

УДК 621.311:681.5

*У статті наведено приклади промислового використання систем автоматичного керування з адаптивними властивостями, описується адаптивна система для теплоенергетичних об'єктів, наводяться та аналізуються результати імітаційного порівняльного моделювання*

*Ключові слова: змінні режими роботи, адаптація, оптимізація*

*В статті приведено приклади промислового використання систем автоматичного управління з адаптивними властивостями, описується адаптивна система для теплоенергетичних об'єктів, приводяться та аналізуються результати імітаційного порівняльного моделювання*

*Ключевые слова: переменные режимы работы, адаптация, оптимизация*

*This article describes examples of industrial use of adaptive automatic control systems; an adaptive system for heat-power facilities is represented; simulation results of comparative modeling are described and analyzed*

*Keywords: variable modes, adaptation, optimization*

# АДАПТИВНІ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ДЛЯ ТЕПЛОЕНЕРГЕТИЧНИХ ОБ'ЄКТІВ

**О.В. Степанець**

Асистент\*

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: anatolymovchan@atep.ntu-kpi.kiev.ua

\*Кафедра автоматизації теплоенергетичних процесів

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут»

пр. Перемоги, 37, м. Київ, 03056

## 1. Вступ

Зазвичай теплоенергетичне устаткування працює у різних режимах, при різних навантаженнях, різноманітних збуреннях, з сировиною та енергоносіями різних характеристик. Причиною зазначених змін часто є й робота інших контурів регулювання, що взаємозв'язані через об'єкт. Значна частина часу персоналу, що експлуатує системи регулювання, витрачається на виявлення й усунення технічних несправностей і налаштування параметрів регулюючих пристроїв.

У роботі розглянуто основні існуючі підходи до вирішення цієї проблеми та запропоновано новий варіант побудови ефективної адаптивної системи керування теплоенергетичними процесами.

## 2. Складності керування теплоенергетичними об'єктами

Згідно з результатами спеціальних досліджень [1], окремі елементи котельних агрегатів змінюють свої динамічні характеристики залежно від навантаження та інших факторів. Синтез придатних до використання систем керування ускладнюється суттєвим транспортним запізненням, характерним для контурів керування теплоенергетичними процесами.

Наприклад, для системи автоматичного регулювання (САР) температури первинної пари парогенератора П-56 (блок 200 МВт) при зниженні навантаження на 50% оптимальні параметри налаштування регулюючого приладу й диференціатора, що працюють за типовою схемою, змінюються приблизно у 2 рази. А

при регулюванні температури проміжного перегріву на котлі ПК-33-83СП блоку 200 МВт методом байпасування пари пароперегрівник має чітко виражену нелінійність характеристик, пов'язану з величиною байпасування. Таким чином, для забезпечення потрібної якості керування параметри регулятора треба змінювати у кілька разів. Коефіцієнти апроксимуючих лінійних моделей пароперегрівника змінюються залежно від навантаження в 5-6 разів [2] (для різних парогенераторів).

У наш час на електростанціях, як правило, застосовуються регулюючі прилади й інші елементи САР, параметри яких встановлюються при налагодженні й після цього залишаються незмінними. Такі регулятори відносно до об'єктів зі змінними динамічними характеристиками в основному не можуть забезпечити якісного регулювання, а іноді навіть стійкого процесу, хоча в деяких випадках [1] вдається задовільно вирішити це завдання установкою так званих компромісних налаштувань.

Експлуатаційний персонал, щоб уникнути частих перенастроювань регуляторів, прагне встановити по можливості «слабкі» параметри налаштування, забезпечуючи стійкість системи регулювання при різних режимах роботи об'єкта. Природно, при цьому доводиться жертвувати характеристиками якості системи регулювання. А для працездатності системи необхідно, щоб процес автоматичного регулювання досягав певних якісних показників. Вимоги до якості процесу регулювання в кожному випадку можуть бути найрізноманітнішими, однак із всіх якісних показників можна виділити декілька найбільш істотних, наприклад, час регулювання й динамічна похибка.

Тому розробка систем, що можуть самостійно або під наглядом оператора підлаштовуватися під зміни об'єкта керування, є актуальною науковою та практичною задачею. Збереження високої якості керування контурами та елементами устаткування сприятиме економії ресурсів та енергоспоживанню, підвищенню строку служби обладнання, позитивно відобразиться на загальній роботі підконтрольних технологічних процесів та інженерних систем.

Для вирішення описаної проблеми існує особливий клас систем автоматичного керування, що мають адаптивні властивості, тобто встановлюють свої параметри чи навіть змінюють свою структуру, підлаштовуючись під важливі для них характеристики об'єкта. Адаптивні ж системи повинні визначати остаточні параметри налаштувань регуляторів при вводі об'єкта в експлуатацію, після його модифікації чи значної зміни характеристик [3]. Фактично, автоматизовані адаптивні системи керування використовуються повсякчасно, просто функції модулів адаптації виконує досвідчений оператор.

### 3. Практична реалізація адаптивних систем автоматичного керування

Одним з варіантів навести лад у різноманітні системи є їх класифікація за підходами до формування механізму адаптації [4]. Згідно цієї класифікації адаптивні системи, засновані на евристичному підході, самоналаштовувальних регуляторах та системах з еталонною моделлю, являються трьома основними підходами до адаптивного керування.

Методи, які використовують евристичний підхід, забезпечують адаптивність прямою оцінкою вихідної змінної (або похибки регулювання) чи обраного для системи критерію якості. У системах, як використовують цей підхід, часто використовується цифровий ПІД регулятор. Подібні методи інколи можуть працювати навіть без ідентифікації елементів системи керування. При синтезі таких регуляторів намагаються оптимізувати критерій, який визначає якість технологічного процесу. Також цей підхід у практичних застосуваннях забезпечує грубість системи, однак велика кількість розрахунків та успішне використання лише у найпростіших випадках створює проблеми для повсюдного поширення. Прикладом успішного практичного застосування регуляторів подібного типу може бути регулятор, запропонований Astrom і Hagglund [5] на основі ПІД-алгоритму.

Проблеми розробки адаптивних САУ з еталонною моделлю широко висвітлені в наукових роботах [6, 7]. Еталонна модель дає бажану реакцію або бажаний вектор станів на задане значення. Такий підхід заснований на визначенні різниці між виходом системи та еталонної моделі. Метою адаптації є наближення статичних та динамічних властивостей замкненої системи регулювання до властивостей моделі. Тому, фактично, адаптивна система порівнює властивості контуру регулювання з бажаними, формуючи при цьому похибку відповідності. Завданням відповідного механізму керування є зменшення похибки між еталонною моделлю та системою, що налаштовується. Це досягається налаштуванням параметрів системи або формуванням по-

трібного вхідного сигналу (тобто виходу регулятора). Важливим є подвійний характер роботи такої системи, так як вона може використовуватися і для ідентифікації параметрів модельованого процесу і для досягнення необхідного режиму роботи системи. Обмеженням у використанні подібних систем є можливість їх застосування лише до детермінованих об'єктів.

Підхід з самоналаштуванням регуляторів базується на рекурентному визначенні характеристик системи та збурень і корекції розрахунків при спостереженні за можливими змінами роботи системи. Використовуючи ці відомості, можна обрати метод для побудови оптимальних регуляторів. Такі регулятори, що ідентифікують невідомі процеси, а потім синтезують управління (адаптивне керування з рекурсивною ідентифікацією) називаються регуляторами, що самоналаштовуються [4].

Розглянемо кілька прикладів промислових регуляторів та систем, що самотужки налаштовуються на підконтрольну систему.

Фірмою Foxboro розроблено «EXACT Controller» [8], який може бути автоматично налаштований по вигляду перехідного процесу. Цей регулятор використовує підхід розпізнавання моделей, тобто користується знаннями про поведінку системи під час перехідного процесу. Принцип його роботи схожий на поведінку досвідченого оператора під час налаштування системи. Для налаштування регулятор використовує три піки у перехідному процесі, по яких оброблює перерегулювання та недорегулювання. Ці параметри разом з періодом коливань визначають налаштування ПІД регулятора. Якість налаштування визначається по величині перерегулювання та степеню затухання.

Промислові контролери фірми ABB [9] адаптуються до характеристик об'єкта керування за допомогою частотної релейної ідентифікації. Процес розпочинається, коли в об'єкті відсутні перехідні процеси. ПІД-регулятор на час експерименту вимикається, а на вхід об'єкту за допомогою реле подаються тестові сигнали, що призводять до появи коливань контрольованої змінної. Як тільки на виході системи встановлюються коливання постійної амплітуди та частоти, отримані дані обробляються методом гармонічної лінеаризації, а результати встановлюються у ПІД-регулятор, що відразу включається у роботу.

Керуючи пристрої сімейства DeltaV компанії Emerson мають можливості автоналаштування, що базуються на релейному експерименті [10]. Отримані по аналізу коливань вихідної змінної параметри моделі об'єкта використовуються для визначення параметрів ПІД-регулятора. Основним способом визначення параметрів являється метод Циглера-Нікольса, однак за бажанням оператора можна обрати й інші.

Технологія AccuTune фірми Honeywell [9] реалізує адаптивні регулятори шляхом попередньої ідентифікації у розімкненому контурі та подальшому налаштуванні параметрів згідно набору правил та формул. Регулятори є модифікованими ПІД-алгоритмами. Ідентифікація об'єкта відбувається по реакції на ступінчасте збурення. По поведінці похідної від вихідної величини обирається вид моделі (якщо похідна весь час зменшується – то обирається модель першого порядку, якщо має максимум – то другого). Значення запізнення визначається як час від початку експерименту до моменту,

коли регульована величина досягне певного, наперед заданого малого приросту.

Згадані регулятори потрібно переналаштувати при зміні умов роботи підконтрольного обладнання, або доповнювати зовнішніми алгоритмічними блоками для забезпечення все режимності роботи регуляторів.

Регулятор SuhoCon [11] є прикладом практичного застосування нейронних мереж для потреб автоматизації процесів керування. Його алгоритм формує набір коефіцієнтів підсилення або вагових факторів, що потім використовуються як параметри закону керування. Він збільшує вагові фактори, які довели ефективність в мінімізації похибки. Вагові фактори оновлюються під час кожного інтервалу дискретизації, щоб включити ефекти від останньої дії по керуванню та недавні зміни у властивостях процесу. Для реалізації такого регулятора необхідне специфічне обладнання та значний підготовчий період.

В роботі [12] розглядається принцип дії та особливості автонастройки ПІД-регулятора «Овен» ТРМ101. Він має два режими налаштування: попереднє та точне. Задачею попереднього налаштування є визначення протягом короткого проміжку часу приблизних значень параметрів регулятора при відсутності точної інформації про характеристики об'єкта. Для реалізації цього алгоритму в контур регулювання включається двопозиційний релейний елемент, в системі з'являється незатухаючий автоколивальний процес, за характеристиками якого розраховується параметри ПІД-регулятора. Задачею основного (точного) налаштування регулятора є уточнення настройки системи по завершенню попереднього етапу або в процесі експлуатації системи. Для цього регулятора використовують автоколивання з генератора синусоїдальних коливань, що дає більш високу захищеність системи та алгоритму від промислових перешкод, а також плавні зміни сигналу на вході регулятора, на відміну від методу автоколивання за допомогою релейного елемента.

Цикл статей [13], [14] присвячено результатам дослідницької роботи російського науково-промислового об'єднання «Техноконт» по створенню промислово придатних систем автоматичного керування. Ці методи розрахунку оптимальних налаштувань відомі як ТПЗС (технологія перенастроювання замкнених систем). По словам авторів, ТПЗС не вимагає спеціальних режимів функціонування системи, наприклад, виведення в режим незгасаючих коливань або спеціальних законів регулювання. В порівнянні з методами, побудованими на технології попередньої ідентифікації в розімкненому контурі за допомогою кривих розгону, імпульсних або частотних характеристик, ТПЗС, разом з економією часу і отриманням інформації без порушення звичайних умов експлуатації технологічного устаткування. У створених на основі ТПЗС програмах як показник якості використовується час перехідного процесу. Розраховані оптимальні параметри регулятора забезпечують мінімум цього показника. Як показали проведені авторами дослідження, мінімізація часу перехідного процесу дозволяє отримувати перехідні процеси з незначним перерегулюванням (не більше 5% від вибігу). У складі ТПЗС в даний час розроблено 2 методики, що істотно розрізняються алгоритмами, видами вхідної інформації і іншими показниками. Їх використання вимагає постійної або періодичної об-

робки експериментальних даних з об'єкта та ручного переносу результатів на регулятори.

У роботі [15] описана адаптивна каскадна система керування на прикладі АСР температури первинної пари енергоблоку потужністю 800 МВт. Особливістю запропонованої системи є її каскадна побудова з двома ПІ-регуляторами, а не застосовувана, як правило, схема з регулятором та диференціатором. Налаштування проводиться послідовно по контурам. Параметри регулятора внутрішнього контуру встановлюються близькими до граничних через малу інерційність контуру. Параметри налаштування зовнішнього контуру шукаються за допомогою контуру адаптації. Адаптивний контур формує пробні гармонійні сигнали, що подаються як завдання для коригуючого регулятора. Обчислювальний комплекс за допомогою перетворювачів формує складові пробного гармонійного сигналу. Отримана реакція системи аналізується для пошуку оптимальних налаштувань керування по запропонованій методиці. Наявність збурень у системі може призвести до значних похибок у результатах розрахунку в порівнянні з теоретично оптимальними значеннями, так як при розробці системи прийнято ряд спрощень.

У останній час багато уваги приділяється методам регулювання, заснованому на модельному прогнозуєчому керуванні. Основна ідея цих алгоритмів полягає в тому, щоб сформулювати задачу проектування регулятора, як задачу оптимізації в реальному масштабі часу, що вирішується при умові заданих жорстких обмежень [16]. До переваг використання модельного прогнозуєчого керування можна віднести можливість керування багатомірними і багатозв'язними об'єктами зі складною структурою, що враховують не лінійності, оптимізацію в реальному часі. Разом з цим для методу існує необхідність побудови моделі об'єкта, що враховує якнайбільшу кількість змінних стану та збурень, що діють на об'єкт, а його використання потребує значних обчислювальних потужностей.

Недоліками більшості вказаних продуктів є недостатність інформації про роботи алгоритмів через комерційну закритість систем або складність реалізації на іншому обладнанні. Це - перешкода для впровадження подібних систем на електростанціях та енергоспоживаючих об'єктах, де частою вимогою є максимальне застосування вже існуючого парку пристроїв керування.

---

#### 4. Адаптивна система керування з регулятором з внутрішньою моделлю для управління контурами теплоенергетичних об'єктів

---

Отже, сучасний стан керуючого обладнання ТЕС та котельних потребує розробки простих алгоритмів управління, що являються логічним розвитком класичної ТАУ та поєднують у собі простоту реалізації з потужністю концепції адаптивного керування.

Як видно з представлених реалізованих систем, більшість з них у тій чи іншій мірі використовують ідентифікацію об'єкта керування, щоб потім за допомогою правил, формул чи емпіричних залежностей визначити параметри налаштування регулятора. Тобто у будь-якому разі оцінка об'єкта стає обов'язковим етапом на шляху синтезу системи автоматичного керування.

Тому логічним кроком вважається використання отриманої моделі об'єкта керування для безпосередньої побудови регулятора. Один з варіантів такого підходу називається «регулятор з внутрішньою моделлю» (Internal model control) [10, 17, 18]. Для нього характерне включення обраної структури моделі в склад регулятора. Це дозволяє автоматично отримати параметри регулятора з високими показниками якості керування відповідно до принципу структурно-параметричної оптимізації, згідно якого регулятор має містити передавальну функцію, близьку або рівну оберненій передавальній функції об'єкта.

Перевагами такої системи є чітка відповідність регулятора підконтрольному об'єкту, перехідні процеси, близькі до аперіодичних, при часі регулювання, що не перевищує такий для оптимально налаштованих ПІД-регуляторів, швидке налаштування. Важливою особливістю такого регулятора є можливість забезпечення робастності. Чутливість системи регулюється значенням сталої фільтра, який входить до складу регулятора. Вибір структури фільтра та його характеристик є окремою важливою задачею.

Перешкодою для використання цієї системи до недавнього часу була складність реалізації на існуючій апаратній базі. Однак тепер, з розвитком і повсюдним впровадженням у системи керування мікропроцесорної техніки, це обмеження знято і можна користуватися всіма перевагами подібної структури: легкістю автоматичного налаштування та високоякісними показниками роботи.

Для роботи розглянутої системи керування у змінних режимах роботи теплоенергетичного обладнання необхідно, щоб виконувалась підстройка, адже зміна параметрів об'єкта керування повинна відобразитись і в параметрах його моделі. З цією метою система доповнюється контуром автоматичного налаштування. Контур представляє собою математично-логічний модуль, де визначається необхідність корекції параметрів, формуються необхідні для неї умови, відбувається слідкування за процесом та аналізуються отримані дані. Остаточна структура запропонованої системи матиме вигляд, зображений на рис. 1.

Адаптивний контур складається з двох основних частин: модуля ідентифікації та власне модуля адаптації. Модуль ідентифікації відповідає за визначення параметрів моделі об'єкта, структура якої апріорі відома. Його робота розпочинається, якщо є необхідність дослідження динаміки об'єкта у поточному режимі роботи обладнання.

Така необхідність виникає при вводі об'єкта в експлуатацію, після модернізації чи ремонту, або під час тривалої експлуатації, яка може вплинути на динамічні характеристики системи. Оцінивши необхідність налаштування регулятора (початок експлуатації об'єкта чи погіршення показників якості роботи САР), запускається процедура ідентифікації.

Для цього, використовуючи блок «селектор» тимчасово вимикається зворотний зв'язок, а на об'єкт подається збурення  $\Delta u(t)$  зі сторони регулюючого органу. Після подання тестового сигналу на об'єкт керування аналізується крива відгуку. За умови можливості опису поведінки системи інерційною ланкою із запізненням, для ідентифікації варто використати метод аналізу початкової ділянки перехідного процесу [19]. Його перевагою є швидкий у порівнянні з апостеріорними методами результат, адже немає необхідності очікувати закінчення перехідного процесу. Параметри моделі визначаються за ключовими точками, пов'язаними з початком реакції об'єкта на збурення та досягненням першої похідної технологічної змінної  $y(t)$  свого максимуму. Отримані у результаті параметри моделі проходять процедуру верифікації, щоб уникнути можливості встановлення недопустимих значень у регулятор. Верифікація полягає у перевірці знаходження результатів у коридорі допустимих меж для кожного параметру. Коридори визначаються технологіями та спеціалістами з автоматизації з урахуванням апріорних відомостей про об'єкт керування. Підтверджені параметри моделі

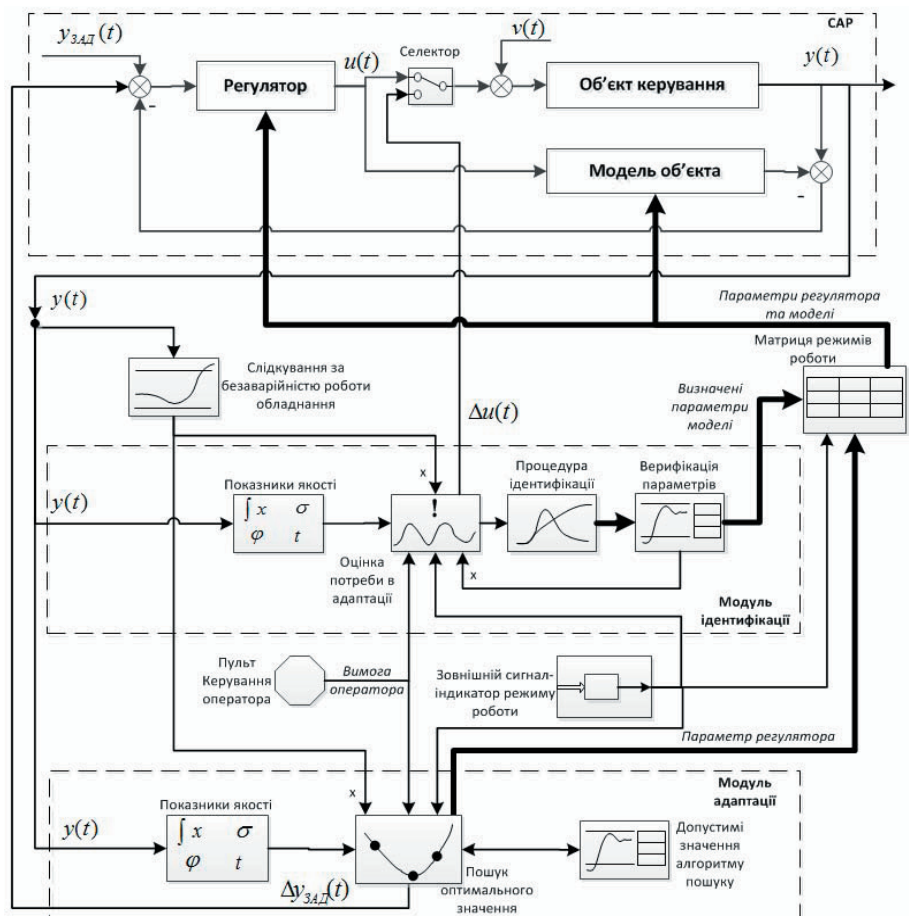


Рис. 1. Структурна схема адаптивної САР



заносяться в матрицю режимів об'єкта, що являє собою таблицю динамічних характеристик об'єкта відповідно до поточного режиму роботи. По результатам оцінювання формуються параметри для блоків «Регулятор» та «Модель об'єкта керування» залежно від поточного режиму роботи. Разом з цим визначається початкове значення сталої фільтру регулятора.

Після виконання ідентифікації контур керування замикається блоком «селектор» і починається другий етап налаштувань. Він полягає у пошуку оптимального за заданим показником якості значення сталої фільтру, яке забезпечить нечутливість САР до похибок ідентифікації, забезпечивши при цьому виконання вимог до якості керування. Це ітераційна процедура оптимального параметричного синтезу, що виконується у замкненій системі шляхом аналізу перехідних процесів при зміні завдання на величину  $\Delta u_{зад}(t)$ . Значення  $\Delta u_{зад}(t)$  повинне бути допустимим регламентом технологічного процесу. Однопараметричний синтез сприяє швидкому завершенню пошуку оптимального значення.

Адаптація у повному обсязі повторюється для всіх допустимих режимів роботи. Надалі по сформованій матриці режимів автоматично реалізується корекція параметрів налаштувань без необхідності повтору повного алгоритму налаштування.

Для уникнення аварійної ситуації, пов'язаної з тимчасовою втратою контролю над об'єктом через розірвання зворотного зв'язку, до складу системи включено спеціальний блок, який слідкує за поточним значенням технологічної змінної. При виході змінної за допустимі межі адаптація припиняється, а параметри регулятора встановлюються рівними останнім коректним.

Адаптація може проводитися і на вимогу оператора, якщо його кваліфікація дозволяє прийняти відповідне рішення.

Таким чином, у результаті адаптації синтезується оптимальна для кожного режиму роботи об'єкта система автоматичного керування.

Розглянемо роботу адаптивної системи на прикладі індивідуального регулятора подачі палива [20]. На регулятор надходять наступні сигнали: температура аеросуміші перед пальником, що характеризує пилопродуктивність аероживильників пилу (АЖП); завдання від загального регулятора палива.

Відомо, що система пилоподачі котла в умовах експлуатації підлягає дії багатьох керуючих і збурюючих впливів, до яких можна віднести зміни подачі палива і первинного повітря, якість палива, режим роботи системи пилоприготування, характер витікання пилу з бункера та ін. Ці збурення, які мають випадковий характер, впливають на рівномірність розподілу палива по пальниках і стабілізацію пилоподачі в часі, що приводить до зміни експлуатаційних показників котла, тобто впливає на надійність та економічність його роботи. Сигнал по температурі аеросуміші пилу з первинним повітрям може бути використаний в САР стабілізації подачі палива на пальники котла як регульована величина, що побічно характеризує витрату палива в пилопроводі. Дослідження динамічних властивостей сигналу по температурі аеросуміші в характерній точці виміру термпарою з захисним чохлам, проведені при різних по величині й знаку збуреннях

витратою палива, показали, що запізнювання сигналу по температурі  $\tau_{зап}=2с$ , а стала часу  $T_{Об}=22с$ . Оскільки переміщення регулюючого органа не є стрибкоподібним і займає близько 10 с, то запізнювання сигналу, що з'являється, впливає на динамічні властивості об'єкта керування і якість автоматичного регулювання подачі палива. У [21] наведено дані, що доводять зміну параметрів об'єкта залежно від поточного режиму роботи котлоагрегату, тобто необхідність у адаптивній системі керування.

Отримати динамічні характеристики аеросуміші експериментальним шляхом можна, нанісши збурення витратою палива при тимчасово відключеному зворотному зв'язку. Оброблені під час ідентифікації дані формують значення для відповідних елементів регулятора та моделі об'єкта. Одночасно з цим розраховується параметр робастності, що входить до складу фільтру регулятора. Контур автоматичного керування замикається та проводиться остаточне налаштування за інтегральним квадратичним показником якості.

Графіки перехідних процесів у контурі керування при зміні завдання та збуренню зі сторони витрати палива зображені на рис. 2. Графіки наведені для випадку моделювання передавальних функцій системи при одиничному збуренні за завдання та збуренні величиною 0,95% зі сторони регулюючого органу (на 100-й секунді графіку) у відхиленнях від сталого стану. Для порівняння наведені графіки системи з ПІ-регулятором, оптимально налаштованим на мінімум інтегрального квадратичного показника якості.

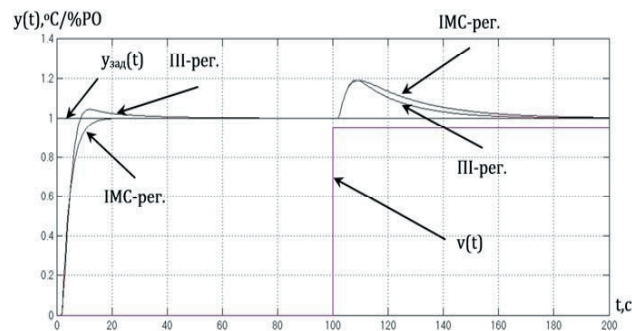


Рис. 2. Графіки перехідних процесів у системах з ІМС- та ПІ-регуляторами

Перевагами системи з ІМС-регулятором у порівнянні зі типовим ПІД-регулятором є використання методу керування на основі моделі об'єкту, можливість впливати на грубість системи окремим параметром налаштувань, підвищена швидкодія при майже повній відсутності перерегулювання, зменшення інтегрального показника якості до 20%, полегшена процедура автоналаштування. Така система пропонується для використання в об'єктах, де висувуються жорсткі вимоги до мінімізації перерегулювання та швидкості відпрацювання збурень і завдань. Додавши до контуру адаптації механізм збереження параметрів моделі та регулятора як функцію від поточного режиму роботи котлоагрегату, через певний час роботи системи можна уникати розімкнення контуру керування для ідентифікації. Дані про необхідні налаштування будуть братися з матриці режимів, забезпечуючи адаптацію регулятора у замкненій системі керування.

---

**Висновки**


---

Теплоенергетичні об'єкти мають ряд властивостей, що утруднює оптимальне налаштування контурів автоматичного керування. Перспективним способом вирішення цієї задачі є використання адаптивних систем керування, що можуть самостійно налаштуватися на поточний стан об'єкта керування, забезпечуючи необхідну якість регулювання технологічних параметрів. У роботі наведені приклади існуючих систем з можливістю автоматичного налаштування, визначені основні підходи до синтезу адаптивних керуючих елементів, вказані труднощі їх реалізації.

Для вирішення проблеми ефективного керування об'єктами енергетичної галузі запропонована адап-

тивна САР з використанням моделі об'єкта у складі регулятора. Система може працювати у автоматичному режимі, та значно полегшує процес налаштування для оптимальної роботи.

Дослідження на прикладі контуру стабілізації температури аеросуміші перед пальником пилувугільного котлоагрегата доводять перспективність даної системи. Перехідні процеси налаштованого контуру характеризуються мінімальним перерегулюванням та високою швидкодією, що є важливим для даної ділянки. Результати синтезу системи можуть бути екстрапольовані на інші об'єкти в межах даного класу устаткування за умови можливості проведення активних експериментів для визначення характеристики моделей об'єктів керування.

---

**Література**

1. Чертков Н.Н. Вопросы применения адаптивных САУ в энергетике [Текст] / Н.Н. Чертков // Теплоэнергетика. – 1969. - №7.
2. Дуэль М.А. Автоматизированные системы управления энергоблоками с использованием средств вычислительной техники [Текст] / М.А. Дуэль - М.: Энергоиздат, 1983. – 208 с.
3. Ротач В.Я. Теория автоматического управления: соответствуют ли её основные положения действительности? [Текст] / В.Я. Ротач // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2007. - №3. - С. 1-5.
4. Digital self-tuning controllers [Текст] / [ Vladimir Bobal, Josef Bohm, Jaromir Fessl and Jiri Machacek]. - London : Springer-Verlag, 2005. - 317 pp.
5. Astrom K. J. PID Controllers: Theory, Design and Tuning, 2nd Edition [Текст] / K. J. Astrom, T. Hagglund. - Research Triangle Park, North Carolina: Instrument Society of America, 1995. - 343 pp.
6. Landau I. D. Adaptive Control – the Model Reference Approach [Текст] / I. D. Landau. – New York: Marsel Dekker, 1979.
7. Ioannou P. A. Robust Adaptive Control [Текст] / P. A. Ioannou. - Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice Hall, 1995. – 834 pp.
8. Kraus T. W. Self-tuning PID controller uses pattern recognition approach [Текст] / T. W. Kraus, T. J. Myron // Control Engineering. - 1984. - vol. June. - pp. 106-111.
9. Leva, A. Hands-on PID autotuning: a guide to better utilization [Електронний ресурс] / Leva, A., Cox C., Ruano A. - IFAC Professional Brief. – Режим доступа \www/ URL: <http://www.ifac-control.org/publications/list-of-professional-briefs> – 21.03.2012 р. - Загол. з екрана.
10. Денисенко В.В. Компьютерное управление технологическим процессом, экспериментом, оборудованием [Текст] / В.В. Денисенко – М.: Горячая линия - Телеком, 2008. – 608 с.
11. Cheng G. S. MFA in Control with CyboCon. CyboSoft [Текст] / Cheng G. S. - General Cybernation Group Inc., Rancho Cordova, CA, 2000. - 200 pp.
12. Кузицин В. Ф. Автоматическая настройка регулятора ТРМ101 [Текст] / В. Ф. Кузицин // Автоматизация и производство. - 2003. - №2. - с.
13. Настройка и адаптация автоматических регуляторов. Инструментальный комплект программ [Текст] / Ш. Е. Штейнберг, Л. П. Серезин, И. Г. Варламов, И. Е. Залуцкий // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2003. - №10. – с.
14. Серезин Л. П. АСУ для промышленных предприятий [Текст] / Л. П. Серезин, И. Г. Варламов, Б. В. Филимонов // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2004. - №9. – с.
15. Ротач В. Я. Автоматизация настройки систем управления [Текст] / Ротач В. Я., Кузицин В. Ф., Клюев А. С.М. - М. : Энергоиздат, 1984. - 271 с.
16. Eduardo F. Camacho. Model predictive control [Текст] / Eduardo F. Camacho, Carlos Bordons. – London: Springer, 1999. – 280 p.
17. 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.
18. Daniel E. Rivera. Internal Model Control: A Comprehensive View [Текст] / Daniel E. Rivera – Department of Chemical, Bio and Materials Engineering College of Engineering and Applied Sciences Arizona State University, Tempe, Arizona, 1999. - 20 pp.
19. Мовчан А.П. Идентификация объектов управления в адаптивных системах управления [Текст] / Мовчан А.П., Мысак В.Ф., Степанец А.В. // - Сучасні наукові дослідження –2006: матеріали II міжнародної науково-практичної конференції. - Д.: Наука і освіта, 2006. – С. 60-63
20. Свириденко В.П. Опыт модернизации схемы регулятора тепловой нагрузки котла ТПП-210А при работе на угольной пыли [Текст] / В.П. Свириденко, А.Б. Попутников // Энергетика и Электрификация – 2001.
21. Ковриго Ю.М. Система регулювання тепловим навантаженням котла ТПП-210А з використанням регулятора з внутрішньою моделлю [Текст] / Ковриго Ю.М., Фоменко Б.В., Степанец О.В. // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. - 2010. -№3/10(45). – С.4-7.