

УДК 621.317

¹О.М. Безвесільна, д.т.н.,
²Ю.О. Подчашинський, к.т.н.**АЛГОРИТМІЧНА ОБРОБКА ДВОВИМІРНОЇ ІНФОРМАЦІЇ ПРО МЕХАНІЧНІ
ВЕЛИЧИНИ НА ОСНОВІ ШТУЧНИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ**¹Національний технічний університет України "КПІ", E-mail: bezvesilna@mail.ru²Житомирський державний технологічний університет, E-mail: ju-p@ztu.edu.ua

В статті розглянуто алгоритмічну обробку двовимірної інформації про механічні величини, що виконується на основі штучних нейронних мереж. Метою такої обробки є підвищення точності вимірювань геометричних параметрів об'єктів вимірювань та їх параметрів руху. Процедури навчання та адаптації штучних нейронних мереж забезпечують компенсацію додаткових похибок вимірювань в несприятливих та нестационарних умовах.

Ключові слова: механічні величини, двовимірна інформація, алгоритмічна обробка, штучна нейронна мережа.

Вступ

Одним з ефективних методів вимірювань механічних величин є формування та алгоритмічна обробка сигналів, в тому числі двовимірних, які містять інформацію про об'єкт вимірювань. Носієм двовимірної інформації про механічні величини можуть бути цифрові зображення об'єктів вимірювань. Для отримання двовимірної інформації про механічні величини необхідно сформувати цифрове зображення, яке являє собою двовимірний образ об'єкта вимірювань, ввести це зображення в обчислювальний пристрій та виконати його алгоритмічну обробку.

Цифрові зображення містять двовимірну інформацію про геометричні параметри та параметри руху об'єктів вимірювань, що виготовляються в ході виробничого процесу або досліджуються в ході наукового експерименту. Якщо в наявності є послідовність зображень, що відповідають певним моментам часу, то на цій основі можуть бути обчислені інші механічні величини (деформації об'єктів, сили та крутні моменти, що діють на ці об'єкти, тощо). Алгоритмічна обробка таких зображень дозволяє отримати результати вимірювань відповідних механічних величин.

Тому **актуальною задачею** є дослідження методів алгоритмічної обробки двовимірної інформації про механічні величини та шляхів реалізації цих методів на основі сучасних інформаційно-комп'ютерних технологій. Такий підхід повинний забезпечити більш високу точність та швидкість вимірювань механічних величин у порівнянні з існуючими методами. Це особливо важливо для вимірювань механічних величин в нестационарних та несприятливих умовах.

Аналіз існуючих досліджень і публікацій

Алгоритмічні методи обробки двовимірної інформації розглянуто в багатьох книг та наукових публікаціях. Це, наприклад, дослідження систем технічного зору в робототехніці [1 – 3], автоматизованих систем управління з датчиками відеоінформації [4, 5], телевізійних вимірювальних систем [6, 7], інформаційних систем [8 – 10], мультимедійних систем. Також існує багато наукових праць по теорії штучних нейронних мереж та методам обробки інформації за допомогою цих мереж.

Але в цих публікаціях не завжди в повній мірі враховуються вимоги до метрологічних характеристик вимірювальної інформації. Це вимоги до точності розрахунку механічних величин на основі вимірювання координат контурів та опорних точок об'єктів, що досліджуються або виготовляються. У відомих науково-технічних рішеннях відсутнє або обмежене використання найсучасніших досягнень інформаційно-комп'ютерних технологій.

Метою проведених досліджень є дослідження процедур високоточної алгоритмічної обробки двовимірної інформації про механічних величин. Ці процедури можуть бути виконані на основі застосування штучних нейронних мереж. Вказана задача вирішується в рамках наукової проблеми створення теорії побудови приладової системи для вимірювань механічних величин з двовимірною інформацією та алгоритмічними методами її обробки.

Постановка задачі алгоритмічної обробки двовимірної інформації на основі штучних нейронних мереж

Наукова проблема створення приладової системи для вимірювань механічних величин вимагає суттєвого поліпшення метрологічних характеристик вимірювальних процедур в цій системі. Важливим напрямком удосконалення вимірювальних процедур є їх розробка і реалізація на основі сучасних інформаційно-комп'ютерних технологій, в тому числі на основі теорії штучних нейронних мереж. Такий підхід забезпечує зменшення додаткової похибки вимірювань механічних величин у несприятливих та нестаціонарних умовах шляхом адаптації та навчання.

При вимірюванні механічних величин на основі двовимірної інформації за допомогою штучних нейронних мереж можуть бути вирішені такі задачі:

1. Фільтрація та відновлення двовимірної інформації по механічні величини, що містить випадкові та динамічні викривлення.

2. Виділення об'єкту вимірювань у цифровому масиві двовимірної інформації.

3. Визначення параметрів руху об'єктів вимірювань на основі часових послідовностей двовимірної інформації, для яких визначено координати центра мас та координати контурних точок об'єктів вимірювань.

Штучні нейронні мережі при алгоритмічній обробці двовимірної інформації забезпечують такі переваги у порівнянні із звичайними цифровими обчислювальними засобами:

1. Наявність вбудованих процедур навчання та самонавчання, адаптації до змінних умов роботи, що забезпечують зменшення додаткової похибки засобів вимірювань.

2. Високоточна алгоритмічна обробка вимірювальної інформації про механічні величини в несприятливих та нестаціонарних умовах роботи засобів вимірювань.

3. Підвищення швидкодії засобів вимірювань механічних величин за умови використання спеціалізованого нейропроцесора з паралельною обробкою масивів двовимірної інформації.

Вимірювальний канал приладової системи складається з пристрою формування двовимірної інформації (незмінна частина) з частотною передаточною функцією $W_n(j\omega_1, j\omega_2)$ (або передаточною функцією $H_n(z_1, z_2)$), що вносить динамічні викривлення у двовимірну інформацію, та цифрової ЕОМ (блоку алгоритмічної обробки, що розробляється у приладовій системі) з частотною передаточною функцією $W_{алз}(j\omega_1, j\omega_2) = 1/W_n(j\omega_1, j\omega_2)$ (або передаточною функцією $H_{алз}(z_1, z_2) = 1/H_n(z_1, z_2)$), що компенсує динамічні викривлення двовимірної інформації. Блок алгоритмічної обробки також повинен реалізовувати фільтрацію випадкових викривлень двовимірної інформації, що виникають в пристрої формування цієї інформації.

Частотна характеристика оптимального фільтра випадкових викривлень двовимірної інформації [8]

$$H_{1\phi}(\omega_1, \omega_2) = \frac{S_{fex}(\omega_1, \omega_2)}{S_{fex}(\omega_1, \omega_2) + S_{\xi ex}(\omega_1, \omega_2)},$$

де $S_{fex}(\omega_1, \omega_2)$ – спектральна щільність корисного сигналу на вході вимірювального каналу,

$S_{\xi ex}(\omega_1, \omega_2)$ – спектральна щільність шуму на вході вимірювального каналу,

$$S_{fex}(\omega_1, \omega_2) = \frac{S_{f2}(\omega_1, \omega_2)}{|W_H(j\omega_1, j\omega_2)|^2}, \quad S_{\xi ex}(\omega_1, \omega_2) = \frac{S_{\xi}(\omega_1, \omega_2)}{|W_H(j\omega_1, j\omega_2)|^2},$$

де $S_{f2}(\omega_1, \omega_2)$ і $S_{\xi}(\omega_1, \omega_2)$ – двовимірні спектральні щільності двовимірної інформації і шуму, що доступні для спостереження на виході пристрою формування двовимірної інформації.

Відомі різні методи відновлення двовимірної вимірювальної інформації про механічні величини, що містить динамічні викривлення [9]. Це лінійні методи (фільтр Вінера та параметричний фільтр Вінера), методи на основі регуляризації, нелінійні та ітераційні методи.

Для задачі відновлення форми перепадів яскравості, що відповідають контурам об'єктів на зображеннях, найбільш придатними є лінійні методи. Ці методи можуть бути реалізовані у реальному часі за допомогою лінійної нейронної мережі.

Блок алгоритмічної обробки у приладовій системі, що виконує фільтрацію та відновлення

двовимірної інформації на основі фільтра Вінера, має частотну передаточну функцію [9]

$$H_{1\beta}(\omega_1, \omega_2) = \frac{1}{H_H(\omega_1, \omega_2)} \cdot \frac{|H_H(\omega_1, \omega_2)|^2}{|H_H(\omega_1, \omega_2)|^2 + S_{\xi_{\beta x}}(\omega_1, \omega_2) / S_{f_{\beta x}}(\omega_1, \omega_2)}$$

Якщо відоме тільки співвідношення сигнал шум Ψ для пристрою формування двовимірної інформації, то маємо параметричний фільтр Вінера

$$H_{2\beta}(\omega_1, \omega_2) = \frac{1}{H_H(\omega_1, \omega_2)} \cdot \frac{|H_H(\omega_1, \omega_2)|^2}{|H_H(\omega_1, \omega_2)|^2 + 1/\Psi}$$

Фільтрація та відновлення двовимірної інформації штучною нейронною мережею

Вимірювальний канал приладової системи, побудований на основі наведених вище співвідношень, є працездатним. Але в ньому виникають додаткові похибки, обумовлені відхиленням поточних параметрів випадкових і динамічних викривлень від значень, що були використані при розрахунках. Це може мати місце при вимірюванні механічних величин в несприятливих та нестационарних умовах. Тому для підвищення точності вимірювань механічних величин необхідно компенсувати вказані додаткові похибки. Це може бути зроблено на основі удосконалення алгоритмічної обробки двовимірної інформації. Пропонується виконувати алгоритмічну компенсацію додаткових похибок шляхом реалізації алгоритмічної обробки двовимірної інформації на основі штучних нейронних мереж. При цьому компенсація додаткових похибок виконується в процедурах адаптації та навчання мережі, що містить адаптивні лінійні нейрони.

Враховуючи існуючу властивість розподілу двовимірних процедур обробки на дві одновимірні процедури, що застосовуються послідовно до рядків і стовбців двовимірної інформації, далі будемо розглядати одновимірні сигнали у рядку двовимірної інформації про механічні величини. Приклад лінійної нейронної мережі, що реалізує одновимірну імпульсну характеристику блока алгоритмічної обробки, наведено на рис. 1.

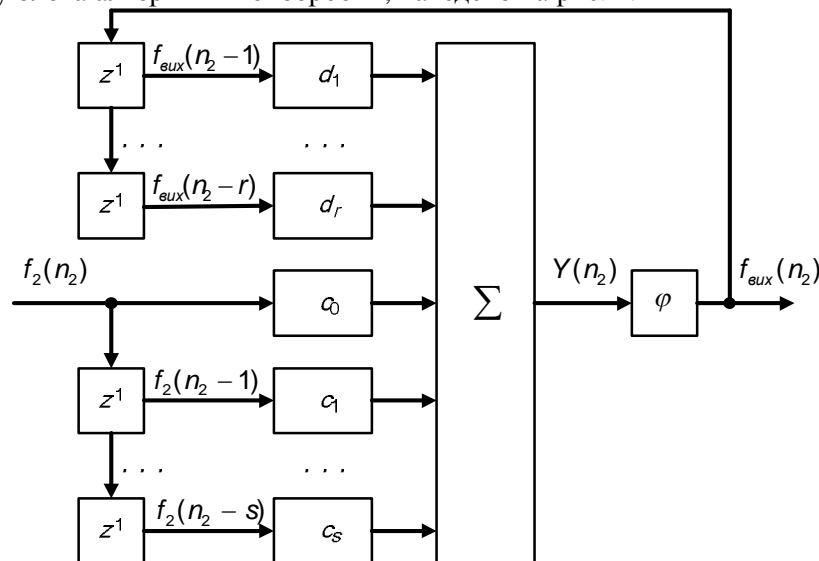


Рис. 1. Реалізація алгоритмічної цифрової обробки вимірювальної інформації на основі лінійної адаптивної нейронної мережі: z^{-1} – елемент затримки на часовий інтервал між надходженням двох дискретних відліків сигналу; c_i, d_j – вагові коефіцієнти, що реалізують частотну передаточну функцію у часовій області; φ – функція активації мережі, в даному випадку $\varphi(Y(n_2)) = Y(n_2)$

Для корекції вагових коефіцієнтів лінійної адаптивної нейронної мережі необхідно виконати ідентифікацію поточних значень коефіцієнтів дискретної передаточної функції пристрою формування двовимірної інформації $H_H(z)$. Ця передаточна функція базується на різницевому рівнянні. Тестовим сигналом в даному випадку є погранична крива, відома з оптики.

Різницеве рівняння і відповідна йому дискретна передаточна функція можуть бути записані для авторегресійної моделі пристрою із зовнішнім входом $f_{\text{ex}}(n_2)$:

$$f_2(n_2) + \sum_{i=1}^s a_i f_2(n_2 - i) = \sum_{j=0}^r b_j f_{ex}(n_2 - j), \quad H_H(z) = \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \dots + b_r z^{-r}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \dots + a_s z^{-s}},$$

де $f_2(n_2)$ – вихід пристрою, a_i, b_j – параметри моделі, що потрібно ідентифікувати.

Метою ідентифікації пристрою формування двовимірної інформації є мінімізація середнього значення квадратичної невязки

$$\overline{\varepsilon^2} = \frac{1}{N_2} \sum_{n_2=0}^{N_2-1} \varepsilon^2(n_2) \rightarrow \min_{a_i, b_j},$$

$$\varepsilon(n_2) = f_H^*(n_2) - \hat{f}_2(n_2) = f_H^*(n_2) - \sum_{j=0}^r \hat{b}_j f_{ex}(n_2 - j) + \sum_{i=1}^s \hat{a}_i \hat{f}_2(n_2 - i),$$

де $f_H^*(n_2) = f_2(n_2) + \xi(n_2)$ – вимірне значення дискретних відліків $f_2(n_2)$ в рядку двовимірної інформації на виході пристрою її формування,

$$\hat{f}_2(n_2) = \sum_{j=0}^r \hat{b}_j f_{ex}(n_2 - j) - \sum_{i=1}^s \hat{a}_i \hat{f}_2(n_2 - i) = f_2(n_2) + \Delta_{AR}(n_2) \text{ – оцінка дискретних відліків}$$

$f_2(n_2)$ в рядку двовимірної інформації на основі авторегресійної моделі, \hat{a}_i, \hat{b}_j – поточні оцінки параметрів авторегресійної моделі, $f_{ex}(n_2)$ – дискретні відліки пограничної кривої на вході пристрою формування двовимірної інформації, $\Delta_{AR}(n_2)$ – похибка авторегресійної моделі з поточними значеннями параметрів \hat{a}_i, \hat{b}_j .

Обчислюючи часткові похідні від функції невязки, отримуємо систему рівнянь, яка може бути вирішена відносно коефіцієнтів $H_H(z)$ відомими з математики методами.

Наприклад, для $s=1, r=0$ маємо авторегресійну модель першого порядку з дискретною передаточною функцією $H_H(z) = \frac{b_0}{1 + a_1 z}$.

Для ідентифікації параметрів необхідно вирішити систему рівнянь в матричній формі:

$$A_H \cdot C_{AR} = B_H,$$

$$A_H = \begin{bmatrix} \sum_{n_2=0}^{N_2-1} (f_H^*(n_2-1))^2 & - \sum_{n_2=0}^{N_2-1} [f_H^*(n_2-1) \cdot f_{ex}(n_2)] \\ - \sum_{n_2=0}^{N_2-1} [f_{ex}(n_2) \cdot f_H^*(n_2-1)] & \sum_{n_2=0}^{N_2-1} (f_{ex}(n_2))^2 \end{bmatrix}, \quad B_H = \begin{bmatrix} - \sum_{n_2=0}^{N_2-1} f_H^*(n_2) \cdot f_H^*(n_2-1) \\ \sum_{n_2=0}^{N_2-1} f_H^*(n_2) \cdot f_{ex}(n_2) \end{bmatrix}.$$

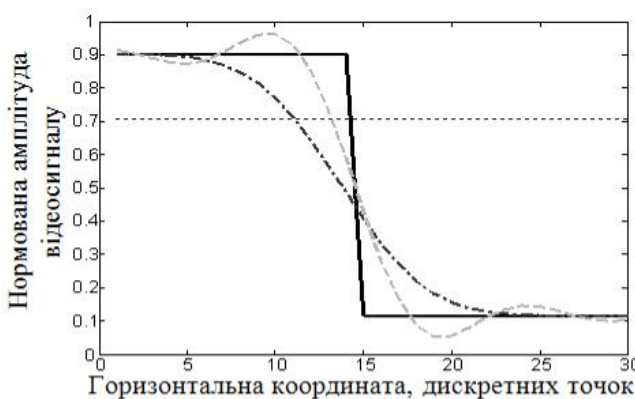


Рис. 2. Перетин контуру об'єкта вимірювань в рядку двовимірного зображення: суцільна лінія – початковий перепад яскравості, що утворює контур; штрихпунктирна лінія – перепад яскравості на виході пристрою формування двовимірної інформації; штрихова лінія – перепад яскравості, відновлений фільтром Вінера на основі лінійної нейронної мережі координати контура об'єкта вимірювань при заданому значенні порога сегментації.

Звідси

$$a_1 = \frac{A_{H11} \cdot B_{H1} + A_{H21} \cdot B_{H2}}{\det A_H},$$

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

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 .

Приклад відновлення двовимірної інформації, що містить динамічні викривлення, наведено на рис. 2. Як бачимо, застосування процедур корекції вагових коефіцієнтів лінійної адаптивної нейронної мережі забезпечує зменшення до 2,5 разів похибки визначення

Виділення об'єктів вимірювань у двовимірному масиві нейронною мережею

Для визначення геометричних параметрів та параметрів руху об'єкта вимірювань необхідно виділити цей об'єкт з всієї множини точок двовимірного цифрового масиву зображення. Це можливо виконати шляхом сегментації зображення на основі порогового значення яскравості або кольору. Відомо багато різних підходів до визначення порогу сегментації [9, 10]. Важливим критерієм для вибору порогу при вимірюванні механічних величин є забезпечення точного виміру геометричних розмірів об'єкта вимірювань. Наприклад, поріг яскравості може бути визначений як середина висоти перепаду яскравості.

Однак, в нестаціонарних та несприятливих умовах вимірювань визначене таким чином значення порогу може не відповідати поточним значенням параметрів двовимірної інформації. Наприклад, яскравість об'єкта і фону може змінюватися через нестабільність освітлення об'єктів вимірювань у виробничих умовах застосування приладової системи. Відхилення поточних значень параметрів від розрахункових приводить до виникнення додаткової похибки вимірювань геометричних параметрів об'єктів.

Тому для компенсації додаткових похибок і суттєвого підвищення точності вимірювань розроблено спосіб сегментації двовимірної інформації про механічні величини на основі штучних нейронних мереж. Для виділення об'єктів вимірювань на кольоровому двовимірному зображенні використовується нейронна мережа на основі прошарку нейронів Кохонена (рис. 3). Така нейронна мережа забезпечує виявлення центрів кластерів, що відповідають кольорам різних типів об'єктів вимірювань і фону. Початкове кольорове зображення перетворюється з кольорової схеми *RGB* в схему *HSV* або *LAB*. На поточному зображенні виділяється фрагмент, що характерний для даного зображення і який використовується для навчання мережі. На етапі навчання інформація про колір кожної точки фрагмента використовується для визначення центрів кластерів. Кількість кластерів обирається на етапі навчання мережі і повинна відповідати кількості різних типів об'єктів вимірювань на зображенні. В робочому режимі нейронна мережа на основі визначених центрів кластерів виконує сегментацію всього зображення на об'єкти вимірювань і фон.

Адаптація процедури сегментації до нестаціонарних умов вимірювань (зміщення порогу сегментації) виконується шляхом мінімізації функції z_i на етапі навчання мережі:

$$z_i = f(\mathbf{W}_i, \mathbf{X}) = \|\mathbf{W} - \mathbf{X}\|,$$

де $\mathbf{W}_i = (\omega_{i1}, \omega_{i2}, \dots, \omega_{in})^T$ – вектор вагових коефіцієнтів мережі, $\mathbf{X} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ – вхідний вектор ознак, що використовуються для розподілу зображення на об'єкти вимірювань і фон.

Для кольорового зображення, перетвореного в схему *Lab* (L – яскравість точок зображення, a і b – показники кольору цих точок), маємо:

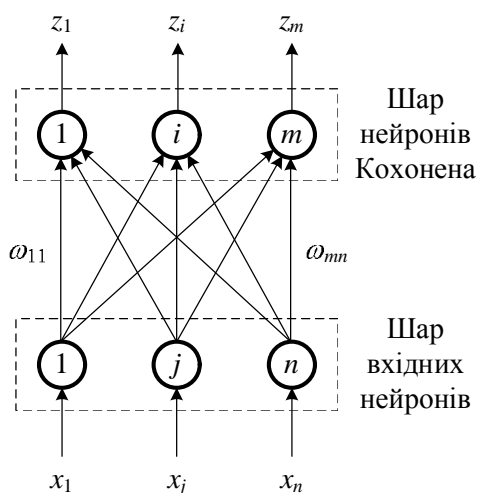


Рис. 3. Нейронна мережа на основі прошарку нейронів Кохонена, що виконує сегментацію зображень

$$\mathbf{X} = (a_{kl}, b_{kl}), \quad k = \overline{1, N}, \quad l = \overline{1, M}, \quad \mathbf{W}_i = (\hat{a}_i, \hat{b}_i)^T,$$

$$\hat{a}_i = \frac{1}{N_{\Omega_i}} \sum_{\Omega_i} a_{kl}, \quad \hat{b}_i = \frac{1}{N_{\Omega_i}} \sum_{\Omega_i} b_{kl}, \quad z_i = \begin{cases} 1, & a_{kl} \in \Omega_i \\ 0, & a_{kl} \notin \Omega_i \end{cases}$$

$$\mathbf{W}_i^* = \mathbf{W}_i + \alpha (\mathbf{X} - \mathbf{W}_i) \cdot z_i, \quad 0 < \alpha < 1,$$

де N, M – розмір зображення в дискретних точках, a_{kl}, b_{kl} – показники кольору для поточної точки зображення, \hat{a}_i, \hat{b}_i – оцінка середніх значень кольору i -го об'єкта вимірювань, отримана на етапі навчання мережі, N_{Ω_i} – кількість дискретних точок у фрагменті зображення Ω_i , що використовується для навчання, α – коефіцієнт, що визначає швидкість процедури навчання.

Результати вимірювань геометричних ознак об'єктів з використанням розроблених методів відновлення і сегментації двовимірної інформації на основі штучних нейронних мереж наведено на рис. 4. При цьому мережа Кохонена забезпечує

нульове зміщення порогу сегментації для поточних умов вимірювань. Як бачимо, застосування штучних нейронних мереж дозволяє суттєво зменшити систематичну складову похибки вимірювань координат, обумовлену несприятливими та нестационарними умовами вимірювань.

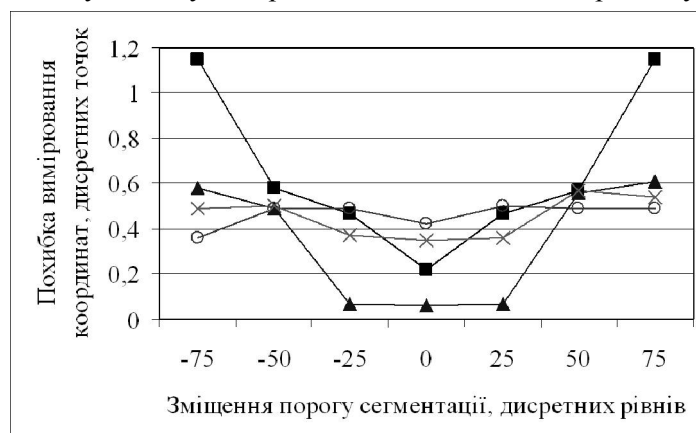


Рис. 4. Похибки визначення координат контурних точок об'єктів вимірювань: ■ – систематична, ▲ – систематична з відновленням параметричним фільтром Вінера, реалізованим штучною нейронною мережею, ○ – випадкова, × – випадкова з відновленням параметричним фільтром Вінера

Висновки

Вимірювання механічних величин на основі двовимірної інформації може забезпечити суттєве підвищення точності та швидкодії вимірювальних операцій, розширення функціональних можливостей засобів вимірювань механічних величин.

Особливо ефективними вимірювання механічних величин є за умови використання процедур алгоритмічної обробки двовимірної інформації. В тому числі – це процедури з використанням штучних нейронних мереж. Застосування штучних нейронних мереж дозволяє компенсувати додаткову похибку, що виникає в несприятливих та нестационарних умовах проведення вимірювань.

Розроблено методи фільтрації, відновлення та сегментації двовимірної інформації про механічні величини на основі штучних нейронних мереж. Ці методи дозволяють суттєво підвищити точність приладової системи для вимірювань механічних величин.

Список літературних джерел

1. Системы технического зрения (принципиальные основы, аппаратное и математическое обеспечение) / Под ред. А. Н. Писаревского, А. Ф. Чернявского. – Л. : Машиностроение, 1988. – 424 с.
2. Техническое зрение роботов / В. И. Мошкин, А. А. Петров, В. С. Титов, Ю. Г. Якушенков ; под общей ред. Ю. Г. Якушенкова. – М. : Машиностроение, 1990. – 272 с.
3. Катус Г. П. Системы машинного видения: анализ состояния и перспективы развития / Г. П. Катус, П. Г. Катус // Приборы и системы управления. – 1999. – № 9. – С. 57 – 67.
4. Катус Г.П. Системы машинного видения с интеллектуальными видеодатчиками / Г.П. Катус // Информационные технологии. – 2001. – № 10. – С. 28-37.
5. Бутаков Е.А. Обработка изображений на ЭВМ / Е.А. Бутаков, В.И. Островский, И.П. Фадеев – М. : Радио и связь, 1987. – 240 с.
6. Горелик С. Л. Телевизионные измерительные системы / С. Л. Горелик, Б. М. Кац, В. И. Киврин. – М. : Связь, 1980. – 168 с.
7. Грязин Г.Н. Системы прикладного телевидения : учебное пособие / Г.Н. Грязин. – СПб : Политехника, 2000. – 277 с.
8. Цифровое преобразование изображений : учебное пособие для вузов / Р.Е. Быков, Р. Фрайер, К.В. Иванов, А.А. Манцетов ; под общей ред. Р.Е. Быкова. – М. : Горячая линия-Телеком, 2003. – 228 с.
9. Гонсалес Р. Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс. – М. : Техносфера, 2005. – 1072 с.
10. Форсайт Д. Компьютерное зрение. Современный подход / Д. Форсайт, Ж. Понс. – М. : Вильямс, 2004. – 928 с.