

УДК 622.48

МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО УПРАВЛІННЯ ТОПКОЮ НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНОГО КИПЛЯЧОГО ШАРУ

Гавриленко Б.В. канд. тех. наук., доц., Ткаченко Г.Є. аспірант
Донецький національний технічний університет

Розглянута математична модель топки низькотемпературного киплячого шару та на її основі синтезовані передаточні функції топки по двом контурам управління. Розроблені перехідні функції для усіх складових системи управління. Отримана динамічна модель системи управління. Проведено моделювання роботи системи управління.

The math model of the low temperature air-fluidized bed furnace was given and on its base the furnace transfer functions according to the two control loops were synthesized. The transfer functions for all another control system parts were developed. The dynamic model of the control system was achieved. The modeling of the control system operation took part.

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними задачами. В наш час однією з актуальних державних проблем є проблема економії паливних ресурсів. Одним з напрямків її вирішення є вволокання в промислове використання джерел енергії, які досі не враховувалися в паливно-енергетичному балансі держави, а також розробка нових методів використання паливних ресурсів, які дозволять вдосконалити їх енергетичний потенціал. Тому досить актуальним є впровадження нової технології спалювання твердого палива в низькотемпературному киплячому шарі (НТКШ).

Високі теплотехнічні показники роботи топок НТКШ забезпечуються необхідною якістю горіння твердого палива, досягти якої можливо лише за умови використання системи автоматичного управління. А при синтезі даної системи необхідно, перш за все, перевірити якість управління, яку вона забезпечує. Для цього проводиться комп'ютерне моделювання перехідних процесів системи на базі її динамічної моделі. Отже наявна задача розробки динамічної моделі системи управління топки НТКШ.

Аналіз досліджень та публікацій з цієї проблеми показує, що на даний момент є багато літературних джерел, що містять математи-

чний опис процесів горіння протікаючих у топках НТКШ [1], [2]. Також існує досить багато математичних моделей реакторів НТКШ, які відрізняються ступенями достовірності порівняно з експериментальними даними, складністю, фізичними моделями, які застосовуються для опису процесів в топках, кількістю припущень та кількістю враховуваних технологічних параметрів горіння.

Але на даний час не існує моделі системи управління топками НТКШ з урахуванням динамічних параметрів об'єкту управління. Саме тому необхідно, по-перше, розробити динамічну модель топки НТКШ, а, по-друге, промодельювати роботу системи управління та дослідити перехідні процеси в об'єкті управління і в системі управління в цілому.

Головною задачею при цьому є визначення динамічних характеристик топки НТКШ у вигляді передаточних функцій по різним контурам управління, а також системи управління в цілому та моделювання її роботи.

Для вирішення даної задачі проведений аналіз динамічних властивостей топки НТКШ.

Відповідно до [2] швидкість відклику об'єкту на динамічні збурення оцінюється за допомогою рівняння теплового балансу шару, яке має наступний вигляд:

$$C_n \rho_n F H_u (dT_u/dt) = j_m Q_n^p F (1 - q_{x.n} - q_{ф.н}) - C_z V_n \rho_z F (T_u - T_{д.н}) - h_{m.н} S_{n.н} (T_u - T_{m.н}) - (Q_{ф.ш} + Q_{з.о}), \quad (1)$$

де C_n , C_z – теплоємність матеріалу шару та газу відповідно, F – поверхнева площа шару, ρ_n , ρ_z – густина матеріалу шару та газу відповідно, $T_{д.н}$ – температура дуттєвого повітря, T_u – температура шару, $S_{n.н}$ – поверхня погрузного теплообмінника, $T_{m.н}$ – температура теплоносія (нагрітої води), Q_n^p – нижча теплотворна здібність палива, $q_{x.н}$ – удельна втрата теплоти від хімічного недопалу, $q_{ф.н}$ – удельна втрата теплоти від фізичного недопалу, $Q_{ф.ш}$ – втрати теплоти з фізичною теплотою шлаків, $Q_{з.о}$ – втрати теплоти від зовнішнього охолодження зовнішніх огорожень котла, $h_{m.н}$ – теплоємність теплоносія, V_n – швидкість дуттєвого повітря, j_m – витрати палива на 1 м^2 НТКШ ($\text{кг}/(\text{м}^2\text{с})$):

$$j_m = \rho C_{вуг} H_u t_p \quad (2)$$

де $C_{вуг}$ – концентрація вуглецю в шарі, t_p – середній час вигорання часток палива.

З рівняння (1) випливає, що у наявності є дві характерні сталі часу відклику топки НТКШ на ступінчасте збурення вхідних параметрів:

$$t_1 = \frac{C_n \rho F T_{ш}}{C_2 \rho V_n F (T_{ш} - T_{д.н.}) + h_{н.в.} S_{п.н.} (T_{ш} - T_{т.н.}) + Q_{ф.ш} + Q_{з.о}}, \quad (3)$$

$$t_2 = \frac{j_i Q_n^p F (1 - q_{х.н.} - q_{ф.н.})}{C_2 \rho V_n F (T_{ш} - T_{д.н.}) + h_{н.в.} S_{п.н.} (T_{ш} - T_{т.н.}) + Q_{ф.ш} + Q_{з.о}}, \quad (4)$$

перша з яких (t_1) – характерний час охолодження НТКШ при миттєвій зупинці горіння, друга (t_2) – час вигорання палива в стаціонарних умовах горіння.

На підставі отриманих рішень оцінюється інерційність топки НТКШ. А оскільки нормальна робота топки НТКШ можлива лише за стаціонарних умов горіння, то для подальшого аналізу був прийнятий вираз (4).

Чисельні значення величин, що входять до рівняння (4) відомі та характеризують властивості палива і конструктивні особливості топки. Отже з виразу (4) отримали значення сталих відгуку топки на зміну витрати твердого палива та зміну швидкості дуттєвого повітря. Проведено порівняння розрахункових даних з дослідними [3], і оскільки вони співпали, зроблено вивід про адекватність математичної моделі топки.

Як було визначено, середній час відгуку температури топки на зміну витрати твердого палива складає в середньому 20 хв, що свідчить про досить високу інерційність топки. Проте оскільки інтервали регулювання продуктивності топки складають не менше доби, що значно перевищує час відгуку топки, то інерційність топки не впливає на кінцевий результат управління. Середній час відгуку температури топки на зміну швидкості дуттєвого повітря визначено як 2 хв.

Аналіз джерел [3] та [4] показав, що з точки зору динаміки топка являє з себе комбінацію аперіодичної ланки з інерційною, на основі чого і були розроблені передаточні функції топки НТКШ. Також було враховано, що топка має різні сталі відгуку та коефіцієнти передачі по двом контурам управління – по витраті палива та по швидкості дуттєвого повітря. Тому було визначено дві перехідні функції топки НТКШ для аналізу її роботи в складі системи автоматичного управління.

Передаточну функцію топки НТКШ по контуру твердого палива визначено як [4]:

$$W_{ш.в}(p) = \frac{K_{ш.в.}}{p(T_B \cdot p + 1)}, \quad (5)$$

де $K_{ш.в.}$ – передаточний коефіцієнт топки НТКШ по контуру твердого палива, визначений як чутливість (по температурі) топки НТКШ на змінення витрати твердого палива, $T_B = 20 \text{ хв} = 1200 \text{ с}$ – стала часу топки по витраті твердого палива.

При розрахунку $K_{ш.в.}$ брали до уваги, що витрату твердого палива визначаємо непрямим методом по кутовій швидкості обертання вала питателя, а залежність температури НТКШ від змінення витрати твердого палива вважаємо лінійною. З врахуванням того, що середня глибина регулювання температури по даному параметру складає 6% [3] отримуємо:

$$K_{ш.в.} = \frac{\Delta T_{ср.ш}}{\Delta \omega} = \frac{6 \cdot T_{ср.ш}}{(\omega_{max} - 0)100\%} = \frac{6 \cdot 850}{(0,786 - 0)100\%} = 63,6 \frac{^{\circ}\text{C}}{1/\text{с}}, \quad (6)$$

де $T_{ср.ш}$ – середня температура шару, ω_{max} – максимальна кутова швидкість обертання вала питателя.

Таким чином передаточна функція топки НТКШ по витраті твердого палива визначена як:

$$W_{ш.в}(p) = \frac{63,6}{p(1200p + 1)} \quad (7)$$

Аналогічно було визначено сталі коефіцієнти передаточної функції топки по контуру дуттового повітря. При цьому враховувалося, що швидкість дуттового повітря визначається дифманометром по перепаду тиску, а глибина регулювання температури по даному параметру сягає 20% [3]. Отже передаточну функцію топки НТКШ по швидкості дуттового повітря визначено як:

$$W_{ш.в.}(p) = \frac{K_{ш.в.}}{p(T_V \cdot p + 1)} = \frac{23}{p(180p + 1)}, \quad (8)$$

де $K_{ш.в.} = 23 \text{ } ^{\circ}\text{C}/\text{кПа}$ – передаточний коефіцієнт топки НТКШ по контуру дуттового повітря, $T_V = 3 \text{ хв} = 180 \text{ с}$ – стала часу топки по швидкості дуттового повітря.

Таким чином, визначено динамічні характеристики об'єкту управління, на підставі яких розроблено функціональну схему системи управління роботою топки (див. рис. 1), з врахуванням динаміч-

них характеристик її складових та проведено моделювання перехідних процесів, що відбуваються в системі.

Основними складовими системи є об'єкт управління – топка НТКШ, пристрій управління – цифровий регулятор та джерела збудовувальних дій. В системі присутні два основні контури управління температурою НТКШ – контур управління по витраті твердого палива та контур управління по швидкості дуттєвого повітря.

До складу першого контуру входять ланка ПІД – регулятора роботи топки по витраті палива $W_{ПД,В}(p)$, ланка привідного двигуна закидувача $W_{П,Д}(p)$, ланка вала питателя $W_{В,П}(p)$ та ланка топки НТКШ $W_{Ш,В}(p)$.

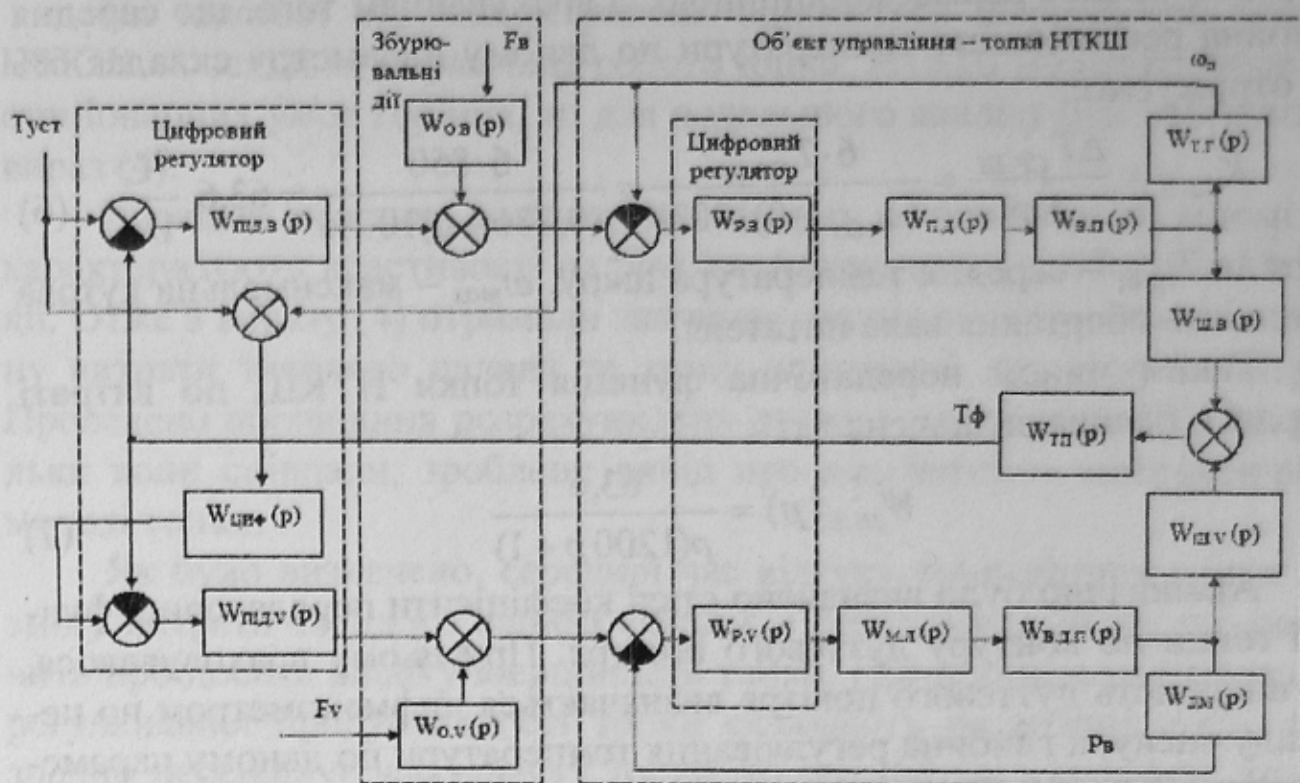


Рисунок 1 - Функціональна схема системи управління роботою топки НТКШ

Аналогічно, другий контур складається за ланки ПІД – регулятора роботи топки по швидкості дуттєвого повітря $W_{ПД,В}(p)$, ланки виконавчого механізму повороту лопаточок вентилятора дуттєвого повітря $W_{М,Л}(p)$, ланки вентилятора дуттєвого повітря $W_{В,Д,П}(p)$ та ланки топки НТКШ $W_{Ш,В}(p)$.

Регулювання по даним контурам здійснюється відповідно до ПІД-закону регулювання на основі уставки температури НТКШ, яку необхідно підтримувати в топці $T_{уст}$ та сигналу фактичного значення

температури НТКШ (сигналу від'ємного зворотнього зв'язку) T_f , який отримуємо з термопари з передаточною функцією $W_{TP}(p)$.

В кожному основному контурі управління є по одному підлеглому контуру. В контурі управління по витраті твердого палива є контур регулювання швидкості обертання вала питателя (фактично витрати твердого палива), який реалізовано за допомогою зворотнього зв'язку через тахогенератор $W_{TG}(p)$. З тахогенератора знімається фактичне значення кутової швидкості вала питателя ω_{Π} , яке по від'ємному зворотньому зв'язку надходить на регулятор витрати твердого палива $W_{P.V.}(p)$. В контурі управління по швидкості дуттевого повітря є контур регулювання напору дуттевого вентилятора (фактично швидкості дуттевого повітря), побудова якого аналогічна побудові контуру регулювання швидкості обертання вала питателя. У якості джерела інформаційного сигналу використано диференціальний манометр $W_{DM}(p)$, з якого знімаємо сигнал напору P_v . Для здійснення корекції по напору дуттевого вентилятора використовуємо регулятор $W_{P.V.}(p)$. Оскільки, спочатку пріоритет регулювання віддається регулюванню по витраті твердого палива як більш економічному, то застосовано ще один регулятор $W_{ЦИФ}(p)$, для забезпечення розподілення пріоритетів керування. У якості регуляторів по підлеглим контурам обрано пропорційні П-регулятори, які задовольняють вимоги до якості управління контрольованих об'єктів, як впливає з аналізу результатів моделювання.

Для імітації зовнішніх збурювань введено ланки $W_{B.V.}(p)$ та $W_{B.V.}(p)$, що описують передавальні функції системи по сигналам збурювань F_b та F_v відповідно.

Оскільки регулювання швидкості обертання вала питателя відбувається не за рахунок змінення кутової швидкості ротора електродвигуна, а за рахунок застосування варіатора швидкості, і сталою часу двигуна нехтуємо порівняно зі сталими часу топки, то передаточна функція двигуна має вигляд безінерційної ланки [4]:

$$W_{П.Д.}(p) = K_{П.Д.} = 1,55 \text{ Гц/В}, \quad (9)$$

де $K_{П.Д.}$ – передаточний коефіцієнт привідного двигуна, зобумовлений його конструктивними особливостями.

Передаточна функція вала питателя також має вигляд безінерційної ланки, що обумовлено конструктивними параметрами вала та варіатора швидкості. Його передаточна функція має вигляд [4]:

$$W_{В.П.}(p) = K_{В.П.} = 0,05, \quad (10)$$

де $K_{В.П.}$ – передаточний коефіцієнт варіатора швидкості.

Передаточну функцію засобу вимірювання витрати палива – синхронного тахогенератора, згідно [4] розглянуто як безінерційну ланку, з передаточним коефіцієнтом, що дорівнює чутливості засобу вимірення. Отже передаточна функція має вигляд:

$$W_{ТГ}(p) = K_{ТГ} = 0,05 = 12,72 \text{ В/Гц}, \quad (11)$$

де $K_{ТГ}$ – передаточний коефіцієнт тахогенератора, зобумовлений його конструкцією.

Передаточну функцію вентилятора дуттєвого повітря представили у вигляді [4]:

$$W(p)_{В.Д.П.} = K_{В.Д.П.} + T_{В.Д.П.}p = 1,4 + 60p, \quad (12)$$

де $K_{В.Д.П.}$ – передаточний коефіцієнт вентилятора, що характеризує його підсилювальні властивості, $T_{В.Д.П.}$ – стала часу вентилятора.

Передавальна функція механізму повороту лопаток дуттєвого вентилятора має вигляд безінерційної ланки:

$$W_{М.Л.}(p) = K_{М.Л.} = 2, \quad (13)$$

де $K_{М.Л.}$ – передаточний коефіцієнт механізму повороту лопаток.

Передаточну функцію засобу вимірення швидкості дуттєвого повітря – диференціального манометра визначено як [4]:

$$W_{ДМ.}(p) = \frac{K_{ДМ.} \cdot p}{T_{ДМ.}p + 1} = \frac{1,43 \cdot p}{2p + 1}, \quad (14)$$

де $K_{Д.М.}$ – передаточний коефіцієнт дифманометра, що характеризує його чутливість, $T_{Д.М.}$ – стала часу дифманометра, що характеризує його інерційність.

Передаточна функція засобу вимірення температури НТКШ термопари хромель-алюмель визначено як [4]:

$$W_{ТП}(p) = \frac{K_{ТП}}{T_{ТП}p + 1} = \frac{5 \cdot 10^{-3} \cdot p}{150p + 1}, \quad (15)$$

де $K_{ТП}$ – передаточний коефіцієнт термопари, що характеризує її чутливість, $T_{ТП}$ – стала часу термопари, що характеризує її інерційність.

Для регулювання роботи топки по двох контурах запропоновано вживати ПІД-регулятори по кожному з контурів управління.

Відповідно до функціональної схеми (див. рис.1) проведено моделювання роботи системи управління. Графік перехідного процесу системи наведено на рис.2.

Як видно з графіку тривалість перехідного процесу системи не перебільшує 22 хв, а перерегулювання складає 20%. Оскільки такі

показники якості роботи системи є задовільними, то остаточно прийнято систему управління з такою структурою.

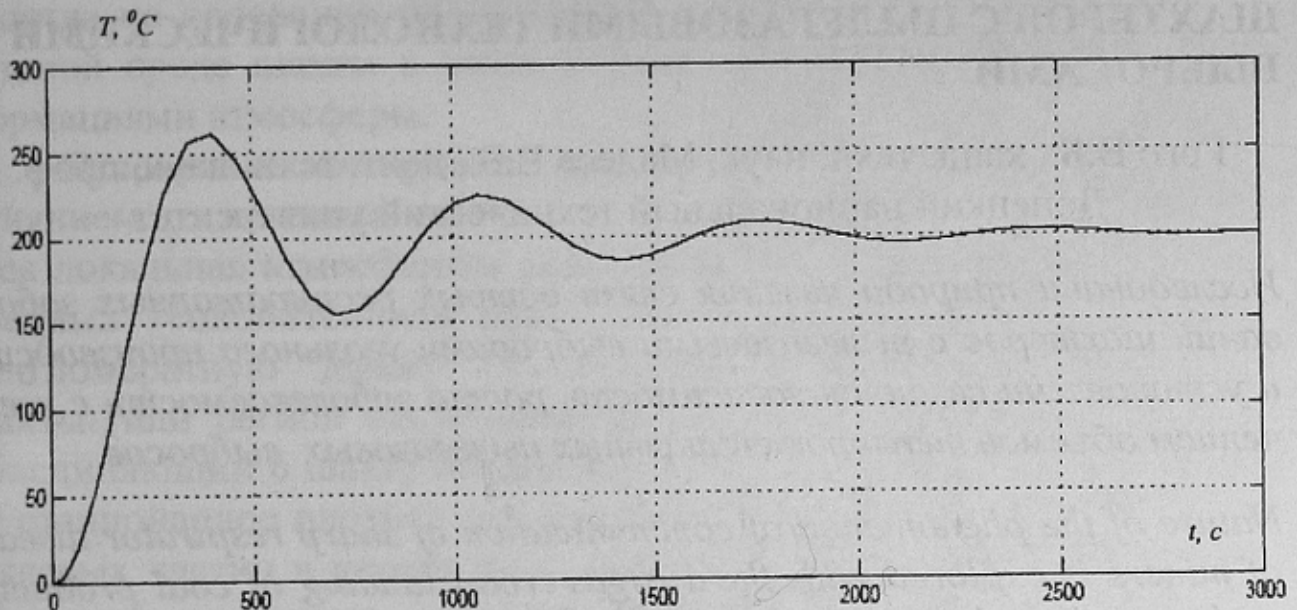


Рисунок 2 – Графік переходного процесу системи управління

Висновки.

Таким чином, на підставі математичного опису топки НТКШ визначили її динамічні характеристики – вивели передаточні функції топки по контурам управління по зміні витрати твердого палива та швидкості дуттєвого повітря. Також визначили передаточні функції для інших складових системи автоматичного управління, на основі чого синтезували динамічну модель системи, яку навели у вигляді функціональної схеми. На базі даної моделі провели моделювання роботи системи в динаміці та отримали графік переходного процесу. Аналіз показників даного графіку довів, що синтезована система забезпечує необхідну якість керування, а отже й потребуемий техніко-економічний ефект від її застосування.

Список джерел

1. Бородуля В.А., Гупало Ю.П. Математические модели химических реакторов с кипящим слоем. - Мн.: Наука и техника, 1976, 208 с.
2. Махорин К.Е., Хинкис П.А. Сжигание топлива в псевдооживленном слое. -К.: Наукова думка, 1989. – 204 с.
3. Ж.В. Вискин и др. Сжигание угля в кипящем слое и утилизация его отходов. – Донецк: «Новый мир», 1997 г. – 284 с.
4. Беседы по автоматике. Голубничий Н.И., Зайцев Г.Ф. и др. «техника», 1971, 232 с.