

УДК 621.317

¹Ю.О. Подчашинський, д.т.н.**ВИПАДКОВІ ПОХИБКИ ВІДЕОЗОБРАЖЕНЬ З ВИМІРЮВАЛЬНОЮ ІНФОРМАЦІЄЮ ПРО ГЕОМЕТРИЧНІ ПАРАМЕТРИ ВИРОБІВ З ПРИРОДНОГО КАМЕНЮ**

¹завідувач кафедри комп'ютеризованих систем управління та автоматики, Житомирський державний технологічний університет, E-mail: ju-p@ztu.edu.ua

В статті розглянуто математичні моделі та методику ідентифікації випадкових похибок відеозображень. Ці відеозображення містять вимірювальну інформацію про геометричні параметри виробів з природного каменю. Детальні характеристики випадкових похибок необхідні для розробки алгоритмічних процедур їх компенсації та для підвищення точності визначення геометричних параметрів виробів.

1. Вступ

Постановка проблеми в загальному вигляді та її зв'язок з важливими науковими і практичними задачами.

Цифрові відеозображення, сформовані сучасними технічними засобами, містять вимірювальну інформацію про геометричні параметри об'єктів вимірювань, що виготовляються в ході виробничого процесу. В тому числі – це відеозображення виробів з природного каменю. Для цих виробів визначаються лінійні розміри та кути по зовнішньому контуру, а також геометричні параметри текстури на поверхні виробу [1, 2]. Результати вказаних вимірювань доцільно використовувати для контролю якості виробів з природного каменю та для підвищення конкурентоспроможності каменеобробних підприємств України.

Суттєвим несприятливим фактором при проведенні вказаних вимірювань є наявність випадкових похибок вимірювальної 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 обумовлено тепловим шумом електронних схем у вимірювальному каналі, неоднорідністю та запиленістю повітря між виробом та оптичною системою пристрою формування відеозображень. Отримання детальних характеристик випадкових похибок дозволяє розробити методику та процедури їх алгоритмічної компенсації та підвищити точність визначення геометричних параметрів виробів з природного каменю.

Тому **актуальною задачею** є розробка та дослідження математичних моделей та методики ідентифікації випадкових похибок відеозображень виробів з природного каменю. Такий підхід повинний забезпечити більш високу точність та швидкодію вимірювань вказаних механічних величин у порівнянні з існуючими засобами вимірювань. Це особливо важливо для вимірювань механічних величин в нестаціонарних та несприятливих умовах, що є характерними для каменевидавувних та каменеобробних підприємств.

Аналіз існуючих досліджень і публікацій.

Алгоритмічні методи обробки відеозображень та наявні похибки цих відеозображень розглянуто в багатьох книгах та наукових публікаціях. Це, наприклад, дослідження систем технічного зору в робототехніці [3], автоматизованих систем управління з датчиками відеоінформації [4], телевізійних вимірювальних систем [5].

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

Метою статті є дослідження математичних моделей випадкових похибок відеозображень з вимірювальною інформацією про геометричні параметри виробів з природного каменю та розробка методики ідентифікації параметрів цих моделей.

2. Математична модель випадкових похибок відеозображень з вимірювальною інформацією про геометричні параметри виробів з природного каменю

Будемо розглядати двовимірну функцію $f_0(x, y)$, що характеризує поверхню виробу з природного каменю, як реалізацію випадкового процесу з просторовими координатами x і y . Ця двовимірна функція реєструється пристроєм формування відеозображень як цифрове відеозображення виробу $f_0(n, m)$, де n і m є індексами відповідних елементів матриці цифрового відеозображення. Для ахроматичної поверхні виробів напівтонове цифрове відеозображення містить один канал $f_0(n, m)$, що характеризує яскравість поверхні. Для хроматичної поверхні виробів кольорове цифрове відеозображення містить три канали, що характеризують яскравість і колір поверхні відповідно до однієї з колориметричних систем [6, 7] та є подібними до $f_0(n, m)$.

Крім корисної вимірювальної інформації, що характеризує геометричні параметри виробів, відеозображення також містять випадкові похибки (шум амплітуди відеосигналу).

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 [5], що є відомим для пристрою формування відеозображень (цифрової відеокамери або фотоапарату):

$$\sigma_{\Delta f} = \frac{A_{\max}}{10^{\psi_{c/ш}/20}},$$

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.)), $\psi_{c/ш}$ – співвідношення сигнал/шум.

Фізичні процеси у пристрої формування відеозображень, що створюють випадкові похибки відеозображень, є некорельованими та відповідають математичній моделі білого шуму. Це тепловий шум та дробовий шум в перетворювачі «світло-сигнал» та електронних підсилювачах, еквівалентний шум процесів дискретизації відеозображень за просторовими координатами та процесів квантування за амплітудою. Шум відеозображень також обумовлений неідеальністю оптичного середовища між об'єктом вимірювань та пристроєм формування відеозображень, що характерно для вимірювання геометричних параметрів в умовах виробництва. Проходячи через електронні схеми пристрою формування відеозображень, шум змінює свої властивості і стає корельованим випадковим процесом. Таким чином, при розробці методів алгоритмічної обробки відеозображень необхідно враховувати наявність кореляційних властивостей випадкових похибок (шуму).

Першим суттєвим фактором, що впливає на властивості шуму, є обмежена смуга частот відеосигналу на виході пристрою формування відеозображень. При цьому спектральна щільність шуму

$$S(\omega_1, \omega_2) = \begin{cases} N, & |\omega_1| \leq \omega_{B1}, |\omega_2| \leq \omega_{B2}, \\ 0 & \text{в іншому випадку,} \end{cases} \quad (1)$$

де N – спектральна щільність початкового білого шуму з кореляційною функцією $N\delta(\tau_x, \tau_y)$, $\delta(\tau_x, \tau_y)$ – двовимірний дельта-функція, ω_{B1}, ω_{B2} – верхня межа смуги частот відеосигналу по двом просторовим координатам.

Дисперсія шуму на виході пристрою формування відеозображень пов'язана з спектральною щільністю білого шуму (1) формулами [8]:

$$D_{\xi} = \frac{N}{4\pi^2} \int_{-\omega_{B1}}^{\omega_{B1}} \int_{-\omega_{B2}}^{\omega_{B2}} d\omega_1 d\omega_2 = \frac{N\omega_{B1}\omega_{B2}}{\pi^2}, \quad N = \frac{D_{\xi}\pi^2}{\omega_{B1}\omega_{B2}}. \quad (2)$$

Для спектральної щільності (1) з врахуванням (2) та шляхом застосування оберненого перетворення Фур'є отримуємо кореляційну функцію шуму на виході пристрою формування відеозображень:

$$R_{\xi}(\tau_x, \tau_y) = \frac{N}{4\pi^2} \int_{-\omega_{B1}}^{\omega_{B1}} \int_{-\omega_{B2}}^{\omega_{B2}} e^{j\omega_1 \tau_x} e^{j\omega_2 \tau_y} d\tau_x d\tau_y = N \cdot \frac{\sin(\omega_{B1} \tau_x)}{\pi \tau_x} \cdot \frac{\sin(\omega_{B2} \tau_y)}{\pi \tau_y} =$$

$$= D_{\xi} \cdot \frac{\sin(\omega_{B1} \tau_x)}{\omega_{B1} \tau_x} \cdot \frac{\sin(\omega_{B2} \tau_y)}{\omega_{B2} \tau_y}.$$

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 цього фактору можна врахувати, використовуючи двовимірну експоненційну кореляційну функцію шуму [6]. Тоді

$$R_{\xi}(\tau_x, \tau_y) = D_{\xi} \exp\left\{-\sqrt{(\alpha_{x\xi} \tau_x)^2 + (\alpha_{y\xi} \tau_y)^2}\right\}, \quad (3)$$

$$S_{\xi}(\omega_1, \omega_2) = \frac{2D_{\xi}}{\alpha_{x\xi} \alpha_{y\xi}} \cdot \frac{1}{1 + \omega_1^2 / \alpha_{x\xi}^2 + \omega_2^2 / \alpha_{y\xi}^2}, \quad D_{\xi} = \frac{N \alpha_{x\xi} \alpha_{y\xi}}{4},$$

де $\alpha_{x\xi} = \omega_{\delta 1}$, $\alpha_{y\xi} = \omega_{\delta 2}$ – постійні коефіцієнти, що визначають ширину смуги частот відеосигналу.

Математичну модель шуму (3) можна спростити, вважаючи кореляційну функцію такою, що може бути розділена на дві частини відносно змінних τ_x і τ_y . При цьому нерівномірність частотної характеристики в смузі перепускання відеосигналу по кожній з просторових частот ω_1 і ω_2 апроксимуємо типовою частотною характеристикою фільтра нижніх частот (фільтра Баттерворта) [9]:

$$|W(j\omega_1)| = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega_1 / \omega_{B1})^{2n_f}}}, \quad |W(j\omega_2)| = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega_2 / \omega_{B2})^{2n_f}}},$$

де n_f – порядок фільтра, в найпростішому випадку $n_f = 1$.

Тоді

$$S_{\xi}(\omega_1, \omega_2) = N \cdot |W(j\omega_1, j\omega_2)|^2 = N \cdot |W(j\omega_1)|^2 \cdot |W(j\omega_2)|^2 =$$

$$= \frac{4D_{\xi}}{\alpha_{x\xi} \alpha_{y\xi}} \cdot \frac{1}{1 + (\omega_1 / \alpha_{x\xi})^2} \cdot \frac{1}{1 + (\omega_2 / \alpha_{y\xi})^2} = \frac{4D_{\xi} \alpha_{x\xi} \alpha_{y\xi}}{(\alpha_{x\xi}^2 + \omega_1^2)(\alpha_{y\xi}^2 + \omega_2^2)},$$

$$R_{\xi}(\tau_x, \tau_y) = D_{\xi} \exp(-\alpha_{x\xi} |\tau_x|) \cdot \exp(-\alpha_{y\xi} |\tau_y|). \quad (4)$$

Для алгоритмічної компенсації випадкових похибок відеозображень необхідно визначити параметри α_x, α_y кореляційної функції корисної вимірювальної інформації $f_D(n, m)$ та параметри $\alpha_{x\xi}, \alpha_{y\xi}$ кореляційної функції шуму $\xi(n, m)$ на виході пристрою формування відеозображень. При цьому для спостереження доступні тільки цифрові відеозображення $f_H(n, m) = f_D(n, m) + \xi(n, m)$ на виході пристрою формування відеозображень, а D_{ξ} визначається на основі паспортних даних пристрою формування відеозображень.

3. Методика ідентифікації параметрів випадкових похибок відеозображень з вимірювальною інформацією про геометричні параметри виробів з природного каменю

Розроблено методику ідентифікації параметрів випадкових похибок відеозображень виробів з природного каменю, що полягає у наступних діях:

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

$$f_{HK}(n, m) = f_2(n, m) + \xi_k(n, m), \quad k = \overline{1, N_p},$$

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

2. Обчислюють оцінку корисної вимірювальної інформації $\hat{f}_D(n, m)$ шляхом усереднення значень цифрових відліків яскравості і кольору, що належать N_p відеозображенням і відповідають точкам виробу з однаковими координатами. В результаті отримують

відфільтроване відеозображення

$$\begin{aligned}\hat{f}_D(n, m) &= \frac{1}{N_p} \sum_{k=1}^{N_p} f_{HK}(n, m) = \frac{1}{N_p} \sum_{k=1}^{N_p} [f_D(n, m) + \xi_k(n, m)] = \\ &= f_D(n, m) + E[\xi_k(n, m)],\end{aligned}\quad (5)$$

де $E[\xi_k(n, m)]$ – математичне сподівання шуму, наявного на N_p відеозображеннях в точці з координатами n і m .

Так, як $E[\xi_k(n, m)] = 0$, то на основі (5)

$$\hat{f}_D(n, m) = f_D(n, m),$$

тобто на відфільтрованому відеозображенні повністю залишається вимірювальна інформація про геометричні параметри виробу, а шум виключається.

3. Для отриманої оцінки $\hat{f}_D(n, m)$ визначають параметри α_x, α_y кореляційної функції шляхом ідентифікації за методом найменших квадратів на основі методики, викладеної в [10].

4. Обчислюють оцінку однієї з випадкових реалізацій шуму

$$\xi_k(n, m) = f_{HK}(n, m) - \hat{f}_D(n, m).$$

5. Для оцінки $\xi_k(n, m)$ визначають параметри $\alpha_{x\xi}, \alpha_{y\xi}$ кореляційної функції (3) або (4) на основі методики [10].

4. Результати експериментальних досліджень випадкових похибок відеозображень з вимірювальною інформацією про геометричні параметри виробів з природного каменю

Розглянемо ідентифікацію параметрів математичних моделей корисної вимірювальної інформації і випадкових похибок для відеозображень, що використовуються при вимірюванні геометричних параметрів виробів з природного каменю (рис. 1). Результати ідентифікації вказаних параметрів наведено в табл. 1. Приклад кореляційних функцій корисної вимірювальної інформації і випадкових похибок (шуму) наведено на рис. 2. Порівняльний аналіз отриманих результатів представлено на рис. 3.

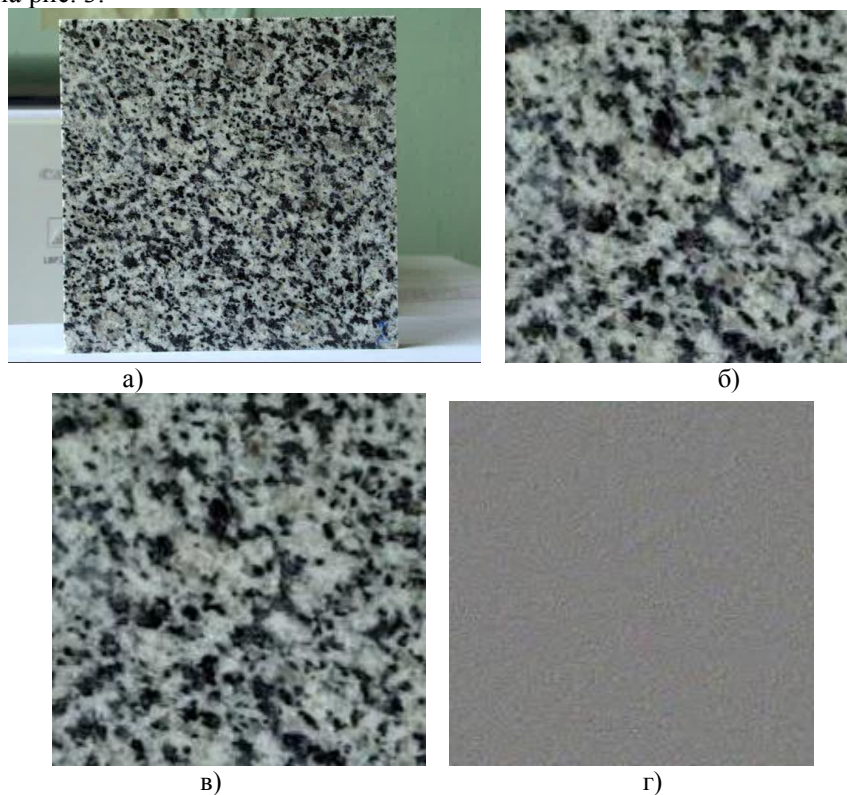


Рис. 1. Розподіл відеозображення граніту Покостівського родовища на корисну вимірювальну інформацію і випадкові похибки згідно розробленого методу: а) – відеозображення з випадковими похибками (цифровий фотоапарат Sony Cyber-Shot DSC-H9); б) – фрагмент відеозображення розміром 200x200 д.т., що обраний для дослідження; в) – корисна вимірювальна інформація; г) – випадкові похибки (додано 128 д.р.)

Таблиця 1

Параметри математичних моделей корисної вимірювальної інформації та випадкових похибок (шуму) на відеозображеннях виробів, отриманих від цифрового фотоапарату 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 $\alpha_x, (\text{д.т.})^{-1}$ та $(\text{мм})^{-1}$	Параметр кореляційної функції $\alpha_y, (\text{д.т.})^{-1}$ та $(\text{мм})^{-1}$	Інтервал кореляції, мм		Коефіцієнт кореляції між каналами кольорового відеозображення
						по горизонталі	по вертикалі	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1. Граніт Покостівського родовища, корисна вимірювальна інформація								
R	104,5	48,5	–	0,266/1,439	0,337/1,823	2,072	1,646	0,999
G	114,3	49,5	–	0,258/1,396	0,329/2,110	2,146	1,720	0,998
B	112,6	48,5	–	0,268/1,450	0,346/1,872	2,072	1,609	0,997
2. Граніт Покостівського родовища, випадкові похибки								
R	0,7	4,9	34,3	2,295/12,42	1,632/8,83	0,240	0,333	0,931
G	0,3	4,8	34,4	1,647/8,91	1,362/7,37	0,333	0,407	0,884
B	-0,7	5,2	33,8	0,528/2,86	0,658/3,56	1,054	0,851	0,889
3. Тестове відеозображення, що містить пограничну криву, корисна вимірювальна інформація								
R	195,7	4,6	–	0,019/0,103	0,025/0,135	27,805	22,477	0,996
G	219,0	4,9	–	0,020/0,108	0,024/0,130	27,417	22,829	0,960
B	248,8	4,7	–	0,018/0,097	0,025/0,135	29,637	22,366	0,973
4. Тестове відеозображення, що містить пограничну криву, випадкові похибки								
R	0,2	0,9	49,3	0,171/0,925	0,334/1,81	3,237	1,665	0,467
G	0,1	0,8	50,6	0,227/1,23	0,252/1,36	2,442	2,201	0,602
B	0,1	0,8	49,6	0,119/0,644	0,102/0,552	4,643	5,420	0,555

Примітки: 1. Інтервал кореляції в мм визначено за умови, що для цифрового відеозображення крок дискретності по просторовим координатам x і y становить $\delta_x = \delta_y = 0,185 \text{ мм} = 1$ дискретній точці (д.т.).

- 3. Значення коефіцієнтів кореляції відповідають парам каналів R_G, G_B, R_B .
- 4.

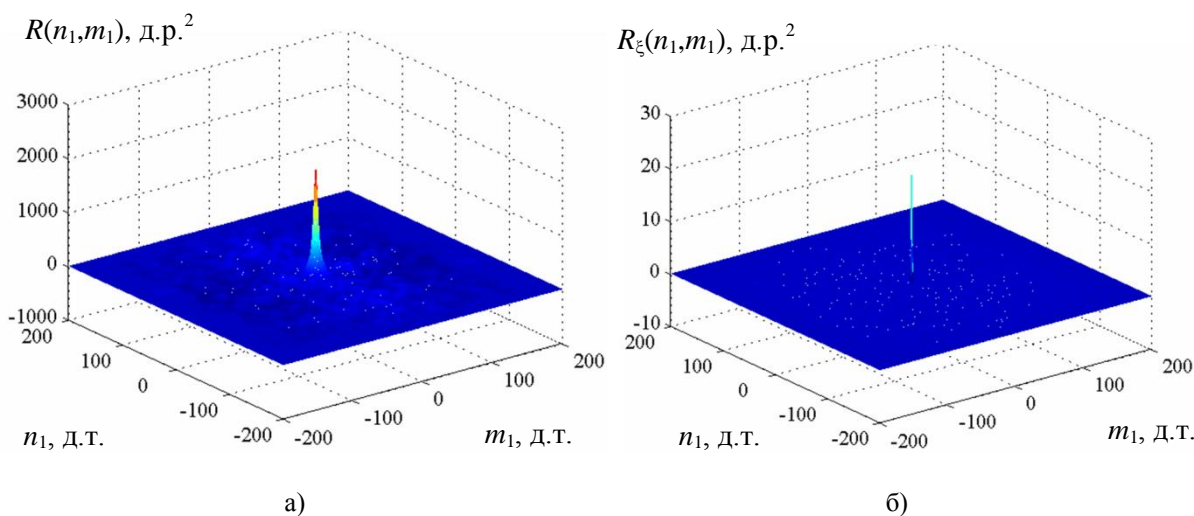


Рис. 2. Кореляційні функції корисної вимірювальної інформації (а) і шуму (б) на прикладі відеозображення поверхні граніту Покостівського родовища (цифровий фотоапарат Sony Cyber-Shot DSC-H9, 1 дискретна точка (д.т.) відеозображення = 0,185 мм)

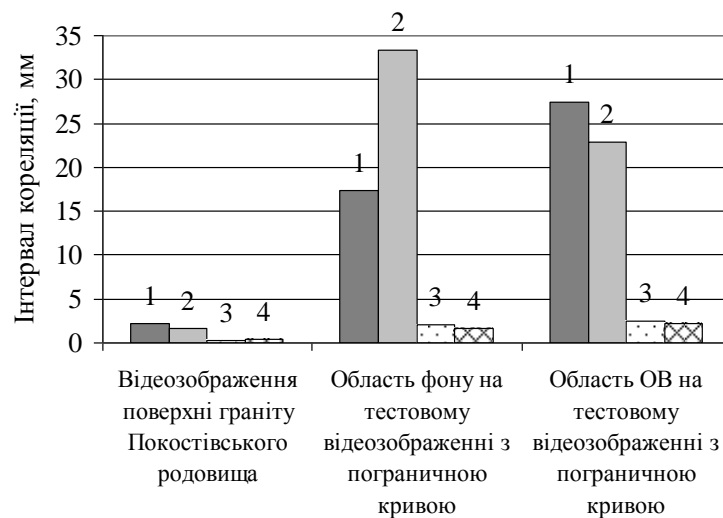


Рис. 3. Результати ідентифікації параметрів математичних моделей корисної вимірювальної інформації (1 – вісь x , 2 – вісь y) і шуму (3 – вісь x , 4 – вісь y)

5. Висновки

За результатами дослідження та ідентифікації випадкових похибок відеозображень виробів з природного каменю можна зробити такі висновки. Параметри кореляційних функцій та відповідні інтервали кореляції корисної вимірювальної інформації про геометричні параметри та випадкових похибок (шуму) суттєво відрізняються для відеозображень виробів з природного каменю. Це є передумовою успішної фільтрації випадкових похибок відеозображень.

Отримані результати необхідні при розробці методів алгоритмічної компенсації випадкових похибок відеозображень з метою підвищення точності вимірювання геометричних параметрів виробів з природного каменю. Результати вимірювання геометричних параметрів на основі відеозображень доцільно використовувати для контролю якості виробів з природного каменю та для підвищення конкурентоспроможності продукції каменеобробних підприємств України.

ЛІТЕРАТУРА:

1. 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.
2. 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.
3. Техническое зрение роботов / В. И. Мошкин, А. А. Петров, В. С. Титов, Ю. Г. Якушенков ; под общей ред. Ю. Г. Якушенкова. – М. : Машиностроение, 1990. – 272 с.
4. Бутаков Е.А. Обработка изображений на ЭВМ / Е.А. Бутаков, В.И. Островский, И.П. Фадеев – М. : Радио и связь, 1987. – 240 с.
5. Горелик С. Л. Телевизионные измерительные системы / С. Л. Горелик, Б. М. Кац, В. И. Киврин. – М. : Связь, 1980. – 168 с.
6. Претт У. Цифровая обработка изображений / У. Претт. – М. : Мир, 1982. – 792 с.
7. Гонсалес Р. Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс. – М. : Техносфера, 2005. – 1072 с.
8. 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.
9. Сергиенко А. Б. Цифровая обработка сигналов / А. Б. Сергиенко. – СПб : Питер, 2003. – 608 с.
10. 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.