

УДК 519.876.5: 004.032.26

М.П. Дивак, д-р техн. наук, проф.,
Н.Я. Савка,
Тернопільський національний економічний університет, м. Тернопіль, Україна
mdy@tneu.edu.ua, nadya_savka@ukr.net

Метод ідентифікації вагових коефіцієнтів синаптичних зв'язків штучних нейронних мереж із радіально-базисними функціями на основі аналізу інтервальних даних

Запропоновано метод ідентифікації вагових коефіцієнтів синаптичних зв'язків ШНМ із РБФ, що ґрунтується на аналізі інтервальних даних. Розглянуто приклад застосування методу.

Ключові слова: штучні нейронні мережі з радіально-базисними функціями, метод ідентифікації, інтервальні дані, інтервальна модель, інтервальна система лінійних алгебричних рівнянь.

Вступ

На сьогодні штучні нейронні мережі знаходять все ширше застосування для ідентифікації нелінійних систем, апроксимації функцій, прогнозування, фільтрації даних, адаптивного управління, розпізнавання образів, кластеризації, технічної діагностики.

Як свідчать проаналізовані праці вітчизняних та зарубіжних науковців, зокрема таких, як Головка В.А., Круглов В.В., Борисов В.В, у якості архітектури, зазвичай, застосовують багатопарові штучні нейронні мережі перцептронного типу з прямою передачею інформації [1, 2]. Дані штучні нейронні мережі характеризуються суттєвими недоліками:

- громіздкість структури мережі;
- складність ідентифікації структури мережі;
- відсутність властивості продуктивності прогнозу;
- неможливості навчання на неоднорідній вибірці даних;
- низька швидкість навчання мережі.

Альтернативу багатопаровим штучним нейронним мережам перцептронного типу представляють штучні нейронні мережі (ШНМ) із радіально-базисними функціями (РБФ), які набувають широкого застосування в теперішній час. Дослідженню особливостей ШНМ із РБФ присвячено праці відомих науковців Nelles O., Бодяньського Є.В., Руденка О.Г., Горшкова Є. В., Колодяжного В.В., Плісс І.П. [3, 4, 5].

Штучні нейронні мережі радіального типу мають універсальні апроксимуючі властивості [3], складаються з двох шарів обробки інформації і при цьому, на відміну від багатопарових перцептронів, включають лише лінійні синаптичні ваги вихідного шару для забезпечення бажаної

продуктивності для нелінійного введення-виведення інформації.

Для настроювання штучних нейронних мереж радіального типу, як свідчать проаналізовані праці, найчастіше застосовують алгоритми, які базуються на квадратичних критеріях функції похибки. Ці методи варіюють від найпростішого однокрокового алгоритму Відроу-Хоффа до методу найменших квадратів у різноманітних варіантах [4, 5].

У той же час існують задачі, зокрема такі, як прогнозування шкідливих викидів в атмосферу, прогнозування індикаторів економічної безпеки держави, де похибки експериментальних даних обмежені за амплітудою. У цих випадках методи ідентифікації ШНМ із РБФ на основі середньоквадратичного критерію є непридатними, оскільки потрібно ідентифікувати таку штучну нейронну мережу з радіально-базисними функціями, яка б уможливила одержати прогноз із заданою точністю в межах похибок обмежених за амплітудою.

Враховуючи дані умови, найбільш придатними є методи ідентифікації ШНМ із РБФ на основі аналізу інтервальних даних.

Постановка задачі

Нехай відомою є структура штучної нейронної мережі з радіально-базисними функціями, представлена на рисунку 1, де використано такі позначення: x_1, \dots, x_n - входи нейронної мережі даного типу; c_1, \dots, c_h - центри, нелінійні параметри прихованого шару мережі, які визначають позицію базисної функції; $dist$ - блок, у якому на основі метрики Евкліда обчислюють відстань між вектором входів \vec{x} і відповідним центром \vec{c}_i ; $\sigma_1, \dots, \sigma_h$ - стандартні відхилення (радіуси базисних функцій) -

нелінійні параметри прихованого шару мережі, які визначають ширину базисних функцій; $f_1(x), \dots, f_h(x)$ - радіально-базисні функції; w_1, \dots, w_h - ваги вихідного шару, які є лінійними параметрами і визначають "висоту" базисної

функції та значення зміщення; y - вихідний нейромережевий сигнал.

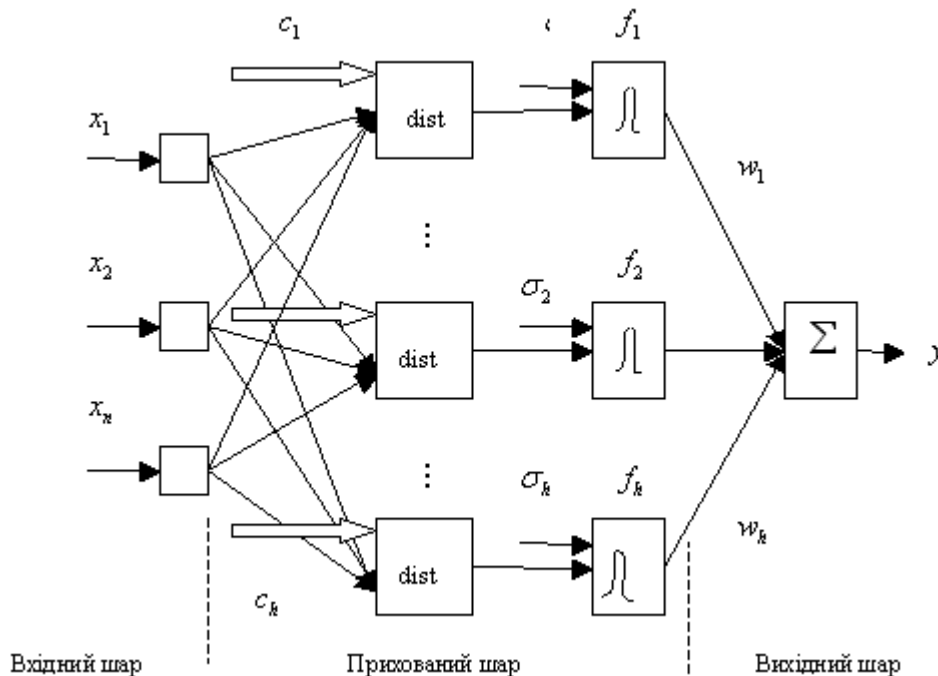


Рисунок 1 - Узагальнена архітектура штучної нейронної мережі з радіально-базисними функціями

У загальному випадку ШНМ із РБФ становить нелінійне перетворення у вигляді:

$$y_j = F_j(\vec{x}) = w_{j0} + \sum_{i=1}^h w_{ij} f_i(\vec{x}) = \vec{w}_j^T \vec{f}(\vec{x}), \quad (1)$$

де y_j - j -ий нейромережевий вихідний сигнал ($j = 1, 2, \dots, m$); $F_j(x)$ - нелінійне перетворення вхідного вектора $\vec{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$ в j -ий вихідний; $\vec{w}_j = (w_{j0}, w_{j1}, \dots, w_{jh})^T$ представляє регульовані синаптичні ваги, і $\vec{f}(\vec{x}) = (1, f_1(x), f_2(x), \dots, f_h(x))^T$ означає радіально-базисну чи центральну функцію; $i = 1, \dots, h$, де h - кількість нейронів прихованого рівня мережі.

Оскільки відстань x_i обчислюють за допомогою центру c_i та норми матриці R_i^{-1} , які є параметрами прихованого шару, $x_i = \|\vec{x} - \vec{c}_i\| R_i^{-1}$, то рівняння (1) набуде такого вигляду:

$$y_j = F_j(\vec{x}) = w_{j0} + \sum_{i=1}^h w_{ij} f_i(\|\vec{x} - \vec{c}_i\| R_i^{-1}) = \vec{w}_j^T \vec{f}(\|\vec{x} - \vec{c}_i\| R_i^{-1}), \quad (2)$$

де R_i^{-1} - нормована матриця або обернена коваріаційна матриця, яка визначає розмір, форму і орієнтацію так званого рецепторного поля радіально-базисної функції.

Як радіально-базисну функцію найчастіше використовують функцію Гаусса

$$f_i(\vec{x}) = f_i(\|\vec{x} - \vec{c}_i\| R_i^{-1}) = \exp\left(-\frac{1}{2} \|\vec{x} - \vec{c}_i\|^2 \sigma^{-2}\right), \quad (3)$$

де σ^{-2} - стандартне відхилення, оскільки приймається, що $r_{ij} = \sigma_{ij}^{-2} = \sigma^{-2} = const$ (r_{ij} - елемент норми матриці R_i^{-1}), $i, j = \overline{1, h}$ [6].

Для синтезу оптимальної структури штучної нейронної мережі радіального типу визначають кількість нейронів прихованого рівня даної нейронної мережі. Для цього, насамперед, визначають центри радіально-базисних функцій - точки, через які має "проходити" апроксимована функція. Оскільки велика навчальна вибірка призводить до збільшення часу навчання ШНМ із РБФ, для визначення центрів досить часто застосовують методи кластеризації [3].

Припустимо, що для ідентифікації вагових коефіцієнтів синаптичних зв'язків штучної нейромережі радіального типу відомі вхідні дані $x(k)$ та вихідні дані $y_j(k)$ з певними відхиленнями $\zeta(k)$. Тоді модель ШНМ із РБФ представляємо у вигляді:

$$y_j(k) - \zeta(k) \leq \vec{w}_j^T \vec{f}(\vec{x}(k)) \leq y_j(k) + \zeta(k) \quad (4)$$

або

$$y_j(k) - \zeta(k) \leq \bar{w}_j^T \bar{f}(\|\bar{x}(k) - \bar{c}_i\| R^{-1}) \leq y_j(k) + \zeta(k), \quad (5)$$

де $\zeta(k)$ - відхилення, а $k=1,2,\dots,N$ - часова дискрета.

Для розв'язання задачі (5) пропонуємо метод ідентифікації вагових коефіцієнтів штучних нейронних мереж із радіально-базисними функціями на основі аналізу інтервальних даних.

Метод ідентифікації вагових коефіцієнтів синаптичних зв'язків ШНМ із РБФ на основі аналізу інтервальних даних

Нехай штучна нейромережа радіального типу має один вихідний сигнал. Тоді розглянемо задачу ідентифікації вагових коефіцієнтів синаптичних зв'язків штучних нейромереж радіального типу (5) у такому вигляді:

$$y^-(k) \leq \bar{w}^T \bar{f}(\|\bar{x}(k) - \bar{c}_i\| R^{-1}) \leq y^+(k), \quad (6)$$

де $y^-(k) = y(k) - \zeta(k)$, $y^+(k) = y(k) + \zeta(k)$.

Задача ідентифікації вагових коефіцієнтів ШНМ із РБФ зводиться до розв'язування інтервальної системи лінійних алгебричних рівнянь (ІСЛАР):

$$\begin{cases} y^-(k) \leq \bar{w}^T \bar{f}(\|\bar{x}(k) - \bar{c}_i\| R^{-1}) \leq y^+(k); \\ \vdots \\ y^-(k) \leq \bar{w}^T \bar{f}(\|\bar{x}(k) - \bar{c}_i\| R^{-1}) \leq y^+(k); \\ \vdots \\ y^-(k) \leq \bar{w}^T \bar{f}(\|\bar{x}(k) - \bar{c}_i\| R^{-1}) \leq y^+(k). \end{cases} \quad (7)$$

Розв'язки ІСЛАР достатньо досліджені методами інтервального аналізу [8]. Відомо, що при умові сумісності системи (7) її розв'язки утворюють опуклий многогранник Ω .

Введемо поняття області Ω можливих значень вагових коефіцієнтів синаптичних зв'язків ШНМ із РБФ – як результат розв'язку ІСЛАР (7). Одержана область значень вагових коефіцієнтів штучної нейромережі радіального типу Ω (7) породжує множину інтервальних моделей вихідних сигналів штучної нейронної мережі з радіально-базисними функціями. При цьому кожен із вихідних сигналів представляємо у вигляді:

$$\hat{y}(k) = w_0 + w_1 f_1(\|\bar{x}(k) - \bar{c}_1\| R^{-1}) + \dots + w_H f_H(\|\bar{x}(k) - \bar{c}_H\| R^{-1}), \quad (8)$$

де $\bar{w}^T = (w_0, \dots, w_1, \dots, w_H) \in \Omega$;

$$\hat{y}^-(k) = \min_{\bar{w} \in \Omega} (\bar{f}^T(\|\bar{x}(k) - \bar{c}_i\| R^{-1}) \cdot \bar{w}) \quad \text{та}$$

$$\hat{y}^+(k) = \max_{\bar{w} \in \Omega} (\bar{f}^T(\|\bar{x}(k) - \bar{c}_i\| R^{-1}) \cdot \bar{w}) \quad \text{- нижня та верхня}$$

межі коридору вихідних сигналів ШНМ із РБФ.

Як одну модель вихідного сигналу штучної нейромережі даного типу із функціонального коридору можна використати модель, що побудована на основі будь-якого із знайдених значень вагових коефіцієнтів \bar{w} , що належить

області можливих значень вагових коефіцієнтів синаптичних зв'язків ШНМ із РБФ – опуклому многограннику Ω . Для цього формуємо задачу лінійного програмування:

$$w_h \rightarrow \min(\max) \quad (9)$$

за умов сумісності ІСЛАР (7).

Враховуючи відомі процедури розв'язування задачі лінійного програмування можлива втрата точності при пошуку вагових коефіцієнтів \bar{w} за рахунок похибки заокруглень, що в свою чергу призведе до порушення умови належності одержаного вихідного сигналу ШНМ із РБФ допустимому коридору інтервальних вихідних сигналів. Поряд із цим точкові значення вагових коефіцієнтів синаптичних зв'язків ШНМ із РБФ не дозволяють в достатній мірі дослідити прогностичні властивості інтервальної моделі штучної нейромережі даного типу.

Зважаючи на це, доцільно знайти множинні значення вагових коефіцієнтів ШНМ із РБФ, точність яких залежить від розмірів області можливих значень вагових коефіцієнтів синаптичних зв'язків. Оскільки областю можливих значень вагових коефіцієнтів штучної нейронної мережі з радіально-базисними функціями є опуклий многогранник, як зазначалося вище, то це в певній мірі ускладнює алгоритм побудови коридорів інтервальних моделей вихідних сигналів ШНМ із РБФ. У зв'язку з цим шукаємо спрощені множини значень вагових коефіцієнтів (наприклад, у вигляді прямокутних паралелепіпедів Π^+), які максимально покривають область можливих значень вагових коефіцієнтів синаптичних зв'язків й поряд з цим є простішими при побудові інтервальних моделей вихідних сигналів штучних нейромереж радіального типу.

Щоб одержати множинні значення вагових коефіцієнтів ШНМ із РБФ, знаходимо $2h$ вершин опуклого многогранника Ω із розв'язку $2h$ задач лінійного програмування у вигляді:

$$w_h \rightarrow \min, h = 1 \dots H \quad (10)$$

$$w_h \rightarrow \max, h = 1 \dots H \quad (11)$$

за умов (7).

В результаті розв'язку задач (10), (11) за умов (7) одержуємо $2H$ вершин \bar{w}_s многогранника Ω , де $s=1 \dots 2H$. Одержана множина вагових коефіцієнтів синаптичних зв'язків ШНМ із РБФ Ω^* є також многогранником, проте містить фіксовану кількість вершин $2H$ і характеризується простішою процедурою обчислення.

Зважаючи на це, прогнозований коридор вихідного сигналу штучної нейронної мережі з радіально-базисними функціями матиме такий вигляд:

$$\begin{aligned} & \left[\min_{\bar{w}_s \in \Omega} (\bar{f}^T (\|\bar{x}(k) - \bar{c}_i\| R^{-1}) \cdot \bar{w}_s), \right. \\ & \left. \max_{\bar{w}_s \in \Omega} (\bar{f}^T (\|\bar{x}(k) - \bar{c}_i\| R^{-1}) \cdot \bar{w}_s) \right] \end{aligned} \quad (12)$$

Для знаходження коридору вихідного сигналу ШНМ із РБФ використовуємо методи лінійного програмування.

Приклад

Ілюстрацію для настроювання структури ШНМ із РБФ, а також оцінку обґрунтованості запропонованого методу ідентифікації вагових коефіцієнтів нейромережі даного типу проведено на прикладі задачі моделювання індикаторів економічної безпеки (ІЕБ) Тернопільської області, враховуючи чинники, що на них впливають.

Позначимо за $\bar{x} = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_8)$ - чинники, що впливають на ІЕБ Тернопільської області (див. таблицю 1), як "входи" ШНМ із РБФ, а y - кількість безробітних, які зареєстровані в державній службі зайнятості, - один із ІЕБ, як вихідний нейромережевий сигнал.

Судячи з експериментальних даних, досліджувана штучна нейронна мережа з радіально-базисними функціями має 8 нейронів вхідного рівня та 1 нейрон вихідного рівня. Шукаємо кількість нейронів прихованого рівня штучної нейромережі даного типу. Для цього визначаємо параметри прихованого рівня - центри радіально-базисних, застосовуючи субтрактивний алгоритм, який ґрунтується на відомому методі

кластеризації [3]. Для реалізації методу кластеризації використано пакет прикладних програм Matlab 7.1.

Суттєвий вплив на визначення кількості нейронів прихованого рівня штучної нейромережі радіального типу за методом кластеризації [3] має значення вектора, що визначає розміри кластерів. Зазвичай, надто малі значення вектора призводять до того, що утворюється багато малих кластерів й формується надто громіздка структура ШНМ із РБФ. Стандартні відхилення визначаємо емпірично, оскільки нейромережа даного типу не є критичною до їх вибору.

У результаті проведених експериментів одержано такі архітектури ШНМ із РБФ – 8:51:1, 8:16:1, 8:8:1, 8:5:1. Структура штучної нейронної мережі радіального типу, що містить 51 нейрон прихованого рівня має високі прогностичні властивості, проте є надто громіздкою, що збільшує обчислювальні витрати. Результати досліджень архітектур радіальних нейромереж, що містять 16 і 8 нейронів прихованого рівня показали, що дані структури мають низькі прогностичні властивості. З огляду на вищесказане, для проведення подальших досліджень та розв'язку поставленої задачі обрано оптимальну структуру штучної нейронної мережі радіального типу 8:5:1 (значення знайдених центрів наведено у таблиці 2). Дана структура ШНМ із РБФ наведена на рисунку 2.

Таблиця 1. Дані про кількість безробітних, які зареєстровані в державній службі зайнятості, як одного із індикаторів економічної безпеки Тернопільської області, та чинники впливу

| Період | № місяця | Перераховано митних платежів в держбюджет, грн. | Оформлено вантажів, тис. тонн | Кількість оформлених ВМД | Оформлено транспортних засобів | К-сть оформлених попередніх декларацій | К-сть оформлених попередніх повідомлень | Заведено справ про порушення митних правил на суму, грн. | Заведено справ про контрабанду на суму, грн. | К-сть безробітних, які зареєстровані в державній службі зайнятості, тис. осіб |
|--------|----------|---|-------------------------------|--------------------------|--------------------------------|--|---|--|--|---|
| | k | x_1 | x_2 | x_3 | x_4 | x_5 | x_6 | x_7 | x_8 | $[y^-(k); y^+(k)]$ |
| 2003 | 1 | 5216128,14 | 8,86 | 567 | 451 | 48 | 227 | 9873441,0 | 23764 | [30,528; 54,272] |
| | 2 | 6443868,7 | 11,05 | 731 | 615 | 56 | 288 | 84588,0 | - | [31,032; 55,168] |
| | 3 | 7647405,08 | 14,46 | 829 | 687 | 45 | 307 | 20912364,0 | 9726143 | [30,816; 54,784] |
| | 4 | 4790370,33 | 16,28 | 744 | 703 | 21 | 281 | 139137,0 | - | [30,456; 54,144] |
| | 5 | 5629560,98 | 19,4 | 771 | 685 | 29 | 320 | 46197,0 | - | [30,168; 53,632] |
| | 6 | 5255195,33 | 18,39 | 849 | 719 | 30 | 318 | 155707,0 | - | [29,592; 52,608] |
| | 7 | 18744222,93 | 46,71 | 1081 | 1365 | 34 | 452 | 190166,0 | - | [28,224; 50,176] |
| | 8 | 6189293,18 | 22,95 | 864 | 1011 | 20 | 369 | 12443,0 | - | [27,864; 49,536] |
| | 9 | 5225720,85 | 20,56 | 879 | 828 | 15 | 299 | 214779,0 | - | [27,504; 48,896] |
| | 10 | 6429778,68 | 22,0 | 937 | 926 | 24 | 385 | 95512,0 | - | [27; 48] |
| | 11 | 7137739,58 | 23,02 | 861 | 919 | 21 | 325 | 48998,0 | - | [27,792; 49,408] |
| | 12 | 10227286,18 | 19,29 | 981 | 897 | 31 | 364 | 59592,0 | - | [28,584; 50,816] |
| | 13 | 3923498,71 | 8,84 | 560 | 322 | 23 | 189 | 11514,0 | - | [30,096; 53,504] |
| | 14 | 5370652,61 | 14,81 | 751 | 651 | 34 | 257 | 54677,0 | - | [31,104; 55,296] |
| | 15 | 8012252,82 | 13,19 | 855 | 694 | 40 | 310 | 75375,0 | 380000 | [32,904; 58,496] |

продовження таблиці 1

| | | | | | | | | | | |
|------|------------|-------------|-------|------|------|-----|---------|-----------|------------------|------------------|
| 2004 | 16 | 6861988,54 | 11,49 | 797 | 638 | 38 | 316 | 69205,0 | - | [34,056; 60,544] |
| | 17 | 6984819,3 | 29,79 | 812 | 916 | 24 | 279 | 92951,0 | - | [32,256; 57,344] |
| | 18 | 6853413,22 | 12,25 | 808 | 677 | 30 | 296 | 150510,0 | 48315 | [30,744; 54,656] |
| | 19 | 7702523,48 | 14,7 | 811 | 783 | 42 | 338 | 6790,0 | - | [28,872; 51,328] |
| | 20 | 9554145,0 | 29,57 | 842 | 952 | 27 | 294 | 43772,0 | - | [28,656; 50,944] |
| | 21 | 9500431,79 | 15,77 | 827 | 731 | 36 | 321 | 10039,0 | - | [28,152; 50,048] |
| 22 | 9729619,84 | 15,32 | 900 | 786 | 48 | 345 | 48993,0 | - | [27,36; 48,64] | |
| 2005 | 23 | 9027142,01 | 18,14 | 897 | 809 | 32 | 299 | 15089,69 | - | [27,648; 49,152] |
| | 24 | 8170620,84 | 16,87 | 995 | 795 | 54 | 278 | 6525,0 | - | [28,224; 50,176] |
| | 25 | 5022599,49 | 11,39 | 627 | 510 | 40 | 217 | 353342,0 | 146922 | [28,512; 50,688] |
| | 26 | 7161648,44 | 13,07 | 807 | 656 | 72 | 257 | 5649,0 | - | [29,088; 51,712] |
| | 27 | 12309469,62 | 18,1 | 1134 | 893 | 80 | 372 | 186243,0 | 131282 | [29,664; 52,736] |
| | 28 | 13007569,35 | 16,13 | 1018 | 867 | 86 | 456 | 3430,0 | - | [29,448; 52,352] |
| | 29 | 10733286,3 | 16,48 | 882 | 812 | 100 | 398 | 2508,0 | - | [28,368; 50,432] |
| | 30 | 13611203,35 | 14,26 | 1011 | 880 | 126 | 443 | 1290062,0 | - | [28,584; 50,816] |
| | 31 | 13804786,97 | 13,84 | 937 | 870 | 151 | 384 | 100,0 | - | [28,8; 51,2] |
| | 32 | 11043825,43 | 16,5 | 912 | 922 | 167 | 331 | 2262267,0 | 2246742 | [27,432; 48,768] |
| | 33 | 10132015,96 | 27,58 | 1020 | 966 | 174 | 377 | 33163,0 | - | [26,208; 46,592] |
| | 34 | 7924811,25 | 22,55 | 1023 | 960 | 126 | 419 | 33439,0 | - | [24,264; 43,136] |
| | 35 | 6548181,0 | 20,13 | 1029 | 935 | 141 | 385 | 61120,0 | - | [25,776; 45,824] |
| 36 | 8384833,03 | 17,48 | 1016 | 913 | 203 | 353 | 1033,0 | - | [29,088; 51,712] | |
| 2006 | 37 | 5031581,82 | 11,67 | 606 | 651 | 113 | 226 | 579401,0 | 336440 | [30,672; 54,528] |
| | 38 | 7959606,05 | 14,87 | 916 | 813 | 147 | 328 | 206078,0 | 90584 | [31,032; 55,168] |
| | 39 | 8888419,67 | 18,51 | 1091 | 943 | 202 | 402 | 7063043,0 | - | [31,608; 56,192] |
| | 40 | 8637731,69 | 13,97 | 868 | 756 | 154 | 358 | 55263,0 | - | [32,112; 57,088] |
| | 41 | 8961534,13 | 15,23 | 1012 | 899 | 154 | 443 | 326620,0 | - | [32,04; 56,96] |
| | 42 | 9343750,32 | 19,27 | 904 | 833 | 148 | 358 | 123685,0 | - | [32,256; 57,344] |
| | 43 | 9876239,92 | 14,93 | 915 | 800 | 155 | 373 | 27813,0 | - | [22,968; 40,832] |
| | 44 | 13592727,48 | 23,63 | 972 | 1010 | 176 | 363 | 157280,0 | - | [20,664; 36,736] |
| | 45 | 14002415,71 | 19,73 | 979 | 911 | 160 | 417 | 284781,0 | - | [19,728; 35,072] |
| | 46 | 11063717,14 | 23,26 | 1048 | 987 | 126 | 448 | 48667,0 | - | [19,368; 34,432] |
| | 47 | 14460756,33 | 24,11 | 1049 | 1033 | 132 | 434 | 15705,0 | - | [22,032; 39,168] |
| | 48 | 12767157,28 | 21,91 | 1167 | 1083 | 203 | 500 | 2176,0 | - | [23,904; 42,496] |
| 2007 | 49 | 7014760,0 | 17,46 | 732 | 686 | 121 | 281 | 14802,0 | - | [24,48; 43,52] |
| | 50 | 10081982,4 | 16,12 | 945 | 824 | 132 | 376 | 782384,0 | - | [24,264; 43,136] |
| | 51 | 13057968,06 | 21,51 | 1210 | 1106 | 226 | 481 | 797749,0 | - | [24,624; 43,776] |
| | 52 | 14066271,7 | 17,17 | 1008 | 908 | 117 | 437 | 244659,0 | - | [26,928; 47,872] |
| | 53 | 13314542,75 | 20,71 | 1139 | 1083 | 119 | 470 | 116791,0 | 231223 | [27,216; 48,384] |
| | 54 | 15413756,2 | 19,83 | 1104 | 1033 | 117 | 446 | 127809,0 | - | [23,832; 42,368] |
| | 55 | 15760830,19 | 20,61 | 1176 | 1102 | 136 | 488 | 16932,0 | - | [19,224; 34,176] |
| | 56 | 14473102,25 | 19,73 | 1074 | 995 | 128 | 481 | 1123801,0 | - | [18,072; 32,128] |
| | 57 | 15579287,24 | 24,39 | 1063 | 1083 | 134 | 411 | 66044,0 | - | [17,064; 30,336] |
| | 58 | 15950395,32 | 36,96 | 1209 | 1392 | 132 | 508 | 147657,0 | 359159 | [16,344; 29,056] |
| | 59 | 18205037,37 | 38,3 | 1261 | 1448 | 169 | 505 | 55362,0 | - | [15,912; 28,288] |
| | 60 | 21199726,08 | 32,64 | 1339 | 1329 | 208 | 470 | 33375,0 | - | [16,056; 28,544] |
| 2008 | 61 | 11770356,47 | 25,04 | 782 | 686 | 121 | 281 | 1500,0 | - | [20,52; 36,48] |
| | 62 | 25053375,99 | 36,31 | 1388 | 824 | 132 | 376 | 23248,0 | - | [22,32; 39,68] |
| | 63 | 27553201,00 | 43,85 | 1408 | 1106 | 226 | 481 | 398596,0 | 789146 | [22,32; 39,68] |
| | 64 | 28983929,32 | 39,81 | 1300 | 908 | 117 | 437 | 398596,0 | - | [21,456; 38,144] |
| | 65 | 29995740,73 | 42,72 | 1452 | 1083 | 119 | 470 | 6557,0 | - | [20,448; 36,352] |
| | 66 | 29179239,08 | 35,46 | 1411 | 1033 | 117 | 446 | 12859,0 | - | [18,288; 32,512] |
| | 67 | 55494159,65 | 37,06 | 1686 | 1102 | 136 | 488 | 491467,0 | 245675 | [16,128; 28,672] |
| | 68 | 42278314,48 | 48,38 | 1637 | 995 | 128 | 481 | 650,0 | - | [14,904; 26,496] |
| | 69 | 56531261,49 | 75,43 | 1948 | 1083 | 134 | 411 | 11909,0 | - | [14,544; 25,856] |
| | 70 | 41329962,64 | 64,87 | 1857 | 1392 | 132 | 508 | 38072,0 | - | [14,544; 25,856] |
| | 71 | 39492118,67 | 48,41 | 1456 | 1448 | 169 | 505 | 50271,0 | - | [14,4; 25,6] |
| | 72 | 43544162,69 | 27,31 | 1258 | 1329 | 208 | 470 | 5268,0 | - | [17,424; 30,976] |
| 2009 | 73 | 17294990,52 | 9,59 | 606 | 525 | 127 | 194 | 24670,0 | 1123802 | 34,6 |
| | 74 | 15166439,17 | 14,02 | 709 | 703 | 147 | 219 | 7141,0 | - | 32,7 |
| | 75 | 29417337,31 | 25,38 | 962 | 556 | 212 | 248 | 21577,0 | - | 32,2 |
| | 76 | 28610400,3 | 24,57 | 942 | 929 | 212 | 279 | 263504,0 | - | 30,4 |
| | 77 | 26798002,66 | 25,03 | 954 | 979 | 212 | 299 | 2682885,0 | 227926 | 26,9 |
| | 78 | 25847898,49 | 24,98 | 1018 | 1074 | 198 | 350 | 2682885,0 | - | 21,8 |
| | 79 | 34654340,36 | 26,56 | 1182 | 1264 | 236 | 406 | 1211,0 | - | 17,1 |
| | 80 | 37617759,27 | 46,19 | 1162 | 1372 | 193 | 332 | 3480,0 | - | 14,9 |
| | 81 | 38103957,91 | 44,65 | 1335 | 1493 | 191 | 377 | 1400,0 | - | 14,0 |
| | 82 | 21243943,8 | 35,3 | 1304 | 1289 | 208 | 404 | 3100,0 | - | 13,2 |
| | 83 | 25873235,43 | 43,28 | 1322 | 1478 | 212 | 369 | 81237,0 | - | 11,9 |
| | 84 | 28284474,1 | 35,67 | 1414 | 1346 | 240 | 410 | 9346,0 | - | 11,2 |

Таблиця 2. Значення центрів радіально-базисних функцій

| | | | | | | | | |
|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| \bar{c}_1 | 0,106 | 0,104 | 0,192 | 0,349 | 0,093 | 0,414 | 0,001 | 0,002 |
| \bar{c}_2 | 0,192 | 0,164 | 0,302 | 0,503 | 0,644 | 0,715 | 0,014 | 0,003 |
| \bar{c}_3 | 0,463 | 0,403 | 0,615 | 0,874 | 1,000 | 0,693 | 0,003 | 0,002 |
| \bar{c}_4 | 0,480 | 0,400 | 0,613 | 0,607 | 0,453 | 0,806 | 0,002 | 0,001 |
| \bar{c}_5 | 0,059 | 0,129 | 0,124 | 0,311 | 0,471 | 0,288 | 0,003 | 0,002 |

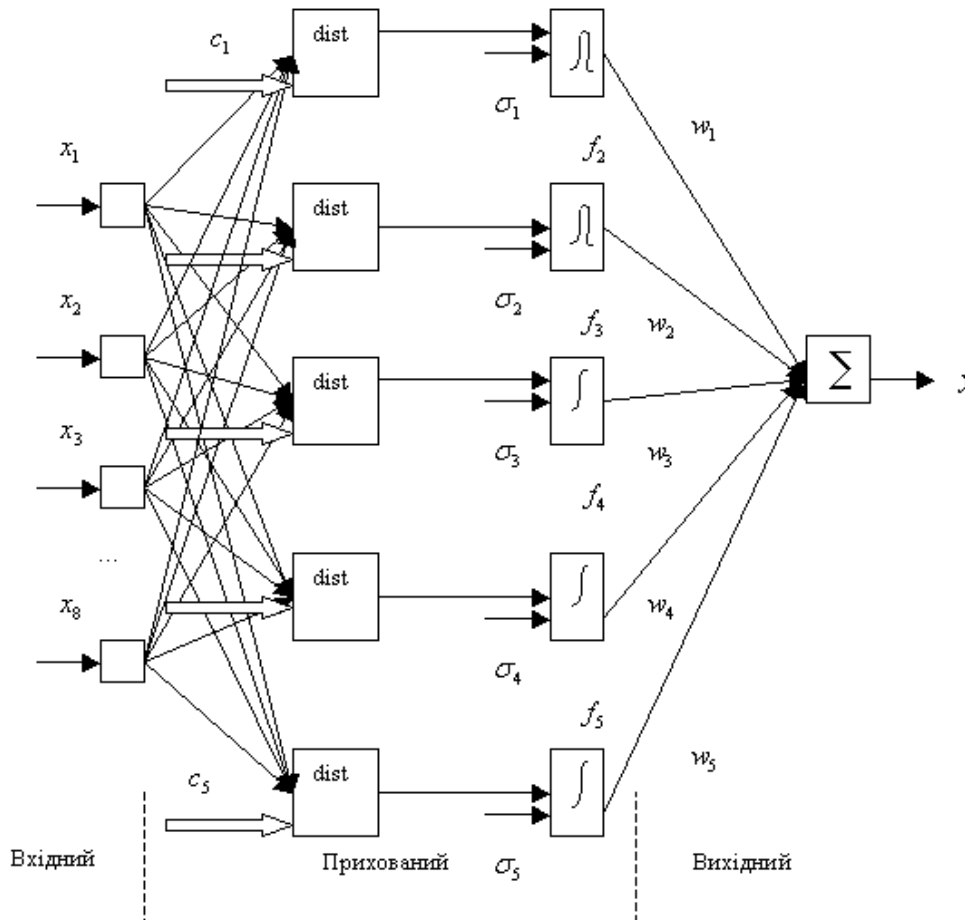


Рисунок 2 - Оптимальна структура штучної нейронної мережі з радіально-базисними функціями

Поділимо експериментальні дані на навчальну вибірку (2003р.-2008р.), $k=1,2,\dots,72$ та контрольну вибірку (2009р.), $k=73,\dots,84$. Як показують дослідження, експериментальні дані кількості зареєстрованих безробітних у державній службі зайнятості за період із 2003 р. по 2008 р. є неточними, з похибкою 28 %, тобто $\zeta = 28\%$.

Інтервальні значення кількості безробітних, які зареєстровані в державній службі зайнятості $y^-(k) = y(k) - \zeta(k)$, $y^+(k) = y(k) + \zeta(k)$ наведено в таблиці 1.

Умови для ідентифікації вагових коефіцієнтів синаптичних зв'язків ШНМ із РБФ 8:5:1, записуємо в такому вигляді:

$$\begin{cases} y^-(k) \leq w_0 + w_1 f_1(\|\bar{x}(k) - \bar{c}_1\| R^{-1}) + \dots \\ \dots + w_5 f_5(\|\bar{x}(k) - \bar{c}_5\| R^{-1}) \leq y^+(k) \\ \vdots \\ y^-(k) \leq w_0 + w_1 f_1(\|\bar{x}(k) - \bar{c}_1\| R^{-1}) + \dots \\ \dots + w_5 f_5(\|\bar{x}(k) - \bar{c}_5\| R^{-1}) \leq y^+(k) \\ \vdots \\ y^-(k) \leq w_0 + w_1 f_1(\|\bar{x}(k) - \bar{c}_1\| R^{-1}) + \dots \\ \dots + w_5 f_5(\|\bar{x}(k) - \bar{c}_5\| R^{-1}) \leq y^+(k) \end{cases} \quad (13)$$

Розв'язуючи задачі лінійного програмування (10), (11), враховуючи умови (13) та експериментальні дані, одержуємо вершини області можливих значень вагових коефіцієнтів синаптичних зв'язків ШНМ із РБФ:

$$\bar{w}_1 = (0.6539; 4.6070; 2.8899; 27.2540; -9.6643),$$

$$\begin{aligned}\bar{w}_2 &= (1.8234; 3.3880; 27.0665; 22.6321; -9.5643), \\ \bar{w}_3 &= (0.6539; 4.6070; 2.8899; 27.2541; -9.6644), \\ \bar{w}_4 &= (3.8291; 6.5784; 28.2013; 18.9566; -8.8253), \\ \bar{w}_5 &= (0.6539; 4.6070; 2.8899; 27.2541; -9.6643), \\ \bar{w}_6 &= (3.8431; 6.5813; 4.2346; 18.9643; -8.8238), \\ \bar{w}_7 &= (3.8431; 6.5813; 3.2346; 18.9643; -8.8238), \\ \bar{w}_8 &= (3.8291; 6.5784; 28.2013; 18.9567; -8.8254), \\ \bar{w}_9 &= (2.5599; 6.1957; 3.6389; 27.5541; -9.0195), \\ \bar{w}_{10} &= (3.8279; 6.5447; 4.2251; 18.9878; -2.5145).\end{aligned}$$

та гарантовані прогнозні коридори для ІЕБ – кількості зареєстрованих безробітних у державній службі зайнятості:

$$\begin{aligned}[\bar{y}^-(k); \bar{y}^+(k)] &= \\ &= \left[\min_{w_i \in \Omega} (\bar{w}_1 \cdot f_1(\|\bar{x}(k) - \bar{c}_1\|_{R^{-1}}) + \dots + \bar{w}_5 \cdot f_5(\|\bar{x}(k) - \bar{c}_5\|_{R^{-1}})); \right. \\ &\left. \max_{w_i \in \Omega} (\bar{w}_1 \cdot f_1(\|\bar{x}(k) - \bar{c}_1\|_{R^{-1}}) + \dots + \bar{w}_5 \cdot f_5(\|\bar{x}(k) - \bar{c}_5\|_{R^{-1}})) \right]\end{aligned}$$

На рисунку 3 наведено графік прогнозу кількості зареєстрованих безробітних у державній службі зайнятості в межах похибок

експериментальних даних на основі інтервальної моделі штучної нейронної мережі з радіально-базисними функціями з ідентифікованими ваговими коефіцієнтами, одержаними за формулою середнього:

$$\begin{aligned}\bar{w}_1 &= 1/10 \cdot (0.6539 + 1.8234 + 0.6539 + 3.8291 + \\ &+ 0.6539 + 3.8431 + 3.8431 + 3.8291 + 2.5599 + 3.8279) = \\ &= 2,5517;\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\bar{w}_2 &= 1/10 \cdot (4.6070 + 3.3880 + 4.6070 + 6.5784 + \\ &+ 4.6070 + 6.5813 + 6.5813 + 6.5784 + 6.1957 + 6.5447) = \\ &= 5,6268;\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\bar{w}_3 &= 1/10 \cdot (2,8899 + 27,0665 + 2,8899 + \\ &+ 28,2013 + 2,8899 + 4,2346 + 3,2346 + 28,2013 + \\ &+ 3,6389 + 4,2251) = 10,7472;\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\bar{w}_4 &= 1/10 \cdot (27,2540 + 22,6321 + 27,2541 + \\ &+ 18,9566 + 27,2541 + 18,9643 + 18,9643 + 18,9567 + \\ &+ 27,5541 + 18,9878) = 22,7778;\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\bar{w}_5 &= 1/10 \cdot ((-9,6643) + (-9,5643) + (-9,6644) + \\ &+ (-8,8253) + (-9,6643) + (-8,8238) + (-8,8238) + \\ &+ (-8,8254) + (-9,0195) + (-2,5145)) = -8,5389.\end{aligned}$$

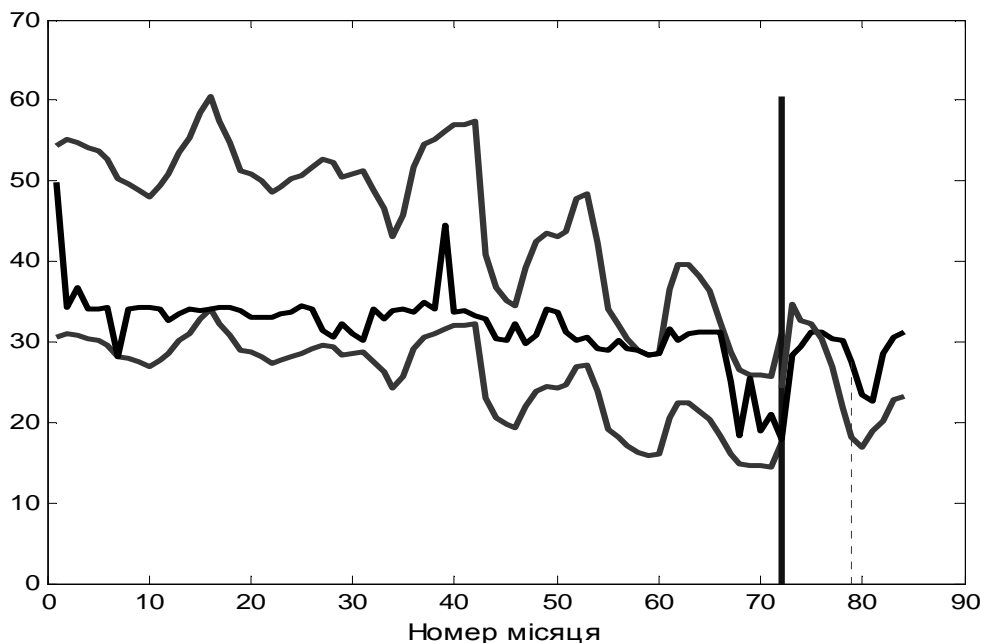


Рисунок 3 - Прогноз ІЕБ – кількості зареєстрованих безробітних, на основі інтервальної моделі ШНМ із РБФ

Як бачимо із рисунка 3, з 1 по 72 місяць дотримується умова включення модельованого показника в коридор експериментальних даних, ширина якого визначається шириною інтервалу. З 73 по 84 місяць наведено результат використання розробленої ШНМ із РБФ для прогнозування модельованого індексу економічної безпеки держави, а також крива

(сірим кольором) реального значення цього показника.

У прогнозний період відносна максимальна похибка відхилення прогнозного значення від експериментального на 79 місяць, як наведено на рисунку 3, не більша 18 %, що засвідчує достатньо високі прогностичні властивості побудованої штучної нейронної мережі радіального типу на основі аналізу

інтервальних даних, а це, в свою чергу, створює перспективи подальшого розвитку розглянутого методу ідентифікації вагових коефіцієнтів.

Висновки

Розглянуто задачу ідентифікації вагових коефіцієнтів синаптичних зв'язків штучних нейронних мереж із радіально-базисними функціями на основі аналізу інтервальних даних. У процесі розв'язання задачі отримано такі наукові та практичні результати:

1. Обґрунтовано вибір оптимальної архітектури штучної нейронної мережі радіального типу для одержання інтервальної моделі ШНМ із РБФ.

2. Вперше запропоновано та обґрунтовано метод ідентифікації вагових коефіцієнтів синаптичних зв'язків штучних нейронних мереж із радіально-базисними функціями, який на відміну від існуючих, базується на процедурах лінійного програмування і відрізняється невисокою обчислювальною складністю. Розроблений метод уможливорює одержати ШНМ із РБФ, яка забезпечує прогноз із заданою точністю в межах обмежених за амплітудою похибок експериментальних даних. Реалізацію методу проведено на конкретному прикладі і результатами підтверджено ефективність його використання.

Список використаної літератури

1. Головки В.А. Нейроинтеллект: теория и применение. Кн. 2. Самоорганизация, отказоустойчивость и применение нейронных сетей / В.А. Головки. – Брест: Изд. БПИ, 1999. – 228 с.
2. Круглов В.В. Искусственные нейронные сети. Теория и практика / В.В. Круглов, В.В. Борисов. – М.: Горячая линия - Телеком, 2001. – 382 с.
3. Nelles O. Nonlinear Systems Identification / O. Nelles. – Berlin: Springer, 2001. – 785 p.
4. Rough Sets-Based Recursive Learning Algorithm for Radial Basis Function Networks / Y. Bodyanskiy, Y. Gorshkov, V. Kolodyazhnyi et al. // Berlin: Springer-Verlag, 2005. – P. 59-65.
5. Рекуррентный алгоритм обучения радиально-базисных нейронных сетей, основанный на приближительных множествах / Е.В. Бодянский, Е.В. Горшков, В.В. Колодяжный [та ін.] // Радиоелектроніка. Інформатика. Управління. – 2005. – № 1. – С. 116-122.
6. Руденко О.Г. Штучні нейронні мережі: навчальний посібник / О.Г. Руденко, С.В. Бодянский. – Х.: ТОВ «Компанія СМІТ», 2006. – 404 с.
7. Дивак М.П. Допустиме оцінювання множини параметрів статичної системи в класі багатомірних еліпсоїдів / М.П. Дивак // Комп'ютинг. – 2002. – Т. 1. – №1. – С. 108 - 114.
8. Калмыков С.А. Методы интервального анализа / С.А. Калмыков, Ю.И. Шокин, З.Х. Юлдашев. – Новосибирск: Наука, 1986. – 222 с.

Надійшла до редколегії 02.04.2012

М.П. ДЫВАК, Н.Я. САВКА

Тернопольский национальный экономический университет, г. Тернополь, Украина

M.P. DYVAK, N.J. SAVKA

Ternopil National Economic University, Ukraine

МЕТОД ИДЕНТИФИКАЦИИ ВЕСОВЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ СИНАПТИЧЕСКИХ СВЯЗЕЙ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ С РАДИАЛЬНО БАЗИСНЫМИ ФУНКЦИЯМИ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ИНТЕРВАЛЬНЫХ ДАННЫХ

METHOD OF IDENTIFYING COEFFICIENTS OF SYNAPTIC CONNECTIONS OF ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS WITH RADIAL BASIS FUNCTIONS BASED ON THE ANALYSIS OF INTERVAL DATA

Предложен метод идентификации весовых коэффициентов синаптических связей ИНС с РБФ, что основывается на анализе интервальных данных. Рассмотрен пример применения метода.

The method of identification coefficients synaptic connections of ANN with RBF, based on analysis of interval data. An example application of the method.

Ключевые слова: искусственные нейронные сети с радиально базисными функциями, метод идентификации, интервальные данные, интервальная модель, интервальная система линейных уравнений алгебраизма.

Keywords: artificial neural networks with radial basis functions, method of identification, interval data, interval model, interval system of linear algebraic equations.