

УДК 681.513.54

КОВРИГО Ю.М., САКОВ Р.П.

Національний технічний університет України «Київський
політехнічний інститут»

ПРОГНОЗНЕ КЕРУВАННЯ ЕФЕКТИВНІСТЮ ГОРІННЯ ПАРОВОГО КОТЛА

Мета. Розглянути метод настройки ПІД-регулятора на основі *Internal Model Control (IMC)* для системи автоматичного керування економічністю процесу горіння ТЕС.

Методика. Використано моделі у вигляді передаточних функцій. Транспортне запізнення апроксимоване методом Паде. Для розрахунку перехідних процесів використовувалось програмне забезпечення *MatLab*.

Результати. В статті розглядається системи автоматичного керування економічністю процесу горіння на ТЕС. Проведено огляд існуючих рішень. Розглянуто розрахунок ПІД-регулятора на основі ІМС підходу для системи керування економічністю процесу горіння ТЕС.

Наукова новизна. Досліджено систему автоматичного керування економічністю процесу горіння ТЕС з ПІД-регулятором на основі ІМС підходу.

Практична значимість. Розглянутий ПІД-регулятор дозволяє настройку за одним параметром, що визначає показник якості перехідних процесів.

Ключові слова. ПІД-регулятор, ІМС-регулятор, економічність ТЕС, прогнозне керування.

Вступ. Економічність роботи котла оцінюється по його ККД, рівному відношенню корисного тепла на генерування і перегрів пари до затраченого, тобто до тепла, яке може бути отримане при спалюванні палива. Для забезпечення надійної та економічної роботи котла необхідно підтримувати вміст кисню O_2 в заданих межах з незначними відхиленнями від номінального. [1]

Задача регулювання економічності полягає в підтриманні максимального значення ККД парогенератору або зведення до мінімуму теплових втрат, що супроводжують процес спалювання палива і передачі тепла воді та пару. Необхідність регулювання економічності горіння визначається умовами технологічного процесу. Перевищення допустимого вмісту кисню O_2 призводить до втрат тепла з вихідними газами і зменшенню ККД процесу. Зменшення вмісту кисню O_2 у вихідних газах нижче допустимого значення призводить до втрат тепла від хімічного і механічного недопалу палива.

Постановка задачі. Завдання дослідження полягає у пошуках нових методів у системах автоматичного керування економічністю горіння, що дозволяють підвищувати ККД парогенератору ТЕЦ.

Результати досліджень. Існує декілька варіантів схем автоматичного управління подачею повітря в залежності від способу непрямої оцінки економічності процесу горіння по відношенню до різних сигналів. Регулювання економічності горіння по відношенню «паливо-повітря» використовується при постійній якості палива та кількості повітря, що необхідно для забезпечення необхідної повноти згорання і зв'язані прямо пропорційною залежністю. Така схема може використовуватися з котлами, що працюють на природному газі або мазуті, оскільки можливий прямий вимір витрати палива. Для використанні

твердого палива проблема виміру витрати палива погано вирішена, тому ця схема не застосовується. Для котлів, що працюють на твердому паливі схему «паливо-повітря» змінила схема, організована за принципом «пар-повітря», де задаючим сигналом регулятора повітря служить витрата пари при виході з котла (D_p). При сталій температурі живильної води, тепловмісту пари, ККД котлоагрегату і при спалюванні одностороннього палива витрата пари в статиці практично однозначно задає теоретично необхідну для горіння витрату повітря. Тому при сталих режимах схема «пар-повітря» забезпечує задовільну точність підтримки заданого коефіцієнта надлишку повітря, визначального фактора економічності топкового процесу. Однак у перехідних режимах, пов'язаних із зміною акумульованого в котлі тепла, витрата пари не узгоджується з фактичним тепловим навантаженням котла, і оптимальне співвідношення між подачею палива і повітря порушується. Корисним удосконаленням схеми «пар-повітря» є використання динамічного зв'язку (зникаючого імпульсу) від регулятора палива до регулятора повітря. Динамічний зв'язок діє тільки в перехідних режимах і не має залишкового впливу на вимірювальну схему регулятора повітря.

Для котлоагрегатів, що працюють на твердому паливі, в схемах регулювання процесу горіння доцільно використовувати сигнал, пов'язаний з тепловиділенням в топці. Таким сигналом є сигнал по «теплу» - тепловому навантаженні. Сигнал за тепловим навантаженням запропонований З.Я. Бейрахом і В.М. Добкін у ЦКТИ (м. Ленінград, 1953р). Тепловим навантаженням котла називають витрату пари, яка була би отримана, якби сприйняте поверхнями нагріву котельного агрегату тепло було витрачено на пароутворення, а не акумулювалось частково водою, парою і металом парогенеруючої частини котла.

Перевагу в АСР процесів горіння на котлах отримала комбінація регулятора палива, працюючого по теплу, з регулятором повітря, виконаним за схемою «задане навантаження-повітря». В загальному, можуть використовуватися схеми: навантаження - повітря, при регулюванні подачі палива по схемі навантаження – паливо; вода – повітря при регулюванні подачі палива по схемі вода – тепло, тепло – повітря і паливо – повітря.

ПІД регулятори широко використовуються в усіх галузях промисловості. В управлінні технологічними процесами більш ніж 95% регуляторів саме ПІД регулятори [2,3]. В сучасних системах керування задачі ієрархічно розподілені так, що ПІД регулятор використовується на нижньому рівні, а верхній рівень обраховує значення завдання для нижнього. Така структура поширена через те, що ПІД регулятор зі зворотнім зв'язком дозволяє уникнути статичної похибки і досягає достатньої якості регулювання для простих процесів. Наразі, ПІД регулятори використовуються в розподілених системах і мають у своєму складі деякі складні функції додані до основного алгоритму, такі як прямий зв'язок, автоматична настройка та інші.[4]

ПІД регулятори з деякою мірою успішності можуть бути застосовані для процесів з транспортним запізненням. В статі проводиться аналіз існуючих методу налаштування ПІД регулятора і порівняння їх з предиктором Сміта. У якості моделі процесу буде використовуватися модель каналу «зміна положення регулюючого клапана витрати природного газу – вміст O_2 у вихідних газах» котла ТГМП-314. Транспортне запізнення значною мірою визначається типом газоаналізатора, що встановлено на об'єкті. Огляд

доступних на ринку України газоаналізаторів кисню показав, що час транспортного запізнення для газоаналізаторів складає від 15 до 45 с, тому в статі буде розглянуто декілька варіантів перехідних характеристик.

Керуюча дія стандартного ПІД регулятора може бути визначена наступним чином:

$$u(t) = K_c \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (1)$$

де $e(t) = r(t) - y(t)$ – похибка між сигналами завдання ($r(t)$) та виходу ($y(t)$),

K_c – пропорційний коефіцієнт підсилення,

T_i – час інтегрування

і T_d – час диференціювання.

Передаточна функція для стандартного ПІД регулятора:

$$C(s) = K_c \left[1 + \frac{1}{T_i s} + T_d \right] \quad (2)$$

Стандартна формула ПІД регулятора – не єдине рішення застосування алгоритму. Інша структура може бути застосована, наприклад, послідовна форма ПІД регулятора с передаточною функцією:

$$C(s) = k_c \frac{(1 + T_i s)}{T_i s} (T_D s + 1) \quad (3)$$

або паралельна форма, що описується передаточною функцією:

$$C(s) = K_p + \frac{K_I}{s} + K_D s \quad (4)$$

в залежності від конкретного застосування або від форми, що використовується промисловим контролером.

Представлені форми ПІД регуляторів не можуть застосовуватись на практиці, через те, що порядок чисельника більший за порядок знаменника. Зазвичай низькочастотний фільтр застосовується для диференційної складової. Наприклад, передаточна функція диференційної частини контролера $D(s)$:

$$D(s) = \frac{K_c (T_d s)}{\alpha T_d s + 1} \quad (5)$$

де $\alpha \in (0,1)$. Для промислових контролерів значення α зазвичай складає від 0,05 до 0,5. Цей параметр може використовуватися для настройки затухання шумів та робастності замкнутої системи. Фільтр також може використовуватися послідовно з ПІД регулятором для реалізації правильної передаточної функції. Для стандартної форми передаточна функція:

$$C(s) = \frac{K_c \left[1 + \frac{1}{T_i s} + T_d \right]}{\alpha T_d s + 1} \quad (6)$$

Для послідовної форми передаточна функція:

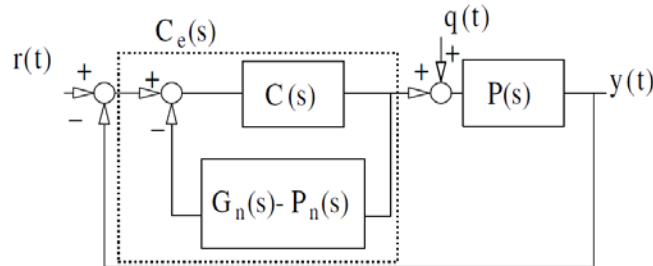
$$C(s) = k_c \frac{(1 + T_i s)}{T_i s} \frac{(T_D s + 1)}{(\alpha T_D s + 1)} \quad (7)$$

Для паралельної форми передаточна функція:

$$C(s) = K_p + \frac{K_I}{s} + \frac{K_D s}{\alpha K_D s + 1} \quad (8)$$

Предиктор Сміта може досягати відмінних перехідних характеристик для процесів, що містять транспортне запізнення. Наступний метод заснований на ідеях предиктора використовується для налаштування ПІД регулятора для процесів з транспортним запізненням.

На рисунку зображено еквівалентну схему предиктора Сміта. $C(s)$ – первинний регулятор, $P(s)$ – передаточна функція процесу, $P_n(s)$ – передаточна функція моделі процесу, $G_n(s)$ – передаточна функція моделі процесу без транспортного запізнення.



Еквівалентна схема предиктора Сміта

В представленій схемі еквівалентний регулятор $C_e(s)$ може бути обрахований як:

$$C_e(s) = \frac{C(s)}{1 + C(s)[G_n(s) - P_n(s)]} \quad (9)$$

Порядок $C_e(s)$ визначається порядком $G_n(s)$, що, зазвичай, визначає порядок первинного регулятора $C(s)$. Зазначимо, що $C_e(s)$ не раціональна функція, через те що $P_n(s)$ містить транспортне запізнення у явному виді. Розглянемо модель процесу, що буде описана наступною передаточною функцією:

$$P_n(s) = \frac{K_p e^{-Ls}}{1 + Ts} \quad \left(G_n(s) = \frac{K_p}{1 + Ts} \right) \quad (10)$$

Для неї первинний регулятор:

$$C(s) = \frac{K_1(1 + T_1s)}{T_1s} \quad (11)$$

Його достатньо для забезпечення замкнутої системи з процесом без транспортного запізнення. ПІ регулятор може бути настроєний для скорочення полюсів моделі процесу ($T_1 = T$). Тоді характеристичне рівняння:

$$1 + C(s)G_n(s) = 1 + \frac{K_1 K_p}{T_1 s} = 1 + \frac{1}{T_0 s}, \quad T_0 = \frac{T}{K_1 K_p} \quad (12)$$

і передаточна функція замкнутої системи:

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{C(s)G_n(s)}{1 + C(s)G_n(s)} e^{-Ls} = \frac{1}{1 + T_0 s} e^{-Ls} \quad (13)$$

T_0 можна використовувати, як параметр настройки для визначення вимог до замкнутої системи.

Передаточна функція еквівалентного регулятора наступна:

$$C_e(s) = \frac{\frac{K_1(1+Ts)}{Ts}}{1 + \frac{K_1 K_p}{Ts}(1 - e^{-Ls})} = \frac{K_1(1+Ts)}{Ts + K_1 K_p(1 - e^{-Ls})} \quad (14)$$

Цей регулятор має інтегральну дію (зазначимо, що $s = 0$ – корінь знаменника $Ts + K_1 K_p(1 - e^{-Ls})$) і може бути апроксимований ПІД регулятором, якщо

транспортне запізнення буде замінено поліноміальною апроксимацією. Для апроксимації транспортного запізнення в рівнянні (14) може бути використана апроксимація Паде

$P_{11}(s) = \frac{1-sL/2}{1+sL/2}$, таким чином:

$$C_e(s) = \frac{K_1(1+Ts)}{Ts + K_1K_p \left(1 - \frac{1-sL/2}{1+sL/2}\right)} = \frac{K_1(1+Ts)}{Ts + K_1K_p \frac{sL}{1+sL/2}} = \frac{K_1(1+Ts)(1+0,5sL)}{Ts(1+0,5sL + \frac{K_1K_pL}{T})} = \frac{K_1(1+Ts)(1+0,5sL)}{Ts(1 + \frac{0,5sL}{1 + \frac{K_1K_pL}{T}})(1 + \frac{K_1K_pL}{T})} \quad (15)$$

Для ПД регулятора з послідовною формою і фільтром (7) можуть бути визначені параметри $T_I = T$, $T_D = 0,5L$ і

$$\alpha = \frac{1}{1 + \frac{K_1K_pL}{T}} = \frac{1}{1 + \frac{T}{T_0}}, k_c = \frac{T}{(L+T_0)K_p} \quad (16)$$

Зручно, що постійна часу замкненого процесу T_0 може бути обрана довільно. Однак, в дійсності якість регулювання залежить від того яким чином було проведено апроксимацію $C_e(s)$.

Розрахунок будемо проводити для наступних моделей:

$$P_{n1}(s) = \frac{0,06e^{-15s}}{1+30s}, P_{n2}(s) = \frac{0,06e^{-30s}}{1+30s}, P_{n3}(s) = \frac{0,06e^{-45s}}{1+30s} \quad (17)$$

Відповідно, для P_{n1} , P_{n2} , P_{n3} співвідношення τ/T буде рівне 0,5, 1, 1,5.

ПІ-регулятор для предиктора буде мати таку форму:

$$C(s) = k_c \frac{(1+T_I s)}{T_I s} \quad (18)$$

T_i обираємо аналогічним T ($T_i = 30$), k_c розраховуємо, щоб досягти домінуючою часової константи в замкненому контурі при $T_{cl} = 0.3$. Тобто:

$$1 + C(s)G(s) = \left[1 + \frac{k_c}{30s}\right]_{s=\frac{-1}{0.3}} = 0 \Rightarrow k_c = 100. \quad (19)$$

В результаті отримуємо перехідні процеси с показниками якості приведеними в таблиці.

Ці показники якості можна вважати еталонними. Для всіх замкнутих процесів стала часу T_{0SP} складає 5,5 с.

Порівняння прямих показників якості

Передаточна функція об'єкта	P_{n1}		P_{n2}		P_{n3}	
	зав.-вих.	зб. – вих.	зав.-вих.	зб. – вих.	зав.-вих.	зб. – вих.
Параметр						
Статична похибка, %02	0	0	0	0	0	0
t_{np} , с	30	132	45	158	60	188
$M+$, %02	1	0,026	1	0,039	1	0,047
Перерегулювання, %	0	0	0	0	0	0
Затухання	1	1	1	1	1	1

Висновки.

- 1) Налаштування ПІД-регулятора може бути виконана з ІМС підходом.
- 2) Отриманий ПІД-регулятор може бути розглянутий, як кореневий метод налаштування для апроксимованої моделі процесу:

$$P_m(s) = \frac{K_p(1 - sL/2)}{(1 + Ts)(1 + sL/2)} \quad (16)$$

- 3) Отриманий ПІД-регулятор скорочує полюс моделі $s = -1/T$, таким чином така налаштування має переваги і недоліки кореневих методів налаштування.

Список використаних джерел

1. Плетнев Г.П. Автоматизированное управление объектами тепловых электростанций: Учебн. пособие для вузов. – М.: Энергоиздат, 1981. – 368 с.
2. K.J. Astrom and T. Hagglund. PID Controllers: Theory, Design and Tuning. Instrument Society of America, 1995.
3. H. Takatsu, T. Itoh, and M. Araki. Future needs for the control theory in industries-report and topics of the control technology survey in the Japanese industry. Journal of Process Control, 8(5-6):369–374, 1998.
4. J. E.Normey-Rico and E.F. Camacho . Control of Dead-time Process. Springer Science, 2007.

References

1. Pletnev G.P. Automated control of thermal power plants. Energoizdat, 1981. [in Russian]
2. K.J. Astrom and T. Hagglund. PID Controllers: Theory, Design and Tuning. Instrument Society of America, 1995.
3. H. Takatsu, T. Itoh, and M. Araki. Future needs for the control theory in industries-report and topics of the control technology survey in the Japanese industry. Journal of Process Control, 8(5-6):369–374, 1998.
4. J. E.Normey-Rico and E.F. Camacho. Control of Dead-time Process. Springer Science, 2007.

ПРОГНОЗИРУЕМОЕ УПРАВЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТЬЮ ГОРЕНИЯ ПАРОВОГО КОТЛА

КОВРИГО Ю.М., САКОВ Р.П.

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»

Цель. Рассмотреть метод настройки ПИД-регулятора на основе Internal Model Control (ИМС) для системы автоматического управления экономичностью процесса горения ТЭС.

Методика. Использование модели в виде передаточных функций. Транспортное запаздывание аппроксимированное методом Паде. Для расчета переходных процессов используется программное обеспечение MatLab.

Результаты. В статье рассматриваются системы автоматического управления экономичностью процесса горения на ТЭС. Проведен обзор существующих решений. Рассматривается расчет ПИД-регулятора на основе ИМС-подхода для системы управления экономичностью процесса горения ТЭС.

Научная новизна. Рассмотрено систему автоматического управления экономичностью процесса горения ТЭС с ПИД-регулятором на основе ИМС-подхода.

Практична значимість. Рассмотренный ПИД-регулятор позволяет настройку по одному параметру, который определяет показатель качества переходного процесса.

Ключевые слова: ПИД-регулятор, ИМС-регулятор, экономичность ТЭС, прогнозируемое управление.

PREDICTIVE CONTROL FOR POWER BOILER COMBUSTION EFFICIENCY SYSTEM

KOVRYGO Y.M., SAKOV R.P.

National Technical University of Ukraine «Kiev Polytechnic Institute»

Purpose. To consider the tuning method the PID controller based on Internal Model Control for the automatic control system of the combustion process efficiency of thermal power plants.

Methodology. The use of model in the form of transfer functions. Transport delay is approximated by Pade. MatLab software is using for the calculation of transients.

Findings. Automatic control system of the combustion process efficiency of thermal power stations is considered in the article. The review of existing solutions is made. We consider the calculation of the PID controller based on IMC approach for the automatic control system of the combustion process efficiency of thermal power stations.

Originality. Automatic control system of the combustion process efficiency of thermal power stations that use the PID controller based on IMC approach had been considered.

Practical value. Considered PID controller allows a setting by one parameter, which determines the quality score of transients.

Keywords: PID controller, Internal Model Control, thermal power plant efficiency, predictive control.