

Розглянуто алгоритмічні методи компенсації динамічних похибок відеозображень з вимірювальною інформацією. Наприклад, це можуть бути відеозображення виробів з природного каменю, для яких потрібно контролювати геометричні параметри. Запропоновано використовувати адаптивну лінійну нейронну мережу для компенсації динамічних похибок. Це забезпечує підвищення точності визначення геометричних параметрів в робочих умовах вимірювань на виробництві

Ключові слова: геометричні параметри, відеозображення, динамічні похибки, компенсація похибок, штучна нейронна мережа

Рассмотрены алгоритмические методы компенсации динамических погрешностей видеоизображений с измерительной информацией. Например, это могут быть видеоизображения изделий из природного камня, для которых необходимо контролировать геометрические параметры. Предложено использовать адаптивную линейную нейронную сеть для компенсации динамических погрешностей. Это обеспечивает повышение точности определения геометрических параметров в рабочих условиях измерений на производстве

Ключевые слова: геометрические параметры, видеоизображение, динамические погрешности, искусственная нейронная сеть

КОМПЕНСАЦІЯ ДИНАМІЧНИХ ПОХИБОК ВІДЕОЗОБРАЖЕНЬ З ВИМІРЮВАЛЬНОЮ ІНФОРМАЦІЄЮ НА ОСНОВІ ШТУЧНИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ

Ю. О. Подчашинський

Доктор технічних наук, доцент*

E-mail: ju.podchashinskiy@gmail.com

О. О. Шаповалова

Асистент*

E-mail: ksyxon@gmail.com

Ю. О. Шавурський

Кандидат технічних наук*

E-mail: shavursky@gmail.com

*Кафедра автоматизованого управління технологічними процесами та комп'ютеризованих технологій

Житомирський державний технологічний університет
вул. Черняхівського, 103, м. Житомир, Україна, 10005

1. Вступ

Вимірювання різноманітних механічних величин широко застосовуються на підприємствах по видобутку та обробці природного каменю. Перш за все, це геометричні параметри виробів з природного каменю та параметри руху виробничого обладнання при їх виготовленні [1]. Результати вказаних вимірювань використовуються для керування виробничими процесами і дотримання технологічних норм при виготовленні виробів з природного каменю, контролю їх геометричних параметрів та підвищення їх якості [2–4].

Для вимірювання геометричних параметрів та параметрів руху вказаних об'єктів розроблено вимірювальну систему, що використовує відеозображення виробів та обладнання. В процесі таких вимірювань виникають динамічні похибки вимірювальної інформації, що обумовлені швидкими змінами в часі та просторі відеосигналу та обмеженою смугою частот перепускання вимірювального каналу засобів вимірювання цих параметрів. На відеозображеннях динамічні похибки проявляються у вигляді розмиття контурів виробів та обладнання.

При вимірюванні параметрів руху в умовах впливу несприятливих і нестаціонарних факторів, що є характерним для каменевидобувних та каменеобробних підприємств, виникають додаткові похибки вимірювальної інформації. Вказані похибки обумовлені відхиленням поточних параметрів вимірювального каналу, поточних параметрів динамічних похибок від значень, що були використані при попередніх розрахунках. Тому для підвищення точності вимірювання геометричних параметрів та параметрів руху необхідно компенсувати динамічні похибки, в тому числі – їх додаткову складову, на основі алгоритмічної обробки вимірювальної інформації.

Важливим напрямком удосконалення алгоритмічних процедур обробки вимірювальної інформації є їх розробка і реалізація на основі теорії штучних нейронних мереж [5, 6]. Такий підхід забезпечує підвищення точності вимірювання геометричних параметрів та параметрів руху в умовах впливу несприятливих і нестаціонарних факторів шляхом навчання штучної нейронної мережі та її адаптації до цих умов. В результаті навчання мережі отримуємо параметри процедур алгоритмічної обробки, що

є оптимальними для поточних умов вимірювань на підприємстві.

2. Аналіз літературних джерел

Похибки відеозображень з вимірювальною інформацією в значній мірі обумовлені динамічними властивостями вимірювальної системи, що використовується для визначення геометричних параметрів та параметрів руху обладнання та виробів з природного каменю. Динамічні властивості засобів вимірювальної техніки розглянуто в багатьох наукових працях, наприклад [7–9]. Однак, вимірювальний канал розробленої вимірювальної системи має ряд суттєвих особливостей, пов'язаних насамперед з алгоритмічною обробкою відеозображень з вимірювальною інформацією і суміщенням різноманітних засобів формування та перетворення цієї інформації (оптична система пристрою формування відеозображень (ПФВЗ), аналогові та цифрові засоби обробки відеосигналу у вимірювальному каналі). Найбільший вплив на динамічні властивості вимірювального каналу і на виникнення динамічних похибок мають: оптична система [10]; напівпровідникові перетворювачі «світло-сигнал» [11]; аналогові кола обробки відеосигналів [11, 12].

Існуючі методи алгоритмічної обробки вимірювальної інформації про механічні величини призначені в основному для обробки одновимірних сигналів. Також відомо багато наукових праць по методам відновлення відеозображень, що містять динамічні похибки, наприклад [13–16]. При цьому основним критерієм оцінки відеозображень є загальна якість відеозображення, призначеного для візуального сприйняття [17, 18].

Однак, в розробленій системі потрібно враховувати те, що вимірювальний канал повинен забезпечити передачу вимірювальної інформації про геометричні параметри та параметри руху з мінімальними похибками. Перш за все, це забезпечується найбільш точним відтворенням контурів об'єктів вимірювань та їх геометричних характеристик. А це відтворення, в свою чергу, істотно залежить від динамічних характеристик вимірювального каналу, методів їх ідентифікації та методів відновлення відеозображень.

Важливою складовою частиною алгоритмічної обробки відеозображень в розробленій системі є штучні нейронні мережі. Відомо багато різних типів цих мереж [6, 19]. Нейронні мережі можуть бути застосовані для лінійних і нелінійних операцій обробки сигналів, що містять вимірювальну інформацію. Оскільки розроблена система повинна мати підвищену швидкість та забезпечувати вимірювання геометричних параметрів та параметрів руху в реальному часі, то слід надати перевагу лінійним методам алгоритмічної обробки. Лінійні методи можуть бути реалізовані на основі адаптивної лінійної нейронної мережі [5, 6], що складається з ряду адаптивних лінійних нейронів.

На основі адаптивної лінійної мережі можуть бути реалізовані такі операції алгоритмічної обробки відеозображень, як ідентифікація динамічних похибок відеозображень з вимірювальною інформацією та алгоритмічна компенсація цих похибок.

3. Постановка задачі компенсації динамічних похибок

Початковий двовимірний образ $f_0(x,y)$ об'єкта вимірювань (елементу виробничого обладнання або виробу з природного каменю) фіксується оптичною системою ПФВЗ. В цьому пристрої до початкового образу об'єкта вимірювань додаються динамічні та випадкові похибки та створюється цифрове відеозображення

$$f_n(n,m) = f_d(n,m) + \xi(n,m),$$

де $f_d(n,m)$ – відеозображення з динамічними похибками, $\xi(n,m)$ – шум (випадкові похибки) на відеозображенні, $n \in 1, N$, $m \in 1, M$ – порядкові номери (індекси) дискретних відліків амплітуди відеосигналу в рядках і стовпцях цифрового відеозображення, N, M – кількість дискретних відліків амплітуди відеосигналу в рядках та стовпцях цифрового відеозображення, що визначає розміри цифрового відеозображення в дискретних точках (д. т.).

Причинами виникнення динамічних похибок є: розмиття контурів об'єктів на відеозображеннях, що виникає в оптичній системі та при проходженні відеосигналу через електронні схеми з обмеженою смугою частот; розмиття відеозображень об'єктів, що рухаються відносно ПФВЗ протягом формування одного цифрового відеозображення у часовій послідовності;

Потрібно на основі спостережень спотворених відеозображень $f_n(n,m)$ та апріорної інформації знайти оцінку початкового двовимірного масиву $f_0(n,m)$, що характеризує геометричні параметри та параметри руху обладнання та виробів з природного каменю. Компенсація динамічних похибок забезпечує підвищення точності вимірювання вказаних параметрів.

Рішення задачі алгоритмічної компенсації динамічних похибок відеозображень з вимірювальною інформацією складається з таких етапів:

- ідентифікація параметрів ПФВЗ що вносить динамічні похибки;
- накопичення та оцінка апріорної інформації про властивості відеозображень і їх похибок;
- розробка методу алгоритмічної компенсації динамічних похибок.

Важливою умовою ефективною компенсації похибок є наявність апріорної інформації про властивості вимірювальної інформації. Для алгоритмічної компенсації похибок в якості апріорної інформації використовуються: спектральна щільність і кореляційна функція випадкових похибок; спектральна щільність і кореляційна функція корисної вимірювальної інформації; співвідношення сигнал/шум ПФВЗ [13, 17].

Отримання повних апріорних відомостей про вимірювальну інформацію є складною задачею, так як в загальному випадку початкова вимірювальна інформація невідома, а для вимірювань доступне тільки спотворене відеозображення на виході ПФВЗ. Тому для ідентифікації параметрів динамічних похибок та їх компенсації пропонується задіяти методи теорії штучних нейронних мереж, що базуються на навчанні мережі з використанням тестових виробів з природного каменю з відомими геометричними параметрами.

4. Ідентифікація параметрів пристрою формування відеозображень, що вносить динамічні похибки

Пропонується ідентифікацію параметрів ПФВЗ виконувати за допомогою адаптивної авторегресійної моделі [20], що реалізується штучною нейронною мережею (рис. 1).

Процедура навчання такої мережі приводить до отримання вагових коефіцієнтів, що відповідають значенням коефіцієнтів дискретної передаточної функції $H_H(z)$ у поточний момент часу.

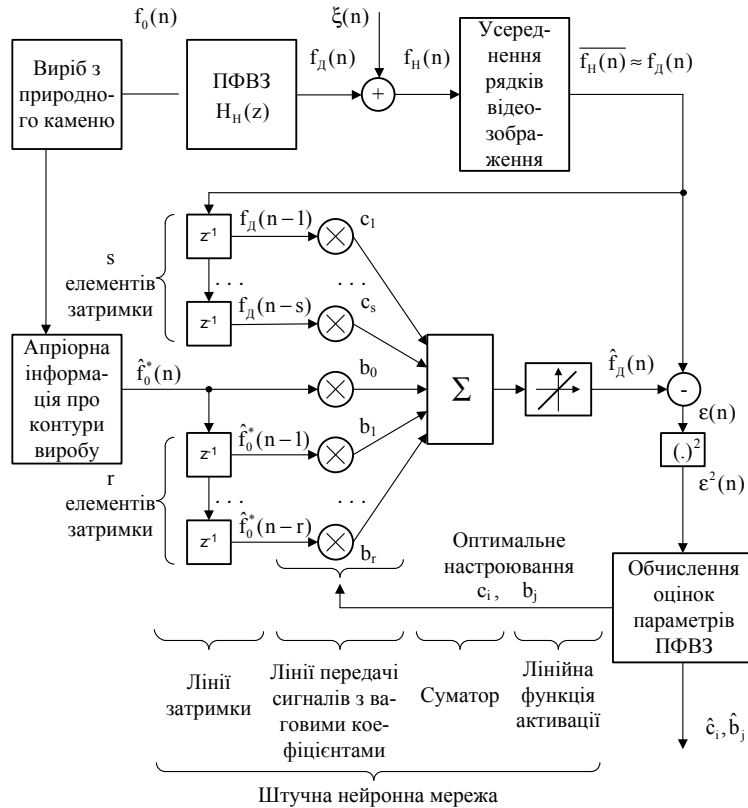


Рис. 1. Схема ідентифікації параметрів пристрою формування відеозображень на основі штучної нейронної мережі:

- $\overline{f_H(n)}$ – значення амплітуди відеосигналу, отримане шляхом усереднення рядків відеозображення;
- $\hat{f}_0^*(n)$ – апріорна оцінка відеосигналу в рядку відеозображення; z^{-1} – цифровий елемент затримки відеосигналу;
- $\hat{f}_D(n)$ – оцінка нейронною мережею рядка відеозображення $f_D(n)$ з динамічними похибками;
- $\varepsilon(n)$ – динамічна похибка відеосигналу в рядку відеозображення; c_i, b_j – параметри авторегресійної моделі;
- \hat{c}_i, \hat{b}_j – поточні оцінки параметрів в процесі ідентифікації; ПФВЗ – пристрій формування відеозображень

Запишемо різницеве рівняння і дискретну передаточної функцію для авторегресійної моделі ПФВЗ із зовнішнім входом $f_0(n)$:

$$f_D(n) + \sum_{i=1}^s c_i f_D(n-i) = \sum_{j=0}^r b_j f_0(n-j), \quad (1)$$

$$H_H(z) = \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \dots + b_r z^{-r}}{1 + c_1 z^{-1} + c_2 z^{-2} + \dots + c_s z^{-s}}, \quad (2)$$

де $f_D(n)$ – рядок відеозображення з динамічними похибками на виході ПФВЗ, c_i, b_j – параметри авторегресійної моделі, що ідентифікуються.

Результати ідентифікації цих параметрів шляхом навчання мережі забезпечують мінімізацію середнього значення динамічної похибки вимірювальної інформації про геометричні параметри та параметри руху:

$$\overline{\varepsilon^2} = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \varepsilon^2(n) \rightarrow \min_{c_i, b_j}, \quad (3)$$

$$\varepsilon(n) = f_H(n) - \hat{f}_D(n) = f_H(n) - \sum_{j=0}^r \hat{b}_j f_0(n-j) + \sum_{i=1}^s \hat{c}_i \hat{f}_D(n-i),$$

де

$$\hat{f}_D(n) = \sum_{j=0}^r \hat{b}_j f_0(n-j) - \sum_{i=1}^s \hat{c}_i \hat{f}_D(n-i) = f_D(n) + \Delta_{AP}(n)$$

оцінка дискретних відліків $f_D(n)$ в рядку або стовпцю відеозображення на основі авторегресійної моделі, \hat{c}_i, \hat{b}_j – поточні оцінки параметрів авторегресійної моделі, $\Delta_{AP}(n)$ – похибка авторегресійної моделі з поточними параметрами \hat{c}_i, \hat{b}_j .

Наприклад, для $s=1, r=0$ маємо авторегресійну модель ПФВЗ першого порядку з дискретною передаточною функцією

$$H_H(z) = \frac{b_0}{1 + c_1 z}. \quad (4)$$

Для ідентифікації параметрів передаточної функції (4) необхідно вирішити систему рівнянь, що випливають з (3):

$$A_H \cdot C_{AP} = B_H, \quad (5)$$

де

$$A_H = \begin{bmatrix} \sum_{n=0}^{N-1} (\overline{f_H(n-1)})^2 & -\sum_{n=0}^{N-1} [\overline{f_H(n-1)} \cdot \hat{f}_0^*(n)] \\ -\sum_{n=0}^{N-1} [\hat{f}_0^*(n) \cdot \overline{f_H(n-1)}] & \sum_{n=0}^{N-1} (\hat{f}_0^*(n))^2 \end{bmatrix},$$

$$B_H = \begin{bmatrix} -\sum_{n=0}^{N-1} \overline{f_H(n)} \cdot \overline{f_H(n-1)} \\ \sum_{n=0}^{N-1} \overline{f_H(n)} \cdot \hat{f}_0^*(n) \end{bmatrix}, \quad C_{AP} = \begin{bmatrix} c_1 \\ b_0 \end{bmatrix}.$$

Вирішуючи систему рівнянь (5), отримуємо:

$$c_1 = \frac{A_{H11} \cdot B_{H1} + A_{H21} \cdot B_{H2}}{\det A_H}, \quad b_0 = \frac{A_{H12} \cdot B_{H1} + A_{H22} \cdot B_{H2}}{\det A_H},$$

де $\det A_H$ – визначник матриці A_H , A_{Hij} – алгебраїчні доданки елемента $A_H(i,j)$ матриці A_H , B_{Hj} – елементи $B_H(j)$ вектора B_H .

В ході досліджень розраховувалися перехідні характеристики ПФВЗ з використанням його авторегресійної моделі. Ці характеристики порівнювалися з відеосигналом на виході ПФВЗ, що отриманий експериментальним шляхом за умови формування відеозображення контуру тестового об'єкта білого кольору на темному фоні. Результати наведено на рис. 2.

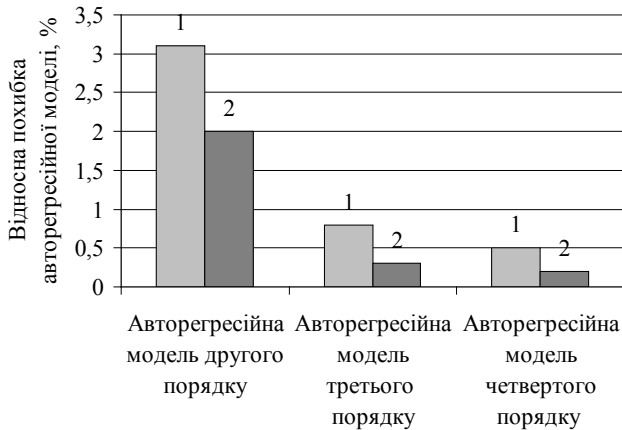


Рис. 2. Відносна похибка відтворення перехідної характеристики ПФВЗ на основі авторегресійної моделі: 1 – цифровий фотоапарат Sony Cyber-Shot DSC-H9; 2 – відеокамера Panasonic M3000

Згідно цих результатів авторегресійна модель 3-го порядку забезпечує ідентифікацію параметрів ПФВЗ з відносною похибкою <1%, що є прийнятним для проведення вимірювань геометричних параметрів та параметрів руху об'єктів на каменевидавувних та каменеобробних підприємствах.

5. Нейромережева компенсація динамічних похибок на відеозображеннях з вимірювальною інформацією

Компенсація динамічних похибок здійснюється шляхом алгоритмічної обробки відеозображень у цифровій ЕОМ з вбудованим нейропроцесором. Дискретна передаточна функція ЕОМ визначається на основі формул (1)–(2) як:

$$H_{алг}(z) = 1 / \hat{H}_H(z) = \frac{b_{алг0} + b_{алг1}z^{-1} + \dots + b_{алгs}z^{-s}}{1 + c_{алг1}z^{-1} + \dots + c_{алгr}z^{-r}}, \quad (6)$$

де $b_{алг0} = 1/b_0$, $b_{алгі} = c_i/b_0$, $i \in \overline{1,s}$, $c_{алгj} = b_j/b_0$, $j \in \overline{1,r}$.

Дискретна передаточна функція (6) може бути реалізована шляхом згортки рядка або стовпця цифрового відеозображення з імпульсною функцією цифрового фільтра, що відповідає цій функції:

$$f_{вих}(n) = -\sum_{j=1}^r c_{алгj} f_{вих}(n-j) + \sum_{i=0}^s b_{алгі} f_H(n-i). \quad (7)$$

Формулі (7) відповідає структурна схема цифрового фільтра, що реалізована в приладовій системі на

основі адаптивної лінійної штучної нейронної мережі (рис. 3).

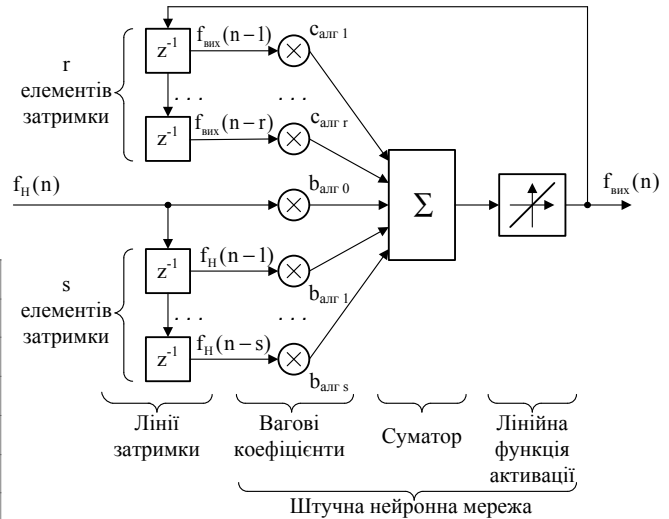


Рис. 3. Структурна схема одновимірного цифрового фільтра на основі штучної нейронної мережі, що виконує алгоритмічну компенсацію динамічних похибок відеозображень з вимірювальною інформацією: $f_H(n)$ – значення амплітуди відеосигналу в рядку відеозображення з динамічними і випадковими похибками на виході ПФВЗ; z^{-1} – цифровий елемент затримки відеосигналу; $f_{вих}(n)$ – результат відновлення нейронною мережею рядка відеозображення; $c_{алгі}$, $b_{алгj}$ – вагові коефіцієнти нейронної мережі згідно (6)

Якщо потрібно реалізувати двовимірну алгоритмічну обробку з метою відновлення відеозображень з вимірювальною інформацією про геометричні параметри виробів, то

$$f_{вих}(n,m) = \sum_{i=-s_1}^{s_1} \sum_{j=-s_1}^{s_1} b_{алгіj} f_H(n+i,m+j). \quad (8)$$

Формулі (8) відповідає структурна схема на основі адаптивної лінійної штучної нейронної мережі (рис. 4).

При застосуванні формули (9) та схеми на рис. 4 враховано той факт, що всі відліки цифрового відеозображення виробу накопичені в запам'ятовуючому пристрої цифрової ЕОМ і для алгоритмічної компенсації динамічних похибок використовується згортка відеозображення з маскою двовимірного фільтра. Така маска може бути розрахована відомими методами [21] за результатами ідентифікації передаточної функції ПФВЗ.

Результати алгоритмічної компенсації випадкових і динамічних похибок відеозображень та визначення геометричних параметрів виробів на основі штучної нейронної мережі наведено на рис. 5.

Як бачимо, похибка ідентифікації параметрів ПФВЗ штучною нейронною мережею не повинна перевищувати 1%. Цей висновок підтверджує можливість використання авторегресійної моделі ПФВЗ третього порядку. Похибка вимірювань параметрів руху дорівнює 0,12 мм/с для накопиченої послідовності відеозображень та 0,60 мм/с для вимірювань в реальному часі.

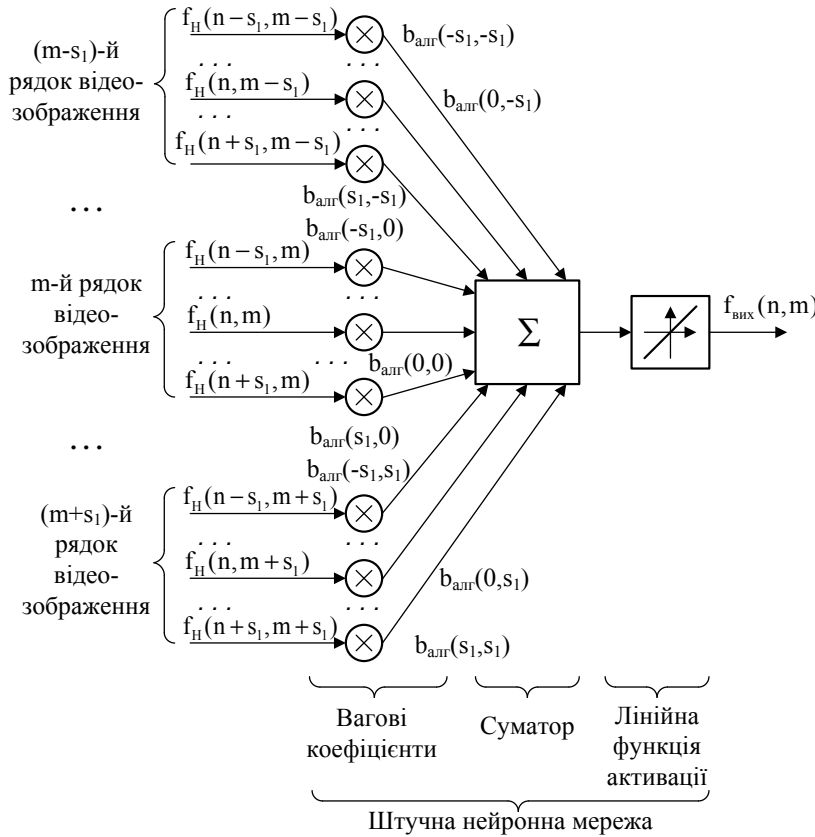


Рис. 4. Структурна схема двовимірного цифрового фільтра на основі штучної нейронної мережі, що виконує алгоритмічну компенсацію динамічних похибок відеозображень з вимірювальною інформацією:
 $f_H(n, m)$ – значення амплітуди відеосигналу з динамічними і випадковими похибками на виході ПФВЗ;
 $f_{вих}(n, m)$ – результат відновлення нейронною мережею відеозображення;
 $b_{алг\ i\ j}$ – вагові коефіцієнти нейронної мережі згідно (9)

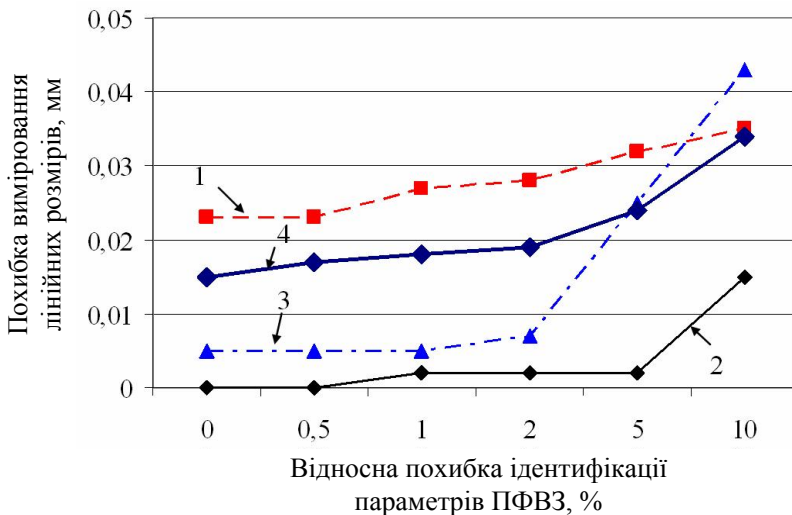


Рис. 5. Відносна похибка визначення лінійних розмірів виробів з природного каменя після алгоритмічної компенсації динамічних похибок штучною нейронною мережею: 1,2,3 – цифровий фотоапарат з співвідношенням сигнал/шум 55 дБ, яскравість ОВ 200, 230 і 255 д. р. відповідно, фону 30 д. р.; 4 – відеокамера з співвідношенням сигнал/шум 40 дБ, яскравість ОВ 230 д. р., фону 30 д. р.; д. р. – дискретні рівні відеосигналу, що кодується 8-ма бітами

6. Висновки

1. В даній роботі розглянуто алгоритмічні методи компенсації динамічних похибок відеозображень з вимірювальною інформацією на основі штучних нейронних мереж. Наприклад, це можуть бути відеозображення промислових виробів з природного каменя та обладнання, що використовується при їх виготовленні. Для цих виробів потрібно з високою точністю контролювати геометричні параметри, в тому числі: лінійні розміри та кути по зовнішньому контуру виробів; геометричні параметри структурних елементів обробленої поверхні виробів. Вказані геометричні параметри визначають якість та естетичний вигляд промислових виробів з природного каменя.

2. При формуванні відеозображень виробів та обладнання виникають динамічні похибки, які суттєво знижують точність визначення їх геометричних параметрів та параметрів руху. Динамічні похибки обумовлені переміщенням вказаних об'єктів в процесі вимірювань відносно ПФВЗ та обмеженою смугою частот вимірювального каналу ПФВЗ. Динамічні похибки проявляються на відеозображенні у вигляді розмиття контурів об'єктів. Таким чином необхідна алгоритмічна компенсація динамічних похибок для підвищення точності вимірювання геометричних параметрів та параметрів руху виробів та обладнання.

3. Важливими алгоритмічними заходами по підвищенню точності вимірювання геометричних параметрів є використання методів теорії штучних нейронних мереж. Ці методи дозволяють компенсувати динамічні похибки, в тому числі – їх додаткову складову, на основі алгоритмічної обробки відеозображень в робочих умовах вимірювань на підприємствах по видобуванню та обробці природного каменя.

4. В ході адаптації нейронної мережі до поточних умов вимірювань виконується оптимальне налаштування вимірювального каналу. Це здійснюється на основі ідентифікації параметрів функції передачі ПФВЗ штучною нейронною мережею. Пропонується ідентифікацію параметрів виконувати за допомогою адаптивної авторегресійної моделі, що реалізується штучною нейронною мережею, яка містить адаптивні лінійні нейрони. Авторегресійна модель третього порядку забезпечує точ-

ність ідентифікації параметрів функції передачі (0,3...0,8) % і може бути використана для алгоритмічної компенсації похибок.

5. Розроблено алгоритмічні процедури та структурні схеми для компенсації динамічної похибки визначення геометричних параметрів та параметрів руху виробів з природного каменю та обладнання, що використовується при їх виготовленні. При цьому

компенсація динамічної похибок реалізується мережею у складі адаптивних лінійних нейронів. Похибка вимірювання геометричних параметрів в умовах впливу несприятливих і нестационарних факторів не перевищує 0,03 мм. Похибка вимірювань параметрів руху дорівнює 0,12 мм/с для накопиченої послідовності відеозображень та 0,60 мм/с для вимірювань в реальному часі.

Література

1. Криворучко, А. О. Застосування інформаційно-комп'ютерних технологій обробки відеоінформації в гірничо-геологічній галузі [Текст] / А. О. Криворучко, Є. С. Купкін, Ю. О. Подчашинський, О. О. Ремезова // Вісник ЖДТУ. Технічні науки. – 2005. – № 1 (32). – С. 107–116.
2. Добыча и обработка природного камня [Текст] : справочник / под ред. А. Г. Смирнова. – М. : Недра, 1990. – 445 с.
3. Карасев, Ю. Г. Природный камень. Добыча блочного и стенового камня [Текст] / Ю. Г. Карасев, Н. Т. Бакка. – СПб. : Изд-во Санкт-Петербургского горного университета, 1997. – 412 с.
4. Сычев, Ю. И. Распиловка камня [Текст] / Ю. И. Сычев, Ю. Я. Берлин. – М. : Стройиздат, 1989. – 320 с.
5. Осовский, С. Нейронные сети для обработки информации : пер. с польского [Текст] / С. Осовский. – М. : Финансы и статистика, 2002. – 344 с.
6. Руденко, О. Г. Штучні нейронні мережі : навчальний посібник [Текст] / О. Г. Руденко, Є. В. Бодянский. – Харків : ТОВ «Компанія СМІТ», 2006. – 404 с.
7. Орнатский, П. П. Теоретические основы информационно-измерительной техники [Текст] / П. П. Орнатский. – К.: Вища школа, 1983. – 455 с.
8. Метрологія та вимірювальна техніка : підручник [Текст] / за ред. Е. С. Поліщука. – Львів : Бескид Біт, 2003. – 544 с.
9. Кожешкурт, В. І. Дослідження схем фільтрації алгоритмів трасової обробки інформації в системах моніторингу динамічних об'єктів [Текст] / В. І. Кожешкурт, В. В. Юзефович // Реєстрація, зберігання і обробка даних. – 2010. – Т. 12, № 4. – С. 3–12.
10. Кононов, В. И. Оптические системы построения изображений [Текст] / В. И. Кононов, А. Д. Федоровский, Г. П. Дубинский. – К. : Техніка, 1981. – 134 с.
11. Пресс, Ф. П. Фоточувствительные приборы с зарядовой связью [Текст] / Ф. П. Пресс. – М. : Радио и связь, 1991. – 264 с.
12. Jähne, B. Practical Handbook on Image Processing for Scientific and Technical Applications [Text] / B. Jähne; 2nd ed. – CRC Press LLC, 2004. – 571 p. doi:10.1201/9780849390302
13. Гонсалес, Р. Цифровая обработка изображений [Текст] / Р. Гонсалес, Р. Вудс. – М. : Техносфера, 2005. – 1072 с.
14. Acharya, T. Image Processing : Principles And Applications [Text] / T. Acharya, A. K. Ray. – John Wiley & Sons, Inc, 2005. – 448 p.
15. Bertero, M. Introduction to Inverse Problems in Imaging [Text] / M. Bertero, P. Boccacci. – Bristol : Institute of Physics Publishing Ltd, 1998. – 370 p.
16. Jain, A. K. Fundamentals of Digital Image Processing [Text] / A. K. Jain. – Englewood Cliffs, NJ : Prentice Hall, 1989, – 590 с.
17. Василенко, Г. И. Восстановление изображений [Текст] / Г. И. Василенко, А. М. Тараторин. – М. : Радио и связь, 1986. – 304 с.
18. Сілагін, С. В. Адаптивна система оцінки якості графічних растрових зображень [Текст] / С. В. Сілагін, В. І. Месюра // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – 2010. – Т. 20, № 2. – С. 119–121.
19. Різник, О. М. Динамічні рекурентні нейронні мережі [Текст] / О. М. Різник // Математичні машини і системи. – 2009. – № 3. – С. 3–26.
20. Александров, А. Г. Оптимальные и адаптивные системы [Текст] : учебное пособие / А. Г. Александров. – М. : Высшая школа, 1989. – 263 с.
21. Даджион, Д. Цифровая обработка многомерных сигналов [Текст] : пер. с англ. / Д. Даджион, Р. Мерсеро; под ред. Л. П. Ярославского. – М. : Мир, 1988. – 488 с.