

**ПІДВИЩЕННЯ РІВНЯ СТИСНЕННЯ З ВТРАТАМИ ЦИФРОВИХ ЗОБРАЖЕНЬ
ЗА ВИКОРИСТАННЯМ НИЗЬКОЧАСТОТНИХ ФІЛЬТРІВ**

П. О. Приставка, д-р техн. наук, проф.; *М. О. Рябий*

Національний авіаційний університет

smayluk@mail.ru

Проведено експериментальне дослідження використання лінійних фільтрів (низькочастотних та псевдозворотних до них контрастних) для підвищення відсотка стиснення цифрованих зображень із втратами. Статистично доведено переваги запропонованого підходу.

Ключові слова: стиснення з втратами, обробка зображень, лінійні фільтри.

An experimental study using linear filters (low-frequency and pseudo inverse contrast contrasting) to increase the percentage of image compression digital losses. Statistically proven benefits of the proposed approach.

Keywords: lossy compression, image processing, liner filters.

Вступ

Значні капіталовкладення в комп'ютерну техніку, здатну ефективно працювати з такими графічними середовищами, як Microsoft Windows або X / Motif, створили цілий клас комп'ютерів, здатних відтворювати на екрані складні графічні образи з якістю, що наближається до телевізійної або поліграфічної.

Програми, що працюють з графічними образами, належать до таких різних категорій, як комп'ютерні ігри, освіта, настільні видавничі системи, тощо.

Спільна особливість у цих програм одна: графічні файли, з якими вони працюють, займають велику кількість дискового простору.

Наприкінці 70-х — початку 80-х років ХХ ст. технології стиснення графічних образів розвивалися в напрямку застосування звичайних алгоритмів стиснення без втрат до графічних даних [1]. Поширені у світі персональних комп'ютерів формати зберігання графічних образів, такі як

РСХ, ВМР, використовуючи ті чи інші методи стиснення без втрат, дають змогу зменшувати обсяг файлу до 20 % [2]. Однак зі зростанням обсягу збереженої графічної інформації такий підхід уже не виправдовує себе.

Постановка проблеми

Проблематика полягає у необхідності стиснення цифрованих зображень (ЦЗ) відомими методами з додатковою модифікацією, що за можливості має сприяти більшому ступеню компресії, із втратами та без них.

Аналіз досліджень та постановка задачі

Стиснення ЦЗ поділяються на дві групи: стиснення із втратами та стиснення без втрат [3].

Методи стиснення без втрат дають більш низький коефіцієнт стиску, проте зберігають точне значення пікселів вихідного зображення.

Методи стиснення із втратами дають високі коефіцієнти компресії, але не дозволяють відтворити вихідне зображення з точністю до всіх значень кольорових складових піксела.

Відомо, що під час погляду на фотореалістичне ЦЗ людське око не сприймає всі відтінки кольорів, тому деякі деталі можуть бути проігноровані без суттєвого спотворення зображення.

Найвідомішими та розповсюдженими методами стиснення ЦЗ із втратами та без них є алгоритм JPEG та архіватор WinRAR відповідно [4; 5].

Вищезазначені методи стиснення дають досить високий коефіцієнт компресії даних з незначними втратами або за відсутності останніх.

У праці [7] було запропоновано провести дослідження щодо пошуку інваріантних перетворень ЦЗ, а саме на попередньому етапі стиснення додати низькочастотний фільтр (НЧ) [5], який при використанні разом із запропонованими методами стиснення дозволить підвищити відсоток стиснення.

Для відновлення зображення потрібно застосувати зворотну до НЧ фільтра функцію (рис. 1), якою є функція контрастування (КФ) [6].

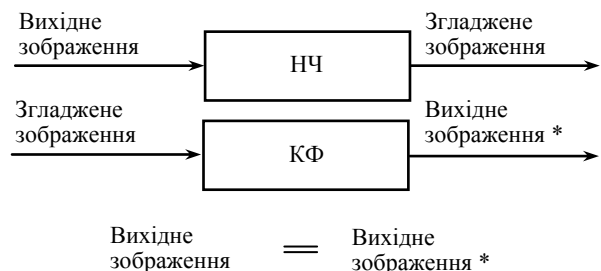


Рис. 1. Функція накладання фільтрів на зображення

Нехай задано деякий растр, кожному пікселу якого поставлено у відповідність два індекси $\{(i, j)\}_{i, j \in \mathbf{Z}}$, що визначають його місцеположення.

Не зменшуючи загальності, позначимо $\{p_{i, j}\}_{i, j \in \mathbf{Z}}$ — послідовність кольорової складової (наприклад, з простору RGB) вихідного растру. Під визначенням лінійного фільтра будемо розуміти лінійний оператор $W(p^{i, j})$, що призводить до зміни (фільтрації) як форми, так і образу кольорових складових растру

$$\tilde{p}_{i, j} = W(p^{i, j}) = \sum_{ii=i-r_i}^{i+r_i} \sum_{jj=j-r_j}^{j+r_j} \gamma_{ii-i, jj-j} p_{ii, jj},$$

$$i = -\frac{k_i}{2}, \frac{k_i}{2}, \quad j = -\frac{k_j}{2}, \frac{k_j}{2},$$

або (не зменшуючи загальності) $i, j \in \mathbf{Z}$, де (i, j) — індекс піксела растру; k_i, k_j — розміри кадру зображення; $\tilde{p}_{ii, jj}$ — кольорова складова растру після дії оператора $W(p^{i, j})$; $\gamma_{ii-i, jj-j}$ — елемент маски фільтра; $(2r_i+1)(2r_j+1)$ — розмір маски фільтра. Не зменшуючи загальності, в подальших дослідженнях використовуватимемо такі маски лінійних фільтрів:

► низькочастотних

$$H2.0 = \frac{1}{64} \begin{pmatrix} 1 & 6 & 1 \\ 6 & 36 & 6 \\ 1 & 6 & 1 \end{pmatrix},$$

$$H3.0 = \frac{1}{36} \begin{pmatrix} 1 & 4 & 1 \\ 4 & 16 & 4 \\ 1 & 4 & 1 \end{pmatrix};$$

► контрастних (псевдзворотних до відповідних низькочастотних)

$$K2.0 = \frac{1}{1156} \begin{pmatrix} 1 & -8 & 48 & -8 & 1 \\ -8 & 64 & -384 & 64 & -8 \\ 48 & -384 & 2304 & -384 & 48 \\ -8 & 64 & -384 & 64 & -8 \\ 1 & -8 & 48 & -8 & 1 \end{pmatrix},$$

$$K3.0 = \frac{1}{196} \begin{pmatrix} 1 & -6 & 24 & -6 & 1 \\ -6 & 36 & -144 & 36 & -6 \\ 24 & -144 & 576 & -144 & 24 \\ -6 & 36 & -144 & 36 & -6 \\ 1 & -6 & 24 & -6 & 1 \end{pmatrix}.$$

Виходячи з вище сказаного, метою даної роботи є проведення експериментального дослідження для обґрунтування статистично значущого підвищення рівня стиснення ЦЗ із втратами, що практично не сприймаються людським оком за умови використання інваріантних перетворень.

Виклад основного матеріалу

Для проведення досліджень було сформовано вибірку ЦЗ обсягом 100 у форматі BMP без спотворення та артефактів, що ідентифікуються візуально. Спеціальних умов до розмірів, деталізації та сюжетного наповнення ЦЗ, що підлягали обробці, не надавалось. Суть експерименту полягала в стисненні методом JPEG та архіватором WinRAR, на попередньому етапі якого були застосовані низькочастотні фільтри з масками H2.0 та H3.0 до кожного ЦЗ. При зворотному процесі на етапі відновлення зображення застосовувався зворотний до низькочастотного фільтра, а саме контрастний (з масками K2.0 та K3.0 відповідно).

Якість відтворення зображень оцінювалась за двома показниками: відношення сигналу до шуму ($PSNR$) та відносна похибка, що визначаються за формулами:

$$PSNR = 10 \lg(255^2 / \sigma_\varepsilon^2),$$

$$\Delta_\varepsilon = \frac{1}{nm} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \frac{\varepsilon_{i, j}}{p_{i, j}} 100\%,$$

де n, m — лінійні розміри цифрового зображення; $p_{i, j}$ — значення інтенсивності в (i, j) -й точці растру; $\varepsilon_{i, j}$ — абсолютне відхилення відтворення в зображення після стиснення в (i, j) -й точці растру; σ_ε^2 — дисперсія похибки відтворення. Вибір саме таких показників зумовлений тим, що зміни в зображенні не сприймаються людським оком, якщо рівень $PSNR$ більший за 35 та відносна похибка менше 5 %.

Результати експерименту наведено на графіках (рис. 1–10) та зведено в табл. 1–2.

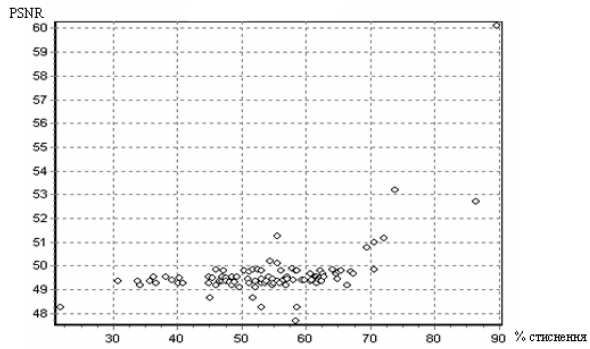


Рис. 1. Кореляційне поле даних (табл. 1, колонки 3 та 5)

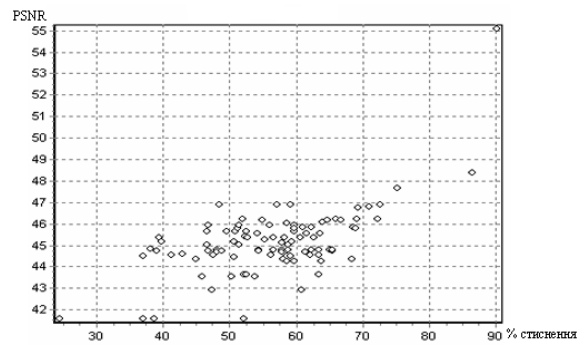


Рис. 2. Кореляційне поле даних (табл. 1, колонки 6 та 8)

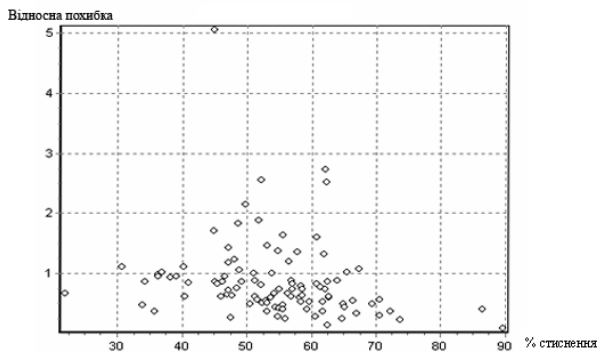


Рис. 3. Кореляційне поле даних (табл. 1, колонки 3 та 4)

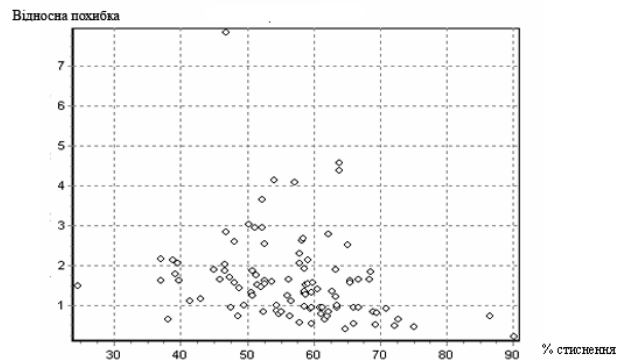


Рис. 4. Кореляційне поле даних (табл. 1, колонки 6 та 7)

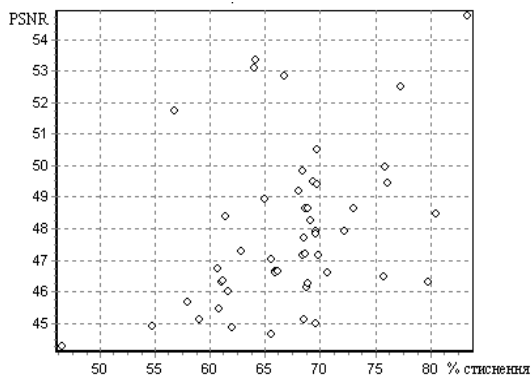


Рис. 5. Кореляційне поле даних (табл. 2, колонки 2 та 4)

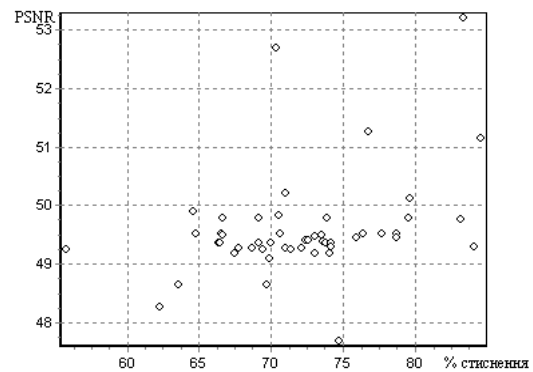


Рис. 6. Кореляційне поле даних (табл. 2, колонки 5 та 7)

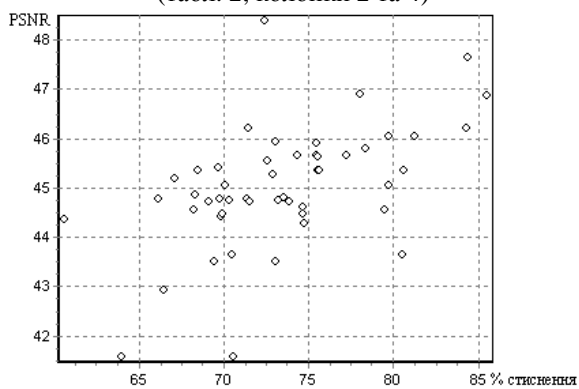


Рис. 7. Кореляційне поле даних (табл. 2, колонки 8 та 10)

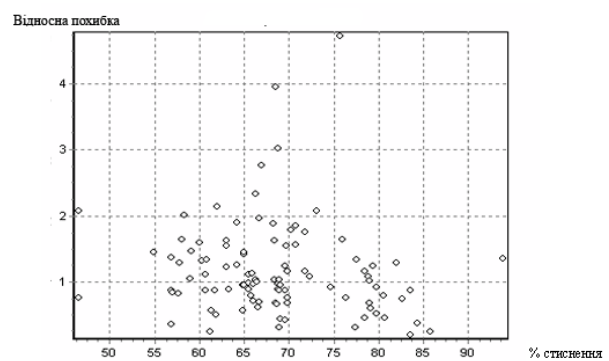


Рис. 8. Кореляційне поле даних (табл. 2, колонки 2 та 3)

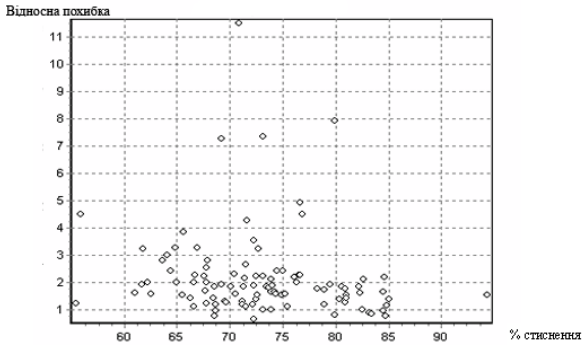


Рис. 9. Кореляційне поле даних (табл. 2, колонки 5 та 6)

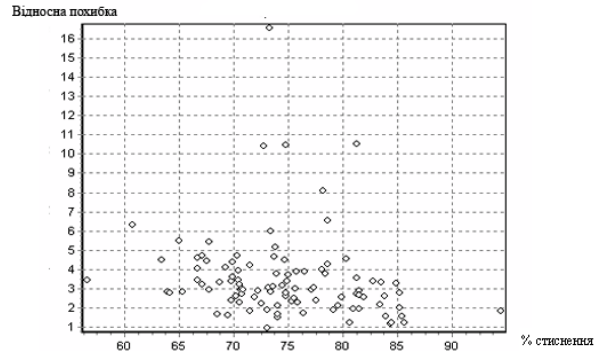


Рис. 10. Кореляційне поле даних (табл. 2, колонки 8 та 9)

Таблиця 1

Результати стиснення архіватором WinRAR

№ з/п	Відсоток стиснення RAR	Відсоток стиснення RAR H2.0	Відносна похибка RAR H2.0	PSNR RAR H2.0	Відсоток стиснення RAR H3.0	Відносна похибка RAR H3.0	PSNR RAR H3.0
1	2	3	4	5	6	7	8
1	59,04	67,39	1,07	49,67	68,48	1,84	45,84
2	45,50	51,83	0,61	49,49	56,64	1,13	44,78
3	59,67	67,03	0,32	49,76	69,21	0,52	46,22
...
99	87,14	89,67	0,08	60,11	91,14	0,23	55,08
100	34,42	40,34	0,61	49,50	42,93	1,16	44,60

Таблиця 2

Результати стиснення методом JPEG

№ з/п	Відсоток стиснення JPEG	Відносна похибка	PSNR JPEG	Відсоток стиснення JPEG H2.0	Відносна похибка H2.0	PSNR JPEG H2.0	Відсоток стиснення JPEG H3.0	Відносна похибка H3.0	PSNR JPEG H3.0
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	78,51	0,79	50,47	82,63	2,12	43,77	82,76	3,36	40,03
2	59,01	1,05	45,09	66,66	2,26	38,24	69,76	3,37	34,81
3	79,78	0,52	46,28	83,22	0,89	42,01	84,41	1,19	39,48
...
98	61,97	2,13	48,38	65,62	3,83	42,74	67,71	5,41	39,23
99	63,02	1,22	44,85	71,35	2,17	39,90	73,43	2,85	37,49
100	66,53	0,61	46,33	72,14	1,19	40,66	74,08	1,69	37,57

У першій колонці табл. 1 подано нумерацію ЦЗ, що аналізувались (за браком місця всі дані не наводяться).

У другій наведено відсоток стиснення архіватором WinRAR.

У третій, четвертій, п'ятій, шостій, сьомій та восьмій колонках наведено відсоток стиснення, відносну похибку та *PSNR* з застосуванням низькочастотної фільтрації з масками H2.0 та H3.0 та архіватора WinRAR відповідно.

У першій колонці табл. 2 подано нумерацію ЦЗ, що аналізувались (за браком місця всі дані не наводяться).

У другій, третій та четвертій наведено відсоток стиснення, відносну похибку та *PSNR* мето-

дом стиснення JPEG. У п'ятій, шостій, сьомій, восьмій, дев'ятій та десятій колонках наведено відсоток стиснення, відносну похибку та *PSNR* із застосуванням низькочастотної фільтрації з масками H2.0 та H3.0 та метод JPEG відповідно.

Для статистичної оцінки результатів наведено *t*-тест для підтвердження трьох основних гіпотез:

- відносна похибка з використанням фільтрів не перевищуватиме значення 1–2 та 5 % для стиснення архіватором WinRAR та методом JPEG відповідно;

- відсоток стиснення з використанням фільтрів перевищуватиме середнє значення відсотка стиснення без використання фільтрів, а саме $X_{\text{сер}} = 68,45$ для методу JPEG та $X_{\text{сер}} = 46,70$ для

архіватора WinRAR;

- показник *PSNR* залишатиметься на рівні 45-49 для архіватора WinRAR та 41-38 для методу JPEG.

Статистична характеристика для перевірки гіпотез виводиться так:

$$t_{\varepsilon} = \frac{\bar{\tau}}{\sigma\{\bar{\tau}\}},$$

де $\bar{\tau}$ — середнє значення по кожній складовій (відносна похибка, відсоток стиснення, показник *PSNR*); $\sigma\{\bar{\tau}\}$ — середньоквадратичне відхилення (відносна похибка, відсоток стиснення, показник *PSNR*).

Критичне значення статистики для перевірки гіпотез за замовчуванням вважаємо $t_{\alpha/2} = 1,98$, при ймовірності похибки першого роду $\alpha = 0,05$.

У табл. 3 наведено результати статистичного дослідження відсотка стиснення.

У першій та третій колонах сформульовано гіпотези відповідно до методу стиснення та середнього значення $X_{\text{сеп}}$.

У другій та четвертій колонках наведено значення *t*-тесту.

У табл. 4 наведено результати статистичного дослідження відносної похибки. У першій та третій колонах сформульовано гіпотези відповідно до методу стиснення та середнього значення $X_{\text{сеп}}$.

У другій та четвертій колонках наведено значення *t*-тесту.

У табл. 5 наведено результати статистичного дослідження значення *PSNR*. У першій та третій колонках сформульовано гіпотези відповідно до методу стиснення та середнього значення $X_{\text{сеп}}$.

У другій та четвертій колонках наведено значення *t*-тесту.

Виходячи з статистичного аналізу результатів

(рис. 1-10, табл. 1-5) можна зробити такі висновки:

- статистично доведено, що використання інваріантних перетворень ЦЗ («згладжування»-«контрастування») у комплексі з відомими методами стиснення покращують рівень компресії;

- при запропонованому підході показник *PSNR* ЦЗ у середньому на рівні 38-41 для стиснення методом JPEG та 45-49 для стиснення архіватором WinRAR;

- відносна похибка при відтворенні після стиснення ЦЗ у середньому на рівні 1-5 %;

- відсоток компресії ЦЗ за запропонованим способом підвищується на показник від 2 до 20 % залежно від методу стиснення та типу зображення;

- залежно від типу зображення змінюється відсоток стиснення, відносна похибка та *PSNR*, що зумовлено властивостями конкретних ЦЗ, на які варто звернути окрему увагу (або при розробці спеціалізованих методів стиснення, або при розробці технологій на основі відомих).

Висновки

Проведені експериментальні дослідження дають змогу стверджувати, що використання низькочастотного фільтра на початковому та контрастного фільтра на кінцевому етапі системи стиснення підвищує відсоток компресії фотореалістичних цифрових зображень і при цьому відбуваються втрати, які не помітні для людського ока.

Перспективним є зосередження подальших досліджень у напрямку уточнення контрастних фільтрів, що під час використання разом з розглянутими методами стиснення дозволить покращити показник *PSNR* та зменшити відносну похибку при використанні низькочастотних фільтрів, що мають більш високий ступінь згладжування, ніж наведені в праці.

Таблиця 3

Результати *t*-тесту відсотку стиснення

Алгоритм JPEG			
H2.0		HЧ3.0	
1	2	3	4
H ₀ : X _{сеп} = 68,45	t = 6,48 Обрати H ₂	H ₀ : X _{сеп} = 68,45	t = 9,57 Обрати H ₂
H ₁ : X _{сеп} < 68,45		H ₁ : X _{сеп} < 68,45	
H ₂ : X _{сеп} > 68,45		H ₂ : X _{сеп} > 68,45	
Архіватор WinRAR			
H2.0		HЧ3.0	
H ₀ : X _{сеп} = 46,70	t = 6,99 Обрати H ₂	H ₀ : X _{сеп} = 46,70	t = 9,66 Обрати H ₂
H ₁ : X _{сеп} < 46,70		H ₁ : X _{сеп} < 46,70	
H ₂ : X _{сеп} > 46,70		H ₂ : X _{сеп} > 46,70	

Результати *t*-тесту відносної похибки

Алгоритм JPEG			
H2.0		HЧ3.0	
1	2	3	4
$H_0: X_{\text{сеп}} = 5$	$t = -17,84$ Обрати H_1	$H_0: X_{\text{сеп}} = 5$	$t = -6,83$ Обрати H_1
$H_1: X_{\text{сеп}} < 5$		$H_1: X_{\text{сеп}} < 5$	
$H_2: X_{\text{сеп}} > 5$		$H_2: X_{\text{сеп}} > 5$	
Архіватор WinRAR			
H2.0		HЧ3.0	
$H_0: X_{\text{сеп}} = 1$	$t = -2,05$ Обрати H_1 H_0 правильна при $\alpha = 0,04$	$H_0: X_{\text{сеп}} = 2$	$t = -3,47$ Обрати H_1
$H_1: X_{\text{сеп}} < 1$		$H_1: X_{\text{сеп}} < 2$	
$H_2: X_{\text{сеп}} > 1$		$H_2: X_{\text{сеп}} > 2$	

Таблиця 5

Результати *t*-тесту показника *PSNR*

Алгоритм JPEG			
H2.0		HЧ3.0	
1	2	3	4
$H_0: X_{\text{сеп}} = 41$	$t = 2,34$ Обрати H_2 H_0 правильна при $\alpha = 0,02$	$H_0: X_{\text{сеп}} = 38$	$t = 2,51$ Обрати H_2 H_0 правильна при $\alpha = 0,01$
$H_1: X_{\text{сеп}} < 41$		$H_1: X_{\text{сеп}} < 38$	
$H_2: X_{\text{сеп}} > 41$		$H_2: X_{\text{сеп}} > 38$	
Архіватор WinRAR			
H2.0		HЧ3.0	
$H_0: X_{\text{сеп}} = 49$	$t = 5,17$ Обрати H_2	$H_0: X_{\text{сеп}} = 45$	$t = 2,01$ Обрати H_2 H_0 правильна при $\alpha = 0,04$
$H_1: X_{\text{сеп}} < 49$		$H_1: X_{\text{сеп}} < 45$	
$H_2: X_{\text{сеп}} > 49$		$H_2: X_{\text{сеп}} > 45$	

ЛІТЕРАТУРА

1. Мюррей Д. Д. Энциклопедия форматов графических файлов / Д. Д. Мюррей, У. Ван. Райнер. — К., 1997. — 159 с.
2. Ватолин Д. С. Алгоритмы сжатия изображений / Д. С. Ватолин. — М. : Издательский отдел факультета вычислительной математики и кибернетики МГУ им. М. В. Ломоносова, 1999. — 59 с.
3. Миано Дж. Форматы и алгоритмы сжатия изображений в действии / Дж. Миано. — М. : Триумф, 2003. — 336 с.
4. Гонсалес Р. Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс. — М. : Техносфера, 2006. — 259 с.

5. Приставка П. О. Обчислювальні аспекти застосування поліноміальних сплайнів при побудові фільтрів / П. О. Приставка // Актуальні проблеми автоматизації та інформаційних технологій: зб. наук. пр. — Д. : Вид-во Дніпропетр. ун-ту, 2006. — 3–14 с.
6. Приставка П. О. Побудова контрастних фільтрів за використанням поліноміальних сплайнів / П. О. Приставка // Актуальні проблеми автоматизації та інформаційних технологій: зб. наук. пр. — Д. : Вид-во Дніпропетр. ун-ту, 2007. — 15–22 с.
7. Приставка П. О. Експериментальний аналіз методів стиснення цифрових зображень / П. О. Приставка, М.О. Рябий // Проблеми інформатизації та управління: зб. наук. пр. — К. : НАУ, 2010. — 78–84 с.

Стаття надійшла до редакції 02.02.2012.