

Ю.О. Подчашинський, к.т.н., доц.  
Житомирський державний технологічний університет

### ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ВИМІРЮВАЛЬНОГО КАНАЛУ ПРИЛАДОВОЇ СИСТЕМИ З ДВОВИМІРНОЮ ІНФОРМАЦІЄЮ ПРО МЕХАНІЧНІ ВЕЛИЧИНИ

*В статті розглянуто математичні моделі та похибки вимірювального каналу приладової системи з двовимірною інформацією про механічні величини. При проведенні вимірювань механічних величин у нестационарних і несприятливих умовах пропонується виконувати алгоритмічну обробку двовимірної інформації за допомогою штучної нейронної мережі. Підвищення точності вимірювального каналу забезпечується за рахунок процедур адаптації і навчання лінійної нейронної мережі.*

**Вступ. Постановка проблеми та її зв'язок з важливими науковими і практичними задачами.** Приладова система для вимірювання механічних величин базується на формуванні та алгоритмічній обробці сигналів, які містять двовимірну інформацію про об'єкт вимірювань. Носієм двовимірної вимірювальної інформації про механічні величини можуть бути цифрові зображення об'єктів вимірювань. Для отримання двовимірної вимірювальної інформації про механічні величини необхідно сформувати цифрове зображення, яке являє собою двовимірний образ об'єкта вимірювань, та ввести це зображення в цифрову ЕОМ.

Для розробки даної системи, підвищення її точності і швидкодії необхідно мати математичні моделі вимірювального каналу. Основою підвищення точності є врахування всіх похибок вимірювального каналу з подальшою розробкою заходів щодо їх компенсації. Суттєвою складовою частиною підвищення точності вимірювань механічних величин також є врахування особливостей двовимірної вимірювальної інформації. Тому актуальною задачею є розробка та вдосконалення математичних моделей вимірювального каналу з двовимірною інформацією про механічні величини, аналіз та компенсація похибок цього вимірювального каналу.

Такий підхід повинен забезпечити більш високу точність та швидкодію вимірювань порівняно з існуючими методами. Це особливо важливо для вимірювань механічних величин у реальному масштабі часу, наприклад, у ході контролю за технологічними процесами.

**Аналіз існуючих досліджень і публікацій, виділення невирішених раніше частин загальної проблеми.** Математичні моделі вимірювальних каналів засобів вимірювань механічних величин розглянуті в багатьох наукових працях та підручниках [1, 2, 3]. Але ці математичні моделі орієнтовані перш за все на одновимірні вимірювальні сигнали або на декілька таких сигналів, що передаються паралельними каналами.

В технічних пристроях, побудованих на основі двовимірних сигналів, найбільший вплив на формування та похибки двовимірної інформації мають: оптична система; напівпровідникові перетворювачі світло-сигнал; аналогові кола обробки сигналів [4, 5, 6].

Також відомо багато наукових праць з методів алгоритмічної обробки та відновлення двовимірних масивів інформації та зображень, наприклад [7, 8, 9]. Основним критерієм оцінки результатів обробки є загальна якість зображення, призначеного для візуального сприйняття.

Однак для приладової системи потрібно враховувати те, що вимірювальний канал повинен забезпечити високоточну передачу двовимірної вимірювальної інформації про механічні величини. Перш за все це пов'язано з найбільш точним відтворенням контурів об'єктів вимірювань та їх геометричних характеристик. А це відтворення істотно залежить від обраної математичної моделі та методів алгоритмічної обробки двовимірних масивів.

**Метою проведених досліджень** є розробка математичної моделі вимірювального каналу приладової системи з двовимірною інформацією про механічні величини, аналіз похибок цього вимірювального каналу та розробка алгоритмічних процедур компенсації похибок.

#### Математична модель вимірювального каналу з двовимірною інформацією про механічні величини

При розробці математичної моделі необхідно враховувати ряд суттєвих особливостей вимірювального каналу з двовимірною інформацією:

- на відміну від більшості систем автоматичного управління, вимірювальний канал є розімкненою структурою, що складається з ряду послідовно з'єднаних блоків;
- вимірювальний канал поєднує як неперервні, так і дискретні блоки і елементи;
- на відміну від типових імпульсних і цифрових систем управління, у вимірювальному каналі неперервна незмінна частина (пристрій формування двовимірної інформації) міститься на початку

каналу, після неї розташований аналого-цифровий перетворювач та цифрова частина, зворотне перетворення сигналів з цифрової на неперервну форму відсутнє;

– вимірювальний канал забезпечує передачу й обробку двовимірної вимірювальної інформації про механічні величини, яка може оброблятися в цифрових блоках як двовимірним фільтром, так і послідовним застосуванням двох одновимірних фільтрів (по рядках і стовпцях двовимірного масиву);

– основною вимогою до динамічних характеристик вимірювального каналу є неспотворена передача стрибкоподібних перепадів сигналу, що утворюють контур об'єктів вимірювань;

– оскільки двовимірна вимірювальна інформація, як правило, подається на цифрову обробку у вигляді накопиченого у запам'ятовуючому пристрої двовимірного масиву, то вимога фізичної реалізації для процедур алгоритмічної обробки не є обов'язковою (як початкові дані процедур алгоритмічної обробки можуть використовуватися як попередні, так і наступні відліки вимірювальної інформації з накопиченого двовимірного масиву);

– в ряді задач для підвищення швидкодії може застосовуватися обробка двовимірної інформації в реальному часі, при цьому вимірювальна інформація надходить до процедур алгоритмічної обробки по рядках і вимога фізичної реалізації є обов'язковою.

Аргументом двовимірної інформації  $f(x, y)$ , що передається у вимірювальному каналі, є просторові координати  $x$  і  $y$ ,  $x \in (0, x_{\max})$ ,  $y \in (0, y_{\max})$ , де  $x_{\max}$  [м],  $y_{\max}$  [м] – розмір прямокутної області в площині об'єкта вимірювань. Вказана область потрапляє в поле зору оптичної системи пристрою формування двовимірної інформації і перпендикулярна оптичній осі цієї системи. Після проходження через оптичну систему двовимірна інформація  $f_1(x_1, y_1)$  є функцією двох просторових координат  $x_1$  і  $y_1$ , причому

$$x_1 = x \cdot k_{moc}, \quad y_1 = y \cdot k_{moc}, \quad x_1 \in (0, x_{1\max}), \quad y_1 \in (0, y_{1\max}),$$

де  $k_{moc}$  – статичний коефіцієнт передачі геометричних параметрів у пристрої формування двовимірної інформації, що дорівнює коефіцієнту збільшення оптичної системи,  $x_{1\max}$  [м],  $y_{1\max}$  [м] – розмір двовимірного зображення об'єкта вимірювань.

У методах алгоритмічної обробки використовуються дискретні відліки  $f_2(n, m)$  двовимірної інформації, що створюються на виході пристрою формування двовимірної інформації після перетворення зображення  $f_1(x_1, y_1)$  на цифрову форму. В цьому випадку

$$n = \text{int}(x / \delta_{\partial 1} + 0,5), \quad m = \text{int}(y / \delta_{\partial 2} + 0,5), \quad n \in \overline{1, N}, \quad m \in \overline{1, M},$$

де  $\text{int}(\cdot)$  – операція обчислення цілої частини числа,  $\delta_{\partial 1}, \delta_{\partial 2}$  – крок дискретності двовимірної інформації  $f(x, y)$  по просторових координатах  $x$  і  $y$ , зазвичай  $\delta_{\partial 1} = \delta_{\partial 2} = \delta_{\partial}$ ,  $N, M$  – розмір двовимірного масиву  $f_2(n, m)$  у дискретних точках (д.т.) по просторових координатах  $x$  і  $y$ , 1 д.т. зображення об'єкта вимірювань відповідає відстані  $\delta_{\partial}$  [м] у площині об'єкта вимірювань.

Амплітуда двовимірної інформації про механічні величини:

$$f(x, y) = B(x, y), \quad f_1(x_1, y_1) = B_1(x_1, y_1),$$

де  $B(x, y)$  – функція розподілу яскравості в площині об'єкта вимірювань,  $B_1(x_1, y_1) = B(x_1 / k_{moc}, y_1 / k_{moc})$  – функція розподілу яскравості в площині об'єкта вимірювань.

Амплітуда дискретних відліків двовимірної інформації на виході пристрою формування двовимірної інформації:

$$f_2(n, m) = \text{int} \left[ \left( \frac{k_{мпзс} \cdot k_{меп}}{\delta_{\partial 1} \cdot \delta_{\partial 2}} \int_{x_{0H}}^{x_{0K}} \int_{y_{0H}}^{y_{0K}} B(x, y) dx dy \right) / \delta_{кв} \right], \tag{1}$$

$$f_2(n, m) \in \overline{1, N_{кв} - 1}, \quad x_{0H} = (n - 1)\delta_{\partial 1}, \quad x_{0K} = n\delta_{\partial 1},$$

$$y_{0H} = (m - 1)\delta_{\partial 2}, \quad y_{0K} = m\delta_{\partial 2},$$

де  $k_{мпзс}, k_{меп}$  – статичні коефіцієнти передачі по амплітуді перетворювача «світло–сигнал» (наприклад, ПЗС-матриці) та електронних підсилювачів сигналу,  $\delta_{кв}$  – крок квантування за амплітудою двовимірної інформації в аналого-цифровому перетворювачі,  $N_{кв}$  – кількість рівнів квантування, зазвичай  $N_{кв} = 2^{n_{алп}} = 256$ ,  $n_{алп} = 8$  – розрядність двійкового коду, що використовується для представлення двовимірної інформації у цифровій формі.

Формула (1) відображає той факт, що в перетворювачі «світло–сигнал» виконується накопичення та усереднення електричного заряду, що створюється під дією зовнішнього освітлення в межах кожної світлочутливої комірки. Така комірка відповідає одному дискретному відліку  $f_2(n, m)$ .

У пристрої формування двовимірної інформації до корисного сигналу  $f_x(n, m)$  також додається шум  $\xi(x, y)$ , що представлений дискретними відліками  $\xi(n, m)$ . Результуючий сигнал пристрою формування двовимірної інформації (незмінної частини вимірювального каналу) дорівнює:

$$f_H(n, m) = f_x(n, m) + \xi(n, m).$$

Якщо розглядати обробку рядка  $f(x)|_{y=const}$  двовимірної інформації  $f(x, y)$  в реальному часі, то цьому рядку відповідає одновимірний сигнал  $f(t)$ ,  $t \in (0, T_p)$ , де  $T_p = 1/(f_k \cdot M)$  – тривалість сигналу  $f(t)$ ,  $f_k$  – частота формування двовимірних масивів у пристрої формування двовимірної інформації. Дискретні відліки  $f_2(n)$  сигналу  $f(t)$  формуються аналого-цифровим перетворювачем через інтервал часу  $T_\delta = 1/(f_k \cdot M \cdot N)$ , що співпадає з кроком дискретності сигналу  $f(x)$  у просторовій області. В цьому випадку:

$$n = \text{int}(t / T_\delta + 0,5), \quad n \in \overline{1, N},$$

а  $f_2(n)$  визначається за формулою (1) при  $m = \text{const}$ .

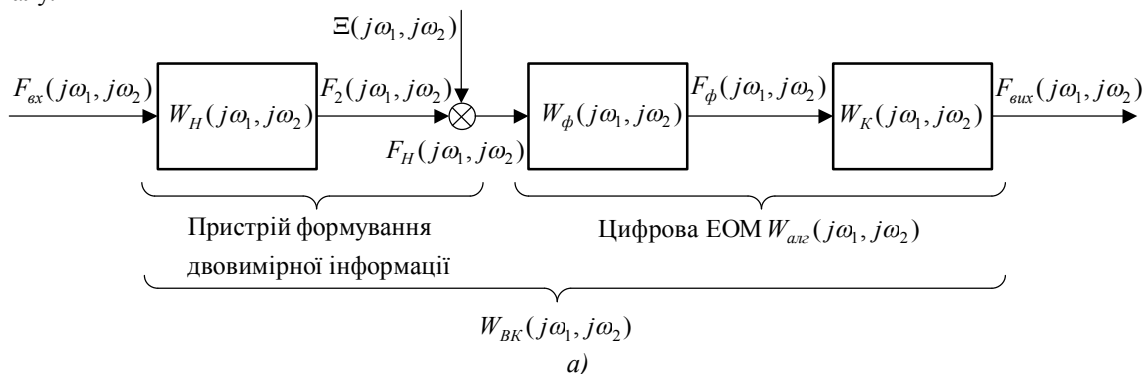
Для визначення динамічних характеристик вимірювального каналу будемо розглядати його лінійну частину, що включає пристрій формування двовимірної інформації, пристрій введення в цифрову ЕОМ сигналу від пристрою формування двовимірної інформації та блоки лінійної алгоритмічної обробки двовимірної інформації, що реалізуються в цифровій ЕОМ. Пристрій формування двовимірної інформації включає оптичну систему, напівпровідниковий перетворювач “світло-сигнал” та блок квантування сигналу за рівнем. Перетворювач “світло-сигнал” (наприклад, ПЗС-матриця) та блок квантування сигналу за рівнем виконують функції аналого-цифрового перетворювача та створюють на виході пристрою формування двовимірної інформації двовимірний масив відліків  $f_2(n, m)$ . Лінійні блоки алгоритмічної обробки двовимірної інформації про механічні величини виконують операцію фільтрації шумів та операцію відновлення динамічних викривлень двовимірної інформації. Ці шуми та викривлення виникли в пристрої формування двовимірної інформації.

Для двовимірних сигналів найбільш прийнятною математичною моделлю вимірювального каналу є дискретна передаточна функція на основі двовимірного  $z$ -перетворення та відповідна їй двовимірна частотна передаточна функція (комплексна частотна характеристика). Дана математична модель відповідає загальному випадку двовимірної алгоритмічної обробки двовимірної інформації про механічні величини. Тому математичною моделлю лінійної частини вимірювального каналу у двовимірному випадку (обробка двовимірної інформації як двовимірного масиву відліків, що накопичені у запам’ятовуючому пристрої цифрової ЕОМ) можуть бути:

– частотні передаточні функції окремих блоків та вимірювального каналу в цілому (рис. 1, а), що реалізуються цифровими фільтрами (рис. 1, б);

– або дискретні передаточні функції на основі двовимірного  $z$ -перетворення (рис. 1, в).

У випадку обробки двовимірної інформації послідовно по рядках і стовпцях або по рядках в реальному часі можливо використовувати математичні моделі одновимірних сигналів і вимірювального каналу.



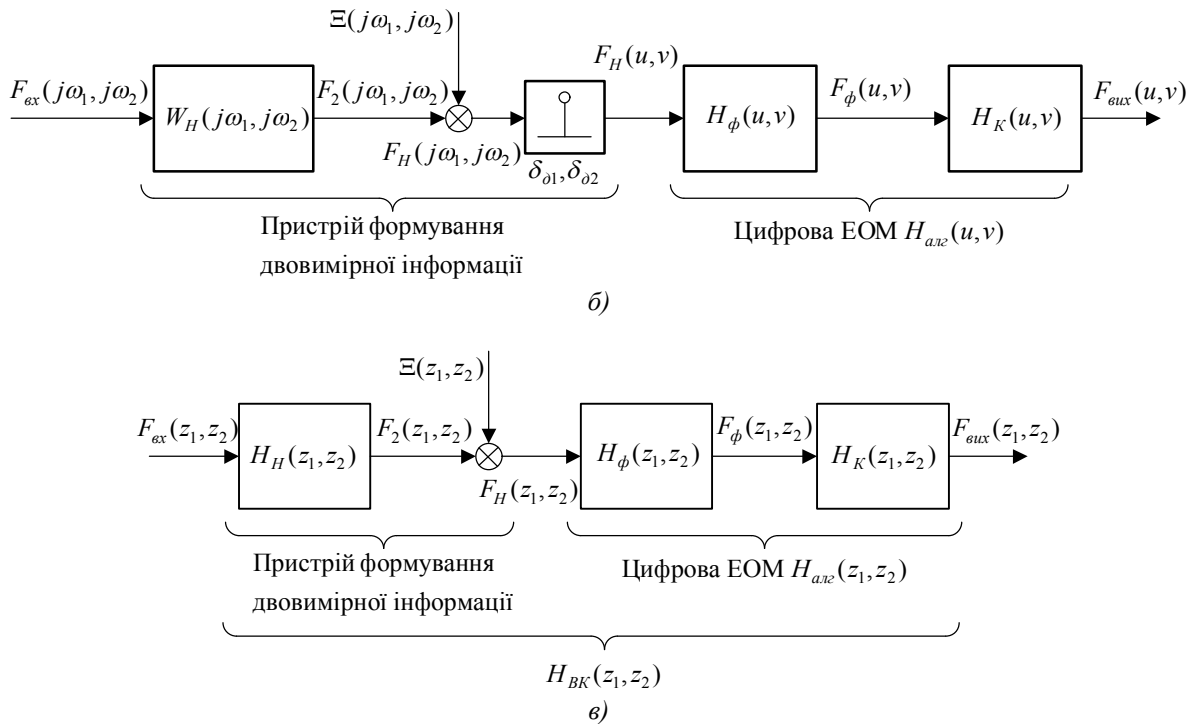


Рис. 1. Структурні схеми лінійної частини вимірювального каналу у двовимірному випадку

На рис. 1 позначено:

1.  $W_H(j\omega_1, j\omega_2), H_H(z_1, z_2)$  – частотна передаточна функція та дискретна передаточна функція пристрою формування двовимірної інформації.

2.  $W_\phi(j\omega_1, j\omega_2), H_\phi(u, v), H_\phi(z_1, z_2)$  – частотна передаточна функція, дискретні відліки частотної передаточної функції та дискретна передаточна функція блоку фільтрації двовимірної інформації.

3.  $W_K(j\omega_1, j\omega_2), H_K(u, v), H_K(z_1, z_2)$  – частотна передаточна функція, дискретні відліки частотної передаточної функції та дискретна передаточна функція блоку відновлення динамічних викривлень у двовимірній інформації;

4.  $W_{але}(j\omega_1, j\omega_2), H_{але}(u, v), H_{але}(z_1, z_2)$  – частотна передаточна функція, дискретні відліки частотної передаточної функції та дискретна передаточна функція блоку алгоритмічної обробки двовимірної інформації, який виконує операції фільтрації шумів та відновлення динамічних викривлень і реалізується в цифровій ЕОМ.

5.  $W_{БК}(j\omega_1, j\omega_2), H_{БК}(z_1, z_2)$  – частотна передаточна функція та дискретна передаточна функція лінійної частини вимірювального каналу з двовимірною інформацією.

Оскільки лінійна частина вимірювального каналу повинна забезпечити передачу і відтворення двовимірної інформації без викривлень, то бажана передаточна функція цієї частини:

$$H_0(z_1, z_2) = 1, \quad W_0(j\omega_1, j\omega_2) = 1. \tag{2}$$

Тоді

$$H_{але}(z_1, z_2) = 1 / H_H(z_1, z_2), \quad W_{але}(j\omega_1, j\omega_2) = 1 / W_H(j\omega_1, j\omega_2). \tag{3}$$

Таким чином, вимірювальний канал складається з пристрою формування двовимірної інформації (незмінна частина) з частотною передаточною функцією  $W_H(j\omega_1, j\omega_2)$  (або передаточною функцією  $H_H(z_1, z_2)$ ), що вносить викривлення у двовимірну інформацію, та цифрової ЕОМ (блоку алгоритмічної обробки, що розробляється у вимірювальній системі) з частотною передаточною функцією  $W_{але}(j\omega_1, j\omega_2) = 1 / W_H(j\omega_1, j\omega_2)$  (або передаточною функцією  $H_{але}(z_1, z_2) = 1 / H_H(z_1, z_2)$ ), що компенсує викривлення двовимірної інформації.

**Похибки вимірювального каналу приладової системи для вимірювання механічних величин**

Виконання співвідношень (2) і (3) в реальній вимірювальній системі можливе лише наближено через наявність шумів і застосування оптимального фільтра. При роботі в реальному часі виконання співвідношень (2) і (3) також можливе лише наближено через необхідність забезпечення фізичної

реалізації передаточної функції вимірювального каналу шляхом введення додаткових співмножників у співвідношення (3). Вказані обставини приводять до того, що передаточна функція лінійної частини вимірювального каналу відрізняється від бажаної передаточної функції.

В процесі роботи системи для вимірювань механічних величин її параметри та параметри двовимірної інформації також можуть відхилятися від номінальних значень, що були використані при розробці методів алгоритмічної обробки. Все це приводить до виникнення похибок вимірювання механічних величин на основі двовимірної інформації. Тому розглянемо ці похибки на основі отриманих математичних моделей двовимірної інформації та вимірювального каналу.

Особливістю аналізу похибок є те, що необхідно оцінювати похибки визначення координат об'єктів вимірювань. Ці похибки залежать від викривлень форми перепадів відеосигналу, що утворюють контури об'єктів вимірювань. Ці викривлення, в свою чергу, залежать від динамічних викривлень амплітуди відеосигналу. Таким чином, оцінки похибки вимірювального каналу за амплітудою можуть бути використані як початкові дані для розрахунку похибки за координатою та як загальна оцінка якості вимірювального каналу. Підсумковою оцінкою повинна бути похибка за координатою об'єктів вимірювань. Для цього можна використовувати спосіб, що викладений у [10].

Як відомо [11, 12], дисперсія  $D_{\Delta}$  похибки динамічної системи за амплітудою сигналу може бути визначена на основі відомої спектральної щільності  $S_{\Delta}(\omega)$  цієї похибки:

$$D_{\Delta} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S_{\Delta}(\omega) d\omega.$$

Спектральна щільність похибки для вимірювального каналу (рис. 1) дорівнює:

$$S_{\Delta}(\omega_1, \omega_2) = |W_0(j\omega_1, j\omega_2) - W_{BK}(j\omega_1, j\omega_2)|^2 \cdot S_{fex}(\omega_1, \omega_2) + |W_{BK}(j\omega_1, j\omega_2)|^2 \cdot S_{\xi ex}(\omega_1, \omega_2), \quad (4)$$

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,

$$S_{fex}(\omega_1, \omega_2) = \frac{S_{f2}(\omega_1, \omega_2)}{|W_H(j\omega_1, j\omega_2)|^2}, \quad S_{\xi ex}(\omega_1, \omega_2) = \frac{S_{\xi}(\omega_1, \omega_2)}{|W_H(j\omega_1, j\omega_2)|^2}, \quad (5)$$

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.

Таким чином, похибка складається з викривлень корисного сигналу, що обумовлені відмінностями реальної передаточної функції вимірювального каналу від його бажаної передаточної функції, та із залишків шуму, що пройшли на вихід вимірювального каналу.

Визначимо дисперсію похибки лінійної частини вимірювального каналу для випадку двовимірної алгоритмічної обробки вимірювальної інформації про механічні величини. При цьому частотна передаточна функція оптимального фільтра [7, 9, 12]:

$$W_{\phi}(j\omega_1, j\omega_2) = \frac{S_{f2}(\omega_1, \omega_2)}{S_{f2}(\omega_1, \omega_2) + S_{\xi}(\omega_1, \omega_2)}. \quad (6)$$

Враховуючи формули (4), (5) і (6), отримуємо:

$$\begin{aligned} S_{\Delta}(\omega_1, \omega_2) &= \left| \frac{1}{W_H(j\omega_1, j\omega_2)} - \frac{S_{f2}(\omega_1, \omega_2)}{(S_{f2}(\omega_1, \omega_2) + S_{\xi}(\omega_1, \omega_2)) \cdot W_H(j\omega_1, j\omega_2)} \right|^2 \cdot S_{f2}(\omega_1, \omega_2) + \\ &+ \left| \frac{S_{f2}(\omega_1, \omega_2)}{(S_{f2}(\omega_1, \omega_2) + S_{\xi}(\omega_1, \omega_2)) \cdot W_H(j\omega_1, j\omega_2)} \right|^2 \cdot S_{\xi}(\omega_1, \omega_2) = \\ &= \frac{S_{f2}(\omega_1, \omega_2) \cdot S_{\xi}^2(\omega_1, \omega_2) + S_{f2}^2(\omega_1, \omega_2) \cdot S_{\xi}(\omega_1, \omega_2)}{(S_{f2}(\omega_1, \omega_2) + S_{\xi}(\omega_1, \omega_2))^2 \cdot W_H^2(j\omega_1, j\omega_2)} = \frac{S_{f2}(\omega_1, \omega_2) \cdot S_{\xi}(\omega_1, \omega_2)}{(S_{f2}(\omega_1, \omega_2) + S_{\xi}(\omega_1, \omega_2)) \cdot W_H^2(j\omega_1, j\omega_2)}, \end{aligned} \quad (7)$$

$$D_{\Delta} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} S_{\Delta}(\omega_1, \omega_2) d\omega_1 d\omega_2. \quad (8)$$

Отримана оцінка похибки вимірювального каналу (7) і (8) не враховує вплив ряду факторів, що мають місце в реальних умовах роботи вимірювальної системи як сукупності вказаних блоків. Це такі фактори:

- ідентифікація параметрів передаточної функції пристрою формування двовимірної інформації виконується з похибками;

- ідентифікація параметрів кореляційної функції двовимірної інформації та шуму також виконується з похибками;

- реалізація частотної передаточної функції  $W_{але}(j\omega_1, j\omega_2)$  в цифровій ЕОМ є наближеною;
- параметри пристрою формування двовимірної інформації можуть змінюватися в часі під дією несприятливих факторів оточуючого середовища та бути нестационарними;
- параметри кореляційної функції двовимірної інформації можуть змінюватися при зміні параметрів об'єктів вимірювань у межах одного типу цих об'єктів.

Все це призводить до появи додаткових похибок вимірювань механічних величин. Для нормальної роботи вимірювальної системи необхідно, щоб при малих значеннях вказаних похибок похибка вихідного сигналу вимірювального каналу також була малою [12].

Похибки ідентифікації впливають на точність визначення передаточної функції  $W_{але}(\rho)$ , що реалізується в цифровій ЕОМ, яка входить до складу вимірювального каналу. Це, в свою чергу, приводить до додаткових похибок двовимірної інформації на виході вимірювального каналу через неточну реалізацію операцій фільтрації і відновлення двовимірної інформації. Тому розглянемо додаткову передаточну функцію лінійної частини вимірювального каналу:

$$\Delta H_{BK}(z_1, z_2) = \frac{\partial H_{BK}(z_1, z_2)}{\partial H_{але}(z_1, z_2)} \cdot \Delta H_{але}(z_1, z_2), \quad (9)$$

де  $\Delta H_{але}(z_1, z_2)$  – додаткова передаточна функція блоку алгоритмічної обробки вимірювальної інформації, що обумовлена похибками ідентифікації.

Передаточна функція  $\Delta H_{BK}(z_1, z_2)$  визначає приріст вихідного сигналу  $\Delta F_{вих}(z_1, z_2)$  вимірювального каналу при вхідному сигналі  $F_{вх}(z_1, z_2)$ :

$$\Delta F_{вих}(z_1, z_2) = \Delta H_{BK}(z_1, z_2) \cdot F_{вх}(z_1, z_2), \quad (10)$$

обумовлений наявністю похибок ідентифікації параметрів пристрою формування двовимірної інформації та параметрів кореляційної функції.

Для двовимірної математичної моделі вимірювального каналу:

$$H_{BK}(z_1, z_2) = H_H(z_1, z_2) \cdot H_{але}(z_1, z_2),$$

$$H_{але}(z_1, z_2) = \frac{1}{H_H(z_1, z_2)} \cdot H_\phi(z_1, z_2) = \frac{Q_H(z_1, z_2)}{P_H(z_1, z_2)} \cdot \frac{P_\phi(z_1, z_2)}{Q_\phi(z_1, z_2)},$$

де

$$H_H(z_1, z_2) = \frac{P_H(z_1, z_2)}{Q_H(z_1, z_2)}, \quad H_\phi(z_1, z_2) = \frac{P_\phi(z_1, z_2)}{Q_\phi(z_1, z_2)}.$$

Додаткова двовимірна дискретна передаточна функція вимірювального каналу на основі (9) і (10) дорівнює:

$$\Delta H_{BK}(z_1, z_2) = \frac{P_H(z_1, z_2)}{Q_H(z_1, z_2)} \cdot \Delta H_{але}(z_1, z_2).$$

Додаткова передаточна функція вимірювального каналу, обумовлена похибками ідентифікації параметрів пристрою формування двовимірної інформації, дорівнює:

$$\Delta H_{BK1}(z_1, z_2) = \frac{P_\phi(z_1, z_2)}{Q_\phi(z_1, z_2)} \cdot \left[ \frac{\Delta Q_H(z_1, z_2)}{Q_H(z_1, z_2)} - \frac{\Delta P_H(z_1, z_2)}{P_H(z_1, z_2)} \right]. \quad (11)$$

Додаткова передаточна функція вимірювального каналу, обумовлена похибками ідентифікації параметрів кореляційних функцій двовимірної інформації і шуму, дорівнює:

$$\Delta H_{BK2}(z_1, z_2) = \frac{P_\phi(z_1, z_2)}{Q_\phi(z_1, z_2)} \cdot \left[ \frac{\Delta P_\phi(z_1, z_2)}{P_\phi(z_1, z_2)} - \frac{\Delta Q_\phi(z_1, z_2)}{Q_\phi(z_1, z_2)} \right]. \quad (12)$$

Додаткова передаточна функція лінійної частини вимірювального каналу в цілому дорівнює:

$$\Delta H_{BK}(z_1, z_2) = \Delta H_{BK1}(z_1, z_2) + \Delta H_{BK2}(z_1, z_2). \quad (13)$$

Стійкість системи з двовимірною додатковою передаточною функцією може бути визначена на основі відомих методів згідно з [8]. Застосовуючи ці методи до результатів ідентифікації пристрою формування двовимірної інформації, приходимо до висновку, що система з додатковими передаточними функціями (11), (12), (13) є стійкою.

#### Підвищення точності вимірювального каналу на основі використання штучної нейронної мережі з адаптивними лінійними нейронами

Вимірювальний канал системи для вимірювань механічних величин є працездатним, але в ньому виникають додаткові похибки, обумовлені співвідношеннями (11), (12), (13). Для підвищення точності вимірювання механічних величин необхідно компенсувати вказані додаткові похибки. Це може бути зроблено на основі вдосконалення 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 (рис. 2).

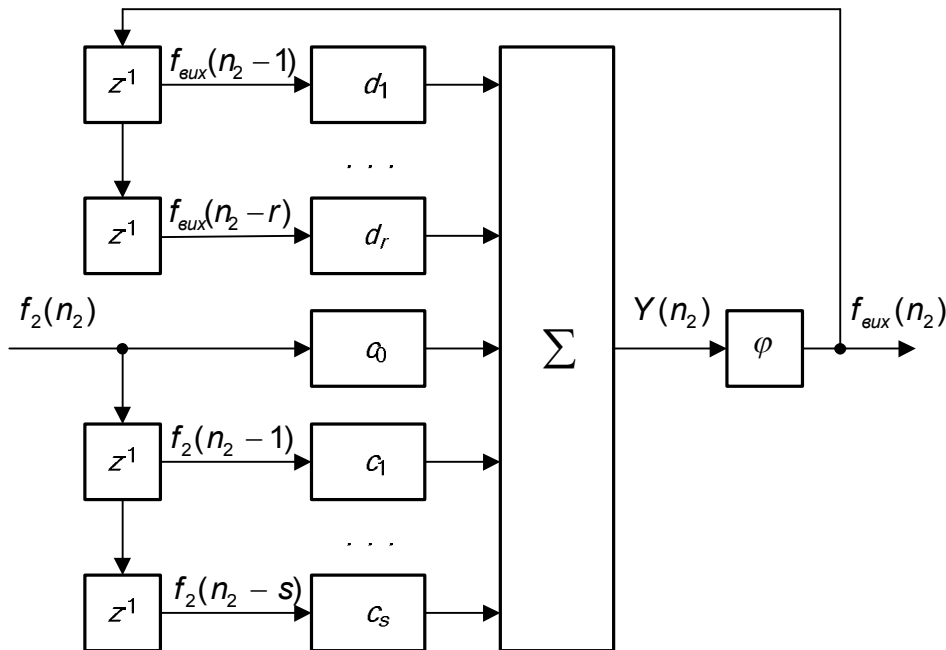


Рис. 2. Реалізація алгоритмічної цифрової обробки двовимірної інформації на основі лінійної адаптивної нейронної мережі:  $z^{-1}$  – елемент затримки на часовий інтервал між надходженням двох дискретних відліків сигналу;  $c_i, d_j$  – вагові коефіцієнти;  $\varphi$  – функція активації, в даному випадку  $\varphi(Y(n_2)) = Y(n_2)$

Для цього необхідно виконувати ідентифікацію дискретної передаточної функції пристрою формування двовимірної інформації. Ця передаточна функція базується на різницевому рівнянні. Оскільки тестовим сигналом є погранична крива [14], то можливо розглядати одновимірні сигнали у рядку двовимірної інформації про механічні величини.

Різницеве рівняння і відповідна йому дискретна передаточна функція можуть бути записані для авторегресійної моделі пристрою із зовнішнім входом  $f_{\text{вх}}(n_2)$  [13]:

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

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

Метою ідентифікації пристрою формування двовимірної інформації є мінімізація середнього значення квадратичного відхилення:

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

$$\varepsilon(n_2) = f_H^*(n_2) - f_2(n_2) = f_H^*(n_2) - \sum_{j=0}^r b_j f_{\text{вх}}(n_2 - j) + \sum_{i=1}^s a_i f_2(n_2 - i),$$

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,

$$f_2(n_2) = \sum_{j=0}^r b_j f_{\text{вх}}(n_2 - j) - \sum_{i=1}^s a_i f_2(n_2 - i) = f_2(n_2) + \Delta_{AR}(n_2) - \tag{14}$$

оцінка дискретних відліків  $f_2(n_2)$  в рядку двовимірної інформації на основі авторегресійної моделі,  $a_i, b_j$  – поточні оцінки параметрів авторегресійної моделі,  $f_{\text{вх}}(n_2)$  – дискретні відліки суміжної кривої

на вході пристрою формування двовимірної інформації,  $\Delta_{AR}(n_2)$  – похибка авторегресійної моделі з поточними значеннями параметрів  $\overset{\epsilon}{a}_i, \overset{\epsilon}{b}_j$ .

Тоді

$$\overline{\varepsilon^2} = \frac{1}{N_2} \sum_{n_2=0}^{N_2-1} \left[ \left( f_H^*(n_2) \right)^2 + \left( \sum_{j=0}^r \overset{\epsilon}{b}_j f_{ex}(n_2 - j) \right)^2 + \left( \sum_{i=1}^s \overset{\epsilon}{a}_i f_2(n_2 - i) \right)^2 - \right. \tag{15}$$

$$\left. - 2f_H^*(n_2) \cdot \sum_{j=0}^r \overset{\epsilon}{b}_j f_{ex}(n_2 - j) + 2f_H^*(n_2) \cdot \sum_{i=1}^s \overset{\epsilon}{a}_i f_2(n_2 - i) - 2 \sum_{j=0}^r \overset{\epsilon}{b}_j f_{ex}(n_2 - j) \cdot \sum_{i=1}^s \overset{\epsilon}{a}_i f_2(n_2 - i) \right],$$

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial \overline{\varepsilon^2}}{\partial \overset{\epsilon}{a}_l} &= \frac{1}{N_2} \sum_{n_2=0}^{N_2-1} \left[ 2\overset{\epsilon}{a}_l f_2^2(n_2 - l) + 2f_2(n_2 - l) \sum_{i=1, i \neq l}^s \overset{\epsilon}{a}_i f_2(n_2 - i) + \right. \\ &\left. + 2f_H^*(n_2) f_2(n_2 - l) - 2f_2(n_2 - l) \sum_{j=0}^r \overset{\epsilon}{b}_j f_{ex}(n_2 - j) \right] = 0, \quad l = \overline{1, s}, \\ \frac{\partial \overline{\varepsilon^2}}{\partial \overset{\epsilon}{b}_k} &= \frac{1}{N_2} \sum_{n_2=0}^{N_2-1} \left[ 2\overset{\epsilon}{b}_k f_{ex}^2(n_2 - k) + 2f_{ex}(n_2 - k) \sum_{j=0, j \neq k}^r \overset{\epsilon}{b}_j f_{ex}(n_2 - j) - \right. \\ &\left. - 2f_H^*(n_2) f_{ex}(n_2 - k) - 2f_{ex}(n_2 - k) \sum_{i=1}^s \overset{\epsilon}{a}_i f_2(n_2 - i) \right] = 0, \quad k = \overline{0, r}. \end{aligned} \right. \tag{16}$$

У рівняння (15), (16) входять як вимірні значення  $f_H^*(n_2)$  дискретних відліків у рядку двовимірної інформації на виході пристрою її формування, так і їх оцінки  $\overset{\epsilon}{f}_2(n_2)$  для поточних значень параметрів  $\overset{\epsilon}{a}_i, \overset{\epsilon}{b}_j$  згідно з формулою (14). Тому мінімізація середнього значення квадратичного відхилення в загальному випадку можлива на основі рекурентної процедури [13].

Для спрощення процедури ідентифікації пропонується виконувати усереднення вимірних значень  $f_H^*(n_2)$  дискретних відліків сигналу  $f_H(t)$  для декількох сотень рядків двовимірної інформації, що наявні на одному зображенні та містять суміжну криву. Також можливе усереднення рядка для послідовності зображень нерухомого тестового об'єкта. При цьому усереднене значення  $\overline{f_H^*(n_2)} \approx \overline{f_2(n)}$ . З іншого боку, при досягненні параметрами авторегресійної моделі своїх оптимальних значень  $\overset{\epsilon}{a}_i = a_i, \overset{\epsilon}{b}_j = b_j$  похибка цієї моделі  $\Delta_{AR}(n_2) \rightarrow 0$ . Тоді згідно з (14)  $\overset{\epsilon}{f}_2(n_2) = f_2(n_2)$ . Таким чином, у рівняння (16) підставляємо  $\overline{f_H^*(n_2)} = \overline{f_H^*(n_2)}, \overline{f_2(n)} = \overline{f_2(n)}, \overset{\epsilon}{a}_i = a_i, \overset{\epsilon}{b}_j = b_j$  і отримуємо:

$$\left\{ \begin{aligned} &\left[ a_l \sum_{n_2=0}^{N_2-1} \left( \overline{f_H^*(n_2 - l)} \right)^2 + \sum_{n_2=0}^{N_2-1} \left[ \overline{f_H^*(n_2 - l)} \cdot \sum_{i=1, i \neq l}^s \overline{a}_i \overline{f_H^*(n_2 - i)} \right] - \right. \\ &\left. - \sum_{n_2=0}^{N_2-1} \left[ \overline{f_H^*(n_2 - l)} \cdot \sum_{j=0}^r \overline{b}_j \overline{f_{ex}(n_2 - j)} \right] \right] = - \sum_{n_2=0}^{N_2-1} \overline{f_H^*(n_2)} \cdot \overline{f_H^*(n_2 - l)}, \quad l = \overline{1, s}, \\ &\left[ b_k \sum_{n_2=0}^{N_2-1} \left( \overline{f_{ex}(n_2 - k)} \right)^2 + \sum_{n_2=0}^{N_2-1} \left[ \overline{f_{ex}(n_2 - k)} \cdot \sum_{j=0, j \neq k}^r \overline{b}_j \overline{f_{ex}(n_2 - j)} \right] - \right. \\ &\left. - \sum_{n_2=0}^{N_2-1} \left[ \overline{f_{ex}(n_2 - k)} \cdot \sum_{i=1}^s \overline{a}_i \overline{f_H^*(n_2 - i)} \right] \right] = \sum_{n_2=0}^{N_2-1} \overline{f_H^*(n_2)} \cdot \overline{f_{ex}(n_2 - k)}, \quad k = \overline{0, r}. \end{aligned} \right. \tag{17}$$

Система рівнянь (17) містить  $(s + r + 1)$  лінійних рівнянь відносно вектора параметрів авторегресійної моделі  $c_{AR} = (a_1, \dots, a_s, b_0, \dots, b_r)^T$  і може бути вирішена відомими з математики методами. Рішення системи рівнянь (17) є результатом ідентифікації параметрів авторегресійної моделі і дискретної передаточної функції пристрою формування двовимірної інформації.

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 розв'язати систему рівнянь, що випливають із (17):



$$\begin{cases} a_1 \sum_{n_2=0}^{N_2-1} (\overline{f_H^*(n_2-1)})^2 - b_0 \sum_{n_2=0}^{N_2-1} [\overline{f_H^*(n_2-1)} \cdot f_{ex}(n_2)] = - \sum_{n_2=0}^{N_2-1} \overline{f_H^*(n_2)} \cdot \overline{f_H^*(n_2-1)}, \\ - a_1 \sum_{n_2=0}^{N_2-1} [f_{ex}(n_2) \cdot \overline{f_H^*(n_2-1)}] + b_0 \sum_{n_2=0}^{N_2-1} (f_{ex}(n_2))^2 = \sum_{n_2=0}^{N_2-1} \overline{f_H^*(n_2)} \cdot f_{ex}(n_2), \end{cases}$$

або в матричній формі

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

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

Звідси

$$a_1 = \frac{A_{H11} \cdot B_{H1} + A_{H21} \cdot B_{H2}}{\det A_H}, \quad b_0 = \frac{A_{H12} \cdot B_{H1} + A_{H22} \cdot B_{H2}}{\det A_H},$$

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

**Висновки.** В статті розглянуто математичні моделі і похибки вимірювального каналу з двовимірною інформацією про механічні величини. Вимірювальний канал складається з пристрою формування двовимірної інформації (незмінна частина), що вносить викривлення у двовимірну інформацію, та цифрової ЕОМ (блоку алгоритмічної обробки, що розробляється у вимірювальній системі), що компенсує викривлення двовимірної інформації.

Додаткові похибки двовимірної інформації у вимірювальному каналі обумовлені тим, що:

– передаточна функція лінійної частини вимірювального каналу відрізняється від бажаної передаточної функції через застосування оптимального фільтра шумів та введення додаткових співмножників у передаточну функцію для забезпечення її фізичної реалізації;

– у процесі роботи приладової системи для вимірювання механічних величин її параметри та параметри двовимірної інформації можуть відхилятися від номінальних значень, що були використані при розробці методів алгоритмічної обробки.

Для підвищення точності вимірювання механічних величин необхідно компенсувати вказані додаткові похибки. 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.

#### ЛІТЕРАТУРА:

1. *Вострокнутов Н.Г.* Информационно-измерительная техника : учебное пособие / *Н.Г. Вострокнутов, Н.Н. Евтихийев.* – М. : Высшая школа, 1977. – 232 с.
2. *Электрические измерения электрических и неэлектрических величин* : учебник / *М.А. Гаврилюк, Е.С. Полищук, С.С. Обозовский* ; под ред. Е.С. Полищука. – К. : Вища школа, 1984. – 359 с.
3. *Засоби і методи вимірювань неелектричних величин* : підручник / *Є.С. Поліщук, М.М. Дорожовець, Б.И. Стадник та ін.* ; за ред. Є.С. Поліщука. – Львів : Бескид Біт, 2008. – 618 с.
4. *Претт У.* Цифровая обработка изображений : пер. с англ. / *У.Претт.* – М. : Мир, 1982. – 792 с.
5. *Измерительные сканирующие приборы* / под ред. Б.С. Розова. – М. : Машиностроение, 1980. – 198 с.
6. *Шарыгин М.Е.* Сканеры и цифровые камеры / *М.Е. Шарыгин.* – СПб. : ВНУ – Санкт-Петербург, 2000. – 384 с.
7. *Виленкин С.Я.* Статистическая обработка результатов исследования случайных функций / *С.Я. Виленкин.* – М. : Энергия, 1979. – 320 с.
8. *Даджион Д., Мерсеро Р.* Цифровая обработка многомерных сигналов / *Д.Даджион, Р.Мерсеро* ; под ред. Л.П. Ярославского. – М. : Мир, 1988. – 488 с.
9. *Мирошников М.М.* Теоретические основы оптико-электронных приборов / *М.М. Мирошников.* – 2-е изд. – Л. : Машиностроение, 1983. – 696 с.
10. Пат. 78419 С2 Україна, МПК (2006) G 01 В 7/00. Спосіб оцінки викривлень вимірювальної інформації на відеозображеннях, відновлених після стиснення / *Подчашинський Ю.О.* ; заявник і

- власник патенту Житомирський державний технологічний університет. – № а2005 06848 ; заявл. 11.07.05 ; опубл. 15.03.07, Бюл. № 3. – 5 с.
11. Радиоавтоматика : учебное пособие / В.А. Бесекерский, А.А. Елисеев, А.В. Небылов и др. ; под ред. В. А. Бесекерского. – М. : Высшая школа, 1985. – 271 с.
  12. Цыпкин Я.З. Основы теории автоматических систем : учебное пособие / Я.З. Цыпкин. – М. : Наука, 1977. – 559 с.
  13. Александров А.Г. Оптимальные и адаптивные системы : учебное пособие / А.Г. Александров. – М. : Высшая школа, 1989. – 263 с.
  14. Подчашинський Ю.О. Динамічні характеристики вимірювального каналу засобів відеовимірювань механічних величин / Ю.О. Подчашинський // Вісник ЖДТУ. Технічні науки. – 2006. – № 3(38). – С. 110–115.

ПОДЧАШИНСЬКИЙ Юрій Олександрович — кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматики та управління в технічних системах Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

- методи вимірювання механічних величин;
- цифрова обробка відеозображень.

Подано 27.12.2009

Подчашинський Ю.О. Підвищення точності вимірювального каналу приладової системи з двовимірною інформацією про механічні величини

Подчашинский Ю.А. Повышение точности измерительного канала приборной системы с двумерной информацией о механических величинах

Podchashinsky Yu.A. Increase of accuracy of a measuring channel of an instrumental system with the two-dimensional information on mechanical values

УДК 621.317

**Підвищення точності вимірювального каналу приладової системи з двовимірною інформацією про механічні величини / Ю.О. Подчашинський // Вісник ЖДТУ. – 2010. – № 1(52) / Технічні науки. – С. ??-??. – Бібліогр.: 14 назв.**

В статті розглянуто математичні моделі та похибки вимірювального каналу приладової системи з двовимірною інформацією про механічні величини. При проведенні вимірювань механічних величин в нестационарних і несприятливих умовах пропонується виконувати алгоритмічну обробку двовимірної інформації за допомогою штучної нейронної мережі. Підвищення точності вимірювального каналу забезпечується за рахунок процедур адаптації і навчання лінійної нейронної мережі.

УДК 621.317

**Повышение точности измерительного канала приборной системы с двумерной информацией о механических величинах / Ю.А. Подчашинский // Вісник ЖДТУ. – 2010. – № 1(52) / Технічні науки. – С. ??-??. – Бібліогр.: 14 назв.**

В статье рассмотрены математические модели и погрешности измерительного канала приборной системы с двумерной информацией о механических величинах. При проведении измерений механических величин в нестационарных и неблагоприятных условиях предлагается выполнять алгоритмическую обработку двумерной информации с помощью искусственной нейронной сети. Повышение точности измерительного канала обеспечивается за счет процедур адаптации и обучения линейной нейронной сети.

УДК 621.317

**Increase of accuracy of a measuring channel of an instrumental system with the two-dimensional information on mechanical values / Yu.A. Podchashinsky // Вісник ЖДТУ. – 2010. – № 1(52) / Технічні науки. – P. ??-??. – Refs.: 14 titles.**

The mathematical models and errors of a measuring channel of an instrumental system with the two-dimensional information on mechanical values are considered. At realization of measurements of mechanical sizes in non-stationary and unfavorable conditions it is offered to execute algorithmic processing of the two-dimensional information with the help of artificial neural network. The increase of accuracy of a measuring channel is provided at the expense of procedures of adaptation and training linear neural network.