

**МОДЕЛЮВАННЯ ВИПАДКОВИХ ПОХИБОК НА ВІДЕОЗОБРАЖЕННЯХ
ВИРОБІВ З ПРИРОДНОГО КАМЕНЮ В АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМАХ**

Розглянуто математичні моделі та методи моделювання випадкових похибок на відеозображеннях. Дані відеозображення містять вимірну інформацію про геометричні параметри промислових виробів з природного каменю. Випадкові похибки виникають внаслідок впливу теплових шумів у перетворювачі «світло-сигнал» та інших електронних схемах пристроїв формування відеозображень, неоднорідності оптичного середовища між виробом та даним пристроєм, впливу інших несприятливих факторів у виробничих умовах. Моделювання випадкових похибок здійснено на основі методу формуючого фільтра та на основі авторегресійної моделі. Результати моделювання необхідні при розробці алгоритмічних процедур компенсації випадкових похибок та для підвищення точності визначення геометричних параметрів виробів в автоматизованих системах.

Ключові слова: відеозображення, геометричні параметри, випадкові похибки.

Вступ. Постановка проблеми в загальному вигляді та її зв'язок з важливими науковими і практичними завданнями. Цифрові відеозображення містять вимірну інформацію про геометричні параметри виробів, що виготовляються на підприємствах. Наприклад, це можуть бути відеозображення виробів з природного каменю. Для цих виробів визначаються лінійні розміри та кути по зовнішньому контуру, геометричні параметри структурних елементів на поверхні [1–3]. Результати вимірювань доцільно використовувати для контролю якості виробів з природного каменю на камінеобробних підприємствах України.

Суттєвим несприятливим фактором при проведенні вказаних вимірювань є наявність випадкових похибок вимірної інформації на відеозображеннях виробів. Ці похибки проявляються у вигляді шуму, що додається до амплітуди корисного відеосигналу та впливає на визначення координат контурних точок виробу та на подальші розрахунки геометричних параметрів. Випадкові похибки виникають внаслідок впливу теплових шумів в перетворювачі «світло-сигнал» та інших електронних схемах пристроїв формування відеозображень, неоднорідності та запиленості повітря між виробом та оптичною системою пристрою формування відеозображень. Також має місце вплив на відеозображення інших несприятливих факторів у виробничих умовах. Отримання математичних моделей, методик та результатів моделювання випадкових похибок дозволяє розробити процедури їх алгоритмічної компенсації та підвищити точність визначення геометричних параметрів виробів з природного каменю.

Тому **актуальним завданням** є розробка математичних моделей та методики моделювання випадкових похибок відеозображень виробів з природного каменю. Такий підхід повинний забезпечити більш високу точність та швидкодію вимірювань геометричних параметрів виробів та інших механічних величин, порівняно з існуючими засобами вимірювань.

Аналіз існуючих досліджень і публікацій. Алгоритмічні методи обробки відеозображень та наявні випадкові похибки цих відеозображень розглянуто в багатьох наукових публікаціях. Це, наприклад, дослідження систем технічного зору в робототехніці, автоматизованих систем управління з датчиками відеоінформації, телевізійних вимірних систем [4–6].

Випадкові похибки (шуми) на відеозображеннях [4, 7, 8] описуються гаусовськими випадковими процесами, що мають експоненційну кореляційну функцію та відповідну спектральну щільність. Процедури чисельного моделювання випадкових похибок повинні бути ґрунтовані на теоретичних положеннях статистичного моделювання випадкових процесів та результатах статистичної обробки даних в реальних умовах проведення вимірювань [9–12].

Відомі різні методи моделювання гаусовських випадкових процесів із заданою кореляційною функцією [13–15]: метод формуючого фільтра, рекурентні моделюючі алгоритми, метод ковзного підсумовування, метод канонічних розкладів. Однак більшість з цих алгоритмів або мають методичні похибки відтворення кореляційної функції, або вимагають застосування складних чисельних методів. Тому необхідно проаналізувати ці методи та визначити ті з них, що придатні для моделювання випадкових похибок з урахуванням особливостей алгоритмічної обробки відеозображень з вимірною інформацією.

Метою статті є розробка методики моделювання випадкових похибок відеозображень з вимірною інформацією про геометричні параметри виробів з природного каменю на основі математичних моделей випадкових похибок. Це особливо важливо для вимірювань механічних величин

в нестационарних та несприятливих умовах, що є характерними для каменевидобувних та каменеобробних підприємств.

Викладення основного матеріалу дослідження. Ефективним методом контролю якості промислових виробів є вимірювання їх геометричних параметрів на основі цифрових відеозображень, що містять вимірювальну інформацію про ці вироби. Наприклад, це можуть бути вироби, що виготовляються з природного каменю на каменеобробних підприємствах. Для вимірювання геометричних параметрів вказаних виробів використовуються координати контурних точок граней виробів та структурних елементів їх поверхні, що визначені на основі відеозображень.

Спочатку наведемо загальну характеристику випадкових похибок відеозображень виробів з природного каменю. Двовимірною функцією $f_0(x, y)$ характеризує поверхню виробу з природного каменю, як площину з просторовими координатами x і y . Ця двовимірною функцією реєструється пристроєм формування відеозображень як цифрове відеозображення виробу $f_0(n, m)$, де n і m є індексами відповідних елементів матриці цифрового відеозображення.

Крім корисної вимірювальної інформації, що характеризує геометричні параметри виробів, відеозображення також містять випадкові похибки. Ці похибки проявляються у вигляді випадкових шумів, що додаються до амплітуди корисного відеосигналу. Існує два основні джерела випадкових похибок:

– теплові шуми в перетворювачі «світлосигнал» та інших електронних схемах пристроїв формування відеозображень;

– неоднорідність та запиленість оптичного середовища між виробом та пристроєм формування відеозображень, що характерно для умов каменеобробних підприємств.

Необхідність детального розгляду та моделювання випадкових похибок на відеозображеннях виробів з природного каменю обумовлена тим, ці похибки суттєво впливають на точність геометричних вимірювань.

Зважаючи на велику кількість чинників, що формують шум на відеозображеннях, його розподіл можна вважати нормальним. Математичне сподівання шуму дорівнює нулю, а його середньоквадратичне значення можна визначити на основі співвідношення сигнал/шум [4], що є відомим для пристрою формування відеозображень (цифрової відеокамери або фотоапарату):

$$\sigma_{\xi} = \frac{A_{\max}}{10^{\psi_{\text{с/ш}} / 20}},$$

де A_{\max} – максимальне значення амплітуди цифрових відеозображень (при кодуванні амплітуди за допомогою 8-ми розрядів двійкового коду $A_{\max} = 255$ дискретних рівнів (д. р.)); $\psi_{\text{с/ш}}$ – співвідношення сигнал/шум.

Фізичні процеси у пристрої формування відеозображень, що створюють випадкові похибки відеозображень, є некорельованими та відповідають математичній моделі білого шуму. Проходячи через електронні схеми пристрою формування відеозображень, шум змінює свої властивості і стає корельованим випадковим процесом. Першим суттєвим фактором, що впливає на властивості шуму, є обмежена смуга частот відеосигналу на виході пристрою формування відеозображень. Другим суттєвим фактором, що впливає на властивості шуму, є нерівномірність частотної характеристики пристрою формування відеозображень в смузі частот відеосигналу. Це є властивість будь-якої реальної електронної схеми. Дію цих факторів можна врахувати, використовуючи двовимірну експоненційну кореляційну функцію шуму [7]:

$$R_{\xi}(\tau_x, \tau_y) = \sigma_{\xi}^2 \exp\left\{-\sqrt{(\alpha_{x\xi}\tau_x)^2 + (\alpha_{y\xi}\tau_y)^2}\right\},$$

де τ_x, τ_y – просторові аргументи кореляційної функції відеозображення; $\alpha_{x\xi}, \alpha_{y\xi}$ – постійні коефіцієнти кореляційної функції, що визначають кореляційні властивості шуму.

Математичну модель шуму можна спростити, вважаючи кореляційну функцію такою, що може бути розділена на дві частини відносно змінних τ_x і τ_y :

$$R_{\xi}(\tau_x, \tau_y) = \sigma_{\xi}^2 \exp(-\alpha_{x\xi}|\tau_x|) \cdot \exp(-\alpha_{y\xi}|\tau_y|). \quad (1)$$

Для математичної моделі випадкових похибок (1) було розроблено методику ідентифікації параметрів $\alpha_{x\xi}, \alpha_{y\xi}$, що полягає у наступних діях:

1. За допомогою пристрою формування відеозображень формують N_p відеозображень нерухомого виробу з природного каменю:

$$f_{i\ k}(n, m) = f_0(n, m) + \xi_k(n, m), \quad k = \overline{1, N_p},$$

де $\xi_k(n, m)$ – шум, що виник в процесі формування k -го відеозображення.

2. Обчислюють оцінку вимірювальної інформації $f^*_o(n, m)$ шляхом усереднення значень відліків яскравості і кольору, що належать N_p відеозображенням і відповідають точкам виробу з однаковими координатами. В результаті отримують відфільтроване відеозображення

$$f^*_o(n, m) = \frac{1}{N_p} \sum_{k=1}^{N_p} f_{i_k}(n, m) = \frac{1}{N_p} \sum_{k=1}^{N_p} [f_o(n, m) + \xi_k(n, m)] = f_o(n, m) + E[\xi_k(n, m)].$$

Оскільки математичне сподівання шуму $E[\xi_k(n, m)] = 0$, то $f^*_o(n, m) = f_o(n, m)$.

3. Обчислюють оцінку однієї з випадкових реалізацій шуму:

$$\xi_k(n, m) = f_{i_k}(n, m) - f^*_o(n, m).$$

4. Для оцінки $\xi_k(n, m)$ визначають параметри $\alpha_{x\xi}, \alpha_{y\xi}$ кореляційної функції (1) на основі методики [16].

Приклад відеозображення виробу з природного каменю наведено на рисунку 1, а результати ідентифікації параметрів кореляційних функцій – в таблиці 1.

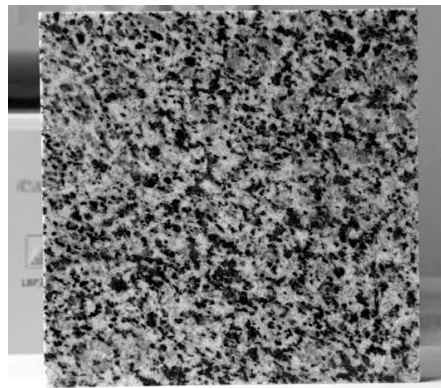


Рис. 1. Відеозображення граніту Покостівського родовища

Таблиця 1

Параметри математичних моделей вимірювальної інформації та випадкових похибок (шуму) на відеозображеннях виробів з природного каменю (цифровий фотоапарат Sony Cyber-Shot DSC-H9)

Канал кольорового відеозображення	Середнє значення амплітуди відеосигналу, д. р.	Середньо-квадратичне значення амплітуди відеосигналу, д. р.	Величина випадкових похибок, дБ	Параметр кореляційної функції α_x , (д. т.) ⁻¹ та (мм) ⁻¹	Параметр кореляційної функції α_y , (д. т.) ⁻¹ та (мм) ⁻¹	Інтервал кореляції, мм		Коефіцієнт кореляції між каналами кольорового відеозображення
						по горизонталі	по вертикалі	
1. Граніт Покостівського родовища, корисна вимірювальна інформація								
R	104,5	48,5	–	0,26/1,43	0,33/1,82	2,072	1,646	0,999
G	114,3	49,5	–	0,25/1,39	0,32/2,11	2,146	1,720	0,998
B	112,6	48,5	–	0,26/1,45	0,34/1,87	2,072	1,609	0,997
2. Граніт Покостівського родовища, випадкові похибки								
R	0,7	4,9	34,3	2,29/12,42	1,63/8,83	0,240	0,333	0,931
G	0,3	4,8	34,4	1,64/8,91	1,36/7,37	0,333	0,407	0,884
B	-0,7	5,2	33,8	0,52/2,86	0,65/3,56	1,054	0,851	0,889

Інтервал кореляції на відеозображеннях (мм) для таблиці 1 визначено за умови, що для цифрового відеозображення крок дискретності за просторовими координатами x і y становить $\delta_x = \delta_y = 0,185$ мм = 1 дискретній точці (д. т.).

Для моделювання випадкових похибок відеозображень промислових виробів розглянемо метод формуючого фільтра та рекурентний алгоритм на основі авторегресії. Для них є відносно прості чисельні методи, що не мають методичної похибки відтворення кореляційної функції [9].

Як відомо, в методі формуючого фільтра початковий випадковий процес $\eta(t)$ типу білого шуму перетворюється у випадкові похибки (шум) $\xi(t)$ на відеозображенні з потрібними статистичними характеристиками за допомогою фільтра з передаточною функцією $H(p)$ та, відповідно, частотною характеристикою $H(\omega)$:

$$|H(\omega)|^2 = \frac{S_{\text{аа}\delta\delta\xi}(\omega)}{S_0},$$

де $S_{\text{аа}\delta\delta\xi}(\omega)$ – спектральна щільність випадкових похибок $\xi(t)$; $S_0 = \text{const} = 1$ – спектральна щільність початкового білого шуму $\eta(t)$ з кореляційною функцією $K_\eta(\tau) = S_0\delta(\tau)$, $\delta(\tau)$ – дельта-функція.

Враховуючі, що $S_{\text{аа}\delta\delta\xi}(\omega) = \sigma_\xi^2 S_\xi(j\omega)S_\xi(-j\omega)$, $|H(\omega)|^2 = H(j\omega)H(-j\omega)$, $j\omega = p$, отримуємо:

$$H(p) = \frac{\sigma_\xi S_\xi(p)}{\sqrt{S_0}} = \frac{\sigma_\xi}{\sqrt{S_0}} \cdot \frac{S_{\xi_1}(p)}{S_{\xi_2}(p)}, \quad (2)$$

де $S_{\xi_1}(\omega)$, $S_{\xi_2}(\omega)$ – поліноми змінної p .

Будемо враховувати, що кореляційна функція (1) використовує модуль аргументу і тому потрібно розглядати фізичний спектр випадкового процесу. Тому випадковий процес $\xi(t)$ з кореляційною функцією (1) має таку спектральну щільність [14, 15]:

$$S_{\text{аа}\delta\delta\xi}(\omega) = \sigma_\xi^2 \frac{2\alpha_\xi^2}{\alpha_\xi^2 + \omega^2}, \quad (3)$$

або в загальному вигляді:

$$S_{\text{аа}\delta\delta\xi}(\omega) = \sigma_\xi^2 \frac{|\beta_\xi|^2}{|j\omega + \gamma_\xi|^2}. \quad (4)$$

Звідси:

$$S_{\xi_1}(p) = \beta_\xi, \quad S_{\xi_2}(p) = p + \gamma_\xi.$$

Формуючому фільтру (2), що відтворює випадкові похибки (4), відповідає диференційне рівняння в операторній формі [14]:

$$S_{\xi_2}(p)\xi(p) = \frac{\sigma_\xi}{\sqrt{S_0}} \cdot S_{\xi_1}(p)\eta(p). \quad (5)$$

Для чисельних розрахунків більш зручно є форма запису (5) у вигляді системи диференціальних рівнянь першого порядку:

$$\dot{X}_\xi = A_\xi X_\xi + B_\xi \eta(t), \quad (6)$$

яка в даному випадку перетворюється в одне диференційне рівняння першого порядку:

$$A_\xi = -\gamma_\xi, \quad B_\xi = \beta_\xi, \quad \dot{x}_\xi(t) = -\gamma_\xi x_\xi(t) + \beta_\xi \eta(t).$$

З формул (2)–(4) отримуємо значення коефіцієнтів передаточної функції формуючого фільтра для випадкових похибок (шуму) відеозображень з кореляційною функцією (1):

$$\beta_\xi = \sqrt{2\alpha_\xi}, \quad \gamma_\xi = \alpha_\xi. \quad (7)$$

Далі необхідно отримати рівняння, за якими можна генерувати на цифровій ЕОМ відліки випадкових похибок $\xi_k = \xi(k \cdot \tau)$, де $k = 1, \dots, N_\xi$, τ – крок дискретності, N_ξ – кількість відліків цих похибок. Дані рівняння є результатом чисельного інтегрування диференціальних рівнянь (6). Методика розв'язання подібної задачі з чисельним інтегруванням на основі методу Рунге-Кутта наведена в [14].

Рішенням (6) є рекурентне матричне рівняння:

$$X_{\xi k} = A_{\xi k} X_{\xi(k-1)} + B_{\xi k} \eta_k.$$

В даному випадку

$$x_{\xi k} = a_{\xi k} x_{\xi(k-1)} + b_{\xi k} \eta_k, \quad (8)$$

$$A_{\xi k} = a_{\xi k} = \exp(-\alpha_{x_\xi} \delta_x), \quad B_{\xi k} = b_{\xi k} = \sigma_\xi \sqrt{1 - \exp(-2\alpha_{x_\xi} \delta_x)}.$$

Моделювання випадкових похибок на відеозображеннях виробів з природного каменю виконуємо в такій послідовності: формуємо початкову умову $x_{\xi 0}$ як відлік стаціонарного випадкового процесу з нормальним законом розподілу; обчислюємо коефіцієнти $a_{\xi k}$, $b_{\xi k}$ рівняння (8); формуємо відліки η_k нормального стаціонарного випадкового процесу з математичним сподіванням $E_\eta = 0$, що є моделлю білого шуму $\eta(t)$ на вході формуючого фільтра; обчислюємо послідовність $\xi_k = x_{\xi k}$ згідно з (8), яка далі додається до рядка цифрового відеозображення.

Другим можливим методом моделювання випадкових похибок на відеозображеннях виробів з природного каменю є рекурентний алгоритм на основі авторегресії. Він оснований на рівнянні

$$\xi_k = \sum_{j=0}^l b_{\xi j} \eta_{k-j} - \sum_{j=1}^m a_{\xi j} \xi_{k-j}, \quad (9)$$

де η_{k-j} – відліки білого шуму, $a_{\xi j}$, $b_{\xi j}$, l , m – коефіцієнти, що залежать від статистичних характеристик випадкового процесу та знаходяться за методом факторизації [15]. Для випадкового процесу з дробово-раціональною спектральною щільністю типу (4) в [14] знайдено рішення (9) та наведено послідовність дій для обчислення коефіцієнтів $a_{\xi j}$, $b_{\xi j}$.

Враховуючи те, що випадкові похибки на відеозображеннях виробів з природного каменю задані за допомогою кореляційної функції, будемо виконувати моделювання на основі рекурентного рівняння типу авторегресії-ковзаючого середнього:

$$\xi_k = a_{\xi} \xi_{k-1} + b_{\xi} \eta_k. \quad (10)$$

Для кореляційної функції (1), що розглядається, рівняння (10) збігається з рівнянням (8) з відповідними коефіцієнтами.

На рисунках 2 та 3 наведено приклад обчислень кореляційних функцій корисної вимірювальної інформації та випадкових похибок (шуму) для відеозображень виробів з природного каменю за даними таблиці 1 та за (1). На вказаних рисунках представлено результати для каналу зеленого кольору, що передає основну інформацію про яскравість ахроматичної поверхні граніту Покостівського родовища. Значення кореляційної функції обчислено в дискретних рівнях (д.р.) амплітуди цифрового відеозображення, що кодується за допомогою 8-ми бітів в діапазоні (0...255) д.р.

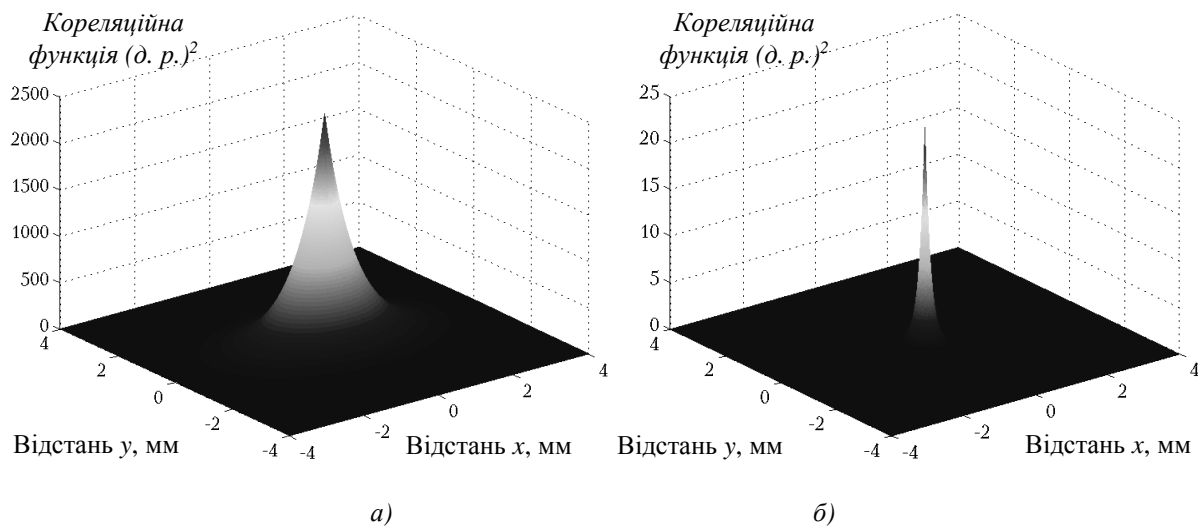
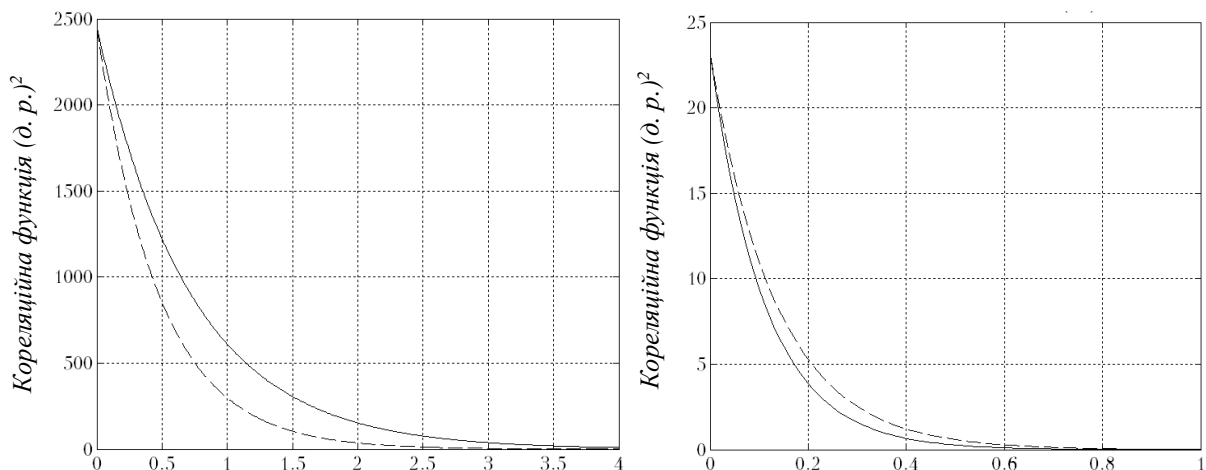


Рис. 2. Двовимірні кореляційні функції корисної вимірювальної інформації (а) та випадкових похибок (б) для відеозображень виробів з природного каменю

Як бачимо, корисна вимірювальна інформація та випадкові похибки на відеозображеннях мають різні інтервали кореляції, що є передумовою успішної фільтрації шуму та алгоритмічної компенсації цих похибок.



Відстань на поверхні виробу, мм

Відстань на поверхні виробу, мм

а)

б)

Рис. 3. Кореляційні функції корисної вимірювальної інформації (а) та випадкових похибок (б) для відеозображень виробів з природного каменю (суцільна лінія – вздовж осі Ox , пунктирна лінія – вздовж осі Oy)

Моделювання випадкових похибок виконувалося на основі наведених методик моделювання згідно з формулами (8)–(10) (рис. 4). Максимальна відносна похибка відтворення кореляційної функції для випадкових похибок дорівнює 5 % в межах інтервалу кореляції 0,4 с.

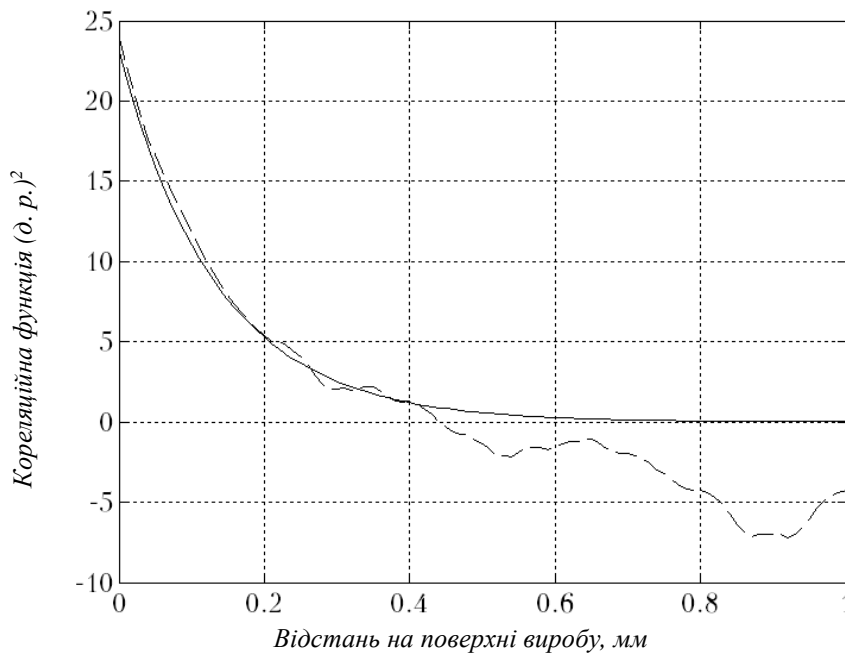


Рис. 4. Кореляційна функція вздовж осі Oy для випадкових похибок на відеозображеннях виробів з природного каменю: суцільна лінія – розрахунок за формулою (1); пунктирна лінія – розрахунок для змодельованих шумів за формулами (8) і (10)

Висновки. Результати проведених досліджень підтверджують можливість чисельного моделювання випадкових похибок на відеозображеннях виробів з природного каменю з прийнятною точністю відтворення статистичних характеристик цих похибок. Методи на основі формулюючого фільтра та рекурентного рівняння авторегресії забезпечують відтворення кореляційної функції випадкових похибок з точністю до 5 % на інтервалі кореляції до 0,4 с.

Математичні моделі (1), (4), (8) і (10) дозволяють розрахувати величину випадкових похибок відеозображень і здійснити алгоритмічну компенсацію цих похибок в автоматизованій системі. При цьому корисна вимірювальна інформація та випадкові похибки на відеозображеннях мають різні інтервали кореляції, що є передумовою успішної фільтрації шуму та алгоритмічної компенсації цих похибок. Результати теоретичного розрахунків похибок підтверджено чисельним моделюванням. Ці результати можуть бути використані при розробці комп'ютеризованих засобів вимірювання геометричних параметрів різних об'єктів вимірювань за їх відеозображеннями.

Список використаної літератури:

1. Добыча и обработка природного камня : справочник / под ред. А.Г. Смирнова. – М. : Недра, 1990. – 445 с.
2. Визначення показників кольору та геометричних характеристик текстури облицювального каменю / М.Т. Бакка, О.О. Ремезова, А.О. Криворучко, Є.С. Купкін, Ю.О. Подчашинський // Сборник научных трудов Национального горного университета. – 2004. – № 19, Т. 1. – С. 23–30.
3. Застосування інформаційно-комп'ютерних технологій обробки відеоінформації в гірничо-геологічній галузі / А.О. Криворучко, Є.С. Купкін, Ю.О. Подчашинський, О.О. Ремезова // Вісник ЖДТУ / Технічні науки. – 2005. – № 1(32). – С. 107–116.

4. *Горелик С.Л.* Телевизионные измерительные системы / *С.Л. Горелик, Б.М. Кац, В.И. Киврин.* – М. : Связь, 1980. – 168 с.
5. *Форсайт Д.* Компьютерное зрение. Современный подход / *Д.Форсайт, Ж.Понс.* – М. : Вильямс, 2004. – 928 с.
6. *Анисимов Б.В.* Распознавание и цифровая обработка изображений : учеб. пособие / *Б.В. Анисимов, В.Д. Курганов, В.К. Злобин.* – М. : Высшая школа, 1983. – 295 с.
7. *Претт У.* Цифровая обработка изображений / *У.Претт.* – М. : Мир, 1982. – 792 с.
8. *Гонсалес Р.* Цифровая обработка изображений / *Р.Гонсалес, Р.Вудс.* – М. : Техносфера, 2005. – 1072 с.
9. *Бусленко Н.П.* Моделирование сложных систем / *Н.П. Бусленко.* – М. : Наука, 1978. – 400 с.
10. *Ермаков С.М.* Метод Монте-Карло и смежные вопросы / *С.М. Ермаков.* – М. : Наука, 1975. – 472 с.
11. *Ермаков С.М.* Курс статистического моделирования / *С.М. Ермаков, Г.А. Михайлов.* – М. : Наука, 1982. – 296 с.
12. *Томашевський В.М.* Моделювання систем : підручник / *В.М. Томашевський.* – К. : ВНУ, 2005. – 352 с.
13. *Поляк Ю.Г.* Вероятностное моделирование на электронных вычислительных машинах / *Ю.Г. Поляк.* – М. : Советское радио, 1971. – 400 с.
14. *Шалыгин А.С.* Прикладные методы статистического моделирования / *А.С. Шалыгин, Ю.И. Палагин.* – Л. : Машиностроение, 1986. – 320 с.
15. *Быков В.В.* Цифровое моделирование в статистической радиотехнике / *В.В. Быков.* – М. : Советское радио, 1971. – 326 с.
16. *Подчашинський Ю.О.* Математична модель двовимірних масивів вимірювальної інформації про механічні величини / *Ю.О. Подчашинський* // Вісник ЖДТУ / Технічні науки. – 2009. – № 4(51). – С. 173–179.

ПОДЧАШИНСЬКИЙ Юрій Олександрович – доктор технічних наук, доцент, завідувач кафедри комп'ютеризованих систем управління та автоматики Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

- комп'ютеризовані системи управління;
- цифрова обробка відеозображень;
- методи вимірювання механічних величин.

Стаття надійшла до редакції 17.04.2014