

Баган Т.Г.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Бунь В.П.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Ремінна А.А.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

СИНТЕЗ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ПАРИ ПРЯМОТОЧНОГО КОТЛОАГРЕГАТУ З ВИКОРИСТАННЯМ НЕЙРОКОНТРОЛЕРА

У статті досліджено синтез системи автоматичного регулювання температури перегрітої пари прямооточного котлоагрегату. Мета роботи полягає в розробці нейронної мережі для врахування основних зв'язків і регулювання контурів котла за допомогою нейронної мережі.

Ця автоматична система керування є складною нестационарною системою з перехресними зв'язками. До того ж положення точки початку перегріву може змінюватися залежно від багатьох факторів, зокрема паропроодуктивності, кількості тепла, що надходить, витрати живильної води. Для покращення якості функціонування запропоновано структуру контролера, побудованого з використанням нейронної мережі. Установлено, що саме рекурентна нейронна мережа з одним зворотнім зв'язком дає найкращу якість регулювання, а необхідна кількість нейронів дорівнює шести. Моделювання роботи цієї системи керування здійснювалося в середовищі Matlab Simulink, використовуючи пакет прикладних програм Neural Network Toolbox. Для реалізації нейроконтролера застосовувався регулятор на основі авторегресії з ковзним середнім. За заданими параметрами навчальної послідовності здійснювалось навчання системи. Після цього проводилися тестування системи та валідація даних.

Аналіз результатів моделювання засвідчив, що запропонований підхід керування температурою перегрітої пари дає покращення якості функціонування системи за основними показниками якості порівняно з використанням класичних структур із ПІД-регуляторами. Це пов'язано з тим, що в структурі нейронної мережі наявні зворотні зв'язки, які істотно покращують якість регулювання. Нейроконтролер у силу своїх особливостей може мати множину входів і виходів. Тому доцільною є перспектива використання нейронних мереж як регулятора для подібних систем. Інтелектуальні методи є корисними в моделюванні та прогнозуванні складних систем, що мають нелінійність і невизначеність у своїх моделях.

Ключові слова: прямооточний котлоагрегат, система керування, нейронна мережа, нейроконтролер.

Постановка проблеми. Сучасні прямооточні котли є високоавтоматизованими установками. Надійна експлуатація котельних агрегатів таких потужних енергетичних блоків на критичні параметри технічно можлива лише на базі комплексної автоматизації котельних агрегатів, оптимальної налашки систем автоматизації та кваліфікованого обслуговування.

У роботі розглянута можливість синтезу автоматичної системи керування (АСК) температури перегрітої пари, яка встановлена на прямооточному котлоагрегаті ТПП-312А.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Застосування ПІД-регуляторів для об'єктів про-

мислової автоматизації триває вже протягом значного часу. Це зумовлено мінімальною кількістю їх параметрів, відносною простотою їх налаштування й високою ефективністю такого підходу [1]. Проте при зміні параметрів об'єкта якість керування погіршується або потрібне нове налаштування параметрів регулятора. Такий підхід не є ефективним для об'єктів з істотно нестационарними параметрами. Виходом зі становища є застосування нових принципів: адаптивне керування, предикативне керування чи нейронні мережі. Вони передбачають підлаштування параметрів регулятора залежно від зміни навколишніх умов.

Для побудови нейромережевої системи в роботі [6] досліджується регулятор NN Predictive Controller, в основу побудови якого покладено принцип нелінійного предиктивного регулювання. Такий регулятор отримує модель нелінійного об'єкта керування у вигляді нейронної мережі, щоб передбачати його майбутню поведінку. До того ж регулятор розраховує сигнал керування, який оптимізує вихід об'єкта протягом заданого інтервалу часу. Однак зазначений регулятор вимагає великих обчислювальних витрат і складний для практичної реалізації.

Супервізорне керування передбачає безпервну зміну коефіцієнтів залежно від поточної помилки, її похідної чи інтеграла помилки. Більшість відомих варіантів супервізорів використовують для опису законів зміни коефіцієнтів нечіткі логічні правила [8]. Однак ці правила часто мають емпіричний характер, їх кількість виявляється досить великою, при цьому вони не завжди можуть бути логічно обгрунтовані.

Ще одним варіантом використання нейронної мережі може бути використання нейроконтролера як коректора для основного ПІД-регулятора [5]. Проте завдання навчання нейронної мережі в таких умовах є складним і багатовекторним.

Постановка завдання. Мета роботи полягає в розробці нейронної мережі для врахування основних зв'язків і регулювання контурів котла за допомогою нейронної мережі.

Виклад основного матеріалу дослідження.
Постановка задачі керування. Принцип дії прямооточного котла заснований на повному випаруванні води, яке відбувається під час її прямооточного проходження через випарну поверхню. Живильний насос подає воду в економайзер і далі в підйомні труби та змійовики, які знаходяться в топці. Ці змійовики і труби і є випарувальною поверхнею. У них вода випаровується й відбувається перегрівання пари.

Послідовно з'єднані поверхні нагрівання прямооточного парогенератора можна представити у вигляді змійовика, в один кінець якого надходить живильна вода, а з іншого кінця виходить пере-

грітий пар. Пароводяний тракт може бути розділений на три частини: водяну, пароводяну і парову. Межі цих зон у загальному випадку не є фіксованими й можуть зміщуватися при перехідних процесах. Положення точки початку перегріву може змінюватися залежно від паропродуктивності, кількості тепла, що надходить, і витрати живильної води. Зазвичай її приймають відповідною до умовної температури фазового переходу T_{ϕ} , що визначається максимальним значенням теплоємності пари [2].

Класична система автоматичного регулювання температури первинної пари побудована за двохімпульсною схемою зі зникаючим сигналом із проміжної точки, котра розташовується одразу після пароохолоджувача. Витрата охолоджувальної води в пароохолоджувачі регулюється клапаном з трифазним електроприводом.

Оптимальний синтез розглянутих систем регулювання виконаний для АСК температури перегрітої пари котла ТПП-312А. Динаміка основної та допоміжної змінних представлена передавальними функціями:

$$W_{\mu y}(s) = 0.08 \cdot \frac{e^{-23 \cdot s}}{(54.7 \cdot s + 1) \cdot (9.1 \cdot s + 1)},$$

$$W_{\mu z}(s) = 0.1 \cdot \frac{e^{-10 \cdot s}}{(48.9 \cdot s + 1) \cdot (11.5 \cdot s + 1)}.$$

В автоматичній системі керування з нейронною мережею необхідний всього один нейроконтролер [3], на вхід якого подаються похибки по основному та допоміжних каналах, а на виході формується необхідний регульований вплив μ (рис. 1).

Дослідження залежності якості регулювання від топології мережі. Для дослідження залежності якості регулювання від топології мережі розглянуто такі нейронні мережі, як прямонаправлена (персептрон), рекурентна з 1-ю, 2-ма та 3-ма зворотними зв'язками та повнозв'язна. Число шарів і нейронів варіювалося [7].

У ході експерименту встановлено, що саме рекурентна нейронна мережа з одним зворотнім зв'язком дає найкращу якість регулювання, а необ-

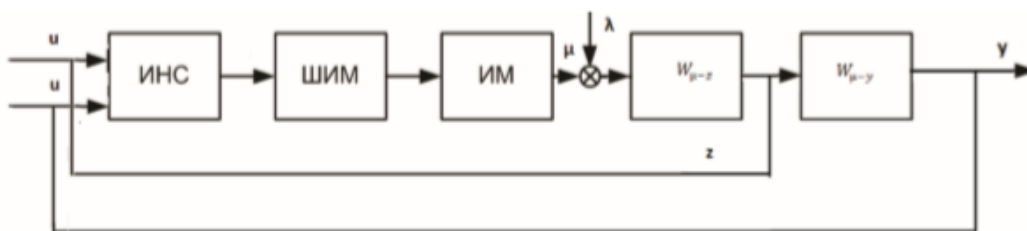


Рис. 1. Структурна схема АСК з нейроконтролером

хідна кількість нейронів дорівнює шести. Тобто один прихований шар із трьома нейронами (рис. 2).

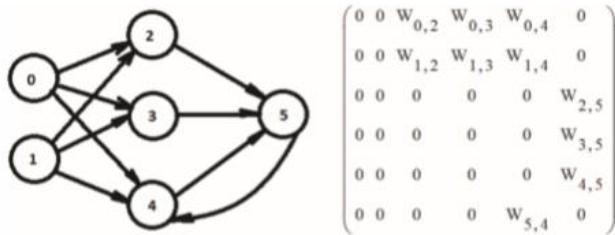


Рис. 2. Структурна схема нейроконтролера температури перегрітої пари і її матриця суміжності

Найкращих результатів вдалося домогтися з блоками у вигляді логарифмічної функції, яка має вигляд:

$$\varphi(b) = \ln(b + \sqrt{b^2 + 1}),$$

де b – сумарний сигнал на вході нейрона.

Інструментом для налаштувань нейронної мережі був вірогідний еволюційний алгоритм оптимізації багатоекстремальних задач. Алгоритм складається з вірогідної процедури Монте-Карло для створення множини початкових точок для пошуку оптимального рішення.

На рис. 3 (а) показана класична схема регулювання температури перегрітої пари з ПІ-контролером і вводом випереджаючого сиг-

налу через диференціатор. На рис. 3 (б) представлена схема з нейроконтролером, який має вихідний сигнал для виконуючого механізму постійної швидкості у вигляді приросту положення регулюючого органу на кожному кроці рішення $\Delta\mu$, у результаті інтегрування якого реалізується регулюючий вплив $\mu(t)$. Сигналами на вході нейроконтролера є відхилення ε основної регульованої величини $y(t)$ від заданого значення $u(t)$ та його перша похідна $\Delta\varepsilon$, а також перша Δz і друга $\Delta^2 z$ похідні допоміжної величини $z(t)$. У першому наближенні така структура відповідає ПІ-алгоритму по основній змінній $y(t)$ та ПД – алгоритму по допоміжній змінній $z(t)$.

Нейроконтролер в аналізованій системі реалізований у вигляді трьохшарової нейронної мережі з двома нейронами в прихованому шарі та шістьма синаптичними ваговими коефіцієнтами $W(w_1, w_2, \dots, w_6)$, які є налаштовувальними параметрами.

Розрахунок налаштувань параметрів традиційної АСК з диференціатором у випадку малої інертності допоміжного каналу $W_{\mu z}(s)$ може бути виконаний відомим аналітичним методом. Диференціатор $W_{\delta}(s)$ розраховується на заданий запас стійкості щодо передавальних функцій основного та допоміжного каналів $W_{\mu y}(s)/W_{\mu z}(s)$, а регулятор $W_p(s)$ – по передавальній функції еквівалентного об'єкта:

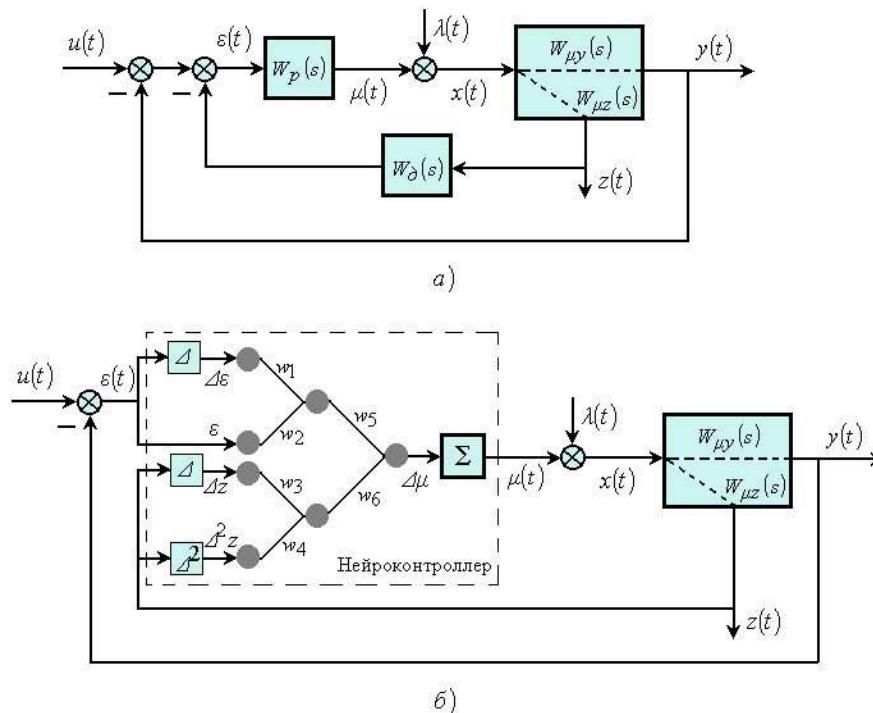


Рис. 3. Структурні схеми АСК: а) з диференціатором; б) з нейроконтролером

$$W_s^p(s) = W_{\text{цв}}(s) + W_{\text{цз}}(s) \cdot W_{\text{д}}(s).$$

Коли інерційність допоміжного каналу $W_{\text{цз}}(s)$ порівнюється з інертністю основного $W_{\text{цв}}(s)$, рекомендується ітераційна процедура виконання умов збіжності [4].

При такому підході в еквівалентному об'єкті для уточнення налаштувань диференціатора $W_{\text{д}}(s)$ з'являється замкнений контур і необхідність урахування налаштувань диференціатора на попередньому кроці ітераційної процедури, що позначається на збіжності й помітно ускладнює рішення задачі за рахунок збільшення числа розрахункових циклів.

У схемі з нейроконтролером розрахунок синаптичних коефіцієнтів аналітичними методами практично неможливий.

Необхідність пошуку глобального екстремуму за наявності великого числа локальних у подібних системах зростає зі збільшенням числа налаштовувальних параметрів. Складність обчислювальних процедур робить рішення подібних задач можливим лише із застосуванням алгоритмів числової оптимізації з використанням прийомів імітаційного моделювання.

Моделювання котла за допомогою нейронної мережі та ПІД-регулятора. Моделювання роботи АСК здійснювалося в середовищі Matlab Simulink, використовуючи пакет прикладних програм Neural Network Toolbox. Для реалізації нейроконтролера застосовувався регулятор на основі авторегресії з ковзним середнім.

Проектування нейроконтролера складається з двох етапів: етап ідентифікації керуючого об'єкта й етап синтезу закону керування. На етапі ідентифікації розробляється модель об'єкта у вигляді нейронної мережі, яка на другому етапі використовується для синтезу контролера.

Побудована модель котлоагрегату з використанням ПІД-регулятора та нейронної мережі в середовищі Matlab Simulink (рис. 4).

Процедура ідентифікації потребує задання таких параметрів, як розмір прихованого шару, що визначається кількістю використаних нейронів; такт дискретності в секундах, визначає інтервал між двома послідовними моментами зняття даних; кількість елементів запізнення на вході моделі; кількість елементів запізнення на виході моделі; нормування навчальних даних до діапазону [0 1].

За заданими параметрами навчальної послідовності здійснювалося навчання системи. Після чого проводиться тестування системи та валідація даних. Результати подано на рис. 5 і 6 відповідно.

Результати синтезу. Результати розрахунку оптимальних налаштувань параметрів для двох варіантів АСК представлені в таблиці 1.

Параметри нейроконтролера й регуляторів, використовувані в порівняннях, отримані виходячи з таких показників якості роботи алгоритмічної системи регулювання по кожному каналу:

- модульний інтегральний показник якості;
- ступінь затухання;
- динамічне відхилення;
- час регулювання.

Отримані перехідні процеси для АСК з різними регуляторами представлені на рис. 7.

Аналізуючи отримані результати, можна зробити висновок, що у випадку роботи АСК з нейроконтролером якість набагато краща, ніж в АСК з диференціатором. Це пов'язано з тим, що в структурі нейронної мережі присутні зворотні зв'язки, які істотно покращують якість регулювання.

Поєднання двох або більше інтелектуальних методів дає потужну систему високої ефек-

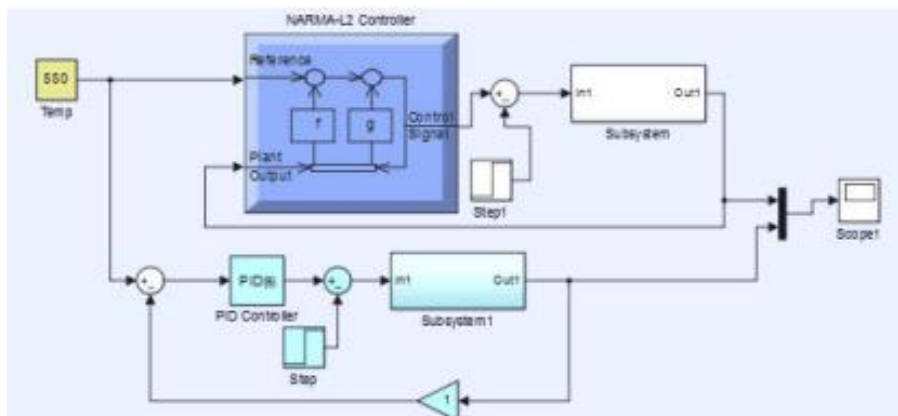


Рис. 4. Модель АСК котлоагрегату з використанням ПІД-регулятора та нейроконтролера

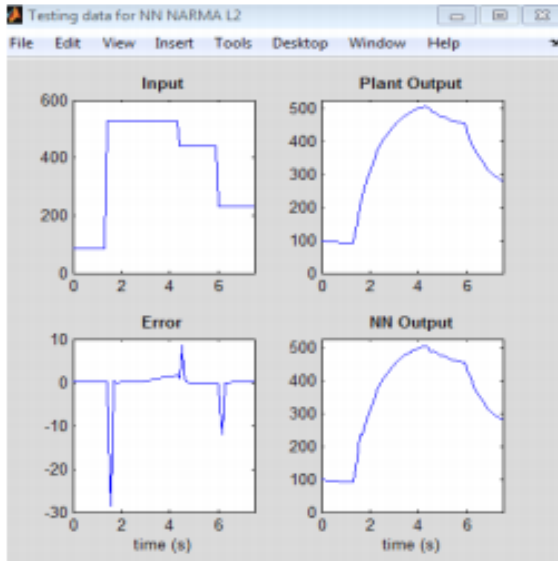


Рис. 5. Графік тестування даних

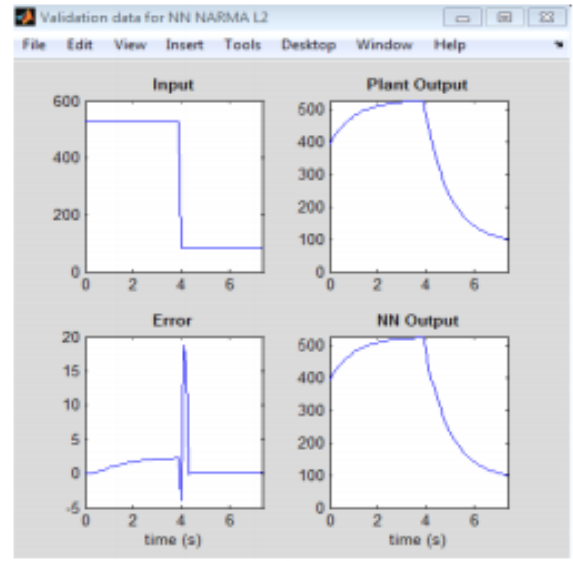


Рис. 6. Графік валідації даних

Таблиця 1

Результати розрахунку налаштувань параметрів АСК

Метод налаштування	Налаштовувальні параметри АСК з диференціатором				Інтегральні критерії для вхідного впливу $\lambda(t)=1$			
	$W_p(s)$		$W_\partial(s)$		$I_{M,\lambda}$	$I_{L,\lambda}$		
	K_p	K_{II}	K_∂	T_∂				
Третій метод	169.9	0.133	39.8	3.560	0.321	0.281		
Перший метод	3.5	3.000	29.4	0.927	1.582	1.079		
Другий метод	13.0	1.500	44.6	2.165	0.479	0.462		
Метод налаштування	Налаштовувальні параметри АСК з нейроконтролем						Інтегральні критерії для вхідного впливу $\lambda(t)=1$	
	w_1	w_2	w_3	w_4	w_5	w_6	$I_{M,\lambda}$	$I_{L,\lambda}$
Третій метод	-1.226	-0.172	0.185	0.022	-3.221	-4.510	0.301	0.253

тивності. Інтелектуальні методи дуже корисні в моделюванні та прогнозуванні складних систем, що мають нелінійність і невизначеність у своїх моделях.

Висновки. У статті розглянуто процеси регулювання температури пари прямооточного котлоагрегату з використанням новітніх способів керування. Запропоновано побудову АСК температури пари за допомогою нейроконтролера, який є перспективним регулятором за рахунок своєї легкості

в навчанні, більш кращими показниками якості регулювання порівняно зі стандартними АСК. Для підвищення якості регулювання варто розглядати додавання інформаційних входів нейронної мережі й додавання зворотних зв'язків у структурі нейронної мережі. Нейроконтролер у силу своїх особливостей може мати множину входів і виходів. Тому доцільною є перспектива використання нейронних мереж як регулятора для подібних систем.

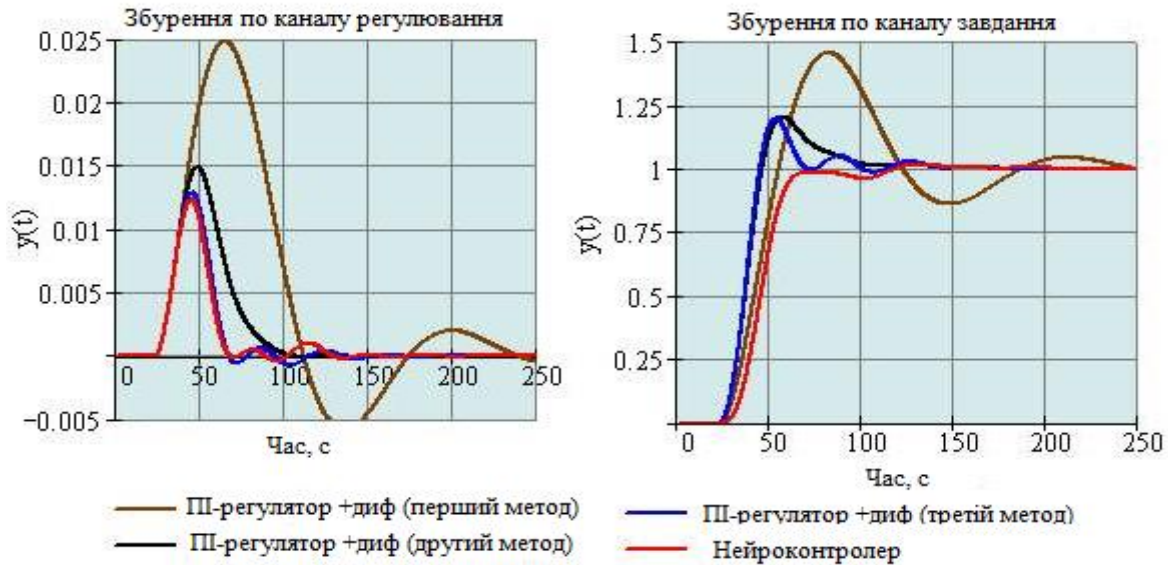


Рис. 7. Порівняння перехідних процесів з різними контролерами

Список літератури:

1. Vilanova R., Visioli A. PID Control in the Third Millennium. Lessons Learned and New Approaches. Springer. 2012. 599 p.
2. Коновалов М.А. Проблемы автоматизации инерционных теплоэнергетических объектов. Киев, 2009. 309 с.
3. Кононюк А.Ю. Нейронні мережі і генетичні алгоритми. Київ, 2008. 470 с.
4. Ковриго Ю., Баган Т., Бунке А. Обеспечение робастного управления в системах регулирования инерционными теплоэнергетическими объектами. *Теплоэнергетика*. 2014. № 3. С. 9–14.
5. Mamchur D., Yatsiuk R. Development of the pid-neurocontroller to compensate for the impact of damages and degradation of induction motor on operation of the electric drive system. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Vol. 5. № 2 (95). P. 66–77.
6. Кузнецов Б.І., Василець Т.Ю., Варфоломійєв О.О. Синтез нейрорегулятора Model Reference Controller для системи наведення і стабілізації. *Електротехніка і електромеханіка*. 2015. № 5. С. 47–54.
7. Баган Т.Г., Ремінна А.А. Використання нейронних мереж в автоматизації процесів. *Матеріали XVII Міжнародної науково-практичної конференції молодих вчених і студентів*. 2020. С. 27.
8. Баган Т.Г., Кузін М.Ю. Нечіткий динамічний коректор для об'єктів із параметричною нестационарністю. *Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова*. 2020. № 1. С. 61–67.

Bahan T.H., Boun V.P., Reminna A.A. DESIGN OF AUTOMATIC CONTROL SYSTEM OF DIRECT-FLOW BOILER STEAM TEMPERATURE USING A NEUROCONTROLLER

The article deals with the synthesis of the system of automatic control of superheated steam temperature of a direct – flow boiler unit. The aim of the work is to develop a neural network to take into account the basic connections and control the boiler circuits using a neural network.

This automatic control system is a complex non-stationary system with cross-links. In addition, the position of the starting point of overheating can vary depending on many factors, in particular, steam productivity, the amount of incoming heat, the consumption of feed water. Controller's structure built using a neural network to improve the quality of operation. It is found that it is a recurrent neural network with one feedback that gives the best quality of regulation, and the required number of neurons is equal to six. Simulation of this control system was performed in the Matlab Simulink environment, using the application package Neural Network Toolbox. To implement the neurocontroller, a regulator based on autoregression with a moving average. According to the set parameters of the training sequence, the system was trained. After that, system testing and data validation were performed.

The analysis of the simulation results showed that the proposed approach to superheated steam temperature control improves the quality of the system functioning according to the main quality indicators in comparison with the use of classical structures with PID controllers. This is because there is feedback in the structure of the neural network, which significantly improves the quality of regulation. Due to its features, the neurocontroller can have multiple inputs and outputs. Therefore, it is advisable to use neural networks as a regulator for such systems. Intelligent methods are useful in modeling and predicting complex systems that have nonlinearity and uncertainty in their models.

Key words: *direct-flow boiler, control system, neural network, neurocontroller.*