

Міністерство освіти і науки України  
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет комп'ютерної інженерії та управління  
(повна назва)

Кафедра електронних обчислювальних машин  
(повна назва)

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**  
**Пояснювальна записка**

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Методи підвищення стійкості нанесення цифрових  
водяних знаків на цифрові зображення

(тема)

Виконав:  
студент II курсу, групи КСМм-21-1  
Озеров М.А.  
(прізвище, ініціали)

Спеціальність 123 «Комп'ютерна інженерія»  
(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна  
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма Комп'ютерні системи та мережі  
(повна назва освітньої програми)

Керівник: доц. Мартовицький В.О.  
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри ЕОМ

(підпис)

(прізвище, ініціали)

2022 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет \_\_\_\_\_ комп'ютерної інженерії та управління \_\_\_\_\_

Кафедра \_\_\_\_\_ електронних обчислювальних машин \_\_\_\_\_

Рівень вищої освіти \_\_\_\_\_ другий (магістерський) \_\_\_\_\_

Спеціальність \_\_\_\_\_ 123 «Комп'ютерна інженерія» \_\_\_\_\_  
(код і повна назва)

Тип програми \_\_\_\_\_ освітньо-професійна \_\_\_\_\_  
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма \_\_\_\_\_ Комп'ютерні системи та мережі \_\_\_\_\_  
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри \_\_\_\_\_  
(підпис)

“ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

## ЗАВДАННЯ

### НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студенту \_\_\_\_\_ Озерову Микиті Аркадійовичу \_\_\_\_\_  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи \_\_\_\_\_ Методи підвищення стійкості нанесення цифрових водяних знаків на цифрові зображення \_\_\_\_\_

затверджена наказом по університету від “ 07 ” листопада 2022 р. № 1453 Ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії \_\_\_\_\_ 13 грудня 2022 р.

3. Вхідні дані до роботи \_\_\_\_\_

Цифрові водяні знаки \_\_\_\_\_

Технічні засоби захисту авторських прав \_\_\_\_\_

Атаки на цифрові водяні знаки \_\_\_\_\_

Системи еталонного тестування \_\_\_\_\_

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати у роботі \_\_\_\_\_

Дослідження впливу JPEG стиснення на коефіцієнти перетворення Адамара \_\_\_\_\_

Аналіз стійкості алгоритму Elham до найбільшпоширеним шкідливим впливам \_\_\_\_\_

Аналіз ефективності ортогональних перетворень в частотних алгоритмах цифрового \_\_\_\_\_

Проаналізовано існуючі системи еталонного тестування, які використовують \_\_\_\_\_

різні підходи для аналізу алгоритмів цифрового маркування \_\_\_\_\_

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (слайдів) \_\_\_\_\_

Слайд-презентація – 12 слайдів.

6. Консультанти розділів роботи (заповнюється за наявності консультантів згідно з наказом, зазначеним у п.1 )

Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Постановка задачі	07.11.2022	
2	Ознайомлення з літературними джерелами	08.11.2022-15.11.2022	
3	Визначення основних принципів ЦВЗ	15.11.2022-17.11.2022	
4	Огляд систем еталонного тестування.	17.11.2022-25.11.2022	
5	Ознайомлення із JPEG-стисненням	25.11.2022-27.11.2022	
6	Дослідження алгоритму Elham	27.11.2022-03.12.2022	
7	Модифікація алгоритму	03.12.2022-10.12.2022	
8	Оформлення пояснювальної записки	10.12.2022-12.12.2022	

Дата видачі завдання 07 листопада 2022 р.

Студент \_\_\_\_\_  
(підпис)

Керівник роботи \_\_\_\_\_  
(підпис)

доц. Мартовицький В.О.  
(посада, прізвище, ініціали)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка кваліфікаційної роботи: 95 с., 44 рис., 9 табл., 1 дод, 21 джерело.

ДИСКРЕТНЕ ВЕЙВЛЕТ-ПЕРЕТВОРЕННЯ, ЦИФРОВИЙ ВОДЯНИЙ ЗНАК, JPEG2000, PSNR, ДИСКРЕТНЕ ПЕРЕТВОРЕННЯ ФУР'Є, АЛГОРИТМ ELNAM, ПЕРЕТВОРЕННЯ АДАМАРА.

Метою кваліфікаційної роботи є підвищення стійкості вбудованих внерухомі зображення цифрових водяних знаків до різноманітних атак, таким як JPEG стиск, зашумлення, фільтрація та іншим операціям обробки графічної інформації.

У ході виконання кваліфікаційної роботи розроблено алгоритм цифрового маркування нерухомих зображень, що вбудовує бінарне зображення у вигляді послідовності біт, отриманої за рахунок використання нового методу скорочення обсягу вбудовується інформації.

## ABSTRACT

Master's thesis: 95 pages, 44 figures, 9 tables, 1 appendix , 21 sources.

DISCRETE WAVELET TRANSFORM, DIGITAL WATERMARK, JPEG2000, PSNR, DISCRETE FOURIER TRANSFORM, ELHAM ALGORITHM, ADAMAR TRANSFORM.

The major goal of this thesis is an increase in the stability of built-in still images of digital watermarks to various attacks, such as JPEG compression, noise, filtering and other graphic information processing operations.

In order to the qualification work, an algorithm was developed for digital marking of still images, which embeds a binary image in the form of a sequence of bits obtained through the use of a new method of reducing the amount of embedded information.

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ .....	8
ВСТУП .....	9
1 АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЇ ЦИФРОВОГО МАРКУВАННЯ НЕРУХОМИХ ЗОБРАЖЕНЬ.....	12
1.1 Вимоги, пред'явлені до алгоритмів цифрового маркування.....	14
1.2 Класифікація цифрових водяних знаків, що впроваджуються в нерухомі зображення .....	15
1.3 Класифікація атак на системи цифрового маркування .....	16
1.3.1 Особливості атаки «компресія зображення».....	18
2 АНАЛІЗ СТІЙКОСТІ ТА СИСТЕМИ ЕТАЛОННОГО ТЕСТУВАННЯ .....	20
2.1 Складові методу аналізу стійкості .....	20
2.2 Вибір контейнера та ЦВЗ .....	21
2.3 Параметри вбудовування .....	23
2.3.1 Вибір метрик визначення якості стеганоконтейнера та ЦВЗ.....	25
2.4 Огляд систем еталонного тестування .....	27
2.4.1 Система Stirmark .....	28
2.4.2 Система Chekmark.....	28
2.4.3 Система Optimark .....	29
2.4.4 Система RK Benchmark .....	30
3.ПІДВИЩЕННЯ СТІЙКОСТІ ЧАСТОТНИХ АЛГОРИТМІВ ЦИФРОВОГО МАРКУВАННЯ ДО JPEG СТИСНЕННЯ .....	31
3.1 Втрата інформації при JPEG стисненні .....	31
3.2 Вплив JPEG стиснення на коефіцієнти перетворення Адамара.....	37
3.2.1 Перетворення Адамара .....	37
3.2.2 Взаємозв'язок коефіцієнтів ДПА і ДКП .....	39
3.2.3 Дослідження алгоритму Elham .....	43

3.3.1	Аналіз непомітності ЦВЗ, вбудованого алгоритмом Elham .....	45
3.3.2	Аналіз стійкості алгоритму Elham до шкідливим впливам .....	47
3.3	Нова стратегія вибору частотних коефіцієнтів ДПА .....	54
3.4	Модифікація алгоритму Elham .....	56
3.4.1	Попередні операції.....	56
3.4.2	Процес вбудовування ЦВЗ.....	57
3.4.3	Процес вилучення ЦВЗ.....	59
3.5	Новий алгоритм цифрового маркування .....	60
3.5.1	Процес скорочення обсягу вбудованих біт ЦВЗ.....	60
3.5.2	Процес вбудовування ЦВЗ.....	62
3.5.3	Процес вилучення ЦВЗ.....	64
3.5.4	Аналіз непомітності нового алгоритму .....	65
3.5.5	Аналіз методу скорочення біт вбудованого ЦВЗ .....	67
3.6	Аналіз стійкості нових алгоритмів до шкідливим впливам .....	69
4	МОДИФІКАЦІЯ РОЗРОБЛЕНОГО АЛГОРИТМУ ЦИФРОВОГО МАРКУВАННЯ.....	76
4.1	Застосування розробленого алгоритму цифрового маркування до кольоровим зображенням.....	76
4.2	Зниження обчислювальної складності процесу впровадження ЦВЗ .....	80
4.3	Вплив розміру блоку декомпозиції контейнера на стійкість водяного знаку.....	82
	ВИСНОВКИ.....	86
	ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ .....	87
	ДОДАТОК А Графічний матеріал кваліфікаційної роботи.....	89

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

- ДВП – дискретне вейвлет-перетворення
- ДКП – дискретне косинусне перетворення
- ДПА – дискретне перетворення Адамара
- ДПФ – дискретне перетворення Фур'є
- ДПХ – дискретне перетворення Хаара
- ЗСЧ – зорова система людини
- ПКЛ – перетворення Карунена-Лоева
- ЦВЗ – цифровий водяний знак
- ЕЦП – електронний цифровий підпис
- GUI – graphical user interface (графічний інтерфейс користувача)
- JPEG – формат стиснення із втратами
- JPEG2000 – новий формат стиснення із втратами
- PSNR – peak signal to noise ratio (пікове ставлення сигналу шуму)
- RGB – палітра кольорів, де R (red) – площа червоного кольору, G – (green) площа зеленого кольору, B (blue) – площа синього кольору
- RLE – run length encoding (кодування довжин серій)
- YCbCr – палітра кольорів, в контексті даної роботи використовується у форматі стиснення JPEG: Y – яркісна компонента; Cb – площа хроматичного синього; Cr – площа хроматичного червоного

## ВСТУП

Цифровий водяний знак (ЦВЗ) – це спосіб уникнення крадіжки або використання цифрових зображень, аудіо та відеоматеріалів ігноруючи дозвіл правовласника. ЦВЗ передбачає впровадження цифрового підпису в будь-які дані. Є 2 класи цифрових водяних знаків – видимі та невидимі.

Видимий водяний знак коректно, в цілому, застосовувати для інформації, зоровий образ котрої ніяк не погіршується від додавання цифрового підпису. Перевагою подібних водяних знаків вважається те, що дані захищені авторським правом та повноцінне їх використання стане неможливим без видалення цифрового водяного знака. Такі заходи значно спрощують дискусії з правоволодіння, оскільки присутність чи видалення водяних знаків просто виявляється.

Невидимий водяний знак застосовується, якщо зовнішній вигляд даних неможливо змінити. Невидимий ЦВЗ – це спеціальна вбудована мітка, так звана "контейнер", яка повинна захистити авторські права та підтвердити загальну цілісність інформації або даних. Особливість такого виду водяних знаків полягає у тому, що їх непросто виявити. Потенційні порушники можуть використовувати дані, не здогадуючись про те, що вони містять маркування правовласника.

В наш час створено багато різних методів вбудовування невидимих ЦВЗ у зображення, наприклад метод LSB (Last Significant Bit), спосіб псевдовипадкового інтервалу, метод псевдовипадкової перестановки (підбору), метод блокування. Найбільш популярним, проте менш стабільним до іскажень вважається спосіб заміни бітів молодших розрядів, що мають яскравість/колір пікселя, він же є LSB-спосіб. Суть LSB полягає у зміні молодших значних бітів у байтах зображення (контейнери), які відповідають за кодування кольору, на біти інформації, що приховуються. Головними достоїнствами цього способу вважаються те, що око людини зазвичай не

здатне помітити таку зміну; простота застосування; можливість приховувати у невеликих зображеннях великий обсяг даних. Ключовим мінусом методу LSB вважається його висока чутливість до спотворення контейнера.

На сьогоднішній день при створенні ЦВЗ використовується принцип вбудовування мітки, яка є вузькосмуговим сигналом у широкому спектрі частот маркованого зображення. Цей метод реалізується за допомогою двох різних алгоритмів. У першому методі дані передаються за допомогою фазової модуляції «несучої» псевдовипадкової послідовності чисел. В іншому весь діапазон поділяється на певне кількість субдіапазонів і передача інформації здійснюється між ними. Щодо маркованого зображення мітку можна розцінювати як шум. Однак оскільки у зображенні постійно є шум, його збільшення через мітки не призводить до значного підвищення спотворення. Крім цього, сигнал, що представляє мітку, поширюється по всьому зображенню, внаслідок чого досягається стійкість до обрізання зображення. Паралельний алгоритм навчання нейронної дає можливість автоматизувати формування тестових або тренувальних наборів при створенні систем розпізнавання зображень.

Основне застосування ЦВЗ було в системах захисту від копіювання, які намагаються запобігти неправомірному копіюванню цифрових даних. Використовують ЦВЗ у стеганографії, коли оператори з обох сторін використовують секретні повідомлення із вбудованим цифровим сигналом. Стеганографія приховує безпосередньо факт передачі, таким чином, ніяк не привертає увагу правопорушника. Крім цього, у стеганографії не накладаються законодавчі обмеження, на відміну від криптографії. Тому застосування методів цієї науки у сфері захисту мультимедійних даних має великий пріоритет.

Разом з розвитком обчислювальної техніки широкого поширення набули комп'ютеризовані системи електронного документообігу. Електронний архів – це варіант системи документообігу, який орієнтований на пошук та зберігання даних. За допомогою архіву можна об'єднати всі

форми даних (зображення, аудіо та відео, WEB, цінні папери) в різних робочих процесах.

Для аутентифікації даних у системах електронного документообігу використовується електронний цифровий підпис (ЕЦП). Але системи ЄЦП не надають належної захисту авторства як цифрових, так і аналогових даних, в умовах, якщо нарушник вносити будь-які спотворення у дані, що захищаються, та аутентифікуючу інформацію. ЦВЗ застосовується як спосіб захисту цінних паперів із зображеннями – паспортів, посвідчень водія, кредитних карток з фотовласника. Незважаючи на те, що певні формати цифрових даних можуть нести в собі метадані, ЦВЗ відрізняється тим, що дані «зашиті» безпосередньо у сигнал. Мультимедія у такому разі буде контейнером. Головним перевагою є те, що є залежність між подією підміни об'єкта та елементом захисту (прихованим водяним знаком). Підміна об'єкта ідентифікації в разі призведе до висновку про неоригінальність документа. Але, в наш час є величезна кількість шкідливих впливів, які можна використовувати для видалення водяного знака з метою запобігання визначення джерела витоку, наприклад: зашумлення, фільтрація, зміна властивостей (розмір, яскравість тощо). Використовуючи дані атаки, правонарушник здатний ускладнити весь процес відстеження неправомірного копіювання та розповсюдження даних.

З поширенням Інтернету став популярним формат стиснення зображень JPEG. Застосовуючи JPEG, зловмисники можуть знищити інтегрований водяний знак, зберігши якість зображення, т.к. Стиснення JPEG не викликає сильних видимих іскажень. Отже, одна з основних задач розробки та вивчення методів маркування зображень, які стійкі до стиснення та інших шкідливих впливів є актуальною.

## 1 АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЇ ЦИФРОВОГО МАРКУВАННЯ НЕРУХОМИХ ЗОБРАЖЕНЬ

Ключові визначення сучасної стеганографії було встановлено у 1996 р. на конференції Information Hiding: First Information Workshop. Проаналізуємо дані визначення щодо сфери цифрового маркування мультимедійних даних.

У стеганографії є ряд контейнерів:

- контейнер – будь-які дані, призначені для розміщення таємних повідомлень;
- порожній контейнер – контейнер без розміщеного повідомлення;
- стежоконтанер – контейнер, заповнений даними.

Контейнер може бути текст, нерухоме зображення, аудіо/відео інформація.

У свою чергу контейнер поділяється на фіксований (зображення) і потоковий (телефонна розмова). Найбільшу популярність отримали дослідження із застосуванням фіксованих контейнерів, оскільки при виборі потокового є проблема синхронізації ЦВЗ та контейнера, визначення початку та кінця.

У цьому випадку подібним повідомленням, що вбудовується, є ЦВЗ.

Стеганографічний канал (стежоканал) – це канал передачі стежоконтанера. Характеризується пропускною здатністю, яка визначає граничний обсяг вбудованої інформації.

Стежоключ (ключ) – ключ, який застосовується для приховання/вилучення інформації. Без цього ключа неможливо визначити точне розташування ЦВЗ у контейнері. Ключ є обов'язковим елементом будь-якої стegosистеми.

Стегосистема – комплекс заходів та методів, що використовуються для формування каналу передачі інформації.

На вхід системи надходить контейнер та ЦВЗ. Перед операцією

введення враховуються специфіка контейнера (наприклад, якщо зображення – контейнер, то враховується його клас, формат), ЦВЗ піддається попередній обробці прекодером. Прикладом такої обробки ЦВЗ можуть бути такі перетворення, як ДПФ (дискретне перетворення Фур'є), ДКП (дискретне косинусне перетворення, ДВП (дискретне вейвлет-перетворення) тощо). ЦВЗ Стегоконтейнер може передаватися певними каналами, піддаючись атакам різного типу.

Виділити ЦВЗ можна в два етапи. Детектор, використовуючи певні критерії, визначає наявність ЦВЗ в інформації, що надійшла. Стегостисіме може знадобитися вихідний контейнер (якщо стегосистема закрита), або не потрібно (сліпа стегосистема). У разі наявності ЦВЗ декодер витягує ЦВЗ згідно з певним алгоритмом. Як детектор може виступати людина, тому під час розробки алгоритмів маркування повинні враховуватися особливості зорово/слухової системи людини.

Більшість досліджень ЦВЗ присвячена маркуванню нерухомих цифрових зображень через такі фактори, як:

- низька сприйнятливність людського ока до шуму, невеликих спотворень зображення, а також таких його параметрів, як колір, яскравість, контраст тощо;
- практична потреба. Є колосальне число авторського фото/відео контенту, який потребує захисту;
- фіксований обсяг даних для приховування, що усуває обмеження вбудовування ЦВЗ потокового контейнера в режимі реальної години;
- можливість вбудувати досить великий обсяг інформації через досить великий обсяг зображення;
- безліч методів цифрової обробки зображень.

Останній фактор ускладнює використання ЦВЗ у статичних зображеннях, оскільки чим ефективніші методи цифрової обробки, тим ефективніші методи стиснення, а отже, буде зменшуватися обсяг доступної для вбудовування інформації.

## 1.1 Вимоги, пред'явлені до алгоритмів цифрового маркування

Є кілька обов'язкових умов, що пред'являються до цифрових стеганографічних алгоритмів, а саме:

- стійкість;
- невиявлення;
- невидимість.

Стійкість стеганографічного методу полягає у можливості ЦВЗ зберігати початковий вигляд після атак на стегоконтейнер.

Невиявлення полягає в тому, щоб протистояти стегааналізу та спробам виявлення присутності ЦВЗ у контейнері.

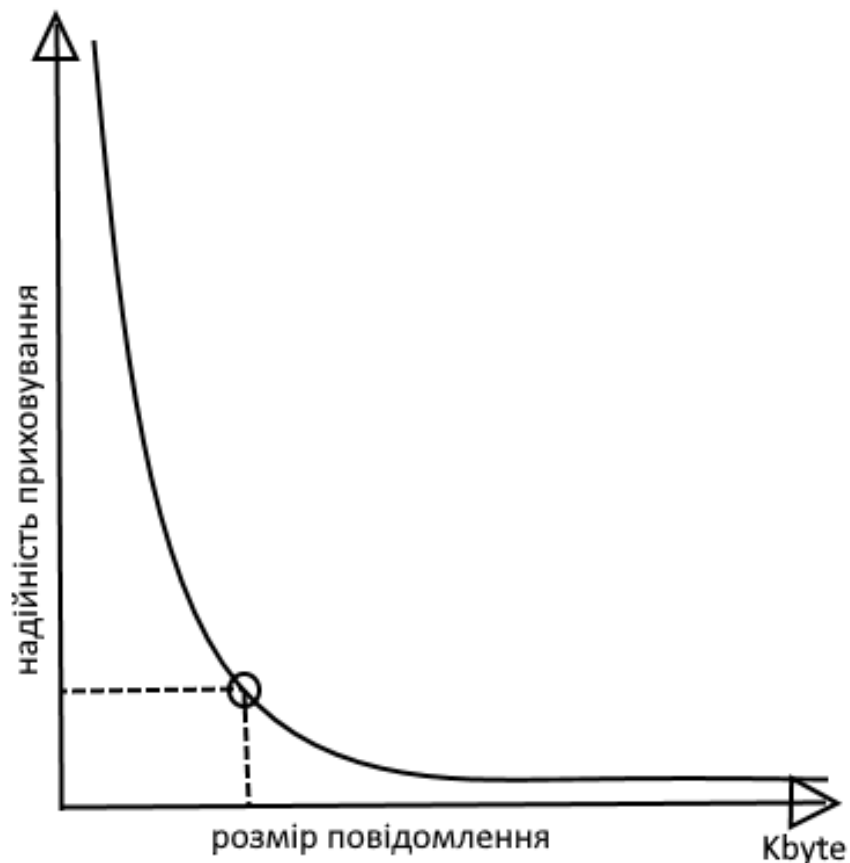


Рисунок 1.1 – Залежність стійкості стеганографічної системи від обсягу вбудованого ЦВЗ

Невидимість характеризується здібностями алгоритму не додавати видимих у людини змін у зовнішній вигляд контейнера. Як уже зазначалося, необхідно враховувати особливості зорової системи людини, такі, як:

- низькочастотні, наприклад чутливість ока до зміни яскравості, частотної складової зображення та до ефекту маскування;
- високочастотні, наприклад чутливість до контрасту, розміру, форми, кольору, розташування окремих елементів зображення.

Потрібно виділити, що надійність стегосистеми також залежить від обсягу ЦВЗ, отже необхідно дотримуватися балансу між рівнем надійності вбудовування та обсягом ЦВЗ. На рисунку 1.1 зображено таку залежність, враховуючи те, що розмір контейнера фіксований.

Крім перерахованих вимог стегоалгоритм повинен мати прийнятну обчислювальну складність.

## 1.2 Класифікація цифрових водяних знаків, що впроваджуються в нерухомі зображення

ЦВЗ можна розділити на:

- крихкі;
- напів крихкі;
- стійкі (робастні).

Основне призначення крихких ЦВЗ – перевірка справжності (аутифікація) контейнера, в якому цей ЦВЗ вбудований. Також тендітні ЦВЗ повинні визначати місце зміни стегоконтейнера та забезпечувати його відновлення. Крихкі ЦВЗ зазвичай руйнуються навіть при незначному шкідливому впливі на контейнер.

Напівкрихкі ЦВЗ мають вибіркочувальну стійкість, наприклад стійкість до JPEG-стиснення, в разі, якщо потрібно буде стискати зображення. Робастні ЦВЗ застосовуються для захисту від незаконного поширення та порушення авторських прав. Такі ЦВЗ мають бути стійкими до атак різних типів.

За ступенем видимості, ЦВЗ діляться на невидимі та видимі.

Переважно застосування невидимих ЦВЗ, оскільки:

- ступінь погіршення якості зображення після їх вбудовування значно менше, ніж при цифровому маркуванні видимими ЦВЗ;
- видимі ЦВЗ не задовольняють умови непомітності.

### 1.3 Класифікація атак на системи цифрового маркування

Серед значної кількості праць, присвячених класифікації атак правопорушників на системи цифрової було зроблено вибірку, схема якої зображена на рисунку 1.2.

Відповідно до цієї класифікації всі атаки проти систем числового маркування можна розділити на 2 класи: системні атаки та неавторизований вплив.

Системні атаки використовують помилки та дірки у самій стегосистемі. Прикладом такої атаки може бути мозаїчна атака, що використовується в Інтернеті. Атака такого роду розбиває стегоконтейнер на окремі фрагменти, які надто малі, щоб зберігати в собі ЦВЗ. На WEB-ресурсі дані фрагменти розміщуються у безпосередній близькості один від одного, візуально утворюючи вихідне зображення.

Атаки ж неавторизованого впливу спрямовані на вразливості в системі маркування та поділяються на атаки неавторизованого вбудовування, виявлення та видалення ЦВЗ.

При неавторизованому вбудовуванні відбувається додавання стороннього ЦВЗ до стеганографічного контейнера.

Атаки неавторизованого виявлення спрямовані на встановлення присутності ЦВЗ у стегаконтейнері або на імітацію присутності ЦВЗ у контейнері (атака помилкового спрацьовування) за наявності детектора у злодійника.

Використовуючи атаки неавторизованого видалення, атакуючий прагне видалити ЦВЗ (наприклад, лінійна фільтрація) або зробити водяний знак невидимим для детектора (геометричні атаки).

Одним з найпоширеніших вредних впливів на системи цифрового маркування є компресія зображення у зв'язку з широким поширенням у мережі Інтернет графічного формату JPEG, а також більш ефективного формату JPEG2000, що набирає популярності. Тому в цій роботі основну увагу приділено дослідженню протидії систем цифрового маркування атак компресії зображення.

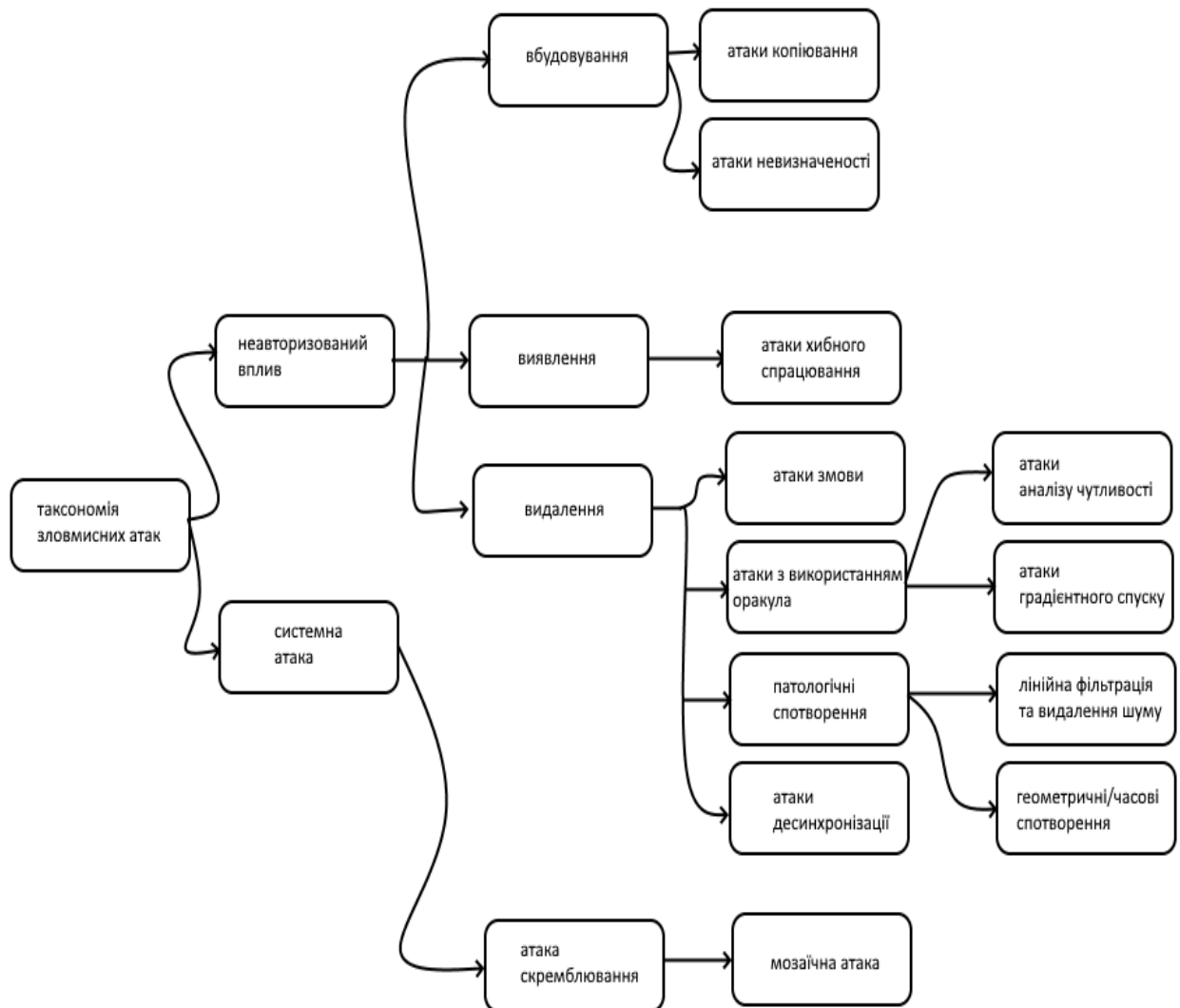


Рисунок 1.2 – Класифікація атак на системи цифрового маркування

### 1.3.1 Особливості атаки «компресія зображення»

Компресія зображення відноситься до класу атак, спрямованих на видалення ЦВЗ зі стеганоконтейнера, за яких ЦВЗ сприймається як статистичний шум. Найбільш поширеними алгоритмами стиснення із втратами є JPEG та JPEG2000. Дані алгоритми ґрунтуються на застосуванні дискретних ортогональних перетворень.

Основою JPEG-стиснення є дискретне косинусне перетворення. Початкове зображення розбивається на ряд блоків розміром 8x8 пікселів. Кожен блок піддається ДКП для перерозподілу енергії зображення. В результаті виходить набір матриць коефіцієнтів ДКП, кожен з яких становить низькочастотний коефіцієнт DC (верхній лівий коефіцієнт матриці) та високочастотні коефіцієнти AC. Кожна матриця коефіцієнтів піддається квантуванню за допомогою наперед заданої таблиці квантування. При цьому обнулюється більша частина високочастотних коефіцієнтів. Кожна отримана матрицю квантованих коефіцієнтів перетворюється на одномірний вектор, що містить довгі послідовності нулів, що дозволяє ефективно використовувати на завершальній стадії JPEG-компресії RLE-стиснення (кодування довжин серій) та стиснення Хаффману.

Основою стиснення JPEG2000 є дискретне вейвлет перетворення (ДВП), яке також здійснює перерозподіл енергії зображення. На відміну від JPEG стиснення вейвлет-перетворення застосовується до всього зображення повністю. Основна ідея вейвлет-перетворення сигналу полягає в ієрархічному розкладанні вхідного сигналу на послідовності так званих базових компонент з послідовно зменшується розрідження і пов'язаних з ним компонент деталей. У порівнянні з ДКП ДВП має набагато кращу здатність перерозподіляти енергію зображення.

Приклад найпростішої атаки компресії на видимий цифровий водяний знак на рисунку 1.3.

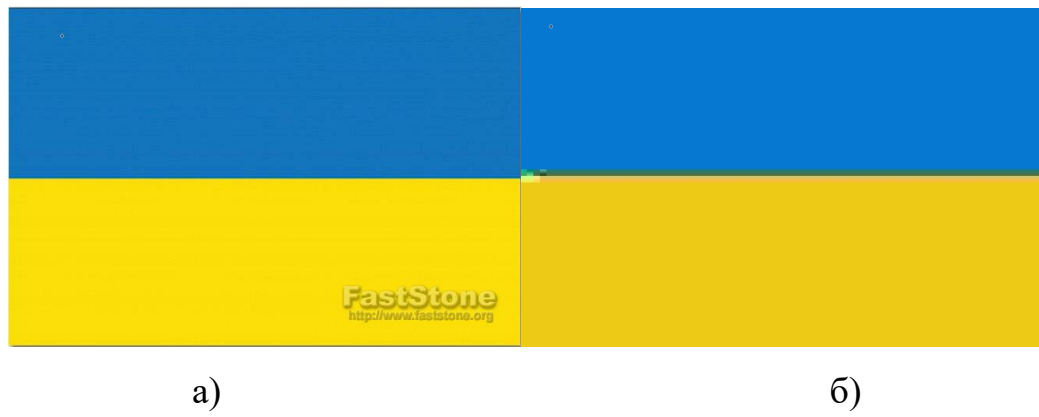


Рисунок 1.3 – Атака «компресія», видимий цифровий знак був вилучений за допомогою JPEG-стиснення: а) до стиснення; б) після обробки

Як видно з опису алгоритмів, JPEG та JPEG2000 використовують дискретні ортогональні перетворення для перерозподілу енергії зображення з подальшим знищенням інформації в першу чергу високочастотних субполос, що необхідно враховувати при вбудовуванні ЦВЗ у контейнер.

## 2 АНАЛІЗ СТІЙКОСТІ ТА СИСТЕМИ ЕТАЛОННОГО ТЕСТУВАННЯ

### 2.1 Складові методу аналізу стійкості

Метод ґрунтується на використанні методів проектування та ООП , призначених для розробки програми автоматичного тестування алгоритмів цифрового маркування.

Виходячи з аналізу низьких робіт для перевірки стійкості алгоритму цифрового маркування до атак різного типу, зазвичай використовують метод, загальний алгоритм якого представлений на рисунку 2.1. Перед його використанням необхідно визначити низку параметрів (розглянутих у наступних підрозділах), які прямо чи опосередковано впливають на результати тестування.

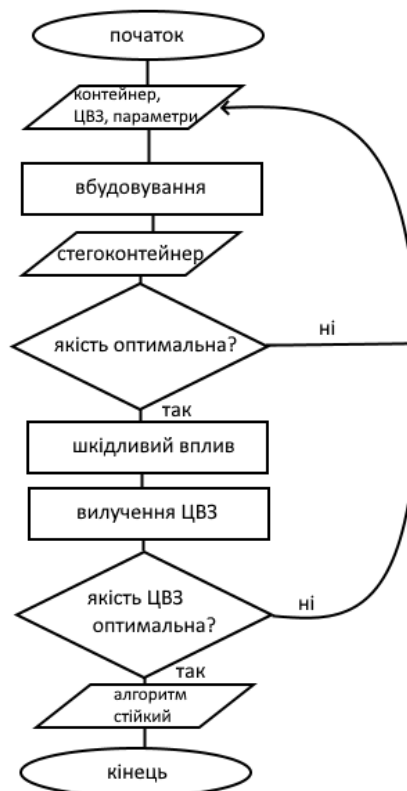


Рисунок 2.1 – Загальна схема перевірки стійкості алгоритму цифрового маркування до шкідливих впливів

Метод можна розділити на три основні етапи: використання ЦВЗ, атака на стеганоконтейнер, вилучення водяного знака. Після етапів маркування зображення визначається ступінь спотворення захищеного зображення шляхом порівняння з оригіналом за допомогою певних метрик. Якщо досягнуто максимально можливої якості стеганоконтейнера, то він піддається впливу низки атак. Інакше коригуються параметри вбудовування. Аналогічна процедура здійснюється і над вилученням ЦВЗ. Висновок про стійкість алгоритму ґрунтується на якості видобутого водяного знака. Непомітність ЦВЗ визначається мірою видимості спотворень зображення-оригіналу.

Розглянемо докладніше основні етапи роботи цього методу.

## 2.2 Вибір контейнера та ЦВЗ

Тестування алгоритму починається з вибору типу контейнера (у разі зображення) і ЦВЗ, куди він спочатку був орієнтований.

Існує кілька типів зображень, наприклад:

- монохроматичне – найпростіший тип зображення, представлений кольорами двох типів: білим та чорним;
- напівтонове – представлене градаціями сірого кольору;
- кольорове – кожен піксел якого представлений трьома параметрами (наприклад, кольорові моделі RGB, HLS тощо);
- неперервно-тонові (природні) – кольори або півтони сусідніх пікселів яких відрізняються один від одного на непомітну для людського ока величину;
- дискретно-тонові (синтетичні) – створені з використанням засобів обчислювальної техніки, характерною особливістю яких є відсутність плям і шумів, властивих природному зображенню;
- зображення типу «мультифільм» – що складаються з великих областей одного кольору чи тону.

Як видно з наведеного вище опису, кожен тип зображення характеризується своїми властивостями, що необхідно враховувати при розробці та тестуванні стеганографічного алгоритму. Так показники непомітності ЦВЗ, отримані при використанні монохроматичного зображення як контейнер можуть відрізнятися від показників, отриманих у разі використання в якості контейнера кольорового зображення. Крім того, варто враховувати, що процес впровадження ЦВЗ у кольірне зображення трохи відрізняється від маркування напівтонового зображення за рахунок складових кольорових моделей і, як правило, включає ряд операцій, пов'язаних з перетворенням контейнера, що передують впровадженню ЦВЗ.

ЦВЗ у свою чергу можуть бути представлені:

- бітовою послідовністю;
- послідовністю символів;
- зображенням.

Використання зображення як ЦВЗ зручно у зв'язку з включенням у процес розпізнавання поруч із декодером зорової системи людини (ЗСЧ). При допустимому рівні спотворень ЗСЧ зможе розпізнати випромінювання ЦВЗ.

У цій роботі як контейнер вибрано природне напівтонове 8-бітне зображення – одне з найпростіших і найоптимальніших у сучасних дослідженнях. Для об'єктивності результатів дослідження в якості контейнерів використано низку зображень, що відрізняються один від одного за такими показниками, як гладкий фон, наявність рівних висококонтрастних областей та складних текстур. Як ЦВЗ вибрано монохроматичне чорне зображення, оскільки зміни у водяному знаку цього типу легше помітити порівняно з іншими типами зображення.

### 2.3 Параметри вбудовування

Виходячи з обраного методу та заданого вище типу алгоритмів цифрового маркування, означимо основні параметри, які підлягатимуть регулюванню при визначенні максимального рівня непомітності ЦВЗ та межі стійкості алгоритму стеганографії.

У адитивних алгоритмів, що використовують для вилучення водяного знака зображення-оригінал, існує кілька формул злиття ЦВЗ із контейнером. Одна з найпоширеніших описується виразом (2.1):

$$c' = c_i \cdot (1 + \alpha w_i), \quad (2.1)$$

де  $c'$  – модифікований піксел контейнера (в даному випадку спектральний коефіцієнт);

$c_i$  – вихідний піксел контейнера (вихідний спектральний коефіцієнт);

$w_i$  – вбудований елемент водяного знака (спектральний коефіцієнт);

$\alpha$  – коефіцієнт посилення. Крім формули (2.1) велике поширення набула формула (2.2).

Крім формули (2.1) велике поширення набула формула (2.2), що застосовується в алгоритмі, розробленому І.Кохом:

$$c_i = c_i + \alpha * w_i. \quad (2.2)$$

Вилучення ЦВЗ згідно з формулою (2.2) здійснюється відповідно до виразу (2.3):

$$w_i = (c'_i - c_i) / \alpha. \quad (2.3)$$

Виходячи з наведених вище формул (2.1), (2.2) та (2.3), одними з головних параметрів, які треба враховувати під час перевірки стійкості алгоритму цифрового маркування є:

- модифіковані спектральні коефіцієнти стеганоконтейнера;
- коефіцієнт посилення – визначальний рівень зміни спектральних коефіцієнтів.

Коефіцієнт посилення може бути постійною величиною, або задаватися індивідуально залежно від властивостей кожного обраного блоку контейнера, тобто адаптивним. Вибір великого коефіцієнта посилення збільшує стійкість водяного знака, проте може сильно погіршити якість зображення, що захищається через занадто високий рівень зміни його спектральних коефіцієнтів. І навпаки – надмірно малий коефіцієнт робить водяний знак вкрай уразливим до шкідливих впливів.

Багато алгоритмів цифрового маркування для досягнення непомітності водяного знаку використовують ентропійне маскування – що стоїть інформативність блоку, тим більше інформації можна в нього вбудувати.

Тому не менш важливим параметром є поріг ентропії, який використовують у деяких алгоритмах для вибору блоків контейнера, що модифікуються.

Грамотний вибір спектральних коефіцієнтів дуже важливий для досягнення стійкості ЦВЗ. Їхній оптимальний вибір має бути теоретично обґрунтований. Тому для оптимальної вибірки частотних коефіцієнтів необхідно провести дослідження впливу стискання на ЦВЗ, вбудоване за допомогою перетворення Адамара. Дане дослідження стійкості базується на теорії інформації, цифрової обробки сигналів та зображення.

Для вирішення поставленої задачі насамперед необхідно провести теоретичний аналіз необхідних та достатніх умов для збереження вбудованої інформації у контейнер при високорівневій компресії JPEG та JPEG2000. Для цього в наступному розділі буде розглянуто перетворення Адамара, а

також основні етапи роботи алгоритмів стиснення, що розглядаються з метою виявлення їх впливу на коефіцієнти перетворення Адамара.

Для досягнення найкращих показників непомітності в разі використання ентропійного маскування необхідне визначення залежності між рівнем ентропії конкретного блоку контейнера та допустимим обсягом вбудовуваної інформації не призводить до видимих спотворень.

Отримані результати досліджень дозволять:

- визначити набір спектральних коефіцієнтів перетворення, стійких до високорівневої компресії стеганоконтейнера та ступінь можливого впливу кількості задіяних спектральних коефіцієнтів на рівень спотворення контейнера та стійкості ЦВЗ;
- здійснювати адаптивний вибір коефіцієнта посилення залежно від рівня ентропії зображення, що дозволить збільшити обсяг вбудовуваної інформації без сильних спотворень контейнера.

### 2.3.1 Вибір метрик визначення якості стеганоконтейнера та ЦВЗ

Для правильної інтерпретації результатів експериментів, пов'язаних з визначенням ступеня невидимості та стійкості ЦВЗ, потрібний грамотний підхід до вибору метрик, що визначають ступінь якості маркованого зображення та видобутого з нього водяного знака. Існує велика різноманітність показників візуального спотворення зображень, що поділяються на:

- різниці – засновані на відмінності між контейнером (вихідний сигнал) та стеганоконтейнером (потворний сигнал);
- кореляційні – засновані на кореляції між вихідним зображенням та стеганоконтейнером;
- інші показники, які не входять за своїми характеристиками у дві вищеперелічені категорії.

На даний момент немає абсолютно-об'єктивної міри спотворення зображення. У сучасних дослідженнях найбільш поширеним показником якості захищеного зображення використовується пікове відношення сигналу до шуму (PSNR), що обчислюється в децибелах (dB) і визначається за формулою (2.4):

$$PSNR = 10 \log_{10} = \frac{255^2 * M * N}{\sum_{x,y} (f(x,y) - f(x,y))^2}. \quad (2.4)$$

Вважається, що зміни зовнішнього вигляду вихідного зображення є непомітними, якщо PSNR не нижче 43 dB. Однак при оцінюванні зовнішнього вигляду стеганоконтейнера з використанням різницевих показників обов'язково необхідно враховувати зорову систему людини. Навіть якщо показник PSNR перевищує 43 dB, є ймовірність, що людському оку можуть помітні спотворення зображення. Цей факт є основним недоліком різницевих показників і пов'язаний з відсутністю їхньої кореляції із зоровою системою людини. Як приклад даного недоліку на рисунку 2.2 а) представлено вихідне зображення, але на рисунку 2.2 б) стеганоконтейнер.



Рисунок 2.2 – Приклад контейнера та стегоконтейнера: а) контейнер;  
б) стегоконтейнер

Незважаючи на високий показник (PSNR = 43.2925 dB), у верхнього краю стеганоконтейнера добре помітні його спотворення (область виділена червоною рамкою), які вкажуть згодом на присутність вбудованого ЦВЗ.

Після того, як досягнуто оптимальних параметрів впровадження ЦВЗ, здійснюється перевірка алгоритму цифрового маркування на стійкість до атак різного типу, серед яких найпоширенішими є: компресія зображення (JPEG і JPEG2000), вплив шумів різного типу зображення, що призводять до сильного спотворення або повного знищення водяного знаку.

Як міру якості здобутого ЦВЗ найбільшого поширення набули кореляційні показники якості. У цій роботі як такий показник обраний коефіцієнт кореляції Пірсона

$$k = \frac{\sum_c \sum_r (A(c,r) - A_m) * (B(c,r) - B_m)}{\sqrt{\sum_c \sum_r ((A(c,r) - A_m)^2) * \left( \sum_c \sum_r (B(c,r) - B_m)^2 \right)}}, \quad (2.5)$$

де  $c, r$  – координати пікселя зображення;

$A(c,r), B(c,r)$  – вихідний та витягнутий ЦВЗ;

$A_m, B_m$  – середнє арифметичне величин яскравості пікселів вихідного та витягнутого ЦВЗ.

Значення коефіцієнта кореляції визначено в діапазоні від -1 до 1. Вилучення ЦВЗ вважаємо стійким до певної атаки, якщо його коефіцієнт кореляції не нижче 0.5. У разі повної ідентичності видобутого водяного даний показник набуває значення, що дорівнює 1.1.

#### 2.4 Огляд систем еталонного тестування

Було розроблено багато систем еталонного тестування, що відрізняються одна від одної програмною архітектурою, набором атак та інтерфейсом. Розглянемо деякі з них.

### 2.4.1 Система Stirmark

Stirmark була розроблена у 1997 р. і є першопрохідником у галузі еталонного тестування алгоритмів цифрового маркування. Є набір класів, написаних на мовах програмування C і C++. Графічний інтерфейс користувача відсутній, що створює незручності при її використанні та вимагає детального ознайомлення з інструкцією.

Система включає набір простих атак (найпоширеніші операції з обробки зображення), атак видалення ЦВЗ чи відключення його виявлення декодером. Параметри шкідливих впливів прописані у функціях класів системи. Отже, для їхньої зміни потрібна безпосередня робота з кодом програми. Для тестування алгоритму необхідне його перетворення на вигляд програмної бібліотеки. Якість зображення оцінюється за такими показниками як PSNR та кореляція.

Крім високої складності до інших недоліків Stirmark належить:

- відсутність можливості автоматизованого виконання багаторазових перевірок алгоритму цифрового маркування;
- відсутність оцінки ймовірності помилкового спрацьовування декодера;
- відсутність оцінки складності алгоритму стеганографії.

Таким чином, Stirmark має досить великі можливості для тестування стійкості, проте в сукупності з наведеними вище недоліками дана система не зручна у використанні. Однак варто відзначити, що пізніше авторами даної системи було розроблено клієнт-серверну версію, в якій було усунуто її деякі недоліки.

### 2.4.2 Система Checkmark

Checkmark є іншим поколінням систем еталонного тестування. Система написана мовою програмування Matlab. Графічний інтерфейс користувача

відсутній. Як контейнер використовується зображення формату JPEG. Інші графічні формати не підтримуються цією системою.

У Checkmark порівняно зі Stirmark збільшено кількість шкідливих впливів. Так, наприклад, було додано стискання JPEG2000, що досить актуально у зв'язку з його високою ефективністю і, отже, великим впливом, що руйнує, у порівнянні з JPEG. Однак як і у Stirmark відсутня атака неоднозначності. У порівнянні з представленою вище системою в Checkmark було введено додаткові метрики оцінки якості зображення: виважено PSNR та метод Уотсона.

Наведені вище недоліки Stirmark були усунені у цій системі.

### 2.4.3 Система Optimark

Optimark – система еталонного тестування з графічним інтерфейсом користувача, що є безперечним перевагою порівняно зі Stirmark та Checkmark. Як шкідливі дії використовуються: загальні операції з обробки зображень, атаки відключення виявлення ЦВЗ детектором, атака невизначеності.

На відміну від Stirmark і Optimark, у яких тестований алгоритм імпортується у вигляді програмної бібліотеки, Optimark для тестування алгоритму від користувача потрібно створити дві консольні програми, що відповідають за впровадження водяного знака та його вилучення.

Основними недоліками Optimark є мала кількість атак, відсутність можливості додавання нових шкідливих впливів та застосування простих метрик сприйняття якості зображення. Так, наприклад, на даний момент у системі відсутня атака компресії JPEG2000, що унеможливило використання Optimark у даній роботі.

#### 2.4.4 Система RK Benchmark

RK Benchmark – система тестування з графічним програмним інтерфейсом, написана на мові програмування Matlab. Була розроблена з метою спрощення аналізу стійкості вбудованих водяних знаків, у зв'язку з тим, що, на думку автора, інші системи складні та важкі розуміння. За доступним типом шкідливих впливів перевищує Stirmark, Checkmark, Optimark. Має відносно малу годину оцінки алгоритму.

Виходячи з вигляду програмного інтерфейсу даної системи зроблено висновок про те, що користувач може коригувати параметри розробленого алгоритму тільки у своєму програмному коді, написаному мовою Matlab, що може викликати деякі незручності під час роботи з цією системою. Іншими недоліками є відносно невелика кількість видів шкідливих впливів, а також невелика кількість метрик аналізу якості зображення (тільки PSNR та нормалізована кореляція).

### 3. ПІДВИЩЕННЯ СТІЙКОСТІ ЧАСТОТНИХ АЛГОРИТМІВ ЦИФРОВОГО МАРКУВАННЯ ДО JPEG СТИСНЕННЯ

#### 3.1 Втрата інформації при JPEG стисненні

Загальна схема JPEG стиснення представлена на рисунку 3.1. Докладно розглянемо ті етапи компресії, у яких відбувається основна втрата інформації зображення.



Рисунок 3.1 – Основні етапи процедури стиснення по стандарту JPEG

Як видно зі схеми, основним операціям перетворення зображення передуює його попередня обробка – переклад RGB схеми YCbCr (етап 1) з її подальшою дискретизацією (етап 2). Далі зображення розбивається на однакові блоки пікселів косинусному перетворенню ДКП (етап 3), що здійснюється за формулою

$$\text{ДКП}(i, j) = C(i) * C(j) * \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) * \cos \left[ \frac{(2x+1)i\pi}{2N} \right] * \cos \left[ \frac{(2y+1)j\pi}{2N} \right], (3.1)$$

$$\text{де } C(i), C(j) = \begin{cases} \sqrt{\frac{1}{N}} & \text{при } i, j = 0 \\ \sqrt{\frac{2}{N}} & \text{при } i, j = 1, 2, \dots, N - 1 \end{cases}, \quad (3.2)$$

де  $f(x, y)$  – піксел зображення.

Внаслідок застосування ДКП отримуємо матрицю коефіцієнтів ДКП. На цьому етапі відбувається перерозподіл енергії кожного блоку зображення, що супроводжується незначною втратою інформації зображення, зумовленої похибкою обчислення ДКП. Низькочастотні складові кожного блоку знаходяться в області верхнього лівого угла матриці коефіцієнтів. У нижньому правому кутку є високочастотні складові. Коефіцієнт, розташований у верхньому лівому кутку, називається DC-коефіцієнтом. Він містить переважну частину енергії блоку. Інші коефіцієнти називаються AC-коефіцієнтами. Чим ближче AC-компонент до правого нижнього кута таблиці коефіцієнтів, тим вища його частота. На рисунках 3.2 а) та 3.3 а) представлені приклади перерозподілу енергії зображення за допомогою ДКП для гладкої (рисунок 3.2 б)) та складної текстури (рисунок 3.3 б)).

171	172	174	172	172	173	174	176	1385,50	-3,39	-2,76	1,68	-1,75	4,19	-2,10	1,57
172	169	174	176	175	178	177	173	2,41	-5,28	1,03	-3,84	0,95	0,55	3,97	1,55
174	171	178	174	175	170	176	174	1,78	1,45	-2,16	0,33	0,34	0,55	0,54	0,65
173	171	171	174	174	174	176	174	-3,67	-0,91	2,24	1,19	-3,96	-3,00	-0,13	-4,08
170	172	171	172	171	172	173	172	-2,25	-2,16	3,25	-3,26	3,00	-2,42	0,01	-0,99
172	176	171	171	171	175	175	175	-0,83	3,50	-1,56	2,74	-1,22	1,29	-1,59	1,26
174	173	172	175	175	175	175	160	1,70	-0,75	6,54	-6,40	1,48	-3,64	0,66	1,53
174	173	173	175	175	171	174	174	-3,19	4,29	-2,39	-1,22	-0,76	1,24	-0,48	2,80

а)

б)

Рисунок 3.2 – Перерозподіл енергії гладкою текстурою: а) гладка текстура; б) коефіцієнти ДКП гладкої текстури

208	244	108	173	71	112	181	245	1116,13	102,47	44,85	-99,15	-95,38	-24,60	40,01	-26,14
231	246	234	193	12	97	192	87	135,21	58,72	79,59	-20,98	-9,77	108,64	-71,45	-85,82
32	40	202	189	25	195	70	149	-17,91	-31,36	99,05	-58,11	3,41	53,09	64,48	-30,85
233	248	245	100	210	203	173	57	-20,26	10,15	43,98	21,87	90,44	-104,04	-189,06	-45,88
161	244	167	167	177	48	167	192	142,38	1,78	135,95	34,85	0,87	5,43	-16,40	80,74
25	124	9	44	81	125	41	65	60,05	0,43	-112,21	42,68	29,49	-102,01	7,72	4,15
71	204	217	180	242	114	30	129	-210,82	-168,90	23,73	21,92	0,07	15,28	97,45	-79,94
139	36	238	8	9	165	127	178	36,65	-64,61	-47,04	-135,14	94,39	-15,52	0,06	-26,08

а)

б)

Рисунок 3.3 – Перерозподіл енергії складною текстурою: а) складна текстура;  
б) коефіцієнти ДКП складної текстури

Як видно з прикладу, для складної текстури характерна більша концентрація енергії в АС-коефіцієнтах, ніж АС-коефіцієнти гладкої текстури.

Після перерозподілу енергії здійснюється квантування коефіцієнтів ДКП. На цьому етапі відбувається основна втрата інформації зображення. Операція квантування полягає у розподілі кожного елемента матриці ДКП на відповідний елемент матриці квантування з подальшим округленням приватного до найближчого цілого.

Стандарт JPEG дозволяє користувачеві задавати власну таблицю квантування. Однак найбільшого поширення набули таблиці, наведені у стандарті JPEG, як приклад. На рисунках 3.4 та 3.5 відображено дані таблиці квантування для яскравості та кольорової складової відповідно.

16	11	10	16	24	40	51	61
12	12	14	19	26	58	60	55
14	13	16	24	40	57	69	56
14	17	22	29	51	87	80	62
18	22	37	56	68	109	103	77
24	35	55	64	81	104	113	92
49	64	78	87	103	121	120	101
72	92	95	98	112	100	103	99

Рисунок 3.4 – Квантування яскравості

17	18	24	47	99	99	99	99
18	21	26	66	99	99	99	99
24	26	56	99	99	99	99	99
47	66	99	99	99	99	99	99
99	99	99	99	99	99	99	99
99	99	99	99	99	99	99	99
99	99	99	99	99	99	99	99
99	99	99	99	99	99	99	99

Рисунок 3.5 – Квантування колірної складової

Надалі вони будуть використані для оцінки стійкості алгоритмів цифрового маркування до стискання JPEG.

З значень таблиць квантування видно, що найбільш зміни піддаються високочастотні коефіцієнти, як менш значущі.

Для регулювання ступеня стиснення в алгоритмі JPEG існує коефіцієнт якості  $Q$ , який знаходиться в діапазоні від 0 до 100. Чим менший коефіцієнт якості, тим вищий рівень стиснення. Таблиці, що представлені на рисунках 3.4 та 3.5, відповідають  $Q = 50$ . Щоб визначити коефіцієнти квантування для інших значень  $Q$  визначається коефіцієнт масштабування  $S$  за формулою (3.1)

$$S = \begin{cases} \frac{500}{Q}, & \text{якщо } Q < 50 \\ 200 - 2Q, & \text{якщо } Q \geq 50 \end{cases} \quad (3.1)$$

Нова таблиця квантування будується за формулою (3.2)

$$T_s[i, j] = \left[ \frac{STb[i, j] + 50}{100} \right], \quad (3.2)$$

де  $T$  – вихідна таблиця квантування для  $Q = 50$ ;

$T_s$  – масштабована таблиця квантування;

$(i, j)$  – координати коефіцієнта в таблиці.

Кожний здобуток за формулою (3.2) елемент таблиці округляється у бік меншого цілого числа. Однак якщо отриманий елемент менше 1, йому присвоюється значення 1. Якщо отриманий елемент таблиці більше 255, то йому присвоюється значення 255. При  $Q = 100$  всі елементи таблиці квантування приймають значення, рівні 1, при  $Q = 0$  – значення, рівні 255. Таким чином, можливі значення елементів даної таблиці квантування укладені в інтервалі від 1 до 255.

На наступних етапах немає необоротної втрати інформації. Після квантування таблиця отриманих коефіцієнтів кожного блоку зображення вишиковується у вектор за допомогою Зигзаг сканування, починаючи з DC-коефіцієнта у бік нижнього правого угла таблиці. В результаті утворюється набір векторів-рядків, у кожному з яких утворюється більше нульових послідовностей, що забезпечує подальшу ефективність стиснення без втрат на кроках 6 (стиснення RLE) та 7 (стиснення Хаффмана).

Процес відновлення зображення аналогічний процесу стиснення, але всі кроки виконуються в зворотному порядку. Однак варто зазначити, що замість процедури квантування коефіцієнтів ДКП здійснюється процедура їх деквантування, в результаті якої кожен квантований коефіцієнт множиться на таблицю квантування, що використовується при стисканні. Для відновлення значень яскравості використовується зворотне ДКП, яке здійснюється за формулою (3.3):

$$f(x, y) = \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} C(i) * C(j) * \text{ДКП}(x, y) * \cos \left[ \frac{(2x+1)i\pi}{2N} \right] * \cos \left[ \frac{(2x+1)i\pi}{2N} \right]$$

$$\text{при } C(i), C(j) = \begin{cases} \sqrt{\frac{1}{N}}, \text{ при } i, j = 0 \\ \sqrt{\frac{2}{N}}, \text{ при } i, j = 1, 2, \dots, N - 1 \end{cases} \quad (3.3)$$

На рисунках 3.6 б) та 3.7 б) наведено приклади коефіцієнтів ДКП гладкої та складної текстур, що пройшли процедури квантування, а потім деквантування з використанням таблиці квантування для  $Q = 50$ .

1392	0	0	0	0	0	0	0	0	1385,50	-3,39	-2,76	1,68	-1,75	4,19	-2,10	1,57
0	0	0	0	0	0	0	0	0	2,41	-5,28	1,03	-3,84	0,95	0,55	3,97	1,55
0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,78	1,45	-2,16	0,33	0,34	0,55	0,54	0,65
0	0	0	0	0	0	0	0	0	-3,67	-0,91	2,24	1,19	-3,96	-3,00	-0,13	-4,08
0	0	0	0	0	0	0	0	0	-2,25	-2,16	3,25	-3,26	3,00	-2,42	0,01	-0,99
0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0,83	3,50	-1,56	2,74	-1,22	1,29	-1,59	1,26
0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,70	-0,75	6,54	-6,40	1,48	-3,64	0,66	1,53
0	0	0	0	0	0	0	0	0	-3,19	4,29	-2,39	-1,22	-0,76	1,24	-0,48	2,80

а)

б)

Рисунок 3.6 – Квантування коефіцієнтів ДКП гладкою текстурою:

а) коефіцієнти ДКП гладкою текстурою; б) відновлені коефіцієнти ДКП гладкою текстурою

1120	99	40	-96	-96	-40	51	0	1116,13	102,47	44,85	-99,15	-95,38	-24,60	40,01	-26,14
132	60	84	-19	0	116	-60	-110	135,21	58,72	79,59	-20,98	-9,77	108,64	-71,45	-85,82
-14	-26	96	-48	0	57	69	-56	-17,91	-31,36	99,05	-58,11	3,41	53,09	64,48	-30,85
-14	17	44	29	102	-87	-160	-62	-20,26	10,15	43,98	21,87	90,44	-104,04	-189,06	-45,88
144	0	148	56	0	0	0	77	142,38	1,78	135,95	34,85	0,87	5,43	-16,40	80,74
72	0	-110	64	0	-104	0	0	60,05	0,43	-112,21	42,68	29,49	-102,01	7,72	4,15
-196	-192	0	0	0	0	120	-101	-210,82	-168,90	23,73	21,92	0,07	15,28	97,45	-79,94
72	-92	0	-98	112	0	0	0	36,65	-64,61	-47,04	-135,14	94,39	-15,52	0,06	-26,08

а)

б)

Рисунок 3.7 – Квантування коефіцієнтів ДКП складною текстурою: а) коефіцієнти ДКП складною текстурою; б) відновлені коефіцієнти ДКП складною текстурою

Як видно з прикладу, всі АС-коефіцієнти гладкої текстури були знищені в процесі квантування. У той же час, за рахунок більшої концентрації енергії основна частина АС-коефіцієнтів складної текстури збереглася. Таким чином, при стисканні JPEG найбільша втрата інформації відбувається при квантуванні коефіцієнтів ДКП, при якому більша кількість інформації зберігається у складних блоках текстур. Отже, складні текстури найбільш підходять для вбудовування цифрового водяного знаку

### 3.2 Вплив JPEG стиснення на коефіцієнти перетворення Адамара

У цій роботі для дослідження було вибрано алгоритми цифрового маркування, що ґрунтуються на використанні дискретного перетворення Адамара (ДПА). Отже, необхідно визначити взаємозв'язок між коефіцієнтами даного перетворення та ДКП, оскільки саме коефіцієнти ДКП піддаються квантуванню у процесі стиснення JPEG.

#### 3.2.1 Перетворення Адамара

Дискретне перетворення Адамара належить до класу ортогональних перетворень у діадних базисах, обчислювальна складність якого менша порівняно з такими перетвореннями, як ДКП та ДВП.

Ядром цього перетворення є матриця Адамара. Елементи даної матриці приймають значення 1 та -1. Матриця Адамара описує перетворення, пов'язане з розкладанням функцій сімейства прямокутних базисних функцій.

Як правило, як ядро ДПА використовується матриця порядку  $N = 2^n$ , де  $n$  – ціле число. Матриця ядра ДПА має властивістю симетричність.

$$A_N = A_N^T \quad (3.4)$$

Ядро ДПА порядку  $N = 2^n$ , де  $n$  – ціле позитивне число, формуються при допомозі операції кронекерівського множення матриць, де  $A_2$  представляє собою матрицю Адамара найменшого порядку.

$$A_{2N} = A_N \otimes A_2 = \begin{bmatrix} A_N & A_N \\ A_N & -A_N \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

В алгоритмах цифрового маркування нерухомих зображень зазвичай використовують ядро ДПА порядку  $N = 8$ , оскільки при компресії JPEG зображення також розбивається на блоки розміром  $8 \times 8$ . Дане ядро представлено формулою 3.6.

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 & -1 & 1 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 & -1 & 1 & 1 & -1 \end{bmatrix}. \quad (3.6)$$

Число змін знака рядків матриці аналогічно частотній концепції перетворення Фур'є. Так само, як і в ДКП основна енергія зображення під час використання ДПА зосереджена в DC-коефіцієнті (верхній лівий угол таблиці коефіцієнтів), інші коефіцієнти – AC. При цьому умовно вважається, що частота коефіцієнтів тим більша, чим більше число змін знаків у відповідному рядку/стовпці матриці ядра ДПА.

Двовимірне перетворення Адамара визначається за формулою (3.7):

$$f_{KL} = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} \sum_{n=0}^{N-1} x_{mn} (-1)^{km+nl} \quad (3.7)$$

де  $m, n$  – індекси пікселі вихідного зображення;  
 $k, l$  – індекси коефіцієнтів ДПА.

Зворотнє перетворення Адамара еквівалентне прямому перетворенню внаслідок симетричності ядра перетворення Адамара.

Ядро ДПА має властивість роздільності ядра перетворення за змінним підсумовування, отже, для зменшення обчислювальної складності пряме та зворотнє ДПА може бути обчислено рядково-стовпцевим способом за формулою (3.8), при якому

$$F_N = \frac{1}{N} A_N [X_N A_N]. \quad (3.8)$$

Одномірні ДПА послідовательно застосовуються до рядків матриці вихідних даних, а потім до стовпців матриці, що виходить проміжних даних де  $X_N$  – вихідне зображення (у разі прямого ДПА) або частотна матриця коефіцієнтів (у разі зворотного ДПА),  $F_N$  – матриця коефіцієнтів ДПА зображення (у випадку прямого ДПА) або матриця пікселів зображення (у випадку зворотного ДПА),  $N$  – розмір перетворюваною матриці. Рядко-стовпцевий метод дозволяє скоротити обсяг обчислень з  $N$  до  $2N$  базових операцій (дій під знаками подвійний суми).

Для більшого зменшення обчислювальної складності можна використовувати алгоритм швидкого перетворення Адамара, який дозволить скоротити число базових операцій з  $N$  до  $(N \times \log_2 N)/2$  при виконанні кожного одновимірного перетворення.

### 3.2.2 Взаємозв'язок коефіцієнтів ДПА і ДКП

JPEG стиснення підстав на використанні ДКП. У цій роботі як основа для алгоритмів цифрового маркування обрано перетворення Адамара. Отже, необхідно визначити, як впливає зміна коефіцієнтів ДКП на частотні складові ДПА.

Для визначення взаємозв'язку між коефіцієнтами ДПА та ДКП було проведено обчислювальний експеримент, послідовність дій якого така:

- генерація напівтонової текстури розміром  $8 \times 8$ ;
- обчислення коефіцієнтів ДПА і ДКП отриманої матриці пікселів;
- ДПА;
- почергове зміна кожного коефіцієнта отриманої матриці;
- обчислення зворотного ДПА з отриманням видозміненою текстури;
- обчислення двовимірного ДКП видозміненої текстурою;
- визначення змін вихідних коефіцієнтів даного перетворення.

Аналогічні операції проводилися при зміні коефіцієнтів ДКП. У результаті експерименту було виявлено 5 груп взаємопов'язаних коефіцієнтів ДПА і ДКП. Зміна будь-якого коефіцієнта з групи одного перетворення наводить до зміни всіх коефіцієнтів відповідного набору тієї ж групи іншого перетворення. Відповідність між коефіцієнтами ДКП  $d_{y,x}$  і ДПА  $a_{y,x}$  представлено в таблиці 3.1.

У таблиці 3.1 представлено становище взаємозалежних коефіцієнтів ДКП та ДПА, зміна яких була суттєвою. Зміни коефіцієнтів порядку  $10^{-12}$  і менше не враховувалися через їхню незначність у контексті завдання цифрового маркування. Найбільш примітна перша група, в якій величина коефіцієнтів двох перетворень практично ідентична. Таким чином, якщо в алгоритми цифрового маркування змінювати коефіцієнти першої групи, то стійкість при використанні ДПА має практично повністю відповідати стійкості того ж алгоритму, але заснованого на ДКП. Також, подібні алгоритми будуть суттєво вигравати в зменшенні обчислювальної складності.

Для решти груп зміна одного коефіцієнта пропорційно сумарному зміні відповідної групи коефіцієнтів іншого перетворення. При цьому найбільшому зміні підлягає коефіцієнт, близький до діапазону частот модифікованого частотного компонента іншого перетворення. Пари таких коефіцієнтів мають дуже схожі коливання на всьому діапазоні значень

параметра якості JPEG, приклад такого подоби відображено на рисунку 3.9 для  $a_{1,5}$  і  $d_{1,2}$ .

Таблиця 3.1 – Взаємозалежність коефіцієнтів ДКП і ДПА

Групи коефіцієнтів	$d_{y,x}$	$a_{y,x}$
1	2	3
1-коефіцієнтна	1,1	1,1
	1,5	1,4
	5,1	4,1
	5,5	4,4
2-коефіцієнтна	1,3 1,7	1,6 1,7
	3,1	6,1
	7,1	7,1
	3,5	6,4
	7,5	7,4
	5,3 5,7	4,6 4,7
4-коефіцієнтна	1,2 1,4 1,6 1,8	1,2 1,3 1,5 1,8
	5,2 5,4 5,6 5,8	4,2 4,3 4,5 4,8
	2,1	2,1
	4,1	3,1
	6,1	5,1
	8,1	8,1
	2,5	2,4
	4,5	3,4
	6,5	5,4
	8,5	8,4
	3,3 3,7	6,6 6,7
	7,3 7,7	7,6 7,7

Продовження таблиці 3.1

1	2	3
8-коефіцієнтна	2,3 2,7	2,6 2,7
	4,3 4,7	3,6 3,7
	6,3 6,7	5,6 5,7
	8,3 8,7	8,6 8,7
	3,2 3,4 3,6 3,8	6,2 6,3 6,5 6,8
	7,2 7,4 7,6 7,8	7,2 7,3 7,5 7,8
16-коефіцієнтна	2,2 2,4 2,6 2,8	2,2 2,3 2,5 2,8
	4,2 4,4 4,6 4,8	3,2 3,3 3,5 3,8
	6,2 6,4 6,6 6,8	5,2 5,3 5,5 5,8
	8,2 8,4 8,6 8,8	8,2 8,3 8,5 8,8

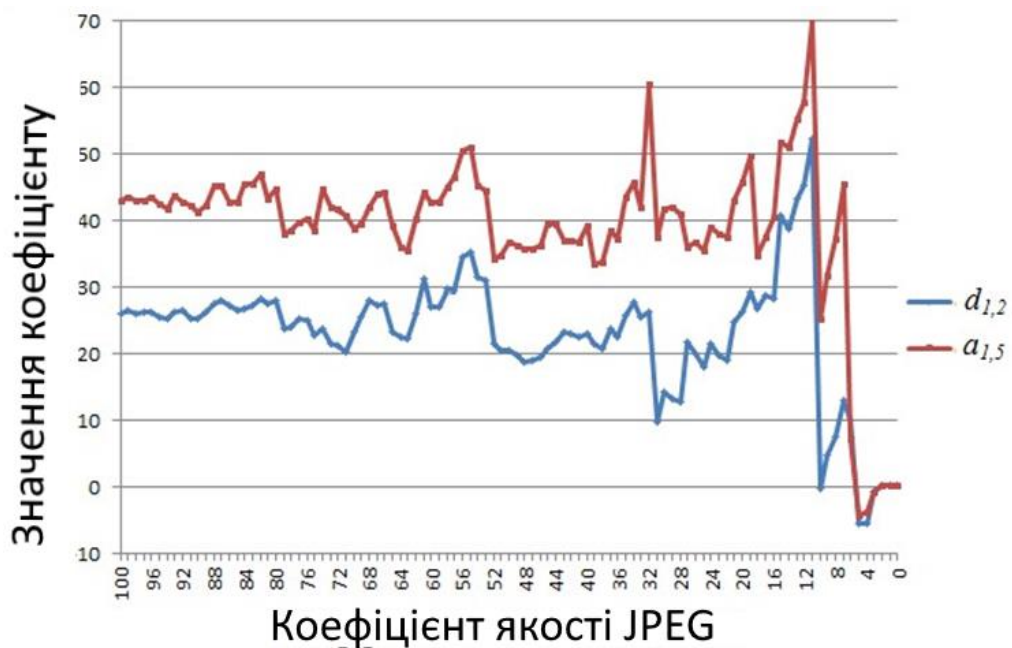


Рисунок 3.8 – Порівняння коливань подібних частотних складових ДПА та ДКП для будь-якого показника якості JPEG

Виходячи з того, що в процесі JPEG стиснення найменшого квантування піддаються низькочастотні компоненти ДКП і на основі аналізу взаємозалежності компонентів ДПА і ДКП були обрані теоретично

найбільш стійкі до компресії коефіцієнти дискретного перетворення Адамара. Їхнє місце розташування в матриці представлено на рисунку 3.9 а).

1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8
2,1	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8
3,1	3,2	3,3	3,4	3,5	3,6	3,7	3,8
4,1	4,2	4,3	4,4	4,5	4,6	4,7	4,8
5,1	5,2	5,3	5,4	5,5	5,6	5,7	5,8
6,1	6,2	6,3	6,4	6,5	6,6	6,7	6,8
7,1	7,2	7,3	7,4	7,5	7,6	7,7	7,8
8,1	8,2	8,3	8,4	8,5	8,6	8,7	8,8

а)

1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8
2,1	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8
3,1	3,2	3,3	3,4	3,5	3,6	3,7	3,8
4,1	4,2	4,3	4,4	4,5	4,6	4,7	4,8
5,1	5,2	5,3	5,4	5,5	5,6	5,7	5,8
6,1	6,2	6,3	6,4	6,5	6,6	6,7	6,8
7,1	7,2	7,3	7,4	7,5	7,6	7,7	7,8
8,1	8,2	8,3	8,4	8,5	8,6	8,7	8,8

б)

Рисунок 3.9 – Низькочастотні коефіцієнти: а) ДПА; б) відповідні низькочастотним компонентам ДКП

Порядок обраних компонентів ДПА  $a_i$  у бік збільшення частотності: 1,1; 1,5; 5,1; 1,7; 5,5; 7,1; 3,1; 7,5; 5,7; 1,3; 1,4; 5,3; 7,7; 3,5; 4,1. Відповідні їм коефіцієнти ДКП  $d_i$  розташовані в порядку Зигзаг сканування (рисунок 3.10 б): 1,1; 1,2; 2,1; 3,1; 2,2; 1,3; 1,4; 2,3; 3,2; 4,1; 5,1; 4,2; 3,3; 2,4; 1,5.3.3

### 3.2.3 Дослідження алгоритму Elham

Для дослідження ефективності перетворення Адамара в галузі цифрового маркування нерухомих зображень було вибрано алгоритм Elham, що поєднує в собі відносну простоту реалізації та стійкість впровадженого ЦВЗ до стиснення JPEG. Розглянемо алгоритм докладніше. Алгоритм не є сліпим, тобто для отримання вбудованої інформації потрібний вихідний контейнер. Подібний підхід спрощує завдання протидії деяким вредним впливам, наприклад, компресії або зміни розміру. Виходячи з аналізу публікації [16] зроблено висновок про те, що алгоритм призначений для напівтонових зображень.

Відмінною особливістю алгоритму Elham є попередня обробка ЦВЗ, що імітує процес стискання JPEG. Основна мета операції – суттєво скоротити обсяг вбудованої інформації без значного зменшення зовнішнього вигляду ЦВЗ. Водяний знак розбивається на блоки розміром  $K \times K$ , кожний з яких застосовується ДКП. Кожна отримана матриця коефіцієнтів вибудовується у вектор-рядок з використанням алгоритму Зигзаг сканування. У кожній рядки зберігаються тільки  $L$  коефіцієнтів, що йдуть поспіль, починаючи з першого. Потім усі рядки об'єднуються в єдину строчку, елементи якої будуть вбудовані в контейнер.

Після операції попередньої обробки контейнер розбивається блоками розміром  $M \times M$ . Серед одержаних блоків вибираються найінформативніші. Як правило, алгоритми, подібні до Elham, для оцінки складності текстури використовують такий параметр, як ентропія зображення, яка найчастіше визначається за формулою Шеннона:

$$E = - \sum_{i=1}^n p_i \log_2(p)_i, \quad (3.9)$$

де  $p_i$  – ймовірність виникнення пікселя з відповідної яскравістю в блоці;

$p$  – ймовірність  $p$  знаходиться в інтервалі  $[0;1]$ .

Сума ймовірностей усіх типів яскравостей блоку дорівнює 1. Чим вище значення ентропії масиву пікселів, тим складніша текстура. Ентропія абсолютно гладкої текстури (кожний елемент якої має однакові значення яскравості) дорівнює нулю.

В алгоритмі Elham спочатку оцінюється ентропія навколо кожного пікселя обраного блоку, потім обчислюється середнє значення. Блоки, чия ентропія перевищує завдання поріг, піддаються ДПА подальшого застосування ЦВЗ. Впровадження здійснюється за формулою 2.2, поданою у розділі 2. Коефіцієнт посилення вибирається заздалегідь і залишається

постійним протягом усього процесу впровадження. Після вбудовування виконується зворотне ДПА. Модифіковані та незмінені блоки об'єднуються.

Процес отримання водяного знака здійснюється аналогічно, але всі операції виконуються у зворотному порядку. Вихідне зображення-контейнер необхідне визначення місцезнаходження модифікованих блоків стеганоконтейнера. Вилучення частотного коефіцієнта ЦВЗ здійснюється за такою формулою 2.3, поданою в розділі 2. Сформований вектор рядок розбивається на однакові блоки, тривалість яких була визначена при вбудовуванні водяного знака. З кожної рядки формується матриця коефіцієнтів ДКП розміром  $K \times K$ . Кожен блок піддається зворотному ДКП. Отримані матриці поєднуються, тим самим відновлюючи вбудовування ЦВЗ.

Таким чином, алгоритм Elham має такі регульовані параметри:  $(y, x)$  модифікованих коефіцієнтів вбудовування в блоці:

- $K, M$  – розміри блоків декомпозиції ЦВЗ та контейнера;
- коефіцієнт сили вбудовування  $\alpha$  прихованої інформації;
- $L$  – кількість збережених коефіцієнтів кожного блоку  $K \times K$  ЦВЗ;
- поріг ентропійного маскування  $E$ .

Розглянемо вплив даних параметрів на непомітність вбудовування ЦВЗ та її стійкість до різних атак визначення шляхів подальшого удосконалення алгоритму.

### 3.3.1 Аналіз непомітності ЦВЗ, вбудованого алгоритмом Elham

З перерахованих вище параметрів вплив на непомітність вбудованого ЦВЗ надає вибір положення модифікованих коефіцієнтів, порог ентропії  $E$  і коефіцієнт сили вбудовування  $\alpha$ .

Для визначення впливу даних параметрів на непомітність ЦВЗ було проведено обчислювальний експеримент. Як тестові контейнери були використані 9 напівтонових зображень розміром  $512 \times 512$ , що відрізняються один від одного яскравістю та рівнем ентропії. Як параметри  $K, M, L$  та  $\alpha$

обрані значення, які використовував автор алгоритму, а саме: 8, 8, 15 та 35. Для кожного тестового зображення поріг ентропії підбирався індивідуально таким чином, щоб задіяти для вбудовування якомога більше складних текстур. Після визначення максимально допустимого порога ентропії виконувалася оцінка коефіцієнта ДПА, що викликає найменші спотворення.

В результаті експерименту було встановлено, що якщо в зображенні мало складних текстур, їх буде неможливо ефективно використовувати, тому що коефіцієнт  $\alpha$  є константою, і, отже, вбудовування ЦВЗ у текстури з низьким рівнем ентропії вимагає малого коефіцієнта посилення  $\alpha$  для непомітності. В іншому випадку будуть помітні артефакти впровадження. Теоретично, цей недолік повинен позначитися і на робастності вбудованого ЦВЗ, яка краща, ніж більший коефіцієнт сили вбудовування.

При однаковому значенні параметра для блоків з високою ентропією найбільша непомітність досягалася при використанні низькочастотних коефіцієнтів для вбудовування (рисунок 3.10 а) для  $\alpha_{1,5}$ ).

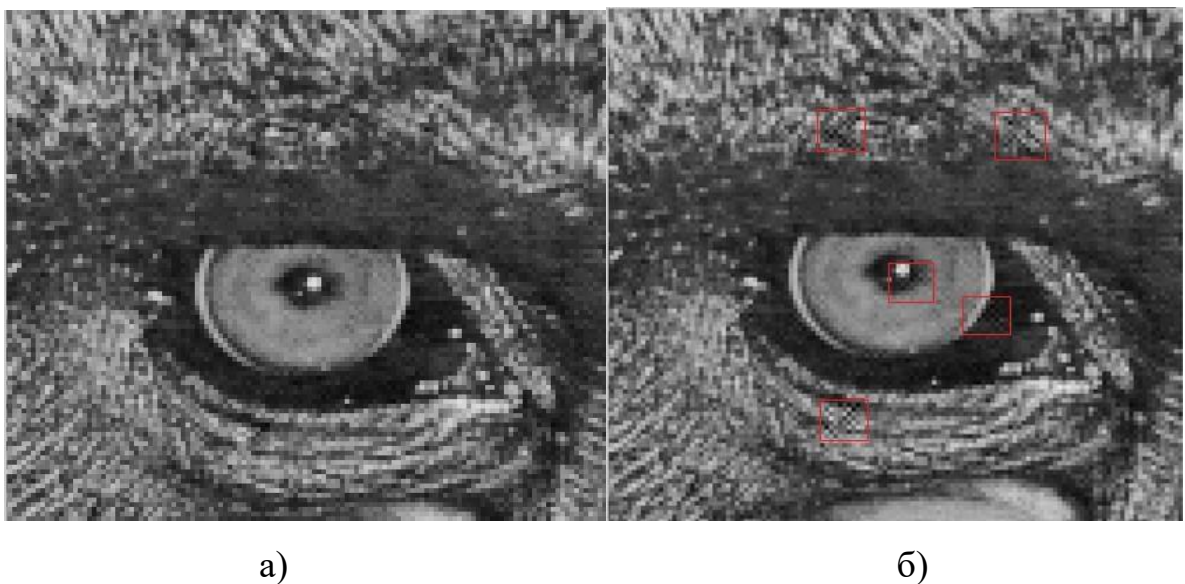


Рисунок 3.10 – Вид стеганоконтейнера при використанні: а) низькочастотні коефіцієнти ДПА; б) високочастотні коефіцієнти ДПА

Найкраща непомітність спостерігалася при використанні DC-коефіцієнта. Однак варто враховувати, що використання DC-коефіцієнта теоретично може зробити водяний знак вкрай уразливим до атак стеганоконтейнера, спрямованим на зміну яскравості пікселів. Зі збільшенням частотності використовуваного коефіцієнта для блоків з високою ентропією збільшувалася помітність спотворень (рисунок 3.10 б) для  $a_{2,2}$ ), що виявляється в освіті областей з порогамі малої площі, але більшої інтенсивності.

Середнє значення PSNR для 9 тестових зображень становить 43,2 дБ, що означає високий рівень непомітності що вносяться в контейнер спотворень.

### 3.3.2 Аналіз стійкості алгоритму Elham до шкідливим впливам

Виходячи з теми даної роботи, основну увагу приділено аналізу стійкості алгоритмів цифрового маркування до стиснення JPEG. Отже, оцінку опірності алгоритму Elham компресії JPEG2000, зашумлення, фільтрації, масштабування, усічення та еквалізації гістограми було проведено з використанням параметрів, що забезпечують найбільшу стійкість до компресії JPEG.

Крім перевірки стійкості, оцінці підлягала ефективність використання ДПА порівняно з ДКП та ДВП на основі цього алгоритму. Для цього головне перетворення алгоритму послідовно замінювалося на два останні з повторенням шкідливих впливів на стеганоконтейнер.

Як контейнери було вибрано кілька зображень різного рівня ентропії та яскравості. Контейнери, що використовуються, представлені в додатку 1. Як ЦВЗ було використано монохромне чорно-біле зображення розміром  $64 \times 64$  (рисунок 3.12).



Рисунок 3.11 – Водяний знак, що використовується при аналізі стійкості алгоритму

Параметри алгоритму для обчислювального експерименту:  $K = 8$ ,  $M = 8$ ,  $L = 15$ ,  $\alpha = 35$ . Для кожного тестового зображення поріг ентропії  $E$  підбирався індивідуально таким чином, щоб задіяти для вбудовування якнайбільше складних текстур. Як змінені коефіцієнти обрані такі, які найбільш близькі до низькочастотного діапазону, а саме коефіцієнт ДПА кДПА(1, 5), коефіцієнт ДКП кДКП(1, 2), коефіцієнт дискретного перетворення Хаара (ДПХ) кДПХ(1, 4), коефіцієнт дворівневого ДПХ до ДВП2 (1, 2). Отримані всім контейнерів параметри стійкості усереднювались кожної атаки.

Насамперед алгоритм був перевірений на стійкість до стиснення JPEG. Після застосування ЦВЗ стеганоконтейнер піддавався компресії з наступним вилученням ЦВЗ. Подібна операція повторювалася всього діапазону коефіцієнта якості  $Q$  (від 100 до 0). Результати тестування наведено на рисунку 3.12. Алгоритм Elham показує хорошу стійкість до стискання JPEG. ЦВЗ розпізнається включно до коефіцієнта якості  $Q = 5$ . Однак, починаючи з  $Q = 10$ , стійкість ЦВЗ починає різко знижуватися. Як і очікувалося, при використанні ДКП були досягнуті вищі результати стійкості, що пов'язано з використанням аналогічного перетворення у сжаті JPEG. Використання ДПХ показує найгірші результати, оскільки процес отримання частотних коефіцієнтів за допомогою відрізняється від ДКП та ДПА. Збільшення рівня вкладення коефіцієнтів водяного знака під час використання дворівневого ДПХ покращує показники стійкості, проте обчислювальна складність у своїй сильно зростає, що позначається на швидкості виконання алгоритму.

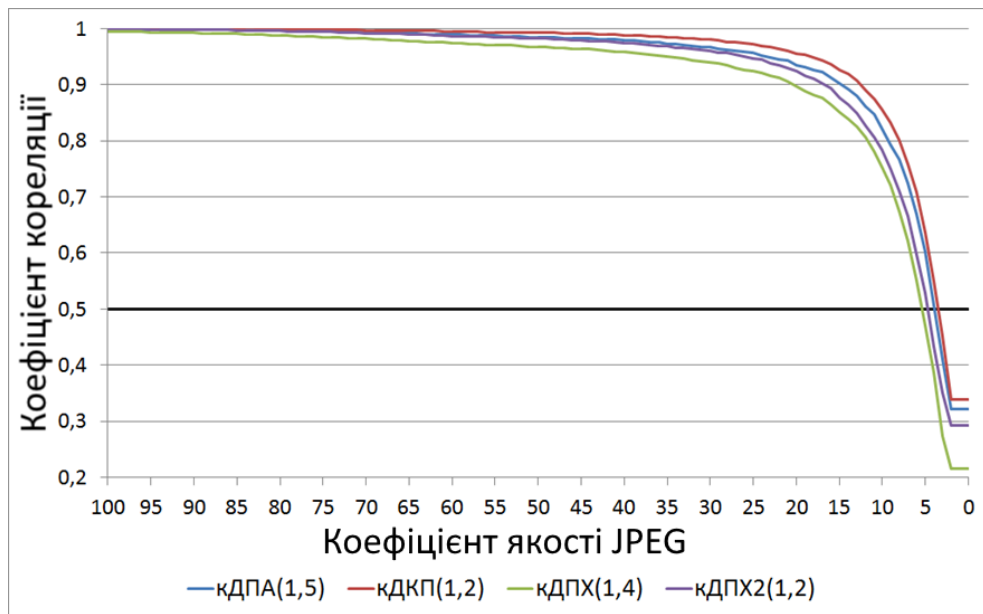


Рисунок 3.12 – Стійкість алгоритму Elham до стиску JPEG

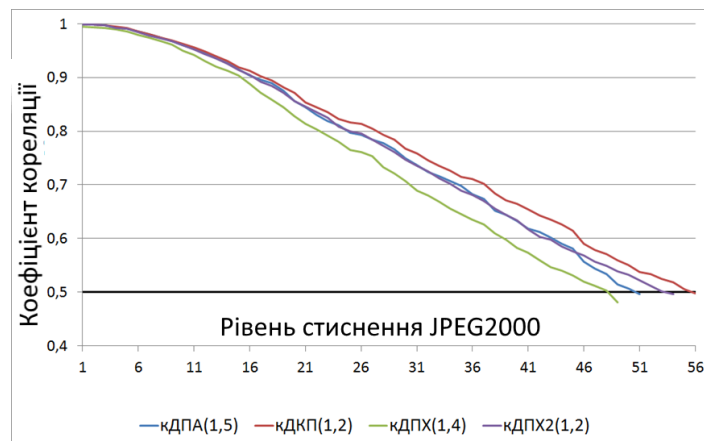


Рисунок 3.13 – Стійкість алгоритму Elham до стиснення JPEG2000

Результати стійкості алгоритму Elham проти стиснення JPEG2000 для рівнів стиснення до 56 раз включно представлені на рисунку 3.13.

Аналогічно результатам попереднього тесту найкращі показники стійкості до стискання JPEG2000 забезпечує ДКП. При його використанні ЦВЗ зберігається у допустимому якості до 55-кратного стиснення, що є недостатнім, оскільки зображення за такого рівня компресії зберігає свої комерційні властивості. Використання ДПА забезпечує схожі показники. При

цьому підхід до вбудовування використання ДПХ першого та іншого рівнів є неефективним через низькі показники першого та високої обчислювальної складності іншого перетворень.

Іншим видом шкідливого впливу є зашумлення. Одними з найшкідливіших є шум Гауса (адитивний шум) та шум «Сіль і перець» (мультиплікативний шум). Стеганоконтейнер був підданий шуму при зміні дисперсії від 0,01 до 0,1, при якому рівень спотворень зображення досягає досить високого рівня. Внаслідок того, що зашумлення матиме випадковий характер, шум при однаковому рівні дисперсії надає різні впливи на ті самі ділянки зображення.

Тому для об'єктивності вимірювань кожного кроку зміни дисперсії операція зашумлення проводилася 50 разів, потім показники усреднювались. Результати наведено на рисунках 3.14 та 3.15.

З графіка (рисунок 3.15) видно, що алгоритм Elham забезпечує стійкість ЦВЗ до шуму Гауса рівня дисперсії 0,03, що є достатнім.

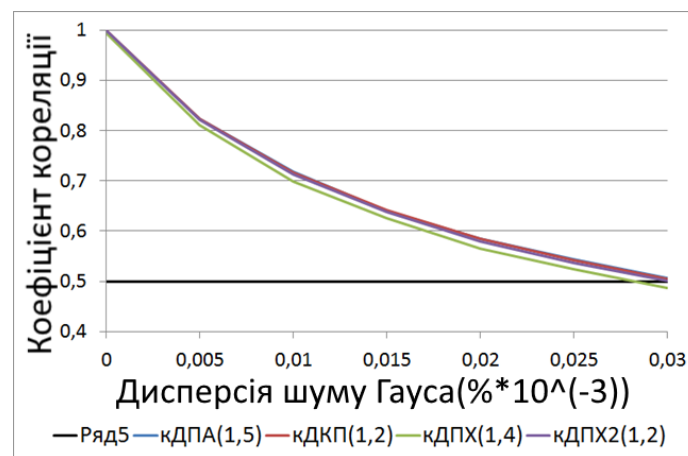


Рисунок 3.14 – Стійкість алгоритму Elham до шуму Гауса

Стійкість ЦВЗ до шуму «Сіль і перець» зберігається до дисперсії 0,085 (рисунок 3.15). Вибір ДПА, ДКП, ДПХ при даному підході до цифровому маркуванню не надає суттєвого впливу на стійкість ЦВЗ до зашумлення.

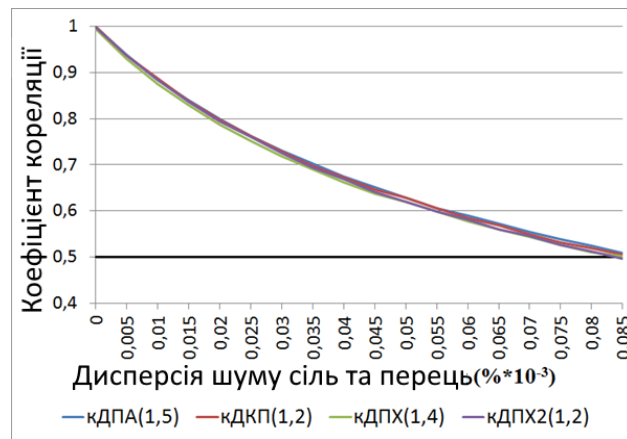


Рисунок 3.15 – Стійкість алгоритму Elham до шуму «Сіль та перець»

Для усунення ЦВЗ злодії можуть активно використовувати фільтрацію зображення, оскільки здатна ефективно усувати спотворення, викликані зашумленням. Для тестування цього алгоритму було обрано фільтр Вінера, який ефективно усуває шум Гауса. Під час тестування до стеганоконтейнера застосовувався фільтр розміром  $a \times a$ . Вікно фільтрації послідовно збільшувалося від 2 до 16. Результати стійкості представлені на рисунку 3.16.

Алгоритм Elham демонструє задовільну стійкість до Вінерівської фільтрації. Використання ДКП замість ДПА у цьому алгоритмі забезпечить незначний приріст стійкості. Найкращі та ідентичні показники спостерігаються при використанні ДПХ першого та іншого рівнів.

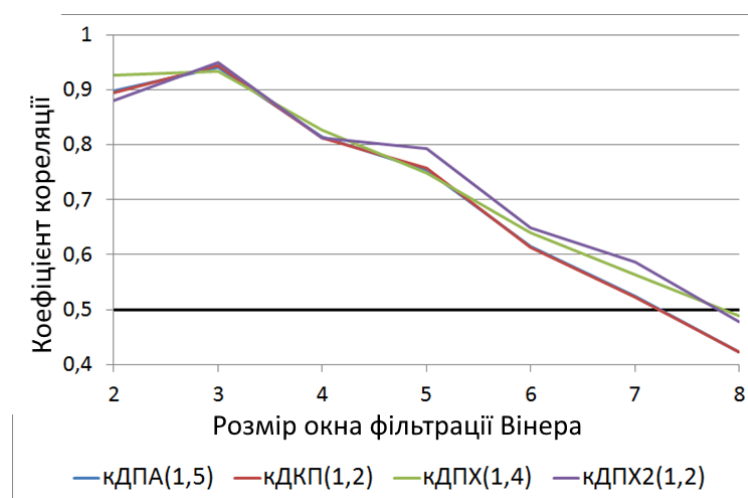


Рисунок 3.16 – Стійкість алгоритму Elham до фільтра Вінера

Показники стійкості для середньочастотної фільтрації – одного з найбільш небезпечних шкідливих впливів, представлені в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Стійкість алгоритму Elham до середньочастотної фільтрації

Тип перетворення/розмір вікна фільтрації	2×2	3×3	4×4	5×5
ДПА	0,5546259	0,840031	0,409953	0,447101
ДКП	0,5516309	0,845854	0,406798	0,455142
ДПХ	0,5171239	0,550607	0,171555	0,141432
ДПХ(2-рівневе)	0,5514369	0,833998	0,407886	0,455612

Усі 4 типи перетворень забезпечують стійкість ЦВЗ у однаковому діапазоні розмірів вікна фільтрації від 2×2 до 3×3. Найгірші результати досягнуто під час використання однорівневого перетворення Хаара. Використання ДПА та ДКП демонструє практично ідентичні показники кореляції.

Одним із найчастіше використовуваних шкідливих впливів, особливо в мережі Інтернет, є зміна розміру зображення. У процесі тестування розмір стеганоконтейнера пропорційно зменшувався включно до 10% початкового розміру з подальшим відновленням до початкового розміру. Результати тестування наведено на рисунку 3.17.

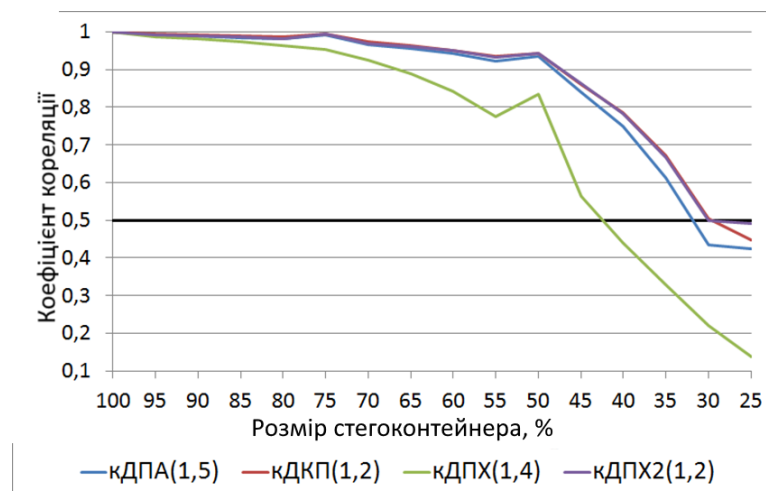


Рисунок 3.17 – Стійкість алгоритму Elham до зміни розміру зображення

У висновку розглядалася протидія алгоритму Elham шкідливим впливам, спрямованим на зміну значень яскравості пікселів: еквалізацію гістограми та зміну загальної яскравості стеганоконтейнера. Стійкість Алгоритму Elham до зміни яскравості стеганоконтейнера представлена на рисунку 3.18. Усереднене значення кореляції при еквалізації гістограми для 9 зображень при використанні кожного перетворення представлені у таблиці 3.3.

За рахунок того, що ДПА у порівнянні з іншими використовуваними перетвореннями гірше здійснює перерозподіл енергії, стійкість ЦВЗ до зміни яскравості та еквалізації гістограми трохи краща. Використання дворівневого ДПХ демонструє найгірші результати, що пов'язано з використанням низькочастотних коефіцієнтів для вбудовування, які зазнають найбільшого впливу при подібних операціях.

Таким чином, алгоритм Elham виявляє слабку стійкість до JPEG сжатию високого рівня. Алгоритм забезпечує стійкість до Вінерівської фільтрації, але не виявляє оптимальної робастності до компресії JPEG2000, шуму Гауса та шуму Сіль та перець. Алгоритм слабо протистоїти зміні яскравості пікселів зображення, особливо еквалізації гістограми.

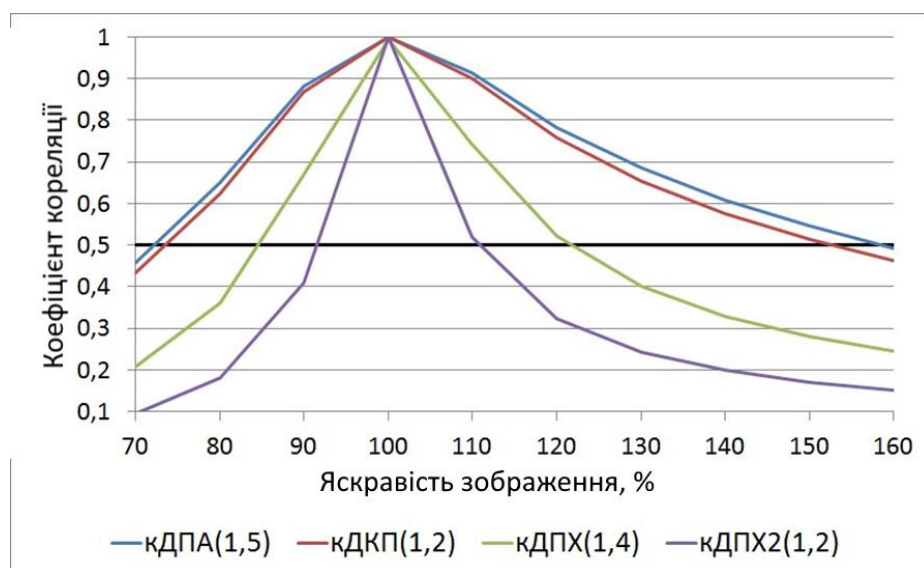


Рисунок 3.18 – Стійкість алгоритму Elham до зміни яскравості зображення

Таблиця 3.3 – Стійкість алгоритму Elham до еквалізації гістограми

ДПА	ДКП	ДПХ	ДПХ(2ух рівневе)
0,5173	0,4917	0,50	0,3469

Результати стійкості під час використання ДПА аналогічні показникам, отриманим під час використання ДКП. При цьому підхід до цифрового маркування використання ДПА є виправданим через низьку обчислювальну складність, простоту апаратної реалізації та здатністю трохи збільшувати робастність ЦВЗ до зміни яскравості та еквалізації гістограми внаслідок поганого перерозподілу енергії зображення за допомогою ДПА. Використання ДПХ першого та іншого рівнів є нецільним при даному підході через їх високу обчислювальну складність.

### 3.3 Нова стратегія вибору частотних коефіцієнтів ДПА

Для алгоритмів, подібних до Elham, для збереження інформації в процесі стиснення різниця ( $a' - a$ ) (у разі збільшення  $a$ ) або ( $a - a'$ ) (у разі зменшення  $a$ ) не повинна ставати надто малою щодо  $|w_i|$  або міняти свій знак на протилежний (рисунок 3.19). При цьому збільшення різниці допустиме, оскільки в такому випадку якість ЦВЗ знизиться набагато слабше, чим при зменшенні різниці.

При вбудовуванні ЦВЗ в вигляді частотних коефіцієнтів оптимальними є два випадку (рисунок 3.19). У першому випадку (рисунок 3.19 а)) відбувається сильне змінювання значення модифікованою частотною складовою  $a'$  в порівнянні з  $a$  при  $Q = 0$ . Цей процес відбувається, якщо до модифікації коефіцієнта значення  $|d|/255 < 0.5$ , а після модифікації значення  $|d|/255 \geq 0.5$  (чи навпаки).

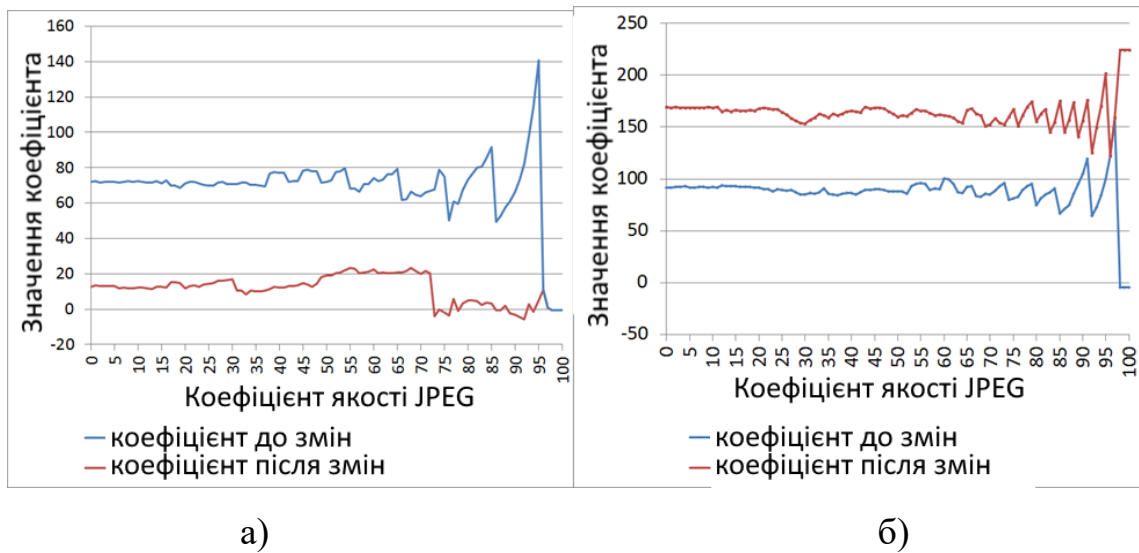


Рисунок 3.19 – Зміна коефіцієнтів дискретного перетворення Адамара в процесі компресії JPEG: а) після вбудовування шляхом збільшення; б) після вбудовування шляхом зменшення

У другому випадку (рисунок 3.19 б)) спостерігаємо незначне відхилення коефіцієнта  $a'$  на всьому діапазоні значень  $Q$ , що пов'язано з малим модулем вихідного коефіцієнта ДКП  $d$ , найбільш близького по частоті до  $a$ . Другий випадок небажаний при вбудовуванні найзначніших частотних коефіцієнтів ЦВЗ (DC-коефіцієнтів кожного блоку декомпозиції), однак може бути використаний при впровадженні менше значимих коефіцієнтів  $w_i$ , модуль яких  $|w_i| \leq 0.2$ .

При вбудовуванні ЦВЗ у вигляді рядка біт оптимальним варіантом є перший випадок поведінки коефіцієнтів (рисунок 3.19 а)). У другому випадку (рисунок 3.19 б)) можливе помилкове спрацювання стеганодетектора, оскільки немодифікований коефіцієнт ДПА при  $Q = 0$  набуває того ж значення, що і після модифікації.

На жаль, неможливо визначити значення частотного коефіцієнта  $d$ , використовуючи ДПА. Тому для даного методу необхідно використання ДКП.

Ефективність представленого методу буде проаналізована на прикладі двох алгоритмів:

- модифікації алгоритму Elham, вбудованого частотні коефіцієнти ЦВЗ;
- новому алгоритмі цифрового маркування, що впроваджує колірні маркери ЦВЗ в вигляді послідовності біт.

### 3.4 Модифікація алгоритму Elham

Вихідними параметрами алгоритму є:

- зображення-контейнер;
- бінарний водяний знак  $w$  розміром  $N \times N$ ;
- кількість  $l$  низькочастотних коефіцієнтів з таблиці  $a$ , взятих в порядку збільшення частотності з кожного блоку декомпозиції ЦВЗ;
- пороги ентропії  $E_1$  і  $E_2$  для вибору блоку контейнера для вбудовування частотних коефіцієнтів ЦВЗ.

Процес вбудовування ЦВЗ розділений на 3 етапи.

#### 3.4.1 Попередні операції

Попередній процес скорочення вбудовується інформації здійснюється аналогічно вихідному алгоритму, однак для зменшення обчислювальної складності замість ДКП було використано ДПА. При цьому якість ЦВЗ знизилася незначно.

Потім створюється порожня таблиця-ключ  $M$  дескрипторів  $m_i$ , кожен з яких представлено наступними  $b$  елементами:

- координати  $(y, x)$  верхнього лівого пікселя блоків декомпозиції (розміром  $8 \times 8$ ) стеганоконтейнера;
- координати модифікованого коефіцієнта  $a'$  в кожному з блоків декомпозиції стеганоконтейнера для вилучення частотного коефіцієнта ЦВЗ;

- вказівник знака коефіцієнта зміни (sign): «1» або «-1»;
- коефіцієнт зміни  $\alpha$ ;
- частотний коефіцієнт ДПА а вихідного зображення;
- коефіцієнт зміни  $\alpha_i$  для кожного частотного коефіцієнта  $w_i$
- визначається згідно:

$$\alpha_i = \begin{cases} 70, \text{якщо } |w_i| \leq 1 \\ 30, \text{якщо } 1 < |w_i| \leq 3. \\ 20, \text{якщо } |w_i| > 3 \end{cases} \quad (3.10)$$

### 3.4.2 Процес вбудовування ЦВЗ

Вбудовування частотних коефіцієнтів ЦВЗ здійснюється аналогічно вихідного алгоритму Elham, але з використанням наведеного вище методу вибору частотних коефіцієнтів ДПА. Крім того, для ефективного використання блоків з високою ентропією на початку впровадження підлягають частотні коефіцієнти  $|w_i| > 0,2$ .

Контейнер розбивається на блоки розміром  $8 \times 8$  для кращого протидії компресії JPEG Обчислюється ентропія блоку за наступною формулі (3.11):

$$E = \sum_{i=1}^n \log_2 p_i, \quad (3.11)$$

де  $p_i$  – імовірність виникнення яскравості;

$i$  – імовірність  $p$  визначається на основі значень гістограми частот появи пікселів в блоці  $i$  знаходиться в інтервалі  $[0; 1]$ .

Сума ймовірностей всіх типів яскравостей блоку дорівнює 1.

Для вбудовування вибираються блоки контейнера  $8 \times 8$ , ентропія яких не менше  $E_1$ . Кожен блок піддається ДКП. В отриманій матриці коефіцієнтів ДКП здійснюється пошук коефіцієнта  $d_i$ , задовольняє умовам в виразі (3.12):

$$\begin{cases} (d_i > c_1) \text{ та } (d_i < c_2), \text{ якщо } d_i > 0 \\ (d_i > -c_2) \text{ та } (d_i < -c_1), \text{ якщо } d_i < 0 \end{cases} \quad (3.12)$$

де з 1 і з 2 – порогові значення  $|d|$ , які визначаються в відповідно з виразом:

$$\begin{cases} c_1 = 50, c_2 = 80, \text{ если } |w_i| * \alpha \geq 80 \\ c_1 = 70, c_2 = 100, \text{ если } |w_i| * \alpha < 80 \end{cases}$$

Якщо знайдений коефіцієнт  $d_i$  задовольняє умовам в виразі (3.11), то блок пікселів піддається прямому ДПА.

По формулі (3.12) здійснюється модифікація частотного коефіцієнта ДПА  $a_i$ , відповідного знайденому  $d_i$

$$a'_i = a_i + sign * a_i * w_i, \quad (3.13)$$

де  $h_i$  – коефіцієнт ДПА після модифікації;

$\alpha_i$  – коефіцієнт зміни;

$sign$  визначник знаку впровадження, що приймає значення за наступним виразом:

$$\begin{cases} sign = 1, \text{ если } (d_i > c_1) \text{ и } (d_i < c_2) \\ sign = -1, \text{ если } (d_i > -c_2) \text{ и } (d_i < -c_1) \end{cases}$$

Відповідні параметри дескриптора заносяться до таблиці  $M$ . При цьому місце розташування дескриптора в таблиці відповідає місцезнаходження частотного коефіцієнта в вектор вбудування.

Блок коефіцієнтів частотних коефіцієнтів за формулою 3.1 піддається зворотному ДПА в результаті виходить матриця пікселів.

Елементів блоку одиничною маски, відповідним пікселів маркованого блоку, присвоюється значення 0.

З другого краю етапі вбудовування здійснюється використання коефіцієнтів  $|w_i|$ , що знаходяться в інтервалі  $[0; 0.2]$  блоки, ентропія яких  $E_2$  задовольняє критерію:  $E_2 > E_1 - 2$ .

Пороги для пошуку  $d_i$  наступні:  $c_1 = 0$ ,  $c_2 = 30$ .

### 3.4.3 Процес вилучення ЦВЗ

Параметрами вилучення ЦВЗ є:

- контейнер і стеганоконтейнер;
- ключова матриця  $M$ ;
- кількість частотних коефіцієнтів  $L$  на блок декомпозиції ЦВЗ;
- кількість пікселів сторони квадратного ЦВЗ;
- розмір ЦВЗ.

Вилучення ЦВЗ в вигляді вектор-рядки здійснюється за наступною формулою (3.14):

$$\begin{cases} (c'_i - c_i), \text{sign} = 1 \\ (c_i - c'_i), \text{sign} = -1 \end{cases}, \quad (3.14)$$

де  $c'$  – частотний коефіцієнт стеганоконтейнера;

$c_i$  – частотний коефіцієнт контейнера.

Наступним етапом є процес, зворотний попередньою обробці ЦВЗ. У результаті формується попередній вигляд ЦВЗ. Для запобігання можливою помилки хибного спрацьовування, вилучені пікселі піддаються бінаризації по наступному правилу:

$$\begin{cases} w_i = 0, \text{ если } w_i \leq 0.6 \\ w_i = 1, \text{ если } w_i > 0.6 \end{cases}$$

### 3.5 Новий алгоритм цифрового маркування

При розробці нового алгоритму головним завданням було досягнення стійкості водяного знака за будь-якого значення коефіцієнта якості JPEG. За основу розробленого алгоритму цифрового маркування взятий алгоритм Elham.

Новий алгоритм ґрунтується на оцінці зміни значень коефіцієнтів перетворення Адамара при максимальному стиску JPEG. У якості ЦВЗ використано бінарне чорно-біле зображення.

Представлений в розділі 3.3 метод вибору частотних коефіцієнтів передбачає сильну зміну їх модуля у процесі модифікації. Крім того, ЦВЗ розміром  $64 \times 64$  має велику кількість біт для вбудовування. Тому прийнято рішення піддавати ЦВЗ попередньої декомпозиції на блоки пікселів однакового кольору з наступним використанням маркера (0 або 1), позначає колір блоку пікселів. Вбудованню підлягають або білі, або чорні маркери ЦВЗ для мінімізації спотворень.

Пікселі протилежного кольору вбудовуються умовно – запам'ятовується розташування конкретного блоку зображення і місце розташування коефіцієнта ДПА в ньому без його попередньою модифікації.

#### 3.5.1 Процес скорочення обсягу вбудованих біт ЦВЗ

Процес скорочення обсягу інформації, що вбудовується, складається з 4 етапів і представлений на рисунку 3.20.



Рисунок 3.20 – Схема скорочення вбудованих біт ЦВЗ

На першому етапі пікселі водяного знаку піддаються одноразовий перестановці за допомогою перетворення Арнольда, яке представляє собою оборотну хаотичну карту:

$$\begin{bmatrix} y' \\ x' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} y \\ x \end{bmatrix} \pmod N,$$

де  $N$  – сторона квадратного ЦВЗ;

$(y, x)$  – вихідні координати пікселя ЦВЗ;

$(y', x')$  – координати пікселя ЦВЗ після перетворення Арнольд.

На другому етапі зображення, що вийшло, піддається повороту вправо на  $90^\circ$  і піддається Зигзагу скануванню, починаючи з верхнього лівого пікселя. У результаті за рахунок попереднього використання одноразового перетворення Арнольда утворюється вектор-рядок пікселів з великою кількістю послідовностей ідентичних посліпів пікселів однакового кольору.

На третьому етапі вектор-рядок розбивається на послідовності пікселів однакового кольору. Формується проміжна таблиця, що містить інформацію про кількість блоків пікселів у послідовності та їх кольору. Ця операція аналогічна RLE-кодуванню, при якому послідовність повторюваних даних замінюється єдиним значенням, після якого вказується кількість його повторень.

На четвертому етапі кожен дескриптор таблиці піддається додатковою декомпозиції за формулами, представленими у таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 – Формули додатковою декомпозиції ЦВЗ

L/n	$n \geq 0,39 \times x$	$0,16 \times \leq n \leq 0,39 \times x$	$n < 0,16 \times$
$L_0$	$\text{round}(0,39 \times x)$	$\text{ceil}(\text{count}/4)-1$	n
$L_1$		$\text{round}(0,125 \times x)$	

Де  $x$  – ширина ЦВЗ,  $n$  – число біт у векторі біт,  $L_0$  – довжина блоку декомпозиції вектора «-0» біт,  $L_1$  – довжина блоку декомпозиції вектора «1» біт,  $\text{ceil}$  – округлення в більший бік;  $\text{round}$  – округлення в менший.

### 3.5.2 Процес вбудовування ЦВЗ

Як і в алгоритмі Elham вибір блоків для вбудовування також ґрунтується на пороговому значенні ентропії. Вихідними параметрами алгоритму є: контейнер, монохромний чорно-білий водяний знак, коефіцієнт зміни  $\alpha$ , поріг ентропії  $E_1$  для вбудовування 1, поріг ентропії  $E_0$  для вибору коефіцієнта для умовного вбудовування 0. Додатково формується одинична маска-матриця з розмірами, рівними розмірам контейнер. Маска необхідна для відстеження вже вибраних для вбудовування біта ЦВЗ блоків зображення. Вихідними параметрами алгоритму є стеганоконтейнер і ключова таблиця M.

Вибір частотних коефіцієнтів для вбудовування ЦВЗ здійснюється за методом, поданим у розділі 3.3. Процес вбудовування схожий на процес Використання ЦВЗ, що виконується в модифікації алгоритму Elham. Однак у новому алгоритмі використовується тільки один коефіцієнт посилення.

#### Вбудовування «1»

Здійснюється декомпозиція контейнера на блоки розміром  $8 \times 8$ . по формулі 3.14 обчислюється ентропія кожного блоку:

$$E = \sum_{i=1}^n p_i * \exp^{1-p_i}, \quad (3.15)$$

де  $p_i$  – імовірність виникнення яскравості ( $i$ ) пікселя в блоці. Можливість  $p$  знаходиться в інтервалі  $[0; 1]$ .  $(1 - p_i)$  – незнання чи невизначеність значення пікселя. Імовірність  $p$  знаходиться, виходячи із значення гістограми частот яскравостей пікселів блоків зображення.

Для подальшого аналізу вибираються ті блоки пікселів, ентропія яких більше або дорівнює заданому порогу  $E_1$ . У блоках за методом, представленим у розділі 3.3, здійснюється пошук частотних коефіцієнтів ДПА для їх наступною модифікації за формулою (3.16)

$$a'_i = a_i + \text{sign} * a, \quad (3.16)$$

де  $a_i$  – обраний для вбудовування коефіцієнт ДПА;

$a'$  – модифікований коефіцієнт;

$a$  – коефіцієнт зміни,  $\text{sign}$  – знак зміни коефіцієнта.

Координати блоку контейнера ( $y, x$ ):  $M(1, i)$  і  $M(2, i)$ , координати зміненого частотного коефіцієнта в блоці ( $y_a, x_a$ ):  $M(3, i)$  та  $M(4, i)$ , знак  $\text{sign}$ :  $M(5, i)$ , а також кількість пікселів, що припадають на маркер  $M(6, i)$ , заносяться в таблицю  $M$ .  $i$  – місце розташування дескриптора, відповідне місцезнаходження впроваджуваного маркера в рядку маркерів ЦВЗ.

Після впровадження блок одиничною маски, координати якого відповідають координатам блоку, вибраного для вбудовування одиничного біта ЦВЗ, обнулюється.

Вбудовування «0»

Для умовного вбудовування чорного пікселя прийнято рішення вибирати блоки зображення з ентропією, значення якої більше заданого порога  $E_0$  значення якого повинно бути менше  $E_1$ . Правила вибору блоків для вбудовування нульового біта ЦВЗ аналогічні правилам вбудовування одиничного біта. Однак у цьому випадку додатково відстежується сума елементів блоку маски визначення наявності вбудованого одиничного

біта ЦВЗ. Якщо блок, ентропія якого більша або дорівнює порога  $E_0$  придатний для вбудовування і сума блоків маски дорівнює 64, то вважається, що коефіцієнт поточного блоку вбудований нульовий біт ЦВЗ.

Отримані відомості о нульовому маркері заносяться в ключову таблицю  $M$ .

Подібний підхід до вбудовування ЦВЗ дозволяє задіяти якомога більше блоків контейнера з максимальним значенням ентропії, що дозволять сильно змінювати відповідний коефіцієнт ДПА, не привертаючи увагу ЗРЧ.

Для зменшення обсягу інформації для вилучення ЦВЗ і зниження обчислювальної складності алгоритму вилучення ЦВЗ, при вбудовуванні в ключову таблицю  $M$  для кожного дескриптора можна, можливо вносити значення коефіцієнтів ДПА до модифікації.

### 3.5.3 Процес вилучення ЦВЗ

Для вилучення ЦВЗ потрібно оригінальне зображення (або значення коефіцієнтів ДПА до модифікації), ключ-масив  $M$  та відомості про розмірність вбудованого ЦВЗ.

Аналогічно модифікований алгоритм Elham, використовуючи координати  $[M(1,i), M(2,i)]$  верхнього лівого пікселя кожного блоку, в який була вбудована (або умовно вбудована) інформація, отримуємо частотні коефіцієнти контейнера  $c_i[(x, i), (y, i)]$  і стеганоконтейнера  $c'_i[(x, i), (y, i)]$

Вилучення ЦВЗ у вигляді вектора-рядки здійснюється за наведеним нижче формулам:

Якщо  $M(5, i) = -1$

$$w_i = \begin{cases} 1, \text{якщо } c'_i[M(3, i), M(4, i)] < (c_i[M(3, i), M(4, i)] - 50) \\ 0, \text{якщо } c'_i[M(3, i), M(4, i)] \geq (c_i[M(3, i), M(4, i)] - 50) \end{cases}$$

Якщо  $M(5, i) = 1$

$$w_i = \begin{cases} 1, \text{ якщо } c'_i[M(3, i), M(4, i)] > (c_i[M(3, i), M(4, i)] + 50) \\ 0, \text{ якщо } c'_i[M(3, i), M(4, i)] \leq (c_i[M(3, i), M(4, i)] + 50) \end{cases}$$

де  $w_i$  – витягнутий маркер-біт ЦВЗ;

$c_i$  – вихідний частотний коефіцієнт ДПА;

$c'$  – модифікований коефіцієнт ДПА.

Далі здійснюється операція, зворотна попередньої обробки ЦВЗ. За допомогою рядка маркерів та ключового рядка (елементи якого –  $M(6, i)$ ), містить інформацію о кількості пікселів для кожного маркер, формується рядок пікселів водяного знак. Рядок пікселів піддається Загзаг сканування. Отримане зображення повертається на  $90^\circ$  вліво. за наведеною нижче формулою здійснюється зворотне перетворення Арнольда (3.17):

$$\begin{bmatrix} y \\ x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} y' \\ x' \end{bmatrix}, \quad (3.17)$$

де  $N$  – сторона квадратного ЦВЗ;

$(y, x)$  – вихідні координати пікселя ЦВЗ;

$(y', x')$  – координати пікселя вилученого ЦВЗ.

#### 3.5.4 Аналіз непомітності нового алгоритму

Новий алгоритм, як і Elham використовує параметр ентропії для визначення складності текстури. Ентропія визначалася по формулі 3.17, оскільки формула Шеннона (формула 3.14) має недолік, Котрий полягає в неможливості коректно розрізнити складність текстури. Так наприклад, текстури, представлені на рисунку 3.21, при використанні формули Шеннона мають однаковий рівень ентропії. Даний недолік позначається

непомітності вбудованого ЦВЗ. Очевидно, що непомітнішими будуть спотворення, при використанні текстури, представленою на рисунку 3.21 в).

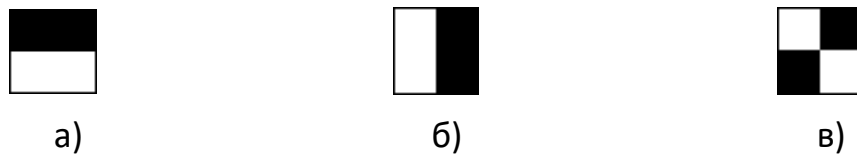


Рисунок 3.21. – Блоки з однаковою ентропією Шеннона

Цього недоліку позбавлено визначення ентропії по формулі 18, яка враховує особливості зорової системи людини.

Порівнюючи рисунки 3.22 та 3.23 видно, що використання ентропії Шеннона забезпечує менше ефективний вибір блоків для непомітності вбудовування ЦВЗ. На рисунку 3.22 червоним кольором виділено положення невдалих блоків. У той час, як при використанні формули 3.17 вибір гладких текстур не здійснюється (рисунок 3.23 ).

Таким чином, для кращої непомітності вбудовування ЦВЗ кращий вибір блоків за модифікованою формулі визначення ентропії.

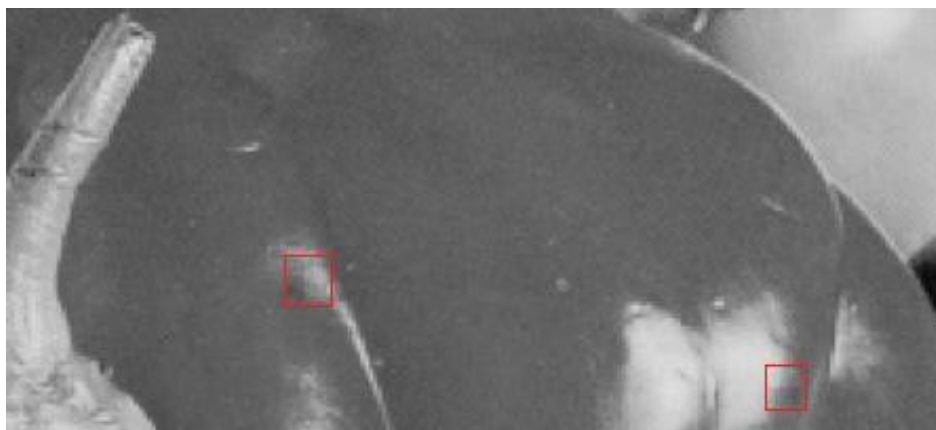


Рисунок 3.22 – Прояв артефактів на гладких текстурах під час використання ентропії Шеннона



Рисунок 3.23 – Відсутність артефактів на гладких текстурах під час використання модифікованою формули ентропії

### 3.5.5 Аналіз методу скорочення біт вбудованого ЦВЗ

Алгоритм цифрового маркування буде непридатний для використання у разі виникнення помилок помилкового спрацьовування стеганодетектора, які полягають у вилученні ЦВЗ із зображення, яке ЦВЗ не було вбудовано. Відповідно, була потрібна перевірка методу скорочення вбудованих біт ЦВЗ на наявність подібної помилки. Внаслідок попередньої обробки ЦВЗ користувач отримує вектор кількості пікселів на кожен вбудований маркер. Ця інформація не повинна бути суттєвою для стеганодетектора, інакше будь-яка випадкова послідовність біт у поєднанні з вектором  $L$  кількості пікселів на маркер може призвести до помилкового вилучення.






Для перевірки розробленого методу було використано ЦВЗ, поданий на рисунку 3.12, взятий з різними розмірами (таблиця 3.4). Кожна версія ЦВЗ зазнавала попередньої обробки. В результаті для кожного ЦВЗ було отримано вектор  $L$ . Для кожного вектора  $L$  було згенеровано 105 випадкових послідовностей біт, що імітують витягнутий вектор маркерів ЦВЗ. Потім проводилася операція формування ЦВЗ з наступним виміром показника кореляції між вихідним ЦВЗ та умовно вилученим. Кореляція з вважалася допустимою, якщо  $|c| < 0.2$ , небажаною, якщо  $0.2 \leq |c| < 0.4$ , дуже небажаною,

якщо  $0.4 \leq |c| < 0.5$ . За  $|z| \geq 0.5$  фіксувалося хибне спрацьовування. Для кожного з 5 ЦВЗ фіксувався зовнішній вигляд ЦВЗ із найбільшою за модулем  $c$ .

В результаті експерименту було встановлено, що на 105 випадкових послідовностей біт не зафіксовано жодного випадку помилкового спрацьовування. Однак ризик отримання ЦВЗ з небажаною кореляцією збільшується зі зменшенням розміру ЦВЗ, що використовується. Для кожного ЦВЗ у таблиці 3.5 представлено кількість 0 та 1, яке необхідно вбудовувати без застосування даного методу, а також кількість біт-маркерів, отриманих після попередньої обробки ЦВЗ. Для ЦВЗ розміром  $64 \times 64$  розроблених методів дозволив скоротити обсяг вбудованих біт на 88,09%.

Результати експерименту наведено у таблиці

Таблиця 3.5 – Статистика хибного спрацьовування в методі скорочення біт

Розмір водяного знаку	64x64	54x54	44x44	34x34	24x24
1	2	3	4	5	6
$0 \leq  c  < 0,10$	96617	95453	91611	88087	78072
$0,10 \leq  c  < 0,20$	3382	4538	8347	11746	20653
$0,20 \leq  c  < 0,30$	1	9	42	167	1263
$0,30 \leq  c  < 0,40$	0	0	0	0	12
$0,40 \leq  c  < 0,50$	0	0	0	0	0
$ c  \geq 0,50$	0	0	0	0	0
Небажана кореляція (%)	0,001	0,009	0,042	0,167	1,275
Найгірший випадок вилучення(Кореляція)	0,2187	0,214	0,2736	0,2818	0,3663
Найгірший випадок вилучення(зображення)					

Продовження таблиці 3.5

1	2	3	4	5	6
Блоки (Кількість 1)	105	91	74	58	37
Блоки (Кількість 0)	383	337	244	232	135
Число 1 біт	712	481	369	206	102
Число 0 бітів	3384	2435	1567	950	474
Скорочення числа біт (%)	88,09	85,32	83,57	74,91	70,14

Таким чином, вектор кількості пікселів на маркер, отриманий в результаті попередньої обробки ЦВЗ, не є суттєвою інформації для стеганодетектора.

### 3.6 Аналіз стійкості нових алгоритмів до шкідливим впливам

Порівняємо стійкість нового алгоритму та модифікованого алгоритму Elham по відношенню до атак компресії, зашумлення, фільтрації, зміни розміру, яскравості, а також еквалізації гістограми.

У ході перевірки використовувалися зображення, аналогічні задіяним контейнерів для аналізу робастності оригінального Elham. Коефіцієнт зміни нового алгоритму дорівнює 90. Параметр ентропії для кожного зображення було обрано максимально можливим, щоб задіяти якнайбільше важливих текстур. Показники якості стеганоконтейнерів для кожного тестового зображення представлені в таблиці 3.6.

На рисунку 3.24 представлена стійкість розробленого алгоритму до стиску JPEG. Модифікований алгоритм Elham забезпечує повну стійкість ЦВЗ до JPEG стиску. Однак новий алгоритм цифрового маркування забезпечує набагато найкращу стійкість ЦВЗ для 96% діапазону коефіцієнтів якості Q. ЦВЗ було знищено лише за  $Q = 4$ . Різке падіння стійкості при Q, що знаходиться в діапазоні від 6 до 3, пов'язане з особливістю поведінки обраних коефіцієнтів при компресії JPEG (рисунок 3.24).

Таблиця 3.6 – Параметри нового алгоритму для аналізу стійкості

	Новий алгоритм	Модифікований алгоритм Elham
Зображення	PSNR ( dB )	PSNR ( dB )
Мавпа	43,21466	43,73979
Човен	43,21726	43,74275
Будинок	43,21496	43,73979
Озеро	43,21541	43,73995
Олена	43,21466	43,73979
Міст	43,21466	43,73979
Перці	43,22455	43,74719
Літак	43,21466	43,73979
Жінка	43,26538	43,78704

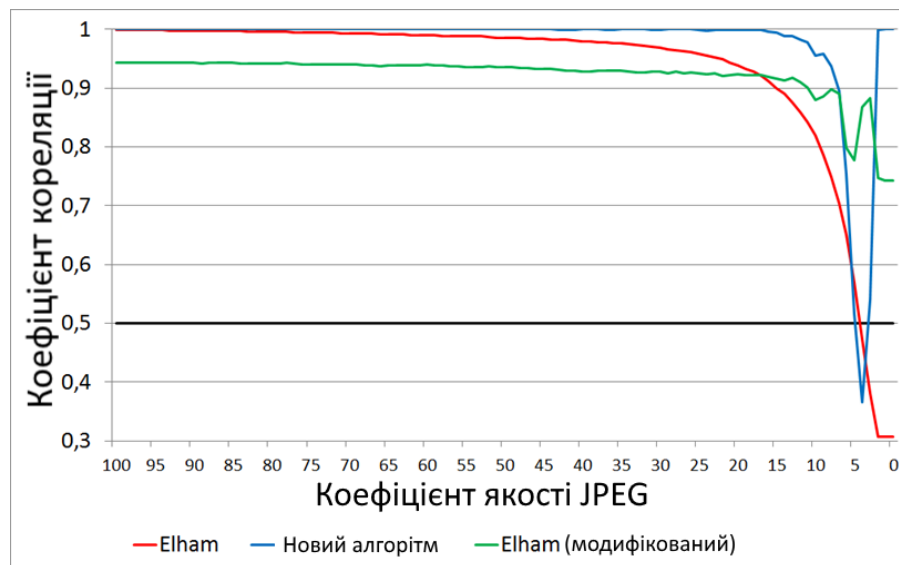


Рисунок 3.24 – Стійкість нових алгоритмів до стиску JPEG

Новий алгоритм і модифікований алгоритм Elham демонструють покращену стійкість до компресії JPEG2000 аж до рівнів стиснення 67 та 68 відповідно (рисунок 3.25). Новий алгоритм демонструє покращену стійкість до компресії JPEG2000 до рівнів стиснення 67. Модифікований алгоритм

Elham по порівнянні з початковим алгоритмом демонструє практично однакову стійкість – рівня стиснення 50.

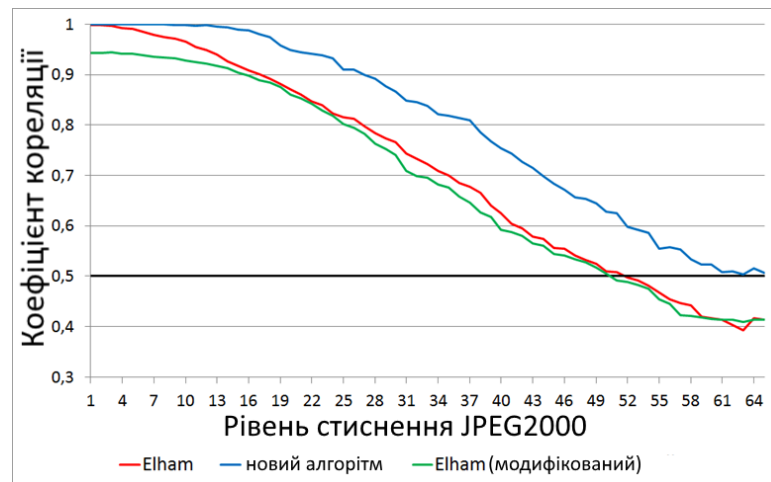


Рисунок 3.25 – Стійкість нових алгоритмів до компресії JPEG2000

З точки зору робастності по відношенню до зашумлення найкращі показники демонструє модифікований алгоритм Elham (рисунки 3.26, 3.27). ЦВЗ витягується при Гауссовому зашумленні включно до рівня дисперсії 0,07, у якому зображення втрачає свою комерційну цінність. новий алгоритм цифрового маркування, представлений в розділі 3.5, стійкий до шуму Гауса до рівня дисперсії 0,04 і потребує підвищення робастності.

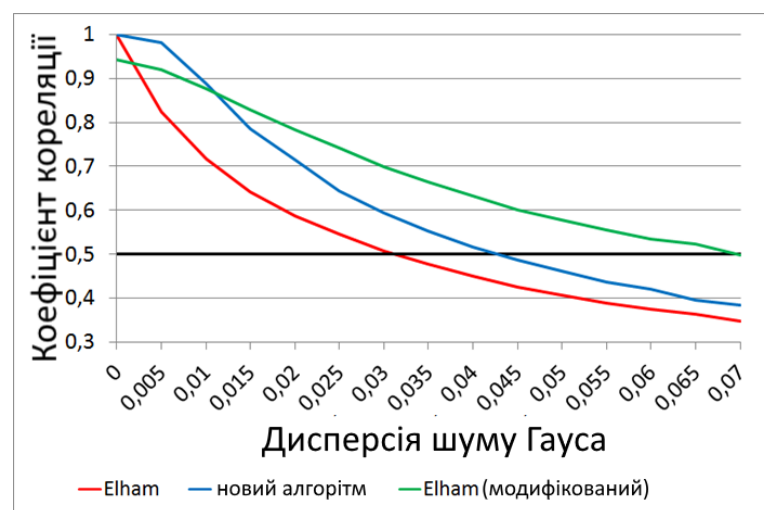


Рисунок 3.26 – Стійкість нових алгоритмів до шуму Гауса

По відношенню до шуму «Сіль та перець» модифікований Elham та новий алгоритм є стійкими – ЦВЗ витягується навіть при значенні дисперсії більше 0,1, при якій зображення не представляє комерційної цінності. Однак модифікований Elham має значно більшою стійкістю.

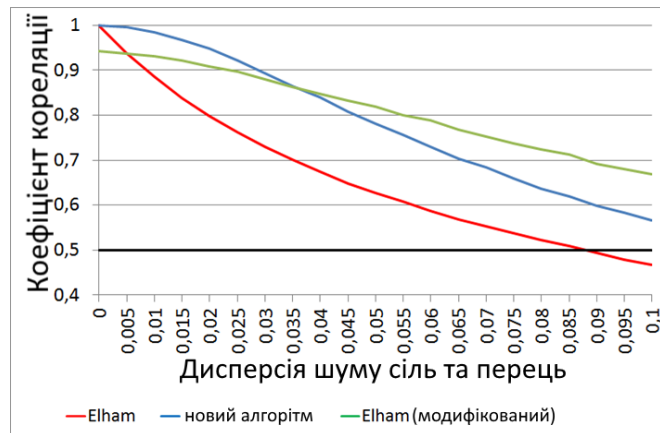


Рисунок 3.27. – Стійкість нових алгоритмів до шуму Гауса

Стійкість до фільтрації Вінера (рисунок 3.28 ) у порівняння з алгоритмом Elham також була збільшено. новий алгоритм, як і модифікація Elham дозволили розпізнавати вбудований ЦВЗ при розмірі вікна фільтрації  $8 \times 8$ . Однак новий алгоритм демонструє суттєво найкращу робастність.

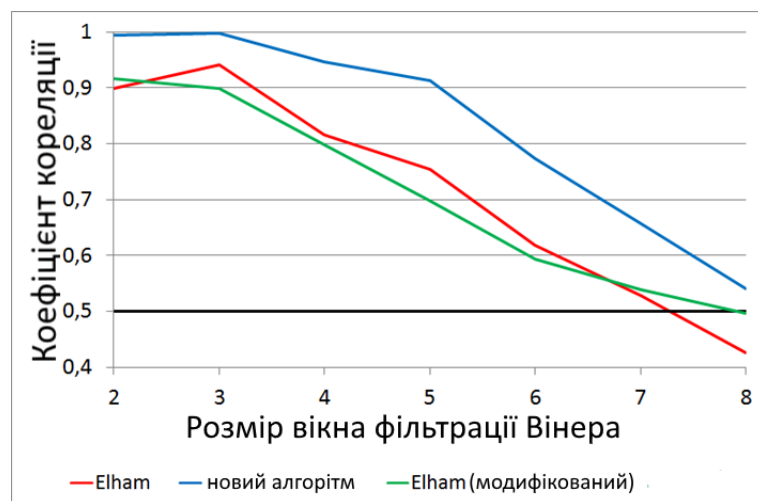


Рисунок 3.28 – Стійкість нових алгоритмів до фільтрації Вінера

Стійкість до середньочастотної фільтрації відображено в таблиці 3.7.

Найбільш широким діапазоном стійкості має модифікація Elham. Однак для вікна 3×3 найкращу стійкість виявляє новий алгоритм.

Таблиця 3.7 – Стійкість ЦВЗ до середньочастотної фільтрації

Тип перетворення/розмір вікна фільтрації	2×2	3×3	4×4	5×5
Elham	0,5999	0,8495	0,4519	0,4762
Модифікований Elham	0,7058	0,7492	0,4361	0,3267
Новий алгоритм	0,6124	0,8651	0,3979	0,3873

Модифікований алгоритм Elham має найгіршою стійкістю до зміни розміру. ЦВЗ виявляє стійкість при зміні розміру контейнер до 40%. На діапазоні від 100% до 40% стійкість значно нижче, ніж у нового алгоритму. ЦВЗ, впроваджений за допомогою нового алгоритму виявляв стійкість, аналогічну оригінальному алгоритму Elham (ЦВЗ витягувався при зменшенні розміру контейнера до 35% включно).

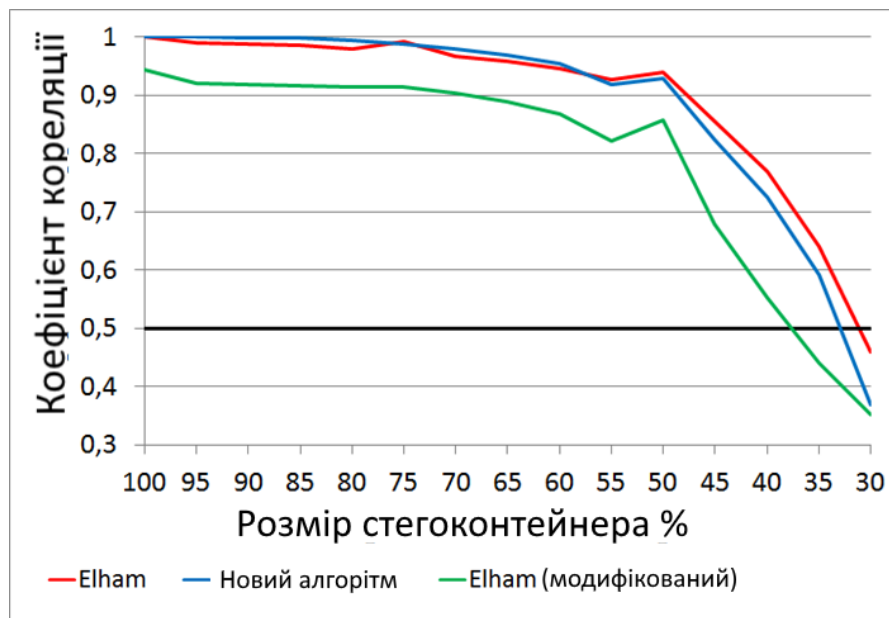


Рисунок 3.29 – Стійкість нових алгоритмів до зміни розміру стегоконтейнера

У висновку новий алгоритм був протестований на стійкість до зміни яскравості стеганоконтейнера (рисунок 3.29), а також еквалізації його гістограми. Модифікація алгоритму Elham має великим діапазоном стійкості до зміни яскравості контейнера: від 60% до 260% від початкової яскравості. Однак, новий алгоритм в інтервалі від 80% до 140% яскравості має значно більшою стійкістю.

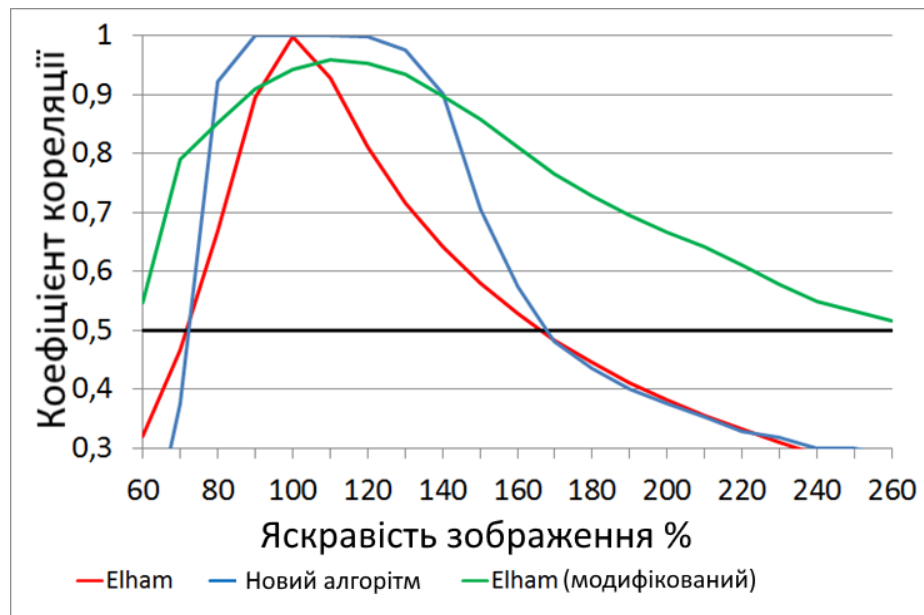


Рисунок 3.30 – Стійкість нових алгоритмів до зміни яскравості стеганоконтейнера

По відношенню до еквалізації гістограми новий алгоритм виявляє слабку робастність, як і Elham (кореляція 0,5488 та 0,5518 відповідно). Модифікація алгоритму Elham має суттєву стійкість (середнє значення кореляції 0,8054).

Таким чином, при необхідності підвищеної стійкості ЦВЗ до JPEG стиску, найбільш кращим є новий алгоритм цифрового маркування, що володіє практично повною стійкістю до компресії JPEG. Однак якщо до ЦВЗ висувається вимога підвищеної стійкості до зашумлення, найбільш кращим є модифікація алгоритму Elham.

Оскільки нові алгоритми залежать від параметра ентропії, стійкість ЦВЗ безпосередньо залежить від кількості складних текстур у контейнері, оскільки, чим вище рівень ентропії, тим великі коефіцієнти посилення можна, можливо використовуватиме запровадження ЦВЗ. Отже, нові алгоритми, як і Elham найбільш придатні для контейнерів з великим кількістю складних текстури. У протилежному випадку необхідно сильне зменшення кількості вбудовується інформації для збереження її стійкість.

## 4 МОДИФІКАЦІЯ РОЗРОБЛЕНОГО АЛГОРИТМУ ЦИФРОВОГО МАРКУВАННЯ

4.1 Застосування розробленого алгоритму цифрового маркування до кольоровим зображенням

Досліджувані в розділі 3 алгоритми цифрового маркування були розглянуті щодо сірих зображень. Використання кольорового контейнера пред'являє додаткові вимоги до вбудовування ЦВЗ.

Кольорове зображення представляє собою тривимірний масив, шари якого – значення трьох складових колірних моделей, найбільш найпоширеніші з яких: RGB, YCrBr. При JPEG стисканні палітра кольорів контейнера перекладається з RGB в YCrBr по наступним формулам:

$$Y = 0.299 \times R + 0.587 \times G + 0.114 \times B \quad (4.1)$$

$$Cb = -0.168736 \times R - 0.331264 \times G + 0.5 \times B + 128 \quad (4.2)$$

$$Cr = 0.5 \times R - 0.418688 \times G - 0.081312 \times B + 128, \quad (4.3)$$

де R, G, B – червона, зелена і блакитна складники колірний палітри RGB;

Y – яскрава складова YCbCr палітри;

Cb – хроматичний синій;

Cr – хроматичний червоний.

Назад перетворення здійснюється по наступним формулам:

$$R = 1 \times Y + 1.402 \times Cr \quad (4.4)$$

$$G = 1 \times Y - 0.34414 \times Cb - 0.71414 \times Cr ; B = 1 \times Y + 1.772 \times Cb. \quad (4.5)$$

Подальші операції JPEG стиснення аналогічні процесам, що застосовуються для напівтонових зображень. У зв'язку з перекладом зображення в іншу колірну палітру, аналогічну операцію необхідно виробляти і з контейнером в процес цифрового маркування.

Для яскравості складника  $Y$  використовується та ж таблиця квантування, що і для напівтонових зображень. Таким чином, якщо при маркуванні кольорових зображень за допомогою нового алгоритму (розділ 3.5) вбудовувати ЦВЗ в яскраву компоненту  $Y$ , то буде досягнуто стійкість, аналогічна отриманої при маркуванні напівтонових зображень.

На рисунках 4.1 та 4.2 наведено приклади стійкості ЦВЗ до компресії. JPEG і JPEG2000 при використанні колірних складових RGB палітри та яскравості складника  $Y$  колірний палітри  $YCbCr$ . ЦВЗ (Рисунок. 3.12) впроваджувався при допомозі нового алгоритму (розділ 3.5). У якості контейнера використовувалося найбільш часто використовуване в стеганографічних дослідженнях зображення «Олена» для R, G, B складових не використовувався метод вибору коефіцієнтів, що застосовується в новому алгоритмі, оскільки він адаптований для напівтонових зображень та  $Y$  складової  $YCbCr$  палітри. Для RGB палітри ЦВЗ вбудовувався у найближчий до DC коефіцієнт ДПА з координатами (1,5), параметр  $sign = 1$ .

З трьох колірних складових RGB палітри лише при впровадженні ЦВЗ в R площина ЦВЗ зберігав відносну стійкість. Як і було сказано раніше, використання  $Y$  складової  $YCbCr$  палітри забезпечує стійкість ЦВЗ, аналогічну при вбудовуванні в напівтонових зображень.

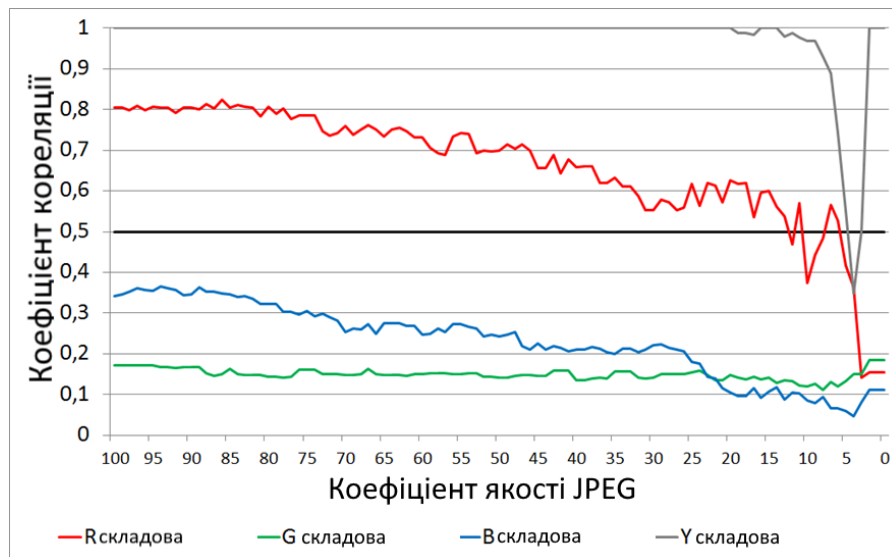


Рисунок 4.1 – Стійкість ЦВЗ до JPEG стиску при впровадженні у кольорове зображення

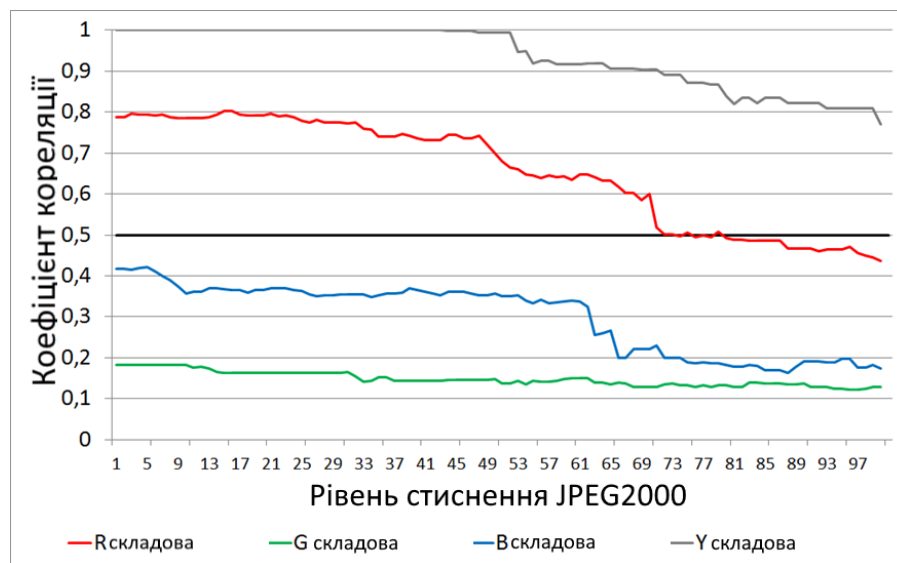


Рисунок 4.2 – Стійкість ЦВЗ до JPEG2000 стиску при впровадженні в кольорове зображення

Для хроматичних складових:  $C_r$  (хроматичний червоний) і  $C_b$  (хроматичний синій) передбачена інша таблиця квантування, елементи якої при  $Q = 0$  також набувають значення, що дорівнює 255. Однак використання хроматичних складових не рекомендується по двом причин:

- семплювання Cr і Vg в процесі JPEG стиснення;
- мала кількість складних текстур у Cr і Vg.

Після перетворення палітри RGB на YCbCr хроматичні складові піддаються семплювання – операції, при якій для кожного блоку пікселів розміром  $4 \times 4$  складової Y ставиться за одним значенням Cr та Cb (схема семплювання 4:2:0). При такому підході площа Cr і Cb зменшується на 75%, що вимагатиме відповідного зменшення обсягу вбудовується інформації.

На рисунку 4.3 відображені три складники YCrVg палітри для зображення. добре видно, що Cr і Vg мають значно меншим кількістю складних текстур, по порівнянні з яскравості компонентом Y. Таких текстур після семплювання стає ще меншим. Для кожної складової в ідентичних областях обчислені коефіцієнти ДКП.

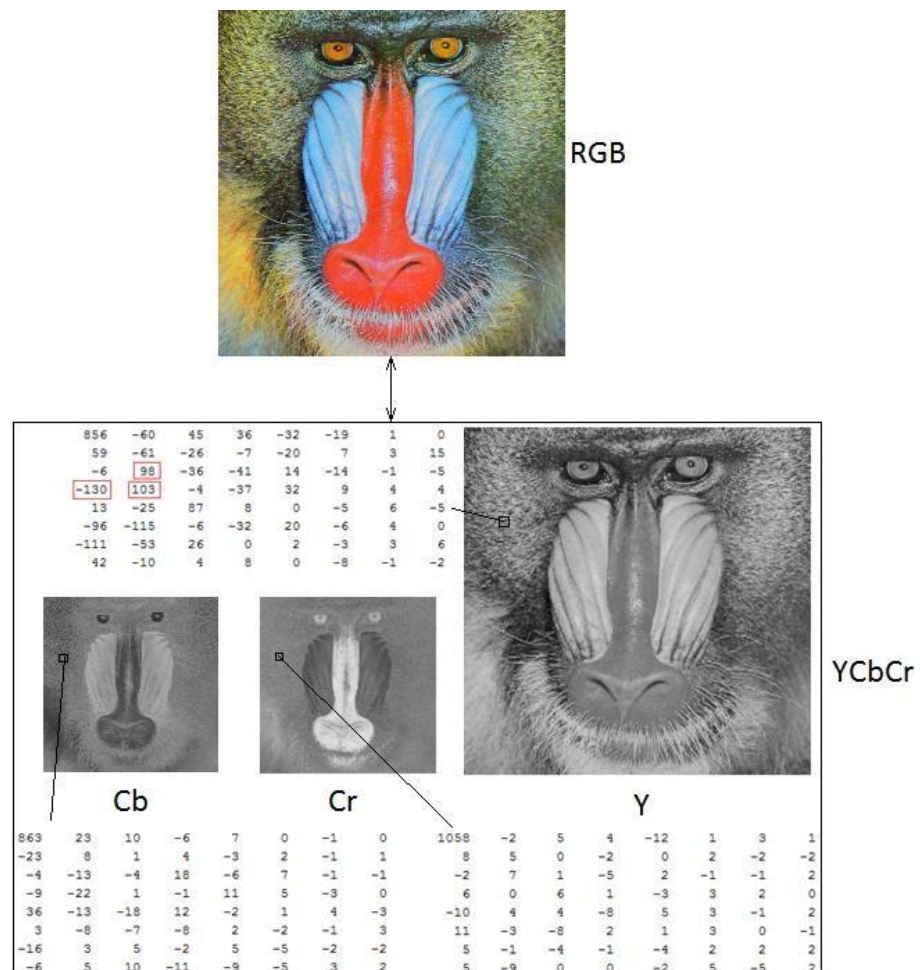


Рисунок 4.3 – Складники колірний палітри YCbCr контейнера

Червоним кольором виділено коефіцієнти ДКП, яким відповідають коефіцієнти ДПА, різко змінюють свій кінцевий стан після модифікації за  $Q = 0$ . Як видно з рисунку, лише яскрава складова має достатніми умовами для маркування контейнер. Отже, хроматичні складові не є придатними для вбудовування ЦВЗ під час використання нового алгоритму цифрового маркування.

#### 4.2 Зниження обчислювальної складності процесу впровадження ЦВЗ

Недоліком методу, що використовується в новому алгоритмі. маркування для пошуку коефіцієнтів ДПА  $a_{y,x}$ , придатних для вбудовування ЦВЗ, була висока обчислювальна складність. Для відстеження наявності різкого зміни  $d_{y,x}$  при модифікації  $a_{y,x}$  необхідно було імітувати процес вбудовування біта ЦВЗ, а саме:

- модифікувати  $a_{y,x}$  двічі: шляхом складання та віднімання з частотної складової коефіцієнта зміни;
- піддати два блоки пікселів дискретному косинусному перетворення для подальшого порівняння змінених коефіцієнтів ДКП ( $d'_{y,x}$ ) з первісним значенням  $d_{y,x}$ ;

У результаті потрібно було виконати 2 рази пряме та зворотне ДПА та 3 рази ДКП.

Визначити значення ДКП, використовуючи лише величину коефіцієнта ДПА неможливо. Однак можна визначити: на яку величину зміниться  $d_{y,x}$  при модифікації  $a_{y,x}$ . Як було зазначено в розділі 3.2, найбільшому зміни піддається частотний коефіцієнт ДКП, близький по частоті до модифікованою частотної складника ДПА. Аналізуючи графік, представлений рисунку 3.9, можна дійти невтішного висновку, що такі зміни будуть пропорційні.

Для визначення коефіцієнтів пропорційності для кожною пари коефіцієнтів ( $a_{y,x}$ ,  $d_{y,x}$ ) було згенеровано по 1000 текстур розміром  $8 \times 8$  з

випадковим значенням яскравості для кожного пікселя. Для кожною текстури послідовно проводилося збільшення  $a_{y,x}$  по формулі (4.6):

$$a'_{y,x} = a_{y,x} + \Delta_a \quad (4.6)$$

де  $\Delta_a$  – величина зміни коефіцієнта ДПА  $a_{y,x}$ , що знаходиться в діапазоні від 10 до 150.

Значення коефіцієнта пропорційності  $\alpha_d$  для коефіцієнтів ДКП визначалося за формулою (4.7):

$$\alpha_d = \frac{d'_{y,x} - d_{y,x}}{\Delta_a} \quad (4.7)$$

У результаті було встановлено, що для даного набору низькочастотних коефіцієнтів ДКП середня величина відхилення коефіцієнта  $d_{y,x}$  від початкового значення після модифікації відповідних коефіцієнтів ДПА складають  $0,85 \times \Delta_a$ . Чим більше кількість коефіцієнтів в групі (таблиця 4.1) тим менше середнє значення  $\alpha_d$  за групою. Значення  $\alpha_d$  для кожного пари низькочастотних коефіцієнтів ( $a_{y,x}$ ,  $d_{y,x}$ ) представлено в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Коефіцієнти пропорційності частотних складових ДКП

Групи коефіцієнтів	$d_{y,x}$	$a_{y,x}$	$\alpha_d$
1	2	3	4
1-коефіцієнтна	1,5	1,4	0,998
	5,1	4,1	0,998
2-коефіцієнтна	1,3	1,7	0,92
	3,1	7,1	0,92

Продовження таблиці 4.1

1	2	3	4
4-коефіцієнтна	1,2	1,5	0,90
	1,4	1,3	0,76
	4,1	3,1	0,76
	2,1	5,1	0,90
	3,3	7,7	0,85
8-коефіцієнтна	2,3	5,7	0,83
	3,2	7,5	0,83
16-коефіцієнтна	4,2	3,5	0,69
	2,4	5,3	0,69
	2,2	5,5	0,81

Таким чином, знаючи величину, на яку зміниться частотна складова ДПА та значення  $d_{y,x}$ , відповідне  $a_{y,x}$ , можна визначити значення  $d'_{y,x}$ . Для цього достатньо отримати  $\alpha_d \times \Delta_a$ . В результаті для пошуку коефіцієнтів ДПА необхідно використовувати один раз тільки пряме ДКП.

#### 4.3 Вплив розміру блоку декомпозиції контейнера на стійкість водяного знаку

Серед алгоритмів цифрового маркування, що розглядаються, заснованих на ДПА, найбільш поширена декомпозиція контейнера на блоки розміром  $8 \times 8$  пікселів для стійкості до атаки JPEG компресії, що використовує аналогічний розмір блоків.

При використанні неперекриваються блоків ДПА розміром  $16 \times 16$  кожному коефіцієнту ДКП  $d_{y,x}$  з таблиці 8, крім коефіцієнта  $a_{y,x}$  ( $y, x$ ) також відповідають коефіцієнти:  $a_{y,x+7}$ ,  $a_{y+7,x}$ ,  $a_{y+7,x+7}$  (рисунок 4.4). При цьому для кожного  $d_{y,x}$  значення коефіцієнта  $\alpha_d$  зменшується вдвічі. Відповідно середня величина відхилення коефіцієнта  $d_{y,x}$  від початкового значення після

модифікації відповідних коефіцієнтів ДПА  $0,43 \times \alpha_a$ . Отже, при розмірі блоків декомпозиції  $16 \times 16$  число придатних для модифікації коефіцієнтів ДПА зменшується вдвічі (якщо коефіцієнти ДПА змінюються на ту саму величину, що і за декомпозиції на блоки  $8 \times 8$ ), а при розмірі блоків декомпозиції  $32 \times 32$  – у 4 рази.

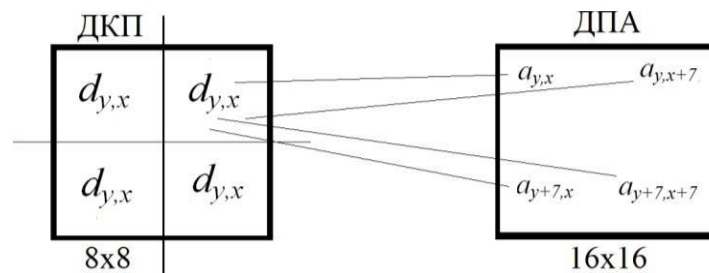


Рисунок 4.4 – Коефіцієнти ДПА блоку  $16 \times 16$ , що впливають коефіцієнти ДКП блоків розміром  $8 \times 8$

Використання блоків декомпозиції розміром  $32 \times 32$  при вбудовуванні одного бита ЦВЗ в один блок для зображення розміром  $512 \times 512$  пікселів зменшить максимальну ємність вбудовування до 256 біт, що критично мало. Тому даний розмір декомпозиції не розглядався.

При використанні блоків декомпозиції розміром  $16 \times 16$  достатньо, щоб при максимальному JPEG стиску різко змінювалося кінцеве стан хоча б одного з чотирьох коефіцієнтів ДКП  $d_{y,x}$ . Для порівняння ефективності використання блоків декомпозиції  $8 \times 8$  і  $16 \times 16$  було використано 5 напівтонових зображень, містять достатньо складних текстур для маркування. В результаті експерименту було встановлено, що використання блоків декомпозиції розміром  $16 \times 16$  практично не впливає на стійкість до зашумлення, зміни розміру і компресії JPEG (рисунок 4,5). Деяке зниження стійкості ЦВЗ при найвищому стиску JPEG (рисунок 4.5 а)) пов'язано з тим, що в деяких випадках зміни кінцевого стану одного з чотирьох коефіцієнтів ДКП недостатньо. Стійкість до середньочастотної фільтрації була збільшено (таблиця 4.2). Також ЦВЗ став отримувати з

контейнера при зменшенні яскравості зображення до 70%. Однак, незважаючи на дані покращення, вбудовування ЦВЗ в блоки контейнера розміром 16x16 наводить до сильного зниження стійкості ЦВЗ до компресії JPEG2000, фільтрації Вінера та збільшення яскравості контейнера.

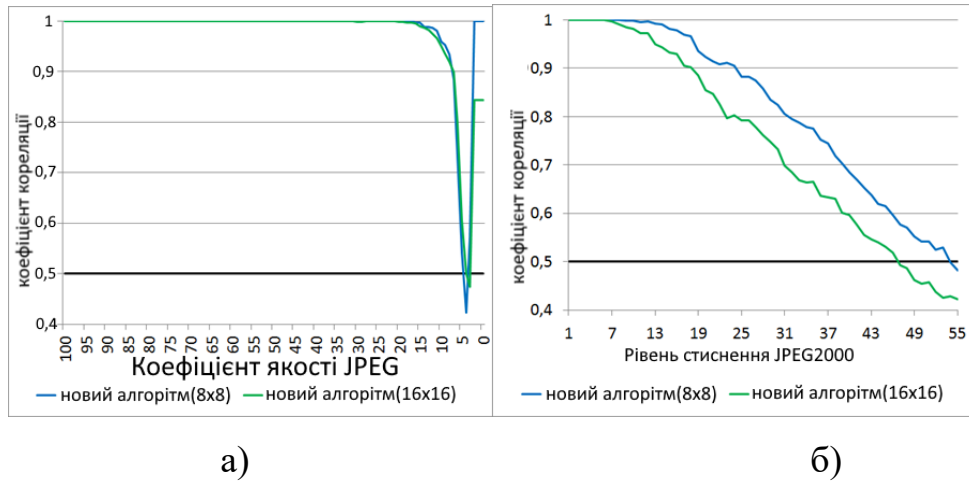


Рисунок 4.5 – Зниження стійкості під час використання блоків декомпозиції розміром 16×16 до атакам: а) компресії JPEG; б) компресії JPEG2000

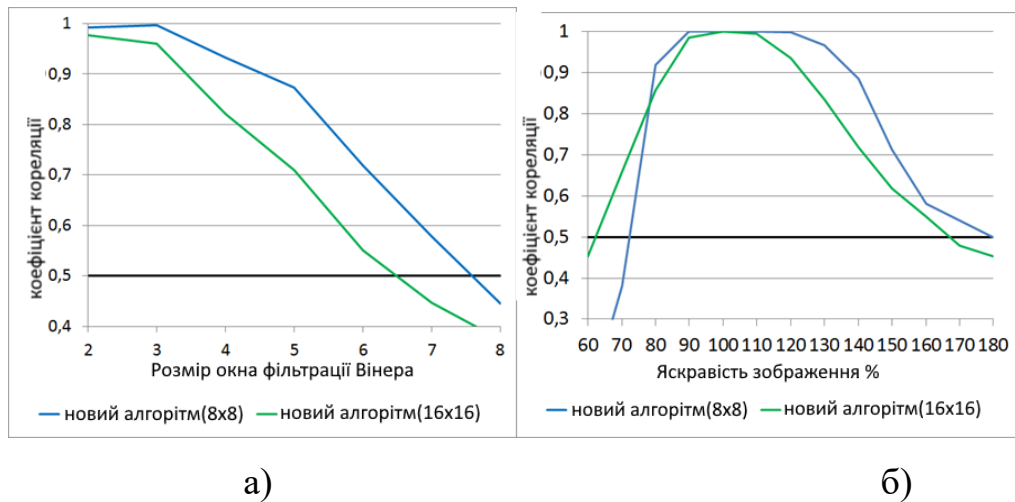


Рисунок 4.6 – Зниження стійкості під час використання блоків декомпозиції розміром 16×16 до атакам: а) фільтрації Вінера; б) зміни яскравості

Таблиця 4.2 – Стійкість ЦВЗ до середньочастотної фільтрації

Тип перетворення/розмір вікна фільтрації	2×2	3×3	4×4	5×5
новий алгоритм ( 16×16 )	0,69	0,8324	0,48	0,420
новий алгоритм ( 8×8 )	0,60	0,8101	0,37	0,325

Разом з тим, що цей розмір декомпозиції в 4 рази зменшує пропускну здатність контейнера (з 4096 біт до 1024 біт) даний розмір блоків декомпозиції зображення не рекомендується використовувати в новому алгоритмі цифрового маркування.

## ВИСНОВКИ

Ціль роботи досягнуто – розроблені методи і алгоритми, що підвищують стійкість вбудованого водяний знак у нерухомі зображення до JPEG стиснення високого рівня та іншим шкідливим впливам.

Були досягнуто наступні основні результати:

- досліджено вплив JPEG стиснення на коефіцієнти перетворення Адамара;

- проведено аналіз ефективності ортогональних перетворень в частотних алгоритмах цифрового маркування, що доводить перспективність використання перетворення Адамара в алгоритмах цифрового маркування, що забезпечують захист мультимедійний інформації від незаконного поширення і неавторизованого використання, в зокрема в комп'ютеризованих системах електронного документообігу;

- проведено аналіз стійкості алгоритму Elham до найбільш поширеним шкідливим впливам;

- розроблено метод вибору коефіцієнтів ДПА, що забезпечують підвищену стійкість вбудованого водяного знаку до JPEG стиску найвищого рівня;

- розроблено модифікація алгоритму цифрового маркування Elham, що забезпечує повну стійкість водяного знаку до JPEG стиску;

- розроблено алгоритм цифрового маркування нерухомих зображень, що вбудовує бінарне зображення у вигляді послідовності біт, отриманої за рахунок використання нового методу скорочення обсягу вбудовується інформації;

- проведено аналіз розроблених алгоритмів цифрового маркування, що доводить їх стійкість до JPEG стиску і найбільш поширеним операціям обробки зображення, спрямованим на усунення можливості визначення джерела витоку нерухомих зображень.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Westfeld, A. Attacks on steganographic systems / A. Westfeld, A. Pfitzmann // Proc. of Information Hiding, Third Int. Workshop, Dresden, Німеччина, September 28 - ЖОВТЕНЬ 1, - 1999.
2. Fridrich, J. Steganalysis of LSB encoding in color images / J. Fridrich, R. Du, Meng // Proc. IEEE Int. Conf. on Multimedia and Expo, New York, July 31-August 2, - 2000.
3. Fridrich, J. Detecting LSB стеганографії в фарбі та штрих-скані зображення / J. Fridrich, M. Goljan, R. Du // IEEE Multimedia Magaz., Special Issue on Security (ЖОВТЕНЬ-november 2001).
4. Fridrich, J. Practical steganalysis of digital images-state of the art / J. Fridrich,
5. Goljan // Proc. SPIE Photonics West, Electronic Imaging (2002), Security and Watermarking of Multimedia Contents, San Jose, CA - January 2002. – vol. 4675.
6. Fridrich, J., Feature-based steganalysis для JPEG images and its implications для майбутнього design steganographic schemes / J. Fridrich // Proc. Inf. Hiding Workshop, Lecture Notes in Computer Science, Springer, - vol. 3200. - 2004.
7. Avcibas, I. Image steganalysis with binary similarity measures / I. Avcibas,
8. Memon, B. Sankur // IEEE Int. Conf. на Image Processing, Rochester, New York, - September 2002. - no. 3.
9. Dumitrescu, S. А новий кадр роботи LSB steganalysis of Digital Media / S. Dumitrescu, X. Wu // IEEE Trans. Signal Process. – October 2005. – vol. 53, no. 10. – pp. 3936-3947.
10. Wang, Y. Steganalysis of block DCT зображення Steganography / Y. Wang, P. Moulin // IEEE Workshop на Statistical Signal Processing. – 2003.

11. Yu X. On estimation of secret message length in JSteg-like steganography / X. Yu, Y. Wang, T. Tan // Proc. of 7th ICPR. – 2004. – vol. 4. – pp. 673-676.
12. Jiang, M., Wong EK, Memon N., Wu X. Steganalysis, of halftone images /
13. M. Jiang, EK Wong, N. Memon, X. Wu // IEEE ICASSP'05 – 2005 – vol. 2.
14. <https://zbmath.org/software/11474> , <https://zbmath.org/software/19164> / Fabien AP Petitcolas, Ross J. Anderson, Markus G. Kuhn
15. [https://www.researchgate.net/publication/261039592\\_A\\_User\\_Friendly\\_GUI\\_Based\\_Benchmark\\_for\\_Image\\_Watermarking](https://www.researchgate.net/publication/261039592_A_User_Friendly_GUI_Based_Benchmark_for_Image_Watermarking)
16. Shabanali Fami, E. Adaptive watermarking in Hadamard transform coefficients of textured image blocks / E. Shabanali Fami, S. Samavi, H. Rezaee Kaviani, Z. Molaei Radani // 16th International Symposium on Artificial Intelligence and Signal Processing. Shiraz, Iran. – 2012. – vol. 2012.
17. <https://www.mathworks.com/help/vision/ug/compare-image-quality-using-psnr.html>
18. <https://www.mathworks.com/help/images/ref/psnr.html>
19. [https://www.researchgate.net/figure/Peak-Signal-to-Noise-Ratio-PSNR-in-decibels-dB-for-different-compression-ratios\\_fig2\\_341720350](https://www.researchgate.net/figure/Peak-Signal-to-Noise-Ratio-PSNR-in-decibels-dB-for-different-compression-ratios_fig2_341720350)
20. Батура, В.О. Підвищення стійкості при JPEG-стисканні цифрових водяних знаків, що вбудовуються у нерухомі зображення / В.О. Батура // Науково-технічний вісник інформаційних технологій, механіки та оптики - 2015. – Т. 15. – № 4(98).
21. Никитина, О.Ю. О методе цифровых водяных знаков на основе особенностей изображения и моментов Цернике / О.Ю. Никитина // «Штучний інтелект». – 2008. – № 3.