

# Питання управління в складних системах

УДК 681.515: 519.7

І.Г. Гуліна, А.А. Мартиненко, О.О. Гулін

*Державний вищий навчальний заклад «Національний гірничий університет», Дніпро*

## ПРИНЦИПИ ПОБУДОВИ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ ТЕПЛОВИМ СТАНОМ ДОМЕННОЇ ПЕЧІ

Виконано аналіз принципів побудови систем автоматичного керування тепловим станом доменної печі, виходячи з особливостей доменного процесу як об'єкта керування. Розглянуто методи робастного, адаптивного, оптимального, синергетичного та нейромережевого керування. Обґрунтовано, що підвищення якості керування досягається шляхом створення безошукової системи непрямого адаптивного керування з ідентифікацією за допомогою навчання нейромережевих прогнозуючих моделей.

**Ключові слова:** система керування, оптимальний регулятор, адаптація, ідентифікація, нейронна мережа, тепловий стан, доменна піч.

### Вступ

Доменне виробництво займає значну частину в структурі споживання ресурсів металургійними підприємствами, тому актуальним є проведення досліджень з метою зниження витрат на виробництво чавуну шляхом підвищення якості систем автоматичного керування (САК) ним.

З позицій керування доменний процес (ДПР) є складним об'єктом керування (ОК), що має нелінійні залежності, нестационарні параметри, залежні (багатозв'язкові) змінні, високий рівень перешкод, а також значну інерційність і час запізнювання [1].

Найбільш актуальним є вдосконалення САК тепловим станом (ТС) доменної печі (ДП), оскільки ця система створює умови, при яких спостерігається раціональне співвідношення процесів прямого і непрямого відновлення заліза, що дозволяє досягти економічності ДПР.

**Постановка задачі.** Використання математичних моделей не тільки на стадії проектування, але і в процесі функціонування систем, дозволяє реалізувати керування складними технологічними процесами, оскільки проблема реалізації адаптивних регуляторів такими ОК визначається принципом внутрішньої моделі [2].

Необхідність переходу до синтезу управління в процесі функціонування систем обумовлена відсутністю інформації, достатньої для прийняття рішень у всіх ситуаціях, які виникають при експлуатації ДП. Крім того, мають місце обмеження не тільки по відношенню до апріорної і поточної інформації, але і по відношенню до статистичних характеристик різних шумів, збурень і параметрів. Експеримента-

льне ж визначення багатомірних законів розподілу ймовірностей потребують абсолютно неприпустимих витрат.

Нехай динаміка ОК описується нелінійним рівнянням:

$$x[k+1] = F\{x[k], u[k], w[k], \xi[k], a[k], k\},$$

де  $F$  – узагальнена функція (алгоритм) перетворення;  $x[k]$ ,  $u[k]$ ,  $w[k]$ ,  $\xi[k]$ ,  $a[k]$  – вектори (матриці) стану процесу, його управління, обурення, шумів і параметрів до поточного часу  $k$ .

Керуючі впливи формуються на основі спостережень змінних, які описують ОК, а стратегія керування базується на апріорній інформації про характеристики ОК і на передісторії зміни вхідних і вихідних змінних.

**Мета статті.** Обґрунтування принципів побудови систем і методів синтезу, що забезпечують підвищення якості керування ТС ДП.

### Обґрунтування принципів керування

Коли властивості ОК недостатньо відомі, то застосовуються методи синтезу робастних регуляторів [2], які забезпечують малу зміну виходу замкнутої САК при малій зміні параметрів ОК.

Однак, в процесі функціонування робастної системи для керування не використовується інформація про невизначеності в системі. Це призводить до того, що такі системи консервативні, а їх недоліками є велика тривалість перехідних процесів і великі допустимі значення вихідної координати при дії перешкод.

Подібно робастній, адаптивна САК також будується для ОК, інформація про які або про впливи

на які недостатньо відомі. При цьому властивість адаптації досягається за допомогою формування в явному або неявному вигляді математичної моделі об'єкта або вхідного впливу.

Завдання синтезу адаптивної САК формулюється як задача пошуку керуючого вектору  $u[k]$  у вигляді функції координат стану  $x[k]$ , збурень і перешкод, який забезпечує асимптотичний перехід ОК з довільного початкового стану в бажане кінцеве із заданими динамічними характеристиками руху. При цьому параметри  $a[k]$  можуть невизначеним чином змінюватися в деякому обмеженому діапазоні [2, 3].

Таким чином, основна особливість адаптивних систем керування - можливість отримання інформації в процесі функціонування і використання її для керування. За рахунок цього адаптивне керування забезпечує більш високу якість керування при наявності перешкод.

Головним завданням при створенні САК є синтез автоматичних регуляторів, які могли б гарантувати асимптотичну стійкість замкнутих систем і задовольнити певній сукупності вимог до властивостей САК.

Це завдання синтезу регулятора, найкращого в певному сенсі, яке вирішується за допомогою теорії аналітичного конструювання оптимальних регуляторів (АКОР) Лєтова-Калмана [2].

Синтез оптимальних регуляторів базується на концепції Ляпунова обуреного руху і визначається як природою ОК, так і видом критерію оптимальності.

Структура адаптивної оптимальної (АО) САК (рис. 1) визначається принципом поділу (теореомою стохастичної апроксимації) [3], згідно з яким така система складається з підсистеми оцінювання та ідентифікації, а також підсистеми оптимального керування, побудованої для умов точного вимірювання вектору стану і вектору параметрів, але використовує оцінки цих величин (вихідні сигнали підсистеми оцінювання та ідентифікації).

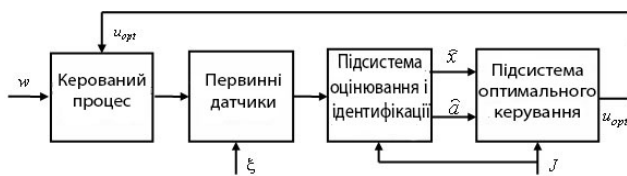


Рис. 1. Загальна структура АО САК

Керований процес в умовах збурень  $w$  спостерігається за допомогою первинних датчиків з помилками вимірювань  $\xi$ . Вектор сигналів спостереження надходить в підсистему оцінювання та ідентифікації, на виході якої формується оцінка вектору стану  $x$  і оцінка вектору параметрів  $\hat{a}$  математичної моделі керованого процесу. Підсистема оптимального керування на основі моделі керованого процесу,

поточної оцінки вектору стану і критерію оптимізації  $J$  формує оптимальне керування  $u_{opt}$ , яке впливає на процес керування.

При класичній реалізації такі дуальні системи являють собою поєднання фільтра Калмана-Бьюсі та оптимального регулятора.

Однак, в теорії АКОР що безпосередньо не розглядає загальноприйняті в інженерній практиці прямі показники якості синтезованих систем, а невирішена задача проектування регуляторів за заданими показниками якості була замінена іншим, побічно з ним пов'язаним [4].

Синтез оптимального керування по АКОР зводиться до вирішення рівняння Беллмана (Гамільтона-Якобі-Беллмана [2]), що для багатовимірних нелінійних ОК зустрічає нерозв'язні труднощі, пов'язані з дуже високою розмірністю при чисельному рішенні таких рівнянь (аналітичні методи рішень таких рівнянь не розроблені).

Розвитком теорії АКОР є принцип мінімуму узагальненої роботи, розроблений академіком А.А. Красовським, згідно з яким оптимізація керування здійснюється за функціоналом узагальненої роботи (ФУР) [2].

Перевага методу АКОР по ФУР полягає в тому, що його функціональне рівняння, на відміну від АКОР Лєтова-Калмана, являє собою лінійне диференціальне рівняння в окремих похідних, яке має більш прості рішення.

САК, що реалізують даний метод отримали назву універсальних - в них використовуються адаптивні оптимальні алгоритми, засновані на автоматичній ідентифікації за допомогою адаптивної прогнозуючої моделі [3].

Разом з тим, недоліком цього методу є те, що синтез управління для багатозв'язних ОК є дуже громіздким.

Для таких ОК більш ефективним вважається синергетичний підхід, який дозволяє синтезувати єдину САК з ієрархічним структуруванням локальних систем (підсистем) [4].

Для застосування синергетичного підходу в САК зовнішні впливи подають у вигляді інформаційних моделей, які об'єднують (агрегують) в структуру розширеної системи. Тоді проблема керування формується як задача пошуку законів взаємодії в розширеній системі, де виникають процеси самоорганізації, тобто виникає кінцеве число аттракторів (принцип розширення-стиснення фазового простору [4]).

Такий метод синтезу керування отримав назву аналітичного конструювання агрегованих регуляторів (АКАР) [4]. Він забезпечує асимптотичну стійкість системи без пошуку рішень нелінійних динамічних рівнянь ОК. При цьому функціонал, що оптимізується є оцінкою якості перехідних процесів.

При використанні методу АКАР нелінійна динаміка ОК в просторі станів апроксимується лінійною динамікою в просторі макрозмінних (аттрактора, бажаного режиму роботи). А завдання підбору макрозмінної зводиться до задачі синтезу стійкої однорідної системи диференціальних рівнянь.

У методі АКАР синтез наступного рівня (нижнього, підлеглого) здійснюють з урахуванням вже синтезованої за своїм критерієм підсистеми попереднього (верхнього) рівня.

Недоліками методів АКАР і АКОР є вимога точного знання ОК, що вимагає дуже великих витрат на експериментальні дослідження по визначенню функцій розподілу, апріорних і апостеріорних ймовірностей змінних ДПП.

Крім того, ці методи відносно складні в реалізації, орієнтовані на використання на етапі проектування САК і при наявності значних запізнь в ОК виникають проблеми стійкості замкнутих систем.

«Класичні» САК побудовані на аналітичному описі ОК в просторі ознак. На практиці ж типовими є погано формалізовані ОК з маловідомими або змінними властивостями, для яких цей підхід не ефективний.

«Некласичний» підхід в теорії керування використовує штучні чіткі і нечіткі нейронні мережі (НМ), що дозволяє керувати нелінійними ОК шляхом створення адаптивних САК з нейрорегулятором (НР), що навчається [5].

До переваг використання НР відносяться їх високу ефективність для керування нелінійними нестационарними ОК в промисловості, де накопичені великі бази даних, а також для керування багатовимірними і багатозв'язними ОК з обуреним середовищем функціонування. При цьому НР мають універсальні апроксимуючі властивості та здатність до навчання [6]. Використання НМ дозволяє вирішувати задачу керування нелінійними ОК шляхом створення адаптивної САК з НР, що навчається, і еталонною моделлю (рис. 2) [7].



Рис. 2. Нейромережна система керування з еталонною моделлю

Необхідною умовою функціонування САК з еталонною моделлю є правильний вибір навчальних вхідних впливів  $q[k]$ , оскільки від їх типу залежить точність налаштування основного контуру системи на еталонну модель.

Таким чином, головні проблеми (і недоліки) при створенні систем з НР - це обґрунтування змісту і обсягу інформації для навчання, а також вибір структури регулятора і умов існування стійких рішень для класу нелінійних ОК і необхідних цілей керування.

Адаптивні САК засновані на поєднанні оцінювання стану (спостереження) і параметрів моделі (ідентифікації) ОК з синтезом керування на основі прогнозуючих моделей, які відтворюють вільний рух ОК. На відміну від систем дуального керування, в адаптивних САК виконання цих процедур та організація їх взаємодії є не формалізованими і допускає використання безлічі методів реалізації. При організації процесу адаптації використовуються методи [3]:

- пошукові, що здійснюють ітеративний рух до досягнення необхідної якості керування;
- безпошукові, які використовують достатні умови необхідної якості керування (точність).

Наявність пробних рухів є основним недоліком пошукової адаптації, оскільки вони не завжди допустимі за умовами функціонування ДП.

У безпошукових системах ідентифікація з адаптивною моделлю виходить за рахунок виміру вхідних і вихідних впливів.

Безпошукові адаптивні системи (БАС) будуються за схемою прямого або непрямого адаптивного керування. У разі прямого керування вимірюються показники моделі і системи (тимчасові, частотні), та на підставі їх неузгодженості перебудовуються коефіцієнти регулятора для зниження до допустимій величині [2]. Їхнім недоліком є вимога до визначення і обґрунтування еталонних характеристик ОК, прямо не пов'язаних з ефективністю САК.

У системах непрямого адаптивного керування попередньо проводиться ідентифікація ОК, на основі чого обчислюються коефіцієнти регулятора.

У БАС з еталонною моделлю за помилку контурів самоналаштування приймається помилка між рухом ОК і виходом моделі  $e[k]$ .

Моделю може налаштовуватися під динамічні характеристики ОК або всього основного контуру, а отримані параметри моделі далі використовуються для перебудови регулятора основного контуру. Це БАС з ідентифікацією за допомогою моделі що налаштовується (рис. 3).

У БАС з власне еталонною моделлю (в якій налаштовуються параметри основного контуру під параметри еталонної моделі) є значні недоліки, що зумовлені не тільки вимогам апріорної розробки еталонної моделі, а й труднощами забезпечення стійкості замкнутого основного контуру (рис. 2).

В БАС з ідентифікацією за допомогою моделі, що налаштовується, основний контур розімкнений (рис. 3), що обумовлює асимптотичну стійкість цієї САК.

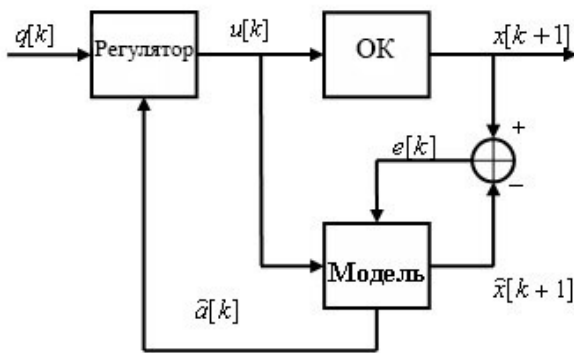


Рис. 3. Структура системи непрямого адаптивного керування з моделлю що налаштовується

В БАС з ідентифікацією в якості моделі доцільно використовувати НМ, які, як зазначалось вище, є універсальними і ефективними апроксиматорами і здатні до навчання (налаштування). При цьому, в якості регулятора цієї БАС можуть використовуватися як самоналагоджувальний, так і стандартні (ПІ, ПІД і ін.) регулятори.

Існування і єдиність вектору налаштувань регуляторів стосовно довільно допустимому вектору параметрів ОК відповідає властивості адаптованості основного контуру.

Повна адаптованість основного контуру забезпечує абсолютну параметричну інваріантність і служить структурною характеристикою адаптивного регулятора, що виражає граничні можливості компенсації впливу параметричних збурень на динамічні характеристики основного контуру [2].

З огляду на те, що кожен фізичний об'єкт з нелінійною динамікою по-своєму унікальний, то і рішення задачі адаптивного керування також є унікальним і обмежено класом доступних моделей ОК.

## Висновки

Від якості керування, що забезпечується адаптивними локальними САК, залежить досягнення

всієї ефективності роботи ДП. Тому адаптивні САК повинні будуватися як оптимальні в сенсі якості керування, що виражається в точності відтворення впливів, що задаються.

Підвищення якості керування ТС ДП досягається шляхом створення безпошукових систем непрямого адаптивного керування з ідентифікацією ОК за рахунок навчання нейромережевих прогножуючих моделей.

Подальші дослідження повинні бути направлені на розробку нейромережевих моделей ТС ДП.

## Список літератури

1. Каганов В.Ю. Автоматизация управления металлургическими процессами / В.Ю. Каганов, О.М. Блинов, А.М. Бельский. – М.: Металлургия, 1974. – 416 с.
2. Справочник по теории автоматического управления / Под ред. А.А. Красовского. – М.: Наука, 1987. – 712 с.
3. Буков В.Н. Адаптивные прогнозирующие системы управления полетом / В.Н. Буков. – М.: Наука, 1987. – 232 с.
4. Современная прикладная теория управления: Синергетический подход в теории управления / Под ред. А.А. Колесникова. – Таганрог : Изд-во ТРТУ, 2000. – Ч. II. – 559 с.
5. Терехов В.А. Нейросетевые системы управления. Кн. 8. Учебное пособие для вузов / В.А. Терехов, Д.В. Ефимов, И.Ю. Тюкин. Общ. редакция А.И. Галушкина. – М.: ИПРЖР, 2002. – 480 с.
6. Круглов В.В. Нечеткая логика и искусственные нейронные сети / В.В. Круглов, М.И. Дли, Р.Ю. Голунов. – М.: Солон, 1996. – 348 с.
7. Махотило К.В. Применение искусственных нейронных сетей для решения задач управления [Электронный ресурс] / К.В. Махотило – 11 с. – Режим доступа до ресурсу : <http://www.users.kpi.kharkov.ua/mahotilo>.

Надійшла до редколегії 25.10.2016

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. М.О. Алексеев, Державний вищий навчальний заклад «Національний гірничий університет», Дніпро.

## ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ТЕПЛОМ СОСТОЯНИЕМ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ

И.Г. Гулина, А.А. Мартыненко, А.А. Гулин

Выполнен анализ принципов построения систем автоматического управления тепловым состоянием доменной печи, исходя из особенностей доменного процесса как объекта управления. Рассмотрены методы робастного, адаптивного, оптимального, синергетического и нейросетевого управления. Обосновано, что повышение качества управления достигается путем создания беспоишковой системы непрямого адаптивного управления с идентификацией посредством обучения нейросетевых прогнозирующих моделей.

**Ключевые слова:** система управления, оптимальный регулятор, адаптация, идентификация, нейронная сеть, тепловое состояние, доменная печь.

## CONSTRUCTION PRINCIPLES OF CONTROL SYSTEMS FOR THERMAL STATE OF BLAST FURNACE

I.G. Gulina, A.A. Martynenko, A.A. Gulin

It is carried out the analysis of construction principles of automatic control systems for thermal state of blast-furnace on the basis of the features of the blast-furnace process as the control object. It were examined the methods of robust, adaptive, optimal, synergetic and neuronet control. It is grounded that the upgrading of control is achieved by making of searchless system of indirect adaptive control with identification by means of neuronet predicting models learning.

**Keywords:** control system, optimal control, adaptation, identification, neuronet, thermal state, blast furnace.