

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ФАКУЛЬТЕТ КІБЕРБЕЗПЕКИ, КОМП'ЮТЕРНОЇ  
ТА ПРОГРАМНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ  
КАФЕДРА ПРИКЛАДНОЇ ІНФОРМАТИКИ

ДОПУСТИТИ ДО ЗАХИСТУ  
Завідувач випускової кафедри  
\_\_\_\_\_ В.П. Гамаюн

« 03 » червня 2021 р.

**ДИПЛОМНИЙ ПРОЕКТ**  
(ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА)

ВИПУСНИКА ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ БАКАЛАВРА  
НАПРЯМУ ПІДГОТОВКИ 6.050101 «КОМП'ЮТЕРНІ НАУКИ»  
або  
ЗА СПЕЦІАЛЬНІСТЮ  
122 «КОМП'ЮТЕРНІ НАУКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ»

**Тема: «Вейвлет-перетворення в обробці зображень»**

Виконавець: Підопригора Артур Олександрович

Керівник: к.т.н. доц. Зудов Олег Миколайович

Нормоконтролер: к.т.н. доц. Боровик Володимир Миколайович

КИЇВ 2021

## ВСТУП

Століття в якому ми живемо є віком інформаційних технологій: від початку використання Інтернету у 2000-их і до дуже стрімкого розвитку, що продовжується і по сьогодні. Щодня людство генерує неймовірну велику кількість інформації – безліч дописів у соцмережах, терабайти відео та десятки мільйонів завантажених фото лише у Instagram. Дані міжнародної корпорації даних IDC говорять, що у минулому 2018 році обсяг даних був близько 33 зеттабайт і прогноуються, що він значно виросте до 2025 року та становитиме 175 зеттабайт (ЗБ) – 175 000 000 000 терабайтів (ТБ)<sup>[1]</sup>.

Значну частку інформації, що передається та зберігається, складають графічні дані – фото- та відеоматеріали. Передача даних в оригінальному розмірі файлів у телекомунікаційних системах вимагає набагато більшої пропускної здатності та швидкості передачі даних, а їхнє зберігання – особливо великого об'єму пам'яті носіїв, які на сьогодні все ж досить непогано еволюціонували і здатні зберігати уже терабайти інформації.

Тож, в даний період нашого цифрового розвитку питання стиснення даних для їх подальшої передачі чи зберігання досить актуальне та не підлягає хованню у далекий ящик. Основою для стиснення зображень та відео є саме зменшення розміру зображень(відео, в основному, це є послідовність зображень). Тому для початку потрібно зосередитися в такому напрямі стиснення, як стиснення зображень.

Стиснення зображень має величезну кількість областей застосування, серед них – передача графічної інформації, у тому числі і через Інтернет(поширення фото і відео у соціальних мережах), обробка даних з географічних систем або астрономічних інформаційних систем(як-от, недавні фото та відео з Марсу, що надійшли на Землю від сучасних машин Perseverance та Ingenuity), котрі можуть містити необхідні та важливі фото чи відео з апарату розміром декілька гігабайт, для

передачі цифрових зображень та відеопотоку високої роздільної здатності у сфері телебачення.

Стрімкість зростання обсягу графічних даних зумовила постійний інтерес у поліпшенні алгоритмів стиснення та відкритті нових, підвищення ефективності таких алгоритмів шляхом оптимізації. Разом з тим, зросла потреба у розробці інструментів прикладного застосування таких алгоритмів. Методом, що стрімко набирає популярність, є стиснення зображень на основі вейвлет-перетворень.

**Метою дипломного проекту** є створення прикладного інструменту(застосунку) для стиснення зображень з використанням вейвлет-перетворень.

Для виконання цієї мети буде досліджено теоретичний матеріал по даній темі та вивчення базових понять із стиснення даних, буде виявлено проблеми цієї області та наведено можливі способи їх вирішення. Також буде набуто необхідні навички та досліджено програмні інструменти, які будуть у нагоді при розробці програми для стиснення зображень.

**Об'єктом** дослідження є сучасні методи та інструменти стиснення зображень, особливу увагу було зосереджено на методі вейвлет-перетворення в тому числі і на вейвлеті Хаара.

**Предмет** дослідження становлять теоретичні і методичні принципи алгоритмів стиснення зображень, а також створення програмного продукту – компресора для зображень на базі вейвлет-перетворень.

Для досягнення поставленої цілі необхідно дослідити такі **питання**:

- проаналізувати 2 базові підходи до стиснення зображень;
- проаналізувати сучасні методи, алгоритми та інструменти стиснення, дослідити механізм їх роботи;
- розглянути властивості та характеристики вейвлетів та перетворень на основі вейвлетів, дослідити роботу методу стиснення на основі вейвлет-перетворень, в тому числі вейвлет-перетворення Хаара;

- визначити ефективність роботи готової програми, в порівнянні з іншими існуючими компресорами зображень.

## РОЗДІЛ 1. МЕТОДИ СТИСНЕННЯ ЗОБРАЖЕНЬ

### 1.1. Класифікація цифрових зображень

Цифровим зображенням називається двовимірне зображення, яке складається з менших елементів зображення, як-от пікселі, геометричні примітиви або навіть з комбінації цих двох<sup>[2]</sup>.

Цифрові зображення можна поділити на три типи:

#### 1. растрові зображення:

Растровим зображенням(*англ. raster image*) називається зображення, яке зазвичай представляє собою прямокутну сітку(так званий растр) пікселів, які у свою чергу розташовуються у рядках та стовпцях матриці. Кожен піксель може набувати різного чисельного значення за його інтенсивністю або рівнем сірого.

Пікселем у комп'ютерній графіці називається базова одиниця растрового цифрового зображення, що містить у собі інформацію про розташування(координати осей X та Y), колір у моделі RGB та інформацію про альфа-канал. У своєму базовому представленні пікселі зберігають кольори у моделі RGB(*англ. Red, Green, Blue*) і використовують для зберігання кольору всього 3 байти(або  $24 \text{ біт} = 3 * 8 \text{ біт}$ ) – по 1 байту для кожного із трьох кольорів. Кожен із кольорів може набувати величини від 0 до 255. Інші ж кольори, окрім червоного, зеленого та синього, формують поєднанням цих базових кольорів. Приклад палітри для додаткових кольорів із моделі RGB наведений нижче

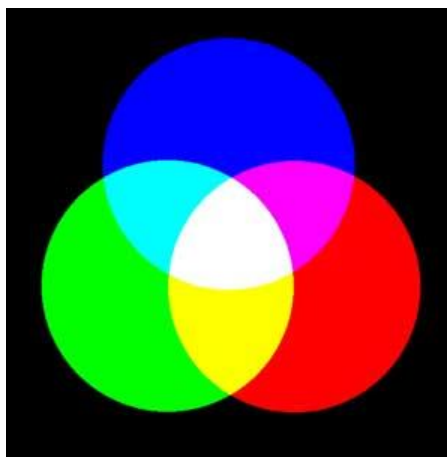


Рис. 1.1.1. Приклад утворення додаткових кольорів з використанням трьох базових у колірній моделі RGB

Растрові зображення можна отримати лише трьома способами:

- скануванням оригіналу:

Дана операція проводиться з використанням спеціального пристрою – сканера, і дозволяє зчитати параметри яскравості і колірні характеристики оригінального зображення та створити на базі нього ідентичну копію.

- проектуванням оригіналу на матрицю через систему лінз:

Даний спосіб отримання растрового зображення використовується у сучасних цифрових фотоапаратах/відеокамерах або смартфонах за допомогою вбудованої камери – зображення проектується на матрицю, оброблюється та зберігається в одному з доступних форматів для растрового зображення.

- створенням зображення у графічному редакторі:

На сьогодні є велика кількість спеціальних програм для створення растрових зображень – графічних редакторів. За допомогою цих програм професійні користувачі створюють високоякісні зображення, які потім продають для отримання матеріальної вигоди. Прості користувачі також

мають доступ до простих графічних редакторів, як-от Paint, GIMP або професійний Adobe Photoshop.



Рис. 1.1.2. Приклад растрового зображення, на якому можна розгледіти окремі пікселі

Малиновий колір на окремих пікселях зображення вище можна розкласти у вигляді комбінації червоного, зеленого, синього і записати так – (187, 16, 66).

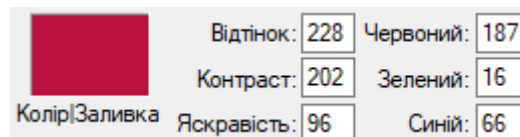


Рис. 1.1.3. Дослідження малинового кольору у моделі RGB та HSB

## 2. векторні зображення:

Векторним зображенням(англ. *vector image*) називається зображення, що було створено із використанням математичного опису базових геометричних об'єктів та форм, що часто називаються «геометричними примітивами». До них відносяться точки, лінії, сплайни, криві Безьє, кола та круги, різні багатокутники та ін.

До найменших базових елементів векторного зображення можна віднести звичайний вектор та криву Безьє.

Векторні зображення набули популярності у деяких видах діяльності людини, як-от різні друковані засоби масової інформації – газети, журнали. Завдяки ним створюються елементи оформлення – шрифти, логотипи на ін. В рекламній продукції корисні завдяки рівній заливці, чіткому відтворенню ліній, яскравим кольорам та геометрично правильним контурам.

Основним недоліком векторних зображень є велика складність або навіть неможливість відтворити складний графічний оригінал у повному обсязі, а лише у спрощеному вигляді. Існують способи наблизитися до оригіналу з використанням величезної кількості геометричних примітивів, але тоді зображення такого векторного формату займатиме дуже багато місця на носії.

Проте головною перевагою зображень такого типу є те, що вони мають значно менший розмір, якщо зображувати нескладні, прості об'єкти(шрифти, логотипи тощо), порівняно з основним конкурентом – растровими зображенням та внаслідок цього не потребують компресії задля зменшення розміру файлу.

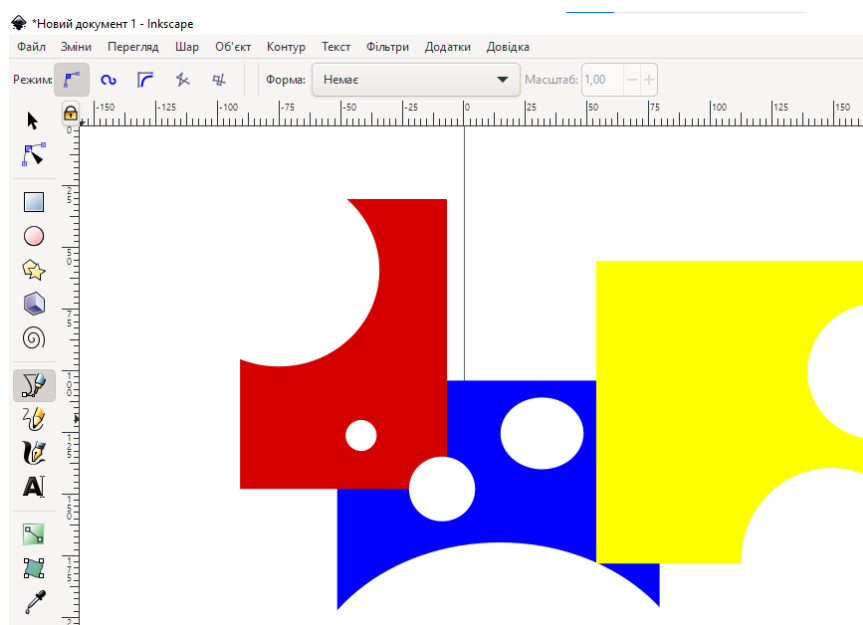


Рис. 1.1.4. Приклад створення векторного зображення у програмі Inkscape

### 3. змішаний тип зображень:

До змішаного типу належать зображення, що включають в себе елементи растрового та векторного зображень. Вони представляють собою масиви даних, які містять інформацію як у вигляді матриці пікселів, так і різноманітні геометричні примітиви: вектори, криві Безьє та ін.

В основі вертикальної структури зображень такого типу лежить поняття шару – детальної інформації про кожен окремий елемент структури зображення. Сучасні зображення змішаного типу можна отримати лише при використанні спеціальних графічних редакторів, в яких можна редагувати окремо кожен шар. Як правило, растрово-векторні зображення використовують растрові шари для додавання фото чи інших точних зображень, а векторні шари для додавання різноманітних художніх шрифтів, логотипів, товарних знаків тощо.

Даний тип зображень має істотний недолік – великий розмір файлу через значну кількість шарів різних типів, проте це ж можна віднести і до плюсів – наявність великої кількості шарів дозволяє редагування окремо кожного шару, що в деяких випадках буває досить корисно.

Растрово-векторний тип зображень є неоптимальним для компресії через свою комплексну структуру: необхідно стискати кожен шар кожного типу окремо із збереженням усіх параметрів, що є досить непростим завданням.



Рис. 1.1.5. Порівняння деталізації векторного та растрового типів зображення





Рис. 1.1.6. Результат масштабування растрового зображення – поява зернистості.

Даний ефект відсутній у векторних зображень

На даний момент більшість зображень в мережі Інтернет відносяться до растрових зображень(у сфері ЗМІ це близько 90% – відповідно до української Вікіпедії), які мають розширення raw, png, bmp, gif або уже стиснене зображення у форматі jpeg.

Користувачі щодня обмінюються своїми фото, різними зображеннями, які створені з використанням графічних редакторів та завантажують усе це в Інтернет для загального доступу в соціальних мережах або ж на спеціальні сайти – іміджборди(*англ. image board* – дослівно «стенд картинок», сайти, які дозволяють користувачам обмінюватися повідомленнями з прикріпленими картинками або просто розміщувати зображення без плати). Медіахолдинги та журналісти-любители по всьому світу щодоби продукують величезну кількість сюжетів та пишуть цілу низку статей з використанням растрових зображень і використання таких матеріалів без зменшення розміру створює значне навантаження на об'єм носіїв для зберігання інформації та на канал передачі даних. Векторні зображення зовсім не використовуються у журналістських сюжетах та розслідуваннях, через те, що усі фото- та відеокамери знімають у форматах растрового зображення, та навіть при

конвертуванні у векторне зображення втрачається велика кількість деталей, що не можна назвати припустимим у такій роботі.

Вирішенням даного питання стане зменшення розміру растрових зображень, яке в свою чергу дозволить зберігати більшу кількість зображень на носії того ж фіксованого розміру та швидше передавати уже зменшені в розмірах графічні файли.

## 1.2. Сучасні методи стиснення зображень

Стиснення зображень є необхідною операцією задля зменшення їх розміру і оптимальнішого розміщення на носіях. Стиснути зображення означає закодувати інформацію, що міститься в даному графічному файлі так, щоб вона займала менший розмір, тобто менше байтів на носії<sup>[3]</sup>. Зворотній процес до стиснення (або компресії) носить назву декомпресія та робить протилежну дію – повертає стиснуті дані назад в початкову форму.

Базовою одиницею інформації в сучасному цифровому світі є біт. Дана величина, може набувати всього двох значень – 0 або 1. Варто також зауважити, що в сучасних операційних системах позначення біту для розміру файлів не використовується. Натомість дані вимірюються в байтах – наступника, що складається з 8 бітів, та похідних від нього – кілобайт, мегабайт, гігабайт та ін.

Растрове зображення складається з пікселів і алгоритми стиснення намагаються знайти подібні ділянки та замінити їх на менші фрагменти – закодувати.

Наприклад, у зображенні трохи вище видно, що не усі пікселі масштабованого фрагмента тюльпана мають різний колір – багато пікселів є білими. Алгоритми стиснення опираються на цю інформацію та дозволяють замінити послідовність: «білий білий білий ... (120 разів)» на фрагмент «білий x 120». Дана проста операція дозволить істотно зменшити розмір зображення навіть не втративши в якості.

Компресія(або стиснення) зображень є важливим і необхідним процесом в сучасному світі, оскільки дозволяє зменшити розмір графічних даних, що в свою чергу робить можливим розміщення більшої кількості зображень на носії того самого розміру та ефективніше їх передавання в мережах опираючись на те, що ширина смуги пропускання є сталою величиною.

**Компресія зображень корисна завдяки:**

- 1) зменшенню розмірів графічних файлів;
- 2) зменшенню часу передачі зображень у локальних або глобальних мережах.

**Основною ціллю** компресії зображень є мінімізація даних, якими це зображення представляється, що в свою чергу робить можливим ефективніше зберігання та швидше передавання даних по мережам<sup>[4]</sup>.

**Стиснення можливо досягти**, якщо усунута принаймні одна з таких базових надмірностей даних:

- 1) *кодована надмірність*: з'являється при неоптимальному опису зображення – коли довжина кодових слів перевищує необхідну;
- 2) *міжпиксельна надмірність*: результат співвідношення між пікселями – кореляційна залежність в пікселях реального зображення;
- 3) *психовізуальна надмірність*: візуальна інформація, яка відкидається зоровою системою людини.

Методи стиснення зображень залежно від збереження даних поділяються на дві категорії – *стиснення із втратами даних* та *стиснення без втрат даних*.

Стиснення зображень із втратами даних робить можливим значно зменшити розмір файлу, але при цьому дещо спотворює дані та викликає артефакти. Залежно від ступеню стиснення оброблене зображення може візуально або майже не відрізнятися від оригіналу для людського ока, або бути дуже сильно помітним.

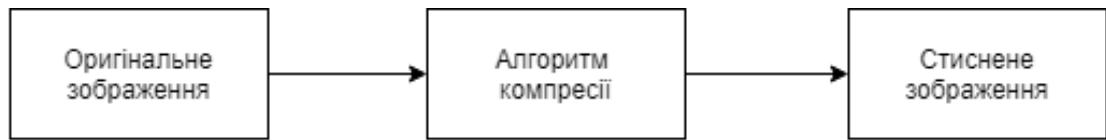


Рис. 1.2.1. Принцип роботи алгоритмів із втратами якості

Стиснення графічної інформації без втрат дозволяє проводити відновлення вихідних даних зображення зі стиснених по схемі «біт в біт».

### 1.3. Стиснення із втратами якості

До стиснення із втратами(*англ. lossy compression*) належать методи, завдяки яким при розпакуванні файлу його розмір відрізняється від оригіналу проте все ще може бути корисним для використання<sup>[5]</sup>. Такий тип стиснення працює ефективніше(якщо брати до уваги зменшення розміру зображення) за протилежний метод без втрат якості, оскільки багато методів зосереджуються на особливостях будови органів почуття людини і відповідно можуть опускати деякі блоки даних так, щоб зовнішньо це зовсім або майже не було помітно.

Даний метод стиснення набув поширення для стиснення мультимедіа-даних – зображень, аудіо та відео. Особливої популярності він набув при використанні в телефонії та потоковому телебаченні(наприклад, такі сервіси як Netflix та Spotify) завдяки властивості зменшувати розмір файлу та при цьому значно не погіршувати якість<sup>[6]</sup>.

До алгоритмів стиснення та форматів зображення із втратами якості належать наступні:

- фрактальне кодування:

Даний алгоритм компресії зображень базується на застосуванні систем повторних функцій(IFS, які зазвичай є афінними перетвореннями) і працює шляхом виявлення самоподібних ділянок у графічному зображенні

та заміною їх на стиснене відображення. Є досить складним методом з математичного боку, оскільки застосовується повний перебір блоків.

- JPEG:

Є найпопулярнішим методом стиснення із втратами, який використовується повсюди – від домашніх комп'ютерів та аж до офісів середніх компаній. Метод опирається на один з різновидів перетворення Фур'є, а саме на дискретне косинусне перетворення та дозволяє контролювати ступінь стиснення і відповідно зернистість зображення.



**Оригінал, PNG**

**Стиснене, JPEG**

Рис. 1.3.1. Порівняння оригінального зображення у нестисненому вигляді із стисненим – артефакти помітні неозброєним оком

- DjVu:

Є найменш популярним методом серед перерахованих вище. Пояснюється це його специфічною галуззю застосування – він був розроблений для зберігання документів – відсканованих книг, газет, різних друкованих видань тощо. Є комплексним алгоритмом та в собі поєднує наступні: універсальний алгоритм стискання ZP, також алгоритми IW44 та JB2.

## 1.4. Стиснення без втрат якості

До методів стиснення зображення без втрат якості(*англ. lossless compression*) належать методи, при використанні яких декодоване зображення ідентичне оригіналу(біт в біт), але натомість займає значно менше місця на носії в порівнянні з оригіналом.



Рис. 1.4.1. Принцип роботи алгоритмів без втрат якості

Методи стиснення без втрат набули особливої популярності в областях, де важливо зберегти файли ідентичними оригіналу при цьому зменшивши розміри – скомпільовані тексти програм в машинному кодї або сирцевий код програм. В обробці зображень також є свої особливі галузі. Наприклад, в машинному навчанні чи розпізнаванні образів важливо оброблювати оригінальне та незашумлене зображення без непотрібних артефактів, які зазвичай утворюються при стисненні з втратами, щоб змусити працювати програму на реальних даних, а не викривлених<sup>[7]</sup>.

До алгоритмів стиснення без втрат належать такі:

- кодування довжин серій(*RLE, англ. Run Length Encoding*):

Алгоритм полягає в тому, що послідовність бітів з яких складається зображення представляється у вигляді одного неперервного рядка і однакові елементи замінюються на пари, що мають вид (лічильник повторень, значення).

- алгоритм Лемпеля-Зіва-Велча(*LZW, англ. Lempel-Ziv-Welch*):

Даний алгоритм належить до словникових методів і відповідно базується на використанні словника – таблиці, яка динамічно складається з записів. Спочатку словник ініціалізується і складається з перших записів різних ланцюжків з одного елемента

У процесі компресії шукається найдовший ланцюжок, котрий уже записаний в словник. Щоразу, коли новий ланцюжок елементів не знайдений в створеному словнику, він додається туди, при цьому записується код ланцюжка, для якого відбувся збіг із словником.

- алгоритм Гаффмана(*англ. Huffman coding*):

Належить до частотних алгоритмів та базується на частоті появи однакових байтів у вхідному блоці даних. Символам вхідної послідовності, які зустрічаються в наборі даних частіше за інші, ставить у відповідність ланцюжок бітів меншої довжини.

Серед форматів зображень, які відносяться до стиснення без втрат можу навести наступні:

- GIF:

GIF( *англ. Graphics Interchange Format*) – досить популярний на сьогодні формат для зображень при використанні стиснення без втрат. Дозволяє використовувати до 256 чітких кольорів із 24-бітного діапазону RGB. Базується на алгоритмі стиснення LZW<sup>[8]</sup>.

Набув величезної популярності в Інтернеті завдяки своїй властивості до анімації та можливості використовувати прозорість.

Використовувався повсюдно як у соціальних мережах, так і на сайтах великих компаній.

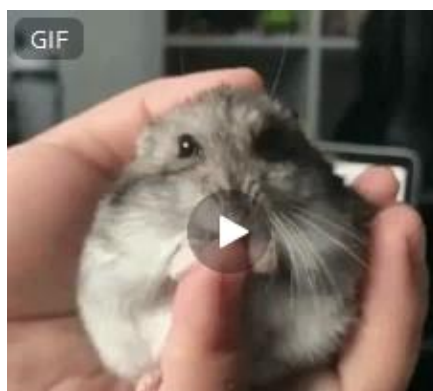


Рис. 1.4.1. Рухоме зображення когось або чогось – звичайний приклад GIF-файлу

- PNG:

Стандарт графічного зображення який був випущений у минулому столітті та з тих пір не оновлювався, хоча і по сьогодні є досить популярним. Даний формат файлу прийшов на заміну попередньому формату GIF та значно покращив його в певних аспектах – додав не просто можливість використовувати прозорість, а ще й налаштовувати ступінь прозорості – так званий альфа-канал. Також дозволяє відтворити набагато більше кольорів порівняно з попередником –  $2^{48}$  кольорів проти  $2^8$  у GIF. Формати зображення такого типу використовують для стиснення алгоритм Deflate, який є вільним для використання та з відкритим сирцевим кодом. Унаслідок цього є велика кількість різних варіацій алгоритму. Використовується повсюди і прийнятий як основний для розміщення графіки в мережі Інтернет.



Рис. 1.4.2. Такий картатий фон означає прозорість у PNG-файлі



- BMP:

BMP(*англ. bit map*) – формат зображень, у якому вони зберігаються у вигляді матриці з пікселів, проте допустимим є лише один шар пікселів. Формат розроблений компанією Microsoft та офіційний документ з описом стандарту можна знайти на їхньому сайті. Дозволяє зберігати двовимірні зображення різної ширини та висоти, з параметрами альфа-каналу та керуванням кольору(бітність кольору може бути 1, 2, 4, 8, 16, 24, 32, 48 або 64). Колір можна задати лише з використанням однієї моделі – RGB. Додатково підтримує гама-корекцію та профілі ICC. Все ще широко використовується на сьогодні у професійних та аматорських графічних редакторах.

- TIFF:

Досить давній формат для зберігання зображень без втрат – був розроблений ще в 1986 році. Завдяки своїй специфікації дозволяє зберігати зображення з великою глибиною кольору(8, 16, 32, 64 біт). Структура графічного файлу дозволяє зберігати його у різноманітних колірних гамах – стандартне RGB, CMYK, чорно-білий. Відноситься як до форматів зображення із втратами даних, так і до форматів без втрат даних. Ступінь стиснення залежить від вибраного алгоритму стиснення, а їх є велика кількість – LZ77, ZIP, JPEG. Набув великої популярності свого часу, бо використовувався як основний графічний формат операційної системи NeXTSTEP. Зараз поступово витісняється сучасними та більш ефективними форматами.

## РОЗДІЛ 2. ВЕЙВЛЕТ-ПЕРЕТВОРЕННЯ ТА ДОРЕЧНІСТЬ ЇХ ВИКОРИСТАННЯ ПРИ СТИСНЕННІ ЗОБРАЖЕНЬ

### 2.1. Вейвлети та їх перетворення

Поняття вейвлету з'явилося відносно недавно та вперше було використано у вісімдесятих роках минулого століття науковцями Алексом Гроссманном та Жаном Морле під час аналізу властивостей сейсмічних та акустичних сигналів. Проте варто також додати, що хоч поняття вейвлету і було вперше використано у 1980-их, та історія досліджень функцій такого характеру була почата раніше – в 1910 році угорський математик Альфред Хаар опублікував свою працю з описом повної ортонормальної системи базисних функцій, що мають локальну область визначення(зараз вони носять ім'я свого дослідника – вейвлети Хаара).

Вейвлетом(від *англ. wavelet – маленька хвиля*) називається короткочасне хвилеподібне коливання з амплітудою, що починається з нуля, зростає та знову спадає до нуля. Вейвлети утворили окремий клас математичних функцій<sup>[9]</sup>.

На малюнках вейвлет виглядає як маленький фрагмент запису з сейсмографа чи виріз із електрокардіограми пацієнта.

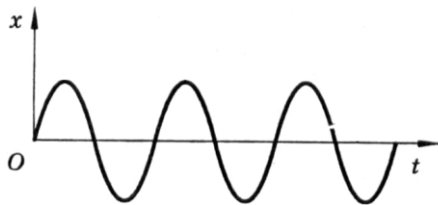


Рис. 2.1.1. Приклад гармонічних коливань

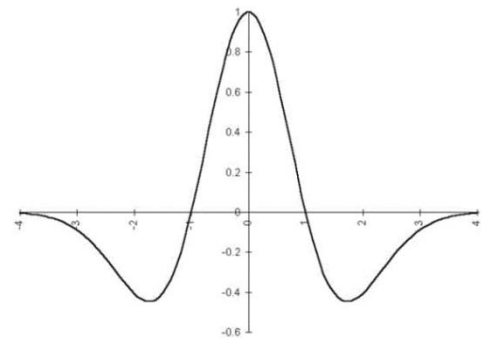


Рис. 2.1.2. Приклад вейвлету

Ортонормованим вейвлетом називається функція  $\psi \in L^2(\mathbb{R})$ , якщо за її допомогою можна визначити базис Гільберта, який є повною ортонормальною системою для Гільбертового простору  $L^2(\mathbb{R})$ , що складається із квадратичних інтегрованих функцій.

Вейвлети використовуються в якості базових функцій у вейвлет-перетворенні, яке в свою чергу дозволяє реалізувати короткомасштабний аналіз даних<sup>[10]</sup>.

Основною ідеєю при використанні вейвлетів для обробки даних є часово-частотне представлення даних, коли дані локалізуються по часу та частоті в один і той самий момент часу.

Вейвлет-перетворенням(*англ. wavelet transform*) одновимірного сигналу називається його представлення у вигляді узагальненого ряду чи інтегралу Фур'є по системі базисних функцій, що сконструйовані з вихідного вейвлета( $\psi$ ), який має визначені властивості за рахунок операцій зсуву в часі( $b$ ) та зміни часового масштабу( $a$ )<sup>[11]</sup>:

$$\psi_{ab}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (2.1.1.)$$

У ідеї перетворення вейвлетів лежить той факт, що саме перетворення має дозволяти тільки зміни на осі часу( $t$ ), але залишати форму функції такою ж. На це впливають базисні функції, яких існує достатньо багато та вони мають різну гладкість і інші показники. Причому, зміни на осі часу відповідають частоті аналізу базису функції<sup>[12]</sup>.

Вейвлет-перетворення містять у собі ту ж саму інформацію, що і віконне перетворення Фур'є, проте з додатковими спеціальними особливостями вейвлетів, які виступають в якості переваг<sup>[13]</sup>. Вони грають велику роль при дослідженні високих частот у базисних функціях<sup>[14]</sup>.

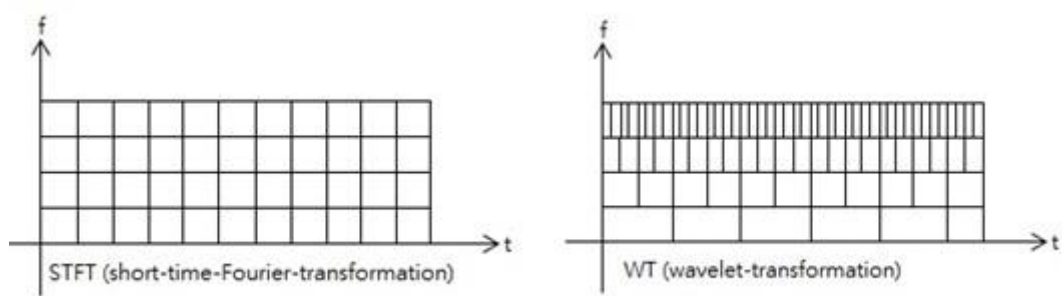


Рис. 2.1.3. Різниця у часі при віконному перетворенні Фур'є та вейвлет-перетворенні

**До переваг** вейвлет-перетворення належать:

- досить великий набір базисних функцій;
- краща локалізація за частотою та часом;
- мають усі переваги перетворень Фур'є;
- можна використовувати функції різного ступеня гладкості.

**Недоліками** вейвлет-перетворення є наступне:

- присутня можливість спотворення даних;
- складність порівняння результатів вейвлет-аналізу, що були отримані при роботі на різних масштабах.

На сьогодні вейвлет-перетворення широко застосовуються в наступних задачах<sup>[15]</sup>:

- обробка зображень:

Суть полягає у природі походження та особливості людського зору – він побудований так, що ми зосереджуємо свою увагу на істотних та важливих деталях зображення, не звертаючи увагу на зайві. Використання вейвлет-перетворень дозволяє розмити або навпаки виділити деякі важливі елементи зображення.

- обробка даних з експериментів:

Оскільки вейвлети з'явилися саме як нагальна необхідність при обробці сейсмічних та акустичних сигналів у минулому столітті, то використання їх на поточний час все ще має сенс, тим паче після значної еволюції даної області математики. Основна перевага в тому,

що вейвлет-перетворення дозволяє очистити вихідні дані експерименту від випадкових викривлень та шумів. Чудово підходять для обробки також різних медичних даних пацієнтів(ЕКГ, графік сатурації кисню в крові), фінансових даних(графіки росту валют, аналізу фондових ринків) та багатьох інших видів даних.

- стиснення даних:

Визначною рисою ортогонального багатомасштабного аналізу даних є те, що для гладкого(незашумленого) масиву даних отримані як результат перетворення деталі в цілому дорівнюють або близькі до нуля та унаслідок цього чудово піддаються стисненню звичайними статистичними методами. Особливою перевагою вейвлет-перетворень при стисненні даних можна назвати той факт, що вони не вносять додаткової збиткової інформації у початкові дані. Сигнал при цьому може бути відновлений до оригінального з використанням тих самих фільтрів.

- аналіз інформації у штучних нейронних мережах:

При роботі з нейронними мережами дуже важливо, щоб дані, які оброблюватимуться були без викривлень(випадкові викиди, пропуски, нелінійні спотворення) та шумів, оскільки це може мати негативний вплив на навчання і спотворювати кінцеві результати навчання. Чудовим способом видалити шуми з сигналів та даних є якраз метод вейвлет-перетворень.

- сфера передачі даних:

Оскільки стиснення даних полягає у зменшенні розміру файлу, то відповідно необхідний менший пропускний канал для передачі інформації з одного місця в інше.

- багато інших галузей застосувань.

Існує велика кількість різних видів вейвлет-перетворень. Кожен вид застосовний лише до певної області.

Поширеними видами вейвлет-перетворень є наступні:

- неперервне вейвлет-перетворення (англ. Continuous wavelet transform, CWT);
- дискретне вейвлет-перетворення (англ. Discrete wavelet transform, DWT);
- швидке вейвлет-перетворення (англ. Fast wavelet transform, FWT);
- схема ліфтинга та узагальнена схема ліфтинга (англ. Lifting scheme & Generalized Lifting Scheme) ;
- розкладання пакетів вейвлетів (англ. Wavelet packet decomposition, WPD);
- стаціонарне вейвлет-перетворення (англ. Stationary wavelet transform, SWT);
- дробове перетворення Фур'є (англ. Fractional Fourier transform, FRFT);
- дробове вейвлет-перетворення (англ. Fractional wavelet transform, FRWT);

Проте найбільшого використання набули лише два перші методи – неперервне та дискретне вейвлет-перетворення.

## 2.2. Неперервне вейвлет-перетворення

Неперервним вейвлет-перетворенням(англ. *Continuous wavelet transform, CWT*) називається реалізація вейвлет-перетворення з використанням різних масштабів і майже будь-яких вейвлетів. Вейвлети, що використовуються в даному типі перетворення, є неортогональними, а отримані дані характеризуються високою кореляцією<sup>[16]</sup>.

Для дискретних часових послідовностей також можна використовувати це перетворення з обмеженням, а саме – мінімальні перенесення вейвлета повинні бути рівними величині дискретизації даних. Даний спосіб носить назву неперервного

вейвлет-перетворення дискретного часу (ДЧ – НВП) і це популярний метод розрахунку неперервних вейвлет-перетворень у реальних задачах.

Приклади неперервних вейвлетів:

- МНАТ-вейвлет:

Назва цього вейвлету (англ. *MHAT*, *Mexican HAT* – мексиканський капелюх) походить від візуальної подібності його графіка із традиційним мексиканським головним убором – сомбреро. Даний вейвлет можна отримати, якщо двічі продиференціювати функцію Гауса. Формула має наступний вигляд:

$$\psi(t) = \frac{d^2}{dt^2} e^{-t^2/2} = (1 - t^2)e^{-t^2/2} \quad (2.2.1.)$$

МНАТ-вейвлет виглядає так:

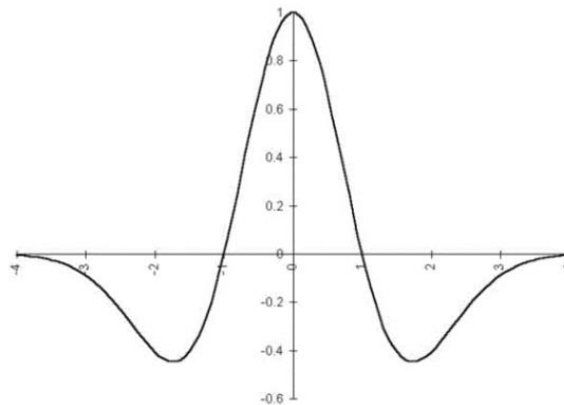


Рис. 2.2.1. Графік МНАТ-вейвлету

- вейвлет Морле:

Вейвлетом Морле називається вейвлет, що складений із добутку вікна Гауса на несучу частоту. Цей вейвлет був винайдений французьким інженером-геофізиком Жаном Морле для полегшення обробки сигналів із сейсмічних датчиків. Також він тісно пов'язаний із шляхами сприйняття людиною інформації – візуальним та слуховим. Вигляд цього вейвлету такий:

$$\Psi_{\sigma}(t) = c_{\sigma} \pi^{-\frac{1}{4}} e^{-\frac{1}{2}t^2} (e^{i\sigma t} - \kappa_{\sigma}) \quad (2.2.2.)$$

Графічне зображення вейвлету Морле наступне:

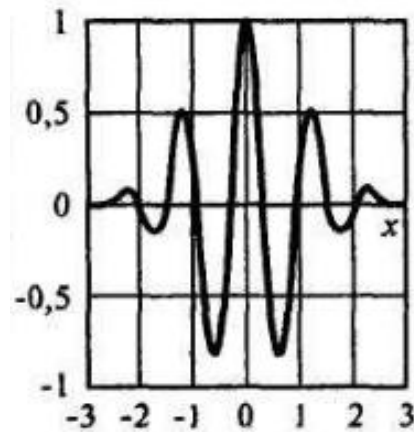


Рис. 2.2.2. Графік вейвлету Морле

- сплайн-вейвлет:

Сплайн-вейвлетом називається вейвлет, що побудований з використанням сплайн-функції (функція, що складається із окремих фрагментів на своїй області визначення, де кожен фрагмент є окремим поліномом). Існує велика кількість різних вейвлетів такого типу та відрізняються вони лише порядком: константні В-сплайни (порядок 1), квадратичні В-сплайни (порядок 3), кубічні В-сплайни (порядок 4), квінтичні В-сплайни (порядок 6) та ін..

Загальну формулу сплайн-вейвлетів можна записати так:

$$\hat{h}(\omega) = \sqrt{2} e^{-i\frac{\omega x}{2}} \left( \cos \frac{\omega}{2} \right)^p \quad (2.2.3.)$$

В-сплайн вейвлет третього порядку:



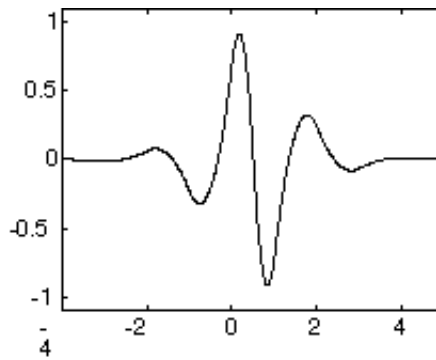


Рис. 2.2.3. Графік сплайн-вейвлету

Неперервні вейвлет-перетворення широко застосовуються у наукових дослідженнях фізичних процесів. Вони чудово підходять для стиснення та роботи із сигналами різного роду – сейсмічні коливання, медичні показники пацієнта, курс акцій на фондовій біржі та інша подібні. Даний тип вейвлет-перетворень характеризується сильною стійкістю до шуму. Проте растрове зображення складається із низки окремих(дискретних) фрагментів – пікселів, і даний метод перетворень недоречно використовувати при стисненні зображень. Набагато краще себе показує у цій сфері метод дискретного вейвлет-перетворення.

### 2.3. Дискретне вейвлет-перетворення

Дискретним вейвлет-перетворенням(ДВП) (англ. Discrete wavelet transform, DWT) називається перетворення вейвлетів, у якому останні представлені у вигляді дискретних сигналів(вибірок фрагментів).

Основоположником теорії дискретних вейвлет-перетворень є угорський математик Альбер Хаар, який почав дослідження в цьому напрямку ще на початку минулого століття. Його ідея полягала в наступному: якщо вхідний сигнал представлений масивом  $2^n$  чисел, тоді вейвлет-перетворення Хаара групує елементи попарно і розраховуються суми і різниці цих елементів. Далі групують суми знову(при умові, парної довжини послідовності сум) так, щоб потім утворився наступний рівень розкладання. Наприкінці отримуємо  $2^n-1$  різниця та 1 спільна сума.

Деякі з вейвлетів, що використовуються для дискретного вейвлет-перетворення:

- вейвлет Хаара:

Є базовим та основним вейвлетом дискретного типу. Простий вейвлет, який являє собою послідовність масштабованих ортогональних функцій, що усі разом утворюють базис. Вейвлети такого типу характеризуються компактним носієм, властивістю ортогональності, добре розміщені у просторі та не є гладкими(на відміну від вищеописаних неперервних вейвлетів). Чудово підходить для компресії зображень.

Вейвлет-функцію для опису можна задати так:

$$\psi(x) = \begin{cases} 1, & 0 \leq x < 1/2 \\ -1, & 1/2 \leq x < 1 \\ 0, & x \notin [0, 1) \end{cases} \quad (2.3.1.)$$

Найпростіший дискретний вейвлет має такий вигляд:

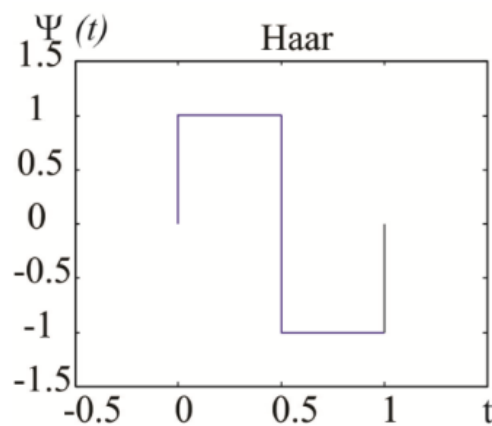


Рис. 2.3.1. Графік вейвлету Хаара

- вейвлети Добеші:

Виокремлюються в один із класів ортогональних вейвлетів з компактним носієм та одні з небагатьох, які обраховуються ітеративно. Були винайдені математиком із США, проте бельгійкою за походженням – Інгрід Добеші, в честь якої і названі. До кожного із таких вейвлетів існує функція

масштабування, яку називають батьківським вейвлетом(англ. father wavelet), що генерує прямокутний, малий по розміру аналіз.

Алгоритм обрахунку дещо складний, тому наводиться в цій роботі не буде, бо не використовуватиметься у подальшому.

Вейвлет Добеші має такий вигляд:

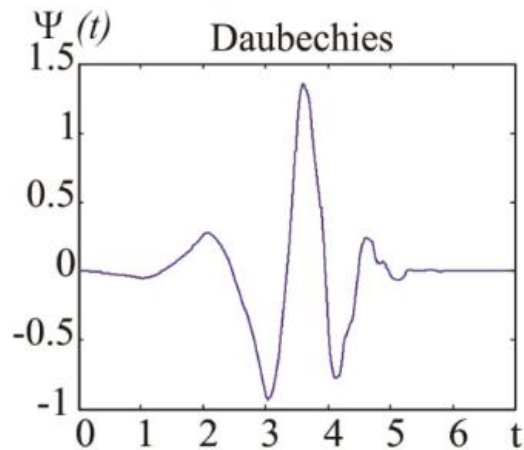


Рис. 2.3.2. Графік вейвлету Добеші

- симлет-вейвлети:

До цієї категорії вейвлетів належать вейвлети Добеші, що мають дуже малу асиметрію та компактного носія. Також, на відміну від вейвлетів Добеші, мають підвищену симетрію.

Вони мають такий вигляд:

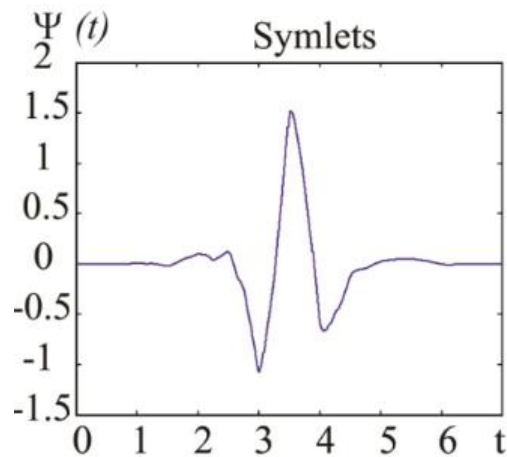


Рис.2.3.4. Графік симлет-вейвлету

Дискретне вейвлет-перетворення зазвичай застосовується при кодуванні сигналів і набув широкого використання у інженерній справі та комп'ютерній інженерії. Даний тип вейвлет-перетворень чудово підходить для компресії зображень<sup>[17][18]</sup>, оскільки зображення можна розглядати як матрицю дискретних елементів, які називаються пікселями. В наступному розділі при проектуванні та розробці компресора зображень буде використане саме дискретне вейвлет-перетворення за участі вейвлету Хаара.

## **2.4. Порівняння вейвлет-перетворень із іншими методами стиснення зображень**

Ще з початку створення та протягом усього розвитку цифрового растрового зображення поставало питання компактнішого розміщення його на носіях інформації(дискети, флеш-накопичувачі, картки пам'яті та ін.) для того, щоб зображення займало менше місця та внаслідок цього можна було зменшити час передачі зображення по мережі. Вирішенням цієї еволюційної проблеми стало винайдення різних алгоритмів стиснення зображень і запровадження відповідних форматів для зберігання стиснених зображень. На сьогодні існує велика кількість найрізноманітніших способів стиснення зображень, які можуть використовуватися для відповідних їм типів зображень.

Існують різні способи порівняння компресії зображень: основними є інформаційний та візуальний. Загалом, при використанні інформаційного методу порівнюються розміри оригінального та стисненого зображень та можна оцінити ступінь компресії використовуючи наступну формулу:

$$k = \frac{S_o}{S_c}, \quad (2.4.1.)$$

де  $S_o$  – розмір вихідних даних,  $S_c$  – розмір стиснених даних

При  $k = 1$  стиснення не відбувається та вихідні дані ідентичні по розміру вхідним даним.

При  $k < 0$  стиснення відбулося і чим показник  $k$  менший, тим краще відбулося стиснення та зменшився розмір зображення.



Рис. 2.4.1. Приклад використання інформаційного методу

Візуальний спосіб порівняння стиснення зображень базується на суб'єктивному сприйнятті людиною зображення та висновку підходить/не підходить для поточної задачі.



Рис. 2.4.2. Приклад використання візуального методу порівнювання

Стиснення із використанням вейвлет-перетворень відноситься до методів стиснення із втратами, тому порівнювати варто також із подібними методами.

Існує велика кількість різноманітних алгоритмів стиснення, які застосовні до різних масивів даних та використовують несхожі підходи до стиснення інформації. Порівняльна таблиця алгоритмів стиснення наведена нижче. Вона представляє собою табличний опис кожного алгоритму та властивості, які до нього відносяться.

<b>Алгоритм</b>	<b>Коефіцієнти стиснення</b>	<b>Симетричність за часом</b>	<b>На що орієнтований</b>	<b>Втрати</b>	<b>Розмірність</b>
<b>RLE</b>	32, 2, 0.5	1	3,4-х бітні	Немає	1D
<b>LZW</b>	1000, 4, 5 / 7	1.2-3	1-8 бітні	Немає	1D
<b>Хаффмана</b>	8, 1.5, 1	1-1.5	8 бітними	Немає	1D
<b>ССІТТ-3</b>	213 (3), 5, 0.25	~ 1	1-бітні	Немає	1D
<b>JBIG</b>	2-30 разів	~ 1	1-бітні	Немає	2D
<b>Lossless JPEG</b>	2 рази	~ 1	24-бітові, сірі	Немає	2D
<b>JPEG</b>	2-20 разів	~ 1	24-бітові, сірі	Є	2D
<b><i>Вейвлет-перетворення</i></b>	2-200 разів	1.5	24-бітові, сірі	Є	2D
<b><i>Фрактальний</i></b>	2-2000 разів	1000-10000	24-бітові, сірі	Є	2.5D

Табл. 2.4.3. Порівняння різних алгоритмів стиснення. Методи із втратами виділені курсивом.

З таблиці вище можна помітити, що метод дискретного вейвлет-перетворення дозволяє стиснути зображення до 200 разів(теоретично) і це набагато кращий показник за популярний метод стиснення растрових зображень – JPEG, при якому стиснення можливе лише до 20 разів. Обидва алгоритми порівнювалися при компресії 24-бітних зображень, тобто звичайних кольорових зображень у колірній моделі RGB, де кожна з трьох базових компонент займає 8 біт(значення від 0 до 255).

До переваг компресії зображень із використанням вейвлет-перетворень порівняно із іншими методами можна віднести наступне:

- можливість реалізувати поступове «проявлення» при передачі зображенні в мережі(локальній або Інтернет);
- дозволяє краще стиснути зображення без втрат якості з використанням більших коефіцієнтів стиснення(зображення однакового розміру матимуть кращу якість саме при методі ДВП);
- немає яскраво вираженого мозаїчного ефекту, що присутнє при стисненні з використанням JPEG;
- зображення характеризується вищою деталізацією, більшою контрастністю та меншою зашумленістю(при тестуванні із різними вейвлетми показними трохи відрізнялися);
- великий вибір базових вейвлетів для стиснення та додаткових параметрів, та унаслідок цього можна вибрати підходящий вейвлет для компресії;

## РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА ПРОГРАМИ ДЛЯ ПОРІВНЯННЯ СТАНДАРТНОГО JPEG- ТА ВЕЙВЛЕТ-КОДЕКА

### 3.1. Проектування програми

Суттю роботи програми є порівняння двох алгоритмів стиснення зображень: дискретного косинусного перетворення, що використовується у форматі стандартного JPEG, та вейвлет-перетворення(на прикладі вейвлету Хаара), що застосовується у форматі зображення JPEG2000<sup>[19]</sup>.

Створений програмний продукт має виконувати такі завдання:

1. дозволяти завантаження будь-якого чорно-білого зображення у нестисненому форматі(.png, .bmp, .raw чи будь-якого іншого);
2. ефективно виконувати стиснення обома способами;
3. бути стійким до помилок та збоїв при обчислювальній роботі та взаємодії користувача з програмою;
4. виводити необхідну інформацію про зображення(розширення, розмір у байтах, ступінь стиснення);
5. дозволяти завантаження стиснених зображень як файлів на комп'ютер користувача.

Для створення комп'ютерної програми було вибрано високорівневу мову програмування з динамічною типізацією – Python. Ця мова широко відома також завдяки простоті використання та дозволяє використовувати велику кількість різноманітних наукових бібліотек для математичних обчислень, виводу діаграм, графіків та ін. При створенні програми вони також використовуватимуться – NumPy, PyWavelets, Matplotlib, CV2 та деякі інші.



Для створення графічного інтерфейсу користувача використовуватиметься надбудова для інструментарію Qt, але для мови Python – PyQt5(цифрою позначається версія бібліотеки). Дана надбудова дозволяє з легкістю створити користувацький інтерфейс програми з використанням технології Drag&Drop – розмістити кнопки для обробки певних подій, помістити поля для вводу даних, для виводу у них зображень, також розмістити написи, що допоможуть користувачеві взаємодіяти з програмою. В подальшому до цих кнопок та полів прив'язуватимуться функції для роботи із зображеннями.

Основний процес написання коду відбувався у середовищі програмування Spyder IDE. Дана програма дозволяє значно спростити написання коду, оскільки містить зручний та необхідний функціонал – підсвічування синтаксису, автодоповнення, можливість відображати графіки та діаграми у вікні програми та інтуїтивно зрозумілий інтерфейс.



Рис. 3.1.1. Використовувані засоби розробки програми

### 3.2. Опис алгоритмів

Для роботи із зображеннями у цій програмі використовуватиметься два різних алгоритми стиснення із несхожими підходами до зменшення розміру.

Дискретним косинусним перетворенням(ДКП, від англ. – *Discrete cosine transform*) називається метод, який використовується для визначення надмірності в інформації та зменшення розміру даних на основі частотного аналізу при якому усувається надмірні дані. Відноситься до ортогональних перетворень та сильно пов'язаний із дискретним перетворенням Фур'є<sup>[20]</sup>. Є значна кількість різних варіацій цього способу перетворення інформації:

- DCT-I

Є базовим випадком ДКП і по своїй природі точно еквівалентний до дискретного перетворення Фур'є  $2N-2$  дійсних чисел із властивістю рівномірної симетрії.

- DCT-II

Найбільш поширена версія дискретного косинусного перетворення через свою особливість, яка дозволяє «ущільнювати енергію». Якраз вона і використовується при стисненні зображень під час роботи над блоками матриці  $8 \times 8$ . Часто саме цю реалізацію алгоритму мають на увазі під назвою DCT(ДКП).

- DCT-III

Використовується у тій же обробці зображень і має іншу назву – зворотне дискретне косинусне перетворення (ЗДКП, або англ. Inverse discrete cosine transform, IDCT).

- DCT-IV

Має цікаву властивість: при множенні на загальний коефіцієнт  $\sqrt{2/N}$  стає ортогональною, а отже набуває симетрії та стає оберненою сама собі.

- та інші.

Алгоритм стискання зображення на основі методу DCT-II такий:

1. зображення розкладається на шари колірного сімейства  $YCbCr$  ( $Y$  – компонента яскравості,  $C_b$  – синя компонента,  $C_r$  – червона компонента даного колірного простору);
2. перетворене зображення фрагментується на блоки пікселів розміром  $8 \times 8$  (квадратні матриці 8 порядку) і поміщається у окремий масив;
3. до кожного фрагменту застосовується дискретне косинусне перетворення, яке можна описати формулою:

$$F(u, v) = \frac{1}{4} C(u) C(v) \sum_{i=0}^7 \sum_{j=0}^7 f(i, j) \cos((2i+1)u\pi/16) \cos((2j+1)v\pi/16)$$

де  $u, v$  – індекси елементів матриці.

(3.2.1.)

4. відбувається квантування з використанням однієї із матриць квантування;
5. застосовується кодування(зворотнє дискретне косинусне перетворення, DCT-III);
6. формується зображення, яке після усіх математичних операцій займатиме менше місця на дисковому просторі.

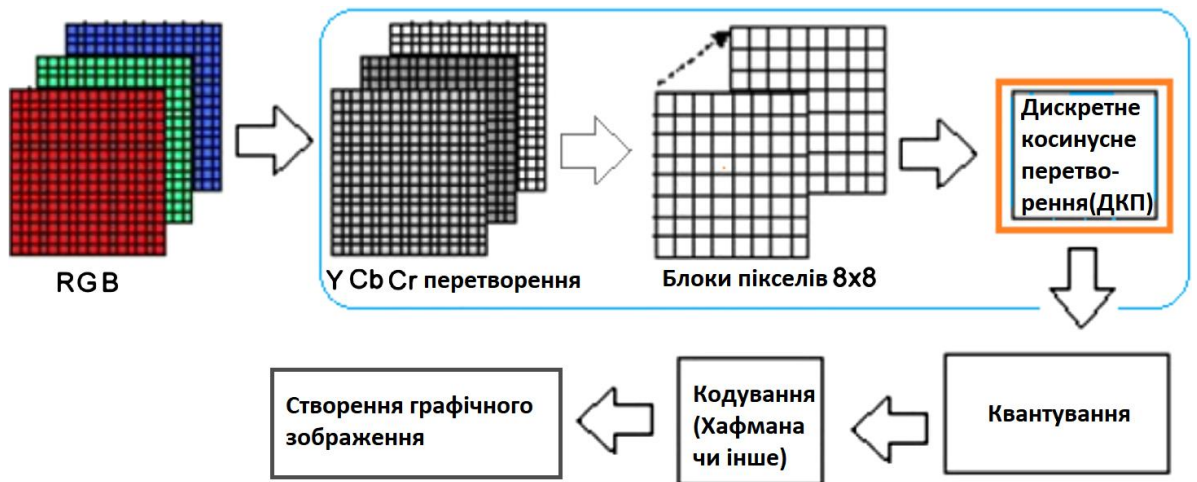


Рис. 3.1.1. Схема роботи алгоритму дискретного косинусного перетворення при обробці зображення

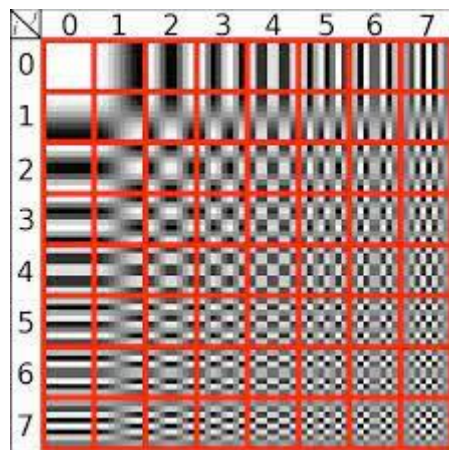


Рис. 3.1.2. Приклад двовимірного дискретного перетворення(матриця 8x8) із алгоритму JPEG

При використанні алгоритму ДКП було використано зображення у відтінках сірого для полегшення обчислювального процесу: це зменшує процес обчислень,

оскільки замість трьох значень, що використовуються у моделі RGB, наприклад (148, 155, 255), доведеться проводити обчислення лише із одним, що відповідає градаціям сірого (так само – від 0 до 255).

Ступінь стиснення зображення при використанні методу ДКП може бути різною та залежить від матриці квантування. Квантування дозволяє зменшити розмір даних завдяки стисненню діапазону значень до одного квантового значення. Як приклад можна навести зменшення кількості кольорів у стисненому зображенні та як наслідок – зменшення розміру зображення. В розробленій програмі використовувалася така матриця квантування:

80	60	50	80	120	200	255	255
55	60	70	95	130	255	255	255
70	65	80	120	200	255	255	255
70	85	110	145	255	255	255	255
90	110	185	255	255	255	255	255
120	175	255	255	255	255	255	255
245	255	255	255	255	255	255	255
255	255	255	255	255	255	255	255

Табл. 3.2.3. Матриця квантування(Q10) для стиснення ДКП

Під час компресії зображень з використанням вейвлету Хаара використовувалося двовимірне вейвлет-перетворення, що можна описати такою формулою:

$$S = H * I * H^T \quad (3.2.2.)$$

$S$  – вейвлет-спектр, який у подальшому буде рекурсивно зменшений до зникання.

$I$  – матриця оригінального зображення розмірності  $2^n \times 2^n$ ;

$H$  і  $H^T$  – нормалізована матриця Хаара і транспонована копія.

Матриця Хаара 2-го порядку має вигляд:

$$K_1 = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix}$$

Щоб визначити матриці наступних порядків, треба застосувати формулу<sup>[21]</sup>:

$$K_{k+1} = \begin{pmatrix} K_k \otimes \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix} \\ 2^{k/2} I_{2^k} \otimes \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix} \end{pmatrix} \quad (3.2.3.)$$

Символом  $\otimes$  позначається добуток Кронекера – наслідок складнішого множення матриць

$$A \otimes B = \begin{bmatrix} a_{11}B & \dots & a_{1n}B \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1}B & \dots & a_{mn}B \end{bmatrix}$$

Відповідно до правила вище, матриця Хаара 4-го порядку матиме такий вигляд:

$$H_4 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \end{bmatrix},$$

Матриці вищих порядків обраховуються за таким самим алгоритмом.

При вейвлет-перетворенні використовуються не звичайні матриці, а нормалізовані<sup>[22]</sup>. Як відомо, обернена ортонормована матриця дорівнює транспонованій. Така математична хитрість суттєво знижує витрату обчислювальних ресурсів при обрахунку значень.

Ортонормована матриця Хаара 4-го порядку матиме такі елементи:

$$\mathbf{H}_4 = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 \\ \sqrt{2} & -\sqrt{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sqrt{2} & -\sqrt{2} \end{bmatrix}$$

Перед загальним алгоритмом компресії кольорове зображення перетворюється на зображення у відтінках сірого для зменшення перетворень та обчислень у програмі. У даній роботі не розглядається стиснення кольорових зображень з метою спрощення наочних результатів та економії ресурсів. Кожен піксель монохромного зображення можна представити всього одним байтом(від 0 до 255), у той час як піксель кольорового зображення займає утричі більше місця(містить червону, зелену та синю компоненти, де кожна описується також одним байтом). Для поставленої мети дипломної роботи цього буде досить.

Алгоритм компресії зображення методом вейвлет-перетворення наведений нижче<sup>[23]</sup>.

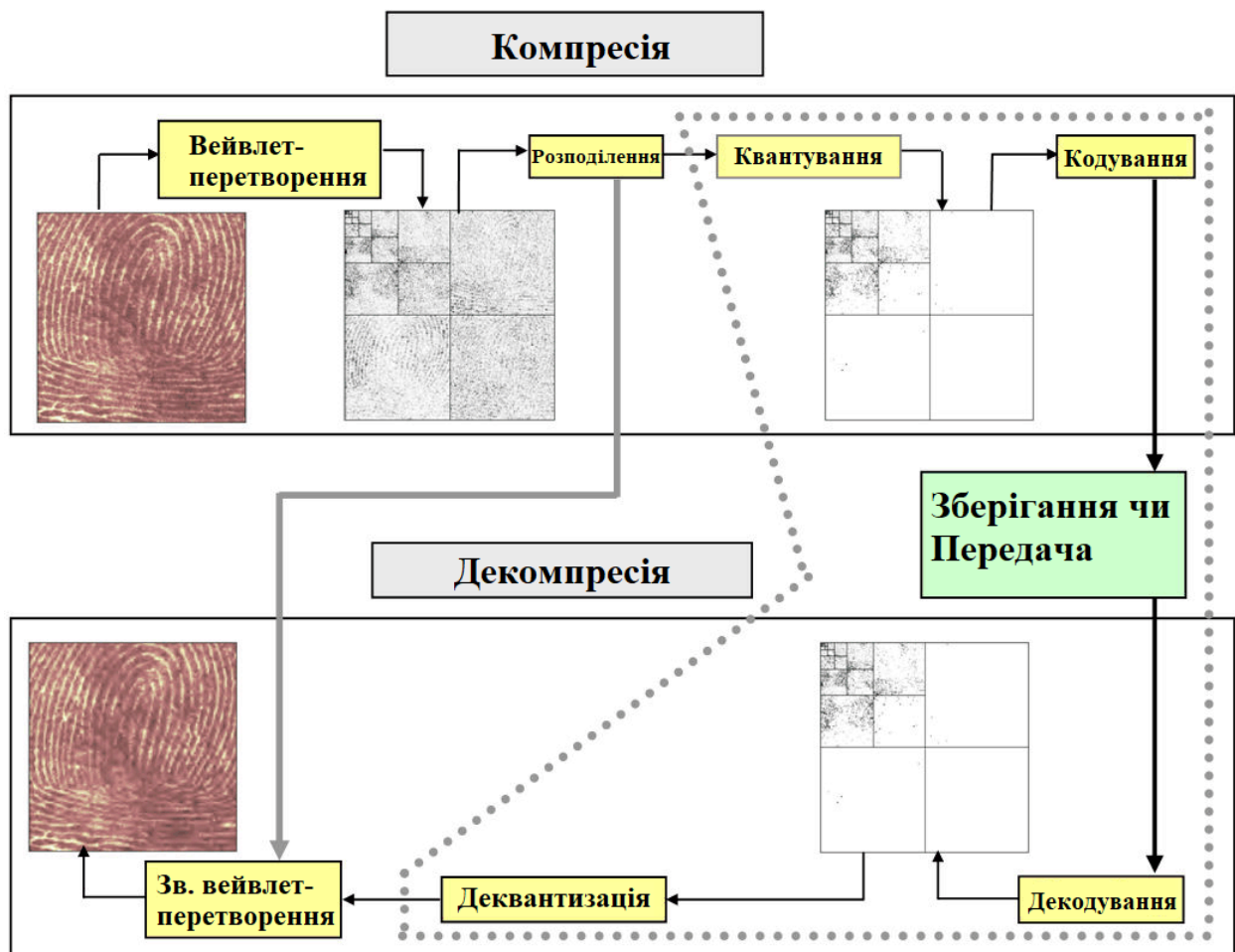


Рис. 3.2.4. Алгоритм роботи з зображенням з використанням вейвлет-перетворень

Зображення утворене методом ДВП базується<sup>[24]</sup> на апроксимованих деталях зображення(LL), горизонтальних деталях(HL), вертикальних деталях(LH) і діагональних деталях(HH). Спочатку розраховуються основні параметри, а кожні наступні – розраховуються рекурсивно.

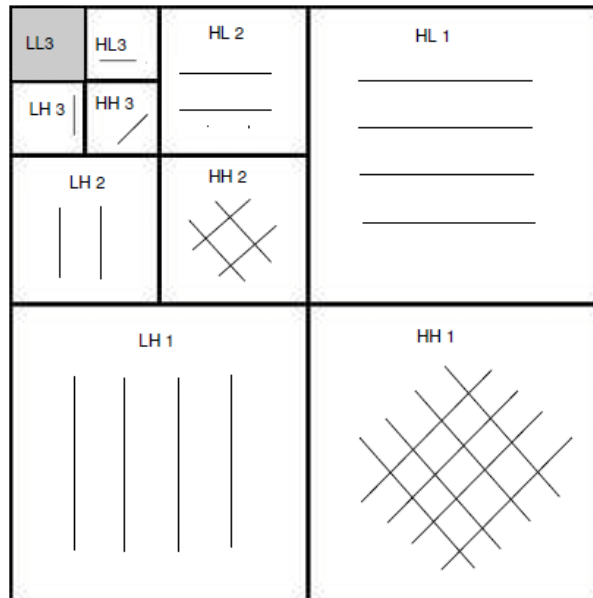


Рис. 3.2.5. Схема розкладу зображення на компоненти та їх вид разом

Приклад розрахунку компонентів до тестового зображення наведений нижче з підписами компонент. Крім дослідження вейвлету Хаара при розподілі зображення, було для прикладу використано ще вейвлет Добеші 2.

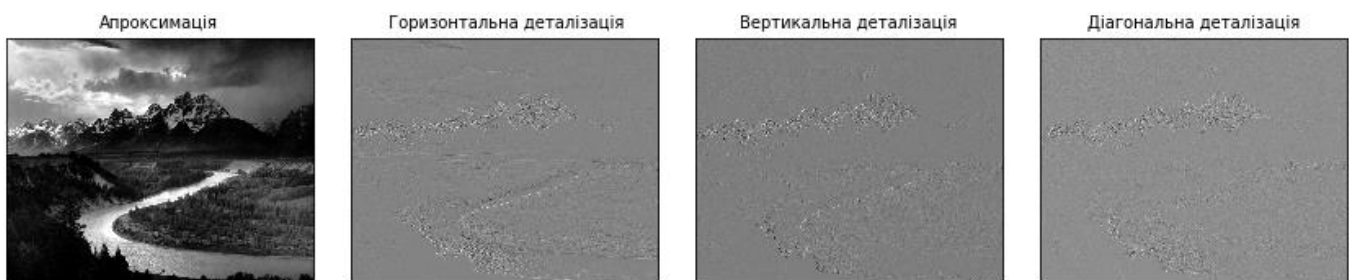


Рис.3.2.6. Вейвлет-перетворення з використанням вейвлету Хаара

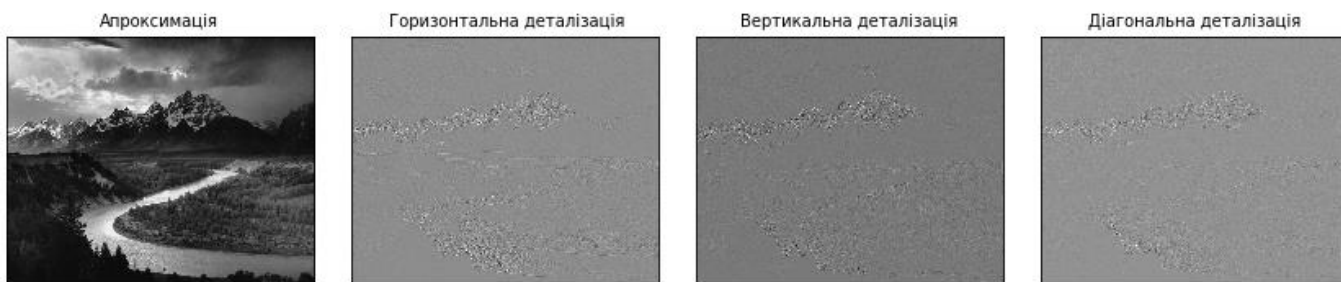


Рис. 3.2.7. Вейвлет-перетворення з використанням вейвлету Добеші 2(db2)

Вищенаведений приклад ілюструє перевагу використання вейвлету Хаара при роботі із зображеннями – зображення виходить насиченішим та контрастнішим, ніж при використанні інших вейвлетів у основі. Це можна явно побачити при детальному розгляді горизонтальної та вертикальної деталізації – зображення річки там виглядає чіткішим, та і кращий контраст, який відповідає оригінальному зображенню.

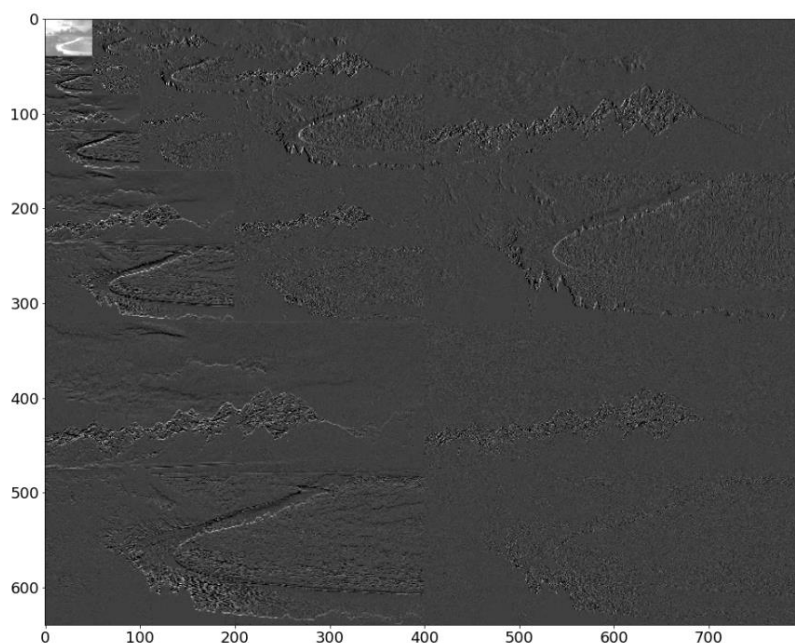


Рис. 3.2.8. Розкладання зображення на компоненти рекурсивно з використанням вейвлету Хаара



### 3.3. Тестування роботи

Розробка програми завершена і вона працює так, як і було задумано – застосунок дозволяє завантажити зображення у градаціях сірого, стиснути його двома методами, переглянути інформацію про стиснені зображення та завантажити їх для детального вивчення. Нижче подані результати роботи програми на різних прикладах та порівняння стиснутих зображень та оригінального.



Рис. 3.3.1. Однотонне зображення, яке буде підданно компресії

Після стиснення цього зображення обома методами було виявлено, що в повному розмірі вони майже ідентичні оригінальному, якщо не враховувати той факт, що зображення стиснене методом дискретного косинусного перетворення має меншу контрастність при порівнянні з іншими. Проте під час збільшення стиснутих зображень стали зрозумілими переваги методу вейвлет-перетворення.

Нижче наведена серія фрагментів зображень – оригінальне зображення в нестисненому вигляді(рис. а), стиснене зображення з використанням дискретного косинусного перетворення(рис. б) та стиснене зображення з використанням вейвлет-перетворення, що базується на вейвлеті Хаара(рис. в). Можна явно побачити

переваги ДВП-стиснення: зображення має значно менший розмір у порівнянні з оригінальним (стиснення на ~64%) та ДКП (краще стиснення на ~34%) та краща якість зображення – можна дуже добре розгледіти силует людини та двері, також порахувати шибки у вікні.

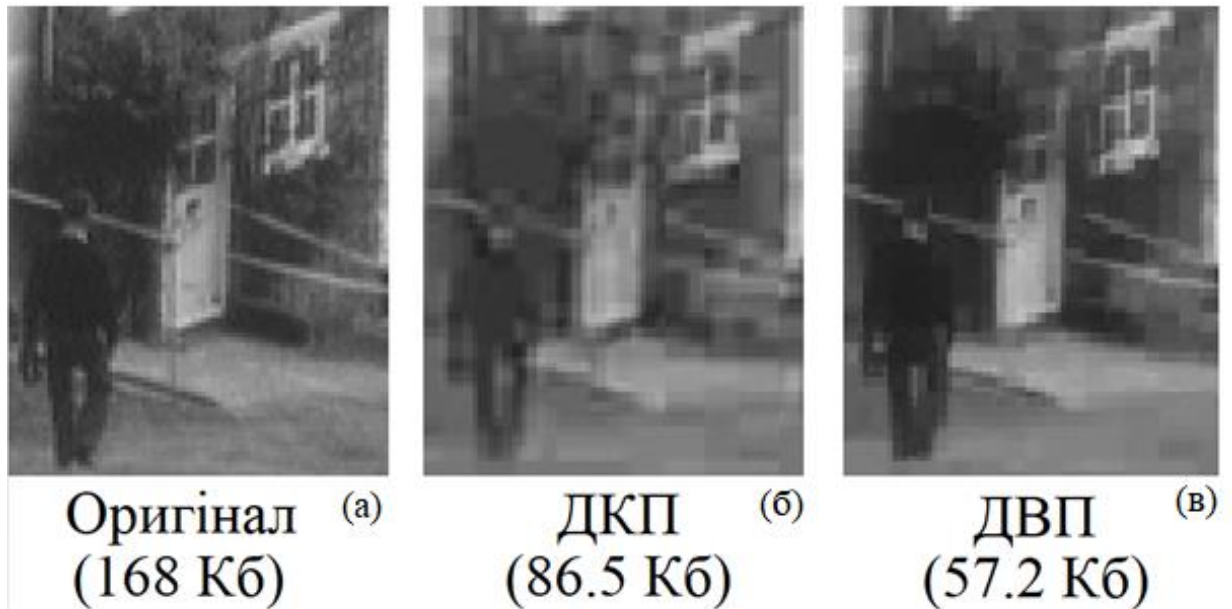


Рис. 3.3.2. Порівняння якості фрагменту зображень та їх загального розміру

При детальному та наближеному вивченні зображення можна помітити, що ступінь деталізації у зображенні JPEG помітно гірша. На першому малюнку нижче можна помітити, що зникли перегородки між вікнами, хоча при вивченні цього ж зображення, але стисненого методом ДВП, стає помітним, що там ця деталь збереглася і досить добре, та навіть можна порахувати кількість шибок у вікні.

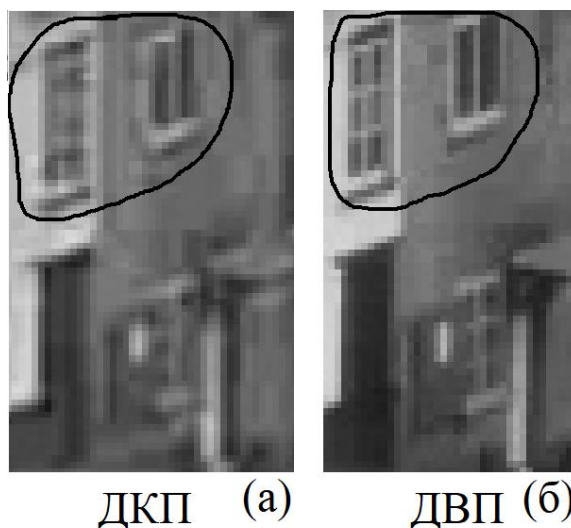


Рис. 3.3.3. Порівняння деталізації стиснутих зображень. Метод дискретного косинусного перетворення(рис. а) та вейвлет-перетворення(мал. б)

Наступним прикладом для перевірки компресора стане однотонне зображення павіана розміром 512 x 512 пікселів.

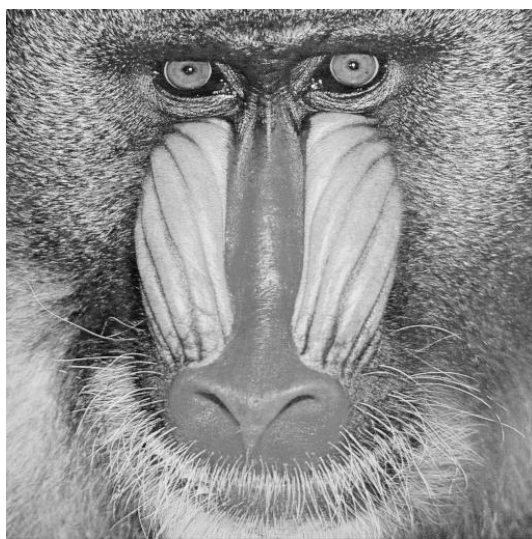


Рис. 3.3.4. Однотонне зображення голови павіана, яке буде підданно компресії

При дослідженні цього зображення також була помічена характерна ознака ДКП – стиснуте зображення має меншу контрастність, ніж оригінальне та стиснене методом ДВП. Загалом, результати компресії схожі – дискретне вейвлет-перетворення з використанням вейвлету Хаара вирізняється кращим стисненням та

більшою деталізацією зображення, додатково до цього має менший розмір за зображення з використанням ДКП.

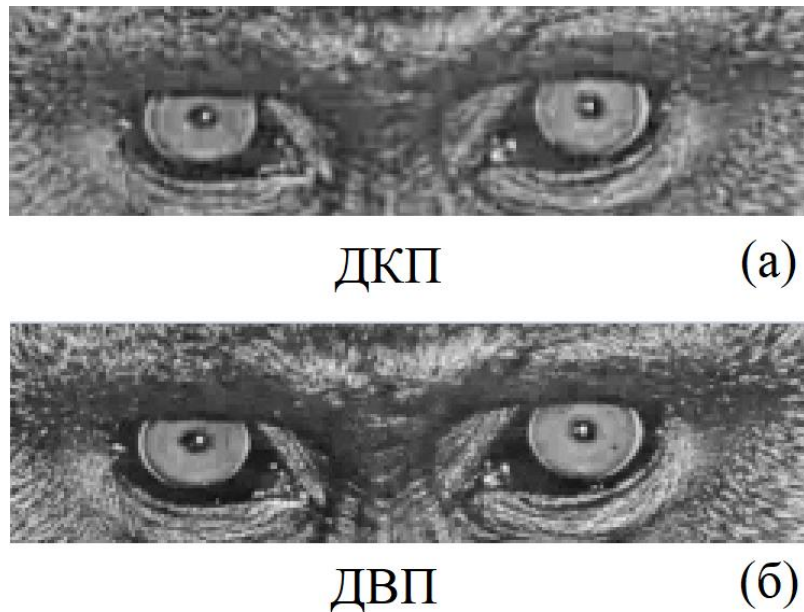


Рис. 3.3.5. Порівняння деталізації очей примата при різних методах стиснення

	<b>Оригінальне зображення</b>	<b>Стиснене у формат JPEG</b>	<b>Стиснене у формат JPEG2000</b>
<b>Розмір</b>	233 Кб	114.3 Кб	73.4 Кб
<b>Стиснення</b>	–	~51%	~69%

Табл. 3.3.6. Порівняння розмірів файлу

З рисунка вище видно, що на збільшеному фрагменті морди примата, рогівка ока та перетинка між очима(із зморшками) на зображенні JPEG уже в яскраво виражених мозаїчних фрагментах та менш чітка, ніж такий самий фрагмент, але у форматі JPEG2000 з використанням методу вейвлет-перетворення.

Результати проведених досліджень однозначно вказують на перевагу використання методу дискретного вейвлет-перетворення з використанням вейвлету Хаара<sup>[25]</sup> при стисненні зображень. Графічний файл стиснений таким чином вирізняється кращою деталізацією до дрібних об'єктів, більшим ступенем стиснення у порівнянні з методом JPEG(стиснення краще на 30-40%) та контрастом.

### 3.4. Дослідження ефективності та швидкодії роботи

При детальному дослідженні ефективності програми не було виявлено жодних недоліків чи програмних багів. Усе працює як і було заплановано, при цьому користувач ніяк не може викликати аварійне завершення роботи програми чи пропустити якийсь етап роботи через продумані способи взаємодії користувача з програмою: якщо до якогось етапу програма ще не дійшла (наприклад, зображення ще не стиснені), то кнопка «Завантажити зображення» не буде активною і т. д.

Програма була створена для роботи в однопоточковому режимі та працює відносно швидко. Під час роботи компресора не було помічено надмірної роботи центрального процесора чи оперативної пам'яті. Графічні файли стискаються ефективно та без помилок.

Щоправда, було помічено, що стиснення методом дискретного вейвлет-перетворення забирає трохи більше часу, ніж стиснення з використанням дискретного косинусного перетворення. Це пов'язано з тим, що перший алгоритм складніший у реалізації та має більші вимоги до пам'яті – це стало однією з причин, чому метод стиснення ДВП так і не набув широкого використання у повсякденному житті<sup>[24]</sup>.

Програмний продукт дозволяє виконувати усі спроектовані завдання:

1. завантаження будь-якого чорно-білого зображення у нестисненому форматі (.png, .bmp, .raw чи будь-якого іншого);
2. ефективне стиснення обома способами;
3. стійкість до помилок та збоїв при обчислювальній роботі та взаємодії користувача з програмою;
4. виведення необхідної інформації про зображення (розширення, розмір у байтах, ступінь стиснення);
5. завантаження стиснених зображень як файлів на комп'ютер користувача.

## ВИСНОВОК

Під час виконання даної дипломної роботи було розглянуто поняття цифрового зображення та класифікацію зображень, досліджено плюси та мінуси кожного з них та доречність компресії зображень того чи іншого типу. Було наведено загальний алгоритм компресії та розказано про два можливі випадки стиснення – із втратами та без втрат. Також при роботі над дипломною роботою було наведено сучасні алгоритми стиснення з цих двох категорій з детальним описом та додано інформацію про сучасні алгоритми стиснення з інформацією про галузь їх використання. Деякі аспекти теорії було проілюстровано відповідними зображеннями. Дана теоретична основа, в якій описано загальні поняття та підходи до компресії інформації, допоможе в подальшому розробити спеціальний програмний продукт для стиснення зображень із використанням вейвлет-перетворення.

Далі було повідано про вейвлети та їх перетворення – наведено поширені випадки та галузі використання вейвлетів, а також різні їх види із прикладами тих самих вейвлетів. Після проведення досліджень дискретних вейвлет-перетворень було вирішено вибрати перетворення Хаара для застосування алгоритму у програмі для стиснення зображень. Також було наведено порівняльну таблицю із описом різних методів стиснення зображень та окремо виділено переваги стиснення методом вейвлет-перетворень у порівнянні з іншими алгоритмами компресії.

Наприкінці роботи було описано необхідні теоретичні моменти певних алгоритмів стиснення, що стали при нагоді у проектуванні програми для компресії зображень. Було спроектовано програму, яка дозволяє завантажувати у неї графічне зображення, стискати його методом дискретного косинусного перетворення(JPEG) та вейвлет-перетворення на прикладі вейвлету Хаара(JPEG2000). Також можна бачити розмір оригінального зображення, розміри стиснутих зображень, ступінь стиснення у відсотках та за необхідності є можливість завантажити зображення меншого розміру для більш детального порівняння. У цьому розділі додатково було проведено тестування програми – наочно порівнювалися результати роботи з

різними зображенням(по деталізації, колірній гамі, різним зображеним об'єктам). Було надано увазі моменти швидкодії та стабільності програми і перевірено стійкість до збоїв при усіх можливих станах.

Результатом виконання даної дипломної роботи став програмний продукт, що дозволяє порівняти стиснення зображень двома методами – за допомогою дискретного косинусного перетворення та з використанням вейвлет-перетворення Хаара. Було теоретично та практично доведено доречність використання саме другого методу для зменшення розміру зображень.

Підсумовуючи, можна додати, що використання різних видів ортогональних перетворень(включно з вейвлет-перетвореннями на базі вейвлетів Хаара) для зменшення розміру графічних файлів має неабиякі можливості при задіянні у сфері спеціальних комп'ютерних інформаційних технологій, які пов'язані з зберіганням та передачею великих масивів інформації та необхідністю використання алгоритмів компресії зображень. До областей застосування можна навести пропускні та охоронні системи(камери з розпізнаванням облич, збереження записаних даних на носії), автомобільні відеореєстратори(передні та задні камери), системи відеофіксації порушень на дорогах та багато інших галузей.