

ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ, СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ ТА КЕРУВАННЯ

DOI: 10.20535/kpi-sn.2019.3.176055

УДК 681.516.75

Ю.М. Ковриго, П.В. Новіков*

КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна

*corresponding author: p.novikov@kpi.ua

АЛГОРИТМ РОБОТИ ДВОКАНАЛЬНОГО НЕЧІТКОГО КОНТРОЛЕРА ДЛЯ КЕРУВАННЯ ТЕПЛОЕНЕРГЕТИЧНИМИ ОБ'ЄКТАМИ

Проблематика. Аналізуються причини низької якості функціонування систем автоматизації складних теплоенергетичних об'єктів керування, що працюють у маневрових режимах. Особливістю котлоагрегату як об'єкта керування є обмеженість проведення на ньому експериментальних досліджень для ідентифікації. Неповнота математичного опису не дає змоги повною мірою формалізувати об'єкт для надійного проектування систем автоматизації. Температурним контурам регулювання прямоточного котлоагрегату властиві велика акумулююча здатність, часові затримки, нелінійність динамічних характеристик, взаємний вплив контурів регулювання, що робить актуальною розробку нових законів керування для підвищення ефективності функціонування існуючих систем автоматичного керування.

Мета дослідження. Метою дослідження є отримання алгоритму роботи системи автоматизації, який нечутливий до невизначеності параметрів об'єкта, враховує наявність запізнення в часі по каналах керування і збурення та гарантує при цьому задану якість регулювання у перехідних режимах.

Методика реалізації. Розглядаються особливості динамічних характеристик багатомісних об'єктів із часовими затримками. Описується новий підхід до синтезу нечітких систем регулювання, що дає змогу врахувати несприятливі властивості теплоенергетичних об'єктів керування, ґрунтуючись на досвіді експлуатації таких установок. Проведено комп'ютерне моделювання синтезованої системи керування.

Результати дослідження. Комп'ютерне моделювання підтверджує справедливість і можливість практичної реалізації запропонованого алгоритму керування. Двоканальна структура fuzzy-контролера дає можливість органічно реалізувати спосіб керування, близький до оптимального при ручному керуванні досвідченим оператором-технологом.

Висновки. Завдяки наявності двох паралельних каналів розмежовуються задачі забезпечення заданих показників якості функціонування системи керування та її запасу стійкості. Описана структура двоканального fuzzy-контролера може використовуватися для мінімізації динамічної похибки на початковій стадії перехідного процесу і зниження коливальності на завершальній стадії.

Ключові слова: нечітка логіка; нестационарність; затримка; транспортне запізнення; запас стійкості; система керування.

Вступ

Сучасний енергетичний блок теплової електростанції є дуже складним комплексом агрегатів і механізмів, які працюють узгоджено між собою. Одним із найважливіших технологічних параметрів, який визначає надійність та економічність роботи парової турбіни й енергоблоку в цілому, є температура первинної ("гострої") пари на виході з котла. Найбільш простим способом точного регулювання є підтримання температури пари за допомогою пароохолоджувачів. Для прямоточних котлоагрегатів регулювання первинного перегріву ускладнюється через взаємний вплив змін витрати води і подачі палива. Це призводить до того, що до 5 % від загальної кількості пари, яка виробляється, припадає на впорскування в пароохолоджувачах [1].

Особливо велике навантаження на систему регулювання первинного перегріву припадає при зміні електричного навантаження енергоблоку (маневрові режими).

Причиною великої витрати води на впорскування є незадовільна якість функціонування системи регулювання температурного режиму котла, яка підтримує задану температуру до першого впорскування. Це своєю чергою зумовлено особливостями цієї ділянки, якій притаманні великі акумулюючі властивості, часові затримки, нелінійність динамічних характеристик, взаємний вплив контурів регулювання [2]. Основні вимоги, що висувуються до системи регулювання температурного режиму котла: динамічне відхилення не більше $\pm 14^\circ\text{C}$, коефіцієнт затухання $\psi = 1$, кількість включень виконавчого механізму (ВМ) – не більше 6 разів за хвилину [3].

Досвід налагоджувальних і експериментальних робіт, проведених низкою організацій як у нашій країні, так і за кордоном, виявив низку принципових проблем, що знижують ефективність використання найбільш поширених промислових регуляторів, зокрема ПІ- та ПІД-регуляторів [4]. Загальноживаною є практика, коли оператори ТЕС вимушені переходити на ручний режим керування, щоб уникнути великих динамічних викидів і тривалих низькочастотних коливань технологічних параметрів котлоагрегату. Тому розробка нових алгоритмів керування, що забезпечують необхідну якість регулювання і одночасно зберігають стійкість в умовах суттєвих змін динамічних характеристик об'єкта керування, є актуальною науковою проблемою.

Постановка задачі

Метою дослідження є розробка алгоритму роботи системи автоматизації, що нечутливий до невизначеності параметрів об'єкта, враховує наявність запізнення в часі по каналах керування і збурення та гарантує при цьому задану якість регулювання у перехідних режимах роботи.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі задачі:

- провести порівняльний аналіз керування інерційними контурами водопарового тракту котлоагрегату в ручному режимі оператором-технологом з алгоритмом роботи класичного fuzzy-регулятора;
- розробити структуру контролера, що дає змогу реалізувати алгоритм керування, подібний до керування об'єктом оператором-технологом у ручному режимі;
- на основі експертних знань про динаміку об'єкта керування розробити базу правил нечіткого контролера.

Аналіз причин низької якості функціонування інерційних контурів регулювання теплоенергетичних об'єктів

Теплоенергетичні об'єкти можна виділити в окремий клас об'єктів регулювання, які за своїми динамічними характеристиками відрізняються від об'єктів інших галузей промисловості. Характерною особливістю динамічних властивостей теплоенергетичних об'єктів є те, що відразу після дії збурення не відбувається помітної зміни параметра. Якщо у простих одноємних

об'єктів початкова швидкість зміни параметра є максимальною, то у складних багатоемних швидкість відхилення параметра після дії збурення починає повільно зростати від нульової і досягає максимуму лише через достатньо великий проміжок часу. Для температури в проміжній точці прямооточного котлоагрегату цей час може становити 210–240 с [4]. Ця обставина суттєво впливає на поведінку системи автоматичного регулювання в початковій фазі перехідного процесу.

Крім того, для цілої низки теплоенергетичних об'єктів, особливо температурних, характерна наявність часових затримок, коли вихідний параметр взагалі не проявляє ніякої реакції на вхідне збурення протягом тривалого проміжку часу. Наявність затримки кардинально впливає на динамічні властивості системи регулювання, знижує її стійкість, погіршує якість перехідних процесів, знижує працездатність в умовах змінних навантажень енергоблоку.

Крива розгону багатоемного об'єкта із затримкою при стрибкоподібному збуренні має вигляд, показаний на рис. 1.

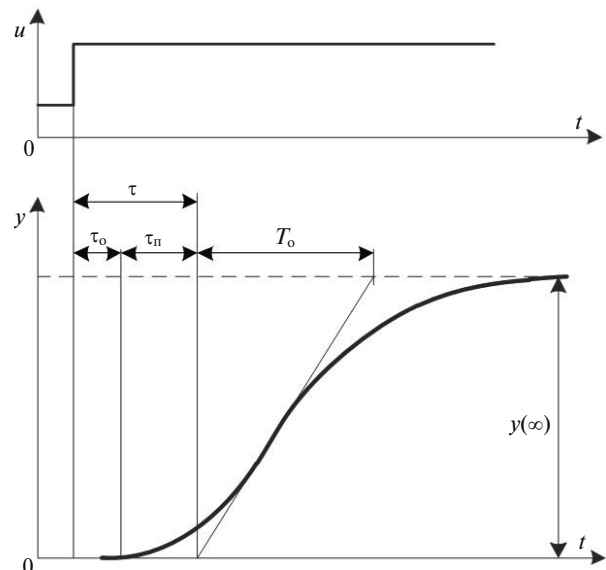


Рис. 1. Крива розгону багатоемного об'єкта з часовою затримкою: u – сигнал керування, y – технологічний параметр, t – час, T_0 – основна стала часу об'єкта, $y(\infty)$ – усталене значення технологічного параметра

На рис. 1 позначено два значення часої затримки – τ_0 і τ_n . Перехідна часова затримка τ_n визначається “розгоном” технологічного параметра, який спочатку змінюється дуже повільно. Це пояснюється наявністю декількох енергетичних ємностей в об'єкті керування, і чим їх більше, тим більшою буде перехідна затримка.

У більшості складних об'єктів зміна параметра може відставати за часом не тільки через наявність перехідної затримки, але й тому, що об'єкт містить чисту транспортну затримку τ_0 . Сума транспортної і перехідної затримок визначає повну затримку об'єкта керування [4]:

$$\tau = \tau_0 + \tau_{\text{п}}.$$

При автоматизації теплових процесів на електростанціях доводиться мати справу, як правило, зі складними об'єктами, що містять багато ємностей, у т.ч. і таких, які розосереджені на порівняно великій довжині (висота котлоагрегату ТПП-210А потужністю 300 МВт становить більше 40 м [5]). Динамічні характеристики таких об'єктів характеризуються не тільки інерційністю і самовирівнюванням, а й наявністю як перехідної, так і транспортної затримки.

Складні об'єкти регулювання описуються диференціальними рівняннями вищих порядків. У найпростішому випадку такий інерційний об'єкт із самовирівнюванням описується послідовно ввімкненими одноємнісними ланками і однією ланкою чистої транспортної затримки [6]:

$$W(s) = \frac{K}{(T_1s + 1)(T_2s + 1)} e^{-\tau s},$$

де T_1, T_2 – сталі часу об'єкта; K – коефіцієнт підсилення, τ – часова затримка.

Динамічні випробування, проведені на різноманітних об'єктах ТЕС із блочними установками, показали, що більшість теплоенергетичних об'єктів регулювання характеризуються значною величиною акумулюючої здатності, наявністю часових затримок і, що особливо важливо, нестабільністю динамічних характеристик в умовах змінних навантажень енергоблоків.

У табл. 1 наведені динамічні характеристики для прямооточного котлоагрегату, що працює в блоці з турбіною К-300-240. Динамічні характеристики отримані експериментально за різних рівнів навантаження енергоблоку [4].

З табл. 1 видно, що динамічні характеристики мають істотну інерційність, що створює проблеми для автоматизації енергоблоку потужністю 300 МВт навіть при роботі на номінальному навантаженні. Переведення енергоблоку згідно з диспетчерським графіком на знижене навантаження (50 або 75 %) збільшує інерційність об'єктів регулювання, що призводить до погіршення якості перехідних процесів. Це пов'язано з тим, що при зміні навантаження величина запізнення і сталої часу зростає в 1,5–2 рази [7]. Аналогічним чином збільшується і коефіцієнт підсилення об'єкта, що призводить до

Таблиця 1. Динамічні характеристики прямооточного котлоагрегату за різних навантажень

Параметр	Збурення	Характеристика об'єкта	Розмірність	Навантаження енергоблоку		
				50 %	75 %	100 %
Температура пари за нижньою радіаційною частиною (НРЧ), °С	Паливо	$\tau_{\text{НРЧ}}$	с	20	–	5
		T	с	25	–	40
		$K_{\text{об}}$	$\frac{^{\circ}\text{C}}{\text{т/год}}$	0,5	–	0,22
	Живильна вода	$\tau_{\text{НРЧ}}$	с	20,5	16	10
		T	с	25	75	85
		$K_{\text{об}}$	$\frac{^{\circ}\text{C}}{\text{т/год}}$	0,56	0,42	0,26
Температура пари за верхньою радіаційною частиною (ВРЧ), °С	Паливо	$\tau_{\text{ВРЧ}}$	с	105	–	55
		T	с	565	–	325
		$K_{\text{об}}$	$\frac{^{\circ}\text{C}}{\text{т/год}}$	3,7	–	1,7
	Живильна вода	$\tau_{\text{ВРЧ}}$	с	225	110	85
		T	с	410	310	270
		$K_{\text{об}}$	$\frac{^{\circ}\text{C}}{\text{т/год}}$	4,1	2,1	1,8

зменшення запасу стійкості замкнутої системи керування [8].

Застосування алгоритмів адаптації на неперервних об'єктах також стикається з низкою проблем. Численні алгоритми побудови адаптивних пристроїв для розпізнавання змін в об'єкті та ідентифікації використовують переважно періодичний автоматичний ввід у розімкнутій контур спеціально генеруючих збурень або вивід замкнутого контуру на границю стійкості. За умов експлуатації такі збурення, несанкціоновані технологічним персоналом, зокрема на прямооточному котлоагрегаті, часто недопустимі і призводять до вимкнення адаптуючих пристроїв. Більш детально проблеми впровадження систем адаптації при автоматизації промислових процесів описані в праці [9].

Найбільш поширеною практикою при автоматизації складних промислових об'єктів керування залишається застосування ПІ- та ПІД-регуляторів зі "слабкими" настройками [9]. Це означає, що перехідні процеси в таких системах характеризуються повільною реакцією регулятора на вплив збурення, але в цьому випадку забезпечується великий запас стійкості. Тому використання ПІД-регуляторів є вимушеною і малоефективною мірою, оскільки не можна збільшити швидкодію регулятора і підвищити якість функціонування без одночасних втрат у стійкості системи.

Для автоматизації складних об'єктів повинні застосовуватися регулятори, які формують ефективніший алгоритм регулювання порівняно з простими ПІД-регуляторами. Об'єктивно склалася суперечлива ситуація, коли складний багатомісний об'єкт із несприятливими динамічними характеристиками необхідно автоматизувати завдяки використанню простого, не призначеного для цієї задачі регулятора. Тому проблема автоматизації багатомісних об'єктів теплоенергетики з часовими затримками продовжує залишатися актуальною.

Особливості алгоритму керування інерційними теплоенергетичними об'єктами

Для застосування теорії оптимального керування часто не вистачає інформації про об'єкт керування і надійного математичного його опису. Цим пояснюється той факт, що в особливих режимах деякі складні технологічні процеси керуються вручну досвідченими операторами-технологами, при цьому цілком успішно. Знання про хід процесу, на які спирається досвідчений

оператор-технолог, реалізуються ним у формі правил ЯКЩО-ТО, що мають нечіткий інформаційний зміст [10]. Цей же принцип використаний при автоматизації технологічних процесів на базі систем fuzzy-керування.

Як приклад, що пояснює принцип fuzzy-керування, розглянемо можливу поведінку fuzzy-регулятора з двома вхідними сигналами: за відхиленням параметра і його похідної відносно типового інерційного температурного об'єкта – прямооточного котла. Покажемо, як формується база правил для пропорційно-диференціального fuzzy-регулятора.

Величина відхилення температури пари від заданої уставки лінгвістично може бути сформульована як "різниця температур" і може набувати значення "мала", "середня" і "велика". Природно, з позиції fuzzy-керування, чим більша "різниця температур" у поточний момент, тим більшим повинен бути керуючий вплив.

Другою лінгвістичною змінною ПД-fuzzy-регулятора є "швидкість зміни параметра", якій також дамо лінгвістичні значення "мала", "середня" і "велика". Якщо швидкість зміни температури велика, то, природно, потрібне і відповідне форсоване переміщення регулюючого органа. В міру наближення регульованого параметра до заданої уставки швидкість зміни параметра буде зменшуватися, а величина регулюючого впливу – знижуватися.

Величина регулюючого впливу, таким чином, є вихідною змінною, якій присвоюються такі терми: "дуже мала", "мала", "середня", "велика" і "дуже велика". Зв'язок між входом і виходом fuzzy-системи може бути відображений у табличній формі у вигляді нечітких правил (табл. 2).

Аналізуючи поведінку fuzzy-регулятора на типовому теплоенергетичному об'єкті, що має акумулюючу здатність, інерційність, запізнення, і порівнюючи його з діями досвідченого оператора-технолога при ручному керуванні, можна прослідкувати, що за зовнішньою формальною привабливістю системи з fuzzy-регулятором і ді-

Таблиця 2. Залежність величини регулюючого впливу від різниці температур і швидкості її зміни

Швидкість зміни температури	Різниця температур		
	Мала	Середня	Велика
Мала	Дуже мала	Мала	Середня
Середня	Мала	Середня	Велика
Велика	Середня	Велика	Дуже велика

ями оператора в аналогічній ситуації спостерігається істотна відмінність [7]. Покажемо це на типовому перехідному процесі, характерному для температурного об'єкта прямиоточного котла, наприклад температури пари за верхньою радіаційною частиною. Перехідна характеристика температурного об'єкта при зовнішньому збуренні наведена на рис. 2 [7].

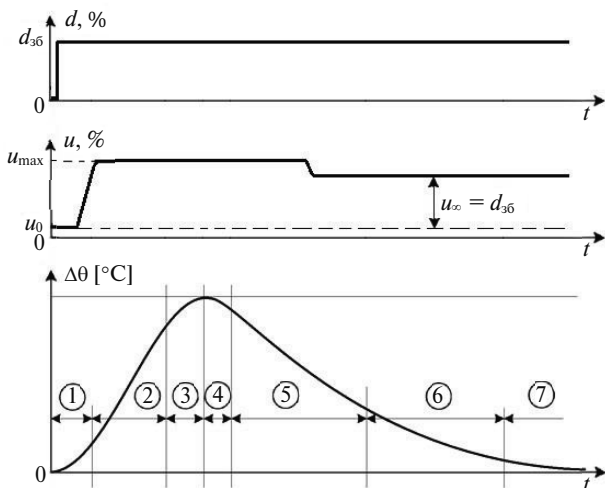


Рис. 2. Бажана перехідна характеристика об'єкта керування при зовнішньому збуренні: d_{36} – величина збурення в еквіваленті переміщення виконавчого механізму (ВМ), u – сигнал керування оператором у ручному режимі, u_0 – початкове положення ВМ, u_{\max} – максимально допустиме положення ВМ, u_{∞} – положення ВМ у кінці перехідного процесу, $\Delta\theta$ – динамічне відхилення технологічного параметра

Розглянемо поведінку fuzzy-регулятора для такого об'єкта в лінгвістичній термінології нечіткої fuzzy-логіки. У початковій фазі (ділянка 1) повільне наростання відхилення параметра ($\Delta\theta$) диктує і відповідну реакцію fuzzy-регулятора (див. табл. 2, “дуже мала”). Потім починається етап швидкого наростання $\Delta\theta$ (ділянка 2), що має викликати відповідну реакцію fuzzy-регулятора щодо прискореного переміщення регулюючого органа в нове положення (по табл. 2, “велика”). Надалі відбувається етап повільного наростання (ділянка 3) за великої різниці $\Delta\theta$ (по табл. 2, “велика-середня”), який потім змінюється етапом повільного зменшення (ділянка 4) за великої різниці $\Delta\theta$ (по табл. 2, “велика-середня”).

На ділянці 5 швидкість зміни температури велика, а відхилення температури $\Delta\theta$ має середнє значення, що відповідає реакції fuzzy-регулятора по табл. 2 як “велика”. На заключному етапі (ділянка 6) при повільному поверненні параметра до свого заданого значення реакція

fuzzy-регулятора характеризується по табл. 2 як “дуже мала”.

Ділянки 3 і 4 відповідають максимуму відхилення параметра, що в термінології нечіткої fuzzy-логіки відповідає “дуже великій” реакції fuzzy-регулятора. На піку відхилення $\Delta\theta$ (max різниця) вектор зміни температури двічі змінює напрямок від повільного наростання (+) до повільного зменшення (–). Судячи з максимуму відхилення ($\Delta\theta_{\max}$), регулюючий вплив має бути спрямований на максимально швидке переміщення регулюючого органа, щоб якнайшвидше ліквідувати відхилення параметра ($\Delta\theta$). У той же час дія оператора-технолога при ручному керуванні на цьому етапі перехідного процесу (див. 3, 4, 5) як раз є прямо протилежною. Оператор “вичікує” певний час, поки з урахуванням інерційності та запізнення “з’явиться” результат форсованого переміщення регулюючого органа, вироблений ним на початковій стадії перехідного процесу (ділянка 2) [7].

Таким чином, не важко помітити, що на інерційному теплоенергетичному об'єкті із запізненням за наявності додатного (від’ємного) відхилення параметра $\Delta\theta$ реакція fuzzy-регулятора, що діє на основі лінгвістичних міркувань (див. табл. 2), переміщає регулюючий орган з більшою або меншою інтенсивністю навіть тоді, коли в цьому немає ніякої необхідності (ділянки 3, 4, 5). Таким чином, дії fuzzy-регулятора вступають у “протириччя” з діями оператора-технолога в аналогічній ситуації.

З наведеного аналізу випливає, що для підвищення ефективності використання fuzzy-регуляторів на інерційному об'єкті із запізненням необхідно алгоритм його керуючої дії організувати відповідно до дій досвідченого оператора-технолога при ручному керуванні. Тобто алгоритм переміщення регулюючого органа повинен включати в себе такі основні фази (див. рис. 2):

- ділянку розгону, тобто “форсованого” переміщення регулюючого органа в початковій фазі перехідного процесу (ділянка 2);
- ділянку інтенсивного “гальмування” переміщення регулюючого органа (ділянки 3, 4, 5), незважаючи на початок швидкої зміни відхилення параметра за великої різниці;
- ділянку корекції (ділянка 6) на заключному етапі перехідного процесу, коли параметр повертається до свого заданого значення, але ще не досяг його.

Усунення зазначеного технічного “протириччя” і підвищення ефективності використання систем fuzzy-керування може бути досягнуто

лише в тому випадку, якщо будуть використані принципово нові логічні підходи формування бази правил. Навіть за наявності великого сигналу неузгодженості необхідно забезпечити часову ділянку, під час якої додатковий сигнал керування не буде формуватися, залишаючи ВМ у незмінному положенні. Цим досягається пауза в керуванні, необхідна для вичікування реакції об'єкта на попередньо вироблену керуючу дію.

При керуванні технологічним процесом у ручному режимі оператор користується обмеженим набором технічних засобів. За наявності виконавчих механізмів постійної швидкості органи керування складають кнопки “більше/менше” для формування імпульсів додатної та від'ємної полярності. При відхиленні параметра у від заданого значення r оператором здійснюється керуюча дія у вигляді імпульсу певної тривалості. Між нанесенням імпульсів оператор витримує паузу, яка для інерційних температурних об'єктів може вимірюватися хвилинами. Таким чином, оператор-технолог при ручному керуванні перебігом технологічного процесу оперує двома основними параметрами – тривалістю керуючих імпульсів і тривалістю пауз. Співвідношення тривалості цих змінних визначає результуючий керуючий вплив на об'єкт. Описана стратегія керування може бути реалізована за допомогою двоканальної структури керування (рис. 3).

У цій схемі як вхідні змінні двоканального fuzzy-контролера розглядаються сигнал неузгодженості e і похідна сигналу неузгодженості за часом de/dt . Відповідно, для кожного з блоків нечіткої логіки визначено діапазони вхідних змінних і розділено кожен із діапазонів на лінгвістичні терми. Для реалізації послідовностей цих імпульсів і пауз використовувалися два різних блоки нечіткої логіки F_1 і F_2 , причому вони повинні бути включені в схему керування паралельно і працювати по чергово.

Звідси випливає двоканальна структура fuzzy-контролера, перший канал якої відповідає за вироблення керуючої дії, тобто формування імпульсів, а другий працює як “заборона” на подачу керуючої дії, тобто формування пауз. Узгодження між роботою двох каналів відбувається у блоці комутації C . Кожен момент часу обидва fuzzy-блоки виробляють тривалість імпульсу/паузи (f_1 та f_2 відповідно) залежно від набору вхідних змінних і баз правил, які в них закладені [11]. Блок комутації сигналів C опитує канал формування імпульсів і канал формування пауз, знімаючи числове значення з виходу опитуваного fuzzy-блока. Це числове значення є тривалістю імпульсу або паузи (залежно від опитуваного каналу), після чого зв'язок між блоком комутації і fuzzy-блоками розривається. Блок комутації знову опитує інший fuzzy-блок після того, як сплине час, рівний знятому числовому значенню з попереднього блока. Послідовність імпульсів u надходить на ВМ, який є інтегральною ланкою.

Приклад роботи двоканального нечіткого контролера

На рис. 4 наведено приклад функціонування двоканального fuzzy-контролера.

На цьому рисунку зображено 5 графіків із сумісними часовими координатами.

Перший графік відображає зміну технологічного параметра, зумовлену деяким зовнішнім збуренням. Логіка перебігу перехідного процесу узгоджується з діями оператора-технолога під час ручного керування. Є ділянка *реакції* при надмірному відхиленні параметра від уставки (ділянка 2); є ділянка *вичікування*, під час якої оператор-технолог витримує паузу, поки об'єкт

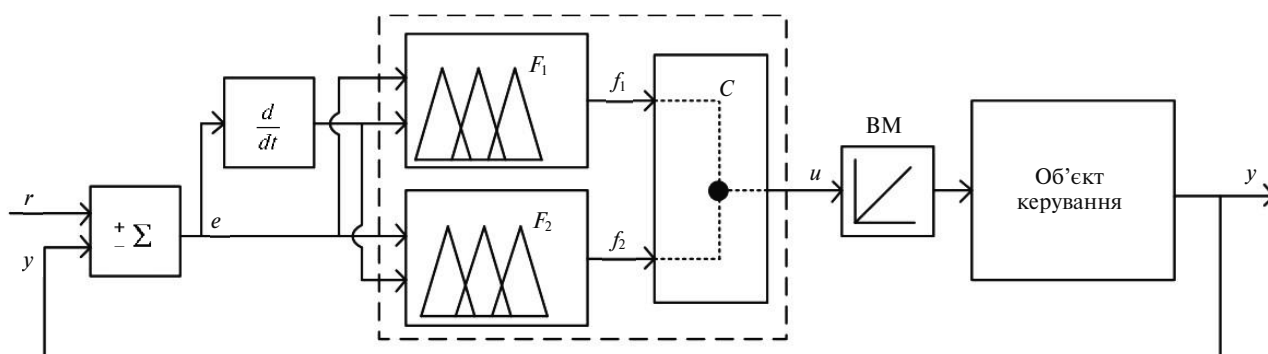


Рис. 3. Схема керування з двоканальним контролером

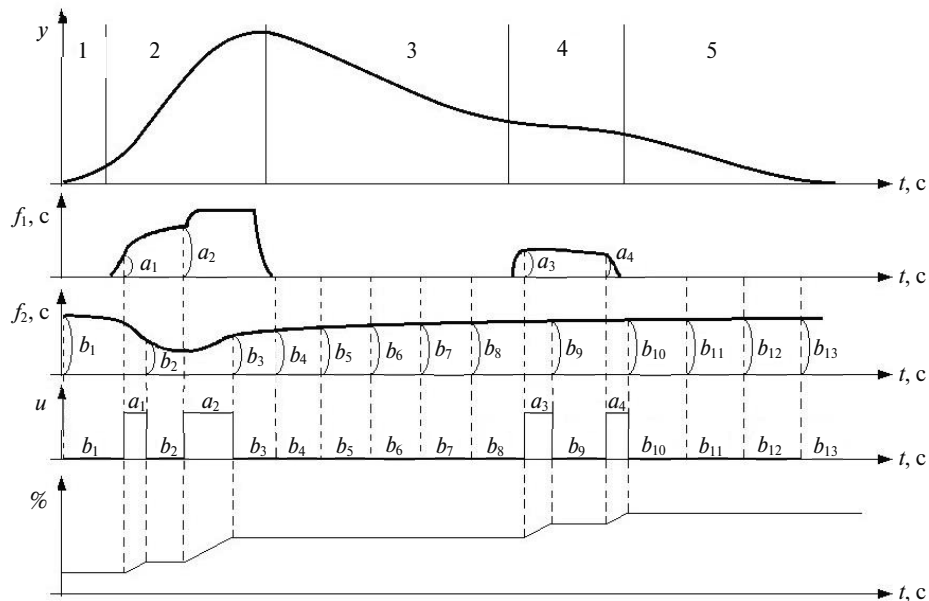


Рис. 4. Принцип роботи двоканального fuzzy-контролера на прикладі перехідного процесу компенсації збурення

керування не відреагує на керуючий вплив (ділянка 3); є ділянка *корекції*, в якій стає зрозумілим, що керуючої дії недостатньо і треба дозвано виробити додатковий сигнал керування з метою “доведення” параметра в бажані рамки (ділянка 4). П’ята ділянка – етап поступового прямування регульованого параметра до уставки із потраплянням в зону нечутливості.

Другий і третій графіки ($f_1(t)$, $f_2(t)$) відображають відповідно вихідні сигнали fuzzy-блока формування імпульсів (F1) і fuzzy-блока формування пауз (F2).

Результуюча послідовність імпульсів керування зображена на четвертому графіку $u(t)$.

Завдяки наявності окремих каналів, а саме каналу формування імпульсів (каналу безпосередньо керування) і каналу формування пауз (каналу вичікування або заборони на керування), значно збільшилася гнучкість формування логіки роботи контролера, адже з’являється можливість працювати не з одним fuzzy-блоком, а з двома, відповідно, формувати дві бази правил для кожного з fuzzy-блоків. Більш детально бази правил двоканального нечіткого контролера розглянуті в праці [11].

Моделювання замкненої системи

Для побудови двоканального нечіткого контролера використано пакет “Fuzzy logic toolbox” MATLAB. Базовим алгоритмом нечіткої логіки використовувався алгоритм “mamdani”.

Модель замкненої системи керування із двоканальним нечітким контролером розроблена в програмному додатку MATLAB/Simulink.

Як об’єкт керування розглянуто систему регулювання температури пари за стельовим пароперегрівачем прямоточного котлоагрегату ТПП-210А. Функція передачі цього контуру отримана ідентифікацією на основі експериментальних даних, отриманих на Трипільській ТЕС:

$$W_{\text{об}}(s) = \frac{4,05}{(293s + 1)(146s + 1)(98s + 1)} e^{-90s}.$$

Оскільки система регулювання температури пари до першого впорскування працює в режимі стабілізації, то основним каналом керування, який розглядається в роботі, взято канал “збурення-вихід”. Перехідні процеси і зміна сигналу керування показані на рис. 5. Збурення наносилося в еквіваленті 10 % зміни навантаження енергоблоку.

Моделювання проводилося порівняно з ПІД-регулятором. Функція передачі з настройками регулятора має вигляд

$$W_{\text{під}}(s) = 0,33 \left(1 + \frac{1}{353s} + \frac{109,8s}{12,2s + 1} \right).$$

Зона нечутливості регулятора – $\pm 2^\circ\text{C}$, період слідування імпульсів широтно-імпульсної модуляції – 20 с, мінімальна тривалість включення ВМ – 0,3 с.

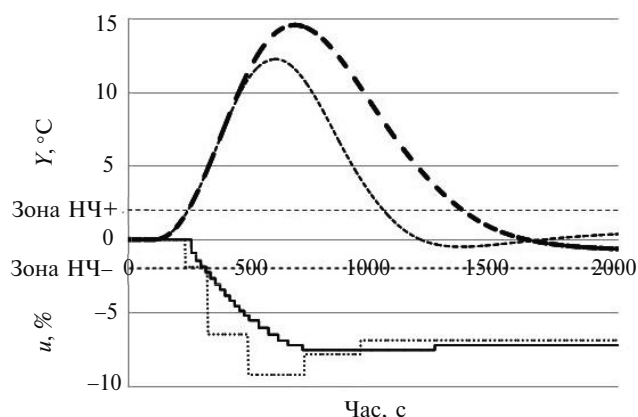


Рис. 5. Перехідні процеси за збуренням: 2кНЧ – двоканальний нечіткий контролер, u 2кПЧ – сигнал керування 2кНЧ, u ПІД – сигнал керування ПІД-регулятора, НЧ–, НЧ+ – нижня і верхня межі зони нечутливості, Y – вихідна величина, u – сигнал керування: — — — — — u 2кНЧ; — — — — — u ПІД; — u 2кНЧ; — — — — — u ПІД

Комп'ютерне моделювання роботи двоканального нечіткого контролера і ПІД-регулятора показало, що динамічне відхилення в схемі з двоканальним нечітким контролером становить $12,3^\circ\text{C}$, що на $18,7\%$ менше, ніж у схемі з ПІД-регулятором; час регулювання становить 1050 с , що на 330 с менше, ніж з ПІД-регулятором.

Висновки

Простота ПІД-регулятора, виражена через усього три параметри настройки і зрозумілість фізичного змісту кожного з них, разом із тим зумовлює зменшення кола задач, де він може

бути використаний ефективно. Для складних багатомісних об'єктів керування в теплоенергетиці необхідно застосовувати структуру регулятора, яка дає можливість реалізувати алгоритм роботи, відмінний від алгоритму, що працює за лінійним законом.

Описаний алгоритм роботи двоканального fuzzy-контролера забезпечує зниження коливальності перехідного процесу. Процес керування відповідає діям досвідченого оператора-технолога при ручному керуванні. Двоканальна структура дає змогу органічно реалізувати алгоритм керування, при якому всі значення керуючого впливу відповідають певним етапам перехідного процесу (розгону, гальмування, корекції). Таким чином, досягається ефективно використання знань експертів (операторів, технологів, наладчиків).

Двоканальна структура нечіткого контролера збільшує гнучкість при формуванні сигналу керування на об'єкт. Завдяки наявності двох окремих блоків розмежовуються задачі форсованого керування на початковій стадії перехідного процесу і стабілізації вихідної величини на завершальній стадії. В першому випадку досягаються бажані показники якості перехідного процесу, а в другому – мінімізуються коливання технологічного параметра в околі значення уставки.

Подальші теоретичні дослідження полягають у розширенні набору вхідних сигналів контролера, наприклад додаванням сигналу за навантаженням енергоблоку або сигналу за положенням ВМ. Доцільною є розробка методів оцінювання стійкості системи керування з двоканальним нечітким контролером.

References

- [1] G.P. Pletnev, *Automation of Technological Processes and Production Facilities in Thermal Power Engineering*. Moscow, Russia: MEI, 2007.
- [2] Y. Kovrigo *et al.*, "Modernizing the heat load control system of a once-through boiler unit at a thermal power station using a dynamic corrector", *Thermal Engineering*, vol. 59, no. 10, pp. 772–778, 2012. doi: 10.1134/S0040601512100072
- [3] S.I. Novikov, *Optimization of the Automatic Systems of Adjusting of Thermal Power Equipment*. Novosibirsk, Russia: NGTU, 2016.
- [4] M.A. Kononov, *Problems of Automation of Inertial Heat-Energy Objects*. Kyiv, Ukraine: Phoenix, 2009.
- [5] E.A. Boiko and T.I. Ohorzina, *Boiler Units and Steam Generators (Construction Characteristics of Power Boiler Units)*. Krasnoyarsk, Russia: KGTU, 2003.
- [6] G.T. Kulakov *et al.*, *Theory of Automatic Control by Thermal Power Processes*. Minsk, Belarus: Vysheishaya Shkola, 2017.
- [7] M.A. Kononov and A.C. Bunke, *Fundamentals of a New Strategy for the Synthesis of Optimal Control Systems*. Kyiv, Ukraine: Phoenix, 2014.
- [8] Y. Kovrigo *et al.*, "Dynamic correction application in control systems of inertial technological objects", *ScienceRise*, no. 1-2, p. 21, 2016. doi: 10.15587/2313-8416.2016.58815
- [9] S.E. Shteinberg *et al.* "Problems of creation and operation of effective control systems", *Promyshlennyye ASU i Kontrolyeriy*, no. 7, pp. 1–7, 2004.

- [10] Y. Kovrigo *et al.*, “Fuzzy-controller for inertial technological parameter control of TPP boiler unit”, *Nauka i Studia NR*, no. 8, pp. 76–84, 2017.
- [11] Y. Kovrigo, and P. Novikov, “Two-channel fuzzy controller for control technological parameters under conditions of nonstationary plant dynamic characteristics”, *Automation of Technological and Business Processes*, vol. 11, no. 1, pp. 4–13, 2019. doi: 10.15673/atbp.v11i1.1328

Ю.М. Ковриго, П.В. Новиков

АЛГОРИТМ РАБОТЫ ДВУХКАНАЛЬНОГО НЕЧЕТКОГО КОНТРОЛЛЕРА ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ

Проблематика. Анализируются причины низкого качества функционирования систем автоматизации сложных теплоэнергетических объектов управления, работающих в маневренных режимах. Особенностью котлоагрегата как объекта управления является ограниченность проведения на нем экспериментальных исследований для идентификации. Неполнота математического описания не позволяет в полной мере формализовать объект для надежного проектирования систем автоматизации. Температурным контурам регулирования прямоточного котлоагрегата свойственны большая аккумулирующая способность, временные задержки, нелинейность динамических характеристик, взаимное влияние контуров регулирования, что делает актуальной разработку новых законов управления для повышения эффективности функционирования существующих систем автоматического управления.

Цель исследования. Целью исследования является получение алгоритма работы системы автоматизации, который нечувствителен к неопределенности параметров объекта, учитывает наличие запаздывания во времени по каналам управления и возмущения, а также гарантирует при этом заданное качество регулирования в переходных режимах.

Методика реализации. Рассматриваются особенности динамических характеристик многоемкостных объектов с временными задержками. Описывается новый подход к синтезу нечетких систем регулирования, позволяющий учесть неблагоприятные свойства теплоэнергетических объектов управления, основываясь на опыте эксплуатации данных установок. Проведено компьютерное моделирование синтезированной системы управления.

Результаты исследования. Компьютерное моделирование подтверждает справедливость и возможность практической реализации предложенного алгоритма управления. Двухканальная структура fuzzy-контроллера позволяет органично реализовать способ управления, близкий к оптимальному при ручном управлении опытным оператором-технологом.

Выводы. Благодаря наличию двух параллельных каналов разграничиваются задачи обеспечения заданных показателей качества функционирования системы управления и ее запаса устойчивости. Описанная структура двухканального fuzzy-контроллера может использоваться для минимизации динамической погрешности на начальной стадии переходного процесса и снижения колебательности на завершающей стадии.

Ключевые слова: нечеткая логика; нестационарность; задержка; транспортное запаздывание; запас устойчивости; система управления.

Yu.M. Kovrigo, P.V. Novikov

CONTROL ALGORITHM OF TWO-CHANNEL FUZZY CONTROLLER FOR HEAT-ENERGY OBJECTS

Background. The reasons of control systems poor operation of complex heat and power control objects operating in changeable modes are analyzed. The peculiarity of the direct-flow steam boiler as a control object is the limited ability to conduct experimental research for identification. The incompleteness of the mathematical description does not allow fully formalizing the object for reliable design of automation systems. The temperature control circuits of the direct-flow boiler are characterized by high accumulation capacity, time delay, nonlinearity of dynamic characteristics, mutual influence of control circuits, which makes it actual to develop new control algorithms to improve the efficiency of existing control systems.

Objective. The purpose is to obtain an algorithm of the control system that is insensitive to the uncertainty of the object parameters, that considers the presence of time delay through reference and disturbance channels and guarantees the given quality of regulation in changeable modes.

Methods. Peculiarities of dynamic characteristics of multicapacity objects with time delays are considered. A new approach to the synthesis of fuzzy control systems is described, which address the adverse properties of thermal power objects, based on the experience of the operation of these facilities. Computer simulation of the synthesized control system was carried out.

Results. Computer modeling confirms the rightfulness and feasibility of the proposed control algorithm. The two-channel structure of the fuzz-controller allows implementing a control method close to optimal in manual control by an experienced operator.

Conclusions. With the availability of two parallel channels, the tasks for providing given quality of control system and its stability margin are delimited. The described structure of a two-channel fuzz-controller can be used to minimize the dynamic error in the initial stage of the transition process and reduce the oscillation at the final stage.

Keywords: fuzzy logic; nonstationarity; delay; transport delay; stability margin; control system.

Рекомендована Радою
теплоенергетичного факультету
КПІ ім. Ігоря Сікорського

Надійшла до редакції
29 січня 2019 року

Прийнята до публікації
20 червня 2019 року