

Харківський національний університет радіоелектроніки

Ляшенко Олексій Сергійович

УДК 681.513.1

**СИНТЕЗ СИСТЕМ НЕЙРОКЕРУВАННЯ ДИФУЗІЙНОЮ
УСТАНОВКОЮ ЦУКРОВОГО ВИРОБНИЦТВА НА ОСНОВІ
РАДІАЛЬНО-БАЗИСНИХ МЕРЕЖ**

05.13.07 – автоматизація процесів керування

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2010

Дисертацією є рукопис

Роботу виконано в Харківському національному університеті радіоелектроніки Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор **Руденко Олег Григорійович**, Харківський національний університет радіоелектроніки, завідувач кафедри електронних обчислювальних машин, м. Харків.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор **Невлюдов Ігор Шакірович**, Харківський національний університет радіоелектроніки, завідувач кафедри технології та автоматизації виробництва радіоелектронних та електронно-обчислювальних засобів;

доктор технічних наук, професор **Мегель Юрій Євгенович**, Харківський національний технічний університет сільського господарства ім. П. Василенка, професор кафедри кібернетики.

Захист відбудеться “20” жовтня 2010 р. о 15 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.052.08 у Харківському національному університеті радіоелектроніки за адресою: 61166, м. Харків, пр. Леніна, 14.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Харківського національного університету радіоелектроніки за адресою: 61166, м. Харків, пр. Леніна, 14.

Автореферат розісланий “___” вересня 2010 р.

Вчений секретар спеціалізованої вченої ради

І. П. Плісс

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Сучасне цукрове виробництво являє собою складний і енергоємний процес. Технічний прогрес в цукровій промисловості пов'язаний з розробкою і впровадженням нових технологій та автоматизованої техніки, метою яких є досягнення високих техніко-економічних показників виробництва за рахунок зменшення втрат кінцевого продукту, витрат сировини, палива і енергії.

Аналіз схеми виробництва цукру показує, що основним відділенням, яке задає і визначає кількість перероблених цукрових буряків, є дифузійне відділення. Головними вимогами до системи автоматизації цього відділення є створення умов для найповнішого отримання цукру з стружки, одержання дифузійного соку заданої концентрації, забезпечення заданої продуктивності дифузійної установки (ДУ) з одночасним забезпеченням максимальної економічності процесу. Оскільки цей об'єкт є багатозв'язним, для управління ним використовуються багатовимірні оптимальні П, ПП і ППД-регулятори, побудовані на основі лінійних моделей у просторі станів. Однак існуючі системи автоматизації не забезпечують необхідної якості соку на виході ДУ, а недостатня точність підтримки технологічного режиму призводить до збільшення витрат енергоносіїв.

У зв'язку з цим для вирішення задачі оптимізації роботи ДУ доцільно застосовувати методи адаптивного керування, в яких здійснювана в реальному часі ідентифікація дозволяє оцінити зміну характеристик процесів, що приводить до корекції алгоритму керування і в кінцевому результаті - до підвищення якості продукту. При цьому найбільш ефективною уявляється розробка систем керування на основі адаптивного підходу в поєднанні з методами обчислювального інтелекту, зокрема, з методами теорії штучних нейронних мереж (ШНМ).

Зв'язок роботи з науковими програмами, темами, планами. Тема дисертаційної роботи і отримані результати відповідають проблематиці держбюджетної теми №ДР0101U001762 «Розробка теоретичних основ та математичного забезпечення нейро-фаззі систем ранньої діагностики, прогнозування та моделювання в умовах апріорної і поточної невизначеності», яка виконувалась у Харківському національному університеті радіоелектроніки, та госпдоговірної теми №ДР01080001352 «Розробка математичного, програмного і технічного забезпечення АСУ ТП при виробництві цукрової продукції», що виконувалася в Харківському національному технічному університеті сільського господарства ім. П. Василенка, в яких автор брав участь як виконавець.

Мета і завдання дослідження. Метою даної роботи є синтез нейромережного керування технологічними процесами для підвищення техніко-економічних показників діяльності цукрового заводу.

Для досягнення цієї мети в роботі вирішуються основні завдання:

1. Аналіз дифузійної установки як об'єкта автоматичного керування і дослідження існуючих систем керування цією установкою.
2. Розробка методів побудови нейромережних моделей ДУ на основі статичних і динамічних нейронів.
3. Синтез нейромережних предикторних ПД-регуляторів для керування ДУ.
4. Синтез спрощених процедур непрямого нейромережного керування ДУ на основі радіально-базисних мереж (РБМ) нульового і першого порядку.
5. Імітаційне моделювання отриманих в роботі нейромережних структур ідентифікації та керування, вирішення практичних завдань.

Об'єкт дослідження – безперервні технологічні процеси дифузійного відділення.

Предмет дослідження – адаптивні нейромережні методи ідентифікації та керування технологічними процесами цукрового виробництва.

Методи дослідження. При виконанні дисертаційної роботи були застосовані методи теорії автоматичного керування та теорії ідентифікації, за допомогою яких вивчено лінійні моделі досліджуваних процесів; методи теорії адаптивних систем, які дозволили синтезувати непрямі методи керування ДУ; методи теорії штучних нейронних мереж, за допомогою яких були синтезовані нейромережні моделі та отримані процедури їх навчання; методи теорії оптимізації, за допомогою яких отримано швидкодіючі та стійкі процедури навчання. Експериментальні дослідження були проведені в лабораторних умовах та на реальних об'єктах.

Наукова новизна результатів дисертаційної роботи. Наукова новизна результатів, отриманих під час виконання дисертаційної роботи, полягає в наступному:

- вперше отримані співвідношення, які описують кусково-лінійну апроксимацію базисних функцій (БФ), що дозволяє суттєво спростити процедуру навчання та скоротити тривалість процесу навчання ШНМ;
- вперше отримані процедури непрямого нейромережного керування на основі РБМ нульового і першого порядку з апроксимацією базисних функцій, застосування яких дозволяє спростити реалізацію нейромережних регуляторів і підвищити якість процесу керування;
- отримали подальший розвиток методи визначення структури нейромережної ARX-моделі, яка на відміну від відомих описує нестационарні технологічні процеси ДУ і використовує UDU^T розкладання коваріаційної матриці спостережень, що дозволило отримати ефективні процедури послідовної корекції порядку моделі;
- отримали подальший розвиток методи побудови нейромережних моделей на основі динамічних нейронів на відміну від відомих, що забезпечує

підвищення адекватності синтезованих нейромережних моделей реальним технологічним процесам;

- отримали подальший розвиток методи побудови нейромережних і нейромережних предикторних ПД-регуляторів, застосування яких дозволяє поліпшити якість керування нестационарними технологічними процесами в цукровому виробництві.

Практичне значення одержаних результатів. Результати дисертаційної роботи були використані при розробці систем керування безперервними технологічними процесами в дифузійному відділенні ТОВ "Кириківський цукровий завод", що підтверджено відповідним актом про впровадження результатів дослідження від 20.05.2009 р. Також положення, висновки і рекомендації дисертаційної роботи використані в учбовому процесі на кафедрі ЕОМ Харківського національного університету радіоелектроніки в курсах «Цифрові системи керування», «Моделювання систем» і «Нейронні обчислювальні структури», що підтверджено відповідним актом про впровадження результатів дослідження від 5 січня 2010 р.

Особистий внесок здобувача. Основні результати отримані особисто автором. У роботах, написаних із співавторами, здобувачу належать: в [1] - синтез процедури керування нелінійним динамічним об'єктом; в [2,3] - розробка процедур навчання нейромережних моделей; в [4] - дослідження процедури навчання нейромережної моделі при наявності перешкод вимірювань; в [6] - аналіз ефективності АСУ ТП цукрового виробництва; в [8] - синтез прогнозної нейромережної моделі нестационарного технологічного процесу; в [9] - аналіз нейромережного керування дифузійним відділенням цукрового виробництва; в [10] - розробка процедур керування на основі кусково-лінійної апроксимації базисних функцій РБМ; в [11] - аналіз існуючих систем керування технологічними процесами цукрового виробництва; в [12] - аналіз ефективності застосування РБМ нульового та першого порядків для побудови моделей нелінійних динамічних об'єктів.

Апробація результатів дисертації.

Основні результати дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на 7-й, 8-й, 11-й науково-технічних конференціях «Інформаційні технології в освіті та управлінні» (Н.Каховка, 2005, 2006, 2009), на 7-й Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні інформаційні та електронні технології» (Одеса, 2006), на 7-й, 9-й Міжнародних науково-технічних конференціях «Проблеми інформатики і моделювання» (Харків, 2007, 2009), на 2-й Міжнародній науковій конференції «Сучасні інформаційні системи. Проблеми і тенденції розвитку» (Харків-Туапсе, 2007), на 11-му Міжнародному молодіжному форумі "Радіоелектроніка та молодь в ХХІ сторіччі" (Харків, 2007), Міжнародній науково-технічній конференції «Сучасні методи, інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем управління організаційно-технічними комплексами» (Київ, 2009), Міжнародній науково-

технічній конференції “Автоматизація: проблеми, ідеї, рішення” (Севастополь, 2009).

Публікації. За темою дисертаційної роботи опубліковано 17 наукових праць, з них: 11 статей в наукових фахових виданнях, перелік яких затверджений ВАК України, 6 публікацій у збірниках матеріалів та тез доповідей на міжнародних наукових конференціях і форумах.

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та двох додатків. Загальний обсяг дисертації складає 185 (з них 159 сторінок основного тексту), 55 рисунків (з них 29 на окремих сторінках), 1 таблиця і 2 додатки на 8 сторінках, список використаних джерел з 109 найменувань на 12 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність дисертаційної роботи, сформульовано основну мету і завдання досліджень, наведено відомості щодо зв'язку обраного напрямку досліджень із планами організації, де виконана робота. Надано стислу анотацію отриманих у дисертації рішень, відзначено їхню практичну цінність, наведено дані щодо використання результатів проведених досліджень у цукровому виробництві.

У **першому розділі** здійснено опис роботи сучасного цукрового виробництва та проведено аналіз проблем керування технологічними процесами ДУ.

Дифузійне відділення є одним з основних, яке задає та визначає кількість перероблених цукрових буряків. Аналіз його роботи показав, що однією з основних задач при розробці автоматизованої системи керування ДУ є підтримання заданого температурного режиму. Нормальна робота цього відділення обумовлюється регулюванням заданих параметрів та співвідношень, що входять до процесу дифузії.

При побудові математичної моделі ДУ, яка складається з чотирьох зон з однією паровою камерою, зазвичай приймають ряд припущень (ідеальність теплоізоляції та теплоємності дифузійного соку тощо), які дозволяють отримувати лінеаризовані рівняння теплообміну для всіх параметрів сокостружкової суміші та парової ємності, виходячи з рівнянь матеріального балансу.

Перехід від опису процесу диференціальними рівняннями з розподіленими параметрами до моделей у вигляді опису в просторі станів зі стаціонарними параметрами дозволяє синтезувати закони керування в деякій компромісній точці. Для оптимізації ж системи в декількох точках необхідною є корекція параметрів регуляторів у зв'язку зі зміною робочих умов. Використання лінійних та стаціонарних моделей на практиці призводить до того, що існуючі

системи автоматизації не забезпечують необхідної якості соку на виході ДУ, а недостатня точність підтримки технологічного режиму є причиною збільшення витрат енергоносіїв.

Це визначило зміст здійсненого в дисертаційній роботі аналізу перспективних напрямків модернізації системи автоматизованого керування технологічними процесами ДУ на основі використання адаптивного підходу в поєднанні з методами обчислювального інтелекту, зокрема, з методами теорії штучних нейронних мереж. Поєднання гарних апроксимуючих властивостей зі здатністю швидко навчатися обумовлює використання ШНМ в задачах керування нелінійними нестационарними динамічними об'єктами в реальному часі.

В роботі проведено аналіз існуючих методів нейрокерування, які базуються на використанні нейромоделей і потребують для своєї реалізації різної кількості інформації. Аналіз властивостей статичних та динамічних ШНМ показав, що внаслідок простоти архітектури та наявності добре розвинутих методів навчання, найбільш доцільним є використання статичної радіально-базисної мережі.

На підставі проведеного аналізу особливостей ДУ як об'єкта автоматизованого керування сформульовано задачі наукового дослідження.

Другий розділ присвячено дослідженню властивостей РБМ при моделюванні та керуванні технологічними процесами дифузійного відділення.

РБМ здійснюють апроксимацію нелінійного оператора досліджуємого об'єкта $f(x)$, яка реалізується нейронами з БФ – нелінійними функціями $\Phi(x, \mu)$, що залежать тільки від відстані (радіальної) $r = \|x - \mu\|$, де x – вектор незалежних змінних; μ – вектор постійних параметрів (центрів БФ).

Розглянуто РБМ нульового та першого порядків, які описуються відповідно співвідношеннями

$$f(x) = \sum_{i=0}^N w_i \varphi_i(x, \mu), = w^T \varphi(x, \mu),$$

$$f(x) = (w + x^T V^T)^T \varphi(x, \mu),$$
(1)

де $w = (w_1, w_2, \dots, w_N)^T$ – вектор ваг; $x = (x_1, x_2, \dots, x_M)^T$ – вектор вхідних сигналів; $\mu = (\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_M)^T$ – вектор центрів; $V = [v_{ij}]$ – вагова матриця; $\varphi(\cdot)$ – базисна функція.

У зв'язку з тим, що якість апроксимації суттєво залежить від виду БФ, проаналізовано проблему ефективного вибору таких функцій. З цією метою розглянуто найбільш поширені види БФ, такі як гаусова та її різновиди,

бірадіальна, мультиквадратична, зворотна мультиквадратична, сплайн-функція та функція Коші.

При виборі будь-якої БФ, виникає дуже важлива і вельми складна задача визначення кількості нейронів в мережі (N), тобто структури мережі. В роботі розглядаються критерії вибору структури, які використовують екзаменаційну вибірку (критерії регулярності, стабільності, несуперечності та варіативності) і не використовують її. До останніх належать інформаційні критерії, що набувають в останній час широкого розповсюдження (критерії Акаїке, Шварца-Ріссанена, Кульбака, Хеннана-Куінна та інші).

Найбільш простим і ефективним є ускладнення структури РБМ шляхом послідовного введення нових нейронів за виконання умов

$$e(l) > \alpha,$$

$$\|x(l) - \mu_m(l)\| > \beta,$$

де $e(l) = y(l) - \hat{y}(l)$ – похибка апроксимації (ідентифікації); $y(l), \hat{y}(l)$ – вихідні сигнали об'єкту та мережі відповідно; α, β – гранично припустимі значення похибки реакції мережі та відхилення сигналу $x(l)$ від найближчого до даного входу центру; l – час.

Апроксимуючи нелінійність $f[x(k)]$ за допомогою РБМ, отримуємо нейромережну модель $y(\theta, k) = f(\theta, k)$, параметри якої θ (вагові коефіцієнти, центри тощо) визначаються шляхом навчання мережі, яке зводиться до мінімізації зазвичай квадратичного функціоналу від похибки навчання e . В роботі проаналізовано існуючі процедури навчання в режимах off-line та on-line.

У зв'язку з тим, що велика кількість параметрів навчання або велика кількість БФ можуть привести до погіршення властивостей матриць спостережень, які використовуються при навчанні, розглянуто питання підвищення стійкості процедур навчання, зокрема запропоновано використання UDU^T -факторизації.

Суттєвого спрощення як процесу навчання, так і реалізації процедур нейромережної ідентифікації та керування можна досягти, якщо використовувати апроксимацію БФ. З цією метою в роботі запропоновано кусково-лінійну апроксимацію всіх вищезгаданих БФ. Так, гаусівська БФ, вид якої, її похідні та відповідні апроксимації наведено на рис. 1, апроксимується наступним чином:

$$\varphi_k(x_i) \approx \begin{cases} \frac{0.77}{1.2\sigma_k}(x_i - \mu_k + 1.7\sigma_k), & \text{якщо } \mu_k - 1.7\sigma_k \leq x_i < \mu_k - 0.5\sigma_k \\ 0.77 + \frac{0.23}{0.5\sigma_k}(x_i - \mu_k + 0.5\sigma_k), & \text{якщо } \mu_k - 0.5\sigma_k \leq x_i < \mu_k \\ 0.77 - \frac{0.23}{0.5\sigma_k}(x_i - \mu_k - 0.5\sigma_k), & \text{якщо } \mu_k \leq x_i < \mu_k + 0.5\sigma_k \\ -\frac{0.77}{1.2\sigma_k}(x_i - \mu_k - 1.7\sigma_k), & \text{якщо } \mu_k + 0.5\sigma_k \leq x_i < \mu_k + 1.7\sigma_k \\ 0, & \text{в інших випадках.} \end{cases} \quad (2)$$

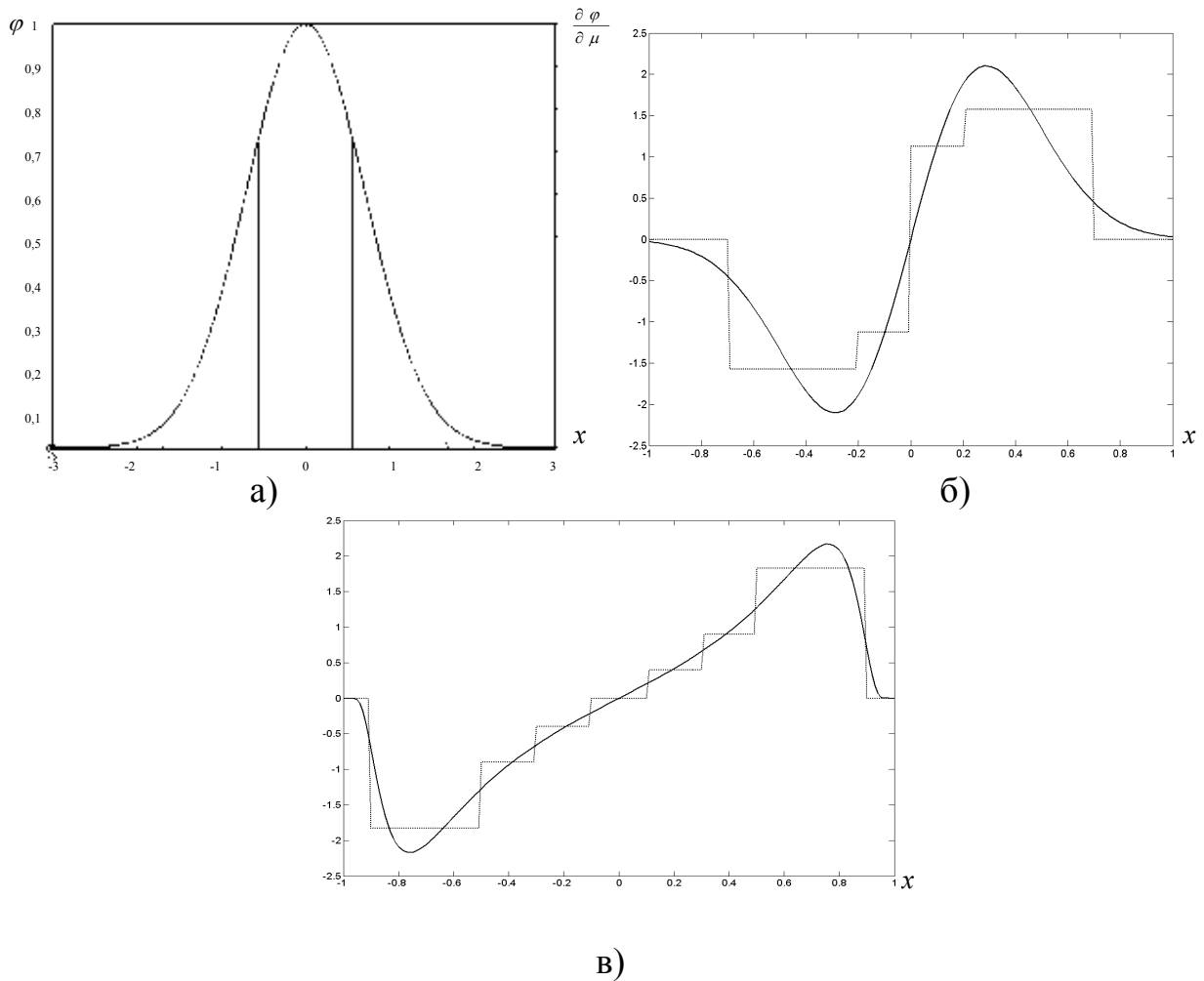


Рис. 1 – Гаусівська БФ та її похідні: б - по центрах; в – по радіусах

Третій розділ присвячено питанням нейромережної ідентифікації технологічних процесів ДУ.

Одним з найбільш загальних представлень нелінійних динамічних об'єктів з одним входом і одним виходом є ряд Вольтерра, часними випадками якого є моделі Гаммерштейна та Вінера, які являють собою послідовно з'єднані нелінійну статичну і лінійну динамічну частини та відрізняються порядком їх слідкування. Так як модель Вінера є часним випадком ряду Вольтерра, між ядрами Вольтерра та коефіцієнтами моделі Вінера існує зв'язок, використання якого дозволяє застосовувати при її отриманні добре розвинуті підходи побудови моделі Вольтерра.

З іншого боку, нейромережна модель Вінера має вигляд

$$y(k) = \theta^T \varphi[u(k)], \quad (3)$$

де $u(k)$ - вхідний сигнал мережі.

Використання в якості $\varphi[\cdot]$ нормованих гаусовських БФ приводить до узагальнено-регресійної нейромережної моделі Вінера

$$\begin{aligned} v(k) &= \sum_{i=1}^m b(i)u(k-i), \\ y(k) &= \sum_{j=1}^q \theta_j \varphi_j[v(k)], \end{aligned} \quad (4)$$

параметри якої b_i та θ_j визначаються шляхом навчання нейромережі за допомогою, наприклад, градієнтного алгоритму

$$\theta_i(k) = \theta_i(k-1) - \gamma_1 e(k) \varphi_i[v(k)],$$

$$b_i(k) = b_i(k-1) - \gamma_2 e(k) \frac{u(k-i)}{\sigma^2} \sum_{j=1}^q \theta_j(k) f_j \left\{ \sum_{e=1}^q [(v(k) - \mu_e) \cdot \varphi_e] - (v(k) - \mu_j) \right\},$$

де μ_i , σ^2 – центри та радіуси БФ.

Найбільше поширення в задачах нейрокерування нелінійними об'єктами набула нейромережна ARX-модель. Як і у випадку ARX моделі, нейромережна реалізація цієї моделі потребує визначення її структури. У зв'язку з цим для загального випадку багатовимірної моделі запропоновано підхід до визначення порядку моделі з використанням критерію Акаїке та UDU^T розкладання коваріційної матриці спостережень, яка корегується при появі нових навчаючих пар за допомогою рекурентного методу найменших квадратів РМНК.

Апроксимуючи нелінійності за допомогою РБМ, отримуємо нейромережну модель, структура якої є аналогічною структурі лінійної ARX-

моделі, проте, на відміну від останньої окрім параметрів, що входять в опис лінійно θ_L , має параметри, які входять в модель нелінійно θ_N ,

$$y(k) = \Phi(\theta_L, \theta_N, x(k-1)) + e(k) \quad (5)$$

Для оцінки знаходження векторів θ_L та θ_N пропонується використовувати комбіновану процедуру, яка включає звичайний МНК для попереднього оцінювання θ_L та деяку обчислювану процедуру, наприклад, алгоритм Левенберга-Марквардта – для знаходження оцінки θ_N . Однак цей спосіб навчання є ефективним в режимі off-line.

Більш адекватного відображення властивостей нелінійних динамічних об'єктів можна досягти шляхом застосування адаптивних ШНМ часової затримки сигналів (TDNN), що використовують динамічні нейрони. В роботі наведено структури моделей, до складу яких входять адаптивні лінійні фільтри, та розглянуто питання вибору параметрів цих фільтрів.

В дисертаційній роботі було здійснене моделювання процесу ідентифікації нелінійних динамічних об'єктів, що мали різну структуру, за допомогою РБМ нульового та першого порядку на основі 10000 навчальних пар. В якості БФ використовувалися всі вищезгадані функції. На рис.2 наведено результати ідентифікації об'єкта, що описується рівнянням

$$y[k] = 0.725\beta(k) \sin\left(\frac{16u(k-1) + 8y(k-1)}{\beta(k)(3 + 4u^2(k-1) + 4y^2(k-1))}\right) + \\ + 0.2u(k-1) + 0.2y(k-1) + \xi(k), \quad (6)$$

де $\xi(k)$ – завада, яка мала рівномірний розподіл $[-0,3 \ 0,3]$; $u(k)$ – вхідний сигнал – випадкова послідовність з рівномірним розподілом в інтервалі $[-1, 1]$

В даному випадку корекція всіх параметрів мережі здійснювалась за правилом

$$\Delta w_i(k) = -\gamma_w e(k) \frac{\partial y(k)}{\partial w_i}; \\ \Delta v_{ij}(k) = -\gamma_v e(k) x_i(k) \tilde{\Phi}_j(k); \\ \Delta \mu_{ij}(k) = -\gamma_\mu e(k) \frac{\partial y(k)}{\partial \mu_{ij}}; \\ \Delta \sigma_{ij}(k) = -\gamma_\sigma e(k) \frac{\partial y(k)}{\partial \sigma_{ij}}, \quad (7)$$

де

$$\frac{\partial y(k)}{\partial w_i} = \tilde{\Phi}_i(k); \quad \frac{\partial y(k)}{\partial \mu_{ij}} = \tilde{c}_i \frac{\partial \tilde{\varphi}_{ij}(k)}{\partial \mu_{ij}} \prod_{\substack{m=1 \\ m \neq j}}^M \tilde{\varphi}_{jm}(k);$$

(8)

$$\frac{\partial y(k)}{\partial \sigma_{ij}} = \tilde{c}_i \frac{\partial \tilde{\varphi}_{ij}(k)}{\partial \sigma_{ij}} \prod_{\substack{m=1 \\ m \neq j}}^M \tilde{\varphi}_{jm}(k); \quad \tilde{\Phi}_i(k) = \begin{cases} \Phi_i(k) & \text{для РБМ;} \\ \bar{\Phi}_i(k) & \text{для НРБМ.} \end{cases}$$

Похідні $\frac{\partial y(k)}{\partial \mu_{ij}}$ та $\frac{\partial y(k)}{\partial \sigma_{ij}}$ обчислювались для кожної БФ та кожної мережі окремо.

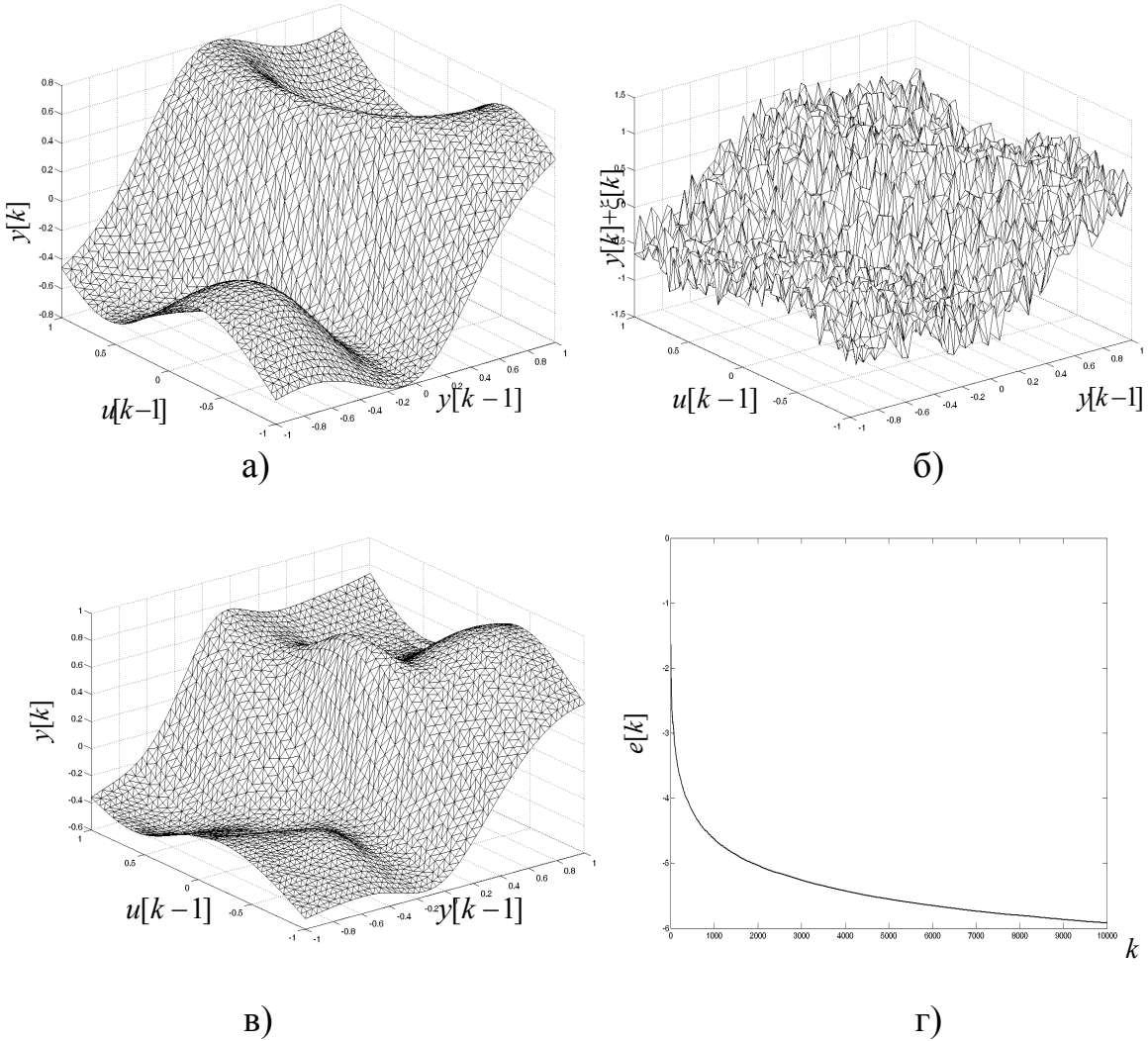


Рис. 2 – Результати ідентифікації об'єкта (б): а – реальна нелінійність; б – зашумлена нелінійність; в – апроксимована нелінійність; г – похибка ідентифікації

Результати моделювання процесу побудови РБМ-моделей нульового та першого порядків на різних тестових прикладах та ідентифікації ДУ свідчать про ефективність розвинутого в роботі підходу.

На рис.3 наведено результати побудови нейромережної моделі ДУ. Тут темними крапками зображено реальні вихідні сигнали, світлими – вихідні сигнали моделі (зміни температур сокостружкової суміші в першій та другій зонах ДУ).

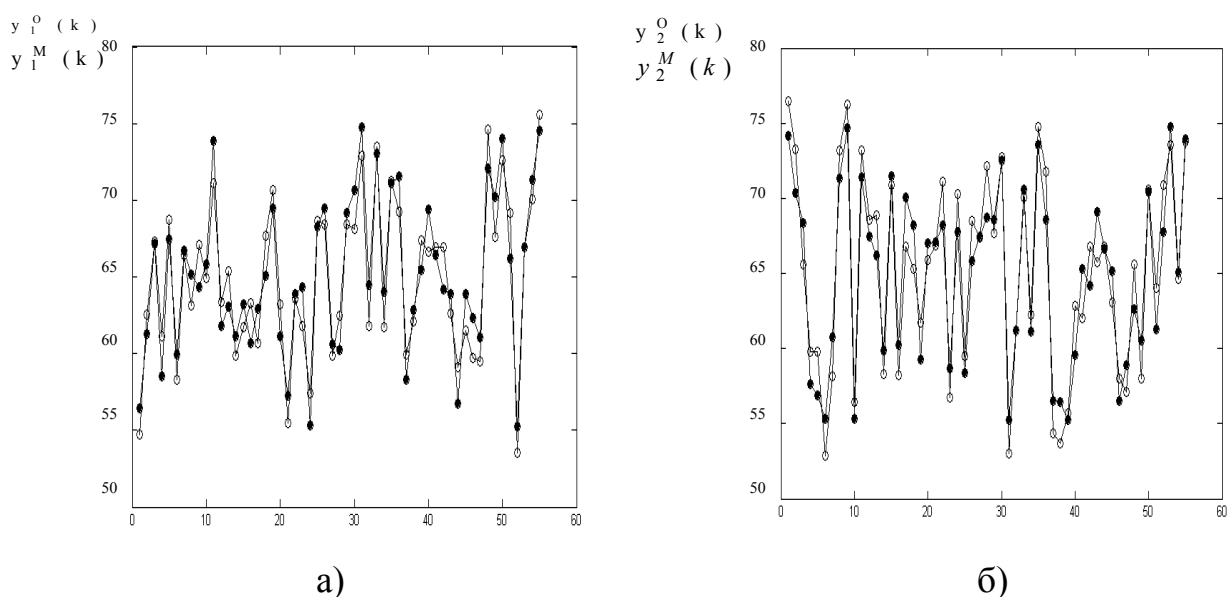


Рис. 3. – Зміни температур сокостружкової суміші в першій та другій зонах ДУ

Результати, отримані внаслідок проведених досліджень, підтверджують адекватність створених нейромODEЛЕЙ та ефективність використання підходу, що розвивається в роботі, для побудови моделей технологічних процесів.

Після закінчення процесу навчання параметри мережі використовуються для реалізації алгоритму керування.

Четвертий розділ присвячено синтезу нейромережних систем керування технологічними процесами ДУ.

Аналіз існуючих систем керування ДУ показав, що в цих системах використовуються лінійні моделі, побудова та реалізація яких потребують проведення активного експерименту, що значно обмежує застосування такого підходу. У зв'язку з тим, що найбільше поширення в промислових системах керування отримали ПІ- та ПІД-структури, які будуються на базі лінійних моделей, розглянуто задачу синтезу нейромережного ПІД-регулятора нелінійного об'єкта з використанням РБМ для апроксимації нелінійності та запропоновано градієнтне правило корекції його вектора коефіцієнтів. Отримано умови збіжності алгоритму керування і визначено значення параметрів алгоритму, що обумовлюють максимальну збіжність.

При реалізації ПІД-регулятора в умовах нестационарності об'єкта та властивостей завад виникає задача оптимізації його параметрів, яка може бути успішно вирішена шляхом побудови предикторного ПІД-регулятора, коли на основі поточної інформації предиктор здійснює прогнозування значення

вихідного сигналу об'єкта, яке і використовується для пошуку оптимальних законів корекції керування, запропонованих в роботі.

Слід відзначити, що предикторне керування може бути здійснено і на основі моделі в просторі станів. В роботі отримано відповідні співвідношення, які дозволяють синтезувати нейропредикторне керування для різних інтервалів прогнозування.

Аналізуючи розподіл температур ДУ вздовж апарату, можна прийти до висновку, що він описується рівняннями в часних похідних другого порядку. Синтез систем керування такими об'єктами є вельми складною задачею, яка ще більш ускладнюється за рахунок нестаціонарності параметрів об'єкту. За цих умов доцільним є використання нейромережного непрямого керування, коли спочатку отримуються оцінки параметрів моделі об'єкту або їх дрейфу, які і використовують в процедурі керування.

В цьому випадку задача керування полягає у визначенні значень керуючих сигналів $\Delta u(k)$, що забезпечують мінімум квадратичного функціоналу від похибки керування $\varepsilon(k) = y^*(k) - y(k)$, де $y^*(k)$ – необхідне значення вихідного сигналу об'єкта.

Використання градієнтної процедури мінімізації приводить до алгоритму керування

$$\Delta u = -\gamma_u \varepsilon(k) \frac{\partial y(k)}{\partial u}, \quad (9)$$

де для РБМ нульового порядку

$$\left. \frac{\partial y(k)}{\partial x_i} \right|_{x_i = x_i(k)} = \sum_{j=1}^N c_j \prod_{\substack{m=1 \\ m \neq i}}^M \tilde{\varphi}_{jm}(x_m(k)) \frac{\partial \tilde{\varphi}_{ij}(x_j(k))}{\partial x_i(k)}, \quad (10)$$

а для РБМ першого порядку –

$$\left. \frac{\partial y(k)}{\partial x_i} \right|_{x_i = x_i(k)} = \sum_{j=1}^N \left\{ v_{ij} \tilde{\varphi}_j(x_i(k)) + \left(c_j + \sum_{l=1}^N v_{li} x_l(k) \right) \prod_{\substack{m=1 \\ m \neq i}}^M \tilde{\varphi}_{jm}(x_m(k)) \frac{\partial \tilde{\varphi}_{ij}(x_j(k))}{\partial x_i(k)} \right\}. \quad (11)$$

Отримані алгоритми керування було промодельовано на різних тестових задачах. На рис. 4 наведено результати керування об'єктом, що описується рівнянням (6) при завданні наступного еталонного сигналу

$$y^*[k] = 0.48 + 0.07 \sin[\pi k / 200] - 0.05 \cos[\pi k / 100].$$

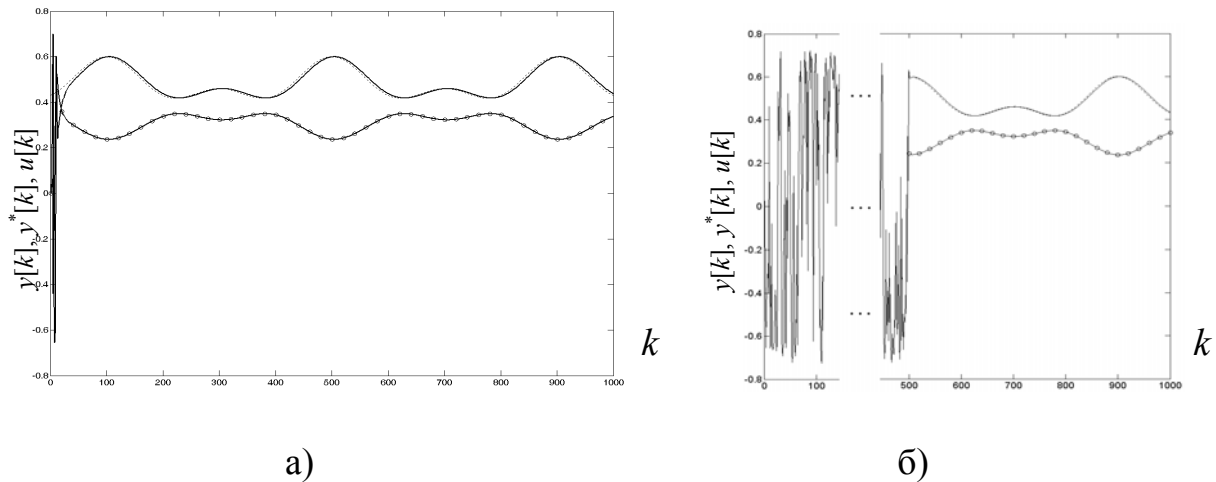


Рис. 4 – Результати керування об’єктом (б): а) – керування з попередньою побудовою моделі об’єкту; б) – одночасна ідентифікація об’єкта та керування ним

На рис. 5 наведено процес стабілізації температур сокостружкової суміші у першій та другій зонах ДУ $\Delta\theta_1$, $\Delta\theta_2$ за допомогою розробленого адаптивного алгоритму керування (в третій та четвертій зонах результати є аналогічними). Тут темними крапками зображено реальні зміни вихідних сигналів при існуючому керуванні, світлими – при запропонованому адаптивному.

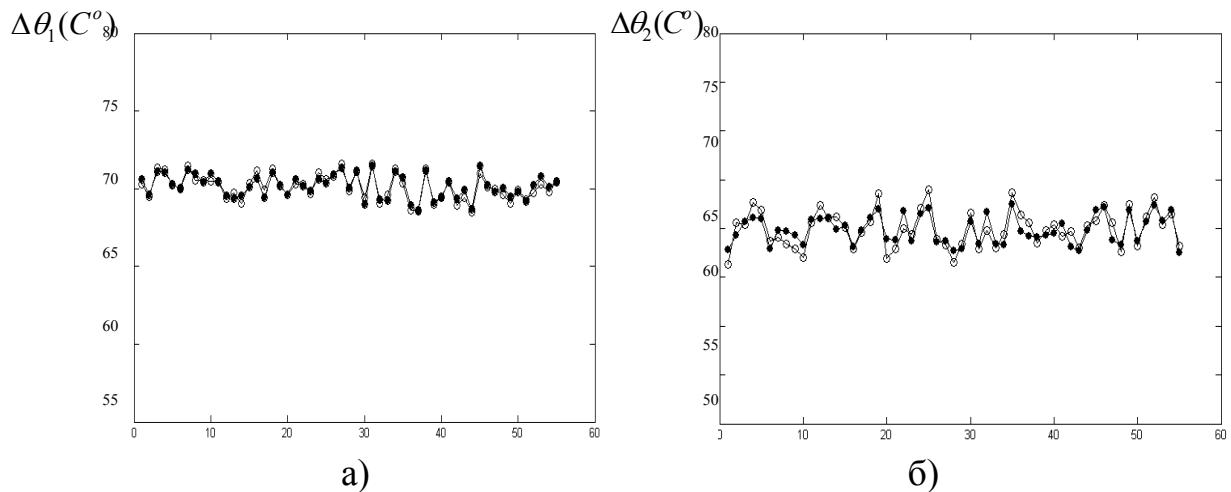


Рис. 5 – Стабілізація температур сокостружкової суміші в першій та другій зонах ДУ

Запропоновані процедури нейрокерування є універсальними і можуть бути використані при оптимізації інших технологічних процесів.

У **висновках** стисло сформульовано основні наукові та практичні результати дисертаційної роботи.

У додатках наведено акти про впровадження результатів дисертаційної роботи у виробництві та навчальному процесі.

ВИСНОВКИ

У дисертації здійснено вирішення наукової задачі, що полягає в розробці нейромережного керування технологічними процесами виробництва цукру. Застосування отриманих нейрорегуляторів дає можливість істотно підвищити точність ведення технологічних режимів, що забезпечує поліпшення якості продукції та зменшення енерговитрат.

1. На основі аналізу технологічних процесів виробництва цукру виділено та описано як об'єкт керування дифузійне відділення як основне, що задає і визначає кількість перероблених цукрових буряків. Розглянуто існуючі методи керування цим відділенням і визначені їх основні недоліки, пов'язані з використанням лінійних стаціонарних моделей, необхідністю великої кількості апріорної інформації про властивості об'єкта і завади, а також значними обчислювальними труднощами, що виникають при реалізації регуляторів. Зроблено висновок про доцільність застосування адаптивного підходу в поєднанні з методами теорії штучних нейронних мереж. Викладено основні підходи до синтезу нейромережного керування та описано деякі типи ШНМ, що використовуються для вирішення подібних завдань.

2. Розглянуто основні положення РБМ: архітектура мережі, модель нейрона шаблонного шару, види базисних функцій і проблема навчання мережі. Описано існуючі підходи до вибору структури мережі, що ґрунтуються на різних критеріях. Показано, що наявність інформації про сигнали і перешкоди дозволяє спростити задачу вибору структури мережі, проте використання будь-якого критерію не гарантує визначення оптимальної структури.

Вивчено методи навчання мережі в режимах off-line і on-line та способи підвищення їх стійкості. У зв'язку з тим, що одним з найбільш ефективних методів підвищення стійкості процедур навчання є використання ідей факторизації, запропоновано дві факторизовані процедури, що реалізують РМНК.

3. На основі аналізу розглянуто питання апроксимації БФ та отримані співвідношення, що дозволяють визначити кусково-лінійну апроксимацію найбільш широко використовуваних БФ: гаусівської, мультіквадратичної, зворотної мультіквадратичної і функції Коші. Застосування подібної апроксимації істотно спрощує реалізацію процедури навчання, що приводить до скорочення тривалості процесу навчання.

4. Викладені питання побудови нейромережних моделей нелінійного динамічного об'єкта, що реалізують класичні моделі Вінера і ARX-модель на основі статичних ШНМ. Вивчено важливе питання вибору структури нейромережної ARX-моделі. Використання UDU^T розкладання коваріаційної

матриці дозволило отримати ефективні процедури послідовної корекції порядку моделі.

Розглянуто NARX і NARMAX моделі, що грають фундаментальну роль при ідентифікації нелінійних динамічних об'єктів за допомогою ШНС. Описано ряд структур нейромережних моделей та запропоновано процедури їх навчання, засновані на використанні МНК для початкового навчання лінійних параметрів мережі та будь-якої обчислювальної процедури (наприклад, алгоритму Левенберга-Марквардта) для оцінювання параметрів, які входять в модель нелінійно. Розглянуто особливості побудови нейромережних моделей на основі мереж прямого поширення, утворених динамічними нейронами.

5. Проведено імітаційне моделювання, результати якого є основою для побудови нейромережних моделей ДУ. Порівняння вихідних сигналів реального об'єкта та отриманих моделей ДУ свідчать про ефективність запропонованих моделей і їх достатньо високу точність.

6. На основі аналізу розглянуто особливості керування ДУ на основі лінійних моделей. Відзначено, що реалізація подібного підходу вимагає або проведення активного експерименту для отримання необхідної моделі, або подачі на вхід досліджуваного об'єкта пробних сигналів. Це істотно обмежує можливість застосування даного підходу, який до того ж не враховує нестационарність і нелінійність характеристик реальних процесів. Вивчено нейромережений підхід до синтезу найбільш широко використовуваних на цей час ПД-регуляторів. Розроблено процедури навчання та визначено умови, за яких швидкість збіжності алгоритму керування буде найбільшою. Крім того, здійснено синтез предикторного ПД-регулятора.

Сформульовано та розв'язано задачу синтезу регулятора на основі прогнозуючої моделі в просторі станів.

7. У зв'язку з тим, що при розгляді розподілу температури ДУ вздовж апарату отримують моделі в часних похідних другого порядку, керування якими навіть у детермінованому випадку є досить складним, розглянуто можливості та особливості реалізації прямого і непрямого нейромережного керування. Здійснено синтез нейромережних регуляторів для нелінійних об'єктів, поданих різними моделями. Отримано процедури навчання у випадку застосування РБМ нульового та першого порядків. Результати імітаційного моделювання свідчать про ефективність запропонованого і розвинутого в роботі підходу, а реалізація розроблених алгоритмів керування ДУ підтвердила їх досить високу ефективність при вирішенні реальних завдань.

СПИСОК ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Ляшенко С. А. Управление нелинейным объектом на основе нейросетевой модели / С. А. Ляшенко, А. С. Ляшенко // Автомобильный транспорт : сб. науч. тр. – Харьков: ХНАДУ, 2003. – Вып. 13. – С. 272-274.
2. Ляшенко С. А. . Нейросетевая реализация модели Винера / С. А. Ляшенко, А. С. Ляшенко // Вестник Херсонского национального технического университета. – Херсон. – 2005. – №(1)21. – С. 48-51.
3. Ляшенко С. А. Построение математической модели нелинейного процесса с помощью нормализованной радиально-базисной сети / С. А. Ляшенко, А. С. Ляшенко // Вестник Херсонского национального технического университета. – Херсон. – 2006. – №(1)24. – С. 32-35.
4. Ляшенко А. С. Відновлення нелінійного динамічного процесу при наявності перешкод за допомогою мереж радіально-базисної основи / А. С. Ляшенко // Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка. Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України. – Том 2. – Харків: ХНТУСГ, 2007. – Вип. 57. — С. 149-153.
5. Ляшенко А. С. Использование радиально-базисных сетей для фильтрации сигналов нелинейного динамического процесса / А. С. Ляшенко // Зб. наук. пр. Інституту проблем моделювання в енергетиці. – Київ: ІПМЕ, 2007. – Вип. 42. – С. 40-45.
6. Ляшенко С. А. Концепция повышения эффективности АСУ ТП при производстве сахара в Украине / С. А. Ляшенко, А. С. Ляшенко, И. С. Беляева // Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка. Сучасні напрямки технології механізації процесів переробних і харчових виробництв. – Харків: ХНТУСГ, 2008. – Вип. 74, С. 54-63.
7. Ляшенко А. С. Моделирование нелинейного динамического объекта с помощью радиально-базисных сетей с линеаризованными базисными функциями / А. С. Ляшенко // Вестник Херсонского национального технического университета. – Херсон. – 2009. – №1(34). – С. 284-288.
8. Ляшенко С. А. Об одном подходе получения нестационарной прогнозной модели динамических объектов / С. А. Ляшенко, А. С. Ляшенко, И. С. Беляева, Р. Н. Чапча // Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка. Технічний сервіс АПК, техніка та технології у сільськогосподарському машинобудуванні. – Харків: ХНТУСГ, 2009. – Вип. 81. – С. 39-44.
9. Ляшенко С. А. Усовершенствование автоматизированной системы управления диффузионного отделения сахарного завода с помощью нейросетевого подхода / С. А. Ляшенко, А. С. Ляшенко // Motrol. Motorization and rower industry in agriculture. Simferopol-Lublin. – 2009. – Vol. 11A. – P. 207-209.
10. Руденко О. Г. Нейросетевое управление на основе кусочно-линейной аппроксимации базисных функций / О. Г. Руденко, А. А. Бессонов, А. С.

Ляшенко // Материалы международной научно-технической конференции «Автоматизация: проблемы, идеи, решения». – Севастополь: СевНТУ, 2009. – С. 26-28

11. Ляшенко С. А. Обоснование автоматического регулирования производственных процессов сахарных заводов / С.А. Ляшенко, А.М. Фесенко, А. С. Ляшенко, И. С. Беляева // Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка. Сучасні напрямки технології механізації процесів переробних і харчових виробництв. – Харків: ХНТУСГ, 2009. – Вип. 88. – С. 104-109.

12. Ляшенко С. А. Об одном подходе к построению нейросетевой модели нелинейного объекта / С. А. Ляшенко, А. С. Ляшенко // 7-я международная научная-практическая конференция «Современные информационные и электронные технологии», 22-26 мая 2006 г. : тез. докл. – Том1. – Одесса, 2006. – С.95

13. Ляшенко А. С. Построение модели управления динамическим объектом на основе радиально-базисной сети / А. С. Ляшенко // Материалы 11-го международного форума «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке», 10-12 апреля 2007г. : тез. докл. – Харьков: ХНУРЭ, 2007. – Часть 2. – С. 251.

14. Ляшенко А. С. Аппроксимация нелинейного динамического процесса с помощью радиально-базисной сети с различными активационными функциями / А. С. Ляшенко // 2-я международная научная конференция «Современные информационные системы. Проблемы и тенденции развития», 2-5 октября 2007 г. : тез. докл. – Харьков-Туапсе: ХНУРЭ, 2007. – С. 487-488.

15. Ляшенко А. С. Оптимизация с помощью радиально-базисной сети при разделении множества сигнала на кластеры / А. С. Ляшенко // 7-я Международная научно-техническая конференция «Проблемы информатики и моделирования», 29 ноября – 1 декабря 2007 г. : тез. докл. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2007. – С. 30.

16. Ляшенко А. С. Прогнозирующее нейруправление на основе ПИД-регулятора / А. С. Ляшенко // 9-я Международная научно-техническая конференция «Проблемы информатики и моделирования», 26-28 ноября 2009 г. : тез. докл. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2009. – С. 92.

17. Ляшенко А. С. Прогнозирующее нейруправление непрерывными технологическими процессами / А. С. Ляшенко // Міжнародна наукова-технічна конференція. «Сучасні методи, інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем управління організаційно технологічними комплексами», 26-27 листопада 2009 р. – К.: НУХТ, 2009. – С. 73-74.

АНОТАЦІЯ

Ляшенко О.С. Синтез систем нейрокерування дифузійною установкою цукрового виробництва на основі радіально-базисних мереж. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.07 – автоматизація процесів керування. – Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, 2010.

Дисертаційну роботу присвячено розробці нейромережного підходу для рішення задач автоматизованого керування технологічними процесами дифузійного відділення виробництва цукру.

У роботі проведено аналіз існуючих систем керування ДУ, на основі якого зроблено висновок щодо доцільності розробки адаптивного керування з використанням методів теорії штучних нейронних мереж. Вивчення властивостей статичних та динамічних ШНМ обумовило використання для рішення поставленої задачі РБМ нульового та першого порядків. Запропоновано кусково-лінійну апроксимацію БФ, що дозволило суттєво скоротити процедуру навчання ШНМ та скоротити тривалість її навчання. З метою корекції порядку моделі та забезпечення стійкості процесу навчання запропоновано використання UDU^T факторизації матриці спостережень. Отримано співвідношення, які дозволяють реалізувати нейромережні та нейромережні ПД-регулятори. Запропоновано процедури непрямого нейромережного керування на основі РБМ нульового та першого порядків з апроксимацією БФ. Достовірність результатів підтверджується експериментальними дослідженнями та впровадженням.

Ключові слова: дифузійне відділення, нелінійний динамічний об'єкт, штучна нейронна мережа, процедура навчання, ідентифікація, нейрокерування, регулятор.

АННОТАЦИЯ

Ляшенко А.С. Синтез систем нейрорегулирования диффузионной установкой сахарного производства на основе радиально-базисных сетей. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.07 – автоматизация процессов управления. – Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков, 2010.

В диссертации осуществлено решение научной задачи, заключающееся в разработке нейросетевого управления технологическими процессами производства сахара. Применение полученных нейрорегуляторов дает возможность существенно повысить точность ведения технологических

режимов, что обеспечивает улучшение качества продукции и уменьшение энергозатрат.

На основе анализа технологических процессов производства сахара выделено и описано как объект управления диффузионное отделение как основное, которое задает и определяет количество переработанной сахарной свеклы. Рассмотрены существующие методы управления этим отделением и отмечены их основные недостатки, связанные с использованием линейных стационарных моделей, необходимостью большого количества априорной информации о свойствах объекта и помехах, а также значительными вычислительными трудностями, сопутствующими реализации регуляторов. Сделан вывод о целесообразности применения адаптивного подхода в сочетании с методами теории искусственных нейронных сетей (ИНС). Изложены основные подходы к синтезу нейросетевого управления и описаны некоторые типы ИНС, используемые для решения подобных задач.

Рассмотрены основные положения РБС: архитектура сети, модель нейрона шаблонного слоя, виды базисных функций и проблема обучения сети. Описаны существующие подходы к выбору структуры сети, основывающиеся на различных критериях как использующих экзаменационную выборку, так и не использующих ее. Показано, что наличие информации о сигналах и помехах позволяет упростить задачу выбора структуры сети, однако использование какого-либо критерия не гарантирует определения оптимальной структуры.

Изучены методы обучения сети в режиме off-line и on-line и способы повышения их устойчивости. Так как одним из наиболее эффективных методов повышения устойчивости процедур обучения является использование идей факторизации, предложены две факторизованные процедуры, реализующие рекуррентный МНК при различном выборе регуляризатора.

Рассмотрены вопросы аппроксимации БФ и получены соотношения, позволяющие определить кусочно-линейную аппроксимацию наиболее широко используемых БФ: гауссовской, мультиквадратичной, обратной мультиквадратичной и функции Коши. Использование подобной аппроксимации существенно упрощает реализацию процедуры обучения, что приводит к сокращению длительности самого процесса обучения.

Изложены вопросы построения нейросетевых моделей нелинейного динамического объекта, реализующих классические модели Винера и ARX-модель на основе статических ИНС. Изучен важный вопрос выбора структуры нейросетевой ARX-модели. Использование UDU^T разложения ковариационной матрицы позволило получить эффективные процедуры последовательной коррекции порядка модели.

Рассмотрены NARX и NARMAX модели, играющие фундаментальную роль при идентификации нелинейных динамических объектов с помощью ИНС. Описан ряд структур нейросетевых моделей и предложены процедуры их обучения, основанные на использовании МНК для первоначального обучения

линейных параметров сети и какой-либо вычислительной процедуры (например, алгоритма Левенберга-Марквардта) – для оценивания параметров, входящих в модель нелинейно.

Рассмотрены особенности построения нейросетевых моделей на основе сетей прямого распространения, образованных динамическим нейронами. Проведено имитационное моделирование, результаты которого послужили основой для построения нейросетевых моделей ДУ.

Изучен нейросетевой подход к синтезу наиболее широко используемых в настоящее время ПИД-регуляторов. Разработаны процедуры обучения и определены условия, при которых скорость сходимости алгоритма управления будет наибольшей. Кроме того, осуществлен синтез предикторного ПИД-регулятора.

Сформулирована и решена задача синтеза регулятора на основе прогнозирующей модели в пространстве состояний.

Рассмотрены возможности и особенности реализации прямого и непрямого нейросетевого управления ДУ. Осуществлен синтез нейросетевых регуляторов для нелинейных объектов, представленных различными моделями. Получены процедуры обучения в случае применения РБС нулевого и первого порядков.

Проведено имитационное моделирование, результаты которого свидетельствуют об эффективности предлагаемого в работе подхода. Реализация разработанных алгоритмов управления ДУ подтвердила их достаточно высокую эффективность при решении реальных задач.

Ключевые слова: диффузионное отделение, нелинейный динамический объект, искусственная нейронная сеть, процедура обучения, идентификация, нейруправление, регулятор.

ABSTRACT

Lyashenko A. The sugar production extraction plant neural control system synthesis based on radial basis function network. - Manuscript.

The dissertation on the receipt of scientific degree of engineering automation sciences candidate on speciality 05.13.07 – automation of control. –Kharkov National University of Radio Electronics, Kharkiv, 2010.

The dissertation is devoted to the neural networks approach development for solving the problems of sugar production diffusion station technological processes automated control.

The existing management control systems analysis was carried out and on its base the conclusion about the appropriateness of an adaptive control methods developing using the artificial neural networks theory was drawn. Examination of static and dynamic ANN properties caused using of zero and first order RBN to solve the assigned task. A BF piecewise-linear approximation was suggested and that

allowed to shorten the ANN training process and reduce its learning duration. For the purpose to correct the model order and to ensure the learning process sustainability the UDU^T factorization of observations matrix was proposed to use. The relations that allow to implement neural network and neural network sub-controllers are obtained. The indirect neural control procedures based on zero and first-order RBN with BF approximation was suggested. The experimental studies and implementation confirm the results reliability.

Key words: diffusion branch, nonlinear dynamical systems, artificial neural network, learning procedure, identification, neural control, regulator.