

УДК 621.039.1

Н.В. Жукова, Т.М. Сухарєва

Донецький національний технічний університет, м. Донецьк

Кафедра автоматики та телекомунікації

E-mail: zhnatka@mail.ru, tnsukharieva@mail.ru**ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ РІВНЯ ВОДИ В БАРАБАННОМУ ПАРОГЕНЕРАТОРІ****Анотація**

Жукова Н.В., Сухарєва Т.М. Дослідження динаміки системи автоматичного регулювання рівня води в барабанному парогенераторі. Розглядається парогенератор як об'єкт управління. Досліджено автоматичну систему регулювання барабанним котлом середньої потужності. Розроблено експериментально-аналітичну модель динаміки ділянки живлення барабанного парогенератора середньої потужності. Модель представлена в просторі станів. З метою стабілізації рівня води в барабанному парогенераторі запропонований оптимальний регулятор.

Ключові слова: парогенератор, система автоматичного регулювання, ділянка живлення, регулятор.

Загальна постановка проблеми.

Даним часом на теплоенергетичних підприємствах України йде заміна аналогових апаратних засобів локальних систем автоматичного управління технологічними процесами на мікропроцесорні управляючі комплекси, які мають величезну перевагу порівняно з аналоговою технікою. Однією з цих переваг є можливість реалізації нових схем і алгоритмів управління технологічними процесами. Однак, незважаючи на те, що на теперішній момент часу вже розроблено математичний апарат для створення цифрових систем регулювання, впровадження нової техніки здійснюється з використанням старих типових схем і алгоритмів регулювання, що не сприяє повному використанню потенціалу цифрової техніки.

Удосконалення автоматизованих систем управління технологічними процесами енергоблоків АЕС і промислових барабанних котлів є найважливішим способом підвищення їхньої ефективності та надійності і однією з необхідних умов підвищення якості і зниження собівартості кінцевого продукту, сприяє економічному зростанню і технічному престижу держави.

Постановка задачі дослідження.

Ефективне управління барабанними парогенераторами (ПГ), промисловими і енергетичними котлами у нормальних і аварійних режимах значною мірою забезпечує динамічну стійкість промислової установки. Найважливіший параметр, від якого залежить виконання цих функцій, – рівень води у ПГ, який необхідно підтримувати на визначеному нормативному значенні. Підвищення рівня в котлах приводить до збільшення вологості пари, закиду води у пароперегрівні поверхні, зниження температури пари, гідроударів, при неприпустимому зниженні рівня може порушитися циркуляція внаслідок улучення значної кількості пари в опускні труби і відбутися перепалення екранних труб котла. Зниження рівня в ПГ АЕС приводить до погіршення теплообміну і підвищення температури води першого контуру, а також до зменшення аварійного запасу води для охолодження реактора, підвищення рівня супроводжується збільшенням вологості і зменшенням потужності енергоблока.

Таким чином, для підвищення якості процесів управління барабанними парогенераторами, зменшення відхилень регульованих параметрів, підвищення надійності устаткування і збільшення числа годин його використання необхідно застосовувати нові способи й алгоритми управління, в тому числі оптимальне управління з використанням сучасної мікропроцесорної техніки.

Для досягнення поставлених цілей необхідно розв'язати такі задачі:

- проаналізувати існуючі САР рівня води в барабанному ПГ;
- розробити математичну модель динаміки барабанного котла і математичну модель ділянки живлення барабанних парогенераторів;
- синтезувати оптимальний закон регулювання рівня води в барабанному ПГ.

Аналіз відомих рішень.

В даний час рівень води в барабані котла стабілізують або 2-контурній системою, або трьох імпульсною автоматичною системою [1, 2].

Однак 2-імпульсна схема регулювання в промисловості вже дуже рідко застосовується з наступних причин:

1) витрата живильної води через регулюючий живильний клапан залежить не тільки від положення клапана, але й від перепаду тиску на ньому, що у процесі експлуатації може змінюватися;

2) у дифманометрах - витратомірах колишніх років випуску вихідний сигнал був пропорційний корню квадратному з перепаду тиску.

Зазначені недоліки 2-контурної САР усуваються введенням у регулятор третього імпульсу по витраті живильної води від дифманометра-витратоміра. Функціональна схема 3-імпульсної САР зображена на рис.1. Принцип роботи САР наступний. Сигнали по витраті пару й живильної води вводяться в регулятор із протилежними знаками. У сталому стані ці сигнали рівні, протилежні за знаком, отже, компенсують один одного.

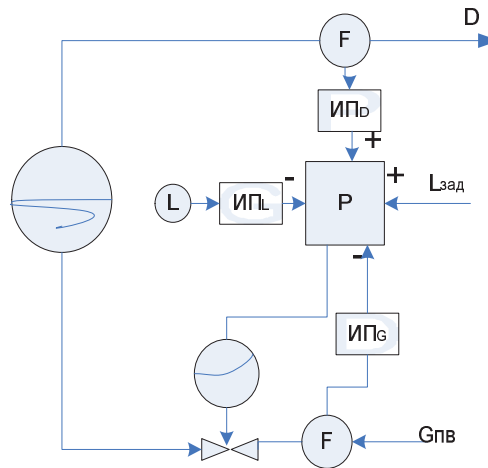


Рисунок 1 – Функціональна схема 3-імпульсної САР рівня

Сигнал за рівнем води в ПГ компенсується сигналом завдання. При зміні витрати пари миттєво змінюється відповідний сигнал на вході в регулятор та останній, пропорційно змінює витрату живильної води, не чекаючи зміни рівня. Використається ПІ-закон регулювання, однак внаслідок введення в регулятор практично безінерційного негативного зворотного зв'язку по витраті живильної води, в ньому реалізується П-закон регулювання (аналогія жорсткого зворотного зв'язку за положенням регульовального органа). Статична нерівномірність П-регулятора усувається корегуючим сигналом по витраті пару.

Результати моделювання такої системи (рис.2) за допомогою пакета прикладних програм Matlab – Simulink наведені на рис.3 та рис.4.

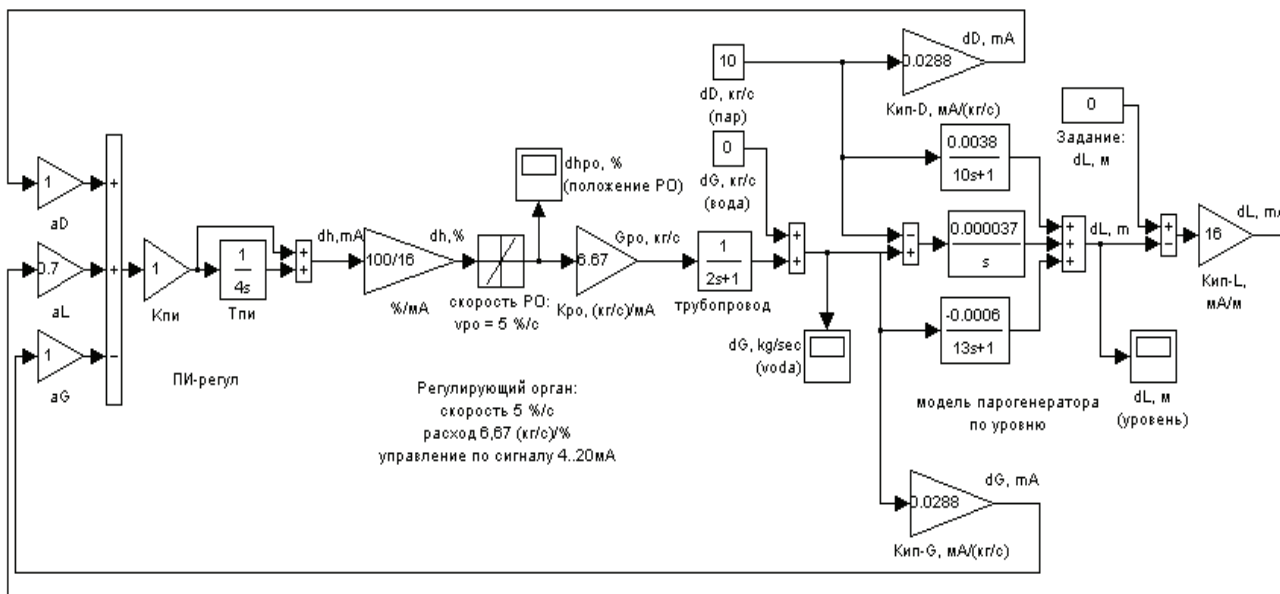


Рисунок 2 – Структурна схема моделі 3-імпульсної САР живлення ПГ

Регулювання рівня води здійснюється шляхом зміни витрати живильної води через регулюючий живильний клапан, який здійснює регулювання в межах 0..100%. Позіціонер управляє приводом електродвигуна постійного струму регулюючого живильного клапана. На позіціонер поступає сигнал завдання відкриття клапана у вигляді нормованого струмового сигналу 4..20мА. Максимальна швидкість переміщення штока складає 5%/с.

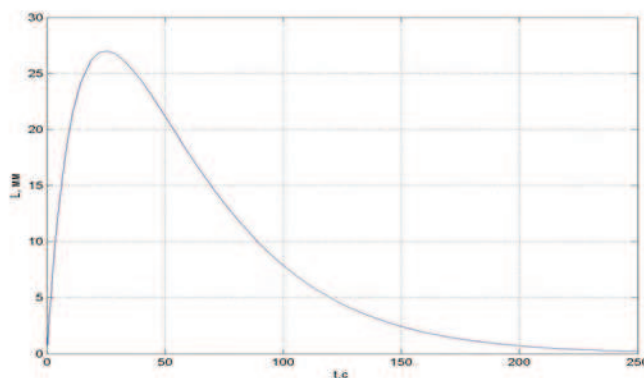


Рисунок 3 – Перехідна характеристика зміни рівня води (обурення – витрата пари)

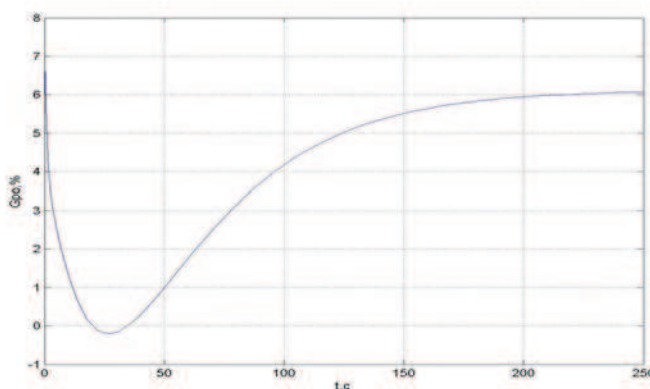


Рисунок 4 – Перехідна характеристика управляючого впливу (обурення – витрата пари)

Використання 3-імпульсної САР рівня води в ПГ з ПІ-регулятором дозволяє з імпульсами по витраті живильної води і пару дозволяє регулювати об'єкт з ефектом "набухання". Можливо придушення стрибкоподібного обурення витратою пару величиною до 18 кг/с без виходу рівня з 50-міліметрової зони. Обурення, що подаються на ПГ, витратою живильної води практично будь-якої величини (до 510 кг/с) не призводять до виходу рівня з 50-міліметрової зони. При всьому цьому аперіодичний перехідний процес регулювання рівня води в ПГ з часом регулювання менш ніж 250 с.

Розглянуті властивості ПІ-регулятора рівня води в барабанному парогенераторі відповідає заданим вимогам, але на сьогоднішній день при появі мікропроцесорної техніки, що має низьку вартість, малі розміри, високу надійність та універсальність у функціональному відношенні, та відкриває нові можливості для вдосконалення систем контролю і управління технологічними процесами, має сенс розглянути та дослідити більш вдосканалі регулятори рівня води.

Рішення задачі та результати дослідження.

Математичні моделі барабанних котлів розроблені багатьма дослідниками [1,2]. В основу даної статті покладено робота [2]. На величину рівня в барабані впливає багато факторів: витрата пари та її температура, витрата живильної води і її температура, тиск у барабані, яке, у свою чергу, залежить від витрати пари і живильної води, витрати палива, рециркулювання газів, тиску клапанів турбіни та інші параметри. Основними факторами з вище названих є витрата води і витрата пари.

Підвищення економічності роботи теплоенергетичного обладнання за рахунок підвищення технічного рівня систем автоматичного регулювання можливо за двома основними напрямками: використання сучасного комплексу технічних засобів (комп'ютеризовані керуючі комплекси з надійними, високоточними, мало інерційними датчиками технологічних параметрів) та удосконалення структурних схем систем автоматичного регулювання (як правило, за рахунок введення в контур контролю додаткових інформаційних сигналів про зміну технологічних параметрів або використання більш складного алгоритму управління). Значний інтерес представляють технічні рішення, які без залучення значних коштів дозволяють знизити споживання палива і зменшити викиди шкідливих речовин в навколишнє середовище. Заміна даним часом на деяких промислових об'єктах застарілих технічних засобів на комп'ютеризовані системи управління відбувається з використанням старих алгоритмів і схем регулювання, тобто не використовуються переваги і можливості мікропроцесорної техніки. Таким чином, для підвищення якості процесів управління барабанними парогенераторами, зменшення відхилень регульованих параметрів, підвищення надійності устаткування і збільшення числа годин його використання необхідно застосовувати нові способи і алгоритми управління, в тому числі оптимальні.

У структурну схему ділянки живлення барабанних парогенераторів (рис. 2) входять такі елементи: парогенератор, що враховує динаміку зміни рівня пароводяної суміші при зміні витрат живильної води та пари, живильний трубопровід, що є сполучним елементом ділянки живлення і враховує динаміку зміни витрати живильної води в результаті зміни положення регулюючого органу. Структурна схема ПГ в загальному вигляді представлена на рис.5.

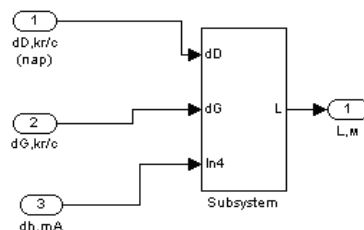


Рисунок 5 – Структурна схема ПГ

Для моделювання цієї системи з оптимальним регулятором необхідно модель об'єкту представити в просторі стану (1).

$$\begin{cases} \dot{\bar{x}}(t) = A\bar{x}(t) + B\bar{u}(t) \\ y(t) = C\bar{x}(t) \end{cases} \quad (1)$$

де $x(t)$ – вектор внутрішнього стану, що відповідає номінальному режиму функціонування системи; $y(t)$ – вектор виходу (рівень води в ПГ); $u(t)$ – вектор регулюючих впливів та основних збурень (положення штока регулюючого органу, а також витрати пару ΔD та жильної води ΔG); A, B, C – системні матриці моделі.

За допомогою функцій Matlab були виконані необхідні перетворення і отримані рівняння динаміки та виходу розомкнутої системи у векторно-матричній формі:

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.5 \\ 0 & 0 & -0.0769 & 0 & 0.5 \\ 0 & 0 & 0 & -0.0769 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -0.5 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 41.6875 \end{bmatrix} \cdot u$$

$$y = [0.38 \ 0.037 \ -0.0462 \ -0.0462 \ 0] \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \end{bmatrix}$$

Задача оптимального управління вирішується за функціоналом енергії виду:

$$J = \int_0^{\infty} (\tilde{X}^T \cdot Q \cdot \tilde{X} + u^T \cdot R \cdot u) dt, \quad (2)$$

де Q, R – позитивно – певні матриці, значення яких підбираються в процесі синтезу регулятора; $\tilde{X}(t) = [\bar{x}(t) \ e(t)]^T$ – вектор стану об'єкту; $e(t) = r(t) - y(t)$, $r(t)$ – задаючий вплив рівня води.

Враховуючи вищесказане структурна схема замкнутої системи с І-регулятором в ланцюзі розузгодження має вигляд (рис.6).

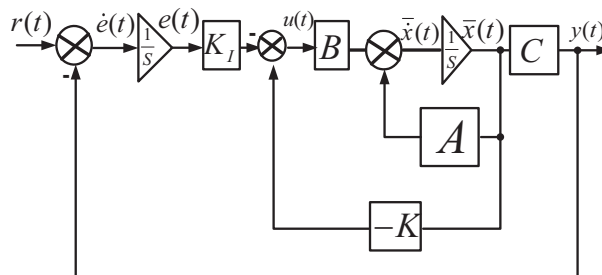


Рисунок 6 – Структурна схема замкнутої системи

Таким чином, модель системи з оптимальним регулятором стану і негативним зворотним зв'язком по виходу має вигляд:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t); \ y(t) = Cx(t); \ \dot{e}(t) = r(t) - y(t) = r(t) - Cx(t) \\ u(t) = -Kx(t) - K_I e(t) \end{cases}, \quad (3)$$

а рівняння динаміки замкненої системи:

$$\begin{aligned} \tilde{X}(t) &= \begin{bmatrix} \dot{x}(t) \\ \dot{e}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & 0 \\ -C & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x(t) \\ e(t) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} BK & BK_I \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x(t) \\ e(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} r(t) = \\ &= \begin{bmatrix} A - BK & -BK_I \\ -C & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x(t) \\ e(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} r(t) \end{aligned} \quad (4)$$

При моделюванні врахована реальна швидкість переміщення штоку регулюючого живильного клапану, яка дорівнює одному відсотку на секунду. Стрибкоподібний вплив, що обурює по витраті пари було прийнято рівним 10% від номінальної витрати пари, тобто 40.8 кг/с.[3] У схемі з оптимальним регулятором для мінімізації функціоналу енергії були прийняті наступні вагові матриці: $Q = \frac{1}{|x_{i\max}|^2}, [MM^{-2}]$; $R = \frac{1}{|u_{\max}|^2}, [0\%^{-2}]$.

Порівняємо перехідні процеси за рівнем води синтезованої системи з перехідними характеристиками у типовій системі з імпульсом по витраті пари, яка забезпечує кращу якість регулювання при дії основного обурюючого впливу - витрати пари. Як видно з результатів моделювання (рис.7 та рис.8), оптимальний регулятор забезпечує значно менший динамічний закид за рівнем води і менший час регулювання. Керуючий вплив u в оптимальній системі більше, ніж у типовій, проте за абсолютною величиною цілком припустимо в реальних системах [4].

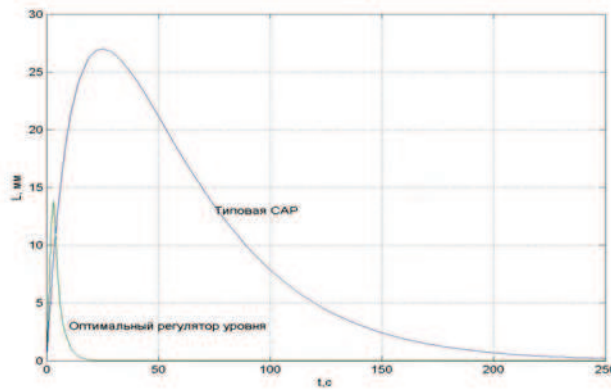


Рисунок 7 – Перехідна характеристика зміни рівня води(обурення – витрата пари)

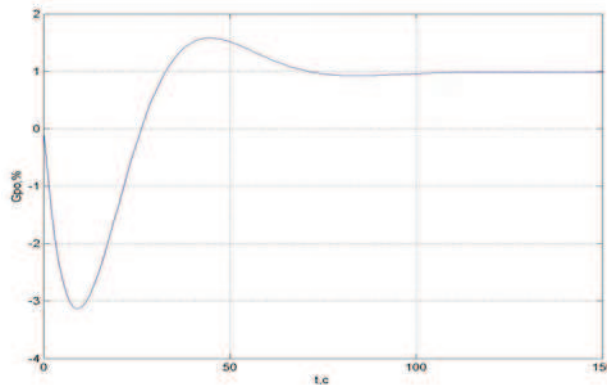


Рисунок 8 – Перехідна характеристика управляючого впливу (обурення – витрата пари) при оптимальному управлінні

В САР відсутня статична помилка регулювання, а використання одного сигналу від дифманометра-рівнеміра підвищує надійність системи і зменшує її вартість. Таким чином, оптимальний регулятор відпрацьовує стрибкоподібні обурення витратою пару величиною до 40.8 кг/с та витратою живильної води практично будь-якої величини (до 510 кг/с) без виходу

рівня з 100-міліметрової зони. При всьому цьому аперіодичний перехідний процес регулювання рівня води в ПГ з часом регулювання менш ніж 100 с.

Висновки.

1. Розглянуто парогенератор як об'єкт управління. Проаналізовано стандартну 3-імпульсну САР рівня води в ПГ з ПІ-регулятором. САР з імпульсами по витраті живильної води і пару дозволяє регулювати об'єкт з ефектом "набухання".

2. З метою задоволення жорстких вимог до стабілізації рівня води в ПГ, а також забезпечення точності підтримки рівня в статичних режимах ± 50 мм від номінального, а в динаміці ± 150 мм від номінального, запропонований оптимальний ПІ-регулятор. Отримана математична модель динаміки ділянки живлення парогенератора в просторі стану.

3. Проведено моделювання САР по основних каналах управління і збурення, результати моделювання наочно підтверджують працездатність системи. Оптимальний регулятор відпрацьовує стрибкоподібні обурення витратою пару та витратою живильної води без виходу рівня з 100-міліметрової зони з часом регулювання менш ніж 100 с.

Література

1. Astrom K.D., R.D. Bell "Drum-boiler dynamics". Automatica, 36(2000) 363-378.
2. Демченко В.А. Разработка математической модели участка питания парогенератора энергоблока с ВВЭР / В.А. Демченко, В.Ф. Ложечников // Труды Одесск. Политехнический ун-та. – 1999. – Вып.2 (8). - С.111-115.
3. Ключев А.С. Наладка систем автоматического регулирования барабанных паровых котлов / А.С. Ключев, А.Т. Лебедев, С.И. Новиков. – М.: Энергоатомиздат, 1985. - 280с.
4. Синтез и анализ законов управления системой регулирования уровня в барабане газомазутного парового котла с учетом экономии энергоресурсов / А.А. Журавлев, М.Л. Шит, О.Б. Попонова, Б.М. Шит // Problemele energeticii regionale. – 2005. - №1.

Надійшла до редакції:
09.02.2011

Рекомендовано до друку:
д-р техн. наук, проф. Ткаченко В.М.

Abstract

Zhukova N.V., Sukhareva T.N., Study of the dynamics of the automatic control of water level in drum steam generator. Study of the dynamics of the automatic control of water level in drum steam generator. Consideration of the steam generator as a control object. Investigated automatic control system drum boiler average power. An experimental and analytical dynamic model of the site supply steam drum of average power. The model is represented in state space. In order to stabilize the water level in drum steam generator proposed optimal controller.

Keywords: steam generator, cruise control, power station, the controller.

Аннотация

Жукова Н.В., Сухарева Т.Н. Исследование динамики системы автоматического регулирования уровня воды в барабанном парогенераторе. Рассмотрен парогенератор как объект управления. Исследованы автоматические системы регулирования барабанным котлом средней мощности. Разработана экспериментально-аналитическая модель динамики участка питания барабанного парогенератора средней мощности. Модель представлена в пространстве состояний. С целью стабилизации уровня воды в барабанном парогенераторе предложен оптимальный регулятор.

Ключевые слова: парогенератор, система автоматического регулирования, участок питания, регулятор.

© Жукова Н.В., Сухарева Т.М., 2011