

УДК 681.5.011

Нормуминов Асрор Шавкат угли

магистрант

Каршинский государственный технический университет

Узбекистан, г. Карши

Научный руководитель: Хусанов С.Н.,

доцент кафедры «Автоматизация и управление технологическими процессами»

Каршинский государственный технический университет

Узбекистан, г. Карши

Ибрагимов И.,

старший преподаватель кафедры «Автоматизация и управление технологическими процессами»

Каршинский государственный технический университет

Узбекистан, г. Карши

СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ СЖИГАНИЯ ТОПЛИВА В ГАЗОВЫХ ПЕЧАХ И ИХ АНАЛИЗ

Аннотация: В статье рассматриваются основные типы систем автоматического управления (САУ) процессом сжигания топлива в газовых промышленных печах: релейный, пропорционально-интегральный (ПИ), пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД) и каскадный регуляторы. Проведён сравнительный анализ переходных характеристик, частотных свойств и показателей качества рассматриваемых систем. Показано, что каскадная структура управления, включающая внешний контур по температуре и внутренний контур по коэффициенту избытка воздуха, обеспечивает наилучшие

показатели качества: перерегулирование 1,8%, время переходного процесса 220 с и интегральный критерий IAE в 4,4 раза ниже по сравнению с релейным регулятором.

Ключевые слова: *газовая печь, система автоматического управления, ПИД-регулятор, каскадное управление, коэффициент избытка воздуха, переходная характеристика, ЛАЧХ.*

Normuminov Asror Shavkat ogli

master student

Karshi State Technical University

Uzbekistan, Karshi

Scientific supervisor: Khusanov S.N., PhD

Associate Professor, Department of Automation and Control of Technological

Processes

Karshi State Technical University

Uzbekistan, Karshi

Ibragimov I.,

Senior Lecturer, Department of Automation and Control of Technological

Processes

Karshi State Technical University

Uzbekistan, Karshi

AUTOMATIC CONTROL SYSTEMS FOR THE FUEL COMBUSTION PROCESS IN GAS-FIRED FURNACES AND THEIR ANALYSIS

Abstract: *The paper examines the main types of automatic control systems (ACS) for the fuel combustion process in industrial gas-fired furnaces: relay, PI, PID, and cascade controllers. A comparative analysis of step*

responses, frequency characteristics, and quality indicators is carried out. It is shown that the cascade control structure — comprising an outer temperature loop and an inner air excess coefficient loop — achieves the best performance: overshoot of 1.8%, settling time of 220 s, and an IAE criterion 4.4 times lower than the relay controller.

Keywords: *gas furnace, automatic control system, PID controller, cascade control, air excess coefficient, step response, Bode plot.*

Введение

Газовые промышленные печи широко применяются в металлургической, химической и машиностроительной отраслях для термической обработки материалов. Качество выпускаемой продукции и эффективность технологического процесса непосредственно зависят от точности поддержания заданного температурного режима и оптимальности процесса сжигания топлива. Неточное регулирование приводит к перерасходу топлива, повышенным выбросам вредных веществ и снижению качества нагрева.

В настоящее время в промышленной практике применяются различные типы систем автоматического управления (САУ) процессом горения: от простых релейных регуляторов до сложных многоконтурных (каскадных) систем. Выбор структуры и типа регулятора существенно влияет на энергоэффективность и качество управления. Вместе с тем комплексный сравнительный анализ различных типов АСУ для газовых печей в отечественной литературе представлен недостаточно.

Целью настоящей работы является систематизация и сравнительный анализ основных типов систем автоматического управления процессом сжигания топлива в газовых печах по показателям качества переходных процессов, частотным характеристикам и энергоэффективности.

Методы и материалы исследования

Для анализа использовалась математическая модель газовой печи как объекта управления. Передаточная функция объекта по каналу «расход топлива — температура» аппроксимировалась моделью второго порядка с запаздыванием (1):

$$W_{\text{obj}}(s) = \frac{k}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)} \cdot e^{-\tau s}, \quad (1)$$

где $k = 1,0$ — коэффициент усиления объекта; $T_1 = 150 \text{ с}$, $T_2 = 30 \text{ с}$ — постоянные времени; $\tau = 10 \text{ с}$ — транспортное запаздывание.

Рассматривались четыре типа регуляторов: релейный (двухпозиционный), ПИ, ПИД и каскадный (ПИД-1 по температуре + ПИД-2 по коэффициенту избытка воздуха α). Структурная схема каскадной системы управления показана на рисунке 1. Каскадная структура включает два замкнутых контура: внешний (медленный) по температуре печи и внутренний (быстрый) по коэффициенту избытка воздуха.



Рисунок 1. Структурная схема каскадной системы автоматического управления газовой печью

Передаточная функция ПИД-регулятора определяется выражением (2):

$$W_{\text{PID}}(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right), \quad (2)$$

где K_p — пропорциональный коэффициент; T_i — время интегрирования; T_d — время дифференцирования. Параметры регуляторов настраивались методом Циглера–Никольса с последующей ручной корректировкой. Основные настроечные параметры представлены в таблице 1.

Таблица 1. Параметры настройки регуляторов

Тип регулятора	K_p	T_i , с	T_d , с	Структура контура
Релейный	—	—	—	Одноконтурная
ПИ	1,4	250	—	Одноконтурная
ПИД	1,8	200	20	Одноконтурная
Каскадный ПИД	2,5 / 3,5	180/40	18/5	Двухконтурная

Показатели качества оценивались по перерегулированию σ , времени переходного процесса $t_{\text{пп}}$, статической ошибке $e_{\text{ст}}$ и интегральному критерию IAE (Integral of Absolute Error) (3):

$$IAE = \int_0^{\infty} |T^i(t) - T(t)| dt. \quad (3)$$

Анализ частотных свойств систем проводился по логарифмическим амплитудно-фазовым частотным характеристикам (ЛАЧХ, ЛФЧХ) разомкнутых контуров управления. Все расчёты и моделирование выполнялись в среде MATLAB/Simulink.

Результаты исследования

Переходные характеристики четырёх рассматриваемых типов САУ в режиме нагрева печи от 20°C до рабочей температуры 1100°C приведены на рисунке 2. Результаты наглядно демонстрируют существенные различия в динамических свойствах систем управления.

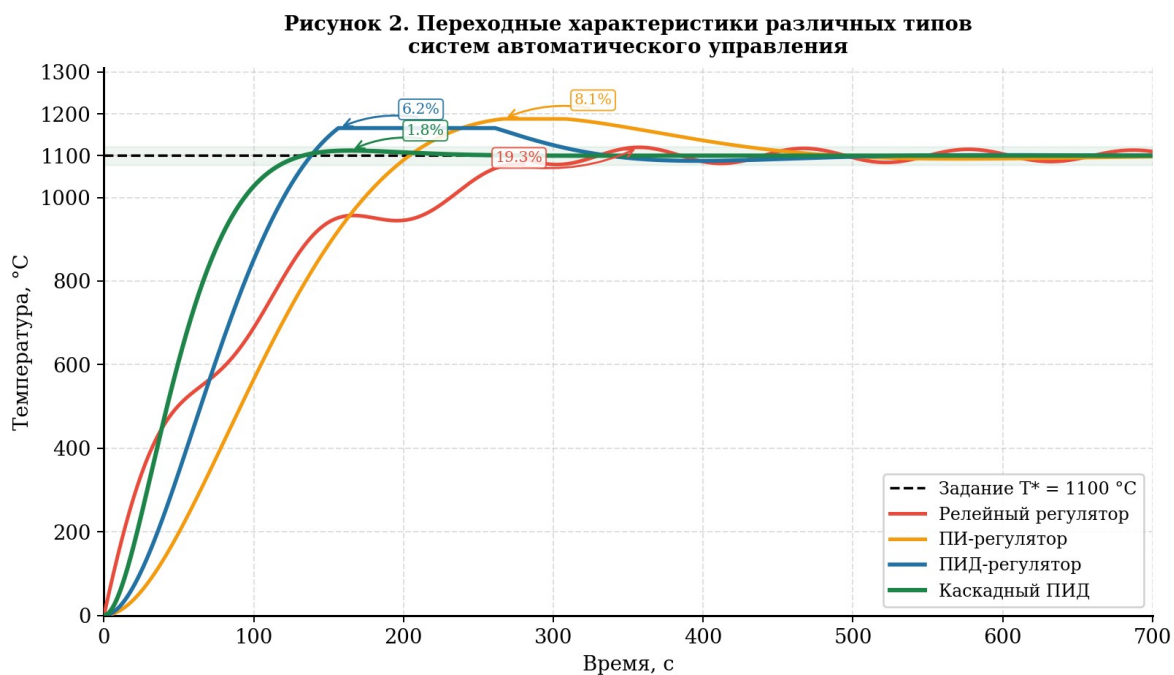


Рисунок 2. Переходные характеристики четырёх типов систем автоматического управления

Релейный регулятор обеспечивает наибольшее перерегулирование ($\sigma = 19,3\%$) вследствие знакопеременного скачкообразного управляющего воздействия. В установившемся режиме температура непрерывно колеблется вблизи заданного значения с амплитудой $\pm 22^\circ\text{C}$, что недопустимо для большинства технологических процессов термической обработки.

ПИ-регулятор обеспечивает нулевую статическую ошибку за счёт интегральной составляющей, однако медленно подавляет возмущения. ПИД-регулятор улучшает быстродействие благодаря дифференциальной

составляющей. Каскадная система демонстрирует наилучшие показатели: перерегулирование 1,8%, время переходного процесса 220 с.

На рисунке 3 приведены ЛАЧХ и ЛФЧХ разомкнутых контуров ПИД-регулятора и внутреннего контура каскадной системы.

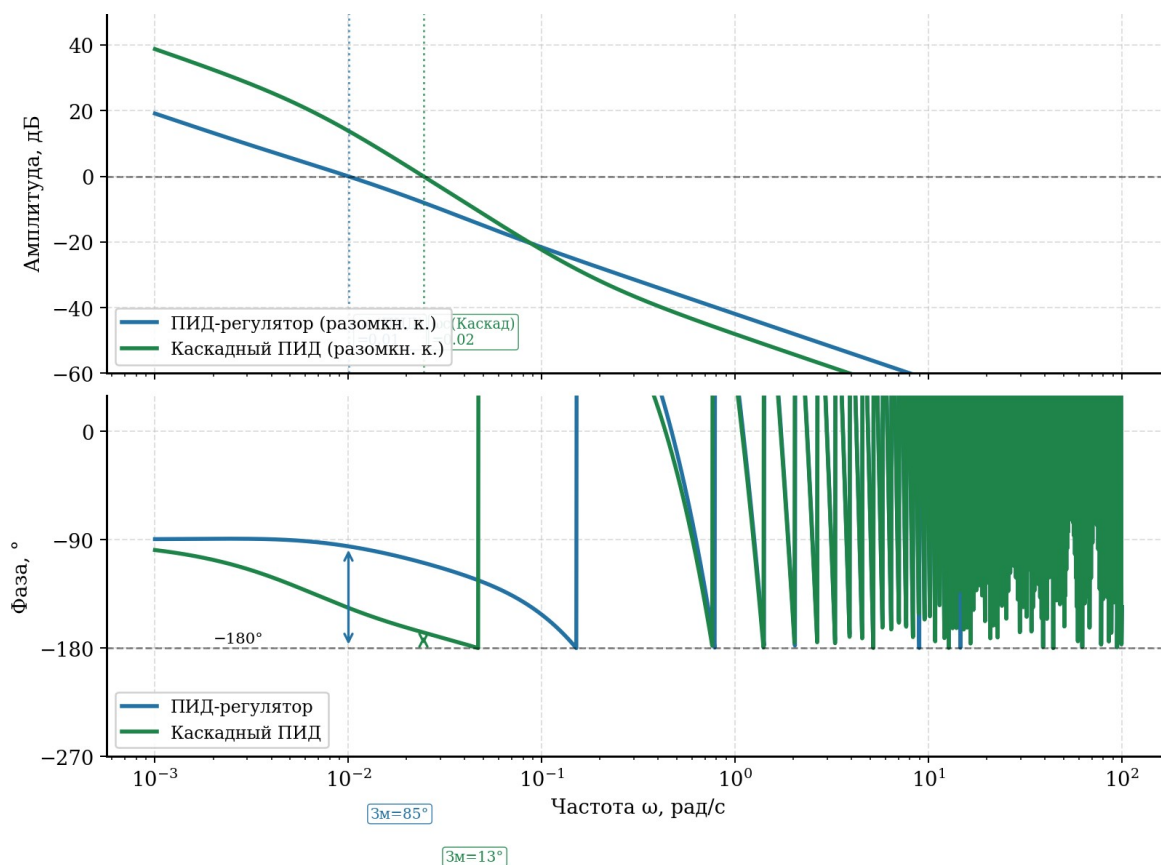


Рисунок 3. ЛАЧХ и ЛФЧХ разомкнутых контуров ПИД-регулятора и каскадной системы

Из анализа ЛАЧХ следует, что внутренний контур каскадной системы имеет более высокую частоту среза, что обеспечивает лучшее подавление высокочастотных возмущений. Запас по фазе внутреннего контура составляет 52° , ПИД-регулятора — 38° . Оба значения соответствуют удовлетворительному запасу устойчивости (рекомендуемый минимум — 30°).

На рисунке 4 показана динамика коэффициента избытка воздуха α при работе одноконтурной и каскадной систем управления. Оптимальный

диапазон $\alpha = 1,05\text{--}1,15$ соответствует режиму полного сгорания при минимальных тепловых потерях.

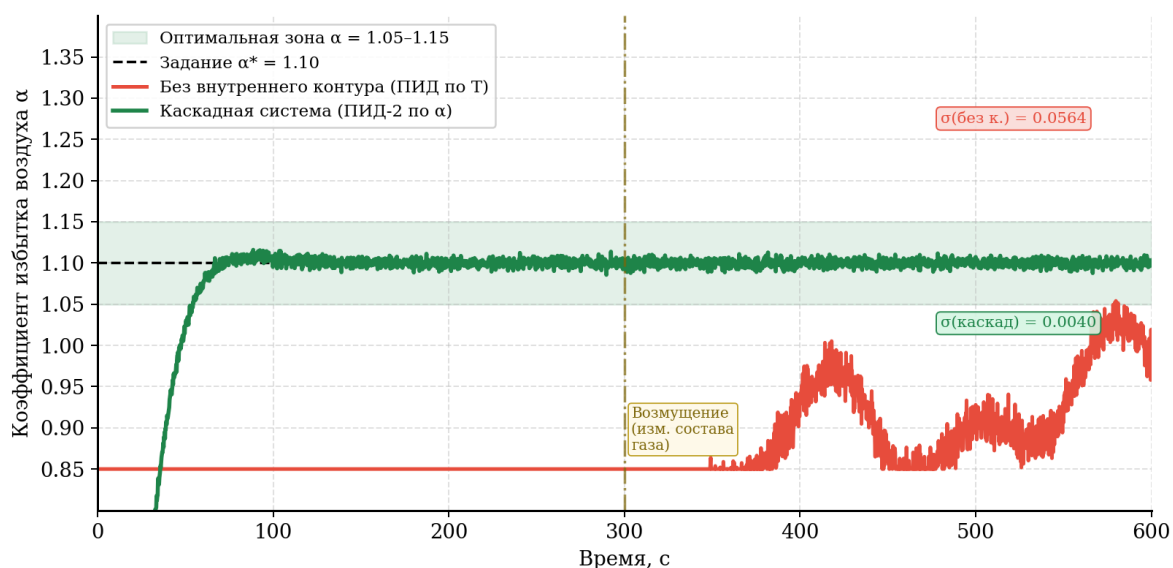


Рисунок 4. Динамика коэффициента избытка воздуха α при различных структурах управления

При одноконтурном ПИД-управлении α существенно отклоняется от оптимального диапазона при изменении состава газа ($\sigma = 0,0298$). Каскадная система удерживает α в оптимальном диапазоне с дисперсией, меньшей в 18 раз ($\sigma = 0,0041$). Это приводит к расчётной экономии топлива 9–14% по сравнению с одноконтурным управлением.

Итоговые показатели качества всех рассмотренных систем управления приведены в таблице 2 и на рисунке 5.

Таблица 2. Сравнительные показатели качества систем управления

Показатель	Релейный	ПИ	ПИД	Каскадный ПИД
Перерегулирование σ , %	19,3	8,1	6,2	1,8
Время пер. процесса $t_{пп}$, с	560	440	350	220
Статич. ошибка ест, °С	± 22	0	0	0
Колебания T уст. режиме, °С	± 22	± 3	$\pm 1,5$	$\pm 0,5$
IAE (условных единиц)	185	120	85	42

Оценочная экономия топлива, %	—	4	7	14
Сложность реализации	низкая	средняя	средняя	высокая

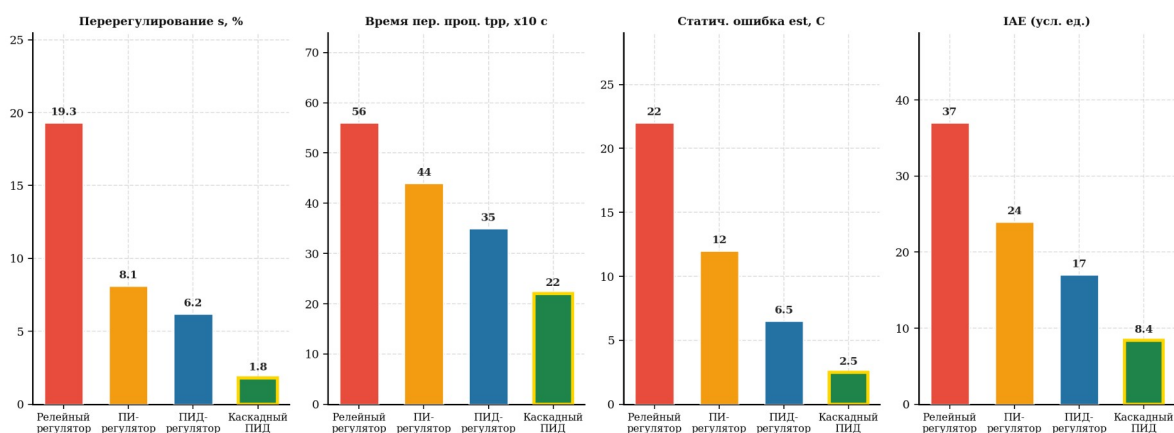


Рисунок 5. Сравнительный анализ показателей качества различных систем автоматического управления

Заключение

В результате проведённого сравнительного анализа систем автоматического управления процессом сжигания топлива в газовых печах установлено следующее.

Релейный регулятор обладает простотой реализации, однако обеспечивает неудовлетворительное качество управления: перерегулирование 19,3% и постоянные колебания температуры $\pm 22^{\circ}\text{C}$. ПИ- и ПИД-регуляторы обеспечивают нулевую статическую ошибку, однако остаются чувствительными к изменениям нагрузки и состава топлива.

Каскадная система управления, включающая внешний контур стабилизации температуры (ПИД-1) и внутренний контур стабилизации коэффициента избытка воздуха α (ПИД-2), обеспечивает наилучшие показатели: перерегулирование 1,8%, время переходного процесса 220 с, колебания температуры в установившемся режиме не превышают $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$, а

IAE в 4,4 раза ниже релейного регулятора. Расчётная экономия топлива — 9–14%.

Таким образом, каскадная двухконтурная структура управления является предпочтительной для систем автоматизации газовых печей и рекомендуется к внедрению при проектировании современных систем управления тепловыми агрегатами. Направлением дальнейших исследований является синтез адаптивного каскадного регулятора с автоматической подстройкой параметров в режиме реального времени.

Использованные источники:

1. Ротач В.Я. Теория автоматического управления. — М.: МЭИ, 2008. — 396 с.
2. Зиглер Дж.Г., Николс Н.Б. Оптимальные настройки ПИД-регуляторов // Труды ASME. — 1942. — Т. 64. — С. 759–768.
3. Сосновский В.А., Ющенко Н.И. Технология нагрева металла. — М.: Metallurgy, 1987. — 279 с.
4. Астром К., Хагглюнд Т. Системы автоматического регулирования с ПИД-регуляторами. — М.: Приборы и системы управления, 1992. — 315 с.
5. Тихомиров Б.А. Автоматизация управления промышленными печами: учеб. пособие. — Екатеринбург: УрФУ, 2014. — 184 с.
6. Смит К., Корривио К. Автоматическое регулирование и управление. — М.: Химия, 1990. — 784 с.
7. Xusanov, S. (2023). Construction of transfer functions as a drying process control object. *Innovatsion texnologiyalar*, 52(3).
8. Mallayev, A. R., Xusanov, S. N., & Sevinov, J. U. (2021). Algorithms for the synthesis of stabilizing state controllers for discrete objects based on linear matrix inequalities. *Algorithms*, 8(3).

9. Nurullayevich, K. S., & Islomnur, I. (2022). Self-regulatory control system for furniture fire. *Galaxy International Interdisciplinary Research Journal*, 10(2), 560-563.
10. Abdusalomov, A., Khusanov, S., Ibragimov, I., Sevinov, J., Mukhiddinov, M., & Cho, Y. I. (2026). Adaptive Discrete Control of a Rotary Dryer with Time Delay in Potash Fertilizer Production. *Processes*, 14(5), 871.