

УДК 681.5.015

В.С. Михайленко, Р.Ю. Харченко

СИНТЕЗ НЕЙПРОМЕРЕЖЕВОЇ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ РІВНЯ ВОДИ В БАРАБАНИ КИП'ЯКА ЕНЕРГОБЛОКА ТЕС

The purpose of this paper is synthesis of intellectual automatic control system (ACS) of the water level of drum boiler unit based on the theory of neural networks. We develop a mathematical model of the research object. Analysis of the transients quality under different operating boiler shows that the traditional ACS has significant drawbacks associated with significant regulation time and the first rejection. To improve the traditional ACS and its efficiency, we propose to use a neural network approach to control. We synthesize a neural network controller (NNC) trained to determine the optimal control actions to compensate for the deep disturbances caused by peaks and adjusting modes of power. To test the proposed solutions in the program MatLab (Simulink, NT) computer experiments are conducted to develop and to test a neural network control system. Analysis of the transients quality when conducting an experiment to determine the robustness and stability of the NNC in the deep impact of external and internal disturbances, advantages of adaptive neural network system compared to the traditional combined one, requires a period of adaptation.

Вступ

Теплові електричні станції (ТЕС) з паровими барабанними котлами становлять понад 53 % сумарної встановленої потужності енергетичної системи України [1]. Енергоблоки сучасних електростанцій працюють у складі потужних енергосистем, які включають десятки електростанцій (теплових, атомних, гідравлічних). Особливістю паралельної роботи генераторів змінного струму є те, що в сталих режимах всі вони обертаються синхронно з однаковою частотою, тобто частота в будь-якій точці системи, на шинах будь-якого генератора – однакова. В цих умовах зміна потужності будь-якого енергоблока, здійснювана зміною підведення пари до турбіни, виявляється величиною малою порівняно із загальною потужністю всіх електростанцій системи, і тому вона не може значно вплинути на частоту в енергосистемі, а отже, і на частоту обертання ротора цієї турбіни при роботі в базовому режимі. Проте в регульовальному або маневреному режимах виникає протилежна ситуація. Так, на думку президента НАН України Б. Патона і член-кореспондента НАН України А. Халатова добові перепади навантаження негативно впливають на роботу застарілих українських ТЕС і можуть призвести до виходу з ладу всієї енергосистеми України. На їхню думку, для поліпшення ситуації частину енергогенеруючих потужностей українських ТЕС слід перевести на технологію, добре пристосовану до маневреного режиму, який передбачає різку зміну навантаження [1]. Таким чином, пошук і створення нових наукових рішень з підвищення рівня управління

ТЕС в маневрених режимах є важливою виробничою проблемою.

У низці публікацій з автоматичного управління теплоенергетичними процесами ТЕС [2–5] показано, що розроблення алгоритмів функціонування типових ПІ і ПІД-регуляторів зазвичай передбачає опис моделей об'єкта системами звичайних диференціальних рівнянь. Проте у складних технологічних процесах енергоблоків регульовального режиму є транспортні запізнення і розподілені параметри. Додаткові проблеми висуває і вимога врахування запасу стійкості або робастності до критеріїв прийнятності функціонування систем управління. Як наслідок, більша частина традиційних адаптивних активних і пасивних методів, які використовуються в САУ ТП (табличний, формульний, Циглера–Ніколса, згасаючих коливальних і т.д.) [6–8] виявляються недостатньо оптимальними, відрізняються тривалістю процесів ідентифікації та розрахунку оптимальних параметрів регуляторів, нездатністю до самонавчання, погіршенням якості управління в процесі адаптації. Проте останнім часом зростає інтерес до інтелектуального управління [9], а впровадження нейрорегуляторів у низці складних зарубіжних виробничих систем дало можливість досягти оптимальних результатів порівняно з типовими системами САУ і САР ТП [10].

Постановка задачі

В умовах наявності неоптимальних класичних адаптивних методів стає актуальним завдання пошуку нових наукових підходів у сфері управління процесами енергоблоків ТЕС, діючих у регульовальних режимах. Мета роботи –

синтез інтелектуальної системи автоматичного регулювання (САР) рівня води барабанного котла енергоблока, яка діє на основі теорії нейронних мереж.

Розроблення математичної моделі об'єкта дослідження

Одним з ключових параметрів барабанних котлів великої потужності на енергоблоках ТЕС є рівень води. Прийнято, що максимально допустимі відхилення рівня води в барабані становлять до 100 мм середнього значення [5]. Зниження рівня до місця приєднання відпускних труб циркуляційного контуру може призвести до порушення живлення і охолодження водою підйомних труб. Наслідком цього є порушення міцності труб у місцях стикування з корпусом барабана, а в аварійному випадку – перепал. Надмірне підвищення рівня може призвести до зниження ефективності пристроїв всередині барабана та передчасного заносу солями пароперегрівача. Переливання котла водою і закидання солями частинок води в турбину є причиною механічних пошкоджень її ротора і лопаток. Відхилення рівня води в барабані від заданого значення пов'язане з наявністю дисбалансу між припливом живильної води і витратою пари, яка відбувається також внаслідок зміни складу пари в пароводяній суміші підйомних труб за рахунок коливань тиску пари в барабані або зміни теплосприйняття випарних поверхонь нагрівання.

Побудова математичної моделі досліджуваного об'єкта, який не володіє властивістю самовирівнювання, виконується відповідно до рекомендацій у [5, 6]. Передавальна функція об'єкта за каналами регулювання "витрата живильної води–рівень" і зовнішнього збурення "витрата пари–рівень" має такий вигляд:

$$W(s) = \frac{k_u}{s} e^{-\tau s},$$

тобто являє собою послідовне з'єднання ланки запізнювання й інтегральної ланки.

Динамічні властивості зазначених об'єктів характеризуються двома величинами: запізненням τ і коефіцієнтом пропорційності інтегральної ланки k_u . З огляду на аналізи досліджень з вивчення динамічних моделей, наведених у працях [2, 3], зміни рівня в барабанах котлів ТЕС і ТЕЦ та експериментальні дані парового котла БКЗ 320-140 [2] прийнято такі передавальні

функції: $W_{D-h}(s) = \frac{0,28}{27s} e^{-4s}$ – канал регулювання, $W_{G_{п.в.}-h}(s) = \frac{-0,027}{37,6s} e^{-25s}$ – канал зовнішнього збурення.

Застосовувану нині схему регулювання рівня в барабанах котлів наведено на рис. 1, а. На вхід регулятора рівня (РР) подається, крім сигналу про зміну рівня в барабані h_b^3 (основної регульованої величини), зважена сума сигналів по витраті живильної води $G_{п.в.}$ (допоміжної регульованої величини) і по витраті перегрітої пари з котла $G_{п.п.}$ (збурюючого впливу). Таким чином, інформаційна структура (рис. 1, б) розглянутої системи регулювання поєднує в собі структуру системи регулювання з допоміжною регульованою величиною і системи з компенсацією збурення. Призначення сигналу від допоміжної регульованої величини полягає в усуненні впливу збурень, що йдуть з боку живильного клапана (самовільної зміни витрати живильної води, зумовленою зміною тиску води в живильній магістралі), призначення сигналу від збурення – усунення впливу парового навантаження котла.

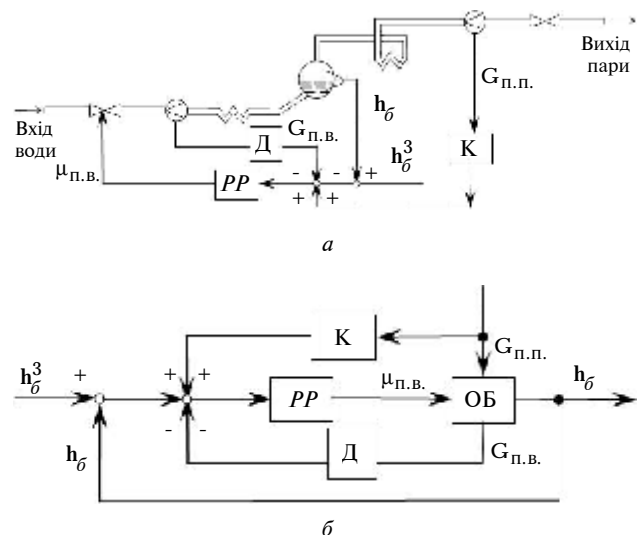


Рис. 1. Схеми комбінованої САР із введенням похідної, де К – компенсатор збурення, Д – диференціатор; h_b – рівень води; ОБ – об'єкт; а – схема регулювання рівня в барабанах котлів, б – її інформаційна структура

Необхідність застосування порівняно складної системи регулювання зумовлена наявністю в сучасних котлах високого тиску своєрідного ефекту "скипання" рівня. Спробуємо пояснити сутність цього явища. Нехай в якийсь момент часу

регулятор турбіни відкриває клапан підведення пари до турбіни, збільшуючи витрати перегрітої пари з котла $G_{п.п.}$. Це мало б призвести до падіння рівня води в барабані котла, однак насправді спочатку рівень швидко зростає (“скапає”) і лише через деякий час починає змінюватися в “правильному” напрямку (зменшуватися). Пояснюється це тим, що в екранних трубах і барабанах котлів високого тиску знаходиться не вода, а пароводяна суміш, обсяг якої залежить від тиску. Збільшення відкриття клапана турбіни призводить до негайного падіння тиску над поверхнею випаровування в барабані, обсяг пароводяної суміші збільшується, що проявляється в тимчасовому збільшенні рівня. Аналогічне явище, але в іншому напрямку, відбувається при зменшенні ступеня відкриття клапана турбіни.

Отже, ефект “скапання” рівня при відсутності в системі регулювання сигналу по витраті пари призвів би до включення РР в хибному напрямку (при збільшенні навантаження він почав би зменшувати підведення живильної води в котел і на-

впаки, при зменшенні навантаження – збільшувати); і хоча через деякий час після зникнення ефекту “скапання”, він почав би працювати в правильному напрямку, виправити наслідки початкової неправильної роботи вже не вдалося б. Введення компенсуючого сигналу по витраті пари усуває можливість помилкових дій регулятора. Тобто у системі регулювання рівня води в барабані котла поряд з допоміжною регульованою величиною – витратою живильної води, є компенсуюча дія від зміни витрати пари з котла. Розглянемо детальніше цю систему з точки зору аналізу стійкості комбінованої САР до впливу випадкових збурень (сигнальних, внутрішніх і зовнішніх).

Передавальна функція компенсатора збурень, виходячи з рекомендацій [6], визначається формулою

$$K_k(s) = K_{об} \frac{T_u s (T_{об} s + 1)}{(T_u s + 1) (f \cdot T_{об} s + 1)}, \quad (1)$$

де f – коефіцієнт демпфірування, рівний 0,1; $K_{об}$ – коефіцієнт передачі об'єкта; T_u – по-

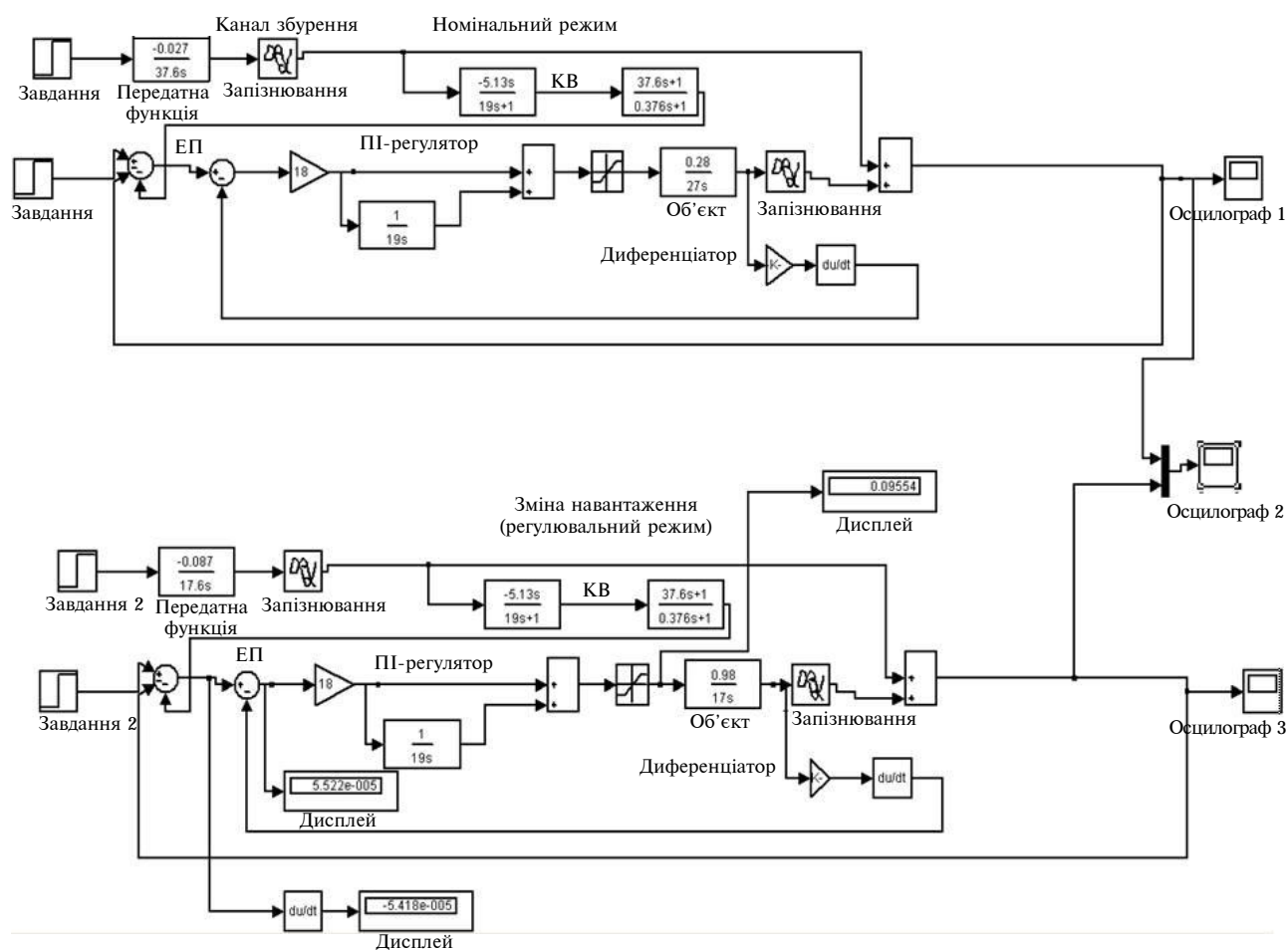


Рис. 2. Комп'ютерні моделі комбінованої САР рівня води в барабані котла; КВ – компенсатор збурень; ЕП – елемент порівняння

стійна інтегрування; s – оператор Лапласа. Виходячи з (1) для досліджуваного об'єкта передавальна функція K має вигляд

$$K_k(s) = \frac{-5,13s(37,6s + 1)}{(19s + 1)(0,376s + 1)}$$

Експериментальну апробацію досліджуваної комбінованої САР при номінальному і регульовальному режимах (зміна значень параметрів об'єкта при впливі параметричного збурення) роботи наведено на рис. 2. Перехідні процеси САР при різних режимах роботи парового котла показано на рис. 3.

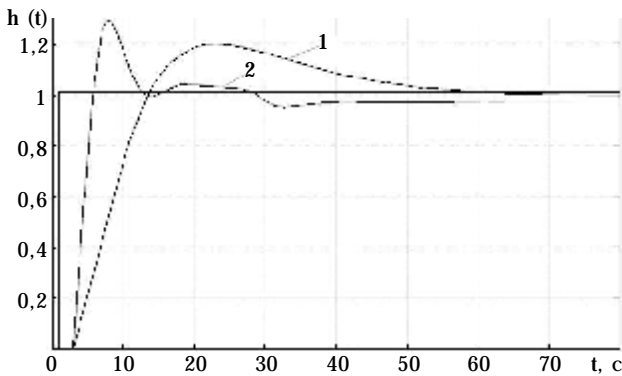


Рис. 3. Перехідні процеси САР рівня за каналом завдання (дія східчастого одиничного сигналу): 1 – номінальний режим; 2 – регульовальний режим

Аналіз показників якості процесу регулювання свідчить, що САР задовольняє задані технологічні критерії, але високе перше відхилення $h_1 = 0,3$ і наявність залишкової помилки $\Delta = 0,02$ за каналом завдання вказують на можливе передчасне зношення труб у місцях стикування з корпусом барабана.

Синтез нейромережевої САР

Для вдосконалення традиційної САР та підвищення її ефективності, тобто поліпшення показників якості перехідних процесів при впливі глибоких зовнішніх і внутрішніх збурень, і для відмови від використання недостатньо ефективних традиційних методів адаптації, тому ми пропонуємо використовувати нейромережевий підхід в управлінні складними об'єктами. Рекомендовано використовувати нейромережевий регулятор (НМР), навчений визначати оптимальні керувальні дії для компенсації глибоких випадкових збурень (рис. 4), викликаних піковими змінами навантаження енергоблоків.

Навчальна вибірка (значення помилки e і оптимального керуючого сигналу u – напруги

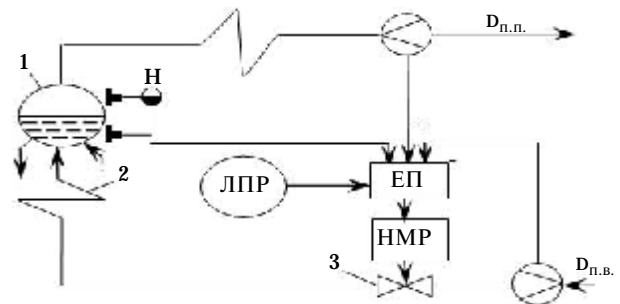


Рис. 4. Структурна схема нейромережевої САР рівня води в барабані котла: 1 – барабан котла; 2 – водяний економайзер; 3 – регульовальний орган; ЛНР – оператор; НМР – нейромережевий регулятор; $D_{п.п.}$ – витрата перегрітої пари; $D_{п.в.}$ – витрата живильної води; H – рівень води

на двигун – змінює положення регулюючого органа (3) накопичується внаслідок комп'ютерних експериментів (див. рис. 2) по параметричних збуреннях і відповідній традиційній адаптації ПІ-регулятора (таблиця).

Таблиця. Фрагмент навчальної вибірки

e	0,7	0,8	0,11	0,12	0,15
u	0,45	0,5	0,7	0,72	0,89

Навчання НМР відбувалося за методом зворотного розповсюдження помилки в режимі реального часу [12] при варіюванні значень передавальних функцій об'єкта за каналами регулювання та збурення в діапазонах: коефіцієнта пропорційності $K_{об} \in [0,1...1,5]$; постійної інтегрування $T_{об} \in [7...190]$; часу запізнювання $\tau_{об} \in [0,5...25]$; коефіцієнта підсилення $K_N \in [-0,017...-0,087]$; постійної часу $T_N \in [5...55]$; запізнювання по каналу зовнішнього збурення $\tau_N \in [1...35]$.

На підставі вибірки і рекомендацій [11, 13] у програмі Matlab (Neural Network Toolbox) була розроблена лінійна одношарова нейронна мережа архітектури прямого поширення без зворотних зв'язків та з лінійною функцією активації [13] (рис. 5).

Комп'ютерний експеримент з апробації синтезованої нейромережевої системи регулювання наведено на рис. 6. Експеримент був виконаний у програмі MatLab (Simulink) [11]. Передавальні функції об'єкта за каналами зовнішнього збурення та регулювання при зміні режиму роботи енергоблока мають такий вигляд: $W_{D-h}(s) = \frac{0,5}{187s} e^{-25s}$,

$W_{Gn-h}(s) = \frac{-0,037}{27,6s} e^{-20s}$. Під час дії глибокого

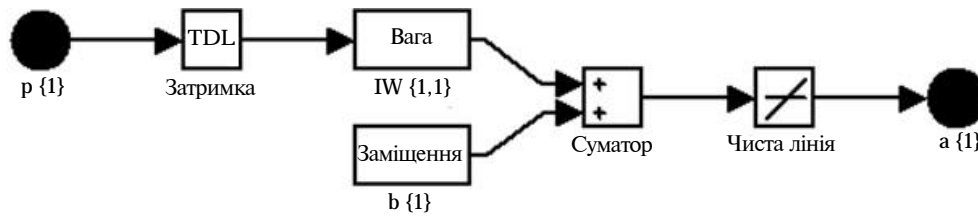


Рис. 5. Структура НМР

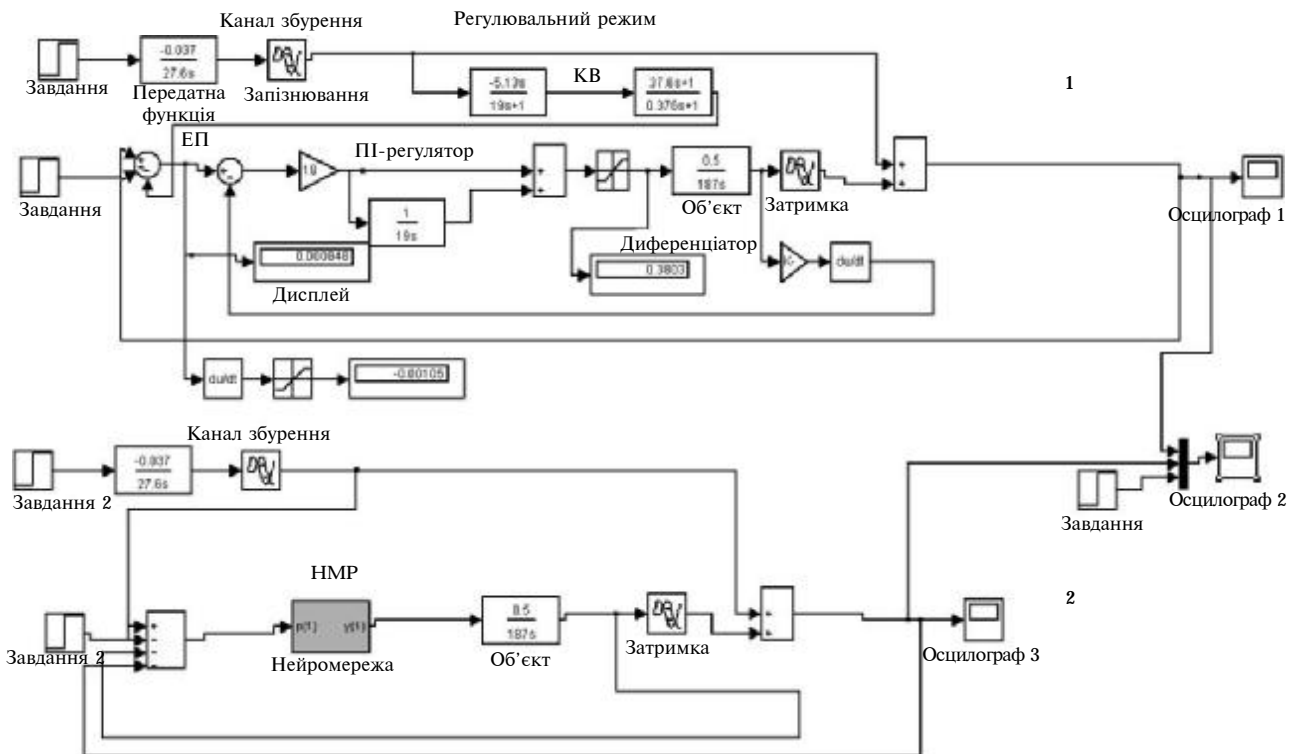


Рис. 6. Комп'ютерні моделі САР: 1 – традиційної, 2 – нейромережевої

зовнішнього збурення (регулювальний режим енергоблока) передатна функція каналу збурення має такий вигляд: $W_{Gn-h}(s) = \frac{-0,17}{37,6s} e^{-10s}$.

Аперіодичні перехідні процеси синтезованих САР при дії найбільш несприятливих збурень (глибоке розвантаження або провал енергоблока) наведено на рис. 7 (криві 1, 2). Аналіз показників якості САР вказує на перевагу адаптивної нейромережевої системи автоматичного регулювання (перше відхилення $h_1 = 0,25$, час регулювання $T_p = 40$ с) порівняно з традиційною комбінованою системою автоматичного регулювання ($h_1 = 0,5, T_p = 180$ с). Також при проведенні експерименту з визначення робастності НМР у процесі впливу глибокого зовнішнього збурення (рис. 7, криві 3, 4) нейромережева САР продемонструвала аперіодичний процес з

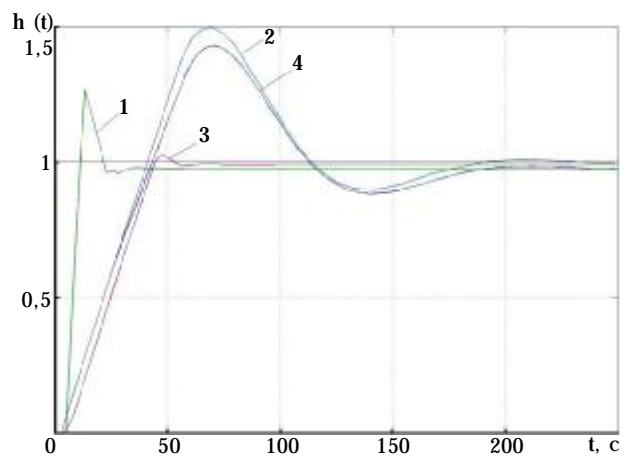


Рис. 7. Перехідні процеси САР рівня води в барабані котла за каналом завдання ($h_z = 1$) при дії параметричних збурень: 1 – нейромережева САР, 2 – традиційна; зовнішніх збурень (зміни навантаження): 3 – нейромережева, 4 – традиційна

$T_p = 60$ с, на відміну від традиційної САР з ПІ-регулятором, який потребує проведення адаптації.

Таким чином, запропонована нейромережева адаптивна САР успішно компенсує найбільш глибокі зовнішні та внутрішні збурення, а її впровадження на підприємствах ПЕК дасть можливість отримати істотний економічний ефект, пов'язаний з економією енергоресурсів, а саме: з роботою двигунів регулюючих органів, що здійснюють більше 3000 обертів за зміну, – та сприяє підвищенню строків експлуатації обладнання всередині котлів.

Висновки

Синтезовано нейромережеву САР рівня води в барабані котла, яка відрізняється кращими показниками якості управління порівняно з традиційною комбінованою САР в умовах, коли енергоблок бере участь у покритті змінної складової навантаження енергосистеми і в сталих режимах при номінальному значенні навантаження.

Алгоритми управління, засновані на нейронних мережах і нечіткій логіці, можуть бути легко реалізовані на апаратних засобах паралельної обробки, що забезпечує високу швидкість САР.

Проведене дослідження показало, що підхід на основі теорії нейронного управління забезпечує стійкість при впливі глибоких збурень. Хоча нейроконтролери мають добрі характеристики і певні переваги перед контролерами традиційних типів, можна стверджувати, що вони не здатні враховувати досвід і знання експертів-технологів і наладників САР, до того ж, процес навчання є складною і багатоетапною процедурою. Тому аналіз і розроблення ще більш ефективних, простих для розуміння персоналу, та надійних схем управління просто необхідне. Цьому має сприяти виявлення кращих сторін і характеристик систем управління різних класів, наприклад нейронечітких або гібридних технологій.

1. Патон Б., Халатов А. Помогут ли газовые турбины преодолеть проблемы энергосистемы Украины? // Зеркало недели. – № 47, 13 декабря 2008 г.
2. Аракелян Э.К. Методика выбора оптимальных параметров и режимов работы оборудования энергоблоков на частичных нагрузках // Теплоэнергетика. – 2002. – № 4. – С. 66–69.
3. Иванов В.А. Регулирование энергоблоков. – Л.: Машиностроение, 1982. – 164 с.
4. Мадоян А.А., Аракелян Э.К., Макарян В.А. Влияние участия энергоблоков ТЭС в регулировании мощности и частоты на эффективность их работы // Теплоэнергетика. – 2005. – № 4. – С. 39–43.
5. Плетнев Г.П. Автоматизированное управление объектами тепловых электростанций. – М.: Энергоиздат, 1981. – 368 с.
6. Ротач В.Я. Теория автоматического управления. – М.: МЭИ, 2004. – 400 с.
7. Ротач В.Я. Настройка регуляторов модифицированным методом Циглера-Николса // Промышленные контроллеры АСУ. – 2008. – № 2. – С. 38–42.
8. Ротач В.Я. Автоматизированная настройка ПИД-регуляторов: экспертные и формальные методы // Теплоэнергетика. – 1995. – № 10. – С. 23–28
9. Методы робастного, нейро-нечеткого и адаптивного управления: Учеб. / Под ред. Н.Д. Егупова. – Изд. 2-е. – М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2002. – 744 с.
10. Рутковская Д., Пилинский М., Рутковский Л. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы. – М.: Горячая линия – Телеком, 2006. – 383 с.
11. Дьяконов В.П. Simulink 5/6/7. Самоучитель. – М.: ДМК, 2008. – 782 с.
12. Руденко О.Г., Бодянский Є.В. Штучні нейронні мережі: Навч. посібник. – Харків: ТОВ "Компанія СМІТ", 2006. – 404 с.
13. Медведев В.С., Потемкин В.Г. Нейронные сети. MATLAB 6. – М.: Диалог-МИФИ, 2002 – 496 с.

Рекомендована Радою
теплоэнергетичного факультету
НТУУ "КПІ"

Надійшла до редакції
16 травня 2012 року