

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СТЕГANOГРАФІЧНОЇ СИСТЕМИ ЧЕРЕЗ ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ

Розвиток комп'ютерних мереж призвів до збільшення об'ємів інформації, яка по них передається та, доволі часто, потребує захисту від несанкціонованого доступу. Поряд з криптографічними активно розвиваються стеганографічні методи приховування інформації. Ефективність стеганографічної системи залежить від багатьох факторів. Серед них слід виділити семантичне наповнення зображення-стегоконтейнера та способи реалізації самого алгоритму. В значно меншій мірі у науковій літературі приділено увагу дослідженню впливу методів обробки стегоконтейнера на ефективність стегосистеми. У цій роботі запропоновано модифіковану узагальнену модель стеганографічної системи, яка містить два додаткових блоки – блок методів покращання та блок еталонних критеріїв ефективності. Перед приховуванням стегоконтейнер опрацьовують методами попередньої обробки - покращання, корекції динамічного діапазону, усунення шумів тощо та перевіряють на відповідність критеріям ефективності стегосистем. Орієнтовні значення наведених критеріїв ефективності отримані на основі статистичних даних. В результаті проведених досліджень підтверджено, що методи приховування в частотній області (DCT, YASS) є більш ефективні у порівнянні з методами вбудовування в просторовій області (LSB). Методи з використанням нейронних мереж (CNN, U-Net) володіють ще більшою ефективністю. Проведено експериментальне моделювання впливу шуму та розмиття стегоконтейнера на основні параметри ефективності стеганосистеми з використанням алгоритму LSB. Встановлено, що метод вбудовування у найменш значущий біт завдяки адаптивності приховуваності забезпечує високу візуальну якість зображень навіть після вбудовування великого текстового повідомлення і при наявності розмиття. Імпульсний шум суттєво знижує візуальну якість сприйняття. Також негативно на збереження приховуваної інформації впливає стиск інформації, особливо, у випадку застосування методів вбудовування у просторовій області.

Ключові слова: ефективність стеганосистеми, обробка зображень, захист інформації, нейронні мережі, просторова та частотна область.

Вступ та формулювання проблеми

Зростання обсягів переданих даних та поширення цифрових технологій призводять до цього, що стеганографічні методи набувають все більшого значення як інструмент забезпечення конфіденційності інформації. Разом з цим ускладнюються умови їх застосування: з одного боку, зростає інтенсивність використання стиснення даних (зокрема, у форматах JPEG, HEVC), з іншого – розвиваються методи стегоаналізу, які здатні виявляти навіть незначні відхилення у структурі цифрового контейнера. Це призводить до необхідності постійного вдосконалення стеганографічних систем з урахуванням сучасних викликів і технічних обмежень. Серед основних напрямів досліджень стегоалгоритмів слід виділити алгоритмічні стратегії, спрямовані на зменшення виявлення прихованої інформації, методи підвищення стійкості до втрат при стисненні та цифровій обробці, підходи до попередньої обробки зображень з метою покращання структури контейнера для приховування, нейромереві та гібридні рішення, що поєднують криптографію та стеганографію, сучасні адаптивні та перцептивно керовані методи вбудовування, які враховують особливості зору людини та статистики зображення [1].

Встановлено, що між досліджуваними складовими ефективності стегосистем існує певна суперечливість – збільшення однієї призводить до зменшення іншої. Тому на практиці досягнення ефективності можливе через врахування всіх складових, у тому числі умов експлуатації, типу середовища та ресурсообмежень.

Метою цієї роботи є дослідження впливу методів обробки, зокрема, покращання зображень на ефективність стегосистем в цілому. Застосування методів попередньої обробки в стеганографічних системах має не лише забезпечити бажаний візуальний ефект, а й вимоги щодо підвищення ефективності стегосистеми, а саме стійкості, непомітності та збереження вбудованої інформації.

Аналіз літератури

Стеганографічні методи приховування інформації можуть бути реалізовані в просторовій або частотній областях. У кожного із них є як свої переваги, так і недоліки.

Проаналізуємо окремо методи, які реалізуються в просторовій і частотній областях.

Просторова область. Просторові методи працюють безпосередньо із значеннями інтенсивностей зображення-стежоконтейнера. Це методи вбудовування у найменш значущий біт LSB, метод з використанням різницевих значень PVD та інші. Основна мета таких методів – зробити зображення локально складнішим, щоб приховані біти повідомлення важче виявлялися. Це можливо досягнути через попередню обробку стежоконтейнера або через використання адаптивності.

В таблиці 1 наведено найбільш вживані методи опрацювання зображень-стежоконтейнерів в просторовій області.

Таблиця 1

Найбільш вживані методи опрацювання зображень-стежоконтейнерів в просторовій області

Метод	Призначення	Особливості
Метод адаптивного вирівнювання гістограми (CLAHE)	Підсилення локального контрасту	Маскує LSB-вставки, зростає ентропія
Білатеральний фільтр	Згладжування зі збереженням країв	Видаляє артефакти, не розмиває контури
Направлений фільтр (Guided filtering)	Покращання освітленості, деталізація	Адаптивне, швидке, без спотворень
Адаптивна гама-корекція (Adaptive Gamma Correction)	Контрастування та вирівнювання яскравості	Покращує помітність низькоконтрастних ділянок
Retinex	Вирівнювання тіней/освітленості	Покращує деталізацію

Першим у таблиці 1 наведено метод адаптивного вирівнювання гістограми з обмеженням за контрастом. Метод забезпечує підсилення локального контрасту та призводить до маскувння LSB-вбудовування і зростання ентропії інтенсивностей. Зазначимо, що подібні результати можуть забезпечити ще інші методи інших класів покращання зображень – розгяг динамічного діапазону, нерізкого маскувння, підсилення контрасту [2]. Білатеральний фільтр використовується для зменшення рівня шумів на зображенні. Його особливість полягає у тому, що зменшуючи рівень шумів в однорідних областях, він не розмиває краї об'єктів [3]. Направлений фільтр (Guided filtering) підвищує візуальну якість зображення через усунення шуму та підвищення контрастності [4]. Метод адаптивної гама-корекції забезпечує підсилення локальних контрастів та вирівнювання значень інтенсивностей по полю зображення. З точки зору стеганографії, такі перетворення збільшують частку прийнятних для вбудовування областей [5]. Метод Retinex забезпечує покращання зображень, особливо за умов низької освітленості [6]. Окрім наведених в таблиці 1 методів в в задачах стеганографії застосовуються також ще інші методи обробки та аналізу зображень.

Частотна область. Частотні методи обробки зображень в стеганографії є доречними, якщо стежоконтейнер зазнає стиску або стегоалгоритм працює у частотному просторі. Метою такого опрацювання є мінімізація компонентів, які можуть бути детектовані. Найбільш вживані методи опрацювання зображень-стежоконтейнерів у частотній області представлені в таблиці 2.

Метод дискретного косинусного перетворення може використовуватися для підсилення високочастотних ділянок спектру, які відповідають межах об'єктів на зображенні [7]. Для усунення шуму в частотній області застосовується хвильове порогове перетворення [8]. Подібні задачі усунення шуму та покращання якості виконують методи корекції фазових спотворень, BM3D [9, 10].

Таблиця 2

Найбільш вживані методи опрацювання зображень-стегоконтейнерів в частотній області

Метод	Призначення	Особливості
Підсилення країв через застосування дискретного косинусного перетворення (DCT)	Підсилення важливих частот	Корисно для JPEG-стего
Хвильове порогове перетворення	Видалення шуму	Усуває дрібні артефакти, не впливає на основний сигнал
Регулювання фази FFT	Корекція фазових спотворень	Покращує стійкість до атак у фур'є-просторі
BM3D (Обробка в блоках)	Покращання через блокову обробку	Висока якість, але ресурсозатратне
Усунення шуму	Видалення шуму зберігаючи структуру	Мінімальні втрати даних у структурованих ділянках

Модифікована узагальнена модель стеганографічної системи

При формуванні стегоконтейнера перед дослідником стоїть задача вибору методу попередньої обробки. Цей вибір ґрунтується на певних вимогах. Основні критерії вибору методів обробки стегоконтейнера представлені на рисунку 1.



Рис. 1. Основні критерії вибору методів обробки стегоконтейнера

Першочергово аналізуємо тип стеганографічного методу, який буде застосовуватися – LSB, DCT, YASS або інші. Це визначає область його реалізації – просторова чи частотна. Далі визначаємо мету застосування методів обробки зображення-стегоконтейнера – маскуванню змін, підвищення ентропії, згладжування артефактів. Щодо ступеня спотворення, то для випадку стеганографічних алгоритмів вони мають бути мінімальними. Для цього застосовується статистична метрика, яка обчислює середнє значення квадратних відхилень між прогнозованими та фактичними значеннями інтенсивностей RMSE. Коли поставлена строга вимога щодо низького значення RMSE, тоді доцільно застосовувати метод, який працює в частотній області. Для оцінки візуальних спотворень доцільно використовувати метрики, які враховують закони зорового сприйняття людини [11]. Методи попередньої обробки мають модифікувати або згладити характеристики зображень-стегоконтейнерів, на основі яких стегодектори, здебільшого статистичними методами, визначають вбудоване повідомлення. У випадку імплементації стеганографічних методів у мобільних пристроях, які характеризуються обмеженими ресурсами, важливою характеристикою є обчислювальна складність. Здебільшого у методів, які працюють у просторовій області, обчислювальна складність, є меншою, у порівнянні з методами, які реалізуються в частотній області.

Досліджені у роботі методи покращання зображень у просторовій і частотній областях, а також інші подібні підходи застосовують для підвищення ефективності стеганографічних систем. Це досягається через модифікацію стегоконтейнера. Відомо, що застосування методів

покращання може як покращити ефективність стegosистеми, так і понизити, залежно від цього, які параметри налаштувань методів покращання застосовані. На практиці складно точно встановити взаємозв'язок між параметрами методів покращання стегоконтейнера та кількісною оцінкою ефективності стegosистеми. Для вирішення цієї задачі нами запропоновано модифіковану узагальнену модель стеганографічної системи (рис. 2).

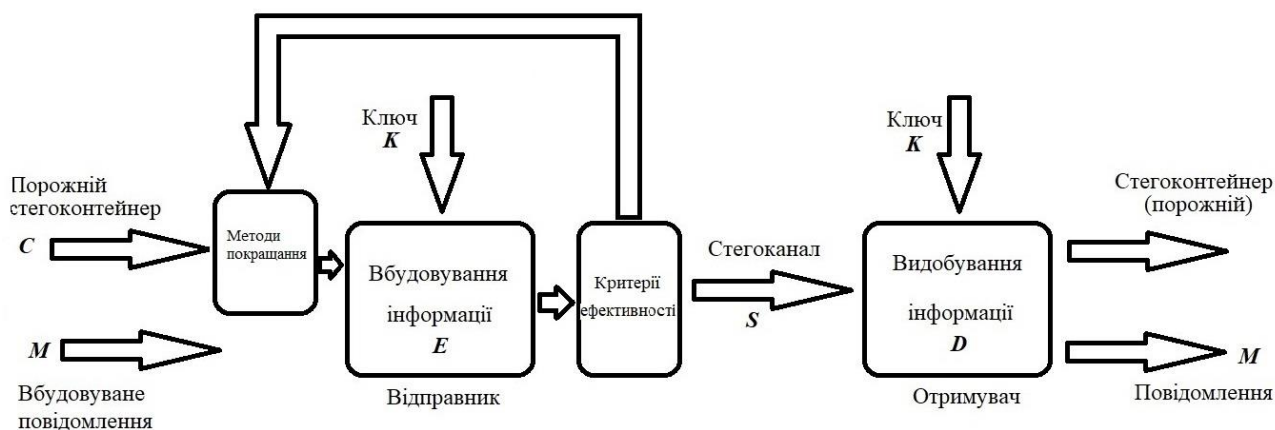


Рис. 2. Модифікована узагальнена модель стеганографічної системи

У порівнянні з відомою узагальненою моделлю стegosистеми [12] модифікована модель містить два додаткових блоки – блок методів покращання та блок критеріїв ефективності. Перед початком приховування стегоконтейнер обробляють методами покращання. Це можуть бути методи контрастування, корекції динамічного діапазону, усунення шумів тощо. Вибір методів покращання та їх параметрів ґрунтується на досвіді оператора-дослідника. Далі у підготовлений стегоконтейнер вбудовують повідомлення. Після цього заповнений стегоконтейнер перевіряють на відповідність критеріям ефективності стegosистеми. Еталонних значень критеріїв ефективності не існує, але в практичному сенсі є орієнтири та метрики, які допомагають визначити прийнятний рівень.

Непомітність в значній мірі буде залежати від вибраного зображення-стегоконтейнера. Зони зображення з високою текстурною або семантичною складністю (наприклад, шерсть, трава, листя) краще маскують приховані зміни. Натомість гладкі області (небо, шкіра, стіни) – чутливі до навіть незначних модифікацій. Для кількісного оцінювання непомітності використовуються метрики PSNR та SSIM. Приховування буде практично непомітним якщо $PSNR > 38$ дБ, при $38 > PSNR > 30$ – втрата якості вважається допустимою, а при $PSNR < 30$ дБ – візуальна різниця є помітною.

Ємність приховування (bpr) вимірюється максимальною кількістю бітів, які можна приховати в одному пікселі. Висока непомітність характеризується значенням $bpr < 0,1$. Типовим безпечним діапазоном ємності є 0,1-0,4, а у випадку $bpr > 0,5$ – ризик виявлення є суттєвим.

Стійкість стеганосистеми вимірюється відсотком правильно збережених бітів після стиску, розмиття, зміни розміру чи атак. В стійких системах прийнятна відновлюваність складає більше 90%, середня – від 80 до 90% і низька стійкість складає менше 80%.

Ще одним важливим параметром ефективності стegosистеми є *візуальна якість* зображення-стегоконтейнера, яка має бути такою, щоб не викликати підозри у зловмисника. Для кількісного оцінювання візуальної якості застосовують різноманітні метрики. Найбільш популярними і вживаними на практиці є оцінки, які не потребують еталону. Наприклад, NIQE та BRISQUE – метрики, які ґрунтуються на статистичних властивостях природних зображень [13, 14]. Також це може бути метрика, яка враховує закони зорового сприйняття світла людиною [11].

На основі статистичних даних встановлено орієнтовні значення наведених вище критеріїв (табл. 3).

Таблиця 3

Орієнтовні значення наведених критеріїв ефективності на основі статистичних даних

Параметр	Орієнтир
PSNR	> 38–40 дБ
SSIM	> 0.95
Ємність	0,1 – 0,3 bpp
Стійкість	> 90% відновлених бітів після JPEG
MOS (опційно)	> 4.5 (із 5)

Наведені в таблиці 3 значення параметрів ефективності стеганосистем залежать від декількох факторів. Серед них слід виділити вибір стегоконтейнера та стегоалгоритм. Стегоконтейнер має відповідати вимогам, які стосуються семантичного наповнення, достатньої кількості складноструктурованих ділянок, мати прийнятну візуальну якість. Без виконання цих базових вимог жоден стеганоалгоритм не забезпечить виконання зазначених у таблиці значень критеріїв ефективності. Другим фактором, який суттєво впливає на значення параметрів ефективності стеганосистем, є безпосередньо стеганоалгоритм. Стеганоалгоритми є різними – адаптивними та глобальними, реалізуються в просторовій або частотній областях, з навчанням та без нього та інші. В таблиці 4 наведено результати порівняння впливу методів стеганографії на параметри ефективності.

Таблиця 4

Результати порівняння впливу методів стеганографії на параметри ефективності

Метод	PSNR (дБ)	SSIM	Ємність (bpp)	Стійкість (%)
LSB	45	0,98	0,50	60
DCT	38	0,94	0,20	85
YASS	40	0,96	0,15	90
CNN-based (deep)	42	0,97	0,10	95
U-Net + LSB	43	0,98	0,12	92

Результати кількісного оцінювання параметрів ефективності вкотре підтверджують, що методи приховування в частотній області (DCT, YASS) є більш ефективні у порівнянні з методами вбудовування в просторовій області (LSB). Методи з використанням нейронних мереж (CNN, U-Net) володіють ще більшою ефективністю.

У роботі проводилося комп'ютерне моделювання LSB стеганоалгоритму з використанням запропонованої у цій роботі моделі. Порівняння запропонованого підходу та з використанням нейромережі показує, що запропонована модель точна, але повільна, тоді як модель на основі нейронної моделі – швидка, але вимагає якісного навчального набору. Суттєвий вплив на встановлення закономірностей між параметрами вбудовування та ефективністю системи має вибір стегоалгоритму. Загалом вибраний напрям досліджень є перспективним, оскільки дозволяє автоматизувати процес оптимізації параметрів ефективності стегосистем.

Експериментальне моделювання впливу шуму та розмиття стегоконтейнера на основні параметри ефективності стеганосистеми

Як зазначалося вище візуальна якість зображення-стегоконтейнера впливає суттєво на ефективність стегосистеми. Продемонструємо це на прикладі. За стегоконтейнер застосуємо загальноприйняте тестове зображення, яке представлено на рисунку 3.



Рис. 3. Зображення-стегоконтейнер.

На основі цього зображення сформовано дві серії зображень (рис. 4) – з різним рівнем імпульсного шуму (від 1% до 10%) та розмиття (розмір апертури від 3х3 до 11х11).

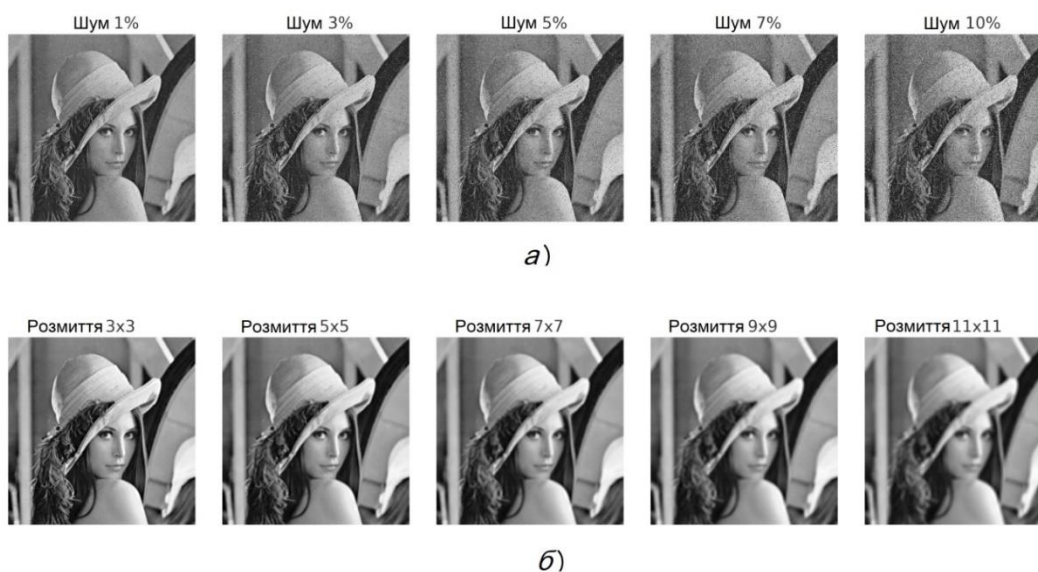


Рис. 4. Серії зображень з різним рівнем імпульсного шуму (а) та розмиття (б).

У кожне із зображень, які представлені на рисунку 4 було вбудовано 4148 бітів (≈ 518 байтів тексту) методом адаптивного LSB. Вбудовування здійснювалося тільки в ті пікселі, які мають достатню локальну варіативність (текстуровані ділянки). Це становило орієнтовно 1,6% пікселів із загальної кількості пікселів зображення ($512 \times 512 = 262\,144$ пікселі). Після цього до зображення застосовували JPEG-стиснення з різним рівнем якості (90, 70, 50).

В таблиці 5 наведено обчислені показники якості, ємності та стійкості LSB-вбудовування для серій зображень на рис. 4.

Таблиця 5

Показники якості, ємності та стійкості LSB-вбудовування

Зображення	PSNR (дБ)	SSIM	Ємність (біт)	Стійкість Q90 (%)	Стійкість Q70 (%)	Стійкість Q50 (%)	MOS
Шум 1%	48,20	0,9935	4148	99,8	95,3	82,6	4,9
Шум 3%	47,76	0,9919	4148	99,2	93,7	79,1	4,7
Шум 5%	46,98	0,9901	4148	98,7	91,5	75,8	4,5
Шум 7%	46,42	0,9886	4148	97,5	89,8	72,3	4,2
Шум 10%	45,83	0,9871	4148	95,9	86,2	67,4	3,9
Розмиття 3×3	48,85	0,9947	4148	99,9	96,2	85,0	5,0
Розмиття 5×5	49,01	0,9951	4148	99,8	95,9	83,1	5,0
Розмиття 7×7	49,14	0,9954	4148	99,7	95,4	81,6	4,9
Розмиття 9×9	49,21	0,9957	4148	99,4	94,6	80,2	4,8
Розмиття 11×11	49,28	0,9959	4148	99,1	93,8	78,5	4,7

Висновки

Проведені дослідження показали, що метод адаптивного LSB забезпечує високу візуальну якість зображень навіть після вбудовування великого текстового повідомлення. Найкращі показники PSNR, SSIM та MOS спостерігаються у серії зображень із розмиттям, де втрата якості практично непомітна для людського ока ($MOS \approx 5$). Натомість імпульсний шум, особливо при рівні понад 5%, призводить до поступового зниження суб'єктивної якості, що підтверджується зменшенням MOS до 3.9. З таблиці 5 видно, що стиснення JPEG має суттєвий вплив на збереження прихованої інформації, особливо в умовах наявності імпульсного шуму. При високих значеннях якості JPEG ($Q=90$), стійкість залишається майже повною — понад 95% повідомлення коректно зчитується в усіх випадках, що свідчить про надійність адаптивного LSB-вбудовування в умовах незначного стискання. Проте зі зниженням якості JPEG до $Q=70$ та $Q=50$ спостерігається поступове зниження стійкості, особливо для зображень із вищим рівнем імпульсного шуму. Наприклад, при шумі 10% і JPEG $Q=50$, правильність відновлення повідомлення зменшується до близько 67%, що пов'язано з високим рівнем втратних перетворень, які спотворюють найменш значущі біти. З іншого боку, у серії зображень із розмиттям адаптивне вбудовування показує вищу стійкість навіть при сильному JPEG-стисненні. Це пояснюється більш однорідною структурою зображення після згладжування, що знижує ймовірність втрат LSB-інформації під час квантування в JPEG. Отже, можна зробити висновок, що розмиття знижує ризик втрати прихованої інформації при стисканні JPEG, тоді як імпульсний шум навпаки — ускладнює збереження вбудованого повідомлення. Це слід враховувати під час проєктування стеганографічних систем, орієнтованих на роботу у стиснених середовищах, таких як соціальні мережі або мобільні месенджери.

Перелік посилань

1. Журавель Ю. І., Мичуда Л. З. Підвищення ефективності стеганографії через застосування методів покращання зображень та моделей штучного інтелекту // Сучасний захист інформації. 2025. № 2(62). С. 59–67. DOI: 10.31673/2409-7292.2025.023202.
2. Gonzalez R., Woods R. Digital image processing. 2nd ed. NJ: Prentice Hall, 2002.
3. Салімонович А. О., Гармаш В. В. Метод фільтрації цифрових зображень на основі білатерального фільтру : дис. ... д-ра техн. наук. Вінниця : БНТУ, 2024.
4. Gao C., Song C., Zhang Y., Qi D., Yu Y. Improving the performance of infrared and visible image fusion based on latent low-rank representation nested with rolling guided image filtering // IEEE Access. 2021. Vol. 9. P. 91462-91475.
5. Zhang D., He Z., Zhang X., Wang Z., Ge W., Shi T., Lin Y. Underwater image enhancement via multi-scale fusion and adaptive color-gamma correction in low-light conditions // Engineering Applications of Artificial Intelligence. 2023. Vol. 126. Article ID 106972.
6. Cai Y., Bian H., Lin J., Wang H., Timofte R., Zhang Y. Retinexformer: One-stage retinex-based transformer for low-light image enhancement // Proc. IEEE/CVF Int. Conf. on Computer Vision. 2023. P. 12504-12513.
7. Shah M., Khan M., Khan S. S., Ali S. Multi-Focus Image Fusion using Unsharp Masking with Discrete Cosine Transform. 2023. [Електронний ресурс].
8. Halidou A., Mohamadou Y., Ari A. A. A., Zacko E. J. G. Review of wavelet denoising algorithms // Multimedia Tools and Applications. 2023. Vol. 82, No. 27. P. 41539-41569.
9. Zhang C., Yen K. S. A Refined First-Order Sparse TGV Model with L1 Norm Data Fidelity for Enhanced Image Denoising // Int. Symp. on Systems Modelling and Simulation. Singapore : Springer Nature Singapore, 2024. P. 1-13.
10. Alnuaimy A. N., Jawad A. M., Abdulkareem S. A., Mustafa F. M., Ivanchenko S., Toliupa S. BM3D denoising algorithms for medical image // 2024 35th Conf. of Open Innovations Association (FRUCT). IEEE, 2024. P. 135–141.
11. Журавель Ю. І., Мичуда Л. З. Метод кількісного оцінювання візуальної якості цифрових кольорових зображень // Сучасний захист інформації. 2024. № 4(60). С. 39-45. DOI: 10.31673/2409-7292.2024.040004.
12. Хорошко В. О., Яремчук Ю. Є., Карпінєць В. В. Комп'ютерна стеганографія. Вінниця : БНТУ, 2017. 244 с.
13. Treder M. S., Codrai R., Tsvetanov K. A. Quality assessment of anatomical MRI images from generative adversarial networks: Human assessment and image quality metrics // Journal of Neuroscience Methods. 2022. Vol. 374. Article ID 109579.
14. Neißner A., Mäder U., Fiebich M. Enhancing clinical CT image quality assessment: adapting no-reference methods NIQE and BRISQUE // Medical Imaging 2025: Physics of Medical Imaging. 2025. Vol. 13405. P. 903-911.

Надійшла 26.06.2025