

Терещенко Д.О.

Одеський національний політехнічний університет

АВТОМАТИЧНА СИСТЕМА РЕГУЛЮВАННЯ ГАЗОПОВІТРЯНОГО ТРАКТУ ЕНЕРГЕТИЧНОГО КОТЛА

Об'єктом дослідження є регулювання газоповітряного тракту енергетичного котла, синтез математичної моделі динаміки газоповітряного тракту. Методом удосконалення системи управління газоповітряним трактом, покращуються якість та критерії перехідних процесів, підвищується надійність, зменшується втручання людини в процес регулювання. У результаті розробки була одержана сучасна автоматична система регулювання розрідження в топці котла та концентрації кисню у відхідних газах. Вибір цієї системи призведе до підвищення продуктивності, надійності, якості та легшення обслуговування.

Ключові слова: автоматична система регулювання (АСР), газоповітряний тракт, розрідження, концентрація кисню, закон регулювання, математична модель, перехідний процес регулювання.

Постановка проблеми. Підвищення економічності роботи тепло-енергетичного обладнання шляхом підвищення технічного рівня систем автоматичного управління можливе по двох основних напрямках: використання сучасного комплексу технічних засобів (комп'ютеризовані керуючі комплекси) і удосконалення структурних схем систем автоматичного регулювання (як правило, за рахунок введення в контур контролю додаткових інформаційних сигналів про зміну технологічних параметрів або використання складнішого алгоритму управління).

На енергетичних і промислових підприємствах України нині завершується процес заміни аналогових систем управління на цифрові. Проте можливості сучасних мікропроцесорних технічних засобів автоматизації використовуються не повністю. Зокрема, на новій техніці реалізуються типові схеми і алгоритми управління, розроблені понад півстоліття назад з урахуванням обмежених можливостей аналогових систем управління.

Нині на теплових електростанціях, оснащених барабанними котлами, промислових і теплофікаційних котельних для управління газоповітряним трактом використовуються локальні автоматичні системи управління (АСУ) загального повітря і розрідження. Завдання АСУ загального повітря полягає в синхронній зміні витрати повітря на пристрої пальників при зміні витрати палива. Як правило, в типовій АСУ загального повітря (економічності процесу горіння) на вхід регулюючого пристрою надходить коригуючий сигнал по витраті палива (рідкого або газоподібного) і сигнал негативного зворотного зв'язку по витраті. Точний вимір масової витрати повітря, на відміну від виміру витрати

палива, ускладнено, оскільки для його визначення використовують сигнал змінного перепаду тиску повітря на повітропідігрівник.

Оскільки по перепаду тиску на повітропідігрівнику складно точно визначити масову витрату повітря по всьому діапазоні робочих навантажень котлоагрегата, точність підтримки матеріального балансу між витратою палива і повітря перевіряється по газоаналізатору, який вимірює вміст кисню O_2 або оксиду вуглецю CO в газах, що відходять. На підставі свідчень газоаналізатора оператор вручну змінює завдання регулятора загального повітря. Задля зменшення динамічного відхилення розрідження в топковій камері при зміні теплового навантаження котлом для регулювання застосовують комбіновану АСР із пристроєм введення основної збурюючої дії витрати повітря. Як сигнал по витраті повітря використовують або перепад тиску повітря на повітропідігрівнику, або положення направляючого апарата дутцевого вентилятора, яке в результаті великої нелінійності не дозволяє точно визначити витрату повітря [3, с. 133–136; 5, с. 99–101]

Постановка задачі. Таким чином, виникає науково-технічна задача – дослідити змогу застосувати оптимальні регулятори для керування типовими технологічними процесами та створення на їх основі сучасної АСР, яка позбавлена недоліків типових систем регулювання і максимально реалізує потенціал цифрових керуючих комплексів.

Виклад основного матеріалу досліджень. Для вирішення завдання оптимального управління необхідна математична модель, яка адекватно описує поведінку об'єкта управління в усьому діапазоні його робочих навантажень.

При сучасному підході до концепції автоматичного управління об'єкт управління розглядається як складна динамічна система з певним числом взаємозалежних входів і виходів. У багатовимірній концепції управління при розрахунку керуючого впливу враховуються прямі і перехресні зв'язки між вектором управління і вектором контрольованих технологічних параметрів [4, с. 134–135].

Газоповітряний тракт складається з послідовно розташованих повітряного і газового трактів. Повітряний тракт – комплекс елементів обладнання для приймання атмосферного (холодного) повітря, його підігріву, транспортування і подачі в топку. Повітряний тракт включає в себе: короб холодного повітря, дуттьовий вентилятор, повітропідігрівник (повітряна сторона), короб гарячого повітря і горючі пристрої. Повітряний тракт (крім забірної повітропроводу), як правило, працює під надлишковим тиском, що розвивається дуттьовим вентилятором [7, с. 34]. Газовий тракт – комплекс елементів обладнання, по якому здійснюється рух продуктів згоряння до виходу в атмосферу. Газовий тракт починається в топковій камері, димові гази послідовно проходять через пароперегрівач (при його наявності), економайзер, підігрівач повітря (газова сторона), золоуловлювач (встановлюється при спалюванні твердого палива) і потім димососом подаються через димову трубу в атмосферу.

При виведенні диференціальних рівнянь газоходу і повітропроводу як ділянок регулювання розрідження в топці, з метою спрощення розрахунків прийняті такі допущення: газохід після димососа і повітропровід після дуттьового вентилятора дуже короткий, і зворотна реакція тиску в топці на витрату палива і повітря на вході в топку можна знехтувати; акумулююча ємність топки і газоходів зосереджена в одному обсязі, а дроселююча здатність газоходів і поверхонь нагріву зосереджені в одній точці. При управлінні технологічним ділянкою змінюється положення направляючого апарату димососа і дуттьового вентилятора з метою зміни масової витрати димових газів і повітря відповідно [1, с. 174–176; 2, с. 9–10]. З урахуванням перерахованих припущень регульовані ділянки можуть бути замінені спрощеною системою, що складається з ємності, дроселя і димососа (дуттьового вентилятора). Оскільки динамічні і статичні властивості барабанного котла в нестационарних режимах роботи нелінійні, для отримання математичної моделі нелінійна модель може бути замінена спектром моделей, лінеаризованих щодо кількох типових режимів.

Регульованою величиною є відхилення розрідження в топці ΔP_P від заданого значення, входною величиною (регулюючим впливом) – зміна положення направляючого апарату димососа $\Delta \phi_G$. В якості зовнішнього обурення приймемо зміну витрати газів, що відходять на притоці ΔM . Таким чином, диференціальне рівняння ділянки регулювання розрідження димових газів має вигляд:

$$T_2 \Delta \ddot{P}_P + T_1 \Delta \dot{P}_P + \Delta P_P = k_4 \Delta \dot{\phi}_G + k_3 \Delta \phi_G + k_2 \Delta \dot{M} + k_1 \Delta M. \quad (1)$$

Динамічні властивості повітропроводу, що визначають залежність між зміною подачі повітря в топку котла і положенням направляючого апарату дуттьового вентилятора $\Delta \phi_B$, описуються диференціальним рівнянням:

$$T_4 \Delta \ddot{M}_L + T_3 \Delta \dot{M}_L + \Delta M_L = k_6 \Delta \dot{\phi}_B + k_5 \Delta \phi_B. \quad (2)$$

Коефіцієнт надлишку повітря λ , який не можна безпосередньо виміряти, можна визначити за концентрацією кисню в димових газах CO_2 практично незалежно від складу палива. Однак на практиці CO_2 не вдається виміряти в точці, розташованій безпосередньо за зоною закінчення процесу горіння. Здебільшого точка відбору проби знаходиться в конвективній частині котла. При цьому гази спочатку перемішуються в зоні горіння, потім транспортуються через радіаційні поверхні і додатково перемішуються в зоні конвективних поверхонь нагріву. У багатьох випадках цю складну схему можна апроксимувати рівнянням:

$$T_6 \Delta \ddot{C}_{O_2} + T_5 \Delta \dot{C}_{O_2} + \Delta C_{O_2} = k_8 \Delta M_L(t - \tau) + k_7 \Delta M_B(t - \tau), \quad (3)$$

де τ – час транспортного запізнювання (приймається рівним величині інерційності самого газоаналізатора – 15 с).

Таким чином, регульованими параметрами газоповітряного тракту барабанного котла є відхилення від номінального значення концентрації кисню в газах ΔCO_2 і відхилення розрідження в топковій камері, а керуючими впливами – зміна положення напрямних апаратів дуттьового вентилятора $\Delta \phi_B$ і димососа $\Delta \phi_G$, основним зовнішнім збурюючим впливом виступає зміна витрати палива ΔM_B . (рис. 1)



Рис. 1. Параметрична схема об'єкта регулювання

З диференціальних рівнянь (1) – (3) можна отримати передатні функції для окремих ділянок газоповітряного тракту:

$$W_{\Delta M \rightarrow \Delta P_p}(s) = \frac{K_2 \cdot S + K_1}{T_2 \cdot S^2 + T_2 \cdot S + 1}, \quad (4)$$

$$W_{\Delta \phi_r \rightarrow \Delta P_p}(s) = \frac{K_4 \cdot S + K_3}{T_2 \cdot S^2 + T_2 \cdot S + 1}, \quad (5)$$

$$W_{\Delta \phi_B \rightarrow \Delta M_L}(s) = \frac{K_6 \cdot S + K_5}{T_4 \cdot S^2 + T_3 \cdot S + 1}, \quad (6)$$

$$W_{\Delta M_L \rightarrow \Delta C_{O_2}}(s) = \frac{K_7 \cdot e^{-\tau s}}{T_6 \cdot S^2 + T_5 \cdot S + 1}, \quad (7)$$

$$W_{\Delta M_B \rightarrow \Delta C_{O_2}}(s) = \frac{K_7 \cdot e^{-\tau s}}{T_6 \cdot S^2 + T_5 \cdot S + 1}. \quad (8)$$

Виходячи з передатних функцій (4) – (8), будемо структуру схему математичної моделі АСР

газоповітряного тракту (рисунок 2), яку будемо використовувати для моделювання.

Чисельні значення коефіцієнтів диференціальних рівнянь (1) – (3) та передатних функцій (4) – (7) для подальшого чисельного моделювання системи управління визначенні за конструктивними і теплотехнічними параметрами газомазутного барабанного котла ГМ-50 для трьох номінальних режимів, відповідних 50, 75 і 100%, потужності наведені в таблиці 1.

Основним способом регулювання надлишку повітря за пароперегрівником служить зміна кількості повітря, поданого в топку за допомогою дутевих вентиляторів. Регулювання економічності по співвідношенню завдання – повітря з додатковим сигналом по вмісту O_2 у димових газах.

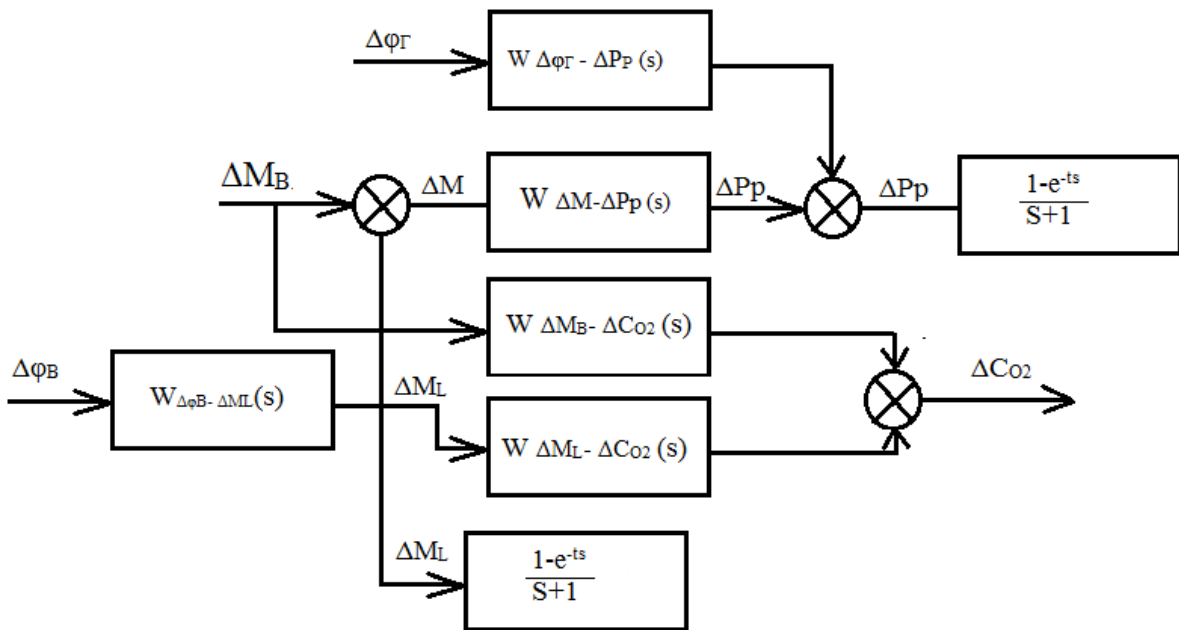


Рис. 2. Структурна схема моделі АСР газоповітряного тракту

Таблиця 1

Паропро- дуктивність, т/Г	T_1, c	T_2, c^2	T_3, c	T_4, c	T_5, c	T_6, c^2	$\frac{k1, Pa \cdot c}{kg}$
25	1,67	0,0566	0,0748	$3,47 \cdot 10^{-4}$	16	56	1080
37,5	1,33	0,0574	0,112	$8,16 \cdot 10^{-4}$	16	56	861
50	1,04	0,0572	0,152	$7,22 \cdot 10^{-4}$	16	56	673
Паропро- дуктивність, т/Г	$\frac{k2, Pa \cdot c^2}{kg}$	$\frac{k3, Pa}{\%}$	$\frac{k4, Pa \cdot c}{\%}$	$\frac{k5, kg \cdot c}{\%}$	$\frac{k6, kg \cdot c^2}{kg}$	$\frac{k7, \% \cdot c}{kg}$	$\frac{k8, \% \cdot c}{kg}$
25	80,3	-278	-20,6	0,224	$4,55 \cdot 10^{-3}$	-39,8	2,74
37,5	87,6	-254	-25,8	0,178	$6,73 \cdot 10^{-3}$	-26,5	1,82
50	106	-125	-19,7	0,147	$6,71 \cdot 10^{-3}$	-19,9	1,37

Вміст O_2 у продуктах горіння палива характеризує надлишок повітря та слабо залежить від складу палива [8, с. 21–22].

Отже, використання O_2 як вхідного сигналу автоматичного регулятора, що впливає на витрату повітря, цілком доцільно. Однак реалізація цього способу ускладнена через відсутність надійних і швидкодіючих газоаналізаторів кисню. Тому в промислових умовах одержали поширення схеми регулювання подачі повітря не з прямим, а з коригувальним впливом по O_2 .

Підтримка надлишку повітря по співвідношенню сигналів теплота–повітря й особливо пар–повітря відрізняється простотою й надійністю, але не є точним. Цього недоліку позбавлена, наприклад, система регулювання економічності, що діє за схемою завдання – повітря з додатковою корекцією по O_2 . У системі загалом сполучають принципи регулювання по збурюванню й відхиленню. Регулятор подачі повітря змінює його витрату по сигналу від головного або коригувального регулятора тиску, що є автоматичним задаючим приладом регулятора з навантаження котла. Сигнал, пропорційний витраті повітря, діє і в інших схемах:

по-перше, усуває збурювання по витраті повітря, не пов'язані з регулюванням економічності (включення або відключення систем пиле-приготування й т.п.);

по-друге, сприяє стабілізації самого процесу регулювання подачі повітря, тому що служить одночасно сигналом твердого негативного зворотного зв'язку.

Введення додаткового коригувального сигналу по змісту O_2 підвищує точність підтримки оптимального надлишку повітря будь-якій системі регулювання економічності. Додатковий коригувальний регулятор по O_2 у схемі регулювання завдання – повітря керує подачею повітря при топкових збуреннях і безпосередньо забезпечує підтримку заданого надлишку повітря в топці.

Регулювання розрідження звичайно здійснюють за допомогою зміни кількості газів, що відходять та відсмоктуються димососами. При цьому їхню подачу можна регулювати поворотними дросельними заслінками, напрямними апаратами.

Найбільше поширення одержала схема регулювання розрідження з одноімпульсним ПІ-регулятором, що реалізує принцип регулювання по відхиленню.

Необхідне значення регульованої величини встановлюють за допомогою ручного задатчика ЗРП регулятора розрідження. При роботі котла в

регулюючому режимі часто відбуваються зміни теплового навантаження й, отже, зміни витрати повітря. Робота регулятора повітря приводить до тимчасового порушення матеріального балансу між вступником повітрям і газами, що відходять. Задля попередження цього порушення й збільшення швидкодії регулятора розрідження рекомендують увести на його вхід додатковий зникаючий вплив від регулятора повітря через пристрій динамічного зв'язку.

Як пристрій динамічного зв'язку використовують аперіодичну ланку, вихідний сигнал якої надходить на вхід регулятора розрідження лише в моменти переміщення виконавчого механізму регулятора повітря.

На рисунку 3 представлена структурна схема математичної моделі АСР газоповітряного тракту в Simulink MathLab. Подаючи на вхід ступінчасті сигнали, будуть промодельовані перехідні процеси регулювання витрати повітря, концентрації кисню в відхідних газах та розрідження в топці котла. Також знайдемо коефіцієнти для двох оптимальних ПІ-регуляторів.

Графічно обробляючи рисунок 4, за методикою Кона знаходимо:

$$\tau_0 = 1,5 \text{ с}; \tau_c = 0,25 \text{ с}; T_a = 3,25 \text{ с}.$$

Для пошуку коефіцієнтів потрібно знайти

$$\alpha = \frac{\tau}{T_a} = \frac{1,75}{3,25} = 0,55.$$

З таблиці Кона виберемо K та C для $q = 2$, $m = 0,48$ та мінімального значення лінійного критерію якості ПІ.

$$K = 0,62; C = 1,16.$$

Підставивши знайдені значення у вираження, знайдемо:

$$K_p = \frac{K}{K_M}; T_u = C \cdot \tau$$

$$K_p = 0,0025 \text{ од.}; T_i = 2,03 \text{ с}.$$

Передатна функція для ПІ-регулятора матиме вид:

$$W(s) = \frac{K_p}{T_i \cdot S + 1} = \frac{0,0025}{2,03 \cdot S + 1}$$

Графічно обробляючи рисунок 5, за методикою Кона знаходимо:

$$\tau_0 = 1,5 \text{ с}; \tau_c = 0,25 \text{ с}; T_a = 3,25 \text{ с};$$

Для пошуку коефіцієнтів потрібно знайти

$$\alpha = \frac{\tau}{T_a} = \frac{1,75}{3,25} = 0,55.$$

З таблиці Кона виберемо K та C для $q = 2$, $m = 0,48$ та мінімального значення лінійного критерію якості ПІ.

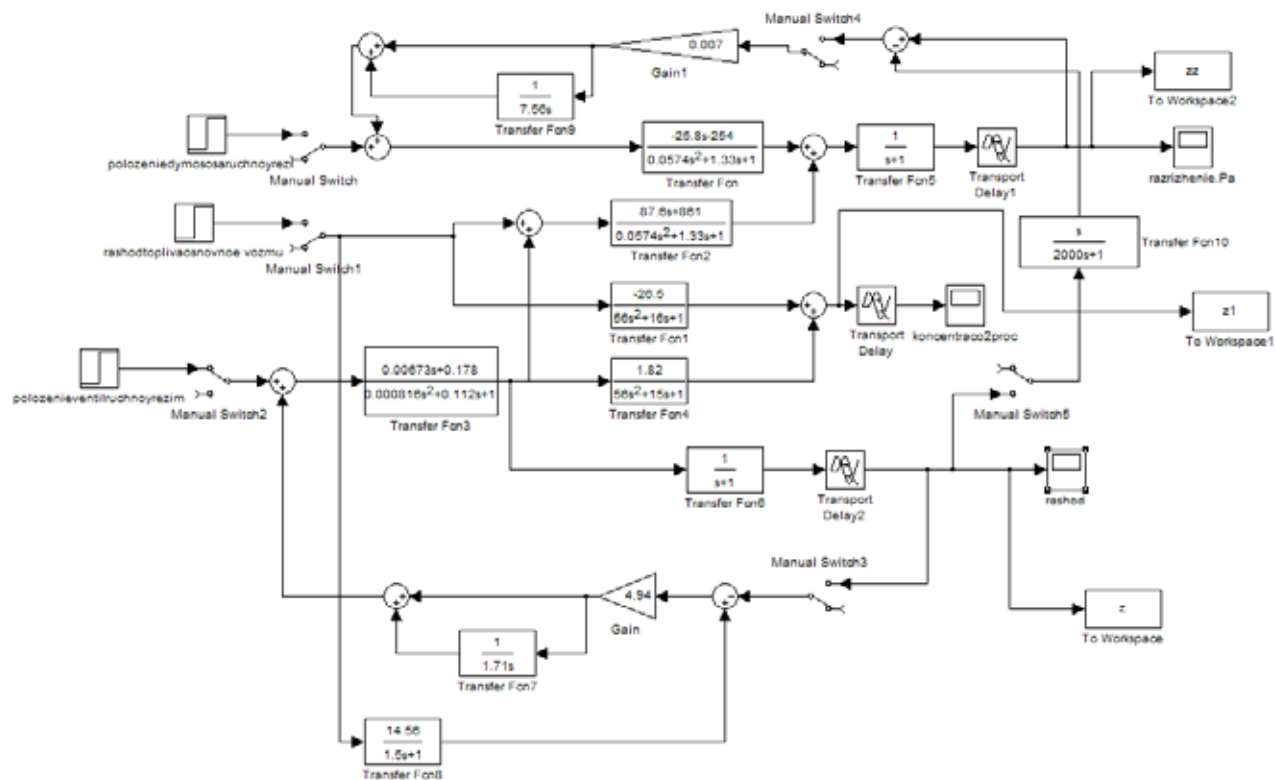


Рис. 3. Структурна схема математичної моделі АСР газоповітряного тракту в Simulink

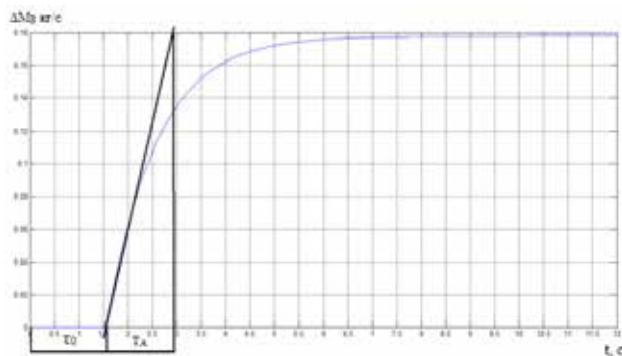


Рис. 4. Крива розгону витрати повітря при відкритому вентиляторі

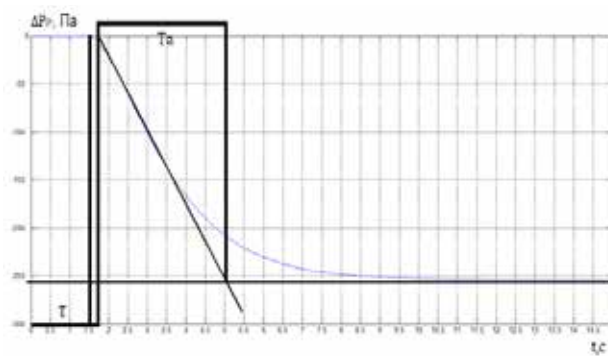


Рис. 5. Крива розгону розрідження в топковій камері (без регулятора)

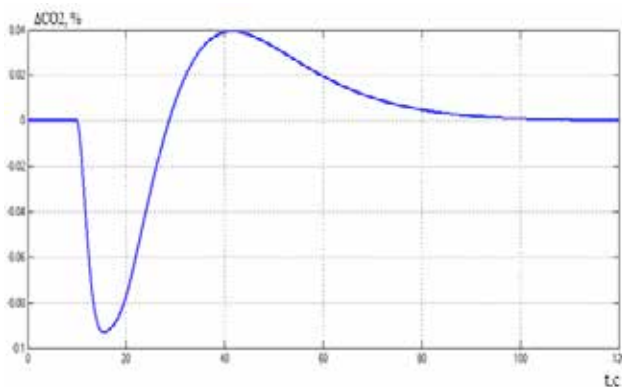


Рис. 6. Перехідний процес регулювання концентрації кисню у відхідних димових газах (ПІ-регулятори)

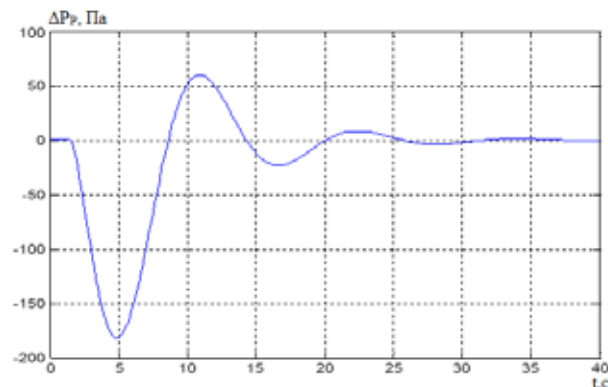


Рис. 7. Перехідний процес регулювання розрідження в топці котла (ПІ-регулятори)

$$K = 0,62; C = 1,16.$$

Підставивши знайдені значення у вираження, знайдемо:

$$K_p = \frac{K}{K_M}; T_i = C \cdot \tau$$

$$K_p = 0,0025 \text{ од.}; T_i = 2,03 \text{ с.}$$

Передатна функція для ПІ-регулятора матиме вид:

$$W(s) = \frac{K_p}{T_i \cdot s + 1} = \frac{0,0025}{2,03 \cdot s + 1}$$

Висновки. В цій роботі було розглянуто АСР газоповітряного тракту енергетичного котла. Була спроектована математична модель газоповітряного тракту, в якій використовується 2 оптимальних ПІ-регулятори. Математичне моделювання показало, що при подачі основного збурення (витрата палива), регульовані параметри – концентрація кисню в відхідних газах та розрідження в топці – не перевищують гранично допустимих значень, не мають статичної помилки при регулюванні та мають мінімальний час регулювання.

Список літератури:

1. Ложечников В.Ф., Михайленко В.С. Методи побудови адаптивних систем управління. Автоматика. Автоматизація. *Электротехнические комплексы и системы*. 2009. № 2. С. 174–179.
2. Тодорцев Ю.К., Бундук А.М., Ларіонова О.С. Математична модель контура теплопостачання когенераційної енергетичної установки. *Автоматика, автоматизація, електротехнічні комплекси та системи*. 2009. № 2. С. 8–11.
3. Брунеткин А.И., Максимов М.В., Бондаренко А.В. Идентификация количественного состава неизвестного газообразного горючего и его продуктов сгорания на основе измеренных технологических параметров процесса сжигания топлива. *Вісник Національного технічного університету ХП. Сер.: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування*. 2014. № 12. С. 131–141.
4. Babich S.V., Davydov V.O. Objective function for municipal heat supply systems structural optimization. *Праці Одеського політехнічного університету*. 2015. № 1(45). Р. 134–140
5. Beglov K.V., Tsiselskaya T.A. A model of a power unit with VVER-1000 as an object of power control. *Odes'ki Politechnichniy Universytet. Pratsi*. 2012. № 1(38). Р. 99–106.
6. Pelykh S.N., Maksimov M.V. Cladding rupture life control methods for a power-cycling WVER-1000 nuclear unit. *Nuclear Engineering and Design*. 2011. № 241(8). Р. 2956–2963.
7. Бундук А.Н., Улицкая Е.О. Разработка алгоритма для расчёта статики когенерационной энергетической установки. *Холодильная техника и технология*. 2013. № 3. С. 34–40.
8. Волошкіна О.О., Плахотнюк О.А., Беглов К.В. Дослідження регулятора концентрації рідкого поглинача енергоблоку АЕС. *Автоматизація технологічних і бізнес-процесів*. 2015. Вип. 7. № 4. С. 18–24.

АВТОМАТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА РЕГУЛИРОВАНИЯ ГАЗОВОЗДУШНОГО ТРАКТА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОТЛА

Объектом исследования является регулирование газозвоздушного тракта энергетического котла, синтез математической модели динамики газозвоздушного тракта. Методом совершенствования системы управления газозвоздушного тракта, улучшаются качество и критерии переходных процессов, повышается надежность, уменьшается вмешательства человека в процесс регулирования. В результате разработки была получена современная автоматическая система регулирования разрежения в топке котла и концентрации кислорода в отходящих газах. Выбор данной системы приведет к повышению производительности, надежности, качества и облегчения обслуживания.

Ключевые слова: автоматическая система регулирования (АСР), газозвоздушный тракт, разрежение, концентрация кислорода, закон регулирования, математическая модель, переходный процесс регулирования.

AUTOMATIC CONTROL SYSTEM OF THE GAS-AIR TRACT OF DRUM-TYPE BOILER

The object of research is adjustment of the gas-air of drum-type boiler. Synthesis of mathematical model of dynamics of gas-air tract. By the method of perfection of control system gas-air tract, quality and criteria of transients get better, reliability rises, diminishes interferences of man with the process of adjusting. As a result of development the modern automatic control system of rarefaction in heating of drum-type boiler and concentration of oxygen was got in outgoing gas. The choice of this system will result in the increase of the productivity, reliability of both quality and facilitation of service.

Key words: automatic control system (ACS), gas-air tract, rarefaction, concentration of oxygen, закон регулирования, mathematical model, переходный процесс регулирования.