
МЕТОДИ ТА СИСТЕМИ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОЇ І ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ ТА СИГНАЛІВ

УДК 004.932:004.42

М.О. ЦАРЕНКО, А.Р. ПАРТЕКА, М.В. ЛАВРОВ, Й.Й. БІЛИНСЬКИЙ

РОЗРОБКА ТА ЗАСТОСУВАННЯ КОМП'ЮТЕРНОЇ ПРОГРАМИ ДЛЯ ОЦІНКИ ЯКОСТІ ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ НА ОСНОВІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗГОРТОК

*Вінницький національний технічний університет, Хмельницьке шосе 95, 21021, Вінниця,
Україна*

Анотація. Цифрові фільтри на основі згортки займають ключове місце в комп'ютерних програмах обробки зображень для розмиття, підвищення різкості, виділення границь тощо. З метою вивчення властивостей таких фільтрів, набуття знань, умінь, навичок та досвіду роботи студентами розроблено комп'ютерну програму, яка дає змогу наочно, використовуючи ядра будь-яких розмірів отримати різні згорткові фільтри (підвищення різкості, розмиття, виявлення країв, тиснення) для обробки зображень, а також оцінити якість їх роботи за допомогою критеріїв пікового співвідношення сигналу до шуму (PSNR) між оригінальним і обробленим зображенням. Програма реалізована на об'єктно-орієнтованій мові програмування Java з використанням бібліотек AWT та Swing, які призначені для обробки фільтрів будь-якого розміру у форматах JPG, JPEG, PNG, BMP або GIF. Описано принципи роботи ядра згортки, методи обробки шумів, реалізація програм та інструкції з налаштування вентилів. Додано функціонал для введення користувацького ядра згортки, обробки зображень з використанням гаусівського шуму ($\sigma = 25.0$) та шуму типу «сіль-перець» (нейтральність 5%), з подальшою можливістю оновлення зображення шляхом скидання шуму. Програма дає змогу використовувати ядра згортки з будь-якими ваговими коефіцієнтами. Враховуючи широке застосування згорткових фільтрів у комп'ютерному зорі та цифровій обробці сигналів, важливою задачею є демонстрація та кількісна оцінка їхньої ефективності. Для вирішення цього завдання ми розробили комп'ютерну програму, яка порівнює різні згорткові фільтри (підвищення різкості, розмиття, виявлення країв, тиснення та власний фільтр) для обробки зображень. Якість обробки оцінюється за допомогою пікового співвідношення сигнал/шум (PSNR) між оригінальним та обробленим зображенням.

Ключові слова: обробка зображень, згортка, ядро згортки, просторова фільтрація, комп'ютерний зір, цифрова обробка сигналів, пікове співвідношення сигналів до шуму, PSNR, середньоквадратична помилка, MSE, метрики оцінки якості зображень, фільтр розмиття, фільтр загострення, фільтр тиснення, виявлення контурів, гаусівський шум, імпульсний шум, шум «сіль-перець», Java, Swing, AWT.

Abstract. Cluster-based digital filters occupy a key place in computer image processing programs for adjusting the shift in sharpness, the visible border, and so on. Using the method of learning the power of such filters, you know, the beginners and the students have developed a computer program that makes it possible to scientifically, vikorista kernels of different sizes to isolate the differences in the Gortkov filters (sharpness shift, pitch, edge detection, embossing) to process the image, as well as evaluate the brightness of their work using additional criteria of peak signal to noise ratio (PSNR) compared to the original and edited images.

The program is implemented in object-oriented Java programming with the AWT and Swing libraries, which are designed for processing filters of any size in JPG, JPEG, PNG, BMP or GIF formats. The principles of operation of the convolution kernel, methods of processing noise, implementation of programs and instructions for setting the valves are described. Added functionality for entering a custom convolution kernel, processing images using Gaussian noise ($\sigma = 25.0$) and “salt-pepper” type noise (5% neutrality), with the further possibility of updating the image by resetting the noise. The program allows you to use convolution kernels with any weight coefficients. The program uses the PSNR criterion to evaluate the luminosity of image processing. Given the widespread use of convolutional filters in computer vision and digital signal processing, it is an important task to demonstrate and quantify their effectiveness.

To solve this problem, we developed a computer program that compares different convolutional filters (sharpening, blurring, edge detection, embossing, and an eigenfilter) for image processing. The quality of processing is evaluated using the peak signal-to-noise ratio (PSNR) between the original and processed image.

МЕТОДИ ТА СИСТЕМИ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОЇ І ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ ТА СИГНАЛІВ

Keywords: image processing, convolution, convolution kernel, spatial filtering, computer vision, digital signal processing, peak signal-to-noise ratio, PSNR, mean square error, MSE, image quality metrics, blur filter, sharpening filter, relief filter, contour detection, Gaussian noise, impulse noise, salt noise, Java, Swing, AWT.

DOI: 10.31649/1681-7893-2025-49-1-64-71

ВСТУП

Одним із основних методів обробки зображень є згортка, яка використовується для виконання операцій, таких як розмиття, загострення, виявлення країв, тиснення та створення власних ефектів [1]. Вона базується на застосуванні ядра згортки до пікселів зображення, що дозволяє модифікувати їх значення залежно від сусідніх пікселів. Для оцінки якості оброблюваного зображення, як правило, використовується оцінка втрат при відновленні зображень так зване пікове відношення сигнал/шум або по-англійськи PSNR, який порівнює між собою оригінальне та оброблене зображення [7]. При цьому можуть бути використані будь-яке зображення у форматах JPG, JPEG, PNG, BMP або GIF [9-12]. Для проведення моделювання з метою виявлення більш ефективного фільтра, як правило, використовується функції додавання різних типів шуму (гаусівський, «сіль-перець», тощо), що дозволяє оцінити в подальшому стійкість фільтрів до спотворень, а також можливість введення користувацького ядра згортки для створення власних ефектів [6].

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ

Згортка — це математична операція, яка математична операція двох функцій, що дозволяє отримати третю функцію й застосовується до зображення за допомогою ядра (матриці) [1], що визначає, як пікселі зображення комбінуються для створення нового значення пікселя. Ядро згортки, як правило, є квадратною матрицею розміром $n \times n$, де кожен елемент ядра впливає на результуючий піксель.

Математично згортка для пікселя (x, y) описується формулою:

$$g_{x,y} = \omega \cdot f_{x,y} = \sum_{i=-a}^a \sum_{j=-b}^b \omega_{i,j} f_{x-i,y-j},$$

де $g_{x,y}$ — відфільтроване зображення, $f_{x,y}$ — вихідне зображення, ω — фільтр, а кожен елемент фільтра розглядається при $-a \leq i \leq a$ та $-b \leq j \leq b$.

У застосунку використано такі типи ядер:

- Ядро для підвищення різкості. Матриця $\begin{pmatrix} 0 & -1 & 0 \\ -1 & 5 & -1 \\ 0 & -1 & 0 \end{pmatrix}$ підсилює контраст між сусідніми пікселями.

- Ядро для розмиття. Матриця $\frac{1}{9} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$ зменшує різницю між сусідніми пікселями

- Ядро для виявлення країв. Матриця $\begin{pmatrix} -1 & -1 & -1 \\ -1 & 8 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \end{pmatrix}$ виділяє контури об'єктів.

- Ядро для тиснення. Матриця $\begin{pmatrix} -2 & -1 & 0 \\ -1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 2 \end{pmatrix}$ створює ефект рельєфності [3].

- Власне ядро: дозволяє користувачу визначити власну матрицю розмірами 3×3 та 5×5 . При необхідності, залежно від поставленої задачі, розміри ядра можна збільшити.

МЕТОДИ ТА СИСТЕМИ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОЇ І ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ ТА СИГНАЛІВ

Пікове співвідношення сигналу до шуму (PSNR) є стандартною метрикою для оцінки якості обробки зображень, яка вимірює ступінь спотворення між оригінальним і обробленим зображенням [7]. PSNR виражається в децибелах (дБ) і базується на середньоквадратичній помилці (MSE), яка кількісно визначає різницю між піксельними значеннями двох зображень. Формула для PSNR [5]:

$$PSNR = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{MAX_I^2}{MSE} \right),$$

де MAX — максимальне значення пікселя (зазвичай 255 для 8-бітних зображень), а MSE обчислюється як:

$$MSE = \frac{1}{mn} \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} [I(i, j) - K(i, j)]^2,$$

де m і n — розміри зображення (висота та ширина), I(i, j) — значення пікселя оригінального зображення, K(i, j) — значення пікселя обробленого зображення, а сума береться по всіх пікселях. Високе значення PSNR (наприклад, вище 30 дБ) вказує на низький рівень спотворень і високу схожість між зображеннями, тоді як низьке значення (нижче 20 дБ) свідчить про значні зміни, що часто спостерігається при агресивних фільтрах. PSNR є чутливим до будь-яких змін у піксельних значеннях, що робить його ефективним для порівняння фільтрів згортки, але він не завжди корелює з суб'єктивною якістю зображення, оскільки людське сприйняття може ігнорувати певні типи спотворень [2].

РЕАЛІЗАЦІЯ ШУМУ

Для оцінки стійкості фільтрів до спотворень у програмі реалізовано додавання двох типів шуму: гаусівського та «сіль-перець».

Гаусівський шум: додається до кожного пікселя зображення шляхом додавання випадкової величини з нормальним розподілом [6]. Для пікселя з координатами (x, y) і значенням I(x, y, b) у каналі b (червоний, зелений, синій) нове значення обчислюється як:

$$I_{noise}(x, y, b) = \max(0, \min(255, I(x, y, b) + G)),$$

де $G \sim N(0, \sigma^2)$ — випадкова величина з нормальним розподілом із середнім 0 і стандартним відхиленням $\sigma = 25,0$. Значення пікселя обмежується діапазоном [0, 255], щоб уникнути переповнення.

Шум «сіль-перець»: із ймовірністю 5% піксель замінюється на 0 (чорний, «перець») або 255 (білий, «сіль») [1]. Для кожного пікселя (x, y) і каналу b (крім альфа-каналу, якщо він є) з ймовірністю $p = 0,05$:

якщо $r < 0,025$ («сіль»)

якщо $0,025 \leq r < 0,05$ («перець»)

інакше

$$I_{noise}(x, y, b) = \begin{cases} 255, & \text{якщо } r < 0,025 \\ 0, & \text{якщо } 0,025 \leq r < 0,05 \\ I(x, y, b), & \text{інакше} \end{cases}$$

де r — випадкове число з рівномірного розподілу на [0, 1).

Відновлення зображення після додавання шуму здійснюється шляхом повернення до збереженої копії оригінального зображення (метод resetNoise).

РЕАЛІЗАЦІЯ ПРОГРАМНОГО ЗАСТОСУНКУ

Застосунок реалізовано на Java з використанням бібліотек AWT для обробки зображень і Swing для створення графічного інтерфейсу. Основний клас ImageConvolutionApp забезпечує завантаження зображень у форматах JPG, JPEG, PNG, BMP, GIF — користувач може обрати будь-яке зображення, для прикладу використано зображення розміром 330×330 пікселів. Особливістю програми є можливість використання будь-яких вагових коефіцієнтів для формування ядра згортки в ручному режимі, тобто шляхом введення їх у матрицю інтерфейса.

МЕТОДИ ТА СИСТЕМИ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОЇ І ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ ТА СИГНАЛІВ

У застосунку реалізовано застосування таких фільтрів як підвищення різкості, розмиття, виявлення країв, тиснення, а також можливість створення власного фільтра. Додатково передбачена обробка зображень із додаванням шуму: гаусівського ($\sigma = 25.0$) та шуму типу «сіль-перець» із ймовірністю 5%. Можна відновити зображення до оригінального стану шляхом скидання шуму.

Застосунок дозволяє обчислювати показник PSNR між оригінальним і обробленим зображенням, а також відображає поточне ядро згортки у текстовому форматі HTML. Передбачено масштабування зображень (збільшення та зменшення).

Інтерфейс містить панелі для відображення оригінального та обробленого зображень, елементи вибору фільтрів, кнопки для масштабування, додавання та скидання шуму. Користувач може створювати власне ядро згортки через спеціальне діалогове вікно, де задається розмір (від 1 до 5, лише непарні значення) і значення елементів матриці.

ІНСТРУКЦІЯ КОРИСТУВАННЯ ЗАСТОСУНКОМ

В роботі розроблено комп'ютерний застосунок для вивчення властивостей фільтрів широкого застосування на основі згортки. Програма реалізована на мові Java з використанням бібліотек AWT та Swing, які застосовані для фільтрів обробки зображень будь-якого розміру у форматах JPG, JPEG, PNG, BMP або GIF).

На рис. 1 показано зовнішній вид вікна інтерфейса застосунка, який містить набір можливих функцій, поточну матрицю, а також вікна для введеного оброблюваного зображення.

Для роботи з застосунком необхідно виконати такі кроки;

1. Завантажити зображення, використовуючи кнопку «Завантажити Зображення» та вибрати файл у форматі JPG, JPEG, PNG, BMP або GIF через діалогове вікно.

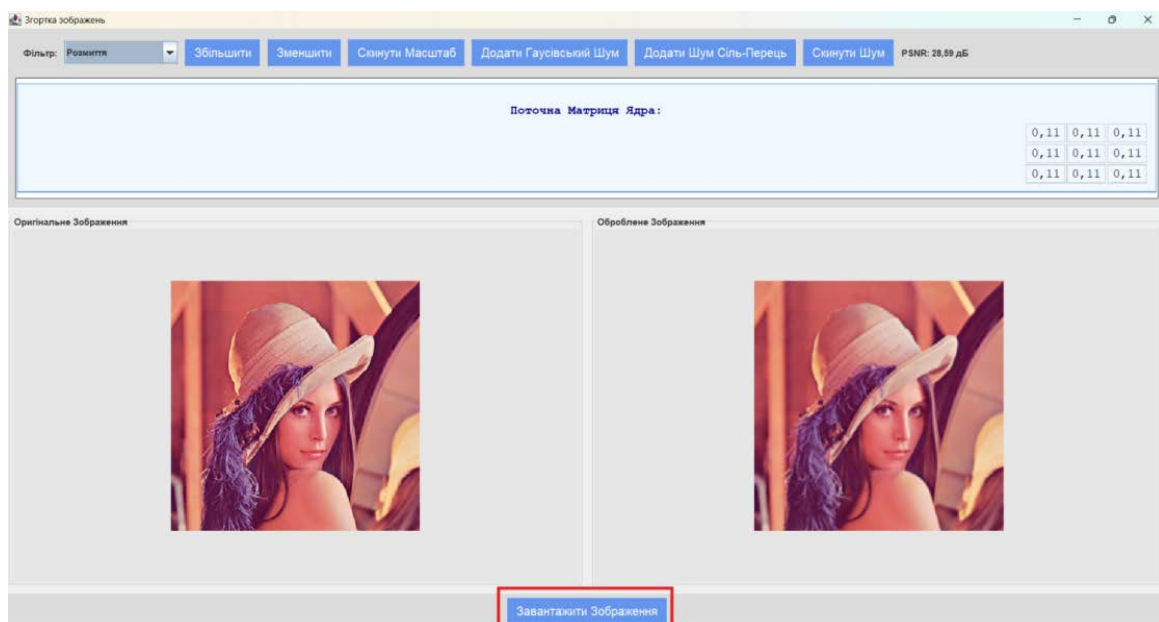


Рисунок 1 – Розташування кнопки "Завантаження зображення"

2. У спадному меню (рис. 2) вибрати один із фільтрів («Різкість», «Розмиття», «Виявлення Контурів», «Тиснення» або «Власна»).

МЕТОДИ ТА СИСТЕМИ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОЇ І ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ ТА СИГНАЛІВ

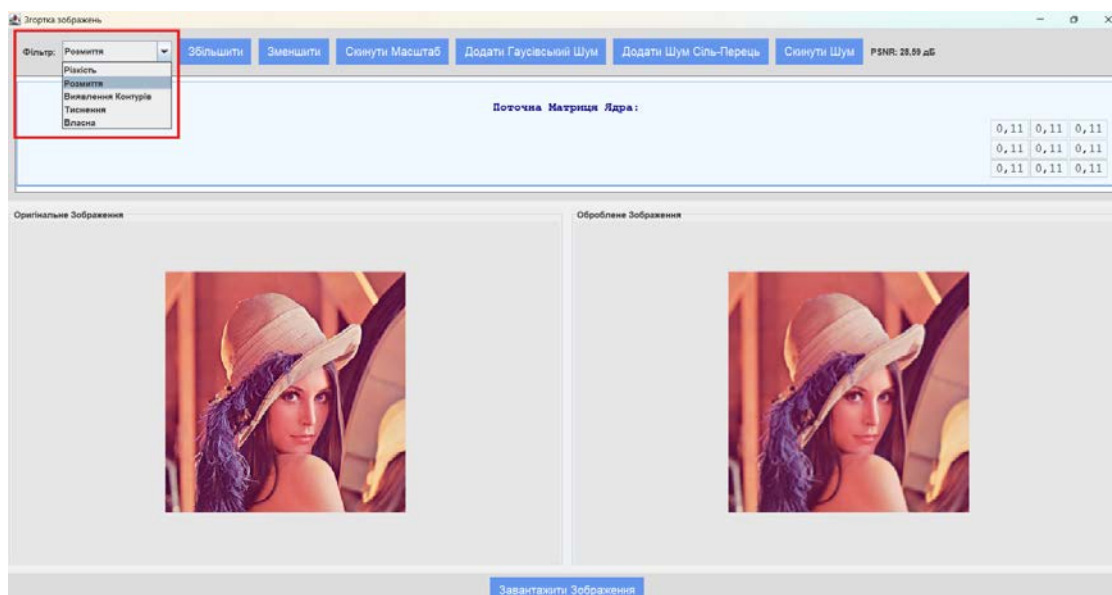


Рисунок 2 – Розташування фільтрів

3. Якщо обрано опція «Власна» (налаштування власного фільтра, у діалоговому вікні (рис. 3) необхідно вказати розмір ядра (1–5, непарне) і ввести значення елементів матриці. Натисканням кнопок «Застосувати» для використання або «Скинути» для повернення до стандартного ядра.

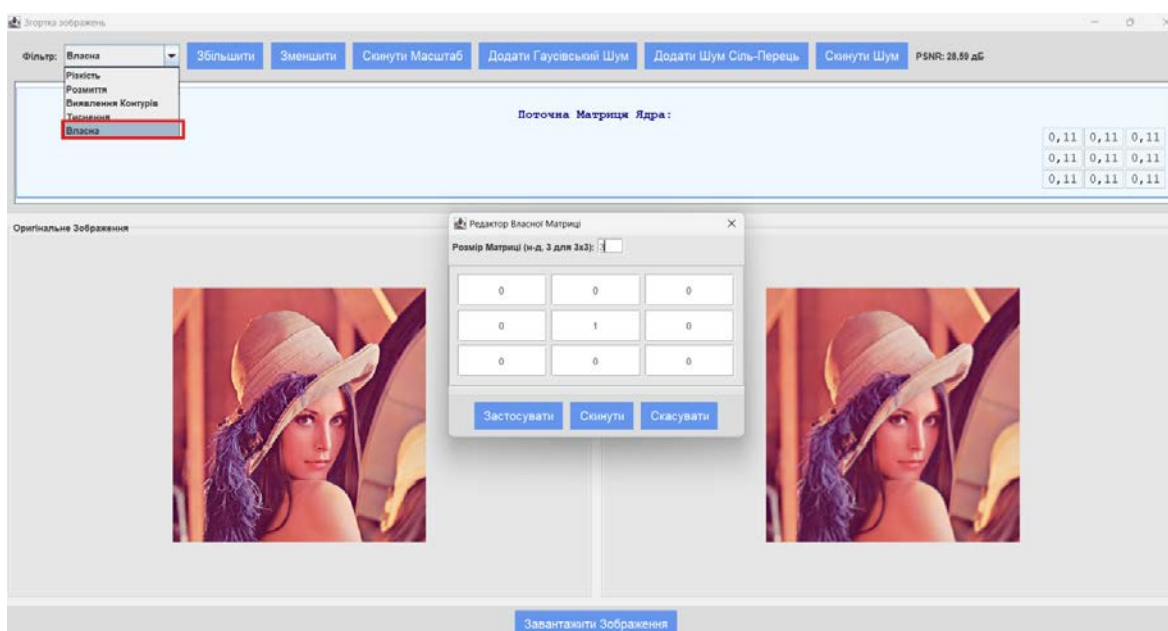


Рисунок 3 – Вікно введення власної матриці

4. Використовуючи кнопку «Додати Гаусівський Шум» або «Додати Шум Сіль-Перець» (рис. 4) для додавання відповідного типу шуму до зображення можна додати відповідний шум на зображенні. Натисніть «Скинути Шум» - для повернення до оригінального зображення.

МЕТОДИ ТА СИСТЕМИ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОЇ І ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ ТА СИГНАЛІВ

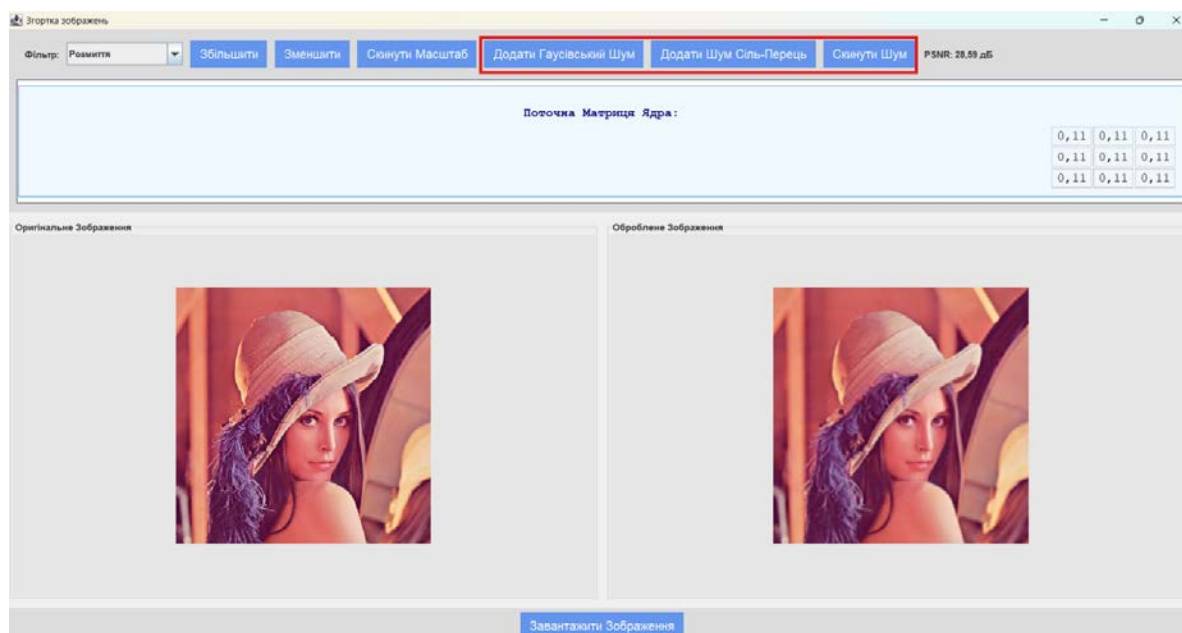


Рисунок 4 – Розташування кнопок додавання та скидання шуму

5. Для дослідження якості оброблюваного зображення використовують критерій PSNR, який дає змогу встановити ефективність використаного фільтра між оригінальним і обробленим зображенням.

АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ

В роботі наведений приклад оброблення зображення розміром 330×330 пікселів з використанням різних фільтрів, оцінено якість обробки за допомогою PSNR. Результати наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

Результати порівняння фільтрів згортки за PSNR

Фільтр	PSNR (дБ)
Розмиття	28,59
Підвищення різкості	17,29
Тиснення	13,91
Виявлення країв	5,85

Фільтр розмиття показав найкращий результат за PSNR (28,59 дБ), що вказує на найменші спотворення та високу якість збереження деталей зображення. Фільтр загострення має середній показник PSNR (17,29 дБ), що відображає помірні зміни в піксельних значеннях. Фільтр тиснення продемонстрував низький результат (PSNR 13,91 дБ), що свідчить про значні спотворення через рельєфний ефект. Фільтр виявлення країв виявився найменш ефективним із PSNR 5,85 дБ, що пояснюється агресивною зміною піксельних значень для виділення контурів.

Додавання шуму (гаусівського або «сіль-перець») знижує PSNR, але функція скидання шуму дозволяє повернути зображення до оригінального стану, що підтверджує ефективність механізму відновлення. Власне ядро згортки дає змогу користувачам експериментувати з новими ефектами, хоча значення PSNR залежить від обраних параметрів матриці.

МЕТОДИ ТА СИСТЕМИ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОЇ І ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ ТА СИГНАЛІВ

ВИСНОВКИ

У роботі розроблено програмний застосунок для обробки зображень із використанням фільтрів згортки та оцінки якості обробки за допомогою метрики PSNR. Показано інтерфес застосунка та описані його можливості. На прикладі проведено порівняння різних фільтрів отримані показники PSNR. Встановлено, що такі фільтри як фільтри для виявлення країв та тиснення значно змінюють зображення, що відображено у низьких значеннях PSNR. Реалізована підтримка шумів і користувацьких ядер дозволяє гнучко аналізувати ефективність фільтрації в різних умовах. Отримані результати підтверджують, що метрика PSNR є придатною для кількісного порівняння фільтрів, однак остаточний вибір фільтра має залежати від конкретної задачі та бажаного ефекту.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ / REFERENCES

1. Gonzalez R. C., Woods R. E. Digital Image Processing. 4-ге вид. New York : Pearson, 2018. 1019 с. URL: <https://www.cl72.org/090imagePLib/books/Gonzales,Woods-Digital.Image.Processing.4th.Edition.pdf> (дата звернення: 07.06.2025).
2. Monsters D. A Quick Overview of Methods to Measure the Similarity Between Images. Medium. URL: <https://medium.com/@datamonsters/a-quick-overview-of-methods-to-measure-the-similarity-between-images-f907166694ee> (дата звернення: 17.05.2025).
3. GeeksforGeeks. Types of Convolution Kernels - GeeksforGeeks. GeeksforGeeks. URL: <https://www.geeksforgeeks.org/types-of-convolution-kernels/> (дата звернення: 03.05.2025).
4. Image Kernels explained visually. Explained Visually. URL: <https://setosa.io/ev/image-kernels/> (дата звернення: 03.05.2025).
5. JavaHowTo CalculatePSNR - Rhea. Project Rhea: Learning by Teaching. URL: https://www.projectrhea.org/rhea/index.php/JavaHowTo_CalculatePSNR (дата звернення: 13.05.2025).
6. Szeliski R. Computer Vision: Algorithms and Applications. 2-ге вид. Springer, 2022. 1206 с. URL: <https://library.huree.edu.mn/data/202295/2024-06-03/Computer%20Vision%20-%20Algorithms%20and%20Applications%202nd%20Edition,%20Richard%20Szeliski.pdf> (дата звернення: 13.05.2025).
7. Image Quality Assessment: From Error Visibility to Structural Similarity / Z. Wang та ін. IEEE Transactions on Image Processing. 2004. Т. 13, № 4. С. 600–612. URL: <https://doi.org/10.1109/tip.2003.819861> (дата звернення: 07.06.2025).
8. ConvolveOp (Java Platform SE 8). Oracle. URL: <https://docs.oracle.com/javase/8/docs/api/java/awt/image/ConvolveOp.html> (дата звернення: 07.06.2025).
9. Pavlov S. V. Information Technology in Medical Diagnostics //Waldemar Wójcik, Andrzej Smolarz, July 11, 2017 by CRC Press - 210 Pages.
10. Wójcik W., Pavlov S., Kalimoldayev M. Information Technology in Medical Diagnostics II. London: (2019). Taylor & Francis Group, CRC Press, Balkema book. – 336 Pages.
11. Highly linear Microelectronic Sensors Signal Converters Based on Push-Pull Amplifier Circuits / edited by Waldemar Wojcik and Sergii Pavlov, Monograph, (2022) NR 181, Lublin, Comitet Inzynierii Srodowiska PAN, 283 Pages. ISBN 978-83-63714-80-2
12. Pavlov Sergii, Avrunin Oleg, Hrushko Oleksandr, and etc. (2021). System of three-dimensional human face images formation for plastic and reconstructive medicine // Teaching and subjects on bio-medical engineering Approaches and experiences from the BIOART-project Peter Arras and David Luengo (Eds.), Corresponding authors, Peter Arras and David Luengo. Printed by Acco cv, Leuven (Belgium). - 22 P. ISBN: 978-94-641-4245-7.

Надійшла до редакції 22.04.25 р.

ЦАРЕНКО МАКСИМ ОЛЕКСАНДРОВИЧ — студент, факультет інтелектуальних інформаційних технологій та автоматизації, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця,
e-mail: maksimcarenko700@gmail.com

МЕТОДИ ТА СИСТЕМИ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОЇ І ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ ТА СИГНАЛІВ

ПАРТЕКА АРТУР РУСЛАНОВИЧ — студент, факультет інтелектуальних інформаційних технологій та автоматизації, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця,
e-mail: aleco112756@gmail.com

ЛАВРОВ МИКОЛА ВАСИЛЬОВИЧ — студент, факультет інтелектуальних інформаційних технологій та автоматизації, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця,
e-mail: first.kreox@gmail.com

БЛИНСЬКИЙ ЙОСИП ЙОСИПОВИЧ — доктор технічних наук, професор, професор кафедри загальної фізики, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, **e-mail: Yosyp.bilynsky@gmail.com**

MAKSYM TSARENKO, ARTUR PARTEKA, MYKOLA LAVROV, YOSYP BILYNSKY

**DEVELOPMENT AND APPLICATION OF A COMPUTER PROGRAM FOR ASSESSING THE
QUALITY OF IMAGE PROCESSING BASED ON THE STUDY OF CONVECTIONS**

Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia