

4.1. Методи ідентифікації параметрів руху обладнання і виробів з природного каменю на основі їх візуалізації

В приладовій системі за допомогою ПФВЗ створюється часова послідовність відеозображень $f_i(x, y)$, що характеризує просторове положення ОВ (обладнання і виробів з природного каменю) в моменти часу $t_i = i \cdot \delta_{\bar{a}}$ ($i \in \overline{1, K}$, K – загальна кількість відеозображень у часовій послідовності, $\delta_{\bar{a}}$ – інтервал часу, що розділяє моменти формування двох сусідніх відеозображень у часовій послідовності). З урахуванням дискретного характеру цифрових відеозображень отримуємо часову послідовність $f_i(n, m)$.

Для кожного i -го цифрового відеозображення в часовій послідовності вимірюються такі ГП: координати $x_{\hat{e}i}^*, y_{\hat{e}i}^*$ для найбільш важливих точок контуру ОВ; координати центра мас ОВ x_{ci}^*, y_{ci}^* та поточне кутове положення ОВ α_i^* . Вимірювання здійснюються згідно методів, викладених в підрозділах 1.2 і 3.5. Вказані ГП характеризують плоский рух ОВ в площині відеозображення, що складається з поступального руху центра мас та обертального руху ОВ навколо цього центра мас.

Параметри руху ОВ (переміщення $dx_i = x_i^* - x_{i-1}^*$, швидкість $v_i = dx_i / dt$ та прискорення $a_i = dv_i / dt$) визначаються по кожній координаті $x_{ci}^*, y_{ci}^*, x_{\hat{e}i}^*, y_{\hat{e}i}^*, \alpha_i^*$ із зведенням отриманих результатів до векторів переміщення, швидкості та прискорення ОВ (змінною x_i^* може бути позначена будь-яка з координат $x_{ci}^*, y_{ci}^*, x_{\hat{e}i}^*, y_{\hat{e}i}^*, \alpha_i^*$). Найпростішим методом визначення параметрів руху в даному випадку є чисельне диференціювання [250, 325].

Чисельне диференціювання по кожній з координат в процесі вимірювань (в реальному часі) виконується за формулами:

$$v_i = \frac{dx_i}{dt} = \frac{x_i^* - x_{(i-q)}^*}{q \cdot \delta_{\ddot{a}}}, \quad q = 1, 2, 3, \dots, \quad (4.1)$$

$$a_i = \frac{d^2 x_i}{dt^2} = \left[\frac{dx_i}{dt} - \frac{dx_{(i-q)}}{dt} \right] / dt = \frac{x_i^* - 2x_{(i-q)}^* + x_{(i-2q)}^*}{(q \cdot \delta_{\ddot{a}})^2},$$

а для накопичених в запам'ятовуючому пристрої даних – за формулами

$$v_i = \frac{x_{(i+q)}^* - x_{(i-q)}^*}{2 \cdot q \cdot \delta_{\ddot{a}}}, \quad a_i = \frac{x_{(i+q)}^* - 2x_i^* + x_{(i-q)}^*}{(q \cdot \delta_{\ddot{a}})^2}. \quad (4.2)$$

Якщо потрібно оцінити миттєві значення параметрів руху, то $q = 1$.

Якщо оцінюються параметри на деякому інтервалі спостереження, то $q > 1$.

Вимірювання поточних координат ОВ здійснюються з похибкою Δ_x . Точність цих вимірювань згідно розділу 3 є достатньою для визначення ГП. Однак, при визначенні швидкості та прискорення ОВ за методами чисельного диференціювання внаслідок похибки Δ_x виникає велика трансформована похибка. Детально розглянемо трансформовану похибку, використовуючи правила перетворення похибок вхідних величин при обчисленнях [325, 332]. Ця похибка є найбільш суттєвою при ідентифікації параметрів руху ОВ.

Для формул (4.1) трансформовані похибки визначення швидкості та прискорення об'єктів вимірювань по кожній з координат дорівнюють:

$$\Delta_{v\ddot{a}} = \frac{2\Delta_x}{q \cdot \delta_{\ddot{a}}}, \quad \Delta_{a\ddot{a}} = \frac{4\Delta_x}{(q \cdot \delta_{\ddot{a}})^2}, \quad (4.3)$$

а для формул (4.2):

$$\Delta_{v\ddot{a}} = \frac{\Delta_x}{q \cdot \delta_{\ddot{a}}}, \quad \Delta_{a\ddot{a}} = \frac{4\Delta_x}{(q \cdot \delta_{\ddot{a}})^2}. \quad (4.4)$$

Аналізуючи формули (4.3) – (4.4), бачимо, що найбільшою трансформована похибка буде у таких випадках: при визначенні миттєвих значень параметрів руху ($q = 1$); при дослідженні ОВ, що швидко рухаються, на основі послідовності відеозображень з високою частотою кадрів ($\delta_{\ddot{a}} \ll 1$).

Наприклад, розглянемо часову послідовність відеозображень, отриману від цифрової відеокамери. Розмір цифрових відеозображень у часовій послідовності дорівнює 2000x2000 д.т., а поле зору оптичної системи становить 2000x2000 мм (для максимального розміру виробів з природного каменю 1500x1200 мм [119, 123]). Якщо $q=1$, $\delta_{\dot{a}} = 0,04$ с (частота 25 кадрів/с), $\Delta_x = 0,5$ д.т. = 0,5 мм (межа точності, обумовлена дискретним характером цифрового відеозображення), то $\Delta_{v_{\dot{\delta}}} = 25$ д.т./с = 25,0 мм/с, $\Delta_{a_{\dot{\delta}}} = 1250$ д.т./с² = 1250,0 мм/с². Такі похибки співрозмірні з лінійними розмірами ОВ та їх точними переміщеннями і тому є неприпустимо великими. Звідси випливає необхідність розробки і застосування в приладовій системі алгоритмічних методів ідентифікації параметрів руху, що забезпечують підвищення точності вимірювань.

Методи чисельного диференціювання також мають методичну похибку. Ця похибка дорівнює залишковому доданку відповідних формул чисельного диференціювання [325, 343].

Для формул (4.1)

$$\Delta_{v_{\dot{a}\dot{\delta}}} = \frac{\delta_{\dot{a}}}{2} \ddot{x}(\xi), \quad \Delta_{a_{\dot{a}\dot{\delta}}} = \delta_{\dot{a}} \ddot{x}(\xi),$$

де ξ – деяке значення аргументу всередині інтервалу чисельного диференціювання по змінній x , а для формул (4.2)

$$\Delta_{v_{\dot{a}\dot{\delta}}} = -\frac{\delta_{\dot{a}}^2}{6} \ddot{x}(\xi), \quad \Delta_{a_{\dot{a}\dot{\delta}}} = -\frac{\delta_{\dot{a}}^2}{12} x^{(4)}(\xi).$$

Якщо використовується математична модель рівноприскореного руху ОВ з прискоренням $a_0 = const$, то $\ddot{x}(\xi) = a_0$, $x^{(4)}(\xi) = 0$. Тоді

$$\Delta_{v_{\dot{a}\dot{\delta}}} = \frac{\delta_{\dot{a}}}{2} a_0$$

для вимірювань в реальному часі, інші методичні похибки дорівнюють нулю.

Для зменшення методичної похибки необхідно зменшувати інтервал часу $\delta_{\dot{a}}$, але це неможливо через зростання трансформованої похибки згідно формул (4.3) – (4.4). Звідси також випливає необхідність розробки і застосування в приладовій системі алгоритмічних методів ідентифікації параметрів руху.

Таким чином, для підвищення точності ідентифікації параметрів руху в приладовій системі необхідно:

- підвищити точність визначення поточних координат ОВ на основі алгоритмічних методів компенсації похибок (див. розділ 3);
- розробити алгоритмічні методи ідентифікації параметрів руху, що не містять в явному вигляді операцій чисельного диференціювання.

Теоретичною базою для розробки вказаних методів ідентифікації є оцінки на основі методу максимальної правдоподібності та фільтра Калмана [344 – 351], що дозволяють отримати високоточні значення параметрів руху в складі вектора стану ОВ. Розробку методів ідентифікації параметрів руху на основі вказаних оцінок виконано в даному розділі. Реалізацію цих методів на основі штучних нейронних мереж в умовах впливу нестационарних та несприятливих факторів на приладову систему розглянуто в розділі 5. Все це дозволяє суттєво підвищити точність приладової системи шляхом ідентифікації параметрів руху ОВ.

Підвищення швидкодії процедур ідентифікації параметрів руху і швидкодії приладової системи забезпечується за рахунок:

- визначення кутового положення ОВ на основі процедур апроксимації контуру мітки на поверхні ОВ (див. підрозділ 3.5). На відміну від процедур обчислення центральних моментів (див. підрозділ 1.2), в цих процедурах використовуються координати тільки частини точок об'єкта, що значно зменшує необхідний об'єм обчислень і підвищує швидкодію;
- добору оптимальних значень параметрів відеозображень, що впливають на показники швидкості формування, введення в цифрову ЕОМ та алгоритмічної обробки вимірювальної інформації (див. розділ 5);

– реалізації розроблених в даному розділі методів ідентифікації параметрів руху на базі нейропроцесора з паралельною обробкою вимірювальної інформації (див. розділ 5).

4.2. Визначення координат і параметрів руху обладнання і виробів з природного каменю на основі накопиченої послідовності відеозображень

Розглянемо можливості підвищення точності визначення поточних координат і параметрів руху ОВ в приладовій системі. Основою цього є алгоритмічна обробка часової послідовності відеозображень та ідентифікація параметрів руху ОВ. Також будемо вважати, що часова послідовність відеозображень накопичена в запам'ятовуючому пристрої цифрової ЕОМ. Довжина цієї послідовності (час спостереження за ОВ) $T_c = K\delta_a$.

Далі будемо розглядати одну координату ОВ та параметри руху (швидкість і прискорення) по цій координаті, позначивши їх x_i^* , v_i , a_i . Але всі викладені міркування можна віднести до будь якої з координат x_{ci}^* , y_{ci}^* , $x_{\hat{e}i}^*$, $y_{\hat{e}i}^*$, α_i^* та до параметрів руху по цим координатам.

Так як координата ОВ $X^* = [x_1^* \dots x_K^*]^T$ вимірюється з похибками, то

$$x_i^* = x_i + \Delta_{xi},$$

де x_i – дійсне значення координати ОВ в момент часу $i\delta_a$,

Δ_{xi} – похибки вимірювання цієї координати.

Математичною моделлю руху ОВ відносно ПФВЗ є детермінований процес [345, 346]

$$x_i = \sum_{l=1}^{N_f} \theta_{il} \beta_l \quad (4.5)$$

або в матричній формі запису

$$X = \Theta\beta,$$

де $X = [x_1 \dots x_K]^T$ – вектор істинних значень координати ОВ в моменти часу $T = [t_1 \dots t_K]^T = [\delta_{\hat{a}} \dots K\delta_{\hat{a}}]^T$, $\Theta = [\theta_{il}]$ – матриця значень деяких відомих функцій часу в ці моменти часу, $\beta = [\beta_1 \dots \beta_{N_{\hat{I}}}]^T$ – вектор параметрів руху, що потрібно ідентифікувати, $N_{\hat{I}}$ – кількість параметрів, що описують детермінований процес руху ОВ.

По результатам вимірювань x_i^* необхідно отримати оцінки \hat{v}_i і \hat{a}_i швидкості і прискорення ОВ, а також уточнену оцінку \hat{x}_i поточної координати цього об'єкта (порівняно з x^*). Для уточненої оцінки координати $\hat{X} = [\hat{x}_1 \dots \hat{x}_K]^T$ існують рішення подібної задачі, що базуються на використанні оцінок максимальної правдоподібності. Наприклад, в [344, 345, 352] наведено оцінку

$$\hat{X} = \Theta \hat{\beta} = \Theta B^{-1} A, \quad (4.6)$$

де

$$B = \Theta^T R_{\Delta x}^{-1} \Theta, \quad A = \Theta^T R_{\Delta x}^{-1} X^*, \quad (4.7)$$

$R_{\Delta x}$ – кореляційна матриця похибок вимірювань Δ_{xi} . При цьому послідовність Δ_{xi} має нормальний розподіл з нульовим середнім значенням.

Рішення цієї задачі в такій постановці дозволяє отримати уточнені оцінки координати ОВ для детермінованої математичної моделі руху (4.5). Але нам також потрібно отримати оцінки швидкості і прискорення в моменти часу $i\delta_{\hat{a}}$ на інтервалі спостереження, що розглядається.

Для отримання оцінок швидкості і прискорення формулу (4.5) потрібно представити у вигляді

$$x_i = \beta_1 + \beta_2 t_i + \beta_3 t_i^2 / k_t + \dots, \quad (4.8)$$

де $\beta_1 = x_0$, $\beta_2 = v_0 = \left. \frac{dx(t)}{dt} \right|_{x=x_0}$, $\beta_3 = a_0 = \left. \frac{d^2x(t)}{dt^2} \right|_{x=x_0}$ – відповідно початкові

значення координати, швидкості і прискорення ОВ.

Тоді

$$\theta_{il} = \frac{(i\delta_{\bar{a}})^{l-1}}{(l-1)!}, \quad (4.9)$$

тобто елементи матриці Θ є поліноміальними функціями, що залежать від дискретних відліків часу $i\delta_{\bar{a}}$ на інтервалі спостереження $T_c = K\delta_{\bar{a}}$. В даному випадку $\theta_{i1} = 1$, $\theta_{i2} = t_i = i\delta_{\bar{a}}$, $\theta_{i3} = t_i^2 / k_t = (i\delta_{\bar{a}})^2 / k_t$,

Таким чином, ідентифікації підлягає вектор

$$\hat{\beta} = B^{-1}A \quad (4.10)$$

з використанням формул (4.6), (4.7). Цей вектор містить згладжені оцінки значень параметрів руху ОВ для початку інтервалу спостереження, що розраховані на основі вимірних значень координати $X^* = [x_1^* \dots x_K^*]^T$. Оцінки поточних значень координати, швидкості та прискорення в довільний момент часу $i\delta_{\bar{a}}$ на основі формули (4.8) будуть дорівнювати:

$$\hat{x}_i = \hat{\beta}_1 + \hat{\beta}_2 \cdot (i\delta_{\bar{a}}) + \hat{\beta}_3 \cdot (i\delta_{\bar{a}})^2 / k_t + \dots ,$$

$$\hat{v}_i = \frac{d\hat{x}_i}{dt} = \hat{\beta}_2 + \hat{\beta}_3 \cdot (i\delta_{\bar{a}}) + \dots ,$$

$$\hat{a}_i = \frac{d^2\hat{x}_i}{dt^2} = \hat{\beta}_3 + \hat{\beta}_4 \cdot (i\delta_{\bar{a}}) + \dots .$$

На відміну від формул (4.2) такий підхід дозволяє отримати поточні значення швидкості та прискорення ОВ і уникнути операцій чисельного диференціювання. Ці операції є небажаними, так як суттєво знижують точність результату при наявності похибок у вимірних відліках координати x_i^* . Підвищення степені поліному збільшує обсяг обчислень при отриманні оцінок параметрів руху, але дозволяє більш точно оцінити рух ОВ. Вибір степені поліному повинен виконуватися з урахуванням вимог і фізичної суті задачі, що вирішується. В приладовій системі використано математичну модель рівноприскореного руху ($N_{\bar{t}}=3$) для виробів з природного каменю та для

виробничого обладнання, параметри руху яких визначаються. Ця математична модель забезпечує необхідну точність ідентифікації параметрів та точність приладової системи.

Похибки вимірювань Δ_{xi} поточної координати ОВ є некорельованим випадковим процесом з нормальним розподілом та з нульовим середнім значенням (при великих K). Це пояснюється тим, що вказані похибки є результатом підсумовування великої кількості похибок вимірювань координат точок ОВ при визначенні його центра мас або кутового положення. Похибки вимірювань координат, в свою чергу, обумовлені дискретним характером цифрових відеозображень та тепловим шумом електронних схем ПФВЗ. Ці складові похибки мають нульове середнє значення. Процедура обчислень поточної координати об'єкта для конкретного відеозображення виконується незалежно від інших відеозображень в часовій послідовності. Тому похибки отриманої послідовності координат є некорельованими. Таким чином,

$$R_{\Delta x} = \sigma_{\Delta x}^2 \cdot I_K, \quad (4.11)$$

де $\sigma_{\Delta x}^2$ – дисперсія похибки визначення поточної координати ОВ, I_K – одинична матриця розміром $K \times K$.

З метою підвищення точності приладової системи поточну оцінку параметрів руху будемо обчислювати за методикою [345] для середини інтервалу оцінювання. Тривалість цього інтервалу $T_{i\ddot{o}} = (N_{i\ddot{o}} - 1)\delta_{\ddot{a}}$, де $N_{i\ddot{o}}$ – непарна кількість вимірних відліків поточної координати, що використовуються для обчислення оцінки. Відліки, що належать інтервалу оцінювання, є підмножиною всіх відліків, отриманих на інтервалі спостереження, тобто $N_{i\ddot{o}} \leq K$. В формулах (4.7) обчислимо елементи матриці Θ для моментів часу $T = [-\delta_{\ddot{a}}(N_{i\ddot{o}} - 1) \dots -1 \ 0 \ 1 \dots \delta_{\ddot{a}}(N_{i\ddot{o}} - 1)]^T$. Далі підставимо формули (4.7), (4.9), (4.11) в формулу (4.10). Також врахуємо, що оцінки обчислюються для математичної моделі рівноприскореного руху на основі великої кіль-

кості вимірних відліків поточної координати, тобто $N_{\dot{x}} = 3$, $N_{\ddot{x}} \gg 1$. В результаті отримуємо формули для визначання параметрів руху ОБ в момент часу $j\delta_{\ddot{x}}$:

$$\begin{aligned}\hat{x}_j = \hat{\beta}_{1j} &= \frac{2,25}{N_{\ddot{x}}} \cdot \sum_{s=-q}^q x_{j+s}^* - \frac{15}{N_{\ddot{x}}^3} \cdot \sum_{s=-q}^q s^2 x_{j+s}^*, \\ \hat{v}_j = \hat{\beta}_{2j} &= \frac{12}{N_{\ddot{x}}^3 \delta_{\ddot{x}}} \sum_{s=-q}^q s x_{j+s}^*, \\ \hat{a}_j = \hat{\beta}_{3j} &= -\frac{30}{N_{\ddot{x}}^3 \delta_{\ddot{x}}^2} \sum_{s=-q}^q x_{j+s}^* + \frac{360}{N_{\ddot{x}}^5 \delta_{\ddot{x}}^2} \sum_{s=-q}^q s^2 x_{j+s}^*,\end{aligned}\quad (4.12)$$

де $q = (N_{\ddot{x}} - 1)/2$, $j = (q+1), \dots, (K-q)$.

Розглянемо питання точності визначення параметрів руху ОБ на основі оцінок максимальної правдоподібності. Максимально можлива точність в цьому випадку характеризується кореляційною матрицею оцінок вектора параметрів руху. Ця матриця дорівнює [297, 344 – 346, 352]:

$$\Psi_{\hat{\beta}} = B^{-1} = \left(\Theta^T R_{\Delta x}^{-1} \Theta \right)^{-1}. \quad (4.13)$$

Діагональні елементи матриці $\Psi_{\hat{\beta}}$ визначають дисперсії похибок оцінок параметрів руху. Якщо похибки вимірювання поточної координати $R_{\Delta x}$ визначаються рівнянням (4.11), а функції часу Θ – рівнянням (4.9), то за умови $N_{\ddot{x}} \gg 1$ елементи матриці B для оцінок параметрів, приведених до середини інтервалу оцінювання, дорівнюють [345]:

$$\begin{aligned}B_{lk} &= \frac{\delta_{\ddot{x}}^{l+k-2}}{\sigma_{\Delta x}^2 (l-1)!(k-1)!} \sum_{s=-q}^q s^{l+k-2}, \\ \text{або } B_{lk} &= \begin{cases} \frac{\delta_{\ddot{x}}^{l+k-2}}{\sigma_{\Delta x}^2 (l-1)!(k-1)!} \cdot \frac{N_{\ddot{x}}^{l+k-1}}{(l+k-1) \cdot 2^{l+k-2}}, & \text{якщо } (l+k) \text{ парне,} \\ 0, & \text{якщо } (l+k) \text{ не парне,} \end{cases} \quad (4.14)\end{aligned}$$

де $l = \overline{1, N_{\dot{x}}}$, $k = \overline{1, N_{\dot{x}}}$.

З формул (4.11), (4.13), (4.14) на основі методики [345] отримуємо матрицю $\Psi_{\hat{\beta}} = B^{-1}$ для $N_{\hat{I}} = 3$, $N_{\hat{i}\ddot{o}} \gg 1$. Діагональні елементи матриці $\Psi_{\hat{\beta}}$ дорівнюють дисперсіям похибок оцінок параметрів руху:

$$\begin{aligned} D_{\hat{i}\ddot{i}\ddot{i}} [\Delta\hat{x}_j] &= \Psi_{\hat{\beta}_{11}} = \frac{3(3N_{\hat{i}\ddot{o}}^2 - 7)}{4N_{\hat{i}\ddot{o}}(N_{\hat{i}\ddot{o}}^2 - 4)} \sigma_{\Delta x}^2 \approx \frac{2,25}{N_{\hat{i}\ddot{o}}} \sigma_{\Delta x}^2, \\ D_{\hat{i}\ddot{i}\ddot{i}} [\Delta\hat{v}_j] &= \Psi_{\hat{\beta}_{22}} = \frac{12}{N_{\hat{i}\ddot{o}}(N_{\hat{i}\ddot{o}}^2 - 1)} \cdot \left(\frac{\sigma_{\Delta x}}{\delta_{\hat{a}}} \right)^2 \approx \frac{12}{N_{\hat{i}\ddot{o}}^3} \cdot \left(\frac{\sigma_{\Delta x}}{\delta_{\hat{a}}} \right)^2, \\ D_{\hat{i}\ddot{i}\ddot{i}} [\Delta\hat{a}_j] &= \Psi_{\hat{\beta}_{33}} = \frac{720}{N_{\hat{i}\ddot{o}}(N_{\hat{i}\ddot{o}}^4 - 5N_{\hat{i}\ddot{o}}^2 + 4)} \cdot \left(\frac{\sigma_{\Delta x}}{\delta_{\hat{a}}^2} \right)^2 \approx \frac{720}{N_{\hat{i}\ddot{o}}^5} \cdot \left(\frac{\sigma_{\Delta x}}{\delta_{\hat{a}}^2} \right)^2. \end{aligned} \quad (4.15)$$

Точність визначення параметрів руху є максимальною при збільшенні кількості відліків координат, що використовуються для ідентифікації цих параметрів.

Порівняємо отримані результати з точністю методу чисельного диференціювання, що реалізується за формулами (4.2). Для методу чисельного диференціювання дисперсія похибок оцінок параметрів руху на інтервалі $(N_{\hat{i}\ddot{o}} - 1)\delta_{\hat{a}} = 2q\delta_{\hat{a}}$ дорівнює:

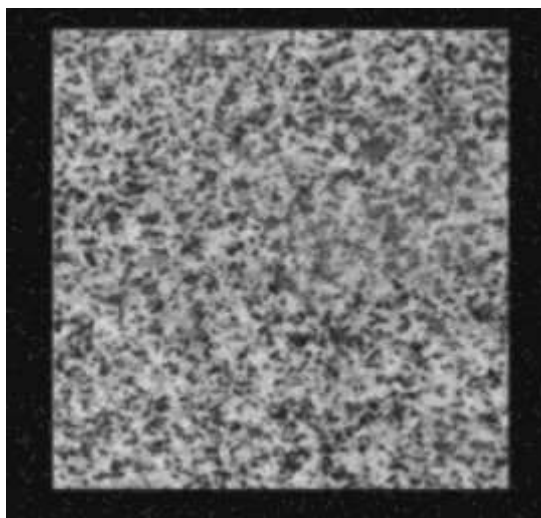
$$\begin{aligned} D_{\times\hat{A}} [\Delta\hat{x}_j] &= \sigma_{\Delta x}^2, \\ D_{\times\hat{A}} [\Delta\hat{v}_j] &= \left(\frac{dv_j}{dx_{j+q}} \right)^2 \sigma_{\Delta x}^2 + \left(\frac{dv_j}{dx_{j-q}} \right)^2 \sigma_{\Delta x}^2 = \frac{2}{(N_{\hat{i}\ddot{o}} - 1)^2} \cdot \left(\frac{\sigma_{\Delta x}}{\delta_{\hat{a}}} \right)^2, \\ D_{\times\hat{A}} [\Delta\hat{a}_j] &= \left(\frac{da_j}{dx_{j+q}} \right)^2 \sigma_{\Delta x}^2 + \left(\frac{da_j}{dx_j} \right)^2 \sigma_{\Delta x}^2 + \left(\frac{da_j}{dx_{j-q}} \right)^2 \sigma_{\Delta x}^2 = \frac{96}{(N_{\hat{i}\ddot{o}} - 1)^4} \cdot \left(\frac{\sigma_{\Delta x}}{\delta_{\hat{a}}^2} \right)^2. \end{aligned} \quad (4.16)$$

Порівнюючи формули (4.15) і (4.16), отримуємо значення коефіцієнтів, що характеризують підвищення точності оцінок параметрів руху за розробленим методом (при $N_{\hat{i}\ddot{o}} \gg 1$):

$$\begin{aligned}
k_x &= \sqrt{\frac{D_{\times\ddot{A}}[\Delta\hat{x}_j]}{D_{\text{iii}}[\Delta\hat{x}_j]}} = \sqrt{\frac{N_{\ddot{o}}}{2,25}} \approx 0,667\sqrt{N_{\ddot{o}}}, \\
k_v &= \sqrt{\frac{D_{\times\ddot{A}}[\Delta\hat{v}_j]}{D_{\text{iii}}[\Delta\hat{v}_j]}} = \sqrt{\frac{N_{\ddot{o}}^3}{6(N_{\ddot{o}}-1)^2}} \approx 0,408\sqrt{N_{\ddot{o}}}, \\
k_a &= \sqrt{\frac{D_{\times\ddot{A}}[\Delta\hat{a}_j]}{D_{\text{iii}}[\Delta\hat{a}_j]}} = \sqrt{\frac{N_{\ddot{o}}^5}{7,5(N_{\ddot{o}}-1)^4}} \approx 0,365\sqrt{N_{\ddot{o}}}.
\end{aligned} \tag{4.17}$$

Визначимо точність параметрів руху (4.12) для часової послідовності відеозображень з прикладу, наведеного у підрозділі 4.1. Початкові дані для розрахунку похибок: похибка визначення координат центра мас ОВ $\Delta_{xc} = 0,500$ д.т. = 0,500 мм; її середньоквадратичне значення $\sigma_{\Delta x} = 0,289$ д.т. = 0,289 мм; кількість відліків координати на інтервалі оцінювання $N_{\ddot{o}} = 101$ відлік. Тоді згідно формул (4.15) і (4.17) $\sigma_{\text{iii}}[\Delta\hat{x}_j] = 0,075$ д.т. = 0,075 мм, $\sigma_{\text{iii}}[\Delta\hat{v}_j] = 0,043$ д.т./с = 0,043 мм/с, $\sigma_{\text{iii}}[\Delta\hat{a}_j] = 0,082$ д.т./с² = 0,082 мм/с², $k_x = 6,70$ разів, $k_v = 4,10$ рази, $k_a = 3,67$ рази.

Таки чином, розроблений метод визначення поточних координат і параметрів руху ОВ здатний забезпечити суттєве підвищення точності вимірювань у приладовій системі (в 3,7...6,7 разів для 101 відліка координат ОВ).



a)

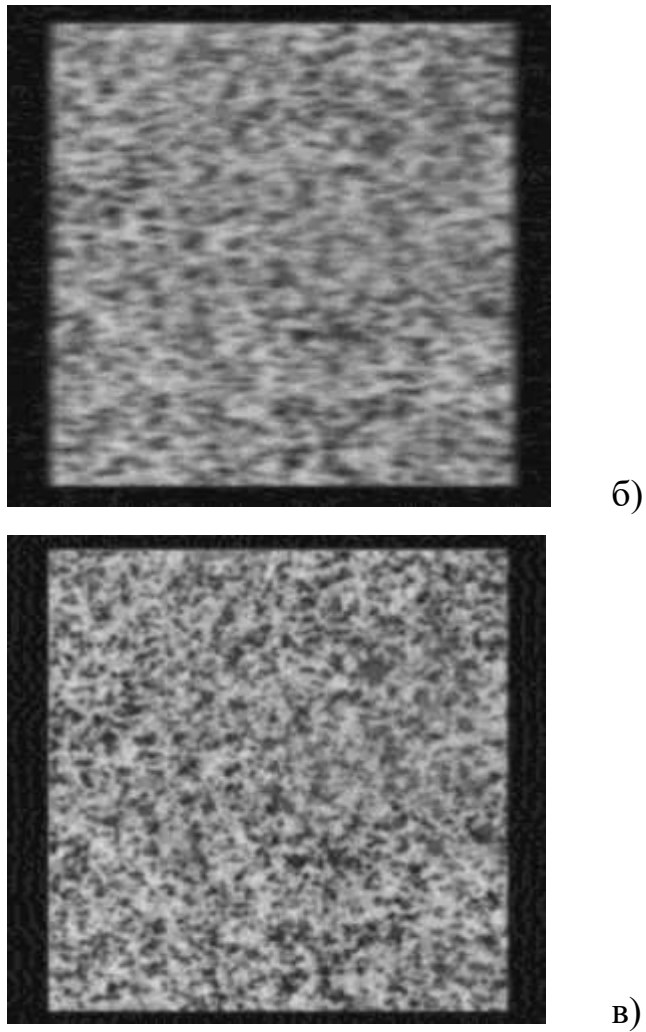
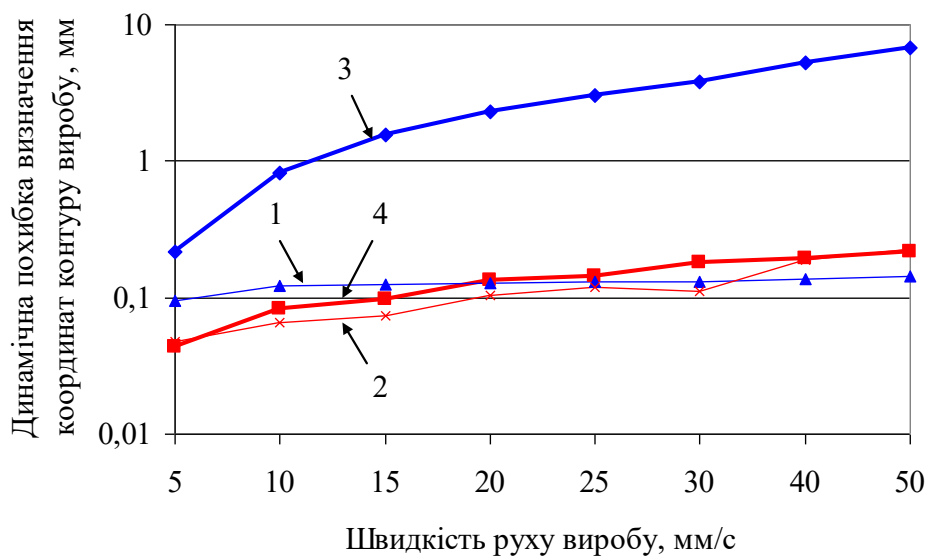
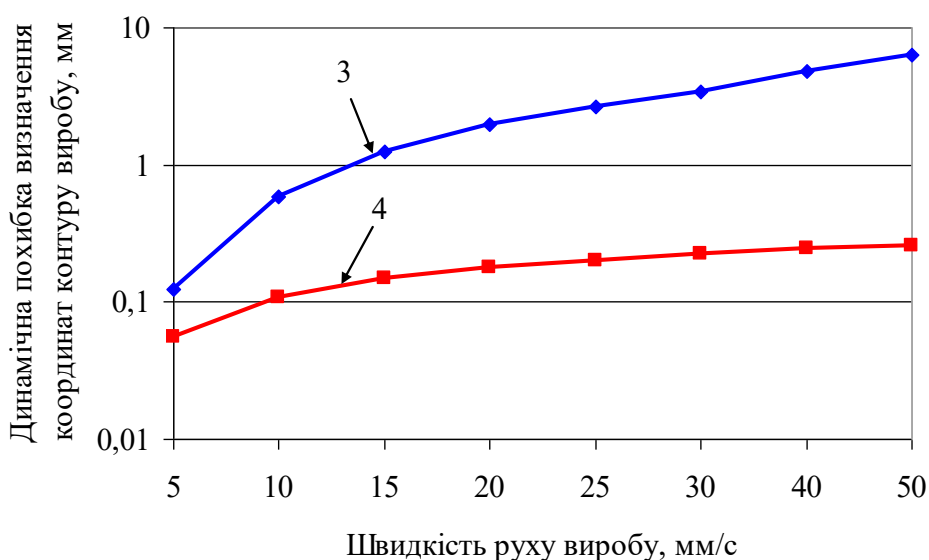


Рис. 4.1. Алгоритмічна компенсація динамічних похибок, обумовлених рухом виробу з природного каменю відносно ПФВЗ: а) – початкове відеозображення нерухомого виробу; б) – відеозображення виробу з динамічними похибками; в) – результат алгоритмічної компенсації похибок



а) чисельне моделювання для нормальних умов вимірювань



б) експериментальні дослідження в робочих умовах з впливом несприятливих факторів

Рис. 4.2. Дослідження алгоритмічної компенсації динамічної похибки ГП з використанням розроблених методів ідентифікації параметрів руху виробу:

- 1 – компенсація похибки відсутня, поріг сегментації 130 д.р.;
- 2 – компенсація похибки виконується, поріг сегментації 130 д.р.;
- 3 – компенсація похибки відсутня, поріг сегментації 160 д.р.;
- 4 – компенсація похибки виконується, поріг сегментації 160 д.р.