

# РОЗРОБКА АЛГОРИТМІЧНОГО МЕТОДУ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ВЕКТОРА СТАНУ ЧУТЛИВОГО ЕЛЕМЕНТУ

О.М. Безвесільна, Т.О. Толочко

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». 03056, м. Київ, Берестейський проспект, 37. E-mail: prilad168@gmail.com, asnk@kpi.ua

На сьогоднішній день надзвичайно перспективним і актуальним є застосування алгоритмічних методів підвищення точності гравіметричних і навігаційних систем. Це вимагає створення високоточних та ефективних алгоритмічних методів обробки вихідного сигналу вимірювачів лінійних прискорень. Запропоновано використання штучної нейронної мережі для підвищення точності вимірювань у нестационарних і несприятливих умовах, що супроводжується виникненням ряду завад, які додаються до вихідного сигналу чутливого елемента цих вимірювачів. Ці особливості враховано при розробці алгоритмів ідентифікації стану вимірювачів лінійних прискорень із підвищеними метрологічними характеристиками. Розробка алгоритмічного методу ідентифікації вектора стану чутливого елемента вимірювача лінійних прискорень забезпечує підвищення точності таких вимірювачів у несприятливих і нестационарних умовах проведення вимірювань. Отримано розв'язок задачі ідентифікації на основі фільтра Калмана у реальному часі. Це дозволяє оцінити вектор стану чутливого елемента при наявності завад детермінованого та випадкового характеру. Запропоновано реалізацію алгоритму ідентифікації на основі штучної нейронної мережі. Адаптацію та оптимальне настроювання параметрів алгоритму виконано у процесі адаптації та навчання даної мережі. Для оцінки вектора стану чутливого елемента розроблено схему, що складається з ліній затримки та трьох адаптивних лінійних нейронів. Результатом є зменшення додаткової похибки вимірювань, обумовленої складними та нестационарними умовами вимірювань. Бібліогр. 12, рис. 1.

*Ключові слова:* алгоритмічні методи, ідентифікація, вектор стану, штучна нейронна мережа, фільтр Калмана

**Вступ.** Розвиток сучасних високоточних гравіметричних і навігаційних систем вимагає удосконалення всіх складових елементів цих систем та широкого застосування алгоритмічних методів обробки сигналів і компенсації похибок. Можливості вдосконалення конструкції та підвищення точності виготовлення складових елементів на теперішній час практично вичерпані. Тому дуже перспективним і актуальним шляхом вирішення цієї проблеми є застосування алгоритмічних методів підвищення точності гравіметричних і навігаційних систем. Все це вимагає створення високоточних і ефективних алгоритмічних методів обробки вихідного сигналу вимірювачів лінійних прискорень як важливої складової частини гравіметричних і навігаційних систем [1, 2].

Існує багато наукових праць, присвячених теоретичним основам і дослідженню оптимальних і субоптимальних алгоритмів фільтрації дискретних сигналів засобів вимірювань, що містять завади [3–7, 9, 10]. Оскільки завдання оптимальної фільтрації є завданням ідентифікації (оцінки) стану, що сформульоване у стохастичних термінах, у подальшому будемо використовувати термін «ідентифікація стану».

Робота вимірювачів лінійних прискорень у несприятливих і нестационарних умовах супроводжується виникненням ряду завад, що додаються до

вихідного сигналу чутливого елемента (ЧЕ) цих вимірювачів. Наприклад, гармонійна завада може бути обумовлена нестационарним тепловим станом гіроскопічного ЧЕ та впливом періодичних рухів на частоті маятникових коливань ЧЕ [8]. Тому необхідно враховувати всі ці особливості при розробці алгоритмів ідентифікації стану вимірювачів лінійних прискорень із підвищеними метрологічними характеристиками.

**Мета роботи** – розробка алгоритмічного методу ідентифікації вектора стану ЧЕ вимірювачів лінійних прискорень. Цей метод забезпечує підвищення точності вимірювачів лінійних прискорень у несприятливих і нестационарних умовах проведення вимірювань.

**Викладення основного матеріалу дослідження.** Розглянемо алгоритмічні методи підвищення точності ідентифікації стану гіроскопічного ЧЕ, яким є вимірювач лінійних прискорень [2, 8]. Результатом оцінки стану є ідентифікація кутового положення та параметрів кутового руху ЧЕ  $\alpha(t) = \alpha_{\Pi} + \alpha_{3M}(t)$ . При цьому амплітуда корисної складової  $\alpha_{\Pi}$ , яку вважаємо постійною на інтервалі спостереження, пропорційна лінійному прискоренню, що вимірюється. Параметри змінної складової  $\alpha_{3M}(t)$  руху ЧЕ необхідні в подальших процедурах алгоритмічної обробки для компенса-

ції похибок оцінки стану та підвищення точності вимірювань лінійних прискорень.

Змінна складова  $\alpha_{3M}(t)$  визначається розв'язком нелінійного диференційного рівняння [2, 8]:

$$\ddot{\alpha}_{3M} + 2\xi_{3M}\dot{\alpha}_{3M} + \omega_0^2 \sin \alpha_{3M} = 0, \quad (1)$$

де  $\omega_0, \xi_{3M}$  – колова частота та коефіцієнт згасання прецесійних коливань ЧЕ.

У разі малих коливань ЧЕ  $\sin(\alpha_{3M}) \approx \alpha_{3M}$ , а розв'язок рівняння (1) має вигляд [8]:

$$\alpha_{3M}(t) = A_{3M} e^{-\xi_{3M}t} \sin(\omega_{3M}t + f_{3M}),$$

де  $\omega_{3M} = \sqrt{\omega_0^2 - \xi_{3M}^2}$ ,  $A_{3M}, f_{3M}$  – амплітуда та початкова фаза прецесійних коливань ЧЕ. Якщо  $\xi_{3M} \rightarrow 0$ , то математична модель ідеальної траєкторії руху ЧЕ має вигляд:

$$\alpha(t) = \alpha_{3M} + \alpha_{3M}(t); \alpha_{II} = \text{const};$$

$$\alpha_{3M}(t) = \alpha_C \sin \omega_{3M}t + \alpha_S \cos \omega_{3M}t, \quad (2)$$

де  $\alpha_C = A_{3M} \cos f_{3M}$ ,  $\alpha_S = A_{3M} \sin f_{3M}$ . У цьому випадку вектор стану ЧЕ, який потрібно ідентифікувати, дорівнює:  $Z_\alpha = (\alpha_{II}, \alpha_C, \alpha_S)^T$ .

Оцінка виконується на основі обробки даних  $\alpha_i^*$ , що надходять від датчика кутового положення (ДК) цього ЧЕ. При цьому:

$$\alpha_i^* = \alpha(t_i) + \delta_\alpha(t_i); i = \overline{1, K}; t_i = i\delta_d; T_C = K\delta_d,$$

де  $\alpha(t_i)$  – значення, що відповідають ідеальній траєкторії руху ЧЕ;  $\delta_\alpha(t_i)$  – похибки вимірної траєкторії руху ЧЕ, обумовлені дією завад на ЧЕ та похибками ДК;  $K$  – кількість відліків, що надходять від ДК та використовуються для оцінки стану ЧЕ;  $\delta_d$  – інтервалу часу між відліками;  $T_C$  – час спостереження за ЧЕ.

Дослідимо похибки оцінки стану, зумовлені неадекватністю прийнятої моделі та реального сигналу гірогравіметра (ГГ), похибки внаслідок кінематичних нелінійностей і типових перешкод у законі руху ЧЕ, а також шумів ДК.

Враховуючи різні підходи до знайдення вихідної системи рівнянь, розглянемо два основних підходи, які використовуються для формування фільтра Калмана (ФК).

Перший підхід полягає у використанні системи рівнянь ГГ у межах прецесійної теорії та врахування додаткового рівняння на підставі сталості кута неузгодженості стану стійкої  $R^N = \alpha_{II}$ , або стану нестійкої рівноваги  $R^S = \alpha_{II}$  з нулем ДК. За цих умов систему рівнянь, яка характеризує рух ЧЕ, що спостерігається за ДК, можна записати у вигляді матричного рівняння:

$$\dot{x}(t) = Ax(t), \quad (3)$$

де:

$$x = [x_1 x_2 x_3]^T = [R^{N,S} \alpha \beta]^T,$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & M_g H^{-1} \\ 0 & \pm \omega_\xi & 0 \end{bmatrix}.$$

У матриці  $A$  знак «-» перед елементом  $\omega_\xi$  відповідає руху ЧЕ поблизу стану стійкої рівноваги, а знак «+» – поблизу стану нестійкої рівноваги.

Другий підхід при формуванні матриці  $A$  полягає у використанні диференціального рівняння другого порядку (1), яке характеризує рух ЧЕ за координатою  $\alpha$ . За цих умов у системі (3) вектору стану має вигляд:

$$x = [x_1 x_2 x_3]^T = [R^{N,S} \alpha \dot{\alpha}]^T,$$

а матриця:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & \mp \omega_0^2 & 0 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Повернемося до питання спостереження системи, що розглядається. Для цього вважатимемо, що поміж вектором вимірювань  $z$  та вектором стану  $x$  є лінійний взаємозв'язок:

$$z(t) = Cx(t), \quad (5)$$

де  $C$  – матриця вимірювань.

Через те, що в системі ГГ потребує вимірювань сигнал  $R^{N,S} + \alpha_{3M}$ , то матриця  $C$  вироджується у матрицю-рядок:

$$C = [1 \ 1 \ 0]. \quad (6)$$

Складемо матрицю спостереження системи. Оскільки вимірювання  $z$  здійснюються з похибками, то співвідношення (5) можна записати у вигляді:

$$z(t) = Cx(t) + V(t). \quad (7)$$

Тоді в прийнятих позначеннях модель ГГ має вигляд:

$$\dot{x} = Ax(t); \quad (8)$$

$$z(t) = Cx(t) + V(t).$$

де  $V(t)$  – вектор, складові якого є випадковими змінними, для яких виконуються такі гіпотези:

– математичне сподівання кожної складової дорівнює нулю;

– похибки вимірювань у кожний момент часу не залежать від похибок вимірювань, які виконуються у наступний момент часу.

Враховуючи, що система ГГ (3) у випадку, що розглядається, є стаціонарною, дискретний ФК представимо системою матричних рівнянь:

$$\hat{x}_{k/k} = \hat{x}_{k/k-1} + k_k (z_k - C\hat{x}_{k/k-1}); \quad (9)$$

$$k_k = P_{k/k-1} C^T [C P_{k/k-1} + L_k]^{-1}; \quad (10)$$

$$P_{k/k-1} = \Phi m_{k-1/k-1} \Phi^T; \quad (11)$$

$$P_{k/k} = P_{k/k-1} - k_k C P_{k/k-1},$$

де  $\hat{x}_{k/k-1}$  – оцінка  $x_k$  з урахуванням всієї інформації, яка відома в момент часу  $t_{k-1}$  та у попередні моменти часу;  $x_k$  – істинне значення  $x$  в момент часу  $t_k$ ;  $\hat{x}_{k/k}$  – оцінка  $x_k$  з урахуванням всієї інформації, яка відома в момент часу  $t_k$  та у попередні моменти часу;  $P_{k/k-1}$  – матриця коваріацій випадкової змінної  $\hat{x}_{k/k-1} - x_k$ .

$$P_{k/k-1} = E \{ (\hat{x}_{k/k-1} - x_k)(\hat{x}_{k/k-1} - x_k)^T \}, \quad (12)$$

$E \{ \}$  – імовірнісна оцінка виразу в дужках;  $P_{k/k-1}$  – матриця коваріацій випадкової змінної  $\hat{x}_{k/k-1} - x_k$ ;  $L_k$  – матриця коваріацій випадкової змінної  $V_k$ .

Перехідна матриця системи (3) не залежить від кроку обчислень, тому її можна представити у вигляді матричного ряду:

$$\Phi = e^{A\Delta t} = 1 + A\Delta t + \frac{[A\Delta t]^2}{2!} + \frac{[A\Delta t]^3}{3!} + \dots \quad (13)$$

У разі надання матриці  $A$  у вигляді (4) матричний ряд перетворюється на матриці розмірності (3×3), в одній з яких елементи є розкладеннями тригонометричних функцій у ступеневий ряд при орієнтації ЧЕ у стан стійкої рівноваги, іншій – елементи є розкладеннями гіперболічних функцій у ступеневі ряди при орієнтації ЧЕ у стан нестійкої рівноваги. З урахуванням цих перетворень перехідні матриці для оцінки стану стійкої та нестійкої рівноваги набувають вигляду:

$$\Phi^N = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega_0 \Delta t & \frac{1}{\omega} \sin \omega_0 \Delta t \\ 0 & -\omega \sin \omega_0 \Delta t & \cos \omega_0 \Delta t \end{bmatrix}, \quad (14)$$

$$\Phi^S = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & \text{ch} \omega_0 \Delta t & \frac{1}{\omega} \text{sh} \omega_0 \Delta t \\ 0 & \omega \text{sh} \omega_0 \Delta t & \text{ch} \omega_0 \Delta t \end{bmatrix}. \quad (15)$$

Вектор стану системи в момент  $t_1 = 0$  задається математичним сподіванням вектора  $\hat{x}_{0/0}$  і встановлюється експериментально на підставі вивчення властивостей системи задання початкових умов конкретного ГГ і з урахуванням точності початкової орієнтації ЧЕ відносно площини північ–південь:

$$\hat{x}_{0/0} = \begin{bmatrix} \Delta \hat{x}_{10} \\ \Delta \hat{x}_{20} \\ \Delta \hat{x}_{30} \end{bmatrix}. \quad (16)$$

Для обчислення оцінки стану, яка використовується на першому кроці  $\hat{x}_{k/k-1}$  при  $k = 1$ , скористаємося співвідношенням:

$$\hat{x}_{k/k-1} = \Phi \hat{x}_{k-1/k-1}.$$

Матрицю коваріацій початкового стану ГГ задамо у вигляді дисперсій початкових відхилень вектора стану (16), причому при  $k = 1$  матриця коваріацій має діагональний вигляд:

$$P_{0/0} = \begin{bmatrix} (\Delta \hat{x}_{10})^2 & 0 & 0 \\ 0 & (\Delta \hat{x}_{20})^2 & 0 \\ 0 & 0 & (\Delta \hat{x}_{30})^2 \end{bmatrix}. \quad (17)$$

Враховуючи структуру матриці вимірювань  $C$ , матриця коваріацій шуму вимірювача має вигляд:

$$L_k = \begin{bmatrix} \sigma_{11}^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (18)$$

Отже, використовуючи апіорну інформацію про перехідну матрицю, вектор початкового стану, матриці коваріацій стану системи та шумів вимірювача на першому кроці ( $k = 1$ ), ФК дає змогу рекурентно оцінити стан ГГ, крок за кроком уточнюючи елементи вектора  $\hat{x}_{k/k}$ .

Інший варіант розв'язку задачі ідентифікації на основі методу найменших квадратів має вигляд [2, 8]:

$$\hat{\alpha}_\Pi = \sum_{i=1}^K \alpha_i^* l_{\alpha\Pi,i}; \quad \hat{\alpha}_C = \sum_{i=1}^K \alpha_i^* l_{\alpha C,i}; \quad \hat{\alpha}_S = \sum_{i=1}^K \alpha_i^* l_{\alpha S,i}.$$

У цьому випадку для визначення вектора стану чутливого елементу використовуються постійні коефіцієнти  $l_{\alpha\Pi,j}$ ,  $l_{\alpha C,j}$ ,  $l_{\alpha S,j}$ ,  $j = (n - k + 1), n$ . Ці коефіцієнти залежать від частоти коливань ЧЕ  $\omega_0$ , коефіцієнта згасання  $\xi_1$ , частоти  $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \xi_1^2}$ , що використовується в алгоритмі ідентифікації, інтервалу часу  $\delta_d$  між відліками, що надходять від ДК.

Усі перераховані величини можуть бути визначені з деякою похибкою та змінюватися на декілька відсотків під дією різних дестабілізуючих факторів у процесі експлуатації засобів вимірювань лінійних прискорень. Окрім того, кількість  $k$  відліків кута, що використовується для розрахунку вектора стану, також може бути обрана різною в залежності від потрібної швидкості та просторової роздільної здатності засобів вимірювань. Усе це вимагає адаптації та оптимального настроювання параметрів в алгоритмах оцінювання для зменшення додаткової похибки вимірювань, обумовленої складними та нестационарними умовами вимірювань.

Адаптація та оптимальне настроювання параметрів алгоритму оцінки можуть бути виконані в

процесі адаптації та навчання штучної нейронної мережі, на основі якої пропонується реалізовувати алгоритм оцінки. Вбудовані алгоритми та методи настроювання вагових коефіцієнтів мережі і є головною перевагою штучної нейронної мережі у порівнянні зі звичайними неадаптивними засобами обробки вимірюваної інформації [11, 12].

Для оцінки вектора стану чутливого елемента будемо використовувати штучну нейронну мережу, що складається з ліній затримки та трьох адаптивних лінійних нейронів (рис. 1). Навчання такої мережі та настроювання її вагових коефіцієнтів будемо виконувати на основі навчального правила Відроу-Хоффа, що є модифікацією методу найменших квадратів [11].

Ступінь наближення вихідного сигналу мережі  $\hat{Z}_N = (\hat{\alpha}_\Pi, \hat{\alpha}_C, \hat{\alpha}_S)^T$  до точного значення  $Z_N = (\alpha_\Pi, \alpha_C, \alpha_S)^T$  може бути оцінений функціоналом якості роботи мережі. Наприклад, для першого виходу мережі цей функціонал  $J_{\alpha\Pi} = E[F(\Delta_{\alpha\Pi}(\alpha_n, \hat{\alpha}_\Pi, \tilde{c}))] \rightarrow \min$ , де  $E[F(\Delta_{\alpha\Pi}(\alpha_n, \hat{\alpha}_\Pi, \tilde{c}))]$  – математичне сподівання функції втрат  $F(\Delta_{\alpha\Pi}) = (\Delta_{\alpha\Pi})^2$  від помилки  $\Delta_{\alpha\Pi} = \hat{\alpha}_\Pi - \alpha_\Pi$  мережі. Результатом навчання є оптимальний вектор коефіцієнтів  $c^* = (l_{\alpha\Pi, n}^*, l_{\alpha\Pi, n-1}^*, \dots, l_{\alpha\Pi, n-k+1}^*)^T$ , що мінімізує функціонал  $J_{\alpha\Pi}$  та враховує вплив дестабілізуючих факторів і нестационарних умов вимірювань. Значення  $\tilde{c} = c^*$  може бути знайдено з рівняння  $\nabla J_{\alpha\Pi}(\tilde{c}) = E[\nabla F(\Delta_{\alpha\Pi}(\tilde{c}))] = 0$ .

Рекуррентний алгоритм навчання штучної нейронної мережі:

$$\tilde{c}(q) = \tilde{c}(q-1) - \Gamma(q) \times \nabla F(\Delta_{\alpha\Pi}(\alpha_{n\Pi}, \hat{\alpha}_\Pi, \tilde{c}(q-1)), \tilde{c}(q-1)), \quad (19)$$

де  $q = 1, N_{\text{навч}}$  – номер кроку рекуррентного алгоритму навчання з сигналом  $\alpha_{n\Pi}$ ;  $N_{\text{навч}}$  – тривалість процедури навчання (загальна кількість кроків);  $\Gamma(q)$  – матриця підсилення, що впливає на швидкість процедури навчання,

$$\frac{\partial F}{\partial l_{\alpha\Pi, n}} = \frac{\partial (\Delta_{\alpha\Pi}^2)}{\partial l_{\alpha\Pi, n}} = -2\alpha_{n,r} \left( \alpha_{n\Pi} - \sum_{j=n-k+1}^n \alpha_{n,j} l_{\alpha\Pi j} \right) = -2\alpha_{n,r} (\alpha_{n\Pi} - \hat{\alpha}_\Pi). \quad (20)$$

Підставляючи (20) у (19), отримуємо:

$$\tilde{c}(q) = \tilde{c}(q-1) + \Gamma(q) \cdot 2\alpha_{n,r} \cdot (\alpha_{n\Pi} - \hat{\alpha}_\Pi), \quad (21)$$

На основі (21) отримуємо остаточний вираз для обчислення вагових коефіцієнтів нейронів в процесі навчання для кожного з виходів мережі:

$$\tilde{l}_{\alpha\Pi, j}(q) = \tilde{l}_{\alpha\Pi, j}(q-1) + 2\alpha_{n,r} \cdot (\alpha_{n\Pi} - \hat{\alpha}_\Pi) \cdot \gamma_n / \|\alpha_n\|;$$

$$\tilde{l}_{\alpha C, j}(q) = \tilde{l}_{\alpha C, j}(q-1) + 2\alpha_{n,r} \cdot (\alpha_{nC} - \hat{\alpha}_C) \cdot \gamma_n / \|\alpha_n\|;$$

$$\tilde{l}_{\alpha S, j}(q) = \tilde{l}_{\alpha S, j}(q-1) + 2\alpha_{n,r} \cdot (\alpha_{nS} - \hat{\alpha}_S) \cdot \gamma_n / \|\alpha_n\|,$$

де  $\|\alpha_n\| = \alpha_n^T \cdot \alpha_n$  – евклідова норма вектору відліків навчального сигналу на вході мережі.

Ознакою завершення процедури навчання штучної нейронної мережі є виконання умов:

$$\alpha_{n\Pi} - \hat{\alpha}_{n\Pi}(q) \leq \varepsilon_{\alpha\Pi}; \quad \alpha_{nC} - \hat{\alpha}_{nC}(q) \leq \varepsilon_{\alpha C};$$

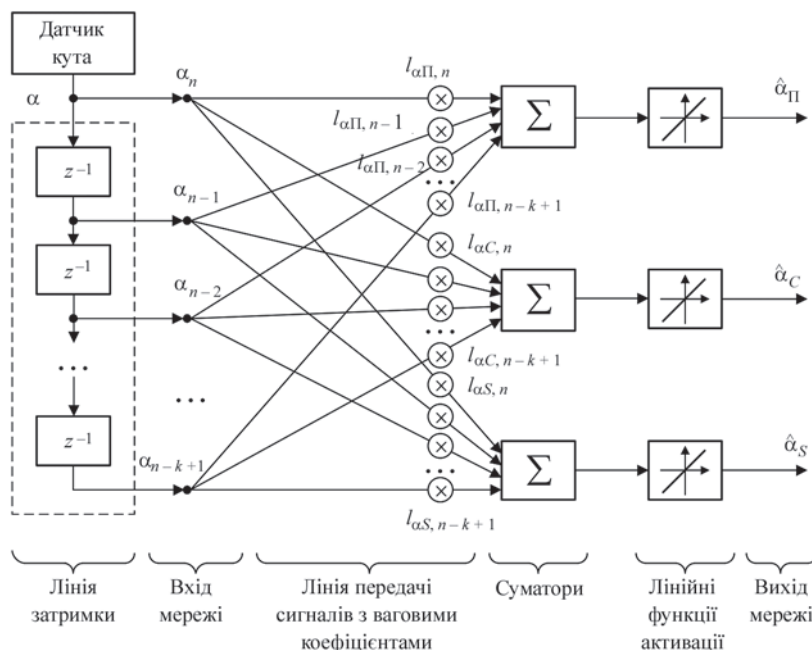


Рис. 1. Структурна схема оцінки вектора стану вимірювача лінійних прискорень на основі штучної нейронної мережі

$$\alpha_{HS} - \hat{\alpha}_{HS}(q) \leq \varepsilon_{\alpha S}, \quad (22)$$

де  $\varepsilon_{\alpha\Pi}$ ,  $\varepsilon_{\alpha C}$ ,  $\varepsilon_{\alpha S}$  – допустимі значення похибки оцінки стану вектора стану вимірювача лінійних прискорень (похибки виходу штучної нейронної мережі). Будемо вважати, що  $\varepsilon_{\alpha\Pi} = \varepsilon_{\alpha C} = \varepsilon_{\alpha S}$ . Тоді для математичної моделі (2) середньоквадратичне значення похибки сигналу  $\alpha(t)$ , обумовлене похибками (22), дорівнює:  $\sigma_{\alpha} = \varepsilon_{\alpha\Pi} / \sqrt{3} \leq \sigma_{\text{ДК}} / 3$ , де  $\sigma_{\text{ДК}}$  – середньоквадратичне значення похибки ДК. Звідси:

$$\alpha_{\Pi} - \hat{\alpha}_{\Pi}(q) \leq \sigma_{\text{ДК}} / \sqrt{3};$$

$$\alpha_{\text{HC}} - \hat{\alpha}_{\text{HC}}(q) \leq \sigma_{\text{ДК}} / \sqrt{3};$$

$$\alpha_{\text{HS}} - \hat{\alpha}_{\text{HS}}(q) \leq \sigma_{\text{ДК}} / \sqrt{3}.$$

Ці співвідношення визначають завершення процедури навчання штучної нейронної мережі та гарантують теоретично обчислену точність оцінок вектора стану вимірювачів лінійних прискорень у несприятливих і нестационарних умовах вимірювань.

## Висновки

Ефективним шляхом підвищення точності вимірювачів лінійних прискорень є ідентифікація стану ЧЕ цих вимірювачів на основі алгоритмічних методів. Отримано розв'язок задачі ідентифікації на основі фільтра Калмана у реальному часі. Це дозволяє оцінити вектор стану ЧЕ при наявності завад детермінованого та випадкового характеру.

Пропонується реалізація алгоритму ідентифікації на основі штучної нейронної мережі. Адаптація та оптимальне настроювання параметрів алгоритму можуть бути виконані в процесі адаптації та навчання цієї мережі. Для оцінки вектора стану ЧЕ розроблено схему, що складається з ліній затримки та трьох адаптивних лінійних нейронів. Результатом є зменшення додаткової похибки вимірювань, обумовленої складними та нестационарними умовами вимірювань.

Напрямок подальших досліджень може бути теоретична оцінка похибок математичної моделі по відношенню до рівняння руху ЧЕ. У подальшому також доцільно розглянути можливості використання інших типів штучних нейронних мереж для компенсації додаткової похибки вимірювань параметрів руху ЧЕ. Отримані результати можуть бути використані для побудови високоточних навігаційних та гравіметричних систем.

## Список літератури

1. Коломієць Л.В. та ін. (2009) *Метрологія у галузі зв'язку. Книга 1. Загальні електрорадіовимірювання: Посібник*. Одеса, ТОВ «ВМВ».

2. Безвесільна О.М. (2007) *Авіаційні гравіметричні системи та гравіметри: Підручник*. Житомир, ЖДТУ.

3. Shi, D., Tylavsky, D.J., Logic, N. (2012) An adaptive method for detection and correction of errors in PMU measurements. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 3(4), 1575–1583. DOI: <https://doi.org/10.1109/TSG.2012.2207468>

4. Кириченко Е. (2003) Эффективность аддитивной и мультипликативной коррекции погрешностей при диагностировании. *Правове, нормативне та метрологічне забезпечення системи захисту інформації в Україні*, наук.-техн. зб., Вип. 6, 20–24.

5. Яцук В.О., Малахівський П.С. (2008) *Методи підвищення точності вимірювань: Підручник*. Львів, Бескид Біт.

6. Болоух В.Ф., Вінніченко О.І. (2019) *Балістичний гравіметр для симетричного та несиметричного способів вимірювань прискорення вільного падіння*. Патент на винахід 118620 Україна, МПК G01V 7/14 (2006.01). № а 2017 06239; заявл. 19.06.2017; опубл. 11.02.2019, Бюл. № 3.

7. KalmanFilter.NET [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.kalmanfilter.net/default.aspx>

8. Безвесільна О.М. (2001) *Вимірювання прискорень: Підручник*. Київ, Либідь.

9. Коваль А.В. (2018) *Ідентифікація та моделювання технологічних об'єктів: Навчальний посібник*. Житомир, ЖДТУ.

10. Дубовой В.М. (2005) *Моделювання систем контролю та керування: Навчальний посібник*. Вінниця, ВНТУ.

11. Руденко О.Г., Бодяньський Є.В. (2006) *Штучні нейронні мережі: Навчальний посібник*. Харків, ТОВ «Компанія СМІТ».

12. Зайченко Ю.П. (2004) *Основи проектування інтелектуальних систем: Навчальний посібник*. Київ, Видавничий дім «Слово».

## References

1. Kolomiets, L.V. et al. (2009) *Metrology in the field of communications. Book 1. General electro-radio measurements: Manual*. Odesa, LLC «VMV» [in Ukrainian].

2. Bezvesilna, O.M. (2007) *Aviation gravimetric systems and gravimeters: Manual*. Zhytomyr, ZhDTU [in Ukrainian].

3. Shi, D., Tylavsky, D.J., Logic, N. (2012) An adaptive method for detection and correction of errors in PMU measurements. *IEEE Transact. on Smart Grid*, 3(4), 1575–1583. DOI: <https://doi.org/10.1109/TSG.2012.2207468>

4. Kirichenko, Ye. (2003) Effectiveness of additive and multiplicative correction of errors in diagnosis. *Legal, regulatory and metrological support of the information protection system in Ukraine: Sci.-Tekh. Coll.*, Issue 6, 20–24 [in Russian].

5. Yatsuk, V.O., Malachivskiy, P.S. (2008) *Methods for increasing measurement accuracy: Manual*. Lviv, Beskyd Bit [in Ukrainian].

6. Bolyukh, V.F., Vinnichenko, O.I. (2019) Ballistic gravimeter for symmetric and asymmetric methods of measuring the acceleration of free fall. Patent 118620 Ukraine, Int. Cl. G01V 7/14 (2006.01). No. a 2017 06239; fill. 19.06.2017; publ. 11.02.2019 [in Ukrainian].

7. KalmanFilter.NET. <https://www.kalmanfilter.net/default.aspx>

8. Bezvesilna, O.M. (2001) *Measurement of accelerations: Manual*. Kyiv, Lybid [in Ukrainian].

9. Koval, A.V. (2018) *Identification and modeling of technological objects: Textbook*. Zhytomyr, ZhDTU [in Ukrainian].

10. Dubovoj, V.M. (2005) Modeling of monitoring and control systems: *Textbook*. Vinnytsya, VNTU [in Ukrainian].

11. Rudenko, O.G., Bodiansky, E.V. (2006) *Artificial neural networks: Manual*. Kharkiv, LLC «SMIT Company» [in Ukrainian].

12. Zaichenko, Yu.P. (2004) *Fundamentals of designing intelligent systems: Manual*. Kyiv, Slovo [in Ukrainian].

DEVELOPMENT OF AN ALGORITHMIC METHOD FOR IDENTIFICATION OF THE STATE VECTOR OF A SENSITIVE ELEMENT

O.M. Bezvesilna, T.O. Tolochko

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute». 37 Beresteysky Ave., 03056, Kyiv, Ukraine.  
E-mail: prilad168t@gmail.com; asnk@kpi.ua

Today, the use of algorithmic methods for increasing the accuracy of gravimetric and navigation systems is extremely promising and relevant. This requires the creation of highly accurate and effective algorithmic methods for processing the output signal of linear acceleration meters. The use of an artificial neural network is proposed to increase the accuracy of measurements in non-stationary and adverse conditions, which is accompanied by the appearance of a number of interferences that are added to the output signal of the sensitive element of these meters. All these features were taken into account when developing algorithms for identifying the state of linear acceleration meters with increased metrological characteristics. The development of an algorithmic method for identifying the state vector of the sensitive element of linear acceleration meter ensures an increase in the accuracy of such meters in adverse and non-stationary measurement conditions. The solution of the identification problem based on the Kalman filter in real time is obtained. This allows to estimate the state vector of the sensitive element in the presence of deterministic and random interference. The implementation of the identification algorithm based on an artificial neural network is also proposed. The adaptation and optimal tuning of the algorithm parameters are performed in the process of adaptation and training of this network. To estimate the state vector of the sensitive element, a scheme consisting of delay lines and three adaptive linear neurons has been developed. The result is a reduction in the additional measurement error caused by complex and non-stationary measurement conditions. 12 Ref., 1 Fig.

Keywords: algorithmic methods, identification, state vector, artificial neural network, Kalman filter

Отримано 26.11.2024

Отримано у переглянутому вигляді 24.12.2024

Прийнято 10.03.2025

**ПЕРЕДПЛАТА 2025**

Журнали	Вартість передплати на друковані версії журналів*, грн.				
	місяць	два місяця	квартал	півроку	рік
«Автоматичне зварювання», видається з 1948 р., 6 випусків на рік. ISSN 3041-2374 (Print). ISSN 3041-234X (Online). Передплатний індекс 70031	–	300	–	900	1800
«Сучасна електromеталургія», видається з 1975 р., 4 випуски на рік. ISSN 3041-238 (Print). ISSN 3041-2331 (Online). Передплатний індекс 70693	–	–	300	600	1200
«Технічна діагностика та неруйнівний контроль», видається з 1989 р., 4 випуски на рік. ISSN 3041-2366 (Print). ISSN 3041-2358 (Online). Передплатний індекс 74475	–	–	300	600	1200
«The Paton Welding Journal»**, видається з 2000 р., 12 випусків на рік. ISSN 0957-798X (Print). ISSN 3041-2293 (Online). Передплатний індекс 21971.	600	1200	1800	3600	7200

\*Вартість з урахуванням доставки рекомендованою банделроллю.

\*\* Журнал «The Paton Welding Journal» містить статті, отримані від авторів з усього світу і вибірково переклади на англійську мову статей з журналів «Автоматичне зварювання», «Сучасна електromеталургія», «Технічна діагностика та неруйнівний контроль».

Передплату на журнали можна оформити по каталогах передплатних агенцій «УКРПОШТА», «Прес Центр», «Меркурій» та у видавництві. Передплата через видавництво з любого місяця на любой термін, в т.ч. на попередні періоди та окремі статті, починаючи з першого року видання.

Передплата на електронну версію журналів. Вартість передплати на електронну версію журналів дорівнює вартості передплати на друковану версію. Випуски журналу надсилаються електронною поштою у форматі pdf. На сайті видавництва у 2024 р. доступні для вільного копіювання випуски журналів з 2007 по 2023 рр.

**Адреса видавництва**

Міжнародна Асоціація «Зварювання»  
03150, Україна, Київ, вул. Казимира Малевича, 11. Тел.: (38044) 205-23-90  
E-mail: journal@paton.kiev.ua; www.patonpublishinghouse.com