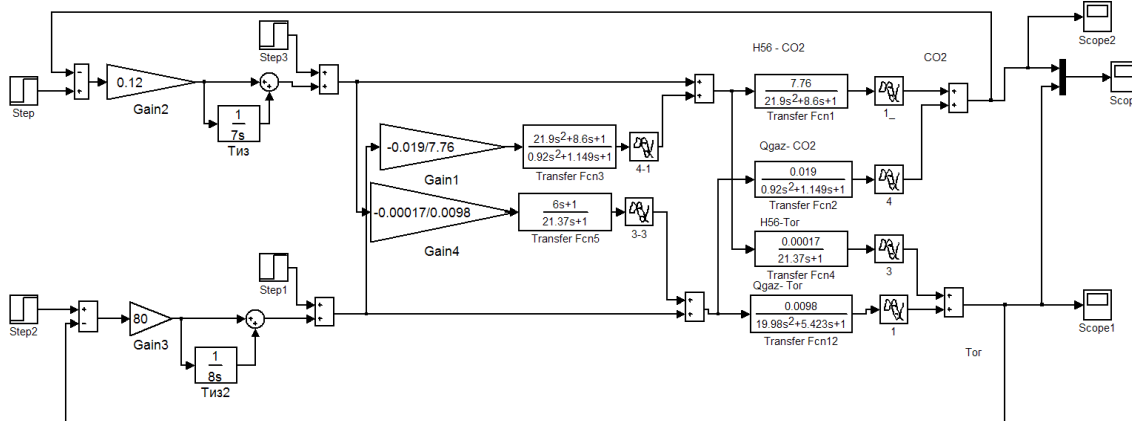


Рис.3. Система управления печью в среде Simulink пакета MATLAB

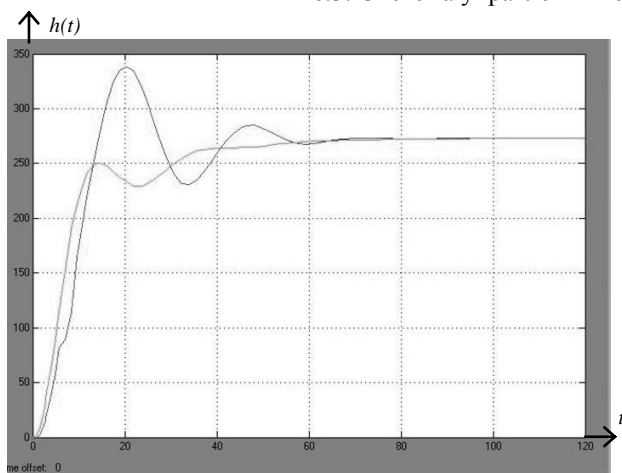


Рис.4. Графики переходных характеристик системы

По основным контурам включены ПИ-регуляторы, настройки по каждому контуру были получены методом Копеловича. Регуляторы для перекрестных контуров рассчитаны по формулам (1). Данная двухсвязная система является устойчивой, и позволяет компенсировать перекрестные связи, что иллюстрируют переходные процессы на рис.4 полученные при подаче ступенчатого воздействия.

При анализе математической модели печи[5,6] были выявлены следующие закономерности: в выходных параметрах печи есть группа параметров, реагирующих сравнительно быстро на входные воздействия  $Q_{gaz}$  и  $H_1$  – параметры 1 на рис.1, и есть группа параметров, реакция которых сравнительно медленная по отношению к тем же входным воздействиям – параметры 2 на рис.1. На основании этого имеется возможность

синтеза системы управления на основе каскадных систем, где быстродействие одного параметра должно быть выше быстродействия другого.

Простейшим случаем каскадной АСР является двухкаскадная АСР (рис.5), состоящая из основного (главного) контура и вспомогательного (внутреннего) контура, как бы вложенного в основной. При этом АСР содержит два регулятора – главный (внешний) регулятор, служащий

для стабилизации основной технологической величины объекта  $y_1$ , и вспомогательный (внутренний) регулятор, предназначенный для регулирования вспомогательной технологической величины  $y_2$ . Поскольку выход внешнего регулятора  $x_1$  используется в качестве задания для внутреннего, то этот регулятор называют еще корректирующим, а внутренний, выходной сигнал  $x_2$  которого подают на исполнительное устройство, – стабилизирующим.

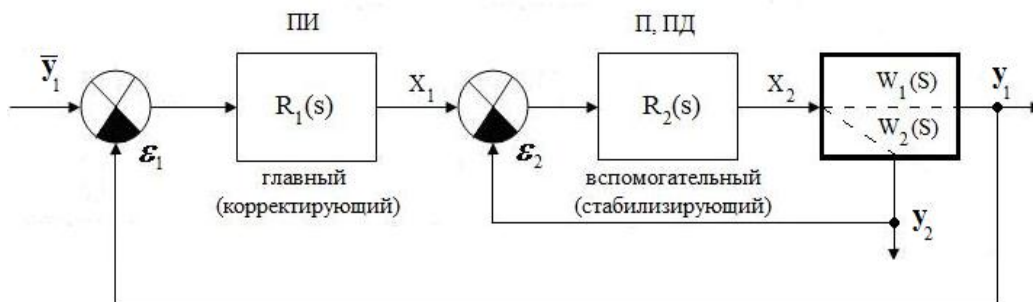


Рис. 5. Структурная схема каскадной АСР

Для того чтобы построить каскадную АСР и чтобы она была эффективна, объект должен удовлетворять, как минимум, двум условиям:

1. При одном входе объекта должно быть не менее двух выходов, то есть управляющее воздействие  $x_2$  должно влиять, как минимум, на две технологические величины  $y_1$  и  $y_2$ ;
2. Инерционность объекта во вспомогательном канале, то есть инерционность  $W_2(s)$ , должна быть меньше (желательно существенно) инерционности основного канала, то есть  $W_1(s)$ .

Так, если передаточные функции  $W_1(s)$  и  $W_2(s)$  – апериодические звенья первого порядка с запаздывающим аргументом, то есть их передаточные функции имеют вид:

$$W(s) = \frac{Ke^{-\tau s}}{T_s + 1},$$

то условие 2) всегда выполняется, если  $K_1 < K_2, \tau_1 > \tau_2$  и  $T_1 > T_2$ , где индексы при параметрах  $K, \tau, T$  соответствуют индексам передаточных функций.

После анализа математической модели печи обжига клинкера, для синтеза каскадной АСР

были выбраны входной параметр  $Q_{gaz}$  и выходные параметры  $T_{oz}$  и  $I_n$ .

Ниже представлены передаточные функции по каналу управления – количество газа подаваемого в печь  $Q_{gaz}$ , для измеряемых сигналов – температура отходящих газов  $T_{oz}$  и нагрузка на главном приводе  $I_n$ :

$$W_{Q_{gaz-Tor}}(s) = \frac{0.0098}{19.98s^2 + 5.423s + 1} e^{-s},$$

$$W_{Q_{gaz-I_n}}(s) = \frac{0.001539}{81s^2 + 8.29s + 1} e^{-8s}.$$

Как видно передаточные функции удовлетворяют условиям построения каскадной АСР: время запаздывания первой передаточной функции значительно выше, чем у второй, а коэффициент усиления ниже. В соответствии с этим в среде Simulink пакета MATLAB была построена каскадная двухконтурная система управления печью (рис.6), где управляющим параметром является  $Q_{gaz}$ , во внешнем контуре регулируется переменная  $I_n$ , а во внутреннем  $T_{oz}$ .

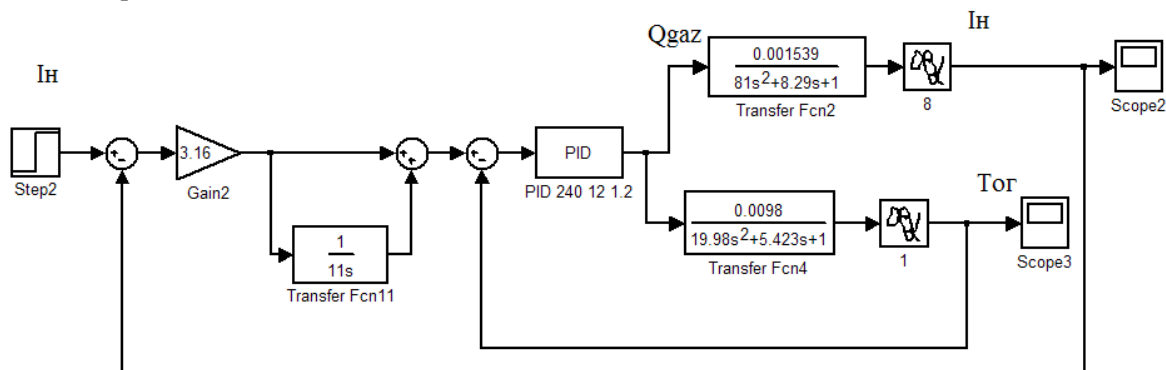


Рис.6. Система управления печью в среде Simulink пакета MATLAB

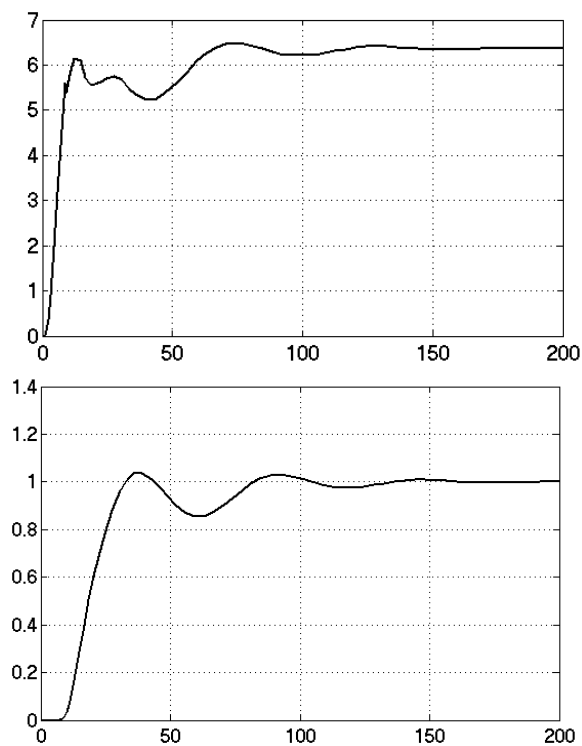


Рис. 7. Графики переходных процессов во внутреннем и внешнем контуре

Построенная в среде Simulink каскадная система была промоделирована путем подачи единичного ступенчатого сигнала по каналу управления, и были получены графики переходных процессов во внутреннем и внешнем контуре (рис. 7). Данная система является устойчивой, позволяет обрабатывать управление и компенсировать возмущения, что иллюстрируют переходные процессы. Таким образом, обосновано применение принципов автономности и каскадности при управлении процессом обжига цементного клинкера, моделирование систем показало достаточный уровень качества управления и данные системы могут быть рекомендованы для использования в производстве.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Рубанов, В.Г. Системный подход к проектированию управляемых мобильных логистических средств, обладающих свойством живучести / В.Г. Рубанов // Научные ведомости БелГУ. Серия: История, Политология, Экономика, Информатика. – 2011. – №1 (96). – Вып. 17/1. – С. 176–187.
2. Бажанов, А.Г. Создание нечеткой диаграммы поведения узла нагрузки на главный привод цементной печи / А.Г. Бажанов, В.З. Магергут, Р.А. Набоков // Математические методы в технике и технологиях: сб. Трудов XXIV Международ. науч. конф., Харьков, 2 – 4 окт. 2012 г. / Национ. техн. ун-т Украины «ХПИ» – Харьков: СГТУ, 2012. – Т. 4. – С. 11–14.
3. Копылов, А.С. Расширенная схема нечеткого управления вращающейся печью для обжига цементного клинкера / А.С. Копылов, В.З. Магергут // Математические методы в технике и технологиях: сб. Трудов XXIV Международ. науч. конф., Харьков, 2 – 4 окт. 2012 г. / Национ. техн. ун-т Украины «ХПИ» – Харьков: СГТУ, 2012. – Т. 4. – С. 9–11.
4. Кариков, Е. Б. Моделирование теплотехнологических объектов в классе дробно-иррациональных передаточных функций / Е.Б. Кариков, В.В. Мишунин, В.Г. Рубанов, Ю.А. Гольцов // Научные ведомости Белгор. гос. ун-та. – 2010. – № 13 (132). – выпуск 23/1. – С. 173–179.
5. 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.
6. Порхало, В. А. Математическая модель обжига клинкера как многосвязного объекта / В. А. Порхало, В. Г. Рубанов // Математические методы в технике и технологиях: сб. тр. XXIV Международ. науч. конф., Киев, 30 мая – 2 июн. 2011 г. / Национ. техн. ун-т Украины «КПИ» – Киев: СГТУ, 2011. – Т. 6. – С. 83–85.