

УДК: 621.311:681.5

# РЕГУЛЮВАННЯ ТЕПЛООВОГО НАВАНТАЖЕННЯ КОТЛОАГРЕГАТА НА ОСНОВІ ОЦІНКИ МОДЕЛІ ОБ'ЄКТА

**О. В. Степанець**

Аспірант\*

Контактний тел.: 066-375-19-82

E-mail: aard@bk.ru

**А. П. Мовчан**

Кандидат технічних наук, доцент\*

Контактний тел.: (044) 241-75-85

E-mail: anatozymovchan@atep.ntu-kpi.kiev.ua

\*Кафедра автоматизації теплоенергетичних процесів  
 Національний технічний університет України  
 «Київський політехнічний інститут»  
 пр. Перемоги 37, м. Київ, 03056

*У роботі запропоновано використання нової ефективної структури каскадної системи автоматичного регулювання теплового навантаження котлоагрегата. Розробка полягає у використанні регуляторів з внутрішньою моделлю об'єкта для реалізації стабілізуючого та коректующого регуляторів.*

*Ключові слова:* регулятор з внутрішньою моделлю, каскадна система, САР теплового навантаження.

*В работе предложено использование новой эффективной структуры каскадной системы автоматического регулирования тепловой нагрузки котлоагрегата. Разработка состоит в использовании регуляторов с внутренней моделью для реализации стабилизирующего и корректирующего регуляторов.*

*Ключевые слова:* регулятор с внутренней моделью, каскадная система, САР тепловой нагрузки.

*A new effective structure of cascade control system for automatic regulation of boiler heat load is proposed. The design method is based on using of internal model control for the implementation of stabilizing and corrective controls.*

*Keywords:* automatic control with internal model of object, cascade control system, control system of boiler heat load.

## Постановка задачі

Висока швидкість сучасних технологічних процесів, наявність великої кількості збурень, пов'язаних із взаємодією окремих частин виробничого процесу й зміною зовнішніх умов, варіація режимів роботи устаткування викликає необхідність створення високоякісних систем автоматичного управління.

Ефективність виробничого процесу безпосередньо залежить від роботи локальних систем керування. Одним з ефективних підходів щодо підвищення якості регулювання важливих технологічних змінних є введення додаткових інформаційних каналів — створення регулюючих каскадів. Разом з очевидними перевагами у використанні подібні системи складно налаштовуються, що може призвести до неефективного функціонування.

У роботі пропонується поєднати в каскадну систему регулятори з внутрішньою моделлю [1], створивши таким чином регулюючий комплекс, що відзначається швидким налаштуванням при збереженні переваг каскадного регулювання. Також представлена методика налаштування системи.

## Структура каскадної системи

Додаткові зворотні зв'язки є одним з найефективніших засобів підвищення стійкості роботи та якості регулювання автоматичних систем. Застосування додаткових ланок зворотної дії дозволяє практично без за-

тримки вводити в систему додаткові імпульси керування, не чекаючи, доки основний керуючий імпульс повністю пройде послідовно поєднані ланки основного контуру системи автоматичного регулювання. Скороченням кола зворотної взаємодії можна значно збільшити швидкодію системи автоматичного регулювання та стабілізувати параметри [2].

Однією з найрозповсюдженіших структур з додатковим зворотним зв'язком є каскадна система. Її загальна схема має вигляд, зображений на рис. 1.

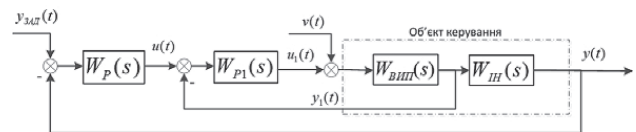


Рис. 1. Каскадна система регулювання

У каскадній системі (рис. 1) регулятор  $W_P(s)$  називається коректуючим (головним), на нього подається сигнал розбалансу завдання та вихідної величини об'єкта (на рисунку  $y(t)$ ), а його вихід є завданням для внутрішнього контуру системи. Регулятор  $W_{PI}(s)$  називається стабілізуючим (допоміжним), на нього подається сигнал розбалансу виходу коригуючого регулятора та сигналу з проміжної точки об'єкта (на рисунку  $y_1(t)$ ).  $W_{ВП}(s)$  та  $W_{И}(s)$  — моделі випереджаючої та інерційної частини об'єкта керування відповідно,  $v(t)$  — збурення, що діють на об'єкт.

Регулятор з внутрішньою моделлю має високу швидкість відпрацювання зміни завдання [1, 3, 4]. При тес-

товому ступінчатому збуренню з боку завдання формуються перехідні процеси, близькі до аперіодичних. Це пов'язано зі структурою регулятора, де використовується частина інвертованої моделі об'єкта. Схема системи з таким регулятором зображена на рис. 2.

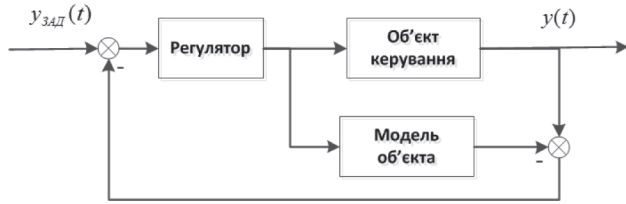


Рис. 2. Структурна схема АСР з регулятором з внутрішньою моделлю

Передавальна функція блоку «Регулятор» має вигляд

$$W_P(s) = W_\Phi(s)W_{M+}(s)^{-1}, \quad (1)$$

де  $W_\Phi(s)$  — передавальна функція фільтра, призначеного для налаштування робастності замкненої системи,  $W_{M+}(s)$  — передавальна функція частини моделі об'єкта, що може бути обернена.

Прийнявши, що модель об'єкту  $W_M(s)$  повністю відповідає або достатньо близька об'єкту  $W_{OB}(s)$ , тобто

$$W_M(s) \approx W_{OB}(s). \quad (2)$$

Згідно схеми, вихідна величина  $Y(s)$  (зображення у просторі Лапласа вихідної змінної  $y(t)$ ) визначатиметься наступним відношенням

$$Y(s) = W_P(s)W_{OB}(s)Y_{Зад}(s). \quad (3)$$

Підставивши (1) в (3), одержимо

$$Y(s) = W_\Phi(s)W_{M+}(s)^{-1}W_{OB}(s)Y_{Зад}(s). \quad (4)$$

Описавши об'єкт певною передавальною функцією зі складовими частинами, що можуть бути інвертовані ( $W_{OB+}(s)$ ) та не можуть ( $W_{OB-}(s)$ ), наприклад, транспортне запізнення), вираз (4) можна переписати як

$$Y(s) = W_\Phi(s)W_{M+}(s)^{-1}W_{OB+}(s)W_{OB-}(s)Y_{Зад}(s). \quad (5)$$

Враховуючи (2), матимемо

$$Y(s) = W_\Phi(s)W_{OB-}(s)Y_{Зад}(s). \quad (6)$$

Отже, система автоматичного керування представленої структури по каналу «завдання — вихідна величина» відтворює динаміку зміни завдання з поправкою на динаміку  $W_\Phi(s)$  та  $W_{OB-}(s)$ .

Скористаємось вказаною властивістю для синтезу каскадної АСР. Внутрішній контур, як правило, має швидшу за зовнішній динаміку, далі розглядатимемо саме цей випадок. Об'єктом для нього виступає випереджаюча частина, тобто

$$W_{OB1}(s) = W_{Вип+}(s). \quad (7)$$

Для головного ІМС-регулятора внутрішній замкнений контур можна вважати «прозорим». Вихід коректуючого регулятора буде транслюватися в інерційну частину об'єкта керування з динамікою, описаною (6). Таким чином, об'єктом для головного регулятора наближено можна вважати наступну структуру:

$$W_{OB}(s) \approx W_{IN}(s)W_{Вип+}(s)W_{Вип-}(s). \quad (8)$$

Або, при достатньо малій сталій часу фільтра  $W_{Вип+}(s)$  регулятора випереджаючого контуру,

$$W_{OB}(s) \approx W_{IN}(s)W_{Вип-}(s), \quad (9)$$

де  $W_{IN}(s)$  — інерційна частина об'єкта,  $W_{Вип-}(s)$  — частина об'єкта випереджаючого контуру, що не може бути обернена (транспортне запізнення).

Результуюча структурна схема запропонованої каскадної зображена на рис. 3. Позначення на схемі аналогічні таким на рис. 1, індекс «м» означає модель відповідної частини об'єкта керування.

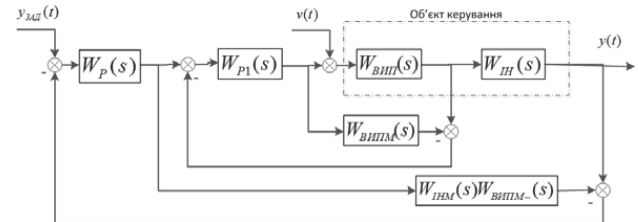


Рис. 3. Каскадна система регулювання з двома регуляторами з внутрішньою моделлю

### Методика налаштування системи

Процес налаштування запропонованої системи можна представити у вигляді наступних етапів:

- 1) ідентифікація об'єктів керування (випереджаюча та інерційна ланка);
- 2) встановлення параметрів моделей у регулюючі елементи та моделі об'єктів;
- 3) налаштування параметрів робастності системи (сталі фільтри);
- 4) замикання контурів регулювання та переведення системи у режим дослідної експлуатації.

Так як основою регулятора з внутрішньою моделлю є введення до складу регулюючого елемента моделі підконтрольного процесу, то природним кроком буде початкова ідентифікація характеристик процесу. Отримати необхідні для синтезу системи керування дані можна, проаналізувавши результати активного експерименту по визначенню параметрів моделі об'єкта.

Для цього тимчасово розриваються зворотні зв'язки, а на вхід об'єкта керування подається ступінчате збурення з боку регулюючого органу. Спостерігаючи за перехідними процесами у системі (одночасно за зміною основної та проміжної регульованих величин), можна оцінити важливі для регулювання параметри моделі. Здійснити це можна одним з відомих методів ідентифікації — наприклад, по аналізу початкової ділянки перехідного процесу [5], за допомогою релейного експерименту [6] чи, якщо дозволяють обчислювальні можливості використовуваної контролерної техніки, одним з методів найменших квадратів [7]. Структура моделі об'єкта керування обирається по апріорній інформації про об'єкт керування або визначається по результатам ідентифікації. При цьому модель об'єкта для зовнішнього контуру матиме вигляд (9).

Отримані дані встановлюються у відповідні блоки каскадної структури. Одночасно з процедурою присвоєння регулюючим елементам визначених параметрів моделей обчислюються опорні значення параметрів робастності — сталих фільтрів регуляторів. Попередні дослідження показали [Степанець], що для початкових

налаштувань за умови використання фільтру першого порядку вигідно обрати значення з інтервалу

$$T_{\Phi} = 0,2...0,5\tau, \tag{10}$$

де  $T_{\Phi}$  — постійна часу фільтра,  $\tau$  — транспортне запізнення контуру.

Після виконання описаних дій система готова для дослідної експлуатації, під час якої можливі уточнення параметрів оператором. Замкнені зворотні зв'язки та визначені параметри регуляторів дозволяють перевести систему в автоматичний режим для виконання нею прямих обов'язків — управління та стабілізації підконтрольних технологічних величин.

**Робота системи у контурі регулювання теплового навантаження котлоагрегата**

Процеси згоряння палива та пароутворення у котлоагрегаті тісно пов'язані. Регулювання паровиробництва котельного агрегата у відповідності до навантаження енергоблоку виконується шляхом впливу на подачу в топку палива та повітря, необхідних для горіння. Умовою, яка визначає матеріальний баланс пари, що використовується та виробляється, є сталість тиску в якій-небудь точці парового тракту [8]. Тепловиділення в топці у сталому режимі повинне відповідати кількості утвореної пари. У випадку, коли неможливо провести пряме вимірювання витрати палива або змінюється його склад, використовуються непрямі показники витрати палива. Таким показником є кількість теплоти [8], що виділилася в топці. Кількість тепла можна визначити по витраті пари перед турбіною. Динамічну похибку визначення кількості теплоти по витраті пари, що виникає у перехідних режимах через акумуляційну властивість котла, можна скоригувати введенням додаткової інформаційної складової. Це імпульс по швидкості зміни тиску пари в котлі. Тоді кількість тепла буде визначатися виразом

$$\Delta D_q = C_{\Pi} \frac{dp_B}{dt} \pm \Delta D_{п.п}, \tag{11}$$

де  $\Delta D_q$  — зміна теплового навантаження;  $C_{\Pi}$  — стала, що характеризує теплову акумулюючу здатність пароводяної суміші й металу випарювальної частини котла, кг/(кгс/см<sup>2</sup>);  $p_B$  — тиск пари у барабані котла;  $\Delta D_{п.п}$  — зміна витрати пари.

Об'єктом керування для регулювання тиску пари та теплового навантаження є послідовне з'єднання топочної камери, поверхонь нагріву робочого тіла в топочній камері, барабану котла та пароперегрівача.

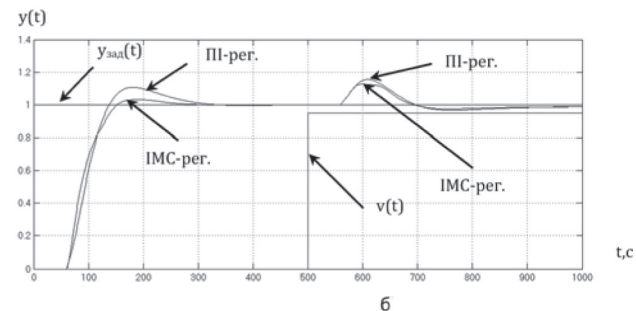
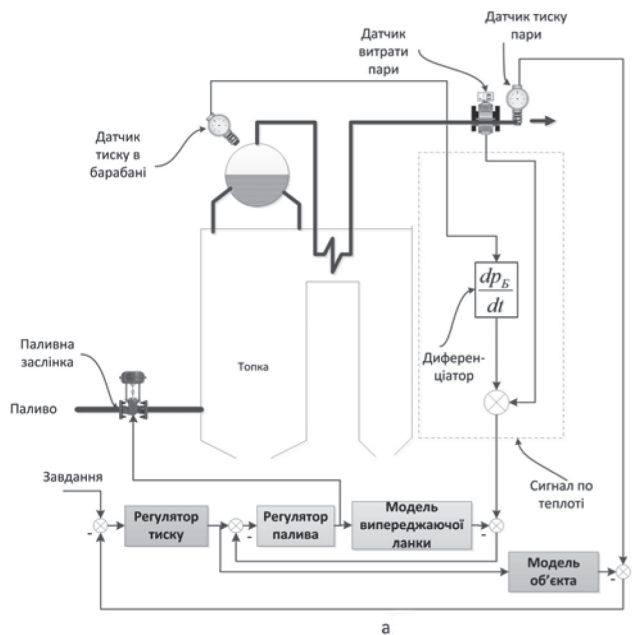
Для енергоблоку, що складається з котлоагрегату та турбіни, основним способом регулювання тиску пари в регулюючому режимі роботи є вплив на витрату палива, що подається в топку котла, залежно від тиску пари в магістралі. Регулятор тиску пари у зовнішньому контурі є давачем завдання регулятору витрати палива. Збурення паровим навантаженням з боку турбіни відпрацьовує коректуючий регулятор, а збурення в топці котла усуваються роботою стабілізуючого регулятора палива.

Мала інерційність та доступний спосіб вимірювання сигналу по теплоті [9] дозволяють використовувати його в системах стабілізації подачі палива. Структурна схема регулювання теплового навантаження з використанням цього сигналу називається «теплота — паливо».

Функціональна схема системи зображена на рис. 4,а, а результати моделювання системи — на рис. 4,б. Структура, що реалізує (11), виділена як «сигнал по теплоті». Для порівняння наведені перехідні процеси у системі з двома ПІ-регуляторами, які зазвичай застосовуються у даній схемі. На графіках наведені реакції систем за зміну завдання та на відпрацювання збурення, прикладеного до входу об'єкта керування.

Передавальні функції об'єктів керування для котлоагрегата ТП-87:  $W_{Об1}(s) = \frac{2,8e^{-25s}}{18s+1}$  для випереджаючого контуру та  $W_{Об}(s) = \frac{2e^{-60s}}{420s+1}$  для об'єкта в цілому.

Отже, моделями об'єктів для контурів регулювання будуть:  $W_{ОбМ1}(s) = \frac{2,8e^{-25s}}{18s+1}$  для регулятора стабілізації та  $W_{ОбМ}(s) = \frac{(18s+1)e^{-60s}}{420s+1}$  для коректуючого контуру, так як  $W_{ІН}(s) = \frac{18s+1}{420s+1} e^{-35s}$ . А регулятори внутрішнього та зовнішнього контурів —  $W_{Р1}(s) = \frac{18s+1}{2,8(5s+1)}$  та  $W_{Р}(s) = \frac{420s+1}{2(30s+1)(18s+1)}$  відповідно.



**Рис. 4.** Функціональна схема (а) та перехідні характеристики (б) системи регулювання теплового навантаження котлоагрегата

Як видно з наведених результатів моделювання (рис. 4,б), розроблена каскадна система ефективно відпрацьовує зміну завдання та усуває збурення, переважаючи по прямим показникам якості роботи каскадну систему з двома ПІ-регуляторами (зменшення часу перехідних процесів на понад 10 % при зменшенні перерегулювання при зміні завдання більше, ніж в 3 рази).

### Висновки

Запропоновано нову структуру системи автоматичного керування, що складається з каскаду регуляторів з внутрішньою моделлю об'єкта, та методику її налаштування.

Каскад регуляторів дозволяє значно покращити роботу системи керування за рахунок ефективного використання допоміжного інформаційного каналу про стан об'єкта. Це дозволяє підтримувати технологічні параметри на визначеному рівні з мінімальним перерегулюванням та часом відпрацювання збурень. Структура має суттєву перевагу перед відомими рішеннями з ПІД-регуляторами по показникам якості перехідних процесів у системі та способам налаштування регуляторів. Розроблена система керування рекомендується для використання в САР теплоенергетичними об'єктами зі змінними режимами роботи, де висуваються жорсткі вимоги до швидкості роботи та мінімізації перерегулювання.

### Література

1. Brosilow C. Techniques of Model-Based Control [Текст] / С. Brosilow, В. Joseph. — USA : Prentice Hall, 2002. — 704 р.
2. Теория автоматического управления [Текст]. Ч. 1. Теория линейных систем управления : учеб. / под ред. А. А. Воронова. — М. : Высш.шк., 1986. — 367 с.
3. Денисенко В. В. Компьютерное управление технологическим процессом, экспериментом, оборудованием [Текст] / В. В. Денисенко. — М. : Горячая линия — Телеком, 2008. — 608 с.
4. Степанец О. В. Адаптивна система керування з внутрішньою моделлю [Текст] / О. В. Степанец, А. П. Мовчан // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. — 2009. — № 6/3(42). — С. 9—14.
5. Мовчан А. П. Идентификация объектов управления в адаптивных системах управления [Текст] / А. П. Мовчан, В. Ф. Мысак, А. В. Степанец // Сучасні наукові дослідження, 2006 : Матеріали ІІ міжнародної науково-практичної конференції. — Д. : Наука і освіта, 2006. — С. 60—63
6. Leva A. Hands-on PID autotuning: a guide to better utilization [Електронний ресурс] / Leva, A., Cox C., Ruano A. — IFAC Professional Brief. — Режим доступу \www/ URL: <http://www.ifac-control.org/publications/list-of-professional-briefs> — 1.03.2011 р. — Загол. з екрану.
7. Изерман Р. Цифровые системы управления [Текст] / Р. Изерман. — М. : Мир, 1984. — 541 с.
8. Клюев А. С. Наладка систем автоматического регулирования котлоагрегатов [Текст] / А. С. Клюев, А. Г. Товарнов. — М. : Энергия, 1970. — 280 с.
9. Плетнев Г. П. Автоматизированное управление объектами тепловых электростанций [Текст] : учеб. пособие / Г. П. Плетнев. — М. : Энергоиздат, 1981. — 368 с.

УДК В621.182.2.001.57

## ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧОЇ ТЕХНОЛОГІЇ КОМБІНОВАНОГО ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ

**Є. Є. Чайковська**

Кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, доцент\*

**Контактний тел.:** (048)758-47-67

**E-mail:** eechaikovskaya@list.ru

**Н. Ф. Іщук**

Аспірант\*

**Контактний тел.:** 067-990-76-55

**E-mail:** natalkaf@bigmir.net

\*Кафедра теоретичної, загальної та нетрадиційної енергетики  
Одеський національний політехнічний університет  
пр. Шевченка, 1, м. Одеса, Україна, 65044

*Визначена ефективність розробленої технології комбінованого теплопостачання.*

*Ключові слова:* енергозберігаюча технологія, комбіноване теплопостачання, прийняття рішень.

*Определена эффективность разработанной технологии комбинированного теплоснабжения.*

*Ключевые слова:* энергосберегающая технология, комбинированное теплоснабжение, принятие решений.

*Efficiency of the developed technology of combined heating is presented.*

*Keywords:* energysaving technology, combined heating, decision-making level.