

DOI: <https://doi.org/10.26565/2519-2310-2025-1-04>
УДК 004.056.55:004.932

МОДЕЛЮВАННЯ І ОЦІНКА ОБЧИСЛЮВАЛЬНОЇ СКЛАДНОСТІ ОСНОВНИХ ПРОЦЕДУР, ПОЧАТКОВИХ ЕТАПІВ ГІБРИДНОГО СТЕГАНОАЛГОРИТМУ

Микита Гончаров¹, аспірант кафедри кібербезпеки інформаційних систем, мереж і технологій,
e-mail: m.honcharov@student.karazin.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9790-7260>

Сергій Малахов¹, к.т.н., ст. науковий співробітник, доцент кафедри кібербезпеки
інформаційних систем, мереж і технологій, e-mail: malakhov@karazin.ua,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8826-1616>

¹*Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна,
61022, проспект Свободи, 4, Харків, Україна*

Рукопис надійшов 1 березня 2025 р. Отримано після рецензування 1 квітня 2025 р.
Прийнято 2 травня 2025 р.

Анотація: У сучасних умовах зростання кіберзагроз стеганографія відіграє ключову роль у забезпеченні конфіденційності даних, приховуючи їх у масивах цифрових даних (зображення, звук, файлові системи тощо). На відміну від криптографії, стеганографія приховує сам факт передачі інформації, що робить її незамінною для захисту даних в інформаційно-комунікаційних системах з обмеженими ресурсами. Необхідність створення енергоефективних і адаптивних алгоритмів, які поєднують стійкість контенту, високу якість контейнера та низьку обчислювальну складність, підкреслює актуальність проведених досліджень. У роботі проведена оцінка обчислювальної складності процедур попередньої обробки вхідних даних та визначено їх вплив на ефективність подальшої інкапсуляції даних. В якості основи для моделювання обрано один із можливих варіантів згладжування малоінформативних областей вихідних зображень. Виконано оцінку: - продуктивності за часом виконання для різних типів зображень; показником *PSNR*; ймовірності кольорового перепаду яскравості та кількістю сформованих опорних блоків (ОБ) зображень. В ході моделювання досліджено наслідки згладжування текстур вихідних зображень в умовах варіювання розміру матриць згладжування та значення різниці яскравості пікселів. Зроблено підрахунок базових операцій (арифметичних, логічних, порівнянь) для кожного блоку та визначена загальна складність відповідних етапів алгоритму. Експериментальна оцінка проводилася шляхом вимірювання часу виконання процедур, оцінці якості зображень за метрикою *PSNR*, розрахунком ймовірності перепаду яскравості та підрахунком кількості сформованих серій ОБ. Для оцінки ефективності досліджуваних процедур, використані тестові зображення із різними текстурними характеристиками. Отримані результати підтвердили, що етап попереднього згладжування покращує вихідні умови для формування серій ОБ (порівняно з їх відсутністю). Впровадження етапу згладжування забезпечує зменшення шуму у малоінформативних областях, що сприяє підвищенню однорідності блоків та розширює діапазон комбінаторики наявних параметрів кодування (як спосіб протидії спробам неавторизованого вилучення контенту). Гнучке налаштування розміру блоку та значень порогу закруглення яскравості елементів зображень, дозволяє забезпечити адаптацію процесу згладжування до різних типів зображень та поточних ресурсних обмежень використовуваних апаратних платформ. Запропонований підхід

до попередньої обробки даних, створює потрібні умови для формування серій ОБ, покращує стійкість контенту та підтримує низький рівень візуальних спотворень. Адаптивне налаштування параметрів згладжування дозволяє ефективно використовувати алгоритм на платформах з обмеженими ресурсами. Це робить його перспективним для застосування в складі мобільних додатків. Отримані результати сприяють подальшому удосконаленню стеганографічних методів захисту інформації та відкривають нові перспективи для подальших досліджень.

Ключові слова: інформаційна безпека, загрози, кібератака, обчислювальна складність, інкапсуляція даних, несанкціонований доступ, стеганографія, кодування довжин серій

Як цитувати: Гончаров М., Малахов С., Моделювання і оцінка обчислювальної складності основних процедур, початкових етапів гібридного стеганоалгоритму. *Комп'ютерні науки та кібербезпека*. 2025; № 1(27): С. 41–59. <https://doi.org/10.26565/2519-2310-2025-1-04>

In cites: Honcharov M., Malakhov S. (2025). Modeling and evaluation of the computational complexity of the main procedures, the initial stages of the hybrid steganographic algorithm. *Computer Science and Cybersecurity*. 1(27): 41–59. <https://doi.org/10.26565/2519-2310-2025-1-04> (in Ukrainian)

1. Вступ

Сучасні цифрові технології забезпечують широкі можливості для обміну, обробки і зберігання інформації, зумовлюючи нові перспективи в галузі розвитку інформаційно-комунікаційних технологій [1-2]. Поряд з цим, розвиток інформаційних технологій (ІТ) неминує створює передумови для появи нових загроз інформаційної безпеки (ІБ), таких як несанкціонований доступ, перехопленням і фальсифікація даних та багато ін. Це зумовлює потребу в постійному вдосконаленні та розробці нових технологій і методів парирования сучасних загроз [3-4]. У цьому контексті стеганографія є важливим інструментом для приховування потрібної інформації у цифрових носіях – переносниках даних різного типу, дозволяючи зберігати конфіденційність прихованого каналу передачі даних без привернення уваги до факту його існування [1,5]. Це забезпечує непомітну передачу конфіденційних даних, роблячи стеганографію важливою складовою в загальному спектрі відомих інструментів безпеки. Розробка стеганографічних методів, що одночасно поєднують високі скритність функціонування і стійкість до спроб «злому» потайного контенту, та мають високі обчислювальну ефективність й адаптивність до різних апаратних платформ, є актуальним завданням. Ключовим питанням у зазначеній композиції факторів й умов, є досягнення балансу між збереженням характерних статистичних властивостей використовуваного контейнера – переносника даних та мінімальним рівнем його демаскуючих спотворень в умовах впливу стохастичних ресурсних обмежень (наприклад, поточна загрузка CPU, залишковий заряд акумуляторної батареї гаджету, обмеження на використовувану смугу частот і т.і.) [1,5,8].

Практичне застосування стеганографії охоплює широкий спектр сценаріїв: від захисту конфіденційної інформації в корпоративних ІКС до забезпечення безпеки даних у мобільних пристроях [2,6,9]. Сучасні методи стегановставки повинні одночасно враховувати, як статистичні характеристики використовуваних цифрових носіїв, так і особливості людської зорової системи, щоб забезпечити непомітність змін у контейнері [1,5,7-8]. Також, з огляду на різноманітність апаратних платформ, від потужних стаціонарних серверів до персональних

мобільних пристроїв, використовувані методи інкапсуляції даних, повинні бути гнучкими та оптимізованими для роботи в умовах обмежених обчислювальних ресурсів [7]. В цьому сенсі, особлива увага приділяється розробці методів й технік, які дозволяють оперативно й ефективно суміщати властивості цифрових контейнерів і контенту, мінімізуючи ризик виявлення факту стегановставки статистичними та/чи візуальними (*в межах даної роботи*) методами аналізу [5,7]. Відповідно, матеріали цієї роботи мають на меті подальше вдосконалення окремих процедур обробки вихідних даних зображень контейнеру і контенту, шляхом аналізу й оптимізації ключових етапів обробки даних, що в підсумку сприятиме підвищенню їхньої практичної застосовності та покращенню адаптивності алгоритму до різних станів комбінаторики зовнішніх факторів, і статистичних властивостей, безпосередньо об'єктів обробки (*в даному разі напівтонових зображень*) [3-4].

2. Структура тестового алгоритму та призначення функціональних модулів

В ході досліджень проведено моделювання 3-х варіантів згладжування малоінформативних ділянок вихідних тестових зображень, з можливістю зміни допустимого значення різниці яскравості сусідніх пікселів (P_z) та розміру матриць згладжування зображень, на задану фіксовану величину [4]. Основною метою попередньої підготовки вихідних даних є, перетворення структури вхідних зображень для зменшення загальної обчислювальної складності алгоритму обробки та створення потрібних умов для подальшого ускладнення аналізу й неавторизованої екстракції прихованого контенту [3]. Ця підготовка (*далі передобробка*) передбачає зменшення кількості візуально непомітних перепадів яскравості елементів зображень, тобто проведення процедури фонового згладжування малоінформативних областей вихідних зображень. Досліджені варіанти передобробки забезпечують необхідні початкові умови для покращення процесу інкапсуляції даних, інтенсифікуючи процес формування серій опорних блоків (ОБ) та розширюючи потенційну комбінаторику мультиплексування поточних параметрів сформованого масиву серій ОБ [4]. Коротко розглянемо основні відмінності, щодо особливостей оцінки обчислювальної складності процедур, які притаманні для кожного із модельованих варіантів передобробки.

Оцінку обчислювальної складності модельованих варіантів передобробки вихідних зображень, виконано спираючись на аналіз кількості базових операцій, потрібних при обробці кожного вихідного блока та, відповідно, загальної кількості цих блоків. Умовно будемо вважати, що, вихідне зображення має розмір $M \times M$ ел, а розмір субблоків при його сегментації для подальшої обробки, становить $N \times N$ елементів. Т.ч., результуюча кількість субблоків, що утворюються в результаті фрагментації вихідного кадру тестового зображення, складає приблизно $(M/N)^2$, а загальна процедурна складність алгоритму визначається, як добуток кількості блоків, на кількість виконуваних операцій для кожного окремого субблоку. Так, якщо обробка одного блока потребує $O(N^2)$ операцій (*де «O» це асимптотична оцінка складності алгоритму, що описує верхню межу кількості операцій*), результуюча складність для вихідного зображення становитиме $O(M^2)$. Слід мати на увазі, що фактична продуктивність залежить не лише від асимптотичної складності, а і від певних незмінних чинників, типу виконуваних операцій та особливостей використовуваної апаратної платформи.

Важливо розуміти, що розмірність обраного блоку матриці згладжування «N», є ключовим параметром, який самим безпосереднім чином впливає на результати проведеного згладжування вихідного фрагменту зображення, та ефективність подальшого використання методу кодування довжин серій. Так, малий розмір блоків ($N = 3 \div 5$ ел.) забезпечує високу швидкість, але враховує локальний розподіл яскравості елементів, а занадто великий розмір блока (*наприклад, $N \geq 7$ ел.*) збільшує обчислювальні витрати, та потребує додаткових заходів

(підходів) для врахування відомостей про появу/початок лінії контурів, зберігаючи т.ч. важливу інформацію та зменшуючи наслідки утворення нетипових артефактів. В цілому, змінюючи розмірність матриці згладжування, можна забезпечити необхідний компроміс між допустимим ступенем спотворень контейнера переносника даних та одержуваної обчислювальною складністю. Т.ч., вибір потрібного значення «N», залежить від конкретного завдання, типу використовуваних зображень (у зв'язці пари «контейнер–контент»), розміру «M» та доступних - вільних обчислювальних і енергетичних ресурсів використовуваної апаратної платформи (RAM, CPU, залишкова ємність АБ і т.і.). Тому оперативний та обчислювально щадний аналіз складності структури вихідних масивів даних, має базуватися на механізмах, котрі пройшли ретельну експериментальну апробацію [1,5,8].

Лабораторний варіант. Цей варіант обробки не передбачає ніякої передобробки і використовується лише для порівняння результатів моделювання інших варіантів: - за результативністю та параметрами формування масиву серій ОБ; - обчислювальною складністю; - отримуваним співвідношенням масивів серій ОБ у пов'язаній системі «контент-контейнер», котра впливає на параметри комбінаторики, безпосередньо на етапі стеганографічної вставки даних. Тобто, в даному випадку, вихідне зображення розбивається на блоки заданого розміру $N \times N$ ел, без будь-якої зміни значень яскравості пікселів, а всі наступні етапи алгоритму використовують вихідне зображення, як воно є. Відповідно, обчислювальна складність цього варіанту становить $O(M^2)$, що відповідає операціям читання зображення та його розбиття на блоки встановленого розміру, тобто з точки зору залучення обчислювальних ресурсів, цей варіант є умовно «найбільш ресурсомістким». Вочевидь, що відсутність будь-якої попередньої обробки, звужує умови для більш ефективного формування серій ОБ и таким чином обмежує диспарат ОБ зображень в системі «контент - контейнер» та потенційну комбінаторику ОБ на етапі мультиплексування ОБ контенту (як механізму з протидії спробам несанкціонованого вилучення контенту).

Перший варіант. Вихідне зображення фрагментується на квадратні блоки $N \times N$ ел, що відповідає будь-якому непарному значенню (3×3, 5×5 і т. ін). Для кожного блоку оцінюється різниця між яскравістю його центрального елемента та яскравістю його периферійних пікселів. В разі, якщо ця різниця менша за встановлену порогову величину (P_z), значення яскравості відповідного периферійного елемента змінюється на значення яскравості його центрального пікселю. Якщо ж ця різниця перевищує встановлене P_z , то значення периферійного елемента залишається без змін. Таким чином, згладжування кожного наступного блоку здійснюється шляхом послідовного порівняння та зміни поточних значень периферійних пікселів, відносно вихідного значення центрального елемента. В цьому разі, обчислювальна складність обробки одного блоку, складає $O(N^2)$, оскільки для кожного блоку виконується ($N^2 - 1$) порівнянь між центральним та периферійними елементами. Загальна кількість блоків у зображенні розміром $M \times M$ дорівнює $(M/N)^2$. Т.ч., результуюча обчислювальна складність розраховується, як $O(M^2/N^2) \times O(N^2)$, що спрощується до $O(M^2)$. В даному випадку, операції заміни значень пікселів не впливають на асимптотичну складність, оскільки вони виконуються в межах обробки блоку за $O(N^2)$. Цей варіант є прийнятним з точки зору ресурсних витрат, оскільки залежність від наслідків збільшення розміру блоку (матриці згладжування), нівелюється при обробці всього масиву зображення. В цілому, для зображень зі значними зі значним розкидом яскравості складових елементів, цей варіант може виявитись менш ефективним, оскільки згладжування базується лише на відомостях про стан центрального пікселю, що не завжди відображає загальні структурні властивості блоку, особливо при збільшенні його розмірів (більше 5×5 ел.).

Другий варіант. Вихідне зображення поділяється на субблоки розміром $N \times N$ (де «N» відповідає будь-якому непарному значенню), після чого для кожного окремого блоку оцінюється різниця між яскравістю його центрального елемента та яскравістю всіх інших пікселів. В разі,

якщо отримана різниця перевищує встановлений поріг закруглення - P_z , то всі такі елементи блоку, замінюються на середнє значення яскравості всіх елементів даного блоку (*тобто, не значенням амплітуди центрального пікселю, як у 1-му варіанті*). Якщо жодна отримана різниця не перевищує заданий поріг « P_z », то все залишається як є. Іншими словами, згладжування яскравості здійснюється шляхом заміни всіх значень елементів, що відрізняються від центрального пікселю більш ніж на величину « P_z », на нове значення, що відповідає середньому значенню усіх елементів блоку. Обчислювальна складність обробки кожного блоку становить $O(N^2)$, оскільки виконується $(N^2 - 1)$ порівнянь між центральним пікселем і його периферійними елементами. В разі заміни амплітуди на нове значення, обчислюється середнє значення всіх N^2 елементів, що також вимагає $O(M^2)$ операцій. Загальна кількість субблоків у зображенні розміром $M \times M$ дорівнює $(M/N)^2$. Т.ч., сумарна обчислювальна складність 2-го варіанту визначається, як $O(M^2/N^2) \times O(N^2)$, що спрощується до $O(M^2)$. Операції обчислення середнього значення не впливають на асимптотичну складність, оскільки вони виконуються в межах обробки блоку за $O(N^2)$. Хоча асимптотична складність другого й першого варіантів збігається, однак реальний час виконання може бути дещо більшим через додаткові операції обчислення середнього значення (*для всіх субблоків*). В цілому, порівняно з першим варіантом, другий варіант згладжування є більш ефективнішим (*з точки зору формування потрібних стартових умов для виконання кодування методом серій*), оскільки заміна на середнє значення враховує всі пікселі блоку, що забезпечує підтримку/формування більш однорідних ділянок зображення. Однак обчислення середнього значення яскравості всіх субблоків, додає витрати, які можуть бути помітними в разі використання великих субблоків (*наприклад, більш ніж 11×11 ел.*), чи великих розмірах вихідного зображення та/чи на пристроях із низькою продуктивністю.

Третій варіант. Вихідне зображення поділяється на субблоки потрібного розміру $N \times N$. Після цього для кожного субблоку обчислюється різниця між яскравістю всіх можливих пар пікселів, що відповідає попарному порівнянню N^2 елементів. В разі, якщо хоча б одна пара пікселів дала різницю, що перевищує заданий поріг закруглення « P_z », то цей блок залишається без змін (*як спосіб збереження можливого контуру*). У випадку, якщо жодне порівняння не перевищує поріг « P_z », усі значення пікселів змінюються на середнє значення яскравості. Обчислювальна складність обробки одного блоку становить $O(N^4)$, оскільки виконується попарне порівняння всіх N^2 ел., а кількість таких пар дорівнює $C(N^2, 2) = N^2(N^2 - 1) / 2$. У разі заміни вихідних значень, обчислення середнього значення всіх N^2 елементів, потребує $O(N^2)$ операцій, але ця складність є менш значущою порівняно з $O(N^4)$. Загальна кількість блоків у зображенні розміром $M \times M$ дорівнює $(M/N)^2$. Т.ч., складність цього варіанту обчислюється, як $O(M^2/N^2) \times O(N^4)$, що спрощується до $O(M^2 \times N^2)$. Ця складність вказує на квадратичну залежність, як від розміру вихідного зображення, так і від розміру субблоків, що робить цей варіант непрактичним для великих субблоків, великих зображень та систем з обмеженою обчислювальною потужністю.

Так, наприклад, для вихідного зображення розміром 1050×1050 пікс (М = 1050) та субблоків 7×7 ел. ($N = 7$), загальна складність складає $1050^2 \times 7^2 \approx 54$ млн. операцій. А для субблоків розміром 3×3 ел., вона вже становитиме $1050^2 \times 3^2 \approx 9$ млн. операцій, що є меншою порівняно з $N = 7$, та перевищує складність інших варіантів. При цьому, цей варіант забезпечує більш ретельний аналіз структури зображення, що може бути корисним для випадків, де зображення не рясніє частими переходами яскравості сусідніх елементів і створює для стеганоаналітика комфортні умови для візуальної локалізації (виявлення) можливих змін початкового стану окремих елементів або ділянок. Однак, порівняно висока обчислювальна складність робить цей варіант непрактичним для більшості випадків застосувань при умові великих значень M чи N , що декілька знецінює його практичне використання в реальних сценаріях, особливо на пристроях з обмеженою потужністю або в умовах дефіциту ресурсів.

3. Оцінка обчислювальної складності процедур передобробки вихідних даних

Результати експериментальної оцінки обчислювальної складності реалізованих процедур, розглянемо на прикладі 2-го варіанту передобробки, як найбільш збалансованого з точки зору наслідків згладжування. В межах моделювання досліджувалися часові характеристики роботи тестового алгоритму, вплив розмірності використовуваних субблоків і параметрів згладжування (P_z) на якість відтворення зображення, яка оцінювалась за показником $PSNR$ (пікового значення C/I). Окремо проведено розрахунок кількості сформованих ОБ та ймовірності перепаду яскравості для декількох типів тестових зображень й їх перетворених копій, отриманих після процедур передобробки за вар. №2, та наведено оцінку обчислювальної складності цього варіанту для обраних зразків зображень. В якості тестових зображень були обрані характерні зображення 3-х різних типів (Мнемосхема, Пейзаж і Пейзаж (два останні в варіанті «Комп'ютерна графіка», тобто CG)), що відрізняються значеннями ймовірності перепаду яскравості [10] між сусідніми пікселями (див. рис. 1). Використання характеристики ймовірності перепаду яскравості між сусідніми елементами, дозволяє визначити загальний рівень текстурної складності вихідних зображень для наступного застосування до них, найбільш збалансованих параметрів згладжування. Також, на рис.1 наведено відповідну схему розгортки (тобто, вибірки елементів для реалізації тих чи інших процедур обробки (у даному випадку, оцінки ймовірності перепаду яскравості)), яка використовувалася в межах даного циклу тестових випробувань. Важливо підкреслити, що діюча схема розгортки є одним із ключових параметрів, якій забезпечує послідовне виконання 2-х різних функцій: - на етапі передобробки визначає послідовність обходу й аналізу вихідних даних, а на етапі формування масиву довжин серій ОБ, забезпечує стійкість контенту до спроб його неавторизованого вилучення [11-13], так як тільки легітимним користувачам відома її діюча схема. Вочевидь, що в залежності від налаштувань алгоритму схеми розгортки на етапі передобробки і формування серій ОБ можуть відрізнятися. В цілому, різні схеми організації розгортки серій ОБ відповідають різним станам відповідного елементу складеного ключа екстрактора даних [3,11]. Використання різних схем розгортки та способів вибірки діючих пар параметрів (тобто, безпосередньо сам ОБ + довжина серії) або тільки їх окремих елементів (наприклад, тільки самого ОБ), формує широке комбінаторне поле для протистояння спробам неавторизованого вилучення контенту, посилюючи роль цього елемента в структурі ключа екстрактора [3]. Т.ч., використання різних способів організації схем розгортки та вибірки її окремих складових, утворює окрему позицію (див. роботи [11-13]) в загальній структурі складеного ключа екстрактора даних [3].

В межах даної роботи на обох етапах алгоритму (згладжування та формування серій ОБ), було використано одну й ту ж схему розгортки «По рядках» (Рис.1(в)). Слід зауважити, що використана схема розгортки не є обчислювально складною. Водночас застосування більш складних схем розгортки значно ускладнює роботу атакуючого та підвищує загальну стійкість контенту до спроб його «злому» [14-15]. Зокрема, двохпрохідні та випадкова схеми, значно посилюють візуальну фрагментацію вихідного контенту, в разі хибного підбору діючих параметрів кодування контенту. Іншими словами, в даному разі, зростає кількість сформованих серій ОБ і розширюється комбінаторне поле можливих варіантів їхньої обробки. З одного боку це виглядає дуже добре, але підвищується обчислювальна складність процедур, що суперечить загальному вектору зусиль, стосовно зниження обчислювальної складності всього алгоритму в цілому [2]. Детальний аналіз цих взаємопов'язаних процесів, наведено в роботах [11-15].

Отримані в ході моделювання часові характеристики для тестових зображень різного типу (див. рис.1 (а,б,г)) в умовах застосування 2-го варіанту передобробки, наведено в табл. 1. У ній наведено результати виконання п'яти однократних повних циклів процедур згладжування та

обчислений середній час їх виконання [4]. Для порівняння використовувалися два варіативні параметри: - розмірність субблоків N та поріг закруглення « P_z », що дозволяє оцінити їх вплив на обчислювальну ефективність і якість згладжування для різних типів тестових зразків.

Ймовірність перепаду яскравості/кольору пікселів є важливою характеристикою цифрових зображень, що має суттєве значення у задачах їх аналізу, класифікації та сегментації [10]. Під «перепадом» будемо розуміти зміну значення відповідного параметра (в даному разі яскравості) між сусідніми елементами зображень, згідно з вибраної схеми розгортки (тобто, послідовності вибірки потрібних значень), як це показано на рис. 1 у роботі [15]. Ця величина трактується, як імовірність випадкової події, котра відповідає переходу між діючими станами яскравості сусідніх пікселів чи блоків. Вона залежить від статистичних властивостей конкретних зображень, їх структури та застосованої шкали квантування складових елементів.

Для оцінки ймовірності перепаду яскравості до уваги береться довжина серій однакових пікселів або цілих субблоків (у межах моделювань, аналогічних до [7,16]). Це дозволяє виділити умовні ділянки з високою та низькою структурній складністю, що є принципово важливими при подальшій обробки зображень. Ймовірність перепаду яскравості, опосередковано характеризує інтенсивність переходів між різними рівнями яскравості або кольоровими відтінками сусідніх (за розгорткою) елементів. Значний перепад вказує на складне - насичене різними деталями зображення, тоді як поступові, плавні або протяжні зміни структури зображень свідчать про певну однорідність зображення й низький рівень його деталізації, що зумовлює низькі значення відповідної ймовірності.

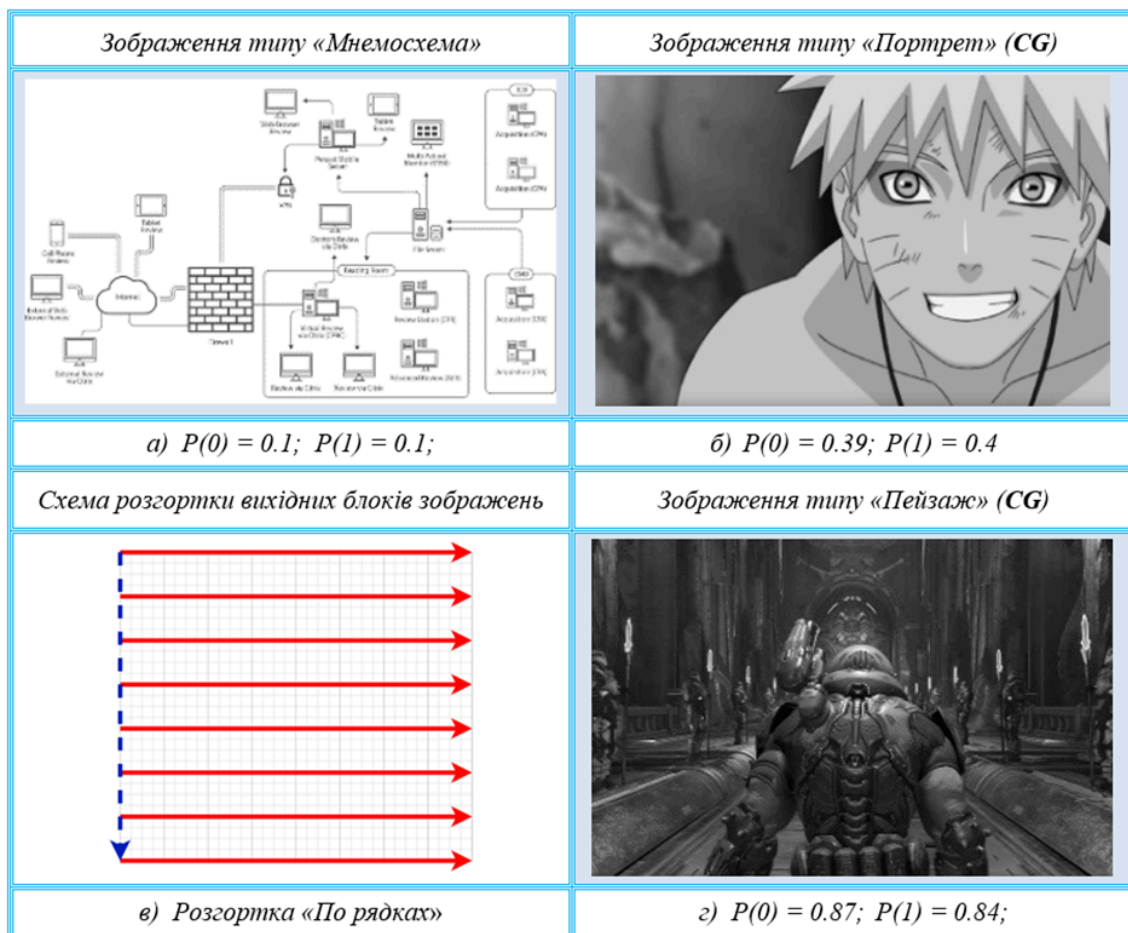


Рис. 1 – Вихідні тестові зображення (а, б, г) та використана схема розгортки (в)

Fig. 1 – Source test images (a, b, d) and the scanning scheme used (c)

Таблиця 1. Час виконання* операцій для 2-го варіанту обробки тестових зображень
 Table 1. Execution time* of operations in the second processing variant for different image types

Значення порогу закруглення (Pz)	Тип тестового зображення					
	Мнемосхема		Портрет (Комп. графіка - CG)		Пейзаж (Комп. графіка - CG)	
	N = 3	N = 7	N = 3	N = 7	N = 3	N = 7
Pz = 3	0.498	0.501	0.479	0.516	0.497	0.51
Pz = 7	0.501	0.518	0.477	0.504	0.491	0.514
Pz = 14	0.493	0.51	0.471	0.515	0.517	0.567

* - Час виконання [с] при різних розмірностях блоків [розраховано середній час за результатами n'яти однократних повних циклів процедур згладжування]

У межах даного циклу досліджень, оцінка ймовірності перепаду яскравості виконувалась відразу у двох просторових метриках: - *загально* і *локально* (див. рис. 1 в [10]). Перший варіант (далі позначається, як « $p(0)$ ») полягає в обчисленні ймовірності для всього вихідного масиву/кадру зображення. Другий варіант (позначається, як « $p(1)$ ») полягає в обчисленні ймовірності перепаду окремо для кожного із субблоків (розміром $N \times N$), на які поділено вихідне тестове зображення. Відповідно, у табл. 2 представлено порівняльні результати обчислення ймовірностей перепаду яскравості $P(0)$ та $P(1)$ вихідних зображень після реалізації процедур згладжування згідно з процедурами Вар.№2 (див. п.2). Розрахунки проведено для 3-х різних значень параметру порогу закруглення P_z (3,7,14 градацій яскравості), котрі відповідають різним режимам обробки та 2-х розмірностей субблоків (3×3 та 7×7 ел.). Значення ймовірностей надано у десятковому форматі, що дозволяє якісно оцінити структуру оброблюваного зображення й класифікувати його тип.

Таблиця 2. Ймовірність перепаду яскравості після згладжування для 3-х типів зображень
 Table 2. Probability of brightness difference after smoothing for 3 types of images

Поріг загрублення (Pz)	<i>P(0) – покадровий аналіз (загальна статистика)</i>					
	Мнемосхема		Портрет (CG)		Пейзаж (CG)	
	<i>N = 3</i>	<i>N = 7</i>	<i>N = 3</i>	<i>N = 7</i>	<i>N = 3</i>	<i>N = 7</i>
Pz = 3	0.006;	0.007;	0.029;	0.02;	0.05;	0.022;
Pz = 7	0.006;	0.007;	0.032;	0.025;	0.063;	0.033;
Pz = 14	0.007;	0.007;	0.033;	0.029;	0.073;	0.048;
<i>P(1) – блочний аналіз (локальна* статистика)</i>						
Pz = 3	0,003;	0,005;	0,023;	0,016;	0,027;	0,01;
Pz = 7	0,003;	0,006;	0,028;	0,024;	0,045;	0,023;
Pz = 14	0,004;	0,006;	0,03;	0,029;	0,06;	0,04;

* - Ймовірності отримані для тестових зображень після процедур згладжування. Ці значення дозволяють оцінити вплив згладжування на структуру зображень та ступінь їх зміни яскравості.

Використання різних розмірностей субблоків мало на меті продемонструвати їх взаємозв'язок (*через ймовірність*) з одержуваними наслідками перетворень. Так, блоки меншої розмірності забезпечують помірне згладжування з мінімальним - щадним впливом на дрібні деталі, тоді як більші блоки демонструють інтенсифікацію процесу, що помітно знижує локальну варіативність (див. Табл.2, стовпці $N=7$ для «Портрет CG» і «Пейзаж CG») чим зумовлює появу певних артефактів (*відносно оригіналу*) та декілька збільшує обчислювальну складність. Т.ч., застосований підхід дозволяє оцінити, яким чином розмірність субблоків й параметр « P_z » впливають на кінцеві результати обробки, які, в свою чергу, надають можливість забезпечити компроміс між збереженням деталей, зменшенням шумів й створенням однорідних ділянок зображень (що є вкрай корисним для формування масиву серій ОБ та зменшенням обчислювальної складності загального алгоритму на наступних етапах алгоритму [4]).

При оцінці ймовірності перепаду для всього кадру ($P(0)$), спостерігається загальна тенденція на її зростання із збільшенням P_z , незалежно від розмірності субблоків (N). При цьому, збільшення розмірностей блоків, призводить до суттєвого зменшення ймовірності перепаду яскравості (табл.2, стовпці «Портрет CG» і «Пейзаж CG»), тобто згладжування текстури вихідного зображення посилюється. Однак із зростанням значення « P_z » ця тенденція помітно нівелюється. Так, наприклад: - для зображення типу «Пейзаж CG» при розмірностях блоків 3×3 та 7×7 ел., інтенсивність процесу згладжування уповільнюється в 1,5 рази (з 2,27 до 1,52). Причому для умов локальної статистики ($P(1)$), для таких же параметрів обробки (N та P_z), відповідна різниця стає ще більшою – в 1,8 рази (з 2,71 до 1,5; $2,71/1,5=1,81$). Крім того, слід враховувати той факт, що збільшення умовної верхньої межі закруглення параметру « P_z », в межах кожної розмірності субблоків, неминуче призводить до погіршення ефекту вирівнювання вихідної текстури через збереження набагато більшої кількості дрібних (незначних) перепадів яскравості в оброблюваних блоках. Інакше кажучи, ефект згладжування значно більшою мірою залежить від використовуваної розмірності блоків і обраного варіанту їх обробки, ніж від тенденції збільшення параметра « P_z ».

У режимі блочного аналізу (тобто, $P(1)$) ймовірності «перепаду» для всіх типів зображень, дещо нижчі, що відповідає більш стабільним текстурам для кожного з отримуваних субблоків. Це свідчить про ефективність механізму блокової декомпозиції з усередненням перепадів яскравості складових елементів.

Відносно зображень типу «**Мнемосхема**», обчислення *локальної* статистики очікувано дає більш низьку ймовірність перепаду яскравості (однорідність), ніж її розрахунок для всього кадру, причому збільшення верхньої межі закруглення параметру « P_z », практично не впливає на процес згладжування, що обумовлюється специфічними особливостями структури цих зображень. В цьому сенсі, збільшення розмірностей субблоків, призводить до значно більш очевидніших результатів, причому, в даному випадку, радикально відмінним від наслідків обробки інших типів зображень (див. табл.2). Ця відмінність полягає у зростанні вірогідності перепаду яскравості елементів (*тобто тенденції збільшення структуризації текстури*) при збільшенні розмірності використовуваних блоків (в даному прикладі з 3 до 7 ел.). Причому в умовах обчислення локальної статистики ($P(1)$), ця тенденція є більш вираженою. В якості коментаря, такої нетипової поведінки спостережуваного процесу, можна припустити, що: - у разі обробки мнемосхем при збільшенні розмірів субблоків, зростає ймовірність «захвату» окремих ділянок контурів та/чи фрагментів об'єктів із однотонною заливкою (яскравістю)). Природно, що на малих блоках такий процес є менш виражений. І в першу чергу, така ситуація обумовлена саме природою таких зображень, що містять велику кількість однотонних областей і протяжних контурів виключно правильної форми, котрі формують основні об'єкти сцени, які відображаються. Очевидно, що при таких відмінних рисах цього типу зображень (рис.1(a)), варіювання порогом закруглення « P_z » не призводить до таких специфічних наслідків. Вони

(наслідки) виявляються тільки при досягненні значень обраного порога (P_z), порівнянних з рівнем контрасту, що притаманний для основних контурів. А така ситуація є неприйнятною, з погляду завдань стеганографії, так як вихідне зображення зазнає неприпустимих змін свого вихідного стану. В цілому, отримані результати (табл.2) демонструють, що перехід від глобального до блокового розрахунку ймовірності покращує точність її оцінки для окремих ділянок зображень, з помітною тенденцією зменшення ймовірностей при збільшенні використовуваних блоків. Одержані відомості слугують основою для подальшого аналізу впливу параметрів обробки на якість перетворень зображень на наступних етапах алгоритму.

Слід зазначити, що процедури згладжування суттєво змінюють фактуру зображень, впливаючи на розподіл яскравості та градієнтів ймовірності її перепаду [10]. Зокрема, при щадному/слабкому згладжуванні ($P_z = 3-5$), зберігається значна частка локальних перепадів, що відображається у декілька більших значеннях ймовірностей. Але з ростом верхньої межі припустимого закруглення яскравості ($P_z = 7-14$) починається певне розмиття контурів й незначне зменшення деталізації, що призводить до виникнення на зображенні візуально малопомітних артефактів у вигляді масштабування однорідних (схожих за структурою блоків) ділянок/фрагментів що, власне, і визначає процес зменшення ймовірності перепаду яскравості, порівняно з вихідним масивом зображення (див. рис. 3 в роботі [10]). Таким чином, «сильне» згладжування може призводити до втрати критичної інформації про структуру зображення, знижуючи його чіткість і, потенційно, погіршуючи результати подальшої сегментації чи розпізнавання об'єктів. Це підкреслює необхідність підтримки балансу між тах можливими параметрами згладжування (значення « N » і « P_z ») та збереженням потрібної деталізації оброблюваних зображень. Забезпечення цього балансу є ключовим аспектом для підтримки візуально незмінної якості оброблюваних зображень, особливо в задачах, що потребують точного розпізнавання об'єктів чи складних текстур цих зображень.

На рис. 2-4 представлені тестові зображення після застосування процедур 2-го варіанту згладжування, а також відповідні залежності кількості сформованих серій ОБ [17] на першому етапі алгоритму [4], в умовах застосування різних значень параметра P_z . Ці візуалізації дозволяють наочно оцінити, яким чином параметри згладжування впливають на структуру й візуальну якість зображення та, в наступному, кількість серій ОБ (вже з «власним» пороговим значенням, використовуваним при порівнянні вмісту сусідніх блоків).

Представлені залежності (див. рис. 2-4(ж,з)) характеризують вплив розміру субблоків ($N \times N$) і значення параметра « P_z » на кількість сформованих серій ОБ для випадку розгортки типу «По рядкам» [4,11]. У цьому контексті аналіз наведених значень $PSNR$ (пікове співвідношення сигнал/шум) дозволяє кількісно оцінити якість зображень після їх згладжування, що є важливим для кількісного порівняння різних підходів до обробки. Отримані результати свідчать про те, що коректний вибір параметрів передобробки (контейнеру і контенту) значно підвищує ефективність загального алгоритму, знижуючи його обчислювальну складність без помітних втрат у візуальній якості перетворених зображень. Безумовно, що використання малих розмірностей матриць згладжування вносить менший рівень спотворень (зразки (а,в,д) на рис.2-4) при збереженні хороших стартових умов для відпрацювання етапу формування серій ОБ (гістограми (ж) на рис.2-4). При цьому, залежно від типу зображення, різниця в кількості серій, що формуються (див. гістограми (ж) і (з) на рис.2-4) при різних розмірностях блоків, відрізняється найбільш істотним чином (в 4-6,5 рази). Однак, навіть така істотна відмінність у кількості формованих серій не зменшує цінність отриманого кінцевого ефекту: - створення умов для зниження обчислювальної складності алгоритму (на етапі кодування з перетворенням [4]) зі збереженням високої якості вихідного зображення. Як приклад, на мініатюрах (д) на Рис.2-4 представлені зразки з найкращим співвідношенням С/Ш (зелений фон). Відповідно, на зразках (Рис.2-4(б), червоний фон) відображені результати

обробки з найгіршою якістю відновлення для обраного діапазону налаштувань: - $N = 7$, тобто великі блоки та $P_z = 3$, тобто більша чутливість при порівнянні вибраних пар i , відповідно, велика кількість змін, що вносяться в вихідні значення яскравості. Попарне порівняння зразків (д) і (б) знімає всі питання щодо якості одержуваного результату.

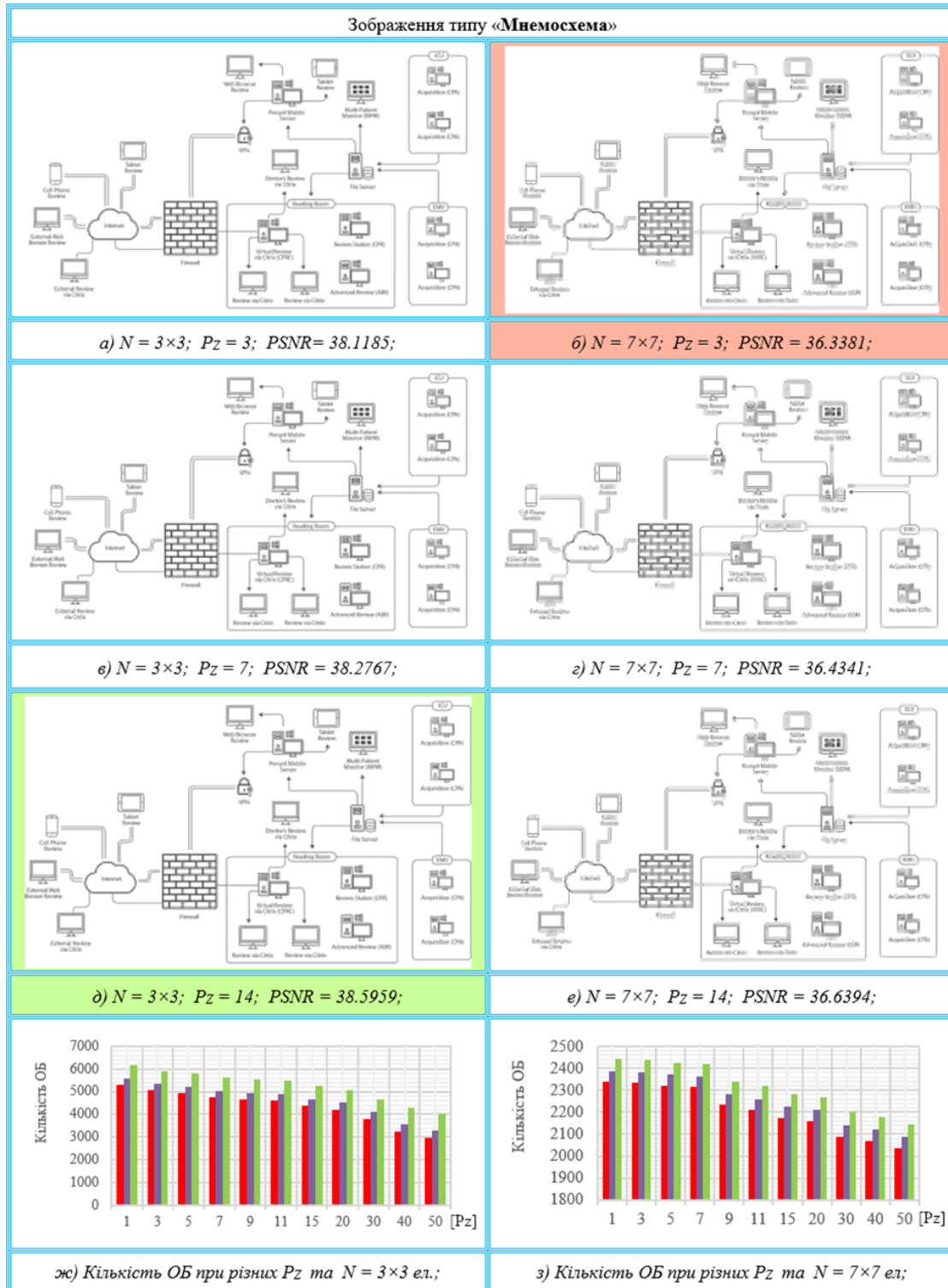


Рис. 2 – Кількість ОБ в зображенні «Мнемосхема» для різних блоків (N) і значень « P_z »
 Fig. 2 – Number of BBs in the «Mnemonic scheme» image for different blocks (N) and « P_z » values

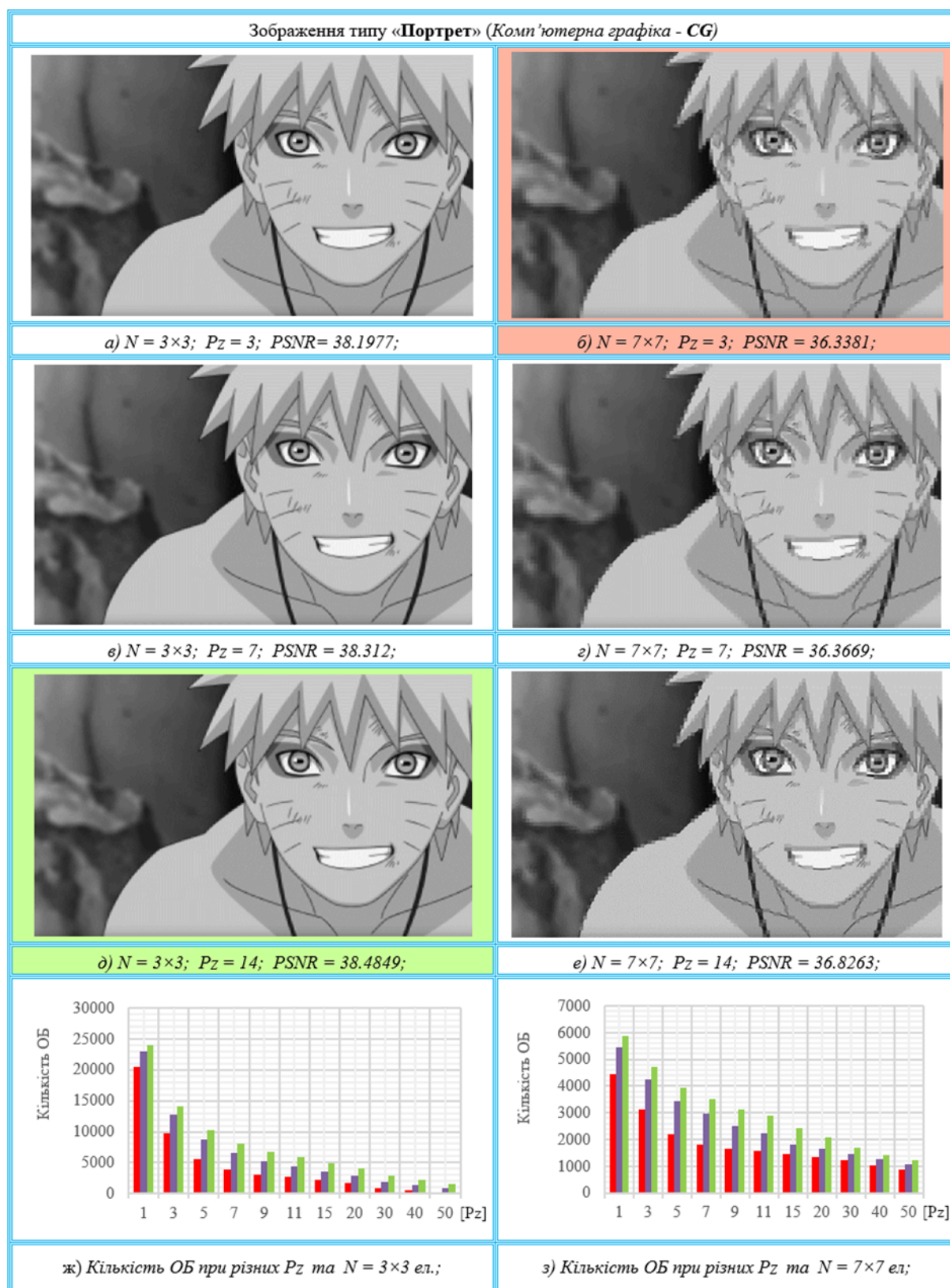


Рис. 3 – Кількість ОБ в зображенні «Портрет» для різних блоків (N) і значень « P_z »
 Fig. 3 – Number of BBs in the «Portrait» image for different blocks (N) and « P_z » values

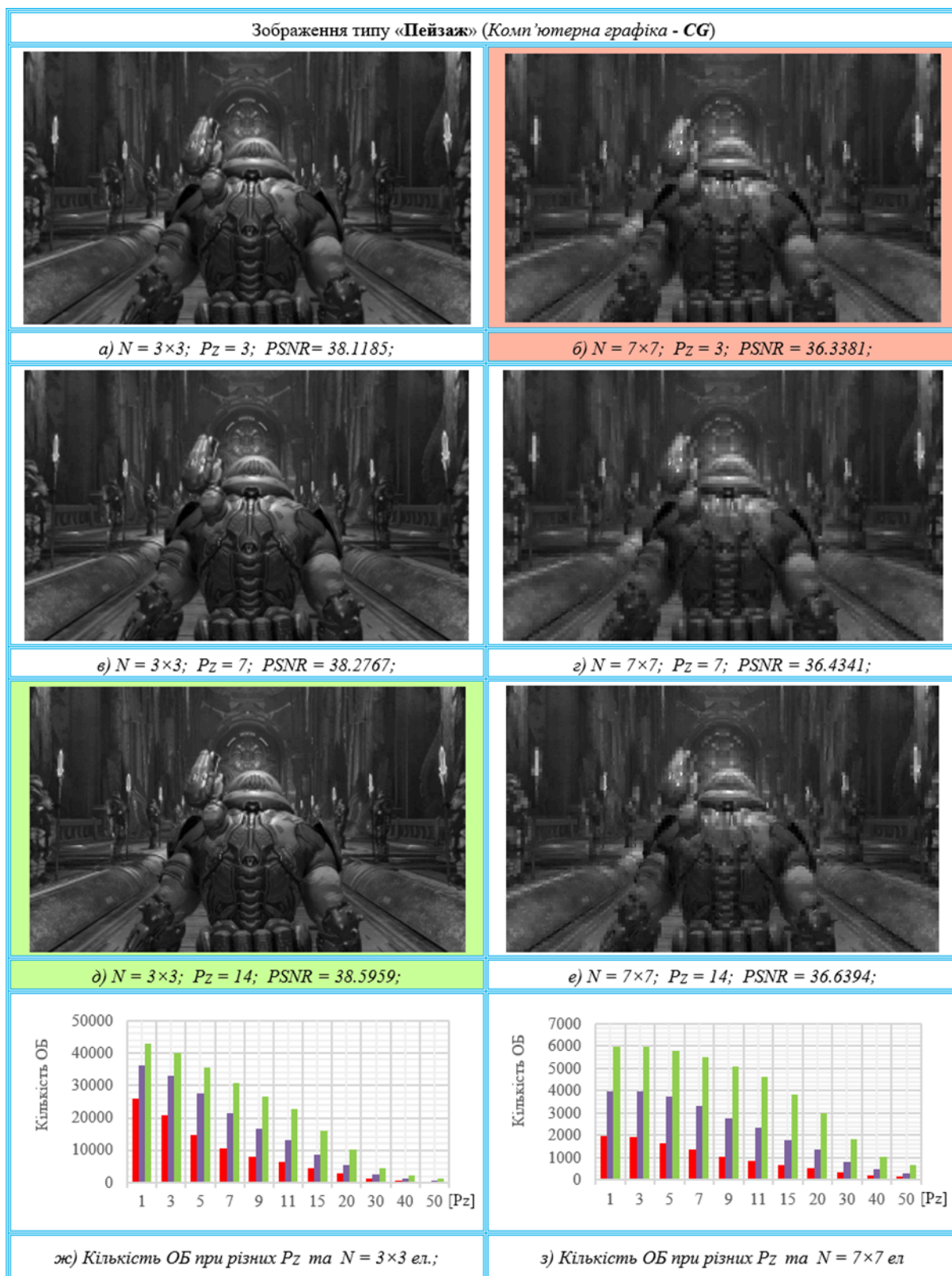


Рис. 4 – Кількість ОБ в зображенні «Пейзаж» для різних блоків (N) і значень « P_z »
 Fig. 4 – Number of BBs in the «Landscape» image for different blocks (N) and « P_z » values

При цьому динаміка прогресу, в частині зменшення візуальних артефактів, добре простежується і в рамках кожного з окремо взятих стовпців на Рис.2-4.

На рис. 5 представлені гістограми значень $PSNR$ [1,5,8] в залежності від різних параметрів обробки для 2-го варіанту згладжування. Ці результати додатково підтверджують необхідність збалансованого підходу до вибору діючих параметрів обробки, що забезпечує потрібний рівень згладжування текстури без втрати важливих деталей зображень.

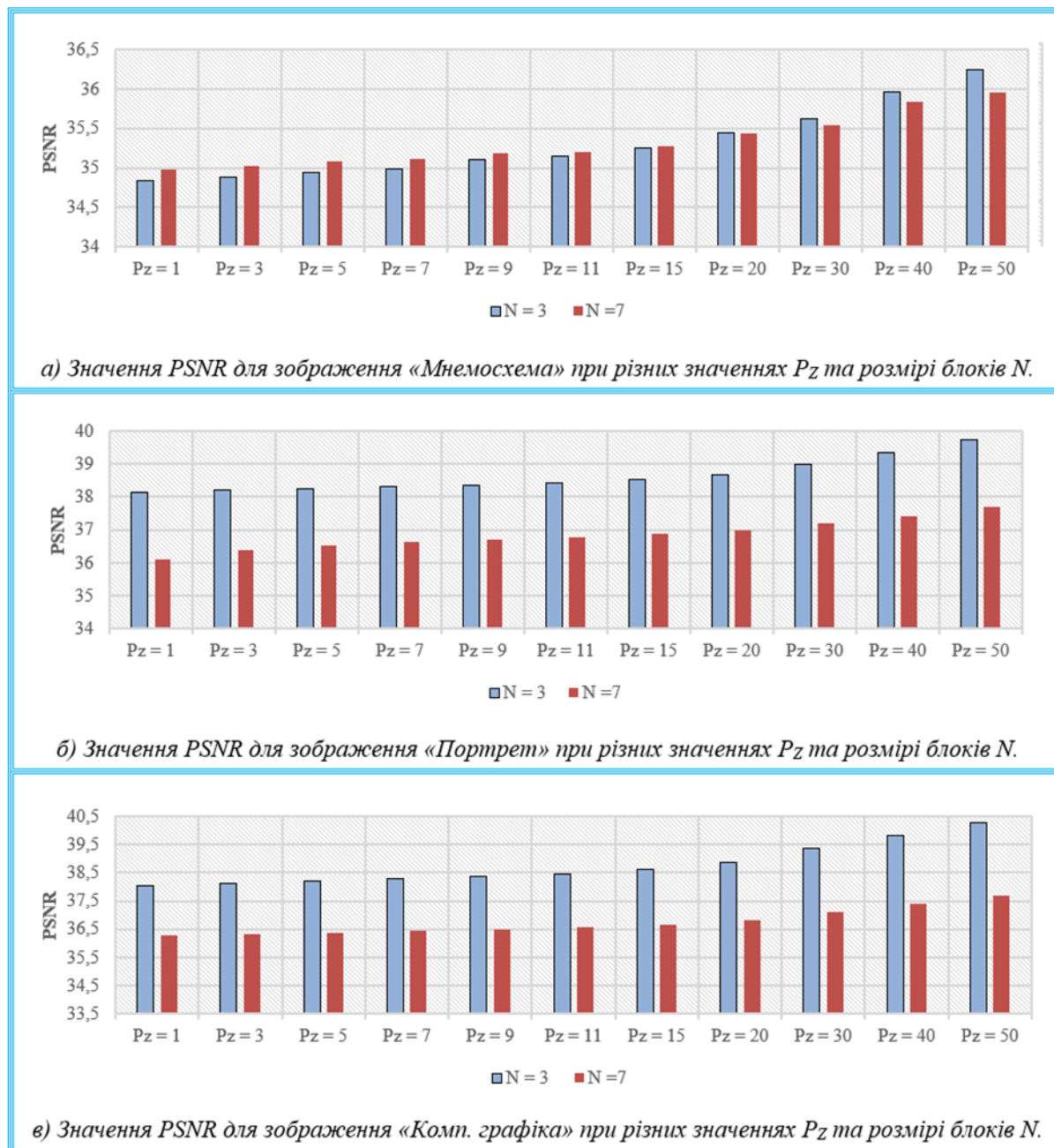


Рис. 5 – Значення $PSNR$ в умовах зміни параметрів P_z та N для 2-го варіанту згладжування
 Fig. 5 – $PSNR$ values in conditions of changing P_z and N parameters for the 2nd smoothing variant

Отримані дані дозволяють оцінити ефективність різних способів обробки, визначити оптимальні параметри та досягти балансу між якістю зображення та обчислювальною складністю алгоритму для подальшої інкапсуляції даних. Це, у свою чергу, впливає на базу можливих перестановок для діючих параметрів серії та може підвищувати помітність

артефактів. При цьому ОБ більшої розмірності менш схильні до зростання кількості сформованих серій, ніж блоки малої розмірності [4].

Виходячи з наведених результатів, можна констатувати, що: - зменшення розмірності матриць згладжування (субблоків) та збільшення значення параметра P_z , в умовах використання 2-го варіанту передобробки, призводять до зростання ймовірності перепаду яскравості (див. табл.2), тобто сприяють збереженню більш високої якості оброблюваних зображень, ніж за інших варіантів налаштувань.

Враховуючи природно складнішу структуру зображень типу «*Пейзаж*» (в даному разі Комп.Графіка (CG)), результат їх обробки дає безумовно більшу кількість формованих опорних блоків (тобто більше серій), порівняно з будь-якими іншими типами зображень (див. *фрейм (ж)* на рис.2-4). При цьому, зі збільшенням розмірності використовуваних субблоків, отриманий результат, за кількістю серій, зменшується в рази (див. *фрейми (ж) і (з)* на рис.2-4). Однак для більш цікавих, з точки зору застосовності стегановставки, зображень («*Портрет*» та «*Пейзаж*»), використання на етапі передобробки, блоків малої розмірності дає однакову динаміку змін при практично збігаючихся результатах обробки (див. Рис.5 (б-в)). Іншими словами, збільшення розмірності вікна згладжування, помітно погіршує якість вихідних зображень (див. *червоний фрейм (б)* на рис.3-4), проте дає суттєвий вииграш зі зменшення часу обробки даних на наступних етапах алгоритму за рахунок значного зменшення кількості блоків, що вимагають їх обробки (дискретне косинусне перетворення [4,7]). Порівняння фреймів (ж) і (з) на рис. 2-4, наочно підтверджує цей факт.

В цілому, оптимальними параметрами налаштувань для забезпечення збалансованого ефекту між якістю отримуваних зображень, кількістю сформованих серій ОБ [12,17] та забезпечуваною обчислювальною ефективністю є: - розмірність матриць згладжування (субблоків) від 3 до 5 елементів та значення порогу закруглення P_z у межах від 3 до 15 градацій яскравості. Саме такий діапазон налаштувань створює потрібні умови для формування масиву серій ОБ, що забезпечує потрібні перетворення на наступних етапах алгоритму [17]. Крім того, розширений аналіз всієї сукупності результатів моделювань показує, що обрані параметри згладжування сприяють високій адаптивності алгоритму до різного ступеня деталізації зображень [4]. Це дозволяє ефективно масштабувати розглянуті механізми для обробки не лише класичних типів зображень [7], а й для інших, варіацій візуального контенту (наприклад, штучно створених зображень типу «*Комп'ютерна Графіка*» (рис.3-4), з притаманними до них особливостями текстури). Така процедурна адаптивність відкриває широкі можливості для подальших досліджень і вдосконалення розроблених підходів до обробки зображень з урахуванням їхнього змісту та одержуваного статистичного диспаритету в динамічній системі комбінаторних пар «*контент – контейнер*», що створює необхідні передумови для розробки більш гнучких і енергоефективних алгоритмів стегановставки, пристосованих для роботи в різних умовах (обмеженнях) та з широкою номенклатурою вихідних даних.

4. Висновки

1. Використання різних варіантів попередньої обробки вихідних даних на початкових етапах алгоритму стегановставки, забезпечує необхідні передумови для формування однорідних серій ОБ, що є фактором впливу для подальшої ефективної інкапсуляції даних та покращення стійкості контенту до спроб його неавторизованого вилучення [3, 11-17].

2. Результати згладжування вихідних текстур та кількість формованих серій ОБ, залежать від типу зображень, розмірності блоків, порогу закруглення (P_z), використаної схеми розгортки [11,13,15] та обраного варіанту згладжування [4], що дозволяє адаптувати алгоритм до різних сценаріїв дій та ресурсних обмежень.

3. Використання різних схем розгортки серій ОБ відіграє ключову роль у забезпеченні компромісу між складністю реалізації алгоритму, його захисним потенціалом та обчислювальною ефективністю [11-16]. Схема розгортки визначає спосіб вибірки потрібних параметрів зображень, впливаючи на формування масиву ОБ та структуру викривлень атакованих зображень, що ускладнює неавторизовану екстракцію контенту. Таким чином, вибір схеми розгортки є критичним для балансу між безпекою та ефективністю алгоритму.

4. Ймовірність перепаду яскравості є ключовим параметром у цифровій обробці зображень [7]. Цей параметр дає змогу аналізувати текстурні та колірні характеристики зображень, виявляти зміни яскравості/кольору між сусідніми пікселями, а також оцінювати текстурну неоднорідність окремих ділянок зображень. Його використання сприяє вдосконаленню методів передобробки зображень, забезпечуючи кращу адаптацію алгоритмів до специфічних умов обробки, зокрема для задач стеганографії. Крім того, аналіз ймовірності перепаду яскравості дозволяє оптимізувати процеси сегментації зображень і виявлення об'єктів, що підвищує загальну ефективність і точність алгоритмів обробки зображень.

5. Збільшення верхньої межі закруглення параметру « P_z » на етапі передобробки вихідних даних, для будь-якої розмірності блоків, неминуче призводить до погіршення ефекту вирівнювання їх вихідної текстури. Тобто, ефект згладжування значно більшою мірою залежить від використовуваної розмірності блоків та обраного варіанту їх обробки, ніж від тенденції збільшення параметра « P_z ».

6. Оцінка обчислювальної складності процедур згладжування показує, що 1-й та 2-й варіанти мають однакову асимптотичну складність. Вони демонструють квадратичну обчислювальну складність $O(M^2)$, що робить їх оптимальними для систем з обмеженими ресурсами, забезпечуючи достатній рівень однорідності при помірних обчислювальних витратах. Третій варіант, зі складністю $O(M^2 \times N^2)$, забезпечує найвищу якість згладжування, але є непрактичним для великих зображень чи блоків, через високу ресурсомісткість, що обмежує його використання в реальних сценаріях дій.

7. Вибір параметрів попередньої обробки вихідних зображень (контейнеру й контенту) відіграє ключову роль у досягненні потрібного балансу отримуваних результатів. Оскільки зображення характеризуються різними текстурами та значними варіаціями деталей, тому правильне налаштування параметрів дозволяє чітко розділяти важливі елементи між основними деталями та фоновими ділянками. Це значно покращує якість інкапсуляції контенту, зменшуючи помітність артефактів і підвищуючи стійкість до виявлення прихованих даних.

8. Оптимальні значення розмірності блоків N від 3 до 5 та порогу закруглення P_z від 3 до 15 забезпечують баланс між збереженням візуальної якості зображень з різним контентом та ефективністю формування серій ОБ. Крім того, адаптивне згладжування малоінформативних областей, сприяє створенню однорідних блоків, що ускладнює статистичний аналіз і підвищує місткість контейнера для приховування інформації.

9. Варіювання розміром маски згладжування та типом зображення-контейнера дозволяє досягти компромісу між допустимим рівнем спотворень і кількістю сформованих ОБ [3]. Це забезпечує гнучкість у налаштуванні варіантів мультиплексування даних, де кожен рівень відповідає певній позиції в структурі композитного ключа екстрактора даних [3,17].

10. У подальшому планується провести експериментальну оцінку складності виконуваних процедур для різних схем розгортки й просторової орієнтації ОБ [11,13], що дозволить визначити загальні умови і обмеження, які впливають на забезпечення ресурсного консенсусу при обробці різних типів даних у комбінаторній системі «контент-контейнер».

Конфлікт інтересів

Автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів.

Список літератури

1. Fridrich, J. (2010). *Steganography in digital media*. Cambridge University Press.
2. Hassaballah, M. (Ed.). (2020). *Digital media steganography: Principles, algorithms, and advances*. Academic Press.
3. Honcharov, M., & Malakhov, S. (2024). Modeling attempts of unauthorized extraction of steganoccontent under different combinations of data key-extractor. *Débats scientifiques et orientations prospectives du développement scientifique* (pp. 234–245). <https://doi.org/10.36074/logos-01.03.2024.053>
4. Гончаров, М. О., & Малахов, С. В. (2021). Моделювання процедур підготовки даних стеганоалгоритма з багаторівневим мультиплексуванням контенту. *Комп'ютерне моделювання в наукоємних технологіях (КНМТ-2021): Матеріали 7-ї міжнар. наук.-техн. конф.* (pp. 118–122). ХНУ ім. В. Н. Каразіна. <http://surl.li/axsna>
5. Конахович, Г., Прогонов, Д., & Пузиренко, О. (2018). *Комп'ютерна стеганографічна обробка й аналіз мультимедійних даних*: Підручник. Центр навчальної літератури.
6. Shih, F. Y. (2020). *Digital watermarking and steganography*. CRC Press.
7. Pratt, W. K. (1978). *Digital image processing*. New York: John Wiley & Sons.
8. Кузнецов, О. О., Євсєєв, С. П., & Король, О. Г. (2011). *Стеганографія*: навч. посіб. Харків: Видавництво ХНЕУ.
9. Yahya, A. (2019). *Steganography techniques for digital images*. Springer International Publishing.
10. Малахов, С., & Гончаров, М. (2024). Синтез ймовірнісних карт переходів яскравості (градієнтів) зображень для покращення процедур стегановставки. *Grail of Science*, (47), 545–554. <https://archive.journal-grail.science/index.php/2710-3056/issue/view/20.12.2024/35>
11. Гончаров, М., & Малахов, С. (2023). Дослідження способів розгортки вихідних блоків зображення - стеганоконтенту як механізму протидії від несанкціонованої екстракції даних. *Science and Technology Today*, 4(18), 293–308. [https://doi.org/10.52058/2786-6025-2023-4\(18\)-293-308](https://doi.org/10.52058/2786-6025-2023-4(18)-293-308)
12. Малахов, С., Нарєжний, О., & Гончаров, М. (2023). Властивості серій опорних блоків стеганоконтенту та наслідки його несанкціонованого вилучення для різних схем розгортки серій. *Grail of Science*, (18-19), 204–211. <https://archive.journal-grail.science/index.php/2710-3056/issue/view/07.07.2023/17>
13. Гончаров, М., Малахов, С., & Колованова, Є. (2024). Результати моделювання різних схем просторової орієнтації та розгортки серій опорних блоків зображень для протидії несанкціонованої екстракції стеганографічних даних. *Комп'ютерні науки та кібербезпека*, (2), 58–70. <https://doi.org/10.26565/2519-2310-2023-2-06>
14. Лесная, Ю., Гончаров, М., Азаров, С., & Малахов, С. (2023). Візуалізація спроб несанкціонованої екстракції стеганоконтенту при помилковому визначенні діючих способів розгортки серій. *Grail of Science*, (24), 335–340. <https://doi.org/10.36074/grail-of-science.17.02.2023.061>
15. Лесная, Ю., Гончаров, М., Семенов, А., & Малахов, С. (2023). Моделювання розгортки серій опорних блоків зображення, як інструменту з протидії спробам несанкціонованої екстракції стеганоконтенту. *Collection of Scientific Papers «ЛОГОΣ»*, (March 31, 2023; Zurich, Switzerland), 109–115. <https://doi.org/10.36074/logos-31.03.2023.33>
16. Малахов, С., & Гончаров, М. (2024). Уточнення процедур формування серій опорних блоків зображень на етапі їх передобробки при реалізації процедур стегановставки. *Grail of Science*, (46), 694–700. <https://archive.journal-grail.science/index.php/2710-3056/issue/view/29.11.2024/34>
17. Лесная, Ю., Гончаров, М., & Малахов, С. (2021). Відпрацювання концепту багаторівневого мультиплексу даних гібридного стеганоалгоритму. Збірник наукових праць SCIENTIA. <https://ojs.ukrlogos.in.ua/index.php/scientia/article/view/17666>

MODELING AND EVALUATION OF THE COMPUTATIONAL COMPLEXITY OF THE MAIN PROCEDURES, THE INITIAL STAGES OF THE HYBRID STEGANOGRAPHIC ALGORITHM

Mykyta Honcharov¹, postgraduate student of the Department of Cybersecurity of Information Systems, Networks and Technologies; e-mail: m.honcharov@student.karazin.ua;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9790-7260>

Serhii Malakhov¹, Ph.D., Senior Researcher, Associate Professor of the Department of Cybersecurity of Information Systems, Networks and Technologies; e-mail: malakhov@karazin.ua; ORCID:

<https://orcid.org/0000-0001-8826-1616>

¹V. N. Karazin Kharkiv National University, Ukraine

Manuscript was received March 1, 2025; Received after review April 1, 2025;

Accepted May 2, 2025

Abstract. In today's environment of increasing cyber threats, steganography plays a key role in ensuring data confidentiality by hiding it in digital data arrays (images, sound, file systems, etc.). Unlike cryptography, steganography hides the very fact of information transfer, which makes it indispensable for data protection in information and communication systems with limited resources. The need to create energy-efficient and adaptive algorithms that combine content robustness, high container quality, and low computational complexity emphasizes the relevance of the research conducted. The paper evaluates the computational complexity of input data preprocessing procedures and determines their impact on the efficiency of subsequent data encapsulation. As a basis for modeling, one of the possible variants of smoothing low-informative areas of the source images was selected. The following assessments were carried out: - performance by execution time for different types of images; PSNR metric; probability of color brightness difference and number of formed basic blocks (BBs) of images. During the modeling, the consequences of smoothing the textures of the source images were investigated in the conditions of varying smoothing matrix sizes and the value of the pixel brightness difference. The number of basic operations (arithmetic, logical, comparisons) for each block was calculated and the overall complexity of the corresponding stages of the algorithm was determined. The experimental evaluation was performed by measuring the execution time of the procedures, evaluating the image quality using the PSNR metric, calculating the probability of brightness difference, and counting the number of formed series of BBs. To evaluate the effectiveness of the investigated procedures, test images with different textural characteristics were used. The obtained results confirmed that the pre-smoothing stage improves the initial conditions for the formation of BBs series (compared to their absence). The introduction of the smoothing stage ensures noise reduction in low-information areas, which contributes to increased block homogeneity and expands the range of combinatorics of available encoding parameters (as a way to counteract attempts at unauthorized content extraction). Flexible settings for block size and brightness coarsening threshold values for image elements allow the smoothing process to be adapted to different image types and the current resource limitations of the hardware platforms used. The proposed approach to preprocessing data creates the necessary conditions for forming BBs series, improves content robustness, and maintains a low level of visual distortion. Adaptive settings for smoothing parameters allow the algorithm to be used effectively on platforms with limited resources.

Keywords: *information security, threats, cyberattack, computational complexity, data encapsulation, unauthorized access, steganography, run-length encoding*

Conflicts of Interest: the authors declare no conflict of interest.

References

1. Fridrich, J. (2010). *Steganography in digital media*. Cambridge University Press.
2. Hassaballah, M. (Ed.). (2020). *Digital media steganography: Principles, algorithms, and advances*. Academic Press.
3. Honcharov, M., & Malakhov, S. (2024). Modeling attempts of unauthorized extraction of steganoccontent under different combinations of data key-extractor. *Débats scientifiques et orientations prospectives du développement scientifique* (pp. 234–245). <https://doi.org/10.36074/logos-01.03.2024.053>
4. Honcharov, M. O., & Malakhov, S. V. (2021). *Modeling data preparation procedures for a steganographic algorithm with multilevel content multiplexing*. Computer Modeling in High-Tech Technologies (KMNT-2021): Proceedings of the 7th International Scientific and Technical Conference (pp. 118–122). V. N. Karazin Kharkiv National University [in Ukrainian] <http://surl.li/axsna>
5. Konakhovych, H., Prohonov, D., & Puzyrenko, O. (2018). *Computer steganographic processing and analysis of multimedia data: Textbook*. Center for Educational Literature [in Ukrainian]
6. Shih, F. Y. (2020). *Digital watermarking and steganography*. CRC Press.
7. Pratt, W. K. (1978). *Digital image processing*. New York: John Wiley & Sons.
8. Kuznetsov, O. O., Yevseyev, S. P., & Korol, O. H. (2011). *Steganography: A textbook*. Kharkiv: KhNEU Publishing House [in Ukrainian]
9. Yahya, A. (2019). *Steganography techniques for digital images*. Springer International Publishing.
10. Malakhov, S., & Honcharov, M. (2024). *Synthesis of probabilistic brightness (gradient) transition maps of images to improve steganographic embedding procedures*. *Grail of Science*, (47), 545–554 [in Ukrainian] <https://archive.journal-grail.science/index.php/2710-3056/issue/view/20.12.2024/35>
11. Honcharov, M., & Malakhov, S. (2023). *Investigation of methods for unfolding original image blocks—steganoccontent as a mechanism for counteracting unauthorized data extraction*. *Science and Technology Today*, 4(18), 293–308 [in Ukrainian] [https://doi.org/10.52058/2786-6025-2023-4\(18\)-293-308](https://doi.org/10.52058/2786-6025-2023-4(18)-293-308)
12. Malakhov, S., Nareznyi, O., & Honcharov, M. (2023). *Properties of reference block series in steganoccontent and consequences of its unauthorized extraction for different series unfolding schemes*. *Grail of Science*, (18-19), 204–211 [in Ukrainian] <https://archive.journal-grail.science/index.php/2710-3056/issue/view/07.07.2023/17>
13. Honcharov, M., Malakhov, S., & Kolovanova, Ye. (2024). *Modeling results of various spatial orientation schemes and unfolding of reference image block series to counter unauthorized extraction of steganographic data*. *Computer Science and Cybersecurity* (2), 58–70 [in Ukrainian] <https://doi.org/10.26565/2519-2310-2023-2-06>
14. Lesnaia, Yu., Honcharov, M., Azarov, S., & Malakhov, S. (2023). *Visualization of attempts at unauthorized extraction of steganoccontent due to incorrect identification of active series unfolding methods*. *Grail of Science*, (24), 335–340 [in Ukrainian] <https://doi.org/10.36074/grail-of-science.17.02.2023.061>
15. Lesnaia, Yu., Honcharov, M., Semenov, A., & Malakhov, S. (2023). *Modeling the unfolding of reference image block series as a tool to counter attempts at unauthorized extraction of steganoccontent*. *Collection of Scientific Papers «ΑΙΟΓΟΣ»*, (March 31, 2023; Zurich, Switzerland), 109–115 [in Ukrainian] <https://doi.org/10.36074/logos-31.03.2023.33>
16. Malakhov, S., & Honcharov, M. (2024). *Refinement of procedures for forming series of reference image blocks at the preprocessing stage during the implementation of steganographic embedding procedures*. *Grail of Science*, (46), 694–700 [in Ukrainian] <https://archive.journal-grail.science/index.php/2710-3056/issue/view/29.11.2024/34>
17. Lesnaia, Yu., Honcharov, M., & Malakhov, S. (2021). *Development of the concept of multilevel data multiplexing in a hybrid steganographic algorithm*. *Collection of Scientific Papers SCIENTIA* [in Ukrainian] <https://ojs.ukrlogos.in.ua/index.php/scientia/article/view/17666>