

ДОДАТОК А

Графічний матеріал кваліфікаційної роботи



Харківський національний
університет радіоелектроніки



Кафедра ЕОМ

Кваліфікаційна робота
Другий (магістерський) рівень

Методи коригування нелінійності функції перетворення засобів вимірювань за допомогою штучних нейронних мереж

Автор:
Сергій Авакін,
студ. гр. СПМ-23-4

Керівник:
Олег Запорожець,
доц. каф. ЕОМ

2

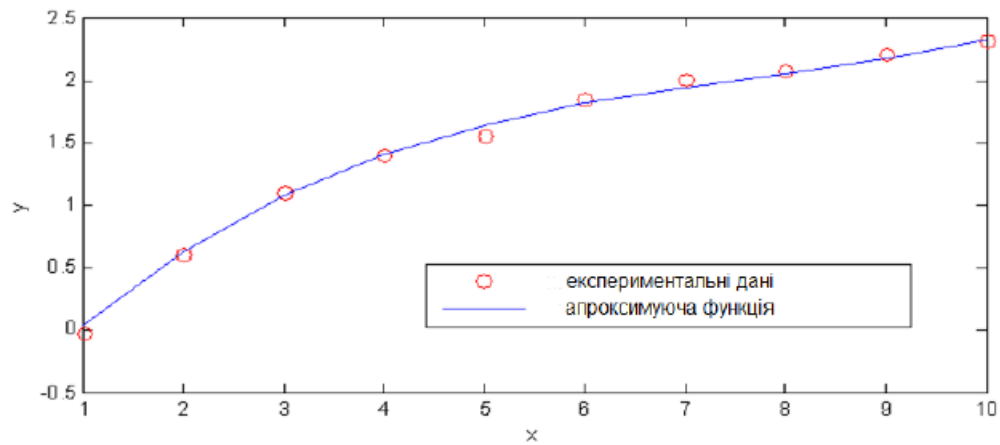
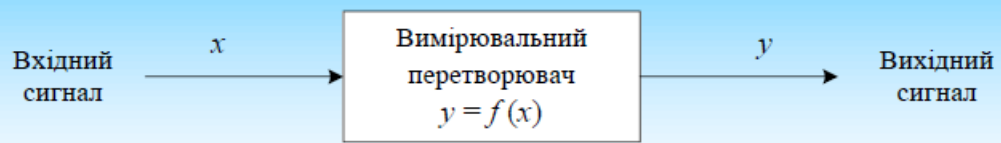
Мета і задачі дослідження

Мета: розробка та дослідження властивостей адаптивної системи коригування нелінійності функції перетворення засобів вимірювань на базі штучної нейронної мережі.

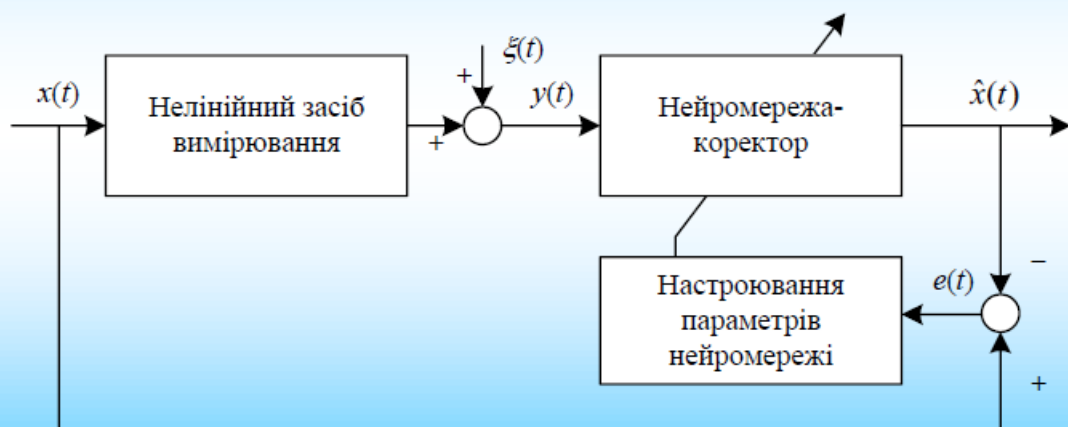
Задачі:

- 1) аналіз підходів до побудови функцій перетворення засобів вимірювань та методів коригування нелінійності;
- 2) аналіз структури, властивостей та методів навчання багатошарового перцептрона та рідіально-базисної нейромережі;
- 3) розробка структури адаптивної системи коригування нелінійності функції перетворення засобу вимірювання за допомогою штучної нейронної мережі;
- 4) комп'ютерне моделювання системи коригування нелінійності функції перетворення засобу вимірювання за допомогою штучної нейронної мережі;
- 5) дослідження впливу виду нелінійності на якість коригування функції перетворення;
- 6) порівняльний аналіз нейромережових коректорів на базі MLP та RBFN і коректора на базі поліноміального апроксиматора.

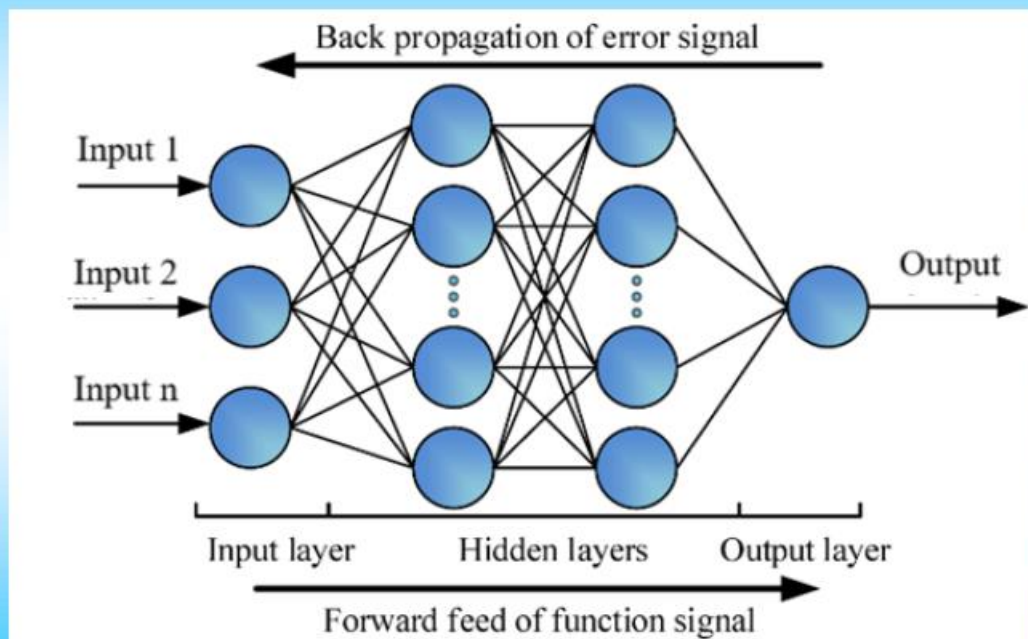
Побудова функції перетворення засобів вимірювань



Структура адаптивної системи коригування нелінійності функції перетворення засобу вимірювання



Багатошаровий перцептрон



Алгоритм Левенберга-Марквардта

Середньоквадратична функція втрат

$$E(w) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m e_i^2(w) = \frac{1}{2} e^T(w) e(w) \rightarrow \min$$

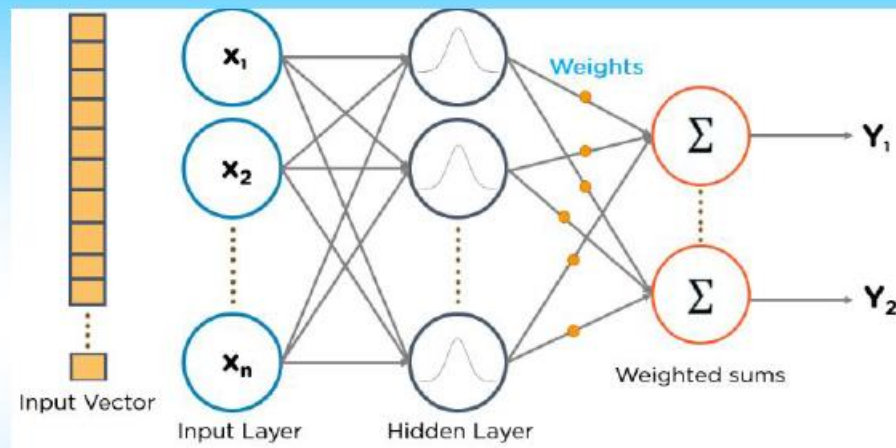
Настроювання синаптичних вагових коефіцієнтів

$$w(t+1) = w(t) - \left[J^T(w(t)) J(w(t)) + \mu I \right]^{-1} J^T(w(t)) e(w(t))$$

$$J(w) = \begin{bmatrix} \frac{\partial e_1(w)}{\partial w_1} & \frac{\partial e_1(w)}{\partial w_2} & \dots & \frac{\partial e_1(w)}{\partial w_n} \\ \frac{\partial e_2(w)}{\partial w_1} & \frac{\partial e_2(w)}{\partial w_2} & \dots & \frac{\partial e_2(w)}{\partial w_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial e_m(w)}{\partial w_1} & \frac{\partial e_m(w)}{\partial w_2} & \dots & \frac{\partial e_m(w)}{\partial w_n} \end{bmatrix} \text{ -- матриця Якобі}$$

Коли параметр регуляризації μ має великі значення, алгоритм наближається до методу градієнтного спуску, а коли μ прямує до нуля, матимемо метод Гауса-Ньютона.

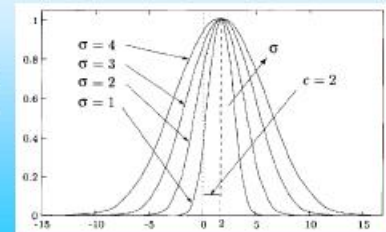
Радіально-базисна нейронна мережа



Рівняння перетворення

Функція Гауса

$$y_i = \sum_{j=1}^k w_{ij} \varphi_j(x) \quad \varphi_j(x) = \varphi_j(\|x - c_j\|) = e^{-\frac{(x-c_j)^2}{2\sigma_j^2}}$$



Навчання RBFN

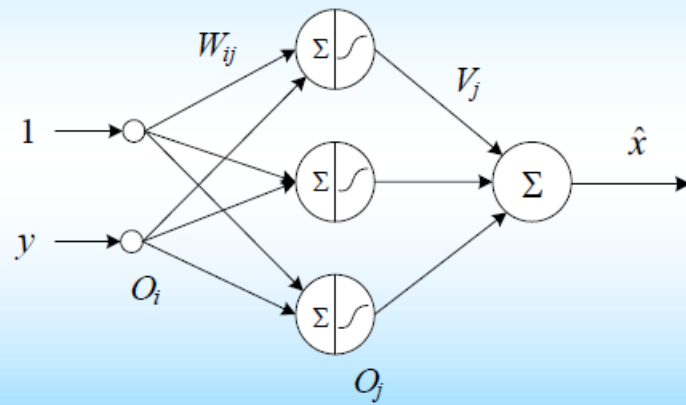
1. Визначення кількості нейронів N у прихованому шарі.
2. Визначення центрів нейронів c_i за допомогою алгоритму k -кластеризації:
 - Крок 1. Визначають кількість кластерів $S < N$.
 - Крок 2. Із навчальної вибірки $\{x_1, x_2, \dots, x_N\}$ обирають S даних у якості центрів $c_i = x_j, j = 1, 2, \dots, S$.
 - Крок 3. Додають нові вектори $x_i, i = S+1, S+2, \dots, N$ в один із кластерів за критерієм мінімуму відстані до центру кластера.
 - Крок 4. Перевизначають центри кластерів $c_j = \frac{1}{N_j} \sum_{i \in C_j} x_i, j = 1, 2, \dots, S$
3. Визначення радіусів функцій Гауса з використанням методу k -найближчих сусідів. Параметр σ_i обирається як середньоквадратична відстань між центром c_i та його K найближчими сусідами

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \|c_i - c_k\|^2}$$

4. Розрахунок вагових коефіцієнтів w_{ij} нейронів вихідного шару за допомогою методу найменших квадратів.

Нейромережеві пристрої для коригування нелінійності функції перетворення

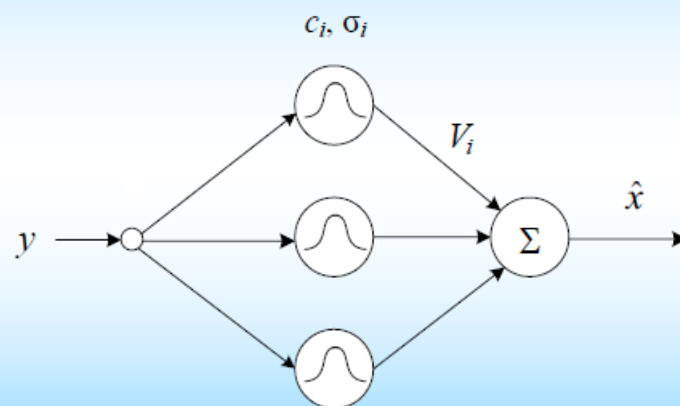
MLP-коректор



$$\hat{x} = \sum_{j=1}^n V_j O_j, \quad O_j = \frac{1}{1 + e^{-S_j}}, \quad S_j = \sum_{i=1}^m W_{ij} O_i.$$

Нейромережеві пристрої для коригування нелінійності функції перетворення

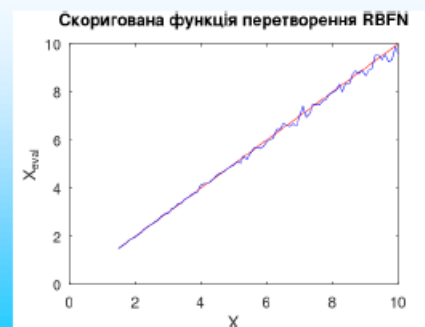
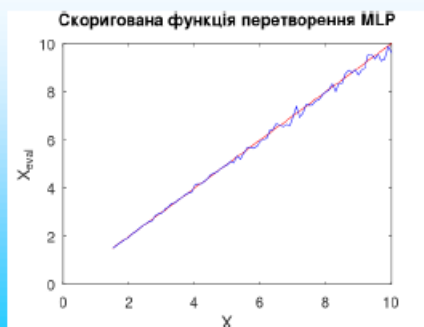
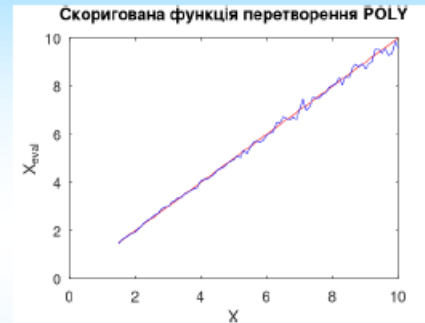
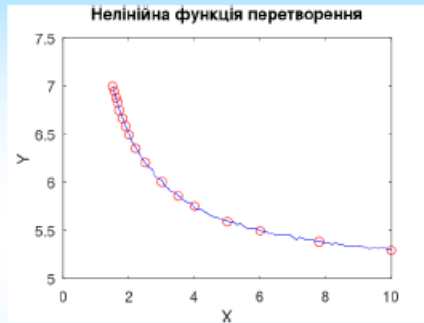
RBFN-коректор



$$\hat{x} = \sum_{i=1}^n V_i \exp\left(-\frac{(y - c_i)^2}{2\sigma_i^2}\right)$$

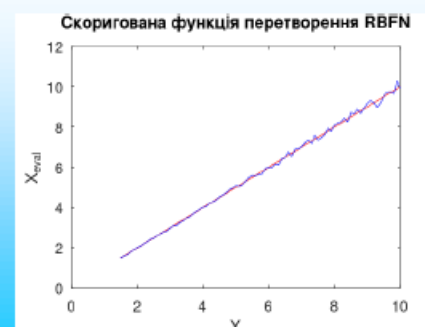
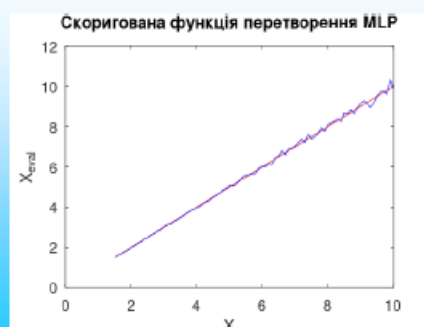
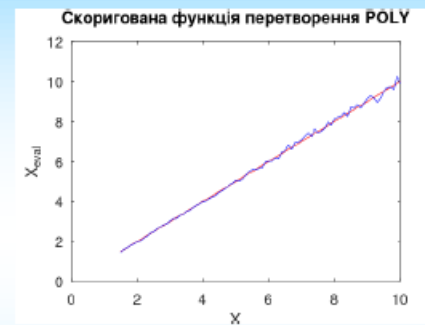
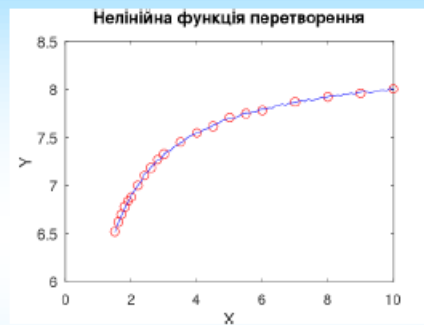
Результати експериментальних досліджень

Коригування гіперболічної функції перетворення



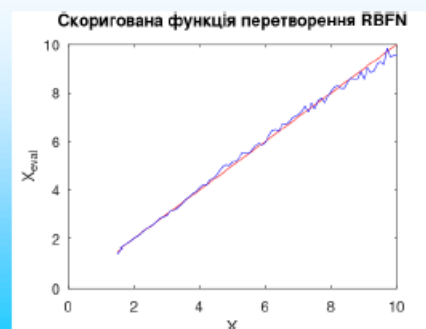
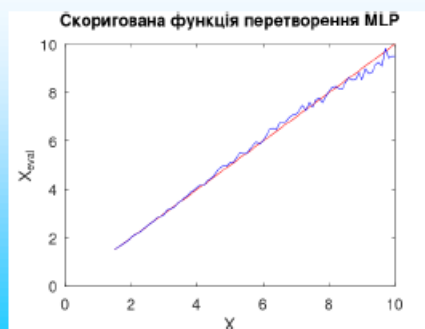
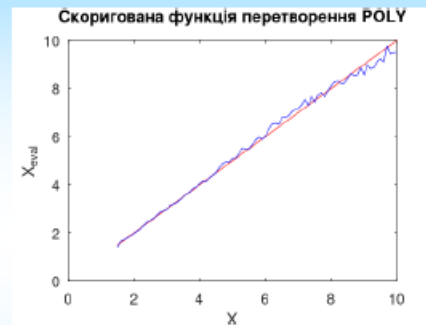
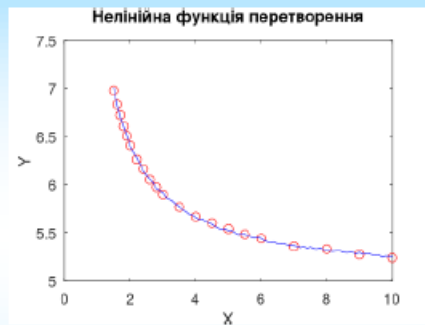
Результати експериментальних досліджень

Коригування дробово-лінійної II функції перетворення



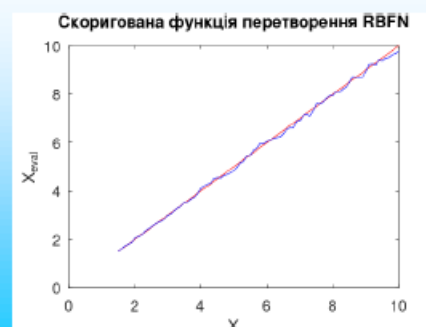
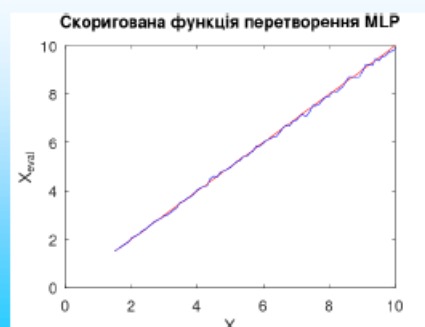
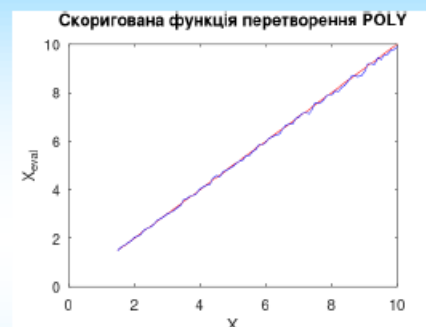
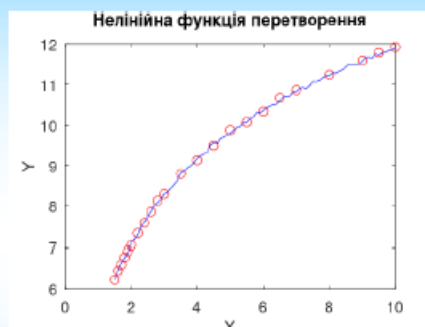
Результати експериментальних досліджень

Коригування показникової II функції перетворення



Результати експериментальних досліджень

Коригування логарифмічної I функції перетворення



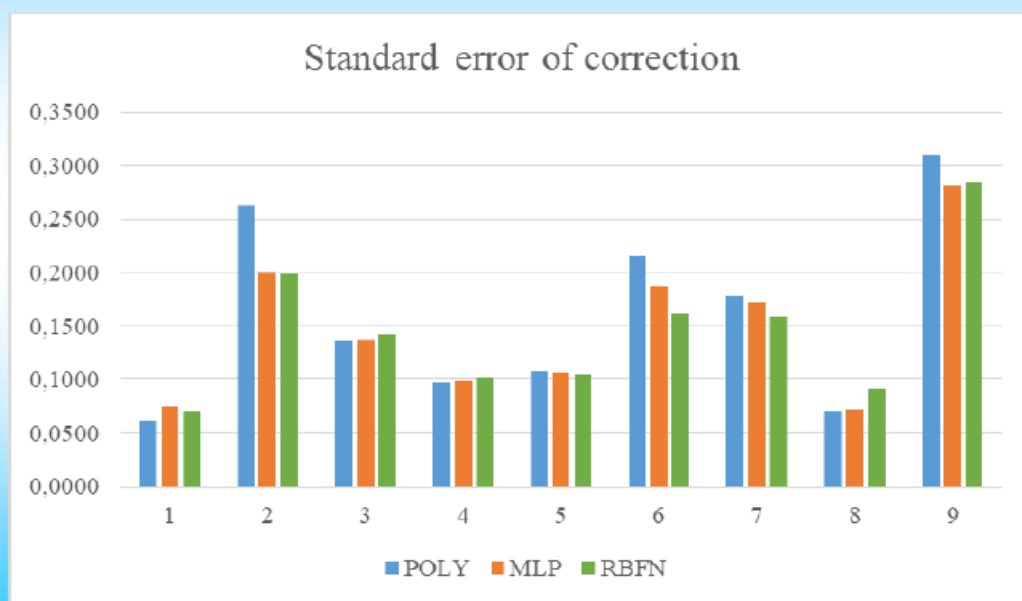
Результати експериментальних досліджень

Середньоквадратична похибка корекції
для різних нелінійних функцій і коректорів

Функція	Формула	Середньоквадратична похибка корекції		
		POLY	MLP	RBFN
1. Синусоїдальна	$y = \sin(0,3x - 1,7)$	0,0615	0,0752	0,0700
2. Степенева	$y = 2 \cdot x^{-1,5}$	0,2621	0,1992	0,1983
3. Гіперболічна	$y = 5 + 3/x$	0,1360	0,1374	0,1414
4. Дробово-лінійна I	$y = \frac{1}{0,05 + 0,1x}$	0,0974	0,0985	0,1016
5. Дробово-лінійна II	$y = \frac{10x}{0,5 + 1,2x}$	0,1076	0,1061	0,1053
6. Показникова I	$y = 5 \cdot e^{-0,5 \cdot x}$	0,2160	0,1870	0,1611
7. Показникова II	$y = 5 \cdot e^{0,5/x}$	0,1780	0,1727	0,1590
8. Логарифмічна I	$y = 5 + 3 \cdot \ln x$	0,0704	0,0715	0,0911
9. Логарифмічна II	$y = 5 + 3/\ln x$	0,3099	0,2814	0,2849

Результати експериментальних досліджень

Середньоквадратична похибка корекції
для різних нелінійних функцій і коректорів



Висновки

- ✓ Розглянуто загальну характеристику та властивості штучних нейронних мереж, їх класифікацію та області застосування. Детально розглянуто структуру та властивості багатошарового персептрона та методи його навчання, зокрема метод зворотного поширення помилки та алгоритм Левенберга-Марквардта. Також у роботі розглянуто архітектуру та методи навчання радіально-базисних нейромереж.
- ✓ Проаналізовано підходи до побудови лінійних та нелінійних функцій перетворення засобів вимірювання, зокрема традиційний підхід з використанням МНК та нейромережеві методи апроксимації нелінійних функцій.
- ✓ Запропоновано узагальнену структуру адаптивної системи коригування нелінійності функції перетворення засобу вимірювання за допомогою штучних нейронних мереж. Пристрій корекції реалізовано у двох варіантах: на базі багатошарового персептрона та на базі радіально-базисної нейромережі.
- ✓ Для вивчення властивостей запропонованих нейромережевих систем коригування функції перетворення засобів вимірювання застосовувалось комп'ютерне моделювання в середовищі MATLAB з використанням бібліотеки Neural Network Toolbox. У процесі моделювання досліджувався вплив виду нелінійності на якість коригування функції перетворення.

Висновки

- ✓ Результати комп'ютерного моделювання повністю підтверджують працездатність запропонованої нейромережевої системи коригування нелінійності функції перетворення засобу вимірювання та узгоджуються з теоретичними припущеннями.
- ✓ Перевагою запропонованого підходу є інваріантність нейромережевих коректорів до виду нелінійної характеристики засобу вимірювання та можливість синтезувати такі системи через навчання, без залучення складних методів проектування. Це значно розширює можливості застосування таких систем у метрологічній практиці, зокрема в каналах інформаційно-вимірювальних систем, де досить просто реалізувати методи цифрової обробки вимірювальної інформації.
- ✓ Використання запропонованого коректора на базі нейромережевого підходу дозволить суттєво зменшити систематичну похибку вимірювання, викликану невідповідністю номінальної та реальної функції перетворення засобу вимірювання.
- ✓ Результати дослідження буде опубліковано у статті (прийнято до друку): Авакін С. М., Довгополий С. О., Запорожець О. В., Мощенко І. О. Коригування функції перетворення засобів вимірювання з використанням нейромережевого підходу. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2025. Вип. 2(80).

ДОДАТОК Б

Текст програми моделювання

```

%x=1.5:0.5:10;
x=[1.5 1.55 1.6 1.65 1.7 1.8 1.9 2 2.2 2.5 3 3.5 4 5 6 7.8 10];
x1=1.5:0.1:10;
K=1;noise=0.005;
while K~=10
K=menu('Нелінійна функція перетворення','Синусоїдальна-
y=b0*sin(b1*x)',...
'Степенева-y=b0*x^{b1}','Гіперболічна-y=b0+b1/x',...
'Дробово-лінійна I-y=1/(b0+b1*x)','Дробово-лінійна II-
y=x/(b0+b1*x)',...
'Показникова I-y=b0*exp(b1*x)','Показникова II-
y=b0*exp(b1/x)',...
'Логарифмічна I-y=b0+b1*ln(x)','Логарифмічна II-
y=b0+b1/ln(x)',...
'Exit');
if K==1
y=sin(0.3*x-1.7); y1=sin(0.3*x1-1.7);
end;
if K==2
y=2*x.^-1.5; y1=2*x1.^-1.5;
end;
if K==3
y=5+3./x; y1=5+3./x1;
end;
if K==4
y=1./(0.05+0.1*x); y1=1./(0.05+0.1*x1);
end;
if K==5
y=10*x./(0.5+1.2*x); y1=10*x1./(0.5+1.2*x1);
end;
if K==6
y=5*exp(-0.5*x); y1=5*exp(-0.5*x1);
end;
if K==7
y=5*exp(0.5./x); y1=5*exp(0.5./x1);
end;
if K==8
y=5+3*log(x); y1=5+3*log(x1);
end;
if K==9
y=5+3./log(x); y1=5+3./log(x1);
end;
if K==10
clear;close;
break;
end;

```

```

y=y+(max(y)-min(y))*noise*randn(size(x));
y1=y1+(max(y1)-min(y1))*noise*randn(size(x1));

p5=polyfit(y,x,5);
X1pol=polyval(p5,y1); epol=sqrt(sum((x1-X1pol).^2)/length(x1));

netmlp=newff([1.5 10],[5 1],{'tansig' 'purelin'},'trainlm');
netmlp.trainParam.epochs=200;
netmlp.trainParam.show=50;
netmlp=train(netmlp,y,x);
X1mlp=sim(netmlp,y1); emlp=sqrt(sum((x1-X1mlp).^2)/length(x1));

netrbf=newrb(y,x);
X1rbf=sim(netrbf,y1); erbf=sqrt(sum((x1-X1rbf).^2)/length(x1));

clc;
figure;
plot(x,y,'ro',x1,y1,'b');
xlabel('X'); ylabel('Y');
title('Нелінійна функція перетворення');

figure;
plot(x1,x1,'r',x1,X1pol,'b');
xlabel('X'); ylabel('S');
title(['Компенсація нелінійності поліномом 5-го степеня. E='
num2str(epol)]);

figure;
plot(x1,x1,'r',x1,X1mlp,'b');
xlabel('X'); ylabel('S');
title(['Скоригована функція перетворення MLP. E='
num2str(emlp)]);

figure;
plot(x1,x1,'r',x1,X1rbf,'b');
xlabel('X'); ylabel('S');
title(['Скоригована функція перетворення RBF. E='
num2str(erbf)]);

pause;close all;
end;

```