

УДК. 681.518.5

В. С. Михайленко, к. т. н., доц; Р. Ю. Харченко**ЗАСТОСУВАННЯ ГІБРИДНИХ МЕРЕЖ В АДАПТИВНИХ СИСТЕМАХ
УПРАВЛІННЯ ТЕПЛОЕНЕРГЕТИЧНИХ ОБ'ЄКТІВ**

Запропоновано використання апарата нейронечітких мереж під час визначення оптимальних значень параметрів ПІ-регуляторів у системах адаптивного управління теплоенергетичних об'єктів. Показано ефективність запропонованої інтелектуальної адаптивної системи порівняно із традиційною адаптивною АСР.

***Ключові слова:** параметрична ідентифікація; генератор синусоїдальних коливань; оптимізація; гібридна мережа; ПІ-регулятор.*

Актуальність

Алгоритми функціонування автоматизованих систем управління (АСУ), розроблені на стадії проектування, як правило, значною мірою відрізняються від оптимальних значень параметрів традиційних регуляторів. Пояснюється це недосконалістю математичних моделей об'єктів, які представлені як в аналітичному (часто спрощеному), так і в експериментальному вигляді. Практично ускладнено отримання математичних моделей систем управління експериментальним шляхом на діючих складних об'єктах і з дистанційним або автоматичним режимом роботи. Ці труднощі пов'язані із впливом зовнішніх і параметричних збурень, частина з яких має нестационарний характер і не підлягає контролю.

Виходячи з цього, розроблені АСУ ТП потребують перенастроювання, яке супроводжується погіршенням якості процесу регулювання, що призводить до додаткових витрат матеріальних ресурсів. Оскільки роботи з настроювання АСУ і АСР під час проведення пуско-налагоджувальних робіт, а також протягом подальшої експлуатації (у разі зміни навантаження й завдання) є необхідними і частими, виникають організаційні проблеми під час їхнього виконання. Наприклад, кількість настроюваних контурів систем регулювання на сучасному теплоенергетичному об'єкті може досягати декількох десятків, що робить практично неможливим високоякісне і швидке виконання цих робіт «вручну» обмеженим складом експлуатаційного персоналу [1, 2]. Наприклад, паровий котел, що працює в регулювальному режимі, сприймає коливання теплового та електричного навантаження турбін, тобто бере участь у регулюванні загального теплового та електричного навантаження станції та як наслідок піддається впливу нестационарних зовнішніх і внутрішніх збурень. Слід зазначити, що динамічні характеристики ділянок регулювання енергоблоку теплової електростанції (ТЕС) істотно змінюються в процесі пуску. Як правило, динамічні параметри цих характеристик, визначені для початкового етапу пуску, значно відрізняються від тих самих параметрів, які визначено для кінцевого етапу пуску або нормального режиму роботи. Наприклад, запізнювання за температурами пари τ по тракту парового котла за каналом регулювального впливу істотно більші, а коефіцієнти підсилення k – менші на початковій стадії пуску порівняно з кінцем пуску і нормальним режимом. У зв'язку з переходом із розпалювального палива на основне і зі змінами теплової схеми блоку автоматичне регулювання більшості технологічних параметрів у процесі пуску не може здійснюватися штатними регуляторами навіть у разі зміни їхніх налаштувань і завдань [2]. З цією метою використовують пускові або розпалювальні АСР. Останні відрізняються від штатних наявністю пристроїв дистанційної зміни настроювань регуляторів (K_p , T_i), які встановлює досвідчений оператор-експерт.

У зв'язку з вищенаведеним, необхідність застосування адаптивних інтелектуальних систем

управління складними багаторежимними теплоенергетичними об'єктами (контури регулювання парових котлів ТЕС) стає актуальною і необхідною мірою для підвищення ефективності управління паливно-енергетичним комплексом загалом.

Структура об'єкта регулювання

В якості об'єкта регулювання розглянуто каскадну АСР температури перегрітої пари барабанного котла ТЕС [1, 2]. Завдання управління пароперегрівачем полягало в забезпеченні заданого температурного режиму в паровому тракті котла. Зміна температури пари здійснювалася за рахунок збільшення або зменшення кількості води, що впорскувалась у пароохолоджувач, з метою стабілізації заданого значення температури пари на виході пароперегрівача (рис.1).

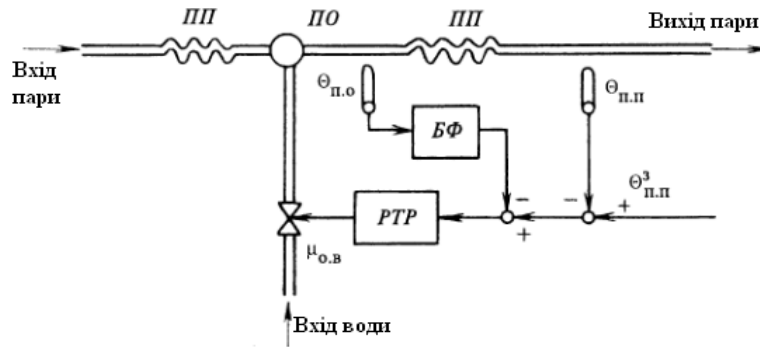


Рис. 1. АСР температури перегрітої пари: ПП – пароперегрівач, ПО – пароохолоджувач, БФ – блок формування сигналу (диференціатор), РТР – регулятор температури, $\Theta_{п.о}$ – температура пару після пароохолоджувача, $\Theta_{п.п}$ – температура після пароперегрівача, $\Theta^3_{п.п}$ – завдання

У вітчизняній теплоенергетиці переважно застосовують типову каскадну систему регулювання температури перегрітої пари. До складу каскадної АСР (рис. 2) входять керувальний контур ПІ-регулятора й додатковий контур вимірювання допоміжної регульованої величини, сформованої в блоці БФ. Практика експлуатації такої системи показує, що за істотних змін витрати пари, що надходить на турбіну, виникає потреба в ручному перенастроюванні значень коефіцієнтів її контуру регулювання для досягнення заданої температури [2]. Фактично це важлива об'єктивна ознака того, що функціонування системи управління відбувається в умовах апріорної невизначеності. Аналіз експлуатаційних характеристик пароперегрівача показує, що об'єкт управління має змінну величину транспортного запізнювання, його динамічні властивості істотно залежать від вмісту кисню у вихідних газах, забруднення поверхонь нагріву, а також від режимних чинників – навантаження, виду й сорту палива, що спалюється, стану поверхонь нагріву, надлишку повітря і т. п. Окрім того отримання математичної моделі температури перегріву пари зазвичай пов'язано з апроксимацією кривих розгону, які отримано експериментально, унаслідок чого математичний опис апріорі стає неточним.

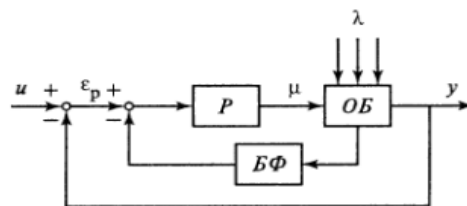


Рис. 2. Каскадна АСР: Р – регулятор, ОБ – об'єкт управління, u – завдання, λ – зовнішнє збурення, ϵ_p – помилка μ – управляюча дія, y – вихідний параметр

Аналіз літератури

Дослідження наукових публікацій в галузі адаптивних АСР у теплоенергетичних системах [1 – 3] дозволило зробити висновок, що широке застосування отримали традиційні методи активної ідентифікації та пов'язані з ними алгоритми розрахунку оптимальних параметрів ПІ- і ПІД- регуляторів з аналізу КЧХ об'єктів або режиму автоколиваний. Наприклад, такі підходи застосовують у російських адаптивних регуляторах Реміконт і Протар. Слід зазначити, що для цієї АСР температури пари, автоколивальний процес не припустимий через вимоги технологічного регламенту, оскільки відхилення температури пари від норми може призвести до передчасного зносу обладнання турбіни. Отже, виникає наукове завдання пошуку оптимальних методів ідентифікації об'єкта у випадках зміни його навантаження й алгоритмів розрахунку настроювань ПІ-регуляторів, з урахуванням думки експерта, для забезпечення очікуваного перехідного процесу (перерегулюванням $G < 30\%$, ступенем згасання $\Psi = (0,75 - 0,95)$, з мінімальним часом регулювання T_p).

На сьогодні широкої популярності в теорії адаптивного управління набули наукові підходи, пов'язані з використанням інтелектуальних систем [4 – 6]. Ці системи успішно реалізують досвід і знання експертів (нечіткі регулятори), а також мають здатність до самонавчання (нейрорегулятори). Спільне або комбіноване застосування цих напрямків стало поштовхом до виникнення нового наукового напрямку – гібридних, або нейронечітких мереж (ГМ, ННМ) [4]. Розгляд цієї технології щодо ідентифікації та адаптації АСР температури перегрітої пари є актуальним науковим завданням.

Мета статті. Метою статті є розробка та навчання гібридної мережі для визначення оптимальних значень настроювань ПІ-регулятора в каскадній АСР температури перегрітої пари за зміни навантаження об'єкта (регульовального режиму) та наявності пускового режиму.

Розробка алгоритму функціонування адаптивної гібридної АСР температури перегрітої пари

Авторами було запропоновано структуру гібридної адаптивної системи регулювання (рис. 3). На рис. 3 наведено такі позначення: K – коефіцієнт передачі об'єкта, T – постійна часу об'єкта, τ – запізнення, n – порядок об'єкта, y – вихідний параметр.

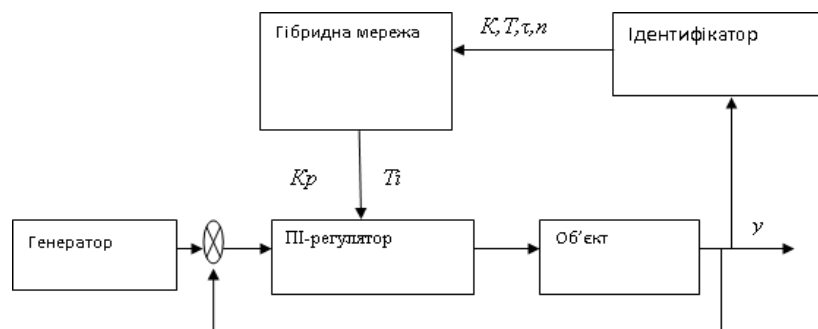


Рис. 3. Структура адаптивної АСР

Структура адаптивного настроювання ПІ-регулятора ґрунтується на використанні активних частотних методів ідентифікації та визначення оптимальних настроювань ПІ-регулятора гібридною мережею. Застосування частотних методів дозволяє забезпечити перешкодозахищеність алгоритму та раціонально організувати активний експеримент на діючій системі щодо підтримки області стійкості. Ідентифікація здійснюється шляхом подання на вхід системи двох синусоїдальних сигналів від генератора на частотах, що розрізняються між собою і належать до суттєвого діапазону [7]. Структура передавальної функції об'єкта складається з декількох інерційних ланок із запізненням виду:

$W(s) = \frac{K}{(T(s)+1)^n} e^{-\tau(s)}$ зі значеннями, що змінюються протягом часу у визначеному діапазоні

залежно від навантаження або режиму роботи парового котла. Ідентифікатор визначає значення параметрів об'єкта та його порядок. Надалі ці значення використовуються оптимізатором у вигляді нейронечіткої мережі, що діє за алгоритмом Сугено [2 – 3] для пошуку оптимальних значень настроювань ПІ-регулятора (K_p, T_i). Навчання гібридної мережі проводиться з урахуванням думки експертів-налагодників АСУ ТП.

Ідентифікація об'єкта та розрахунок оптимальних параметрів ПІ-регулятора

Для визначення значень чотирьох параметрів об'єкта (K, T, τ, n) запропоновано використовувати генератор синусоїдальних коливань, який здійснює оцінку КЧХ об'єкта на двох різних частотах, що належать до суттєвого діапазону. Із урахуванням дійсних рівнянь:

$$\left. \begin{aligned} A_1 &= \frac{K}{(\beta^2 \tau^2 \omega_1^2 + 1)^{0,5n}}; \\ A_2 &= \frac{K}{(\beta^2 \tau^2 \omega_2^2 + 1)^{0,5n}}; \\ \varphi_1 &= -\arctg(\beta \tau \omega_1) - \tau \omega_1; \\ \varphi_2 &= -\arctg(\beta \tau \omega_2) - \tau \omega_2 \end{aligned} \right\}$$

розв'язання яких за відомих амплітуд, частот і фазових зсувах: $A_1, A_2, \omega_1, \omega_2, \varphi_1, \varphi_2$ – дозволяє знайти значення параметрів передатної функції об'єкта. При цьому постійна часу $T = \beta \tau$. Припускалося, що ідентифікатор визначив такі значення параметрів передатної функції досліджуваного об'єкта за каналом регулювання [1, 2]: $W(s) = \frac{8,27}{(3,05s + 1)^3} e^{-0,93s}$. У програмі

MathCAD проведено розрахунок оптимальних значень настроювань ПІ-регулятора (рис. 4). Слід зазначити, що розраховані за представленим методом настроювань ПІ-регулятора потребували ручного коригування, оскільки низка отриманих загасаючих перехідних процесів не відповідала заданим критеріям (першому відхиленню та часу регулювання). Для отримання тестової вибірки (матриці навчання нейронечіткої мережі) значень оптимальних параметрів ПІ-регулятора каскадної АСР був проведений комп'ютерний експеримент у програмі MatLab (Simulink) із ручним коригуванням значень настроювань K_p та T_i , значення параметрів передатної функції об'єкта змінювалися з урахуванням різних режимів роботи парового котла (номінального, економного, пуску, останова, регульовального, пікового) [7]. Результати експерименту представлено в табл. 1.

Таблиця 1

Оптимальні настроювання ПІ-регулятора при $n=3$ та дії на об'єкт параметричного збурення (зміни навантаження)

$K_{об}$	0,5	1	5	15	5	12	4,43	7,05	11,9	13,7
$T_{об}$	1,5	3	4	4	1,5	1,5	2,48	1,5	1,5	3,4
τ	0,5	1	1,5	1	0,5	0,5	0,92	0,5	0,5	0,7
K_p	1,34	0,99	0,49	0,146	0,135	0,031	0,22	1,92	0,031	0,021
T_i	1,91	5,55	40,63	20,4	1,92	1,58	6,61	0,1	1,58	3,55

Mathcad-документ

Розрахунок настроювань ПІ-регулятора за допоміжною функцією

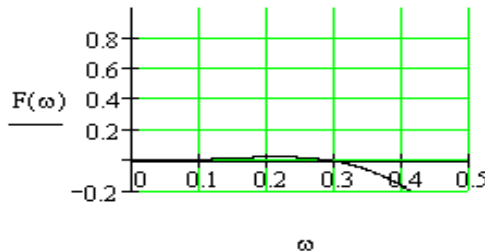
введення показника коливальності $M := 1.55$

введ. параметрів об'єкта $k_{\mu} := 8.27$ $T_{\mu} := 3.05$ $\tau := .93$ $W_{\mu}(\omega) := \frac{k_{\mu} \cdot e^{-\tau \omega \cdot j}}{(T_{\mu} \cdot j \cdot \omega + 1)^3}$

побудова графіка допоміжної функції

$$\omega_{end} := .5 \quad n := 500 \quad \Delta\omega := \frac{\omega_{end}}{n} \quad \omega := \Delta\omega, 2 \cdot \Delta\omega .. \omega_{end}$$

$$\phi_{\mu}(\omega) := \arg(W_{\mu}(\omega)) \quad A_{\mu}(\omega) := |W_{\mu}(\omega)| \quad F(\omega) := \frac{-\omega \cdot M}{A_{\mu}(\omega) \cdot (M^2 - 1)} \cdot (M \cdot \sin(\phi_{\mu}(\omega)) + 1)$$



визначення частоти максимуму допоміжної функції

$$\omega := .35 \quad \text{Given} \quad \omega \geq .2 \quad \omega \leq .4$$

$$\omega_{res} := \text{Maximize}(F, \omega)$$

$$\omega_{res} = 0.213 \quad F(\omega_{res}) = 0.022$$

визначення оптимальних параметрів регулятора і побудова АЧХ замкнутого контуру

$$A_{res} := A_{\mu}(\omega_{res}) \quad k_p := -M^2 \cdot \frac{\cos(\phi_{\mu}(\omega_{res}))}{(M^2 - 1) \cdot A_{res}} \quad T_i := \frac{k_p}{F(\omega_{res})} \quad W_r(\omega) := k_p \cdot \left(1 + \frac{1}{T_i \cdot \omega \cdot j}\right)$$

$$W(\omega) := W_{\mu}(\omega) \cdot W_r(\omega) \quad \Phi(\omega) := \frac{W(\omega)}{1 + W(\omega)} \quad A(\omega) := |\Phi(\omega)| \quad \omega_{end} := 2 \quad \Delta\omega := \frac{\omega_{end}}{n}$$

$$\omega := \Delta\omega, 2 \cdot \Delta\omega .. \omega_{end}$$

Оптимальні значення

$$k_p = 0.124 \quad T_i = 5.649$$

$$+ \frac{A(\omega)}{1.55}$$

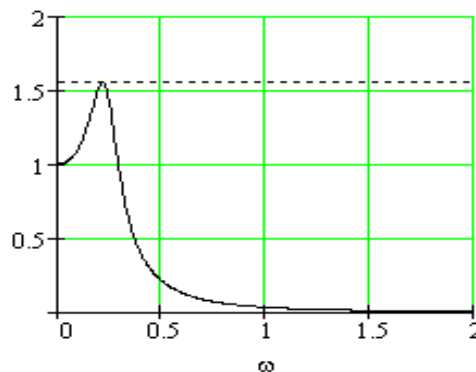


Рис. 4. Розрахунок оптимальних значень настроювань ПІ-регулятора

Розробка нейронечіткої системи

Нейронечітка мережа (ННМ) або гібридна мережа (ГМ) є багатозаровою нейронною мережею без зворотних зв'язків [3]. У такій мережі входи (K, T, τ) представлені у вигляді лінгвістичних змінних (мале значення, середнє, велике). У програмі Matlab (ANFIS) був проведений процес побудови адаптивної системи нейронечіткого виводу (рис. 5) для апроксимації залежності, що являє собою причинно-наслідковий зв'язок поміж K, T, τ і K_p, T_i . Виходячи з рекомендацій [5, 6] і комп'ютерних експериментів у середовищі MatLab (Fuzzy Logic Toolbox), було обрано й типи функцій належності (трапеційдний і трикутний) [4], що описують вхідні і вихідні значення. У процесі навчання було використано кількість циклів, що дорівнює 40, та обрано метод навчання – зворотного поширення помилки [5].

Отже, гібридною мережею було реалізовано відображення параметрів ПІ-регулятора за характеристиками об'єкта регулювання: $S^k = f(x^k) = f(x_1^k, x_2^k, \dots, x_n^k)$, $k = 1, 2, \dots, N$, за наявності

навчальної множини $((x^1, y^1), \dots, (x^N, y^N))$, що в табл. 1.

Для моделювання невідомої функції f використовують алгоритм Сугено з базою знань такого типу: Π_i : ЯКЩО $x_1 \in A_{i1}$ Й $x_2 \in A_{i2}$ Й $x_l \in A_{in}$, ТО $T_{ii} = S_i, i=1, 2, \dots, m$, де A_{ij} – нечіткі множини трикутної форми, що описують висловлювання експерта (мале (**М**), середнє (**С**), велике (**В**)), S_i – вихідні значення регулятора. Ступінь істинності μ правила i визначають за допомогою операції кон'юнкції. Вихід нечіткої системи визначають методом центру тяжіння

$$[3]: T_{ik} = \frac{\sum_{i=1}^m \mu_i S_i}{\sum_{i=1}^m \mu_i}.$$

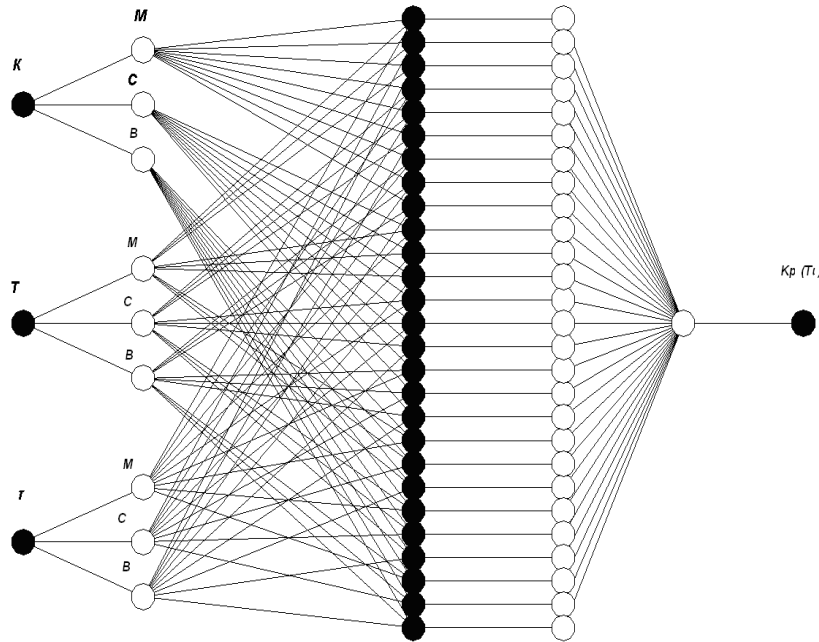


Рис. 5. Структура запропонованої гібридної мережі

Після навчання ГМ та подання на її вхід значень параметрів об'єкта ($K_{об} = 8,27; T_{об} = 3,05; \tau = 0,928$), що відсутні в тестовій вибірці (табл. 1) і визначені у результаті активної ідентифікації, мережа рекомендувала значення настройок ПІ-регулятора: $T_i = 5,15; K_p = 0,12$, а традиційний метод КЧХ (рис. 4) – $K_p = 0,21, T_i = 5,649$.

Комп'ютерні експерименти з апробації значень настроювань адаптивного ПІ-регулятора

У програмі MatLab (Simulink) [8] розроблено моделі каскадних АСР (рис. 2) з ПІ-регуляторами та інерційними об'єктами третього порядку із запізненням (модель пароперегрівача за каналом регулювання) з нелінійним елементом (обмеження на керуючий вплив) (рис. 6). На вхід системи подавався одиничний стрибок. За зміни значень параметрів передатної функції об'єкта у випадках переходу енергоблока на піковий або пусковий режим (за моделювання дії параметричного збурення) та встановлення нових значень параметрів об'єкта $K_{об} = 13,7; T_{об} = 5,4; \tau = 1,1$, ГМ рекомендувала настроювання: $K_p = 0,81; T_i = 6,33$, а традиційний частотний метод за допоміжною функцією: $K_p = 0,021; T_i = 3,55$. Підстановка цих значень у схему програми Simulink дозволила отримати такі перехідні процеси (рис. 7).

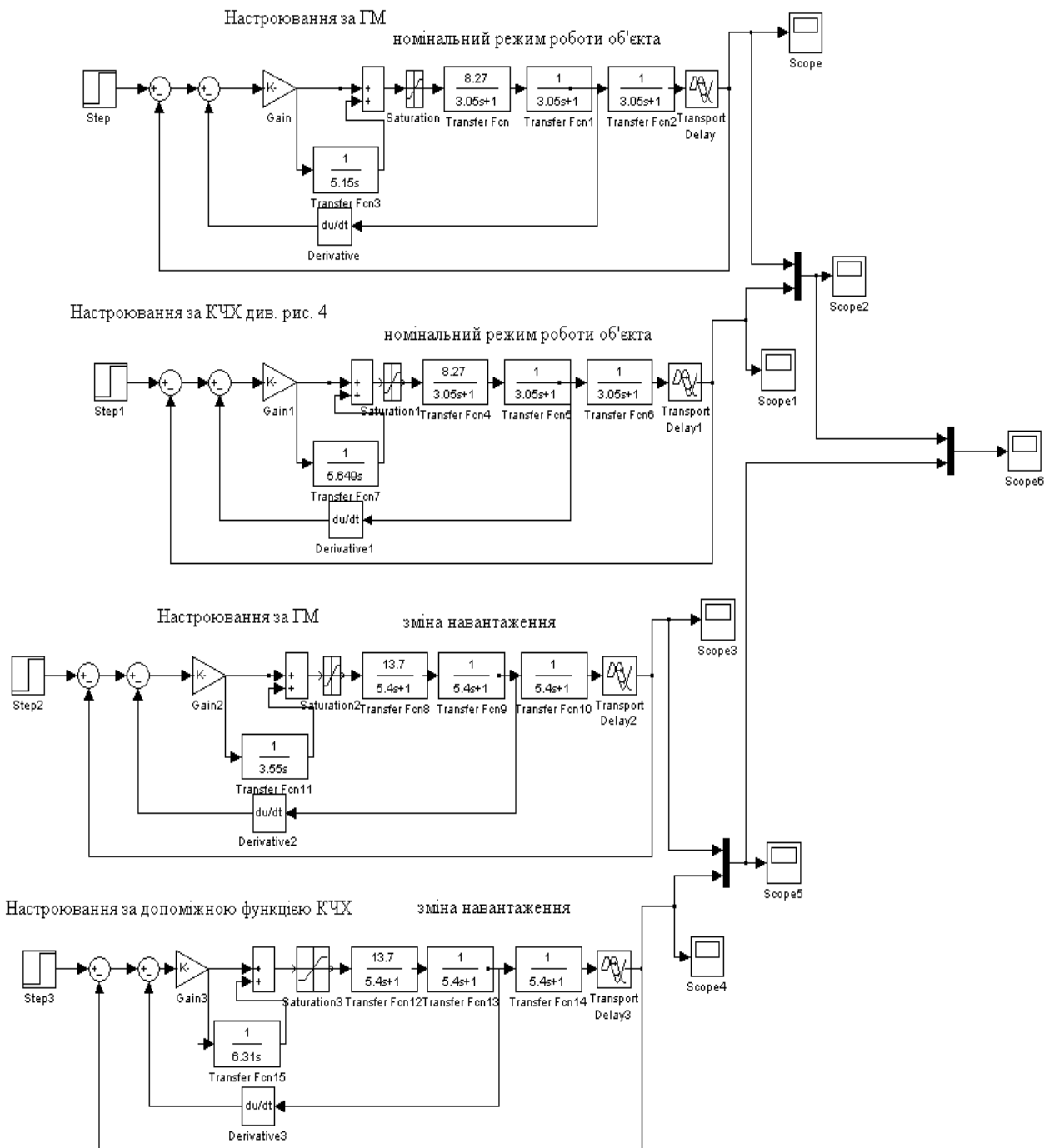


Рис. 6. Схема адаптивних АСР з ПІ-регуляторами та нелінійними елементами (Saturation)

З аналізу перехідних процесів рис. 7 (1, 2) можна зробити висновок, що під час номінального або стабільного режиму роботи об'єкта гібридний і традиційний ПІ-регулятори демонстрували однакові показники якості (час регулювання $T_p = 45$ с), однак, за умови впливу параметричного збурення (3, 4), гібридна система має менший час регулювання ($T_{p1} = 138$ с) порівняно з традиційною адаптивною АСР ($T_{p2} = 173$ с), також перерегулювання гібридної АСР $G^{TP} = 28\%$, традиційної $G^{TP} = 50\%$, ступінь затухання гібридної $\Psi^{TP} = 0,91$, традиційної $\Psi^{TP} = 0,68$, тобто запропонована гібридна АСР є оптимальною та енергоекономною, а традиційна каскадна АСР потребує додаткової адаптації.

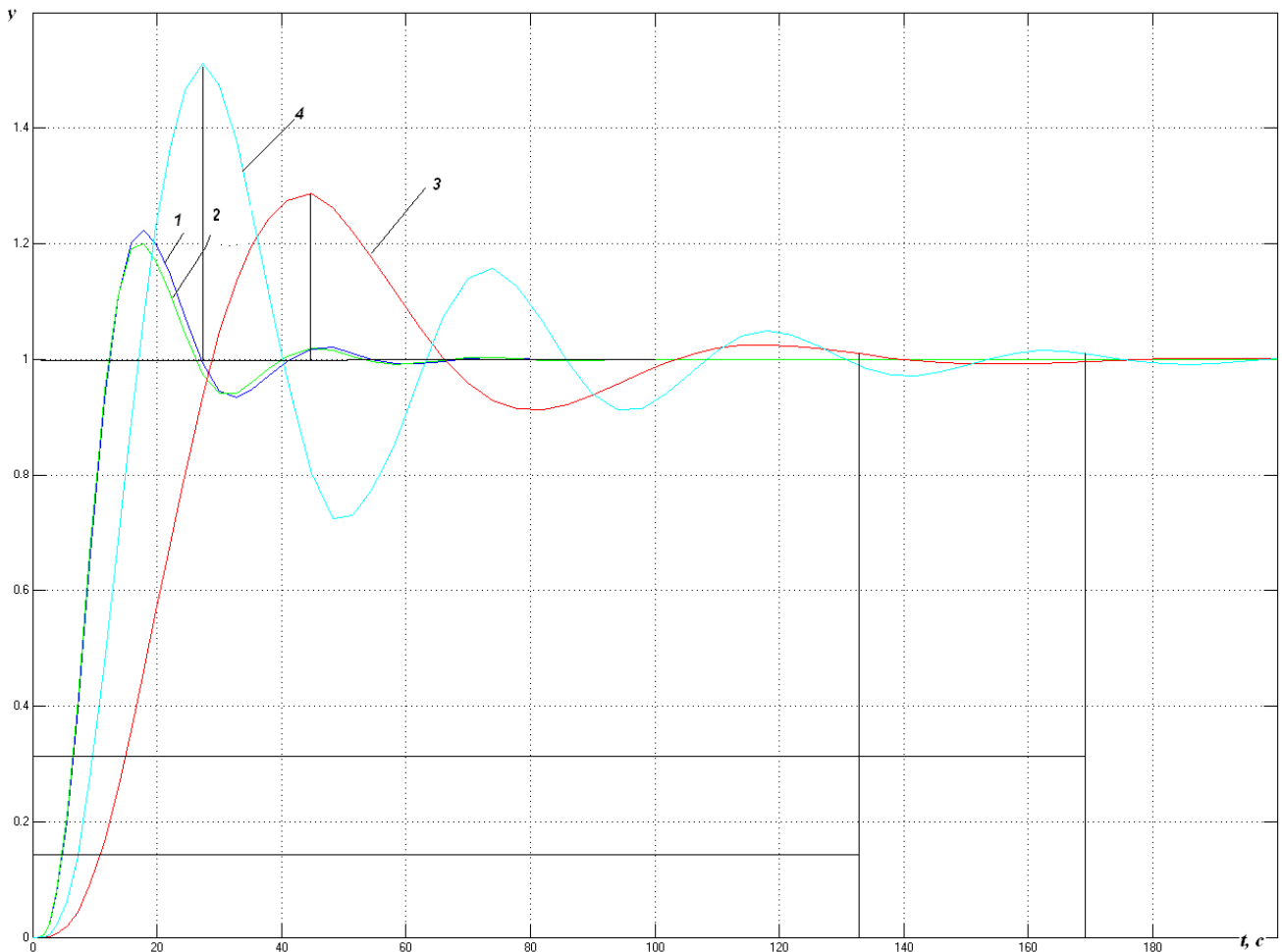


Рис. 7. Перехідні процеси за каналом регулювання: 1 – традиційної АСР та 2 – нейронечіткої АСР (за номінального навантаження), 3 – нейронечіткої АСР та 4 – традиційної АСР (за зміни навантаження)

Висновок

Комп'ютерні експерименти в програмі MatLab (Simulink) із варіюванням значень параметрів передатної функції об'єкта (за моделювання пікових і пускових режимів парового котла) продемонстрували в разі випадків неефективність традиційного адаптивного підходу (АСР була неефективна), на відміну від алгоритму ГМ, перехідні процеси якої були оптимальними. Виходячи з отриманих результатів, можна зробити висновок, що запропонована інтелектуально-адаптивна АСР температури перегрітої пари має такі переваги порівняно з традиційними методами адаптації за КЧХ і автоколиваний, які використовують сьогодні в АСР ТЕС:

- 1) швидкість процесу знаходження оптимальних налаштувань ПІ-регулятора каскадної АСР з можливістю їхньої апроксимації та екстраполяції, а також при дії невизначених збурень;
- 2) менші перше відхилення і час перехідного процесу регулювання;
- 3) можливість оптимального функціонування каскадної АСР у всіх режимах парового барабанного котла;
- 4) можливість використання в процесах адаптації різних АСУ ТП і АСР з ПД і ПІД-регуляторами в теплоенергетиці.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Ротач В. Я. Теория автоматического управления / В. Я. Ротач. – М.: МЭИ, 2008 – 396 с.
2. Плетнев Г. П. Автоматизированное управление объектами тепловых электростанций / Г. П. Плетнев. – М.: Энергоиздат, 1986. – 368 с.

3. Клюев А. С. Настройка систем автоматического регулирования котлоагрегатов / А. С. Клюев, А. Г. Товарнов. – М.: Энергия, 1970 – 280 с.
4. Леоненков А. Ю. Нечеткое моделирование в среде Matlab и fuzzyTech / А. Ю. Леоненков. – С. – Птб.: БХВ, 2003. – 720 с
5. Круглов В. В. Искусственные нейронные сети. Теория и практика / В. В. Круглов, Н. Н. Борисов. – М.: Горячая линия – Телеком, 2001. – 382 с.
6. Рутковская Д., Пилинский М., Рутковский Л. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы ; пер. с польск. И. Д. Рудинского. – М.: Горячая линия – Телеком, 2006. – 452 с.
7. Дейч А. М. Методы идентификации динамических объектов / А. М. Дейч. – М: Энергия, 1979 – 240 с
8. Дьяконов В. П. Simulink 5/6/7: Самоучитель / В. П. Дьяконов. – М.: ДМК-Пресс, 2008. – 781 с.

Михайленко Владислав Сергійович – к. т. н., доцент кафедри інформаційних систем та мереж, vlad_mihailenko@mail.ru.

Одеська державна академія холоду.

Харченко Роман Юрійович – аспірант, ст. викладач кафедри морської електроніки, roman30@gmail.com.

Одеська національна морська академія.