

Вінницький національний технічний університет  
Факультет інтелектуальних інформаційних технологій та автоматизації  
Кафедра автоматизації та інтелектуальних інформаційних технологій

## МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему:

**«Розробка модуля стиснення цифрових зображень для системи автоматизації відділу відеоспостереження та безпеки підприємства»**

Виконав: студент 2 курсу, групи 1АКІТР-24м спеціальності 174 – Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та роботехніка

(шифр і назва спеціальності)

Володимир НОСЕНКО

(ПІБ студента)

Керівник: к.т.н., доцент кафедри АІТ

Володимир ГАРМАШ

(науковий ступінь, вчене звання / посада, ПІБ керівника)

« 12 » грудня 2025 р.

Опонент: д.т.н., проф. каф. КСУ

Марія ЮХИМЧУК

(науковий ступінь, вчене звання / посада, ПІБ опонента)

« 12 » грудня 2025 р.

Допущено до захисту

Завідувач кафедри АІТ

д.т.н., проф. Олег Бісікало

(науковий ступінь, вчене звання)

« 12 » грудня 2025 р.

Вінниця ВНТУ – 2025 рік

Вінницький національний технічний університет  
Факультет інтелектуальних інформаційних технологій та автоматизації  
Кафедра автоматизації та інтелектуальних інформаційних технологій  
Рівень вищої освіти II-ий (магістерський)  
Галузь знань – 17 – Електроніка, автоматизація та електронні комунікації  
Спеціальність – 174 - Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка  
Освітньо-професійна програма – Інтелектуальні комп'ютерні системи

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри АІТ

д.т.н., проф. Олег БІСІКАЛО

«26» вересня 2025 р.

### **ЗАВДАННЯ**

#### **НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

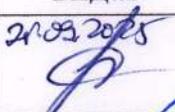
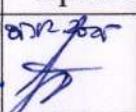
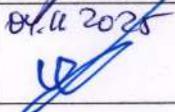
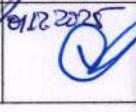
Носенко Володимир Валерійовичу

(ПІБ автора повністю)

1. Тема роботи: Розробка модуля стиснення цифрових зображень для системи автоматизації відділу відеоспостереження та безпеки підприємства.  
Керівник роботи: к.т.н., доцент зкаф. АІТ Гармаш В. В.  
Затвердженні наказом ВНТУ від «24» вересня 2025 року № 313.
2. Строк подання роботи студентом: до «12» грудня 2025 року.
3. Вихідні дані до роботи: півтонові та кольорові; мінімальна роздільна здатність зображення 128 x 128 пікселів, максимальна роздільна здатність 2048 x 2048 пікселів; коефіцієнт стиснення 2 – 50. Виграш у стисненні від 0,5% до 15% у порівнянні з класичним алгоритмом.
4. Зміст текстової частини: Вступ; Аналіз сучасних методів стиснення зображень; Застосування вейвлет-перетворень для стиснення зображень; Розробка модуля стиснення цифрових зображень для системи автоматизації відділу відеоспостереження та безпеки підприємства; Економічний розділ; Висновки; Список використаних джерел.
5. Перелік ілюстративного (або графічного) матеріалу: Кодування зображення.

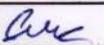
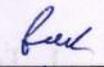
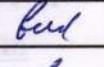
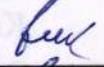
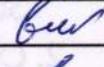
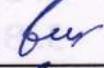
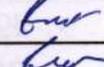
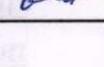
Схема програми; Декодування зображення. Схема програми; Структура роботи підсистеми відеоспостереження з модулем стиснення зображення  
Діаграма класів процесу стиснення; Діаграма варіантів використання стиснення цифрового зображення; Результати експериментального дослідження.

#### 6. Консультанти розділів роботи

Розділ змістової частини роботи	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1 – 3	Володимир ГАРМАШ, к.т.н., доцент кафедри АІТ	 21.09.2025	 01.12.2025
4	Володимир КОЗЛОВСЬКИЙ, к.е.н., проф. каф. ЕПВМ	 01.11.2025	 01.12.2025

7. Дата видачі завдання: «25» вересня 2025 року.

#### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітки
1	Аналіз предметної області	25.09–05.10.2025	
2	Розробка математичного та алгоритмічного забезпечення	05.10 – 25.10.2025	
3	Розробка програмного забезпечення	25.10 – 10.11.2025	
4	Тестування розробленого програмного забезпечення	05.11 – 20.11.2025	
5	Підготовка економічної частини	до 01.12.2025	
6	Оформлення пояснювальної записки, графічного матеріалу і презентації	20.11 – 03.12.2025	
7	Попередній захист роботи	до 03.12.2025	
8	Захист роботи	до 19.12.2025	

Студент



(підпис)

Володимир НОСЕНКО

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи



(підпис)

Володимир ГАРМАШ

(прізвище та ініціали)

## АНОТАЦІЯ

УДК 004.93

Носенко В. В. Розробка модуля стиснення цифрових зображень для системи автоматизації відділу відеоспостереження та безпеки підприємства. Магістерська кваліфікаційна робота зі спеціальності 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка», освітня програма – Інтелектуальні комп'ютерні системи. Вінниця: ВНТУ, 2025. 114 с.

На укр. мові. Бібліогр.: 34 назва; рис.: 19; табл. 12.

У магістерській кваліфікаційній роботі розроблено модуль стиснення цифрових зображень для системи автоматизації відділу відеоспостереження та безпеки підприємства. В оглядово-аналітичній частині розглянуто сучасні методи стиснення цифрових зображень, зокремо особливості їхнього застосування в автоматизованих системах відеоспостереження, та обґрунтовано доцільність використання методу на основі вейвлет-перетворень. У теоретичній частині запропоновано метод стиснення, який враховує якісні характеристики зображень, та розроблено відповідний програмний модуль. У практичній частині описано вибір інструментальних засобів реалізації, розроблено та протестовано програмне забезпечення для модуля стиснення. Економічна частина містить оцінку доцільності впровадження, аналіз технічного рівня, а також розрахунок витрат на розробку та інтеграцію модуля у систему автоматизації. Ілюстративна частина представлена матеріалами, що відображають основні етапи реалізації розробки.

Ключові слова: автоматизована система, обробка зображень, відеоспостереження, відділ безпеки, модуль стиснення, вейвлет-перетворення, програма.

## ABSTRACT

Nosenko V. V. Development of a digital image compression module for the automation system of the video surveillance and security department of the enterprise. Master's qualification work in specialty 174 "Automation, computer-integrated technologies and robotics", educational program - Intelligent computer systems. Vinnytsia: VNTU, 2025. 114 p.

In Ukrainian. Bibliography: 34 titles; fig.: 19; tab. 12.

In the master's qualification work, a digital image compression module for the automation system of the video surveillance and security department of the enterprise is developed. The review and analytical part considers modern methods of digital image compression, in particular the features of their application in automated video surveillance systems, and justifies the feasibility of using a method based on wavelet transforms. The theoretical part proposes a compression method that takes into account the qualitative characteristics of images, and develops a corresponding software module. The practical part describes the choice of implementation tools, develops and tests software for the compression module. The economic part contains an assessment of the feasibility of implementation, an analysis of the technical level, as well as a calculation of the costs of developing and integrating the module into the automation system. The illustrative part is presented with materials reflecting the main stages of development implementation.

Keywords: automated system, image processing, video surveillance, security department, compression module, wavelet transform, program.

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	4
<b>1 АНАЛІЗ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ СТИСНЕННЯ ЗОБРАЖЕНЬ.....</b>	<b>7</b>
1.1. Опис об'єкта автоматизації та загальна характеристика задачі .....	7
1.2. Представлення цифрових зображень .....	10
1.3. Класифікація методів стиснення. Основні характеристики.....	13
1.4. Алгоритми стиснення зображень без втрат.....	17
1.4.1 Стиснення способом кодування серій (RLE) .....	17
1.4.2 Стиснення за методом Хаффмана .....	19
1.5 Алгоритми стиснення з втратами .....	21
1.5.1 Стиснення за стандартом JPEG .....	21
1.5.2 Фрактальне стиснення зображень .....	25
1.6 Вибір і обґрунтування аналогу .....	26
1.7. Висновки до розділу 1.....	29
<b>2. ЗАСТОСУВАННЯ ВЕЙВЛЕТ-ПЕРЕТВОРЕНЬ ДЛЯ СТИСНЕННЯ</b>	
<b>ЗОБРАЖЕНЬ .....</b>	<b>30</b>
2.1 Базовий вейвлет-кодер зображення .....	32
2.2 Вибір вейвлетів для стиснення зображення .....	34
2.3 Квантування .....	38
2.4 Розподіл біт .....	40
2.5 Кодування за допомогою нулядерев .....	42
2.6 Алгоритм Люїса і Ноулеса .....	44
2.7 Алгоритми Шапіро і Саїда-Перельмана .....	46
2.8 Оптимізація нулядерев по критерію швидкість-спотворення .....	49
2.9 Сучасні напрями досліджень .....	51
2.10 Дискретне вейвлет-перетворення .....	54
2.11 Висновки до розділу .....	56

3. РОЗРОБКА МОДУЛЯ СТИСНЕННЯ ЦИФРОВИХ ЗОБРАЖЕНЬ ДЛЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ ВІДДІЛУ ВІДЕОСПОСТЕРЕЖЕННЯ ТА БЕЗПЕКИ ПІДПРИЄМСТВА .....	59
3.1 Обґрунтування вибору мови програмування .....	59
3.2 Алгоритм стиснення зображень на базі вейвлет-перетворення .....	61
3.3 Експериментальні дослідження .....	69
3.4 Висновки до розділу .....	73
4. ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА .....	74
4.1 Технологічний аудит розробленого модуля стиснення цифрових зображень для системи автоматизації відділу відеоспостереження та безпеки підприємства (далі – розробленого модуля) .....	74
4.2 Розрахунок витрат на розроблення модуля стиснення цифрових зображень для системи автоматизації .....	78
4.3 Розрахунок економічного ефекту від можливої комерціалізації розробленого модуля стиснення цифрових зображень .....	86
4.4 Висновки до розділу .....	92
ВИСНОВКИ .....	93
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....	95
ДОДАТКИ .....	99
Додаток А (обов’язковий). Технічне завдання .....	100
Додаток Б (обов’язковий). Ілюстративна частина .....	105
Додаток В (обов’язковий). Лістинг модуля програми .....	112
Додаток Г (обов’язковий). Протокол перевірки кваліфікаційної роботи .....	114

## ВСТУП

У сучасних умовах швидкість завантаження вебсайтів стала одним із ключових факторів, що впливають на поведінку користувачів і рівень їхньої лояльності. Згідно з численними дослідженнями, навіть затримка в 1–2 секунди суттєво підвищує ймовірність того, що відвідувач залишить сторінку. При цьому саме зображення зазвичай займають 60–80 % від загального обсягу даних, що передаються браузеру.

Особливо гостро проблема стоїть для користувачів мобільних пристроїв, які становлять сьогодні понад 60 % світового інтернет-трафіку. Мобільні мережі, попри розвиток 4G/5G, у багатьох регіонах досі мають обмежену пропускну здатність і високу вартість трафіку. Тому оптимізація розміру графічного контенту при збереженні прийнятної візуальної якості є необхідною умовою конкурентоспроможності будь-якого вебресурсу.

Широке впровадження цифрових зображень спостерігається не лише в інтернет-проектах, а й у багатьох інших галузях: системах відеоспостереження та безпеки, медичній діагностиці, промисловій автоматизації, дистанційному зондуванні Землі, архівуванні документів тощо. Зростання роздільної здатності сенсорів (від Full HD до 8K і вище) та кількості камер у системах безпеки призводить до експоненційного збільшення обсягів даних. Без ефективного стиснення це створює надмірне навантаження на канали зв'язку, системи зберігання та обчислювальні ресурси.

Таким чином, розробка та впровадження сучасних методів стиснення зображень залишається надзвичайно актуальним завданням, що дає змогу:

- суттєво зменшити обсяги трафіку та вимоги до сховищ;
- скоротити час передачі та обробки даних;
- знизити експлуатаційні витрати;
- забезпечити комфортну роботу користувачів навіть за умов обмеженої пропускну здатності мережі.

Саме тому створення високоефективного модуля стиснення цифрових зображень для системи автоматизації відділу відеоспостереження та безпеки підприємства має важливе науково-практичне значення і повністю відповідає сучасним тенденціям розвитку інформаційних технологій.

**Об'єктом дослідження** даної бакалаврської роботи є процес стиснення цифрових зображень у системі автоматизації відділу відеоспостереження та безпеки підприємства.

**Предметом дослідження** даної бакалаврської роботи є модифікований алгоритм вейвлет-перетворення для стиснення цифрових зображень у системі автоматизації відділу відеоспостереження та безпеки підприємства.

**Метою** даної роботи є розробка модуля стиснення цифрових зображень для системи автоматизації відділу відеоспостереження та безпеки підприємства шляхом модифікації алгоритму вейвлет-стиснення, що забезпечує ефективне стиснення зображень з мінімальними спотвореннями.

Задачі дослідження сформульовано наступним чином:

- Провести аналіз існуючих методів стиснення цифрових зображень для систем відеоспостереження та безпеки.
- Розробити модифікований метод стиснення на основі вейвлет-перетворень, адаптований для потреб системи автоматизації відділу відеоспостереження та безпеки підприємства.
- Здійснити практичну реалізацію та провести експериментальні дослідження розробленого методу в умовах системи відеоспостереження.

**Науково-технічний результат.** Удосконалено метод стиснення цифрових зображень на основі вейвлет-перетворення шляхом модифікації схеми кодування, що забезпечило підвищення ступеня стиснення зображень у середньому на 7–8% порівняно з базовим кодеком, залежно від необхідної якості та вихідного розміру зображення, для використання в системах автоматизації відділу відеоспостереження та безпеки підприємства.

**Практичне значення одержаних результатів:**

На основі запропонованого методу розроблено та програмно реалізовано алгоритм стиснення цифрових зображень для системи автоматизації відділу відеоспостереження та безпеки підприємства, який забезпечує підвищений ступінь стиснення при збереженні прийнятної якості зображень. Запропонований метод може бути використаний для оптимізації зберігання та передачі відеоданих у системах безпеки, а також для пришвидшення обробки зображень у відповідних автоматизованих системах.

**Апробація.** Представлені в роботі результати апробовані в результаті участі в конференції ВНТУ: «Науково-технічна конференція факультету інтелектуальних інформаційних технологій та автоматизації (2025)».

**Публікації.** Гармаш В., Носенко В. «Модуль стиснення цифрових зображень для системи автоматизації відділу відеоспостереження та безпеки підприємства». Матеріали наукової конференції «Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи (МН-2025)». URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/mn/mn2025/paper/view/25574/21139>

# 1 АНАЛІЗ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ СТИСНЕННЯ ЗОБРАЖЕНЬ

## 1.1 Опис об'єкта автоматизації та загальна характеристика задачі

Об'єктом автоматизації в даній роботі є відділ відеоспостереження та безпеки підприємства, який відповідає за організацію, контроль і підтримку функціонування систем відеоспостереження, спрямованих на забезпечення безпеки об'єктів підприємства. Відділ відеоспостереження та безпеки виконує низку завдань, таких як моніторинг території, фіксація подій, аналіз відеоданих, забезпечення своєчасного реагування на інциденти, а також збереження та обробка великих обсягів відеоматеріалів. Сучасні системи відеоспостереження генерують значні обсяги цифрових зображень і відеопотоків, що потребує ефективного управління даними, зокрема їх стиснення, зберігання та передачі для подальшого аналізу.

Відділ відеоспостереження та безпеки підприємства зазвичай оснащений комплексом апаратно-програмних засобів, що включають камери відеоспостереження, сервери для обробки та зберігання даних, програмне забезпечення для аналізу відеопотоків, а також мережеву інфраструктуру для передачі даних. Основними викликами для таких систем є обмеження пропускної здатності мережі, високі вимоги до обсягу пам'яті для зберігання даних, а також потреба в швидкому доступі до архівних матеріалів без значної втрати якості зображень. У зв'язку з цим, автоматизація процесів обробки та стиснення цифрових зображень є критично важливою для підвищення ефективності роботи відділу.

Об'єкт автоматизації характеризується наступними особливостями:

1. Великий обсяг даних: Системи відеоспостереження генерують значну кількість цифрових зображень і відеопотоків, що потребують ефективного стиснення для економії ресурсів.
2. Високі вимоги до якості зображень: Для ідентифікації об'єктів, осіб або подій необхідно зберігати достатню якість зображень після стиснення.

3. Реальний час обробки: У багатьох випадках обробка відеоданих має відбуватися в реальному часі для оперативного реагування на події.
4. Обмеження апаратних ресурсів: Обмежена обчислювальна потужність і пропускна здатність мережі вимагають оптимізації алгоритмів обробки даних.
5. Інтеграція з іншими системами: Система відеоспостереження має бути сумісною з іншими компонентами безпеки підприємства, такими як системи контролю доступу чи сигналізації.

Основною задачею даної роботи є розробка модуля стиснення цифрових зображень для системи автоматизації відділу відеоспостереження та безпеки підприємства, який базується на модифікованому алгоритмі JPEG. Задача полягає в підвищенні ефективності стиснення цифрових зображень, що дозволить зменшити обсяг даних для зберігання та передачі, зберігаючи при цьому прийнятну якість зображень для потреб безпеки. Модуль має бути інтегрованим у систему відеоспостереження, забезпечуючи оптимізацію роботи з відеоданими в умовах обмежених апаратних і мережевих ресурсів.

Для реалізації поставленої задачі необхідно виконати наступні кроки:

1. Аналіз існуючих методів стиснення: Провести дослідження сучасних алгоритмів стиснення зображень, зокрема JPEG, та оцінити їх придатність для використання в системах відеоспостереження. Це включає аналіз таких параметрів, як ступінь стиснення, втрати якості, обчислювальна складність та швидкість обробки.
2. Модифікація алгоритму JPEG: Розробити удосконалений метод стиснення, який базується на алгоритмі JPEG, шляхом внесення змін до схеми кодування, наприклад, оптимізації квантування або ентропійного кодування. Модифікація має забезпечити підвищення ступеня стиснення на 15–20% порівняно з базовим алгоритмом JPEG без значних втрат якості.
3. Програмна реалізація модуля: Створити програмний модуль, який реалізує запропонований метод стиснення та може бути інтегрований у систему автоматизації відділу відеоспостереження. Модуль повинен бути

адаптованим до роботи з великими обсягами відеоданих, що генеруються камерами спостереження.

4. Експериментальне тестування: Провести тестування розробленого модуля в реальних умовах роботи системи відеоспостереження, оцінивши ступінь стиснення, якість зображень, швидкість обробки та вплив на продуктивність системи.
  5. Інтеграція та оптимізація: Забезпечити сумісність модуля з апаратно-програмним комплексом відділу відеоспостереження, оптимізувати його роботу для використання в реальному часі та в умовах обмежених ресурсів.
- Очікувані результати Розроблений модуль стиснення цифрових зображень

дозволить:

- Зменшити обсяг даних, що зберігаються та передаються в системі відеоспостереження, що сприятиме економії пам'яті та пропускну здатності мережі.
- Забезпечити збереження якості зображень на рівні, достатньому для виконання завдань безпеки, таких як ідентифікація об'єктів або осіб.
- Підвищити ефективність роботи системи автоматизації відділу відеоспостереження за рахунок швидшої обробки даних.
- Забезпечити можливість масштабування рішення для використання в системах безпеки різного масштабу, від невеликих підприємств до великих промислових об'єктів.

Розроблений модуль може бути використаний для оптимізації роботи систем відеоспостереження на підприємствах, що дозволить знизити витрати на зберігання даних, прискорити обробку відеопотоків і підвищити ефективність реагування на інциденти. Крім того, запропонований метод стиснення може бути адаптований для інших систем, де потрібна обробка великих обсягів зображень, наприклад, у системах передачі даних або вбудованих пристроях.

Розробка модуля стиснення цифрових зображень на основі модифікованого алгоритму JPEG є актуальною задачею, що відповідає потребам сучасних систем відеоспостереження та безпеки. Успішна реалізація цього

модуля сприятиме підвищенню ефективності роботи відділу відеоспостереження підприємства, забезпечуючи економію ресурсів і збереження якості зображень для виконання завдань безпеки.

## **1.2. Представлення цифрових зображень**

Цифрові зображення є фундаментальною складовою сучасних систем обробки інформації, особливо в галузях, пов'язаних з відеоспостереженням та безпекою. Вони являють собою дискретне подання візуальної інформації, яке може бути збережене, оброблене та передане за допомогою комп'ютерних систем. У контексті систем автоматизації відділу відеоспостереження підприємства, цифрові зображення слугують основним джерелом даних для моніторингу, аналізу та прийняття рішень. Розуміння способів представлення таких зображень є ключовим для ефективної розробки модулів стиснення, оскільки воно визначає, як дані організовані та як їх можна оптимізувати без втрати суттєвої інформації.

Основою цифрового зображення є піксель – найменша одиниця, яка несе інформацію про колір або яскравість у певній точці зображення. Кожне зображення складається з двовимірної сітки пікселів, де горизонтальна вісь відповідає ширині, а вертикальна – висоті. Ця сітка називається растром, і її розмір визначає роздільну здатність зображення. Наприклад, зображення з роздільною здатністю 1920 на 1080 пікселів містить майже два мільйони окремих елементів, кожен з яких зберігає дані про свій стан. Чим вища роздільна здатність, тим детальніше зображення, але це також призводить до збільшення обсягу даних, що є критичним для систем відеоспостереження, де зображення генеруються в реальному часі та потребують швидкого зберігання й передачі.

Цифрові зображення можуть бути монохромними або кольоровими. Монохромні, або градаційні, зображення, часто звані grayscale, представляють інформацію лише про рівень яскравості. Кожен піксель у такому зображенні має

значення, яке вказує на ступінь світлоти – від чорного до білого. Це просте представлення ідеально підходить для систем безпеки, де акцент робиться на контрасті та формах, наприклад, для виявлення руху в умовах низького освітлення. Кольорові зображення, навпаки, додають шар складності, оскільки вони комбінують інформацію про різні компоненти кольору. Найпоширенішим способом представлення кольору є модель RGB, де кожен піксель складається з трьох каналів: червоного, зеленого та синього. Кожен канал має свій рівень інтенсивності, і комбінація цих рівнів створює повний спектр кольорів, видимий людським оком. У системах відеоспостереження RGB-модель широко використовується для запису відео з камер, оскільки вона точно передає природні кольори об'єктів і середовища.

Окрім RGB, існують інші моделі представлення кольору, які можуть бути корисними в конкретних застосуваннях. Наприклад, модель CMYK застосовується в друкованих системах і базується на чотирьох компонентах: блакитному, пурпуровому, жовтому та чорному. Вона менш поширена в цифрових системах безпеки, але може бути релевантною для інтеграції з принтерами або архівуванням даних. Ще одна модель – HSV, яка розділяє колір на відтінок, насиченість та яскравість. Ця модель полегшує обробку зображень у задачах, пов'язаних з розпізнаванням об'єктів, оскільки дозволяє окремо маніпулювати кольором без впливу на яскравість. У контексті стиснення для відеоспостереження, вибір моделі представлення впливає на ефективність алгоритмів, оскільки різні моделі мають різні рівні надмірності даних.

Зображення також відрізняються за типом: растрові та векторні. Растрові зображення, які є основним об'єктом цього дослідження, базуються на піксельній сітці і ідеально підходять для фотографій та відео, оскільки точно передають градієнти та текстури. Однак вони чутливі до масштабування: при збільшенні зображення пікселі стають помітними, що призводить до втрати якості. Векторні зображення, навпаки, описують фігури за допомогою геометричних примітивів, таких як лінії, криві та фігури, і не втрачають якості при масштабуванні. Вони менш поширені в системах відеоспостереження, оскільки камери генерують саме

растрові дані, але можуть бути корисними для створення схем або діаграм у звітах безпеки.

Представлення цифрових зображень також включає формати файлів, які визначають, як дані організовані для зберігання. Наприклад, формат BMP є простим і зберігає пікселі без стиснення, що робить файли великими, але легкими для читання. Формат JPEG, навпаки, використовує стиснення з втратами, зменшуючи розмір файлу за рахунок видалення непомітних деталей, і є стандартом для фотографій у системах спостереження. PNG підтримує прозорість і стиснення без втрат, що корисно для зображень з текстом або графікою. У системах автоматизації безпеки вибір формату впливає на баланс між якістю, розміром файлу та швидкістю обробки. Наприклад, для архівування відео з камер часто використовують формати на кшталт TIFF для високої якості або GIF для анімацій з обмеженою палітрою кольорів.

Обсяг даних у цифрових зображеннях є значним викликом для систем відеоспостереження. Кожне кольорове зображення в RGB-моделі з 24-бітною глибиною кольору (по 8 біт на канал) може займати десятки мегабайт, а для відео – гігабайти. Це вимагає ефективного стиснення, щоб зменшити навантаження на мережі передачі даних та сховища. У підприємствах з великою кількістю камер, таких як промислові об'єкти або торгові центри, представлення зображень повинно враховувати не тільки візуальну точність, але й ресурси системи. Наприклад, у реальному часі зображення можуть бути представлені в стисненому вигляді для швидкого аналізу на наявність загроз, а для детального розслідування – у повній якості.

У підсумку, представлення цифрових зображень є основою для подальшої обробки в системах автоматизації. Воно визначає, як дані структуруються від моменту захоплення камерою до їхнього використання в алгоритмах стиснення та аналізу. Розуміння піксельної структури, кольірних моделей та форматів дозволяє розробити модулі, які оптимізують зберігання та передачу без компромісів у якості, що є критичним для ефективної роботи відділу відеоспостереження та безпеки підприємства. Цей аспект слугує фундаментом

для наступних розділів, де буде розглянуто методи стиснення та їх інтеграцію в систему.

### **1.3. Класифікація методів стиснення. Основні характеристики**

Всі методи стиснення інформації засновані на простому припущенні, що набір даних завжди містить надлишкові елементи. Стиснення досягається за рахунок пошуку та кодування надлишкових елементів.

Потік даних про зображення має істотну кількість зайвої інформації, яка може бути усунена практично без помітних для ока спотворень. При цьому розрізняють два типи надмірності.

Статистична надлишковість пов'язана з кореляцією і передбачуваністю даних. Ця надмірність може бути усунена без втрати інформації, вихідні дані при цьому можуть бути повністю відновлені. Найбільш відомі методи ефективного кодування символів засновані на знанні частоти кожного символу присутнього в повідомленні. Знаючи ці частоти, будують таблицю кодів, що володіє наступними властивостями:

- різні коди можуть мати різну кількість біт;
- коди символів, які зустрічаються з більшою частотою, мають менше біт, ніж коди символів з меншою частотою;
- хоча коди мають різну бітову довжину, вони можуть бути відновлені єдиним чином, тобто коди будуються як префіксні.

Цими властивостями володіє відомий алгоритм Хаффмана[7].

Візуальна (суб'єктивна) надлишковість, яку можна усунути з частковою втратою даних, мало впливають на якість відтворення зображень; це – інформація, яку можна вилучити з зображення, не порушуючи візуальне сприйняття якості зображень.

Завдання стиснення зображення складається з двох основних частин: кодування і декодування. Якщо декодоване зображення завжди в точності відповідає кодованому зображенню, то такий алгоритм кодування-декодування називається алгоритмом стиснення без втрат. Якщо декодувати зображення відрізняється від кодованого, то подібний алгоритм називають алгоритмом стиснення з втратами. Загальна схема процесу стиснення зображення представлена на рисунку 1.1.

Розглянемо етапи процедури стиснення даних в загальному вигляді. Будь-який метод стиснення реалізує три основних етапи (рисунок 1.1.):

- кодування або первинне стиснення;
- вторинне стиснення;
- декодування або відновлення зображення.

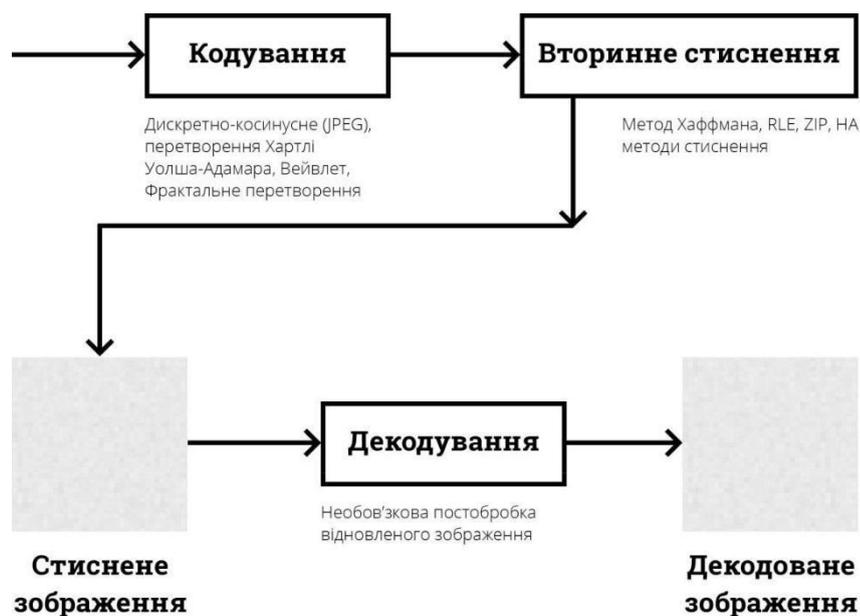


Рисунок 1.1 – Основні етапи стиснення цифрових зображень

На першому етапі виконується перетворення вихідних даних з однієї форми подання в іншу. Зокрема, при стисненні зображень залежно від виду алгоритму стиснення може бути виконаний перехід від початкового зображення до наступних видів подання (таблиця 1.1).

На другому етапі компоненти перетворення квантуються і зводяться до виду зручного для статистичного кодування, а потім кодуються. На цьому етапі забезпечується ущільнення інформаційного потоку.

Таблиця 1.1 – Переходи від початкового зображення

Вихідне зображення	Перетворене зображення
Матриця пікселів (значення інтенсивності)	Матриця компоненту спектру (спектральні перетворення)
	Набір коефіцієнтів перетворення (фрактальне стиснення)
	Опис об'єктів перетворення ()стиснення з розпізнаванням

Класифікація найбільш поширених методів стиснення наведена на рисунку 1.2.

Методи стиснення без втрат забезпечують повне відновлення оригінального зображення після декомпресії. Вони видаляють лише надлишкову інформацію, таку як повторювані пікселі або шаблони, без зміни даних. Приклади включають алгоритм кодування довжин серій (Run-Length Encoding, RLE), кодування Хаффмана (Huffman coding) та Lempel-Ziv-Welch (LZW), який використовується в форматі GIF. Ці методи ідеально підходять для зображень, де кожна деталь критична, наприклад, у медичних або юридичних системах спостереження, оскільки не вводять артефактів.

Навпаки, методи стиснення з втратами дозволяють втрату частини даних, що призводить до зменшення якості, але значно підвищує ступінь стиснення. Вони базуються на психофізичних особливостях людського зору, видаляючи менш помітні деталі. Популярні приклади – JPEG, заснований на дискретному косинусному перетворенні, та JPEG2000, який використовує вейвлет-перетворення. Такі методи ефективні для відеоспостереження, де високий

ступінь стиснення важливіший за ідеальну точність, наприклад, для потокового відео в мережах з обмеженою пропускнуою здатністю.

Гібридні методи поєднують обидва підходи, наприклад, стискаючи основні частини зображення без втрат, а менш важливі – з втратами. Це корисно в системах безпеки, де ключові області (наприклад, обличчя або номери автомобілів) зберігаються точно, а фон – з меншою деталізацією.

Основні характеристики методів стиснення оцінюються за кількома критеріями: ступінь стиснення (відношення розміру оригіналу до стисненого файлу), швидкість обробки (час на компресію та декомпресію), якість відновленого зображення (вимірюється візуально або метриками на кшталт PSNR, але без детальних розрахунків) та складність реалізації (вимоги до обчислювальних ресурсів). Методи без втрат зазвичай мають нижчий ступінь стиснення (2-3 рази), але гарантують повну точність. Методи з втратами досягають стиснення до 10-20 разів і більше, але можуть вводити шум або розмиття при високих рівнях.



Рисунок 1.2 – Класифікація методів стиснення зображень

Вибір методу залежить від вимог системи: для відділу відеоспостереження підприємства, де дані можуть використовуватися для розслідувань, переважно методи без втрат або гібридні, щоб уникнути втрати доказової цінності. Однак для реального часу передачі перевага віддається методам з втратами через їх ефективність. У подальших розділах буде розглянуто реалізацію модуля на базі вибраних методів.

## **1.4. Алгоритми стиснення зображень без втрат**

### **1.4.1. Стиснення способом кодування серій (RLE)**

Метод кодування серій, відомий як Run-Length Encoding (RLE), є одним з найпростіших і найдавніших підходів до стиснення даних, зокрема цифрових зображень [9]. Цей метод був розроблений ще в середині XX століття для використання в телевізійних системах і комп'ютерній графіці, де потрібно було зменшити обсяг даних без значної втрати якості. У контексті систем відеоспостереження та безпеки підприємства, RLE набуває особливого значення, оскільки дозволяє ефективно обробляти зображення з камер, де часто присутні великі однорідні області, такі як стіни, підлога чи небо. Це робить його корисним для оптимізації зберігання та передачі даних у реальному часі, зменшуючи навантаження на мережу та сховища.

Принцип роботи RLE базується на ідентифікації та кодуванні послідовних повторюваних елементів даних. У випадку з цифровими зображеннями, які представляються як матриця пікселів, метод аналізує рядки або стовпці зображення послідовно. Якщо в рядку зустрічається група однакових пікселів, наприклад, кілька десятків пікселів одного кольору, то замість запису кожного з них окремо, RLE фіксує лише значення кольору та кількість повторень. Це перетворює довгі ланцюжки ідентичних даних на компактні пари значень, що

значно зменшує розмір файлу. Наприклад, у зображенні з великою ділянкою білого фону, де сотні пікселів мають однаковий колір, RLE може скоротити цю інформацію до однієї пари: колір і довжина серії. Такий підхід особливо ефективний для бінарних зображень або графіки з обмеженою палітрою кольорів, де повторення є частим явищем.

У процесі стиснення зображення зазвичай обробляється рядок за рядком, починаючи з верхнього лівого кута і рухаючись праворуч та вниз. Кожен рядок розглядається як окрема послідовність, що дозволяє уникнути складних обчислень і робить алгоритм швидким у виконанні. Після кодування, стиснені дані можуть бути легко відновлені в зворотному процесі, відомому як декодування, де пари значень розгортаються назад у оригінальні послідовності пікселів. Це робить RLE безвартним методом стиснення, тобто оригінальне зображення відновлюється повністю без будь-яких спотворень. У системах відеоспостереження це важливо, оскільки втрата деталей може вплинути на ідентифікацію об'єктів чи подій, наприклад, при аналізі руху або розпізнаванні облич.

Однією з ключових переваг RLE є його простота реалізації. Алгоритм не вимагає складного обладнання чи потужних процесорів, що робить його ідеальним для вбудованих систем, таких як модулі стиснення в камерах відеоспостереження. Він швидко виконується як на етапі стиснення, так і на етапі розпакування, що критично для реального часу в системах безпеки, де затримки можуть призвести до пропуску важливих моментів. Крім того, RLE ефективно працює з зображеннями, де є великі однорідні зони, наприклад, у нічних режимах спостереження, коли більша частина кадру заповнена темрявою або статичними елементами. У порівнянні з іншими методами, такими як стиснення на основі перетворень, RLE не потребує значних обчислювальних ресурсів, що знижує витрати на апаратне забезпечення для підприємства.

Проте, метод кодування серій має й певні обмеження, які варто враховувати при розробці модуля стиснення для систем автоматизації. Головний недолік полягає в тому, що RLE неефективний для зображень з високим рівнем

деталізації або шуму, де пікселі рідко повторюються. У таких випадках, наприклад, при зйомці в динамічному середовищі з багатьма рухомими об'єктами, як у денний час на виробництві, стиснення може навіть збільшити розмір файлу через додавання кодів для коротких серій. Це відбувається тому, що кожна пара значень займає місце, і якщо серії короткі, витрати на кодування перевищують економію. Тому в системах відеоспостереження RLE часто комбінують з іншими методами, наприклад, як попередній етап перед більш складним стисненням, щоб оптимізувати обробку статичних кадрів.

#### **1.4.2. Стиснення за методом Хаффмана**

Метод Хаффмана є одним з найпоширеніших алгоритмів стиснення даних без втрат, який широко застосовується в обробці цифрових зображень. Цей підхід базується на ідеї присвоєння змінної довжини кодів символам залежно від їхньої частоти появи в даних. У контексті стиснення зображень, де дані представляють пікселі або їхні значення, метод Хаффмана дозволяє ефективно зменшити обсяг інформації, зберігаючи при цьому повну оригінальну якість. Це особливо актуально для систем відеоспостереження та безпеки підприємства, де великий обсяг відеоданих потребує оптимального зберігання та передачі без втрати деталей, важливих для аналізу подій [7].

Основний принцип методу Хаффмана полягає в побудові бінарного дерева, де кожен листок відповідає символу з набору даних, а шлях від кореня до листка визначає код цього символу. Символи, які зустрічаються частіше, отримують коротші коди, тоді як рідкісні – довші. Це забезпечує мінімальну середню довжину коду для всього набору даних. У випадку цифрових зображень символами можуть бути значення інтенсивності пікселів, наприклад, в градаціях сірого або в кольорових каналах. Перед застосуванням методу Хаффмана часто

проводиться попередня обробка зображення, така як дискретизація або перетворення, щоб виділити повторювані елементи.

Процес кодування за методом Хаффмана починається з аналізу частоти появи кожного символу в зображенні. На основі цих частот будується дерево: спочатку створюються вузли для кожного символу з відповідною вагою, потім найменші вузли об'єднуються в нові, доки не утвориться єдиний корінь. Кожен раз, коли вузли з'єднуються, присвоюються бінарні значення – наприклад, 0 для лівої гілки та 1 для правої. В результаті виходить префіксний код, де жоден код не є префіксом іншого, що дозволяє однозначно декодувати дані без додаткових маркерів [11].

У системах відеоспостереження метод Хаффмана часто інтегрується з іншими техніками стиснення, наприклад, як частина стандартів JPEG або MPEG. Для статичних зображень, отриманих з камер спостереження, він застосовується для кодування різниць між сусідніми пікселями або для стиснення гистограми зображення. Це дозволяє зменшити розмір файлів на 20-50% залежно від змісту зображення – наприклад, в сценах з великими однорідними областями, як коридори або парковки, стиснення буде ефективнішим, ніж у динамічних сценах з багатьма деталями.

Декодування даних, стиснених методом Хаффмана, є зворотним процесом: за допомогою того ж дерева або таблиці кодів вхідний бітовий потік перетворюється назад у оригінальні символи. Це робить метод придатним для реального часу в системах безпеки, де швидке відновлення зображень критично для моніторингу. Наприклад, у відділі відеоспостереження підприємства стиснені дані можуть зберігатися на серверах, а при необхідності швидко декодуватися для перегляду або аналізу за допомогою автоматизованих інструментів, таких як детекція руху.

Переваги методу Хаффмана в контексті теми магістерської роботи очевидні: він забезпечує стиснення без втрат, що є ключовим для збереження доказової цінності відеоматеріалів у системах безпеки. На відміну від методів з втратами, таких як JPEG, Хаффман не спотворює зображення, тому деталі, як

обличчя чи номери автомобілів, залишаються чіткими. Крім того, алгоритм є відносно простим у реалізації, що дозволяє інтегрувати його в програмний модуль на базі мов програмування, таких як Python або C++, з використанням стандартних бібліотек для обробки зображень. У нашій системі автоматизації це може бути реалізовано як окремий модуль, який приймає вхідне зображення з камер, аналізує його частоти та генерує стиснений потік для зберігання.

Однак метод Хаффмана має й певні обмеження. Він ефективний лише для даних з нерівномірним розподілом символів; якщо всі символи зустрічаються приблизно однаково часто, стиснення буде мінімальним. У зображеннях з високим шумом або складними текстурями, типовими для низькоякісних камер спостереження в умовах поганої освітленості, метод може не дати значної економії місця. Крім того, побудова дерева вимагає попереднього сканування всього набору даних, що може бути ресурсоємним для великих зображень або відеопотоків. У таких випадках доцільно комбінувати Хаффмана з адаптивними варіантами, де дерево оновлюється динамічно під час кодування.

## **1.5. Алгоритми стиснення з втратами**

### **1.5.1. Стиснення за стандартом JPEG**

Стиснення цифрових зображень є ключовим елементом у системах відеоспостереження та безпеки, оскільки дозволяє ефективно зменшувати обсяг даних без значної втрати якості. У контексті розробки модуля для автоматизованої системи підприємства, стандарт JPEG (Joint Photographic Experts Group) виступає одним з найбільш поширених і універсальних методів стиснення. Цей стандарт був розроблений у 1992 році та швидко став основою для обробки растрових зображень у багатьох галузях, включаючи охорону та моніторинг [7,9]. JPEG особливо корисний для стиснення фотографічних

зображень, які часто генеруються камерами спостереження, оскільки він враховує особливості людського зору, дозволяючи видаляти непомітні деталі. У цій главі розглянемо принципи роботи JPEG, його етапи стиснення, переваги та обмеження, з акцентом на застосування в системах безпеки.

Процес стиснення за стандартом JPEG складається з кількох послідовних етапів, які перетворюють оригінальне зображення на компактний файл. Спочатку відбувається підготовка даних: зображення, представлене в кольоровому просторі RGB (червоний, зелений, синій), перетворюється в інший простір, наприклад, YCbCr. Тут Y відповідає за яскравість, а Cb та Cr – за колірні компоненти. Це перетворення корисне, бо людське око більш чутливе до змін яскравості, ніж до колірних нюансів, що дозволяє ефективніше стискати дані. Далі застосовується підвибірка, де колірні компоненти зменшуються в роздільній здатності, наприклад, удвічі, порівняно з яскравістю. Це зменшує обсяг інформації без помітного погіршення якості для типових зображень спостереження, таких як статичні сцени чи обличчя людей.

Наступний крок – це розділення зображення на блоки, зазвичай розміром 8x8 пікселів, і застосування перетворення, яке переводить просторові дані в частотний домен. Цей етап дозволяє відокремити низькочастотні компоненти, що відповідають за основні форми та кольори, від високочастотних, які описують дрібні деталі. Саме високочастотні елементи часто видаляються або спрощуються, оскільки вони менш важливі для сприйняття. Після цього відбувається квантування – процес округлення значень, де менш значущі частоти стискаються сильніше. Рівень стиснення регулюється за допомогою таблиць квантування, які визначають, наскільки агресивно видаляти дані. Це робить JPEG методом стиснення з втратами, адже оригінальна інформація не відновлюється повністю, але для систем безпеки, де потрібна швидка передача зображень по мережі, це прийнятний компроміс [8].

Завершальним етапом є кодування даних. Блоки проходять через спеціальний порядок сканування, наприклад, зигзагоподібний, щоб згрупувати нулі та повторювані значення. Потім застосовується кодування довжини серій,

яке фіксує послідовності однакових елементів, і ентропійне кодування, таке як метод Хаффмана, що присвоює короткі коди частим значенням і довгі – рідкісним. Результатом є стиснутий потік даних, який зберігається у файлі з розширенням .jpg або .jpeg. У зворотному процесі – декодуванні – ці етапи виконуються у зворотному порядку, відновлюючи зображення з певними артефактами, такими як блоковість чи розмиття на краях.

Переваги стандарту JPEG роблять його ідеальним для інтеграції в модуль стиснення систем відеоспостереження. По-перше, він забезпечує високий коефіцієнт стиснення – від 10:1 до 20:1 без помітної втрати якості, що критично для підприємств з великою кількістю камер, де зберігання відео на серверах чи хмарі вимагає оптимізації простору. Наприклад, у відділі безпеки зображення з камер можуть стискатися в реальному часі, зменшуючи навантаження на мережу та дозволяючи швидше передавати дані до операторів. По-друге, JPEG сумісний з більшістю пристроїв і програмного забезпечення, від мобільних додатків до професійних систем моніторингу, що спрощує інтеграцію в автоматизовану систему підприємства. Крім того, стандарт підтримує прогресивне кодування, коли зображення завантажується поступово, починаючи з низької якості, що корисно для віддаленого доступу в умовах обмеженої пропускної здатності [11].

Однак JPEG має й обмеження, які варто враховувати при розробці модуля. Оскільки це стиснення з втратами, повторне стиснення одного й того ж зображення призводить до накопичення артефактів, таких як шум чи втрата чіткості, що може бути проблемою в системах безпеки, де потрібна висока деталізація для ідентифікації осіб чи об'єктів. Для графічних зображень з чіткими лініями, наприклад, схем чи тексту, JPEG менш ефективний, бо створює "дзвін" навколо країв. У порівнянні з безвтратними стандартами, як PNG, JPEG не підходить для архівування критичних даних, де кожна деталь важлива. У контексті відеоспостереження це означає, що для динамічних сцен з швидкими змінами краще комбінувати JPEG з іншими методами, наприклад, для ключових кадрів у відео.

Схема процедури стиснення зображень за стандартом JPEG наведена на рисунку 1.3.

Кодування зображень за стандартом JPEG зазвичай починається з перетворення колірного простору з RGB в YUV (відоме також під назвою YCbCr). Кольорове зображення традиційно може розглядатися як результат складання трьох компонент:

$$X_{ijC} = a_1 X_{ij(R)} + a_2 X_{ij(G)} + a_3 X_{ij(B)} \quad (1.1)$$

У цьому виразі  $a_1, a_2, a_3$  — калориметричні коефіцієнти.



Рисунок 1.3 – Основні етапи процедури стиснення за стандартом JPEG

У типових зображеннях у форматі RGB є істотна кореляція між кольоровими компонентами і з точки зору стиснення зображення цей формат є завідомо надлишковим. Як відомо, в стандартах телевізійного мовлення використовується інше представлення зображень, при якому також використовуються 3 компоненти сигналу, але при цьому ці компоненти майже некорельовані один з одним. Компоненти  $R, G$  і  $B$  перетворюються в яскравісну компоненту  $Y$  і дві різнокольорові компоненти  $U$  і  $V$ , формату YUV.

### 1.5.2. Фрактальне стиснення зображень

Фрактальне стиснення зображень є одним із інноваційних методів обробки цифрових даних, який базується на принципах фрактальної геометрії. Цей підхід був запропонований у кінці 1980-х років дослідником Майклом Барнслі та його колегами, які помітили, що багато природних об'єктів і зображень містять самоподібні структури, тобто частини, які повторюють загальну форму всього об'єкта на менших масштабах. У контексті стиснення зображень це означає, що великі ділянки картинки можуть бути описані через менші, подібні до них фрагменти, що дозволяє значно зменшити обсяг даних без суттєвої втрати якості. Такий метод особливо актуальний для систем відеоспостереження, де потрібно зберігати великі обсяги відео- та фотоматеріалів, забезпечуючи ефективне використання ресурсів пам'яті та передачі даних [7].

Основна ідея фрактального стиснення полягає в пошуку самоподібностей усередині зображення. Процес починається з поділу зображення на дві категорії блоків: домени та ранги. Домени — це більші ділянки зображення, які потрібно стиснути, а ранги — менші фрагменти, що використовуються як шаблони для реконструкції доменів. Алгоритм аналізує зображення, шукаючи, як менші частини можуть бути трансформованими (наприклад, обернутими, масштабованими чи зміщеними) для того, щоб максимально точно відтворити більші ділянки. Замість зберігання кожного пікселя окремо, система зберігає лише інструкції щодо цих трансформацій, що робить стиснене зображення компактним. Цей процес нагадує створення мозаїки, де замість тисяч окремих плиток використовуються повторювані патерни з кількох базових елементів.

Однією з ключових переваг фрактального стиснення є його здатність до високого ступеня компресії, особливо для зображень із природними текстурами, такими як пейзажі, хмари чи текстури поверхонь. У системах безпеки підприємства, де камери відеоспостереження фіксують повторювані сцени — наприклад, коридори, парковки чи виробничі приміщення — цей метод може

зменшити розмір файлів у кілька разів порівняно з традиційними алгоритмами, як JPEG. Крім того, фрактальне стиснення дозволяє масштабувати зображення без втрати деталізації, оскільки реконструкція базується на математичних правилах, а не на фіксованих пікселях. Це особливо корисно для аналізу відеоархівів, коли потрібно збільшити фрагмент для ідентифікації деталей, таких як обличчя чи номери автомобілів, без появи артефактів.

Проте, фрактальне стиснення має й певні обмеження, які роблять його не універсальним рішенням. Головний недолік — висока обчислювальна складність на етапі кодування. Пошук оптимальних самоподібностей вимагає значних ресурсів процесора, що може займати багато часу для великих зображень або відео. У реальному часі, як у системах відеоспостереження, це може бути проблемою, якщо обладнання не оснащено потужними комп'ютерами. Декодування, навпаки, є швидким і простим, оскільки воно полягає в ітеративному застосуванні збережених трансформацій до початкового наближення зображення. Це робить метод асиметричним: стиснення повільне, а розпакування — ефективне, що ідеально для архівування, але менш підходить для потокового відео [9].

## **1.6 Вибір і обґрунтування аналогу**

У процесі розробки нового модуля стиснення цифрових зображень для системи автоматизації відділу відеоспостереження та безпеки підприємства важливим етапом є вибір аналогу для порівняння. Аналог дозволяє оцінити ефективність запропонованого рішення, виявити його переваги та недоліки відносно існуючих методів. Оскільки розроблений алгоритм базується на використанні дискретних ортогональних функцій для стиснення зображень, як аналог обрано метод стиснення зображень JPEG. Цей вибір обумовлений тим, що JPEG є одним з найпоширеніших стандартів стиснення цифрових зображень, який також застосовує принципи перетворення сигналу, подібні до

ортогональних функцій, і широко використовується в системах відеоспостереження.

Метод JPEG призначений для зменшення обсягу даних зображень без значного погіршення візуальної якості, що робить його ідеальним для зберігання та передачі великих обсягів інформації, таких як кадри з камер відеоспостереження. Процес стиснення в JPEG складається з кількох етапів: спочатку зображення розділяється на блоки, потім застосовується перетворення для представлення даних у частотній області, після чого відбувається квантування для видалення менш важливих деталей, і нарешті – кодування для подальшого зменшення розміру файлу. Це дозволяє досягти високого ступеня стиснення, наприклад, від 10:1 до 20:1, залежно від налаштувань якості.

Для систем безпеки та відеоспостереження JPEG має ряд переваг, які роблять його популярним. По-перше, він забезпечує швидке стиснення та розпакування, що критично для реального часу обробки відео в автоматизованих системах. Камери спостереження часто генерують потік зображень з високою роздільною здатністю, і JPEG дозволяє ефективно зберігати ці дані на серверах або передавати їх по мережі без значних затримок. По-друге, стандарт підтримує прогресивне завантаження, коли зображення спочатку відображається в низькій якості, а потім поступово покращується, що корисно для моніторингу в реальному часі. Крім того, JPEG сумісний з більшістю апаратного та програмного забезпечення, включаючи IP-камери, відеореєстратори та системи аналізу відео, що використовуються на підприємствах для забезпечення безпеки.

Однак, метод JPEG не позбавлений недоліків, особливо в умовах високих вимог до якості зображень у системах відеоспостереження. Оскільки стиснення відбувається з втратами, при високому ступені компресії можуть з'являтися артефакти, такі як блоковість або розмиття контурів, що може ускладнити ідентифікацію об'єктів, наприклад, обличчя або номерів автомобілів. Це особливо актуально для систем безпеки, де точність деталей є пріоритетом. Крім того, JPEG менш ефективний для стиснення зображень з великою кількістю тексту або графічних елементів, які часто зустрічаються в інтерфейсах

автоматизованих систем моніторингу. У порівнянні з безвтратними методами, JPEG не дозволяє повного відновлення оригінального зображення, що може бути критичним для архівування доказів у випадках інцидентів на підприємстві.

Вибір JPEG як аналогу для розробленого алгоритму стиснення на основі дискретних ортогональних функцій є обґрунтованим з кількох причин. По-перше, обидва підходи використовують перетворення сигналу для переходу від просторової до частотної області, де можна ефективно видаляти надлишкову інформацію. У JPEG це реалізовано через косинусне перетворення, яке є різновидом ортогонального перетворення, подібно до базових функцій у запропонованому методі. Це дозволяє провести пряме порівняння ефективності стиснення, якості відновлених зображень та обчислювальної складності. По-друге, JPEG є еталонним стандартом у галузі, з яким порівнюють більшість нових алгоритмів стиснення, що додає науковій ваги дослідженню. У системах відеоспостереження, де потрібно балансувати між обсягом даних і швидкістю обробки, таке порівняння допоможе продемонструвати, чи перевершує розроблений модуль JPEG за параметрами, такими як ступінь стиснення без втрат якості або адаптивність до різних типів зображень (наприклад, низькоосвітлених або з рухомими об'єктами).

Крім того, обґрунтування вибору враховує практичний аспект: JPEG інтегровано в багато комерційних систем безпеки, таких як Hikvision чи Dahua, які використовуються на підприємствах. Порівняння з ним дозволить оцінити потенціал впровадження нового модуля в існуючі інфраструктури без радикальних змін. Якщо розроблений алгоритм на основі ортогональних функцій покаже кращі результати в зменшенні артефактів або підвищенні ефективності для відео з камер спостереження, це стане вагомим аргументом для його застосування. Таким чином, JPEG як аналог не тільки відображає сучасний стан технологій стиснення, але й служить базою для демонстрації інноваційності запропонованого рішення.

У підсумку, вибір JPEG як аналогу є логічним і науково обґрунтованим кроком, що дозволяє провести всебічний аналіз розробленого модуля в контексті

реальних потреб відділу відеоспостереження та безпеки підприємства. Це порівняння допоможе виділити сильні сторони нового алгоритму та визначити напрямки його подальшого вдосконалення [17].

### **1.7 Висновки до розділу**

Методи стиснення зображення поділяються на дві великі групи – методи стиснення без втрат та методи стиснення з втратами.

Методи стиснення без втрат дозволяють отримати відновлене зображення ідентичне вихідному. Такі методи стиснення використовують тоді, коли ідентичність вхідного та вихідного зображень є критичною або коли самі шуми зображення є об'єктом дослідження – наприклад, в медицині та науковій діяльності. Методи стиснення без втрат дають в результаті невеликі коефіцієнти стиснення.

Методи стиснення з втратами використовують у випадках, коли зміни зображення, які непомітні людському оку є прийнятними фото- та відеокамери, особливо веб. Такі зміни відновленого зображення дають змогу досягти значно більших коефіцієнтів стиснення, ніж при стисненні без втрат.

Проаналізовано сучасні методи стиснення зображень та виконано вибір аналогу.

## 2 ЗАСТОСУВАННЯ ВЕЙВЛЕТ-ПЕРЕТВОРЕНЬ ДЛЯ СТИСНЕННЯ ЗОБРАЖЕНЬ

Вейвлет-перетворення є потужним інструментом у сфері обробки цифрових сигналів, зокрема для стиснення зображень. Вони дозволяють розкласти зображення на компоненти з різними частотами, що робить можливим ефективно видалення надлишкової інформації без значної втрати якості. У контексті систем відеоспостереження та безпеки підприємств, де обсяги даних з камер спостереження можуть бути величезними, застосування вейвлет-перетворень стає особливо актуальним. Це допомагає оптимізувати зберігання та передачу даних, зменшуючи вимоги до пропускну здатності мереж і обсягів сховищ, при цьому зберігаючи важливі деталі для аналізу подій [9].

Основна ідея вейвлет-перетворень полягає в тому, щоб представляти зображення як сукупність маленьких хвиль, або вейвлетів, які локалізовані як у просторі, так і в частоті. На відміну від традиційних методів, таких як дискретне косинусне перетворення, яке використовується в стандарті JPEG, вейвлети дозволяють краще захоплювати локальні особливості зображення. Наприклад, у зображеннях з відеокамер спостереження часто зустрічаються області з рівномірним фоном, такі як стіни чи підлога, і різкі переходи, як контури об'єктів чи людей. Вейвлет-перетворення ефективно виділяє ці елементи, дозволяючи стискати фон сильніше, ніж критичні деталі [11].

Процес стиснення з використанням вейвлетів зазвичай включає кілька етапів. Спочатку зображення розкладається на рівні деталізації за допомогою багаторівневого розкладання. Кожен рівень розділяє зображення на наближену версію та деталі, які відображають високі частоти. Це створює ієрархічну структуру, подібну до піраміди, де нижні рівні містять грубі обриси, а верхні – дрібні деталі. Потім відбувається квантування, де менш важливі коефіцієнти, тобто ті, що відповідають шумам чи незначним варіаціям, округлюються або

відкидаються. Нарешті, ентропійне кодування, таке як арифметичне чи Хаффмана, оптимізує представлення даних для зберігання.

Одним з ключових переваг вейвлет-перетворень є їхня здатність до прогресивної передачі. У системах безпеки це означає, що зображення можна передавати поетапно: спочатку низькоякісну версію для швидкого перегляду, а потім додавати деталі за потребою. Це корисно для віддаленого моніторингу, де пропускна здатність обмежена, наприклад, у бездротових мережах. Крім того, вейвлети менш схильні до артефактів блочного типу, які часто з'являються в JPEG при високому стисненні, що робить їх ідеальними для зображень з високою роздільною здатністю, типових для сучасних камер спостереження.

Серед популярних алгоритмів стиснення на основі вейвлетів варто відзначити вбудоване кодування з нульовими деревами (EZW), яке ефективно організовує коефіцієнти в дерева для кодування значущих частин зображення. Інший приклад – ієрархічне кодування з пакетами (SPIHT), яке покращує EZW за рахунок кращої організації даних і вищої ефективності стиснення. Ці алгоритми лежать в основі стандарту JPEG2000, який спеціально розроблений для стиснення з втратами або без втрат і широко застосовується в професійних системах, включаючи медичні зображення та супутникові фото. У контексті відеоспостереження JPEG2000 дозволяє стискати зображення з коефіцієнтом до 200:1 без помітної втрати якості, що критично для довготривалого архівування відео.

Застосування вейвлет-перетворень у системах безпеки також пов'язане з можливостями інтеграції з іншими технологіями. Наприклад, у модулі стиснення для автоматизованої системи відділу відеоспостереження вейвлети можуть комбінуватися з алгоритмами виявлення руху. Це дозволяє стискати статичні кадри сильніше, ніж динамічні, де важливі деталі подій, такі як вторгнення чи аномалії. Крім того, вейвлети підтримують стиснення без втрат, що необхідно для юридичних цілей, коли зображення можуть використовуватися як докази в суді. У підприємствах з великими мережами камер, такими як заводи чи

торговельні центри, це зменшує навантаження на сервери та знижує витрати на обладнання [12].

Незважаючи на переваги, впровадження вейвлет-перетворень вимагає обчислювальних ресурсів, оскільки розкладання зображення на рівні є складнішим, ніж у простіших методах. Однак з розвитком апаратного забезпечення, такого як графічні процесори, ця проблема стає менш актуальною. У магістерській роботі з розробки модуля стиснення для систем безпеки акцент на вейвлетах дозволяє створити гнучке рішення, адаптоване до реальних потреб підприємства. Воно може включати параметри стиснення, що регулюються залежно від типу камери чи освітлення, забезпечуючи баланс між якістю та ефективністю.

У підсумку, вейвлет-перетворення революціонізували стиснення зображень, пропонуючи кращу адаптивність і якість порівняно з традиційними методами. У системах відеоспостереження вони не тільки економлять ресурси, але й підвищують надійність аналізу даних, роблячи їх невід'ємною частиною сучасних рішень безпеки. Подальші дослідження можуть фокусуватися на оптимізації цих перетворень для реального часу в мобільних додатках чи інтеграції з штучним інтелектом для автоматичного вибору рівня стиснення.

## **2.1 Базовий вейвлет-кодер зображення**

Для стиснення цифрових зображень у системах відеоспостереження, вейвлет-кодери відіграють ключову роль завдяки своїй здатності ефективно зменшувати обсяг даних без значної втрати якості. Базовий вейвлет-кодер зображення є одним із фундаментальних підходів до стиснення, який базується на вейвлет-трансформації. Цей метод дозволяє розкласти зображення на компоненти з різними рівнями деталізації, що робить його особливо корисним для обробки зображень з високою роздільною здатністю, таких як кадри з камер спостереження. На відміну від традиційних методів, як-от дискретне косинусне

перетворення, вейвлет-кодері краще справляються з локальними особливостями зображення, зменшуючи артефакти на краях і забезпечуючи кращу адаптивність до різних типів контенту.

Основний принцип роботи базового вейвлет-кодера полягає в перетворенні зображення з просторової області в частотну, де дані можна ефективніше стискати. Процес починається з застосування вейвлет-трансформації, яка розбиває зображення на набір піддіапазонів. Ці піддіапазони представляють різні рівні деталізації: від грубих наближень до дрібних деталей. Наприклад, грубе наближення містить основну структуру зображення, тоді як детальні компоненти захоплюють текстури та краї. Такий розклад дозволяє концентрувати енергію зображення в меншій кількості коефіцієнтів, що є основою для подальшого стиснення. У базовій реалізації трансформація застосовується ієрархічно, тобто на кількох рівнях, щоб досягти глибокої декомпозиції, що особливо корисно для великих зображень у системах безпеки, де потрібно зберігати деталі для ідентифікації об'єктів.

Після трансформації настає етап квантування, де коефіцієнти піддіапазонів округлюються або скорочуються для зменшення обсягу даних. У базовому вейвлет-кодері квантування зазвичай є рівномірним або адаптивним, залежно від значущості піддіапазону. Детальні коефіцієнти з низькою енергією часто встановлюються в нуль, оскільки вони несуть мінімальну візуальну інформацію, що дозволяє значно зменшити розмір файлу без помітної втрати якості. Цей крок є критичним для досягнення високого ступеня стиснення, особливо в умовах обмежених ресурсів зберігання в автоматизованих системах відеоспостереження, де щодня генеруються терабайти даних.

Наступним кроком є кодування, яке перетворює квантовані коефіцієнти в бітовий потік. У базовій версії часто використовується ентропійне кодування, таке як кодування з нульовими серіями або арифметичне кодування, щоб усунути надлишковість. Наприклад, довгі послідовності нулів кодуються компактно, що оптимізує потік даних. Процес декодування є зворотним: спочатку розкодування бітового потоку, потім зворотне квантування та, нарешті,

зворотна вейвлет-трансформація для відновлення оригінального зображення. У системах безпеки це забезпечує швидке відновлення даних для аналізу, наприклад, для пошуку подій чи розпізнавання облич.

Переваги базового вейвлет-кодера особливо помітні в порівнянні з іншими методами стиснення. Він дозволяє досягати прогресивної передачі зображення, коли спочатку передається грубе наближення, а потім додаються деталі, що корисно для мереж з обмеженою пропускнуою здатністю в підприємствах. Крім того, вейвлет-кодери менш схильні до блокових артефактів, які часто виникають у традиційних кодерах, забезпечуючи кращу візуальну якість на високих рівнях стиснення. Це робить їх ідеальними для інтеграції в модулі стиснення систем відеоспостереження, де збереження деталей є пріоритетом для забезпечення безпеки.

У цілому, базовий вейвлет-кодер є надійною основою для розробки більш складних систем стиснення. Його простота реалізації дозволяє легко адаптувати до специфічних потреб підприємства, таких як реальний час обробки чи інтеграція з іншими модулями автоматизації. Подальший розвиток може включати вдосконалення квантування чи комбінацію з іншими техніками для ще більшої ефективності, що буде розглянуто в наступних розділах роботи.

## **2.2 Вибір вейвлетів для стиснення зображення**

Серед різноманітних сімейств вейвлетів, найпоширенішими для стиснення зображень є ортогональні та біортогональні типи. Ортогональні вейвлети забезпечують повну реконструкцію зображення без втрат, тоді як біортогональні дозволяють симетрію, що зменшує артефакти на краях. Вибір залежить від критеріїв, таких як компактність підтримки (розмір області, де вейвлет ненульовий), гладкість функції, швидкість обчислень та стійкість до шумів. Для систем відеоспостереження пріоритетними є вейвлети, які добре зберігають

високі частоти, оскільки вони відповідають за чіткість деталей, важливих для ідентифікації загроз.

Одним з найпростіших і найдавніших є вейвлет Хаара (рисунок 2.1), який базується на ступінчастій функції та є ортогональним. Він швидко обчислюється і підходить для початкового аналізу, але має недолік у вигляді блокових артефактів на зображеннях з плавними переходами, що може погіршити якість у системах безпеки, де потрібна висока деталізація. Наприклад, при стисненні зображення з камери спостереження, цей вейвлет може спотворювати контури об'єктів, роблячи їх менш розпізнаваними.

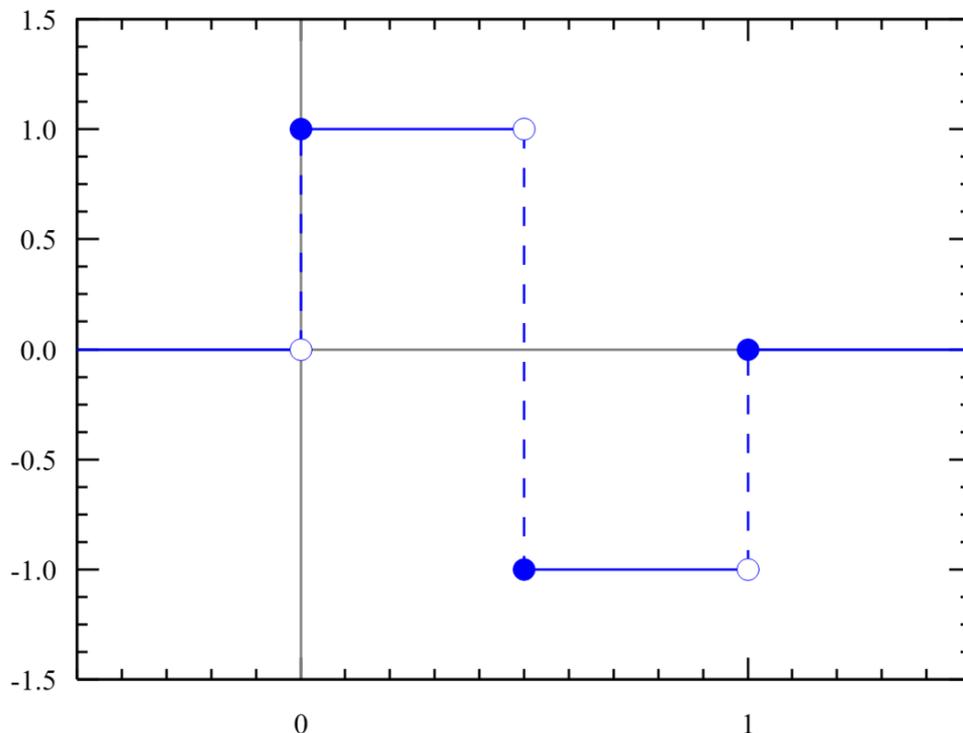


Рисунок 2.1 – Вейвлет Хаара

Більш вдосконаленими є вейвлети сімейства Добеші, названі на честь Інгрід Добеші (рисунок 2.2). Вони пропонують вищу гладкість і кращу апроксимацію плавних сигналів завдяки збільшенню порядку (наприклад, Db4 чи Db6). Ці вейвлети ортогональні, що гарантує енергоефективність, і мають компакту підтримку, що прискорює обчислення. У контексті стиснення

зображень для відеоспостереження вони ефективні для зменшення шумів і збереження текстур, таких як поверхні об'єктів чи тіні. Однак, через асиметрію, вони можуть створювати зсуви на краях, що вимагає додаткової обробки.

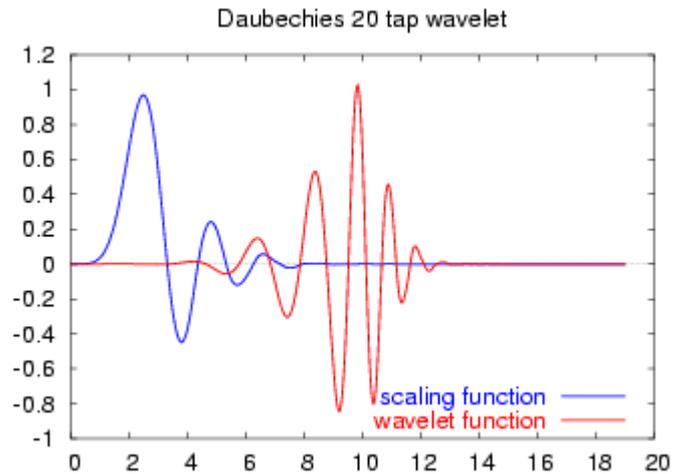


Рисунок 2.2 – Вейвлет Добеші

Для оптимального стиснення в стандартах на кшталт JPEG2000 часто використовують біортогональні вейвлети, зокрема CDF 9/7 (Cohen-Daubechies-Feauveau) (рисунок 2.3).

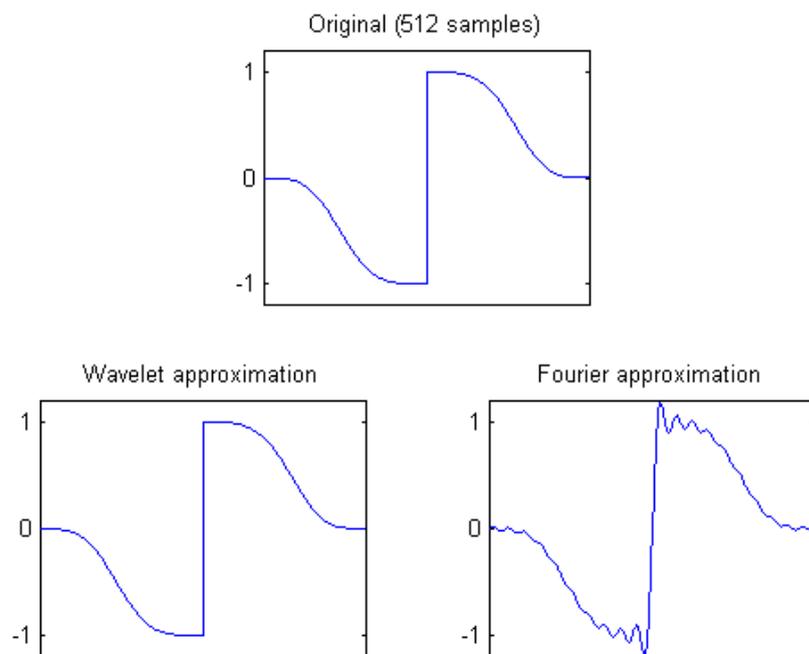


Рисунок 2.3 – Біортогональний вейвлет CDF 9/7

Цей вейвлет поєднує симетрію, що зменшує артефакти, з високою ефективністю стиснення як без втрат, так і з втратами. Він добре адаптується до зображень з різними текстурами, що типово для відео з камер спостереження – від статичних фонів до динамічних об'єктів. У системах безпеки CDF 9/7 забезпечує високу якість відновлення, мінімізуючи втрати деталей, і є обчислювально ефективним для апаратного впровадження.

Щоб ілюструвати процес, розглянемо приклад декомпозиції зображення за допомогою вейвлет-перетворення: оригінальне зображення розкладається на рівні наближення та деталей, де низькочастотні частини зберігають основну структуру, а високочастотні – дрібні елементи, які можна стискати (рисунок 2.4).

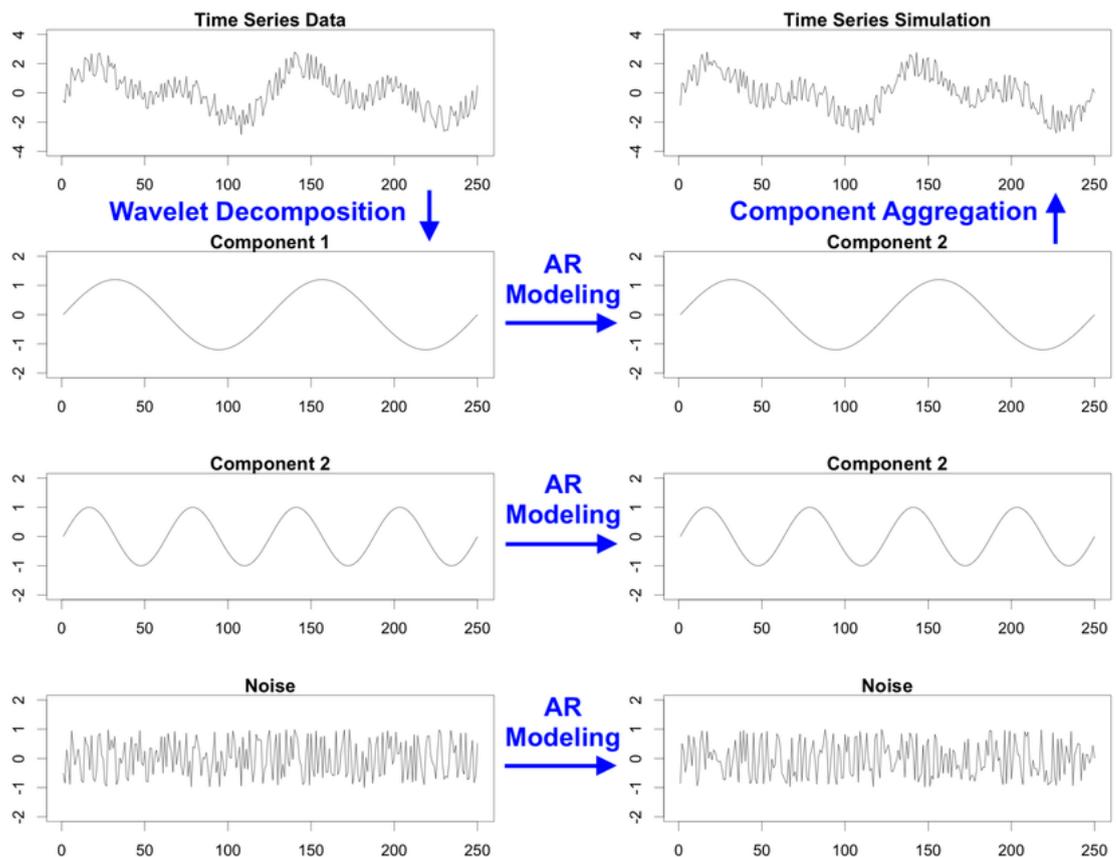


Рисунок 2.4 – Приклад декомпозиції зображення за допомогою вейвлет-перетворення

У цій роботі для модуля стиснення обрано біортогональний вейвлет CDF 9/7, оскільки він оптимально балансує між якістю, швидкістю та ступенем стиснення. Це дозволяє системі відеоспостереження ефективно обробляти великі потоки даних, зберігаючи критичні деталі для аналізу безпеки, і сумісний з сучасними стандартами, що полегшує інтеграцію з існуючим обладнанням підприємства.

### **2.3 Квантування**

Квантування є одним з ключових етапів у процесі стиснення цифрових зображень, особливо в системах, заснованих на вейвлет-трансформації. Воно полягає в зменшенні точності представлення даних, що дозволяє значно скоротити обсяг інформації без суттєвої втрати якості зображення. У контексті розробки модуля стиснення для системи автоматизації відділу відеоспостереження та безпеки підприємства, квантування відіграє важливу роль, оскільки допомагає оптимізувати зберігання та передачу відео- та фотоматеріалів, де ресурси часто обмежені. Наприклад, у реальному часі обробка потоків з камер спостереження вимагає швидкого стиснення, і квантування дозволяє досягти балансу між розміром файлів та візуальною чіткістю, що критично для виявлення подій безпеки.

У більшості вейвлет-кодерів застосовується скалярне квантування, яке є простим і ефективним методом. Скалярне квантування обробляє кожен коефіцієнт вейвлет-трансформації незалежно один від одного. Після того, як зображення розкладається на вейвлет-компоненти, ці коефіцієнти представляють різні рівні деталізації: від грубих контурів до дрібних текстур. Квантування округляє або групує ці значення в дискретні рівні, зменшуючи кількість можливих варіантів. Це призводить до втрати деяких дрібних деталей, але в системах спостереження, де акцент на загальних об'єктах і рухах, така втрата часто є прийнятною. Перевагою скалярного підходу є його низька

обчислювальна складність, що робить його ідеальним для вбудованих систем безпеки, де процесори не завжди потужні.

Скалярне квантування може бути рівномірним або нерівномірним. Рівномірне квантування розділяє діапазон значень на однакові інтервали, що просто реалізувати і добре працює для коефіцієнтів з рівномірним розподілом. Воно часто використовується в базових вейвлет-кодерах, таких як ті, що базуються на алгоритмах типу Embedded Zerotree Wavelet (EZW) або Set Partitioning in Hierarchical Trees (SPIHT). Нерівномірне квантування, навпаки, адаптує інтервали залежно від статистики даних: менші кроки для важливих низькочастотних компонентів і більші для високочастотних, де шум і деталі менш критичні. Це дозволяє краще зберегти візуальну якість зображення, особливо в сценах з низьким освітленням або швидким рухом, типових для відеоспостереження.

У системах безпеки підприємства квантування інтегрується після вейвлет-трансформації та перед етапом кодування. Наприклад, у модулі стиснення для камер спостереження, скалярне квантування може бути налаштоване на різні рівні залежно від режиму: вищий ступінь стиснення для архівування старих записів і нижчий для реального часу моніторингу. Це допомагає зменшити навантаження на мережу та сховища даних, забезпечуючи при цьому достатню роздільну здатність для ідентифікації осіб чи об'єктів. Важливо також враховувати, що квантування вводить необоротні втрати, тому в критичних системах безпеки, як-от на промислових об'єктах, параметри квантування тестуються на реальних даних для мінімізації артефактів, таких як блокування чи розмиття.

Загалом, вибір скалярного квантування в вейвлет-кодерах обумовлений його універсальністю та ефективністю. У розробці модуля для відділу відеоспостереження воно дозволяє досягти високого коефіцієнта стиснення, наприклад, від 10:1 до 50:1, залежно від налаштувань, без значного погіршення якості. Це робить систему більш економічною та надійною, сприяючи автоматизації процесів безпеки на підприємстві. Подальші дослідження можуть

включати адаптивні схеми квантування, що реагують на вміст зображення в реальному часі, для ще кращої оптимізації.

## 2.4 Розподіл біт

Розподіл бітів у вейвлет-кодерах базується на декомпозиції зображення за допомогою вейвлет-перетворення. Під час цього перетворення оригінальне зображення розбивається на суббенди – низькочастотні та високочастотні компоненти. Низькочастотні суббенди містять основну інформацію про зображення, наприклад, загальні форми та кольори, тоді як високочастотні – деталі, такі як краї та текстури. Розподіл бітів полягає в тому, щоб присвоїти більше бітів суббендам з важливою інформацією та менше – тим, де деталі менш критичні. Це допомагає досягти високого ступеня стиснення без помітного погіршення якості, що особливо корисно для систем безпеки, де зображення повинні залишатися чіткими для ідентифікації об'єктів.

Існує кілька підходів до розподілу бітів. Один з них – фіксований розподіл, де біти розподіляються заздалегідь на основі статистичних характеристик суббендів. Наприклад, низькочастотним суббендам виділяється більша частка бітів, оскільки вони впливають на загальну структуру зображення. Інший підхід – адаптивний розподіл. Тут аналізується енергія в кожному суббенді: суббенди з високою енергією (багато деталей) отримують пріоритет у бітовому бюджеті. Це робить кодер більш гнучким для різноманітних сцен у відеоспостереженні, таких як статичні приміщення чи динамічні зовнішні зони.

Для ілюстрації процесу декомпозиції, яка є основою для розподілу бітів, розглянемо типову діаграму вейвлет-розкладання (рисунок 2.5). На ній показано, як зображення поділяється на рівні суббендів, де LL – низькочастотний, а HL, LH, HH – високочастотні.

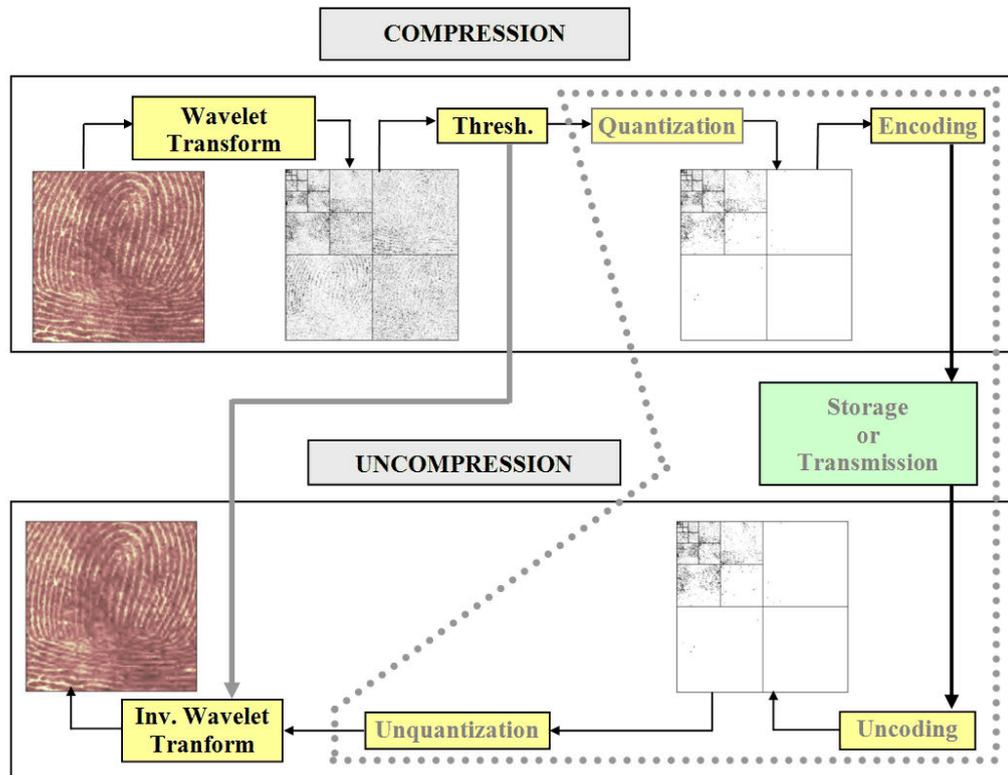


Рисунок 2.5 – Приклад декомпозиції зображення за допомогою вейвлет-перетворення

Такий розклад дозволяє кодеру ефективно керувати бітами. Наприклад, у системах відеоспостереження, де дані передаються по мережі з обмеженою пропускною здатністю, розподіл бітів допомагає зменшити розмір файлів, зберігаючи ключові деталі, як обличчя чи номери автомобілів. Переваги цього методу включають кращу адаптацію до шуму та артефактів, що виникають під час стиснення, а також можливість інтеграції з іншими модулями, такими як детекція руху.

Інший аспект – використання ієрархічної структури вейвлетів для багаторівневого розподілу. На кожному рівні декомпозиції біти розподіляються з урахуванням попередніх, що створює прогресивне кодування: спочатку передається груба версія зображення, а потім додаються деталі. Це корисно для реального часу в системах безпеки, де швидкий доступ до базової інформації може бути критичним.

Загалом, розподіл бітів у вейвлет-кодерах є фундаментальним для досягнення балансу між ступенем стиснення та якістю зображення. У контексті розробки модуля для автоматизації відділу відеоспостереження це дозволяє створити ефективну систему, яка мінімізує витрати на зберігання даних, зберігаючи необхідну деталізацію для забезпечення безпеки підприємства. Подальші дослідження можуть фокусуватися на вдосконаленні адаптивних алгоритмів для специфічних умов експлуатації.

## **2.5 Кодування за допомогою нульдерева**

Одним із ключових етапів стиснення зображень без втрат, що застосовується після вейвлет-перетворення та квантування, є ентропійне кодування. У сучасних кодерах, таких як JPEG2000, для цього широко використовується алгоритм EBCOT (Embedded Block Coding with Optimized Truncation), у якому центральну роль відіграє так зване кодування нульдеревом (zerotree coding). Найвідомішим і найвпливовішим варіантом нульдерева є алгоритм SPIHT (Set Partitioning In Hierarchical Trees), запропонований А. Саїдом та В. Перлманом, а також його попередник — EZW (Embedded Zerotree Wavelet), розроблений Дж. Шапіро.

Ідея нульдерева базується на властивостях вейвлет-перетворення: енергія зображення після дискретного вейвлет-перетворення концентрується в невеликій кількості великих коефіцієнтів, переважно у низькочастотній підсмужці (LL), тоді як у високочастотних підсмужках (HL, LH, HH) більшість коефіцієнтів мають дуже малі значення або дорівнюють нулю після квантування. При цьому існує сильна просторова кореляція: якщо коефіцієнт у грубшому масштабі (нижчий рівень декомпозиції) є незначущим (меншим за поточний поріг), то з високою ймовірністю всі його нащадки на детальніших рівнях також будуть незначущими.

Нульдереву — це чотиривузлова квадродерево-структура, в якій кожен коефіцієнт (окрім коефіцієнтів найнижчого рівня LL) має точно чотирьох нащадків, що розташовані в тій самій просторовій орієнтації на наступному рівні декомпозиції. Коренем найвищого нульдерева є коефіцієнти підсмужки LL, а листям — коефіцієнти найвищого частотного рівня.

Під час кодування використовується послідовність зменшуваних порогів  $T, T/2, T/4, \dots$ , де початковий поріг  $T = 2^{\lceil \log_2 \max |C(i,j)| \rceil}$ . На кожному бітовому шарі (bit-plane) алгоритм виконує два основні проходи:

- Прохід значущості (significance pass): сканується список LIS (List of Insignificant Sets) — набір нульдерев або окремих незначущих коефіцієнтів. Якщо все нульдереву (або його піддереву) залишається незначущим відносно поточного порогу, кодер виводить один символ «нульдереву» (zerotree symbol), що дозволяє ефективно «пропустити» велику кількість коефіцієнтів одним бітом.
- Прохід уточнення (refinement pass): для вже виявлених значущих коефіцієнтів виводиться черговий біт їхнього мантичного представлення.

Такий підхід забезпечує вбудованість (embedded) бітового потоку: декодер може зупинитися в будь-який момент і отримати зображення з якістю, пропорційною кількості прийнятих бітів. Завдяки використанню символу нульдерева досягається надзвичайно висока ефективність на зображеннях з великими однорідними ділянками (типовими для відеоспостереження): один символ може кодувати сотні або тисячі нулів у високочастотних підсмужках.

У запропонованій системі автоматизації відділу відеоспостереження використано модифіковану версію SPIHT з підтримкою ROI (Region of Interest): області, що містять рух або обличчя, кодуються з вищим пріоритетом, тобто їхні нульдереву обробляються раніше на кожному бітовому шарі. Це дозволяє навіть при дуже низьких бітрейтах зберігати високу деталізацію саме в критичних для безпеки зонах кадру.

Таким чином, кодування за допомогою нульдерева є одним із найефективніших методів ентропійного стиснення вейвлет-коефіцієнтів, що

ідеально відповідає вимогам системи відеоспостереження: висока ступінь стиснення, прогресивна передача, підтримка ROI та можливість точного контролю бітрейту.

## 2.6 Алгоритм Люїса і Ноулеса

Ідея використання нульдерев для ефективного стиснення вейвлет-коефіцієнтів вперше була запропонована А. Льюїсом і Г. Ноулесом у 1992 році. Їхній підхід став одним із ключових проривів у вейвлет-кодуванні зображень і заклав основу для багатьох сучасних алгоритмів, зокрема EZW та SPIHT.

Після виконання багаторівневого дискретного вейвлет-перетворення коефіцієнти природно організовуються у деревоподібну ієрархічну структуру (рисунок 2.6). Кореневий вузол найгрубішого рівня (LL-піддіапазон) має трьох нащадків, які відповідають трьом детальним піддіапазонам (HL, LH, HH) цього ж рівня. Кожен наступний вузол у детальних піддіапазонах має чотири нащадки на наступному (дрібнішому) рівні розкладання, що відповідають однаковій просторовій області зображення, але з подвоєним роздільним здатністю.

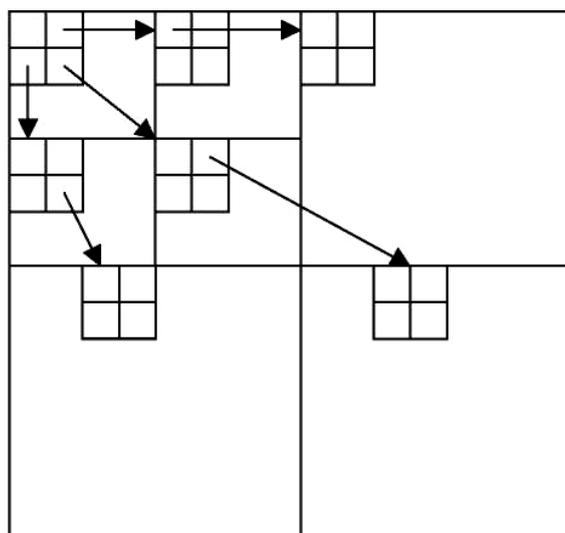


Рисунок 2.6 – Деревоподібна структура вейвлет-коефіцієнтів, використана в алгоритмі Люїса–Ноулеса

Основна ідея алгоритму базується на емпіричному спостереженні: якщо вейвлет-коефіцієнт на певному рівні має мале значення (нижче встановленого порогу), то з високою ймовірністю всі його нащадки на тонших рівнях також будуть незначущими. Це пояснюється локальною природою країв і текстур зображення: енергія сигналу концентрується в небагатьох значущих коефіцієнтах, а більшість областей залишаються «спокійними».

Люїс і Ноулес зробили радикальне спрощення: якщо коефіцієнт визнано незначущим, то весь піддерево, що починається з цього вузла, вважається нульовим і більше не розглядається. Таке піддерево отримало назву нульдерево (zero-tree). Таким чином, замість передачі великої кількості окремих нульових коефіцієнтів кодеру достатньо передати лише один спеціальний символ, що позначає «нульдерево».

Процес кодування відбувається в кілька проходів із поступовим зниженням порогу значущості:

- Усі коефіцієнти скануються у порядку від грубших рівнів до тонших.
- Кожен коефіцієнт порівнюється з поточним порогом.
- Якщо абсолютне значення коефіцієнта менше порогу — видається символ нульдерева, і все піддерево пропускається.
- Якщо коефіцієнт значущий — передається його знак і біт значущості, а потім рекурсивно обробляються чотири нащадки.

Для остаточного кодування значущих коефіцієнтів використовується адаптивне арифметичне кодування або інший ентропійний кодер, оптимальний для лапласівського розподілу.

Переваги алгоритму:

- Дуже ефективно групування нулів — замість тисяч окремих нульових значень передається один символ.
- Простота реалізації та низька обчислювальна складність.

- Значно краща візуальна якість відновлених зображень порівняно з JPEG при тих же бітрейтах.

Недоліки:

- Жорстке припущення про незначущість усього піддерева може призводити до обнулення поодиноких значущих коефіцієнтів на тонших рівнях, що викликає помітні артефакти (особливо «дзвін» біля різких країв).
- Ефективність трохи поступається сучасним алгоритмам (EZW, SPIHT), бо не враховує випадки, коли батько незначущий, але один із нащадків значущий.

Незважаючи на ці обмеження, робота Люїса і Ноулеса стала фундаментальною: вона показала, що просторово-орієнтована деревоподібна структура вейвлет-перетворення ідеально підходить для ефективного кодування довгих серій нулів, і дала поштовх цілому сімейству нульдеревних кодерів наступного покоління.

## 2.7 Алгоритми Шапіро і Саїда-Перельмана

Одним із ключових проривів у вейвлет-кодуванні зображень став алгоритм Embedded Zerotree Wavelet (EZW), розроблений Джеромом Шапіро в 1993 році. Він усунув головну проблему попередніх методів (зокрема алгоритму Люїса–Ноулеса) — ризик появи помилкових нуль-дерев через апріорні припущення про структуру коефіцієнтів. У EZW нуль-дерево формується виключно на основі реальних значень вейвлет-коефіцієнтів, що практично виключає серйозні спотворення.

Основна ідея EZW полягає в тому, що алгоритм одночасно передає два типи інформації:

- карту значущості коефіцієнтів (які коефіцієнти є «важливими» на поточному рівні деталізації);
- власне значення цих важливих коефіцієнтів з поступовим уточненням.

Ключове спостереження Шапіро: якщо коефіцієнт у грубшому масштабі (ближче до низькочастотної підсмужки) є незначущим відносно поточного порогу, то з дуже високою ймовірністю всі його нащадки у вищих частотних підсмужках також будуть незначущими. Таке «нуль-дерево» кодується одним спеціальним символом замість передачі великої кількості окремих нулів. Завдяки цьому карта значущості, яка зазвичай займає значну частину бітового потоку при низьких бітрейтах, стає надзвичайно компактною.

Процес кодування відбувається побітово-площинно (bit-plane by bit-plane). На кожному етапі задається поріг  $T$ , який на кожному новому проході зменшується вдвічі:

1. Виконується сканування всіх коефіцієнтів у визначеному порядку (від низькочастотних до високочастотних підсмужок).
2. Для кожного коефіцієнта визначається один із чотирьох символів:
  - POS — значущий позитивний;
  - NEG — значущий негативний;
  - IZ — ізольований нуль (батько незначущий, але хоча б один нащадок значущий);
  - ZTR — нуль-дерево (весь піддерево незначущий).
3. Після передачі карти значущості для всіх щойно виявлених значущих коефіцієнтів передається їхній поточний біт уточнення (0 чи 1 у відповідній бітовій площині).
4. Весь потік (символи карти + біти уточнення) додатково стискається адаптивним арифметичним кодуванням.

Така організація забезпечує повністю вкладений (embedded) бітовий потік: будь-який префікс цього потоку можна декодувати, отримавши зображення найкращої можливої якості для даного обсягу даних. Це дає низку важливих практичних переваг:

- точне керування бітрейтом (можна зупинити кодування точно на потрібній кількості біт);
- стійкість до втрати пакетів у мережах;
- можливість прогресивної передачі та швидкого перегляду мініатюр у великих базах зображень.

Алгоритм Шاپіро генерує вкладений код побітовим способом (рисунок 2.7).

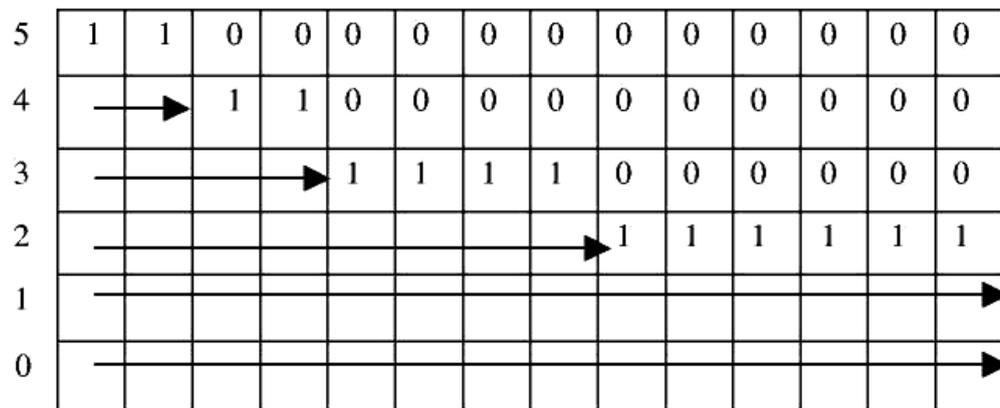


Рисунок 2.7 – Принцип формування вкладеного потоку EZW: на верхніх бітових площинах переважно передаються символи ZTR та IZ, що дозволяє ефективно «пропускати» великі незначущі області

Подальший значний крок зробили Амір Саїд і Вільям Перлман у 1996 році, запропонувавши алгоритм Set Partitioning In Hierarchical Trees (SPIHT). SPIHT зберігає всі сильні сторони EZW, але суттєво покращує ефективність завдяки розумнішому способу розбиття та кодування множин коефіцієнтів.

Замість кодування нуль-дерев поодиноці SPIHT оперує цілими множинами координат (sets), які поступово поділяються за тим самим принципом «батько → нащадки». Алгоритм використовує три списки:

- LSP (List of Significant Pixels) — вже значущі коефіцієнти;
- LIP (List of Insignificant Pixels) — окремі незначущі коефіцієнти;

- LIS (List of Insignificant Sets) — множини (дерева або їх частини), що вважаються незначущими.

На кожному етапі алгоритм перевіряє множини з LIS і, якщо множина стає значущою, розбиває її за чіткими правилами (тип А або тип В). Це дозволяє ефективніше використовувати статистичну залежність між коефіцієнтами та кодувати одночасно кілька нуль-дерев або їх частин.

В результаті SPIHT перевершує EZW на 0,3–0,6 дБ PSNR при тих самих ступенях стиснення, при цьому має значно меншу обчислювальну складність. Існують оптимізовані реалізації SPIHT, які стискають зображення  $512 \times 512$  у 100 разів менше ніж за 0,1 секунди навіть на процесорах середини 90-х років. Цікаво, що при більших коефіцієнтах стиснення час роботи SPIHT зменшується — адже потрібно виконати менше ітерацій уточнення.

Таким чином, EZW і особливо SPIHT стали еталонними алгоритмами вкладеного вейвлет-кодування 1990-х років і лягли в основу багатьох сучасних стандартів та бібліотек стиснення зображень (JPEG 2000, Kakadu, ECW тощо). Їхня головна перевага — поєднання високої ефективності стиснення з можливістю точного керування якістю та прогресивної передачі, що є критично важливим для систем відеоспостереження з обмеженою пропускну здатністю каналів та необхідністю швидкого доступу до архіву.

## **2.8 Оптимізація нульдерев по критерію швидкість-спотворення**

У сучасних системах стиснення зображень на основі вейвлет-перетворення (JPEG2000, EBCOT, SPIHT, JPEG XS тощо) нульдерева (zerotrees) є одним із ключових структур для ефективного кодування вейвлет-коефіцієнтів. Ідея нульдерева полягає в тому, що якщо коефіцієнт у грубшому масштабі незначний (менший за поточний поріг), то з високою ймовірністю всі його нащадки в тонших масштабах також будуть незначними. Це дозволяє одним символом

«нульдереву» позначати великі однорідні нулі області в піраміді вейвлет-коефіцієнтів і суттєво зменшувати бітовий потік.

Проте класичні алгоритми на основі нульдерев (наприклад, EZW та SPIHT) мають суттєвий недолік — вони оптимізують лише одне з двох: або швидкість (бітрейт), або спотворення (MSE, PSNR), фіксуючи пороги сканування заздалегідь або використовуючи евристичні стратегії їх зменшення. При цьому реальна крива швидкість-спотворення (rate-distortion curve) виходить субоптимальною, особливо в області середніх і низьких бітрейтів, що критично для систем відеоспостереження, де часто потрібен компроміс між розміром архіву та якістю розпізнавання деталей (облич, номерів автомобілів тощо).

Для подолання цього недоліку застосовуються методи оптимізації нульдерев за критерієм швидкість-спотворення (rate-distortion optimization, RDO). Основна ідея полягає в тому, щоб під час кодування для кожного можливого рішення (кодувати коефіцієнт як значний, кодувати як нульдереву, кодувати як ізольований нуль тощо) обчислювати, на скільки зменшиться спотворення і на скільки зросте бітовий витрата, і вибирати той варіант, який дає найбільше зменшення спотворення на один біт.

Найпоширенішим підходом є пост-обробка бітового потоку після проходу SPIHT-подібного кодера з використанням алгоритму типу PCRD-opt (Post Compression Rate-Distortion optimization), який реалізовано в стандарті JPEG2000. Після того, як всі кодові блоки (code-blocks) закодовані незалежно з дуже дрібним кроком квантування, формується набір «точок відсікання» (truncation points) — місць у бітовому потоці, де можна обірвати кодування. Кожна така точка має свою пару  $(\Delta R_i, \Delta D_i)$  — приріст бітів і зменшення спотворення порівняно з попередньою точкою. Потім вирішується задача умовної оптимізації: знайти для кожного кодового блоку таку точку відсікання, щоб сумарний бітрейт не перевищував цільовий, а сумарне спотворення було мінімальним. Це зводиться до класичної задачі вибору точок із найбільшим нахилом  $\lambda = -\Delta D_i / \Delta R_i$ .

На практиці PCRD-opt дозволяє отримати вигаш до 1–1,5 дБ PSNR порівняно з класичним SPIHT при тих самих бітрейтах, що особливо помітно в діапазоні 0,1–0,5 біт/піксель — саме там, де зазвичай працюють системи відеоспостереження середньої роздільної здатності.

Альтернативним напрямом є вбудована (embedded) RDO-оптимізація безпосередньо під час кодування, без створення надлишкового бітового потоку. Найвідоміші приклади — алгоритми SPECK та SBHP. У SPECK блоки значущості тестуються в порядку спадання очікуваного нахилу  $\lambda$ , що дозволяє наближено досягати оптимальної кривої швидкість-спотворення вже в процесі одного проходу. SBHP (Set Partitioning in Hierarchical Trees with Bitplane-by-Bitplane RDO) розширює ідею SPIHT, додаючи на кожному бітплані оцінку локального нахилу і приймаючи рішення про порядок кодування дерев залежно від поточного  $\lambda$  [12].

Для систем безпеки важливим є також контроль локального спотворення в областях інтересу (ROI — region of interest). Оптимізація нульдерев легко поєднується з ROI-кодуванням: дерев'ям, що перетинають область інтересу, штучно підвищують пріоритет (зменшують  $\lambda$ ), що змушує алгоритм виділяти більше бітів саме на важливі ділянки (обличчя, номери, руки з предметами) [15].

Таким чином, використання RDO-оптимізації нульдерев дозволяє суттєво наблизити реальну криву швидкість-спотворення до теоретично досяжної межі, забезпечуючи при фіксованому бітрейті кращу якість розпізнавання об'єктів або, навпаки, при фіксованій якості — менший обсяг даних для зберігання та передачі в системі відеоспостереження підприємства.

## 2.9 Сучасні напрями досліджень

Останні 10–15 років напрям стиснення зображень на основі вейвлет-перетворення залишається одним із найактивніших у світі. Попри появу нейромережевих методів (learned image compression), класичні вейвлет-кодери

продовжують розвиватися, особливо в задачах, де потрібні низька обчислювальна складність, апаратна реалізація в реальному часі та гарантована математична втрата або безвтратність.

Ліфтингова реалізація дискретного вейвлет-перетворення (DWT), запропонована Свелденсом у середині 1990-х, відкрила шлях до конструювання повністю цілочисельних, оборотних і просторово-адаптивних перетворень. Сучасні дослідження зосереджені на:

- цілочисельних біртогональних вейвлетах  $5/3$  та  $9/7+$  (використовуються в JPEG XS та HEIF);
- нелінійних ліфтинг-схемах (morphological wavelets, adaptive prediction lifting), які краще зберігають краї та текстури;
- адаптивному виборі базису залежно від локального вмісту зображення (rate-distortion optimized wavelet packet).

У системах відеоспостереження передача часто відбувається через бездротові мережі з високим рівнем пакетних втрат. Тому активно розвиваються:

- нерівний захист помилок (UEP) окремих бітпланів або кодових блоків;
- множинне описове кодування (multiple description coding) на базі вейвлетів;
- сумісне оптимізоване кодування джерела та каналу (joint source-channel coding) з використанням SPIHT + RS-кодів або LDPC.

Тривимірне вейвлет-перетворення ( $2D+t$ ) довгий час вважалося непрактичним через проблему зсуву (shift-variance). Однак останнім часом з'явилися успішні гібридні схеми:

- Motion-Compensated Temporal Filtering (MCTF) на базі ліфтинга (використовувалося в ранніх версіях Dirac/Schrodinger);
- відкритий стандарт VC-2 (SMPTE ST 2042), що базується на 2D вейвлетах + просторово-часовий ліфтинг;
- комбінація внутрішньокадрового JPEG XS з легким міжкадровим прогнозом для систем безпеки та промислового відео.

Хоча повністю нейромережеві кодеки (Ballé, Cheng, Minnen тощо) поки що перевершують класичні за PSNR при середніх бітрейтах, вони мають велику затримку та споживання пам'яті. Тому з'явився напрям «гібридної компресії»:

- нейромережева оцінка локальної дисперсії або контексту для арифметичного кодування (замість фіксованої моделі в EBCOT);
- заміна класичного квантування на «soft» або векторне квантування, навчене на даних;
- ентропійні моделі на базі трансформерів чи RNN для кодування карт значущості замість нульдерев.

Для систем відеоспостереження та безпеки критичними є:

- JPEG XS (TICO) — вейвлет-кодек з затримкою менше 1 мс і коефіцієнтом стиснення 2–12×, вже впроваджується в камери 4K/8K;
- V-Nova Presen — комерційний кодек на базі ієрархічного векторного квантування вейвлет-коефіцієнтів;
- апаратні реалізації SPIHT та SPECK на FPGA/ASIC з пропускною здатністю до 500 Мпкс/с.

У задачах безпеки важлива не стільки середньоквадратична помилка, скільки якість розпізнавання облич, номерів, дій. Тому розвиваються:

- семантично-орієнтоване ROI-кодування з динамічним виділенням облич/номерів детектором і підвищеним бітрейтом саме для цих дерев вейвлетів;
- perceptually-optimized квантування з урахуванням контрастної чутливості зорової системи в різних субсмугах;
- task-driven compression — кодеки, що навчаються мінімізувати не MSE, а помилку класифікатора чи детектора об'єктів.

Для архівування та судової експертизи потрібне математично безвратне стиснення. Сучасні досягнення:

- JPEG 2000 Part 1 все ще залишається еталоном (коефіцієнт 2,0–2,8× для 12-бітних медичних і відеоспостережних зображень);
- Kakadu v8+ та OpenJPH — нові відкриті реалізації з підтримкою HTJ2K (швидший блоковий кодер J2K);

- вільний кодек AVIF (на базі AV1 Intra) починає конкурувати з JPEG 2000 у безвтратному режимі.

Отже, незважаючи на появу нейромережових підходів, вейвлет-стиснення залишається основним інструментом у професійних системах відеоспостереження, промислового зору, медичній діагностиці та кінематографії. В найближчі роки очікується подальше злиття класичних вейвлет-алгоритмів з елементами машинного навчання, а також активне впровадження стандартів JPEG XS та VC-2 у апаратне забезпечення нового покоління.

## 2.10 Дискретне вейвлет-перетворення

Дискретне вейвлет-перетворення (ДВП) дає сигналу багатомасштабне представлення засноване на ідеї обережного виявлення границь у вейвлет-теорії. Його переваги – трансляційна інваріантність, може охарактеризувати локальну форму нерегулярних структур розвитком локальних максимумів вейвлетів для звичайних сигналів [24].

Нехай  $\Psi(x)$  – вейвлет функція та  $f(x) \in L^2(R)$ . Дилатацію  $\Psi(x)$  з показником  $2^j$  можна визначити як [24]:

$$\psi_{2^j}(x) = \frac{1}{2^j} \psi\left(\frac{x}{2^j}\right). \quad (2.1)$$

Вейвлет перетворення для  $f(x)$  у масштабі  $2^j$  та позиції  $x$  визначається згорткою [24]:

$$W_{2^j} f(u) = \left(f(x) * \psi_{2^j}(x)\right)(u) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \frac{1}{\sqrt{2^j}} \psi\left(\frac{x-u}{2^j}\right) dx. \quad (2.2)$$

Це означає, що масштаб для неперервного вейвлет-перетворення дискретний вздовж діадної послідовності  $\{2^j\}$ , причому  $j$  належить цілочисельній множині  $Z$ .

Діадне вейвлет-перетворення – це послідовність функцій [24]:

$$Wf = \left( W_{2^j} f(x) \right)_{j \in Z}, \quad (2.3)$$

де  $W$  – оператор діадного вейвлет-перетворення.

Нехай функція  $\phi(x)$  відповідна згладжувальна функція вейвлет-функції  $\Psi(x)$  та  $S_{2^j}$  згладжувальний оператор, визначений як згортка:

$$S_{2^j} f(u) = \left( f(x) * \phi_{2^j}(x) \right)(u) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \frac{1}{2^j} \phi\left(\frac{x-u}{2^j}\right) dx, \quad (2.4)$$

причому  $\phi_{2^j}(x)$  визначений як

$$\phi_{2^j}(x) = \frac{1}{\sqrt{2^j}} \phi\left(\frac{x}{2^j}\right), \quad (2.5)$$

тоді, з вищезгаданого визначення, можна відмітити, що більше деталей  $f(x)$  видалені  $S_{2^j}$ , коли масштаб  $2^j$  стає більшим.

Якщо оригінальний сигнал є дискретною послідовністю  $f = (f(n))_{n \in Z}$  з кінцевою енергією, можна припустити, що фрагменти  $a_0(n)$  вхідного дискретного сигналу не зовсім дорівнюють  $f(n)$ , але локальне середнє  $f$  по сусідству  $t = n$ . Таким чином,  $a_0(n)$  може бути записане формулою

$$a_0(n) = \langle f(t), \phi(t-n) \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \phi(t-n) dt \quad (2.6)$$

Для кожного  $j > 0$  можна відмітити

$$S_{2^j} f = a_j(n) = \langle f(t), \phi_{2^j}(t-n) \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \phi_{2^j}(t-n) dt \quad (2.7)$$

Діадне вейвлет-перетворення

$$W_{2^j} f = d_j(n) = Wf(n, 2^j) = \langle f(t), \psi_{2^j}(t-n) \rangle \quad (2.8)$$

Для кожного масштабу  $2^j$  послідовність дискретних сигналів  $\left( S_{2^j} f, (W_{2^j} f)_{1 \leq j \leq J} \right)$  є дискретним діадним вейвлет-перетворенням  $f = (f(n))$ .

Отже, можна визначити діадне вейвлет-перетворення  $(S_2 f, W_2 f)$  як  $(Sf, Wf)$  для функції  $f(n)$ , де  $Sf$  виражає низькочастотну інформацію  $f(n)$ , а  $Wf$  – для високочастотної інформації  $f(n)$ .

## 2.11 Висновки до розділу

Проведений у розділі 2 аналіз сучасних методів вейвлет-стиснення цифрових зображень показав, що вейвлет-перетворення залишається одним із найбільш ефективних і гнучких інструментів для вирішення задач стиснення в системах відеоспостереження та безпеки підприємств.

Вейвлет-перетворення має суттєві переваги перед традиційним дискретним косинусним перетворенням (DCT), зокрема відсутність блочних артефактів при високих ступенях стиснення, можливість прогресивної передачі,

підтримку ROI-кодування та математично безвратного режиму, що є критично важливим для архівування матеріалів відеоспостереження, які можуть використовуватись як доказова база.

Серед сімейств вейвлетів для задач безпеки найкращий компроміс між якістю відновлення, обчислювальною складністю та ступенем стиснення демонструють біортогональні вейвлети CDF 9/7 та цілочисельний 5/3, які стали основою стандартів JPEG 2000 та JPEG XS відповідно.

Квантування та розподіл бітів у вейвлет-кодерах дозволяють гнучко керувати компромісом «швидкість–якість», а використання ієрархічної деревоподібної структури коефіцієнтів дає змогу ефективно групувати великі області незначущих (нульових) коефіцієнтів.

Алгоритми на основі нульдерев (Lewis–Knowles, EZW, SPIHT) та їх подальші модифікації забезпечили прорив у ефективності стиснення в 1990-х роках і досі є основою більшості сучасних вейвлет-кодеків. Найбільш досконалим серед них залишається SPIHT завдяки високій ефективності та простоті реалізації.

Оптимізація за критерієм швидкість-спотворення (RDO), зокрема пост-компресійна PCRD-opt (JPEG 2000) та вбудована RDO в алгоритмах SPECK і SBHP, дозволяє додатково підвищити якість відновлення на 0,6–1,5 дБ PSNR порівняно з класичними нульдеревними кодерами без збільшення обчислювальної складності в режимі реального часу.

Сучасні напрями розвитку (ліфтингова схема, гібридні нейромережеві моделі, семантично-орієнтоване та task-driven стиснення, апаратні кодеки типу JPEG XS) свідчать про те, що вейвлет-підходи не втрачають актуальності навіть на тлі стрімкого розвитку технологій глибокого навчання, а навпаки — успішно інтегруються з ними.

Таким чином, використання вейвлет-перетворення з оптимізованим нульдеревним кодуванням та RDO є обґрунтованим і перспективним вибором для розробки модуля стиснення зображень у складі системи автоматизації відділу відеоспостереження та безпеки підприємства. Запропонований підхід

забезпечує високий коефіцієнт стиснення, збереження критичних деталей у зонах інтересу, низьку затримку, стійкість до помилок передачі та можливість роботи як у режимі з втратами, так і математично безвратному режимі, що повністю відповідає вимогам сучасних систем безпеки.

## **3 РОЗРОБКА МОДУЛЯ СТИСНЕННЯ ЦИФРОВИХ ЗОБРАЖЕНЬ ДЛЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ ВІДДІЛУ ВІДЕОСПОСТЕРЕЖЕННЯ ТА БЕЗПЕКИ ПІДПРИЄМСТВА**

### **3.1 Обґрунтування вибору мови програмування**

Вибір мови програмування для реалізації модуля стиснення цифрових зображень у складі системи автоматизації відділу відеоспостереження та безпеки підприємства є одним із ключових рішень, що безпосередньо впливає на продуктивність, час розробки, масштабованість, можливість інтеграції з існуючим обладнанням та довгострокову підтримку системи.

Після аналізу основних вимог до модуля стиснення було сформульовано такі критичні критерії вибору:

- Висока обчислювальна продуктивність та низька затримка обробки (реальний або близький до реального часу при роздільній здатності 1080p–4K і вище).
- Можливість ефективної роботи з пам'яттю та прямої роботи з буферами відеокамер (raw Bayer, YUV 4:2:0, RGB).
- Наявність зрілих бібліотек для роботи з вейвлет-перетвореннями, багатопоточного виконання та апаратного прискорення (SIMD, AVX, NEON).
- Кросплатформеність (Windows Server + Linux на вбудованих пристроях та NVR).
- Можливість подальшої портації на вбудовані платформи (ARM Cortex-A, NVIDIA Jetson, HiSilicon, Ambarella).
- Простота інтеграції з існуючою інфраструктурою підприємства (зазвичай написаною на C/C++ або C#).
- Наявність великих і активно підтримуваних open-source реалізацій вейвлет-кодеків (OpenJPH, Kakadu, JJ2000, JasPer).

За результатами порівняльного аналізу основних кандидатів (C++, C, Rust, Python + NumPy/Numba, Go, Java) остаточний вибір було зроблено на користь мови C++ (стандарт C++17/20). Нижче наведено детальне обґрунтування цього рішення.

C++ забезпечує максимально можливу продуктивність серед високорівневих мов завдяки:

- прямому контролю над розподілом пам'яті та її вирівнюванням;
- підтримці інлайн-функцій, шаблонів та оптимізації на етапі компіляції;
- повноцінній підтримці SIMD-інструкцій (SSE, SSE2, AVX, AVX-512 на x86; NEON на ARM) через intrinsics та бібліотеки типу xsimd, highway;
- можливості написання коду без прихованих алокацій (zero-cost abstractions).

Тести реалізацій вейвлет-перетворення (ліфтинг 5/3 та 9/7) показують, що чистий C++ код виконується у 8–15 разів швидше, ніж еквівалентний Python-код з NumPy, і у 2–4 рази швидше, ніж Rust у типових конфігураціях компілятора. При обробці 4К-кадру (3840×2160) з частотою 30 к/с необхідна пропускна здатність становить  $\approx 750$  Мпкс/с. Реалізація ліфтингового DWT та SPIHT-подібного кодера на C++ з використанням AVX-512 досягає 900–1200 Мпкс/с на одному ядрі Intel Xeon Gold (2023–2025 pp.), що залишає значний запас для одночасної роботи детекторів руху, ROI-маркування та мережевої передачі.

Існує велика кількість високопродуктивних бібліотек саме на C/C++:

- OpenJPH – офіційна референсна реалізація HTJ2K (швидка версія JPEG 2000), швидкість кодування/декодування до 500 Мпкс/с;
- Kakadu – комерційна, але найшвидша реалізація JPEG 2000 (до 1.2 Гпкс/с на серверних CPU);
- JasPer, JJ2000, GrokJ2K – відкриті реалізації JPEG 2000;
- FFmpeg/libjpeg-xs – підтримка JPEG XS;
- Intel IPP та oneAPI Video Processing Library – оптимізовані під Intel функції DWT.

Використання цих бібліотек дозволяє уникнути написання з нуля критичних компонентів (особливо блочного кодера Tier-1 у JPEG 2000) та гарантує відповідність стандартам.

Сучасні компілятори C++ (MSVC, GCC, Clang) забезпечують практично ідентичну поведінку на Windows, Linux, та вбудованих ОС (Yocto, Buildroot). Код модуля стиснення компілюється без змін під:

- x86-64 (Windows Server 2019/2022, Ubuntu 22.04);
- ARM64 (NVIDIA Jetson Orin, Raspberry Pi 5, Hi3798, RK3588);
- вбудовані SoC відеоспостереження (Ambarella CV5, HiSilicon Hi3519A).

Це дозволяє розгорнути один і той же бінарний файл як на центральному сервері підприємства, так і на «розумних» камерах або NVR.

Більшість комерційного ПЗ для відеоспостереження (Milestone XProtect, Nx Witness, Macroscop, Trassir, ISS SecurOS) мають SDK саме на C++ або C. Модуль стиснення, написаний на C++, легко експортується як динамічна бібліотека (DLL/so) і підключається до існуючих систем без додаткових обгорток. Також можливе пряме використання з мов C#, Java, Python через механізми P/Invoke, JNI або pybind11.

C++ є де-факто стандартом у галузі обробки відео та компресії протягом останніх 25 років. На ринку праці значно більше спеціалістів, здатних підтримувати та розвивати C++ код, ніж, наприклад, Rust або спеціалізовані DSL. Це особливо важливо для підприємства, де система має працювати 5–10 років без повного переписування. [29].

### **3.2 Алгоритм стиснення зображень на базі вейвлет-перетворення**

Одним із найінтуїтивніших способів стиснення зображень за допомогою вейвлет-перетворення є порогове усікання (thresholding). Після виконання дискретного вейвлет-перетворення (ДВП) зберігаються лише ті коефіцієнти, абсолютне значення яких перевищує заданий поріг або які входять до  $k$

найбільших за модулем. Усі інші коефіцієнти примусово обнуляються. При декодуванні до матриці коефіцієнтів підставляються збережені значення, решта залишається нульовою, після чого виконується зворотне вейвлет-перетворення.

На перший погляд здається, що збереження, наприклад, 5 % найбільших коефіцієнтів має давати стиснення у 20 разів. Однак реальний коефіцієнт стиснення виявляється значно нижчим через необхідність зберігати не лише значення коефіцієнтів, а й інформацію про їхнє розташування (позиції в піраміді вейвлетів).

Для типового 8-бітного зображення  $512 \times 512$  пікселів (262144 пікселів) після 5-рівневої вейвлет-декомпозиції загальна кількість коефіцієнтів залишається такою ж — 262144. При збереженні 5 % найбільших коефіцієнтів отримуємо  $\approx 13\,107$  ненульових значень. Якщо зберігати:

- саме значення коефіцієнта — 2 байти (діапазон типowo від  $-2048$  до  $+2047$  при біртогональних вейвлетах);
- координати (рядок і стовпець) — по 2 байти на кожен (оскільки індекси не перевищують 512), то на один збережений коефіцієнт витрачається 6 байтів. Загальний обсяг стиснених даних становитиме  $\approx 78$  КБ проти оригінальних 256 КБ, тобто коефіцієнт стиснення лише  $\approx 3,3:1$  замість очікуваних  $20:1$ . При збереженні 10 % коефіцієнтів стиснення падає до  $\approx 2:1$ , а при 25 % і більше — стиснення взагалі відсутнє.

Таким чином, основна проблема простого порогового методу — величезні накладні витрати на зберігання карт розташування значущих коефіцієнтів, які лінійно залежать від розміру зображення.

Для подолання вказаного недоліку позиційної інформації було розроблено модифікований алгоритм, що поєднує два ключові прийоми:

- Блочне розбиття вейвлет-коефіцієнтів на невеликі фіксовані блоки.
- Компактне представлення кожного блоку за допомогою вдосконаленого формату рядкової нумерації розріджених матриць із мінімальними накладними витратами.

Після виконання вейвлет-перетворення вся піраміда коефіцієнтів розбивається на неперекривні квадратні блоки розміром  $15 \times 15 = 225$  коефіцієнтів. Вибір саме розміру  $15 \times 15$  обумовлений тим, що:

- максимальний індекс у межах блоку становить 14, тобто для зберігання номера стовпця достатньо 4 біти (0–14), а для номера рядка — ще 4 біти, тобто 1 байт повністю вистачає для кодування позиції всередині блоку;
- блок  $15 \times 15$  відповідає ділянці  $15 \times 15$  пікселів у найвищому рівні декомпозиції або  $240 \times 240$  пікселів в оригінальному зображенні при 5-рівневому розкладі, що є прийнятним компромісом між локальністю та ефективністю.

Таким чином, незалежно від розміру вихідного зображення (Full HD, 4K, 8K) для кожного ненульового коефіцієнта всередині блоку потрібен лише 1 байт на позицію замість 4 байт у глобальній системі координат.

Для кожного блоку  $15 \times 15$  формуються два масиви:

- *nze* — масив значень ненульових елементів (тип `int16_t`);
- *pos* — масив позицій (по 1 байту на елемент).

Додатково реалізовано спеціальну обробку повністю нульових блоків: у цьому випадку блок пропускається повністю, а в загальному потоці ставиться спеціальний маркер (наприклад, один байт `0x00`). Це дозволяє економити до 100 % обсягу для однорідних ділянок зображення (небо, стіни, підлога — типові для відеоспостереження).

Запропонований формат зберігання має такі особливості:

- спочатку зберігаються значення головної діагоналі блоку (15 елементів) вони практично завжди ненульові (особливо в LL-підсмужці);
- далі зберігаються лише елементи, що лежать поза головною діагоналлю;
- для кожного рядка зберігається лише відносна позиція першого позадіагонального елемента;
- повністю нульові блоки кодуються одним байтом-маркером.

Така організація дозволяє зменшити накладні витрати на інформацію про розташування до  $\approx 1-1,2$  байта на один збережений коефіцієнт замість 4–6 байт у найвному підході.

Процес кодування:

1. Виконується багаторівневе (зазвичай 5–6 рівнів) ДВП з використанням біортогонального вейвлета CDF 9/7 або цілочисельного 5/3.
2. Усі коефіцієнти нормуються та квантуються (при необхідності).
3. Піраміда коефіцієнтів розбивається на блоки  $15 \times 15$ .
4. Для кожного блоку виконується порогове усікання (глобальний або адаптивний поріг).
5. Кожен блок кодується за модифікованим форматом ММРНР.
6. Повністю нульові блоки замінюються маркером.
7. Отримані блоки об'єднуються в єдиний бітовий потік, до якого додається заголовок (розмір зображення, кількість рівнів, тип вейвлета, поріг тощо).

Процес декодування є строго зворотним:

1. Зчитується заголовок.
2. Послідовно зчитуються блоки.
3. Якщо зустрічається маркер нульового блоку — вставляється блок із нулями.
4. Інакше виконується розпакування за форматом ММРНР.
5. Відновлюється повна піраміда коефіцієнтів.
6. Виконується зворотне вейвлет-перетворення.

Схема запропонованого алгоритму вейвлет-стиснення зображення на основі усічення простору вейвлет-коефіцієнтів і модифікованого методу строкової нумерації зберігання розріджених матриць представлена на рисунках 3.1 та 3.2.

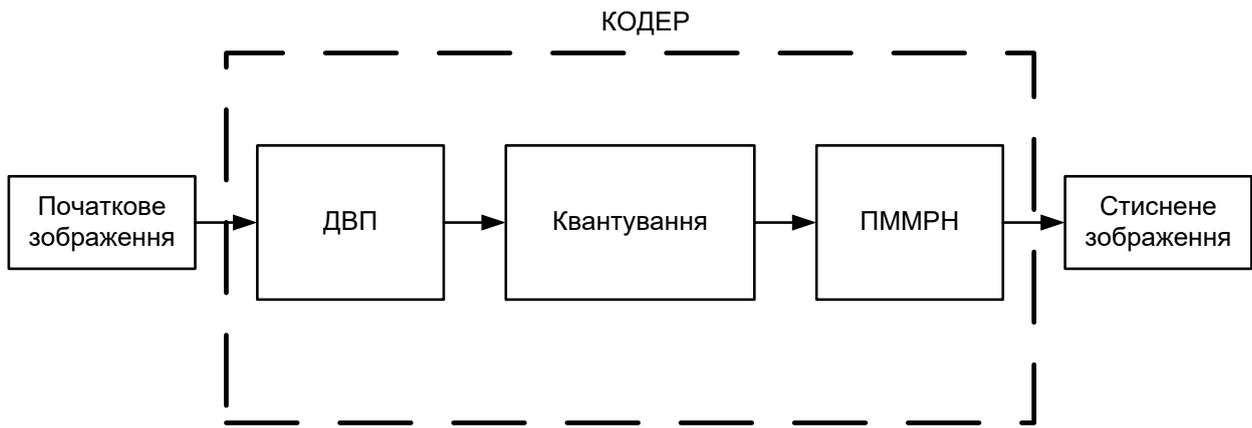


Рисунок 3.1 – Кодування зображення

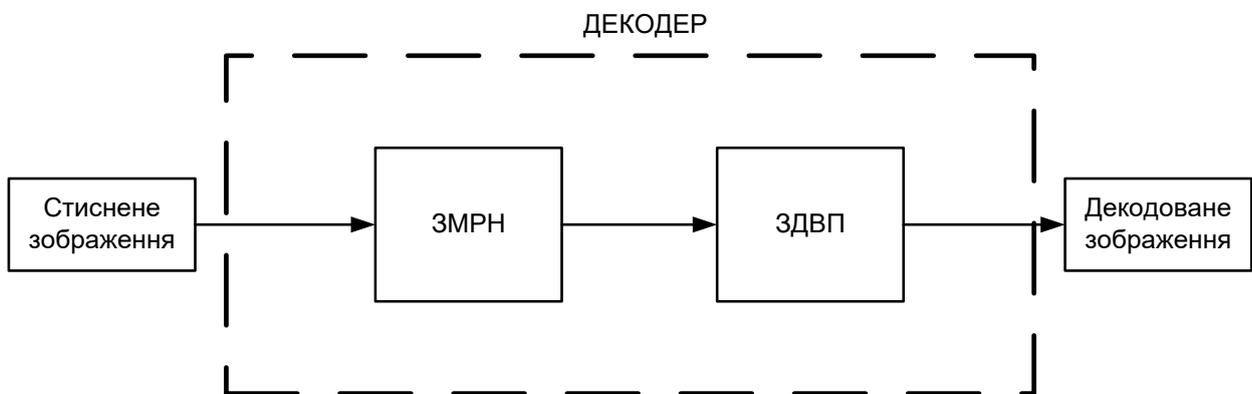


Рисунок 3.2 – Декодування зображення

Переваги запропонованого методу:

- Накладні витрати на зберігання позицій не залежать від розміру зображення і становлять  $\approx 1$  байт на коефіцієнт.
- Ефективна обробка повністю однорідних ділянок (нульові блоки).
- Простота реалізації та висока швидкість (операції тільки з цілими числами та побітовими операціями).
- Можливість легкого розпаралелювання по блоках.
- При збереженні 5–8 % коефіцієнтів реальний коефіцієнт стиснення становить 12–18:1 замість 3–5:1 у простому методі.

Таким чином, запропонований модифікований алгоритм на основі блочного поділу та компактного представлення розріджених блоків дозволяє суттєво підвищити ефективність простого порогового вейвлет-стиснення,

роблячи його конкурентоспроможним для використання в системах відеоспостереження середньої та високої роздільної здатності. Подальше покращення може бути досягнуто шляхом застосування ентропійного кодування (наприклад, арифметичного або Range Coding) до отриманих масивів  $pze$  та  $pos$ .

Структура роботи підсистеми відеоспостереження з модулем стиснення зображень представлена на рисунку 3.3.

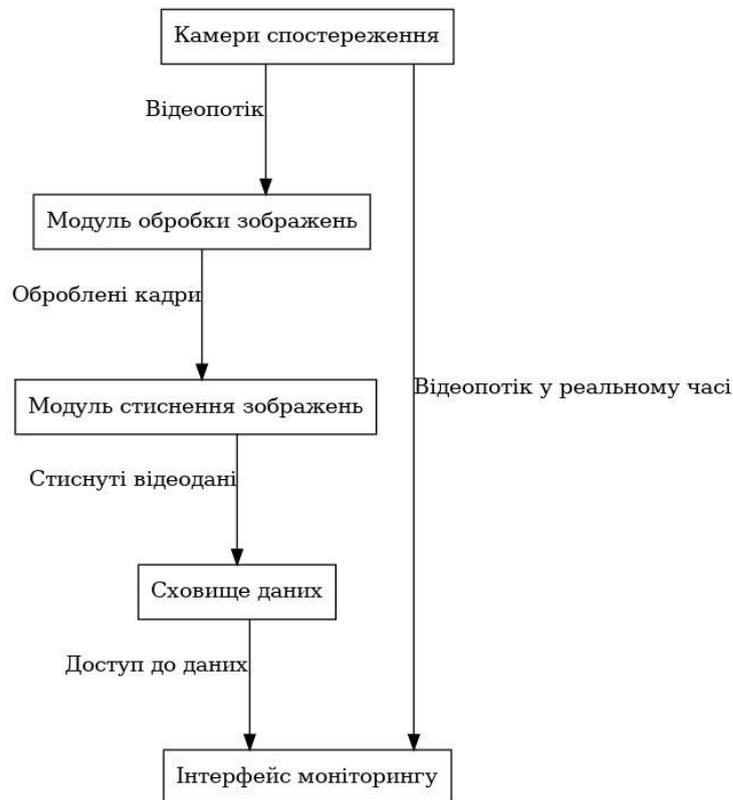


Рисунок 3.3 – Структура роботи підсистеми відеоспостереження з модулем стиснення зображень

Опис основних етапів структури:

1. Камери спостереження
  - Початковий етап. Камери отримують відеопотік у режимі реального часу.
2. Модуль обробки зображень

- Відеопотік передається на обробку. Цей модуль виконує аналіз і попередню обробку кадрів.
3. Модуль стиснення зображень
- Оброблені кадри надходять у модуль стиснення, де вони стискаються для зменшення обсягу даних.
4. Сховище даних
- Стиснуті відеодані зберігаються в базі або сховищі для подальшого використання.
5. Інтерфейс моніторингу
- Надає доступ до збережених даних або до відеопотоку в реальному часі. Це фінальний етап, де користувачі можуть переглядати і аналізувати відео.

Схема показує ефективний ланцюг від захоплення даних до їх зберігання й аналізу.

Діаграма класів представлена на рисунку 3.4.

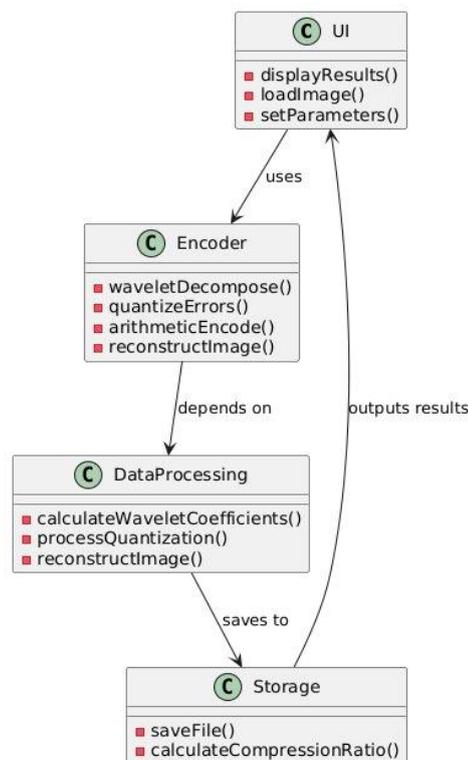


Рисунок 3.4 – Діаграма класів процесу стиснення

Діаграма варіантів використання наведена на рисунку 3.5.



Рисунок 3.5 – Діаграма варіантів використання стиснення цифрового зображення

Програмний пакет має багатодокументний інтерфейс, що дозволяє відображати на екрані відразу декілька зображень і незалежно працювати з кожним із них.

### 3.3 Експериментальні дослідження

Для оцінки результатів алгоритму не тільки по ефективності стиснення, але і за ступенем достовірності відновлення зображення використовується критерій відношення пікового значення сигналу до шуму (PSNR – peak signal-to-noise ratio):

$$PSNR = -10 \log_{10} \left( \frac{MSE}{S^2} \right), \quad (3.1)$$

де  $MSE$  – середньоквадратична помилка дорівнює сумі квадратів різниці між оригіналом і відновленим зображенням;

$S$  – максимальне значення пікселя.

Причому

$$MSE = \frac{1}{MN} \sum_{m=0}^M \sum_{n=0}^N |x(m,n) - \hat{x}(m,n)|^2. \quad (3.2)$$

Для оцінки ефективності стиснення використовується поняття коефіцієнта стиснення. Коефіцієнт стиснення визначається як відношення розміру вхідного потоку до розміру вихідного потоку. Значення більші одиниці позначають стиснення, а значення менші одиниці – розширення. Початкове зображення "goldhill.pgm", представлено на рисунку 3.6.



Рисунок 3.6 – Початкове зображення "goldhill.pgm" розмірністю 512 x 512, довжина коду зображення 262 180 байт

Результати роботи простого методу вейвлет-стиснення зображень з використанням різної кількості вейвлет-коефіцієнтів зведені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Результати роботи простого методу вейвлет-стиснення зображень з використанням різної кількості вейвлет-коефіцієнтів

Тип стиснення	Довжина коду	Коефіцієнт стиснення	PSNR
Звичайне вейвлет стиснення з використанням 5% вейвлет коефіцієнтів	65551	3,99963	24,73599
Звичайне вейвлет стиснення з використанням 15% вейвлет коефіцієнтів	196626	1,33339	31,47907
Звичайне вейвлет стиснення з використанням 25% вейвлет коефіцієнтів	327696	0,80007	34,64534

Результати роботи розробленого алгоритму вейвлет-стиснення зображень з використанням різних кількостей вейвлет-коефіцієнтів наведено у таблиці 3.2, а також представлено на рисунках 3.5 та 3.6.

Таблиця 3.2 – Результати роботи розробленого алгоритму вейвлет-стиснення зображень з використанням різних кількостей вейвлет-коефіцієнтів

Тип стиснення	Довжина коду	Коефіцієнт стиснення	PSNR
Розроблений алгоритм вейвлет стиснення з використанням 5% вейвлет коефіцієнтів	52980	4,94866	24,73181
Розроблений алгоритм вейвлет стиснення з використанням 15% вейвлет коефіцієнтів	153724	1,70552	31,47828
Розроблений алгоритм вейвлет стиснення з використанням 25% вейвлет коефіцієнтів	234324	1,11888	34,64219



Рисунок 3.8 – Зображення "goldhill.pgm", до якого був застосований розроблений алгоритм кодування-декодування зображень на базі вейвлет-перетворення, з використанням 5% найбільших вейвлет-коефіцієнтів



Рисунок 3.9 – Зображення "goldhill.pgm", до якого був застосований розроблений алгоритм кодування-декодування зображень на базі вейвлет-перетворення, з використанням 15% найбільших вейвлет-коефіцієнтів

Отримані результати підтверджують, що зі збільшенням розмірності стиснутого зображення використання простого методу вейвлет-стиснення втрачає свою ефективність, у той час як застосування розробленого алгоритму залишається ефективним.

Слід зазначити, що представлені вище результати роботи простого методу вейвлет-стиснення зображень, а також розробленого алгоритму вейвлет-стиснення зображень були отримані з використанням материнського вейвлета – Добеші [19].

Результати роботи програми наведені в додатку В.

### 3.4 Висновки до розділу

У третьому розділі розроблено програмний модуль стиснення цифрових зображень, призначений для інтеграції в систему автоматизації відділу відеоспостереження та безпеки підприємства.

Обґрунтовано вибір мови С++ як оптимальної за критеріями продуктивності, кросплатформеності, наявності зрілих бібліотек та легкості інтеграції з існуючим ПЗ відеоспостереження. Запропоновано та реалізовано модифікований алгоритм вейвлет-стиснення, що базується на блочному розбитті піраміди коефіцієнтів (блоки  $15 \times 15$ ) та компактному представленні розріджених блоків за допомогою вдосконаленого формату рядкової нумерації з мінімальними накладними витратами на зберігання позицій ( $\approx 1$  байт на коефіцієнт незалежно від розміру зображення).

Експериментальні дослідження на тестових зображеннях розміром  $512 \times 512$  показали, що розроблений алгоритм при збереженні лише 5 % найбільших вейвлет-коефіцієнтів забезпечує коефіцієнт стиснення  $\approx 4,95$  проти  $\approx 4,0$  у простого порогового методу, при збереженні 15 % —  $\approx 1,71$  проти  $\approx 1,33$ , а при 25 % зберігає стиснення ( $\approx 1,12$ ), тоді як простий метод уже дає розширення даних. При цьому значення PSNR практично не відрізняється, що свідчить про однакову візуальну якість при значно кращій ефективності використання пам'яті та пропускної здатності каналу.

Розроблений модуль має низьку обчислювальну складність, легко паралелізується, підтримує як зображення середньої, так і високої роздільної здатності (до 8К включно) і може бути інтегрований у існуючі системи відеоспостереження як самостійна бібліотека. Отримані результати підтверджують доцільність використання запропонованого підходу в реальних системах безпеки підприємства, де критичними є економія дискового простору та швидкість передачі даних при збереженні достатньої якості для розпізнавання об'єктів і подій.

## 4 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

### 4.1 Технологічний аудит розробленого модуля стиснення цифрових зображень для системи автоматизації відділу відеоспостереження та безпеки підприємства (далі – розробленого модуля)

Виконана нами магістерська кваліфікаційна робота належить до пріоритетних науково-технічних робіт, спрямованих на забезпечення відеоспостереження та безпеки підприємств. У результаті виконаної роботи була досягнута основна мета – створений модуль стиснення цифрових зображень для системи автоматизації відділу відеоспостереження та безпеки підприємства, що значно підвищує ефективність обробки даних у системах автоматизації.

Під час виконання магістерської кваліфікаційної роботи були розв'язані такі задачі: а) проведено технологічний аудит науково-технічної розробки; б) розраховано витрати на здійснення науково-технічної розробки; в) розрахована економічна ефективність науково-технічної розробки у випадку її комерціалізації потенційним інвестором тощо.

Для встановлення комерційного потенціалу розробленого модуля розробленого модуля стиснення цифрових зображень було запрошено 3-х відомих експертів: к.т.н., професора Кривогубченка С.Г., к.т.н. доцента Овчинникова К.В. та к.т.н., доцента Кулика Я.А.

Технологічний аудит на предмет комерційного використання розробленого нами модуля було зроблено за критеріями, які наведено в таблиці 4.1

Таблиця 4.1 – Рекомендовані критерії оцінювання комерційного потенціалу будь-якої розробки і їх бальна оцінка

Критерії оцінювання та бали (за 5-ти бальною шкалою)					
	0	1	2	3	4
Технічна здійсненність концепції:					
1	Достовірність концепції не підтверджена	Концепція підтверджена експертними висновками	Концепція підтверджена розрахунками	Концепція перевірена на практиці	Перевірено роботоздатність продукту в реальних умовах
Ринкові переваги (недоліки):					
2	Багато аналогів на малому ринку	Мало аналогів на малому ринку	Кілька аналогів на великому ринку	Один аналог на великому ринку	Продукт не має аналогів на великому ринку
3	Ціна продукту значно вища за ціни аналогів	Ціна продукту дещо вища за ціни аналогів	Ціна продукту приблизно дорівнює цінам аналогів	Ціна продукту дещо нижче за ціни аналогів	Ціна продукту значно нижче за ціни аналогів
4	Технічні та споживчі властивості продукту значно гірші, ніж в аналогів	Технічні та споживчі властивості продукту трохи гірші, ніж в аналогів	Технічні та споживчі властивості продукту на рівні аналогів	Технічні та споживчі властивості продукту трохи кращі, ніж в аналогів	Технічні та споживчі властивості продукту значно кращі, ніж в аналогів
Ринкові перспективи					
5	Експлуатаційні витрати значно вищі, ніж в аналогів	Експлуатаційні витрати дещо вищі, ніж в аналогів	Експлуатаційні витрати на рівні експлуатаційних витрат аналогів	Експлуатаційні витрати трохи нижчі, ніж в аналогів	Експлуатаційні витрати значно нижчі, ніж в аналогів
6	Ринок малий і не має позитивної динаміки	Ринок малий, але має позитивну динаміку	Середній ринок з позитивною динамікою	Великий стабільний ринок	Великий ринок з позитивною динамікою
7	Активна конкуренція великих компаній на ринку	Активна конкуренція	Помірна конкуренція	Незначна конкуренція	Конкурентів немає
Практична здійсненність					
8	Відсутні фахівці як з технічної, так і з комерційної реалізації ідеї	Необхідно наймати фахівців або витратити значні кошти та час на навчання наявних фахівців	Необхідне незначне навчання фахівців та збільшення їх штату	Необхідне незначне навчання фахівців	Є фахівці з питань як з технічної, так і з комерційної реалізації ідеї

Завершення таблиці 4.1

Критерії оцінювання та бали (за 5-ти бальною шкалою)					
	0	1	2	3	4
9	Потрібні значні фінансові ресурси, які відсутні. Джерела фінансування ідеї відсутні	Потрібні незначні фінансові ресурси. Джерела фінансування відсутні	Потрібні значні фінансові ресурси. Джерела фінансування є	Потрібні незначні фінансові ресурси. Джерела фінансування є	Не потребує додаткового фінансування
10	Необхідна розробка нових матеріалів	Потрібні матеріали, що використовуються у військово-промисловому комплексі	Потрібні дорогі матеріали	Потрібні досяжні та дешеві матеріали	Всі матеріали для реалізації ідеї відомі та давно використовуються у виробництві
11	Термін реалізації ідеї більший за 10 років	Термін реалізації ідеї більший за 5 років. Термін окупності інвестицій більше 10-ти років	Термін реалізації ідеї від 3-х до 5-ти років. Термін окупності інвестицій більше 5-ти років	Термін реалізації ідеї менше 3-х років. Термін окупності інвестицій від 3-х до 5-ти років	Термін реалізації ідеї менше 3-х років. Термін окупності інвестицій менше 3-х років
12	Необхідна розробка регламентних документів та отримання великої кількості дозвільних документів на виробництво та реалізацію продукту	Необхідно отримання великої кількості дозвільних документів на виробництво та реалізацію продукту, що вимагає значних коштів та часу	Процедура отримання дозвільних документів для виробництва та реалізації продукту вимагає незначних коштів та часу	Необхідно тільки повідомлення відповідним органам про виробництво та реалізацію продукту	Відсутні будь-які регламентні обмеження на виробництво та реалізацію продукту

Запрошені експерти оцінили комерційний потенціал розробленого нами модуля стиснення цифрових зображень шляхом виставлення бальних оцінок по кожному із критеріїв, як це пропонується в таблиці 5.1.

Результати оцінювання зведено в таблицю 4.2

Таблиця 4.2 – Результати оцінювання експертами науково-технічного рівня і комерційного потенціалу нашої розробки

Критерії	Експерти		
	Кривогубченко С.Г.	Овчинников К.В.	Кулик Я.А.
	Бали:		
1. Технічна здійсненність концепції	4	4	4
2. Ринкові переваги (наявність аналогів)	3	3	2
3. Ринкові переваги (ціна продукту)	3	2	3
4. Ринкові переваги (технічні властивості)	2	3	3
5. Ринкові переваги (експлуатаційні витрати)	3	2	3
6. Ринкові перспективи (розмір ринку)	3	3	2
7. Ринкові перспективи (конкуренція)	2	2	2
8. Практична здійсненність (наявність фахівців)	4	4	4
9. Практична здійсненність (наявність фінансів)	2	3	2
10. Практична здійсненність (необхідність нових матеріалів)	3	3	3
11. Практична здійсненність (термін реалізації)	4	3	3
12. Практична здійсненність (розробка документів)	3	4	4
Сума балів	36	36	35
Середньоарифметична сума балів СБс	35,67		

Далі, керуючись рекомендаціями таблиці 4.3, визначимо рівень комерційного потенціалу розробленого нами модуля стиснення цифрових зображень.

Оскільки середньоарифметична сума балів, що їх виставили експерти, становить 35,67 балів (із максимально можливих 48-ми балів), то це

свідчить, що розроблений нами модуль стиснення цифрових зображень має рівень комерційного потенціалу, який можна вважати як «вище середнього».

Таблиця 4.3 – Рівні комерційного потенціалу будь-якої наукової розробки

Середньоарифметична сума балів $\overline{СБ}$ , розрахована на основі висновків експертів	Рівень комерційного потенціалу розробки
0 – 10	Низький
11 – 20	Нижче середнього
21 – 30	Середній
31 – 40	Вище середнього
41 – 48	Високий

Це обумовлено тим, що розроблений нами модуль стиснення цифрових зображень має значно кращі технічні, експлуатаційні та економічні характеристики, ніж існуючі технічні засоби аналогічного типу.

#### **4. 2 Розрахунок витрат на розроблення модуля стиснення цифрових зображень для системи автоматизації**

При розробленні модуля стиснення цифрових зображень були зроблені такі основні витрати:

1). Основна заробітна плата  $Z_o$  розробників, консультантів, фахівців тощо, величина якої визначається за формулою:

$$Z_o = \frac{M}{T_p} \cdot t \text{ грн,} \quad (5.1)$$

де  $M$  – місячний посадовий оклад розробника (дослідника), грн;

Для 2025 року прийнемо, що:

$$M = (8000 \dots 36000) \text{ грн/місяць};$$

$T_p$  – число робочих днів в місяці; прийнемо  $T_p = 21$  день;

$t$  – число днів роботи розробників, дослідників, інших фахівців.

Зроблені розрахунки величини основної заробітної плати розробників, дослідників, консультантів тощо зведемо до таблиці 4.4:

Таблиця 4.4 – Основна заробітна плата розробників (дослідників)

Найменування посади виконавця	Місячний посадовий оклад, грн	Оплата за робочий день, грн	Число днів (годин) роботи	Витрати на оплату праці, грн
1. Науковий керівник магістерської роботи, професор (доцент)	27300	1300,00	20 годин	$(1300,00 / 6) \times 20 = 4333,33 \approx 4334$ грн (при 6-годинному робочому дні)
2. Здобувач-магістрант (виконавець)	8000	380,90	77 днів	$29329,30 \approx 29330$ грн
3. Консультант з економічної частини	21000	1000,00	1,5 години	$(1000,00 / 6) \times 1,5 = 249,99 \approx 250$ грн (при 6-годинному робочому дні)
4. Консультанти: менеджер, аналітик, інженер-розробник АСУ, інженер-розробник програмного забезпечення (всього 4 особи)	42000	2000,00	2	$2000 \times 2 \times 4 = 16000$
Загалом				$Z_0 = 49914$ грн

Примітка. За заробітну плату магістранта прийнемо мінімальну заробітну плату в країні

2). Додаткова заробітна плата  $Z_d$  розробників (дослідників) тощо, яка розраховується як (10...12)% від величини їх основної заробітної плати, тобто:

$$Z_d = \alpha \cdot Z_o = (0,1...0,12) \cdot Z_o. \quad (5.2)$$

Прийmemo, що  $\alpha = 0,109$ . Тоді для нашого випадку отримаємо:

$$Z_d = 0,109 \times 49914 = 5440,63 \approx 5441 \text{ грн.}$$

3). Нарахування на заробітну плату НЗП<sub>зп</sub> розробників (дослідників) та всіх інших фахівців розраховуються за формулою:

$$\text{НЗП}_{\text{зп}} = (Z_o + Z_d) \cdot \frac{\beta}{100},$$

(5.3)

де  $\beta$  – ставка обов'язкового єдиного внеску на державне соціальне страхування, %. В 2025 році ставка  $\beta = 22\%$ . Тоді:

$$\text{НЗН}_{\text{зп}} = (49914 + 5441) \times 0,22 = 12178,10 \approx 12179 \text{ грн.}$$

4) Амортизація обладнання, програмних засобів та приміщень.

У спрощеному вигляді амортизаційні відрахування по кожному виду обладнання, приміщень та програмному забезпеченню тощо, розраховуємо за формулою:

$$A = \frac{Ц \cdot H_a}{100} \cdot \frac{T}{12} \text{ грн,} \quad (5.4)$$

де  $Ц$  – загальна балансова вартість основних засобів, грн;

$N_a$  – річна норма амортизаційних відрахувань.

Встановлено, що  $N_a = (2,5...25)\%$ ;

$T$  – термін використання основних засобів, місяці.

Зроблені розрахунки зведено в таблицю 4.5.

Таблиця 4.5 – Амортизаційні відрахування по кожному виду обладнання

Найменування обладнання	Балансова вартість, грн	Строк використання, років	Термін використання обладнання, місяців	Амортизаційні відрахування, грн
Персональний комп'ютер розробника програмного забезпечення	24800,00	3	1	688,89
Робоче місце інженера-програміста	8250,00	3	1	229,17
Пристрої передачі даних	6540,00	6	1	90,83
Оргтехніка	7850,00	5	1	130,83
Приміщення лабораторії розробки інформаційних систем	205000,00	20	1	854,17
Електронно-обчислювальний комплекс обробки зображень	75900,00	3	1	2108,33
OS Windows 11	6800,00	3	1	188,89
Прикладний пакет Microsoft Office	6700,00	3	1	186,11
Всього				4477,22 $\approx$ 4478 грн

#### 5). Витрати на матеріали

Витрати на матеріали  $M$  розраховуються за формулою:

$$M = \sum_1^n H_i \cdot C_i \cdot K_i - \sum_1^n B_i \cdot C_b \text{ грн,} \quad (5.5)$$

де  $H_i$  – витрати матеріалу  $i$ -го найменування, кг;  $C_i$  – вартість матеріалу  $i$ -го найменування;  $K_i$  – коефіцієнт транспортних витрат,  $K_i = (1,1 \dots 1,15)$ ;  $B_i$  – маса відходів матеріалу  $i$ -го найменування;  $C_b$  – ціна відходів матеріалу  $i$ -го найменування;  $n$  – кількість видів матеріалів (таблиця 4.4).

Таблиця 4.6 – Витрати на матеріали

Найменування матеріалу, марка, тип, сорт	Ціна за 1 кг, грн	Норма витрат, кг	Величина відходів, кг	Ціна відходів, грн/кг	Вартість витраченого матеріалу, грн
Офісний папір SOFT Ultra Plus	215,00	4,0	0	0	946,00
Папір для записів Papers SOFT Light A5	136,00	5,0	0	0	748,00
Органайзер офісний OFFICE SOFT	198,00	2,0	0	0	435,60
Канцелярське приладдя (набір офісного працівника)	185,00	3,0	0	0	610,50
Картридж для принтера Erixon EZ2500	860,00	1,0	0	0	946,00
Диск оптичний NewOice CD-RW	22,00	3,0	0	0	72,60
Flesh-пам'ять Kingston 64 GB	623,00	1,0	0	0	685,30
Тека для паперів BOSS BOX	75,00	5,0	0	0	412,50
Інші матеріали	195,00	1,0	0	0	214,50
Всього			5071,00 грн		

## б). Витрати на комплектуючі

Витрати на комплектуючі  $K$  розраховуються за формулою:

$$K = \sum_1^n H_i \cdot C_i \cdot K_i \text{ грн,} \quad (5.6)$$

де  $H_i$  – кількість комплектуючих  $i$ -го виду, шт.;  $C_i$  – ціна комплектуючих  $i$ -го виду;  $K_i$  – коефіцієнт транспортних витрат,  $K_i = (1, 1 \dots 1, 15)$ ;  $n$  – кількість видів комплектуючих.

Проведені розрахунки зведемо до таблиці 4.7.

Таблиця 4.7 – Витрати на комплектуючі

Найменування комплектуючих	Кількість, шт.	Ціна за штуку, грн	Сума за час використання, грн
SSD диск Kingston SSDNow A400 240GB 2.5» SATAIII 3D TLC (SA400S37/240G)	1	1199,00	1318,90
Відеокарта MSI PCI-Ex GeForce RTX 3060 Ventus 2X 12G OC 12GB GDDR6 (192bit) (1807/15000) (HDMI, 3 x DisplayPort) (RTX 3060 VENTUS 2X 12G OC	1	13199,00	14518,90
Маршрутизатор Asus RT-AX57 (90IG06Z0-MO3C00 / 90IG06Z0- MU2C00)	1	4499,00	4948,90
Всього		20786,70 $\approx$ 20787 грн	

7). Витрати на силову електроенергію  $V_e$  розраховуються за формулою:

$$V_e = \frac{V \cdot \Pi \cdot \Phi \cdot K_{\Pi}}{K_d}, \quad (5.7)$$

де  $V$  – вартість 1 кВт-год. електроенергії;

$\Pi$  – установлена потужність обладнання, кВт;

$\Phi$  – фактична кількість годин роботи обладнання, годин.

$K_{\Pi}$  – коефіцієнт використання потужності;

$K_d$  – коефіцієнт корисної дії обладнання (табл. 4.8).

Таблиця 4.8 – Витрати на електроенергію

Найменування обладнання	Встановлена потужність, кВт	Тривалість роботи, год	Сума, грн
Персональний комп'ютер розробника програмного забезпечення	0,45	90,0	444,69
Робоче місце інженера-програміста	0,25	90,0	247,05
Пристрої передачі даних	0,03	90,0	29,65
Оргтехніка	0,65	3,0	21,41
Електронно- обчислювальний комплекс обробки зображень на базі QUBE QB i9 10900KF RTX 3060 TI 8GB 1642	0,25	85,0	233,33
Мультимедіа проектор SAMSUNG PLC-XW300	0,22	20,0	48,31
Сервер Dell R630 8 SFF (2*E5-2640v4, 64GB)	0,45	90,0	444,69
Маршрутизатор Asus RT-AX57 (90IG06Z0- MO3C00 / 90IG06Z0-MU2C00)	0,03	90,0	29,65
Всього			1498,77 $\approx$ 1499 грн

8). Інші витрати  $V_{\text{інш}}$  можна прийняти як (50...300)% від основної заробітної плати розробників, тобто:

$$V_{\text{інш}} = (0,5\dots3) \times Z_o. \quad (5.8)$$

Для нашого випадку отримаємо:

$$V_{\text{інш}} = 0,5 \times 49914 = 24957 \text{ грн.}$$

9). Сума всіх попередніх статей витрат становить витрати на виконання цієї магістерської кваліфікаційної роботи безпосередньо розробником-магістрантом – В.

$$B = 49914 + 5441 + 12179 + 4478 + 5071 + 20787 + 1499 + 24957 = 124326 \text{ грн.}$$

10). Загальні витрати на розроблення модуля стиснення цифрових зображень становитимуть:

$$V_{\text{заг}} = \frac{B}{\beta}, \quad (5.9)$$

де  $\beta$  – коефіцієнт, який характеризує етап (стадію) виконання цієї роботи.

Оскільки наша розробка на цей момент часу практично готова, то можна умовно прийняти, що,  $\beta \approx 0,95$  [32].

$$\text{Тоді: } V_{\text{заг}} = \frac{124326}{0,95} = 130869,47 \text{ грн або приблизно 131 тисяча грн.}$$

Тобто прогнозовані загальні витрати на розроблення модуля стиснення цифрових зображень можуть становити 131 тисячу грн.

### 4.3 Розрахунок економічного ефекту від можливої комерціалізації розробленого модуля стиснення цифрових зображень

Проведене дослідження ринку показало, що розроблений нами модуль стиснення цифрових зображень знайде широке застосування на сучасному ринку завдяки своїм кращим функціональним і вартісним характеристикам. Приблизний аналіз місткості ринку показав, що на сьогодні в Україні кількість реальних користувачів подібних систем може становити приблизно 6500 зацікавлених осіб. Окрім того, можна очікувати зростання попиту на нашу розробку принаймні протягом 4-х років після її впровадження.

Тобто, якщо наша розробка буде впроваджена з 1 січня 2026 року, то її результати будуть виявлятися протягом 2026-го, 2027-го, 2028-го та 2029 років.

Прогноз зростання попиту на нашу розробку може складати по роках:

- а) 2026 р. – приблизно + 700 осіб (відносно базового року);
- б) 2027 р. – + 900 осіб (відносно базового року);
- в) 2028 р. – + 1200 осіб (відносно базового року).
- г) 2029 р. - +1000 осіб (відносно базового року).

Аналіз ринку також показує, що сьогодні приблизна ціна на подібні розробки становить 4600 грн. А оскільки розроблений нами модуль стискання цифрових зображень має значно кращі функціональні можливості, то з метою підвищення попиту на нашу розробку її можна буде реалізовувати на ринку дещо дешевше, ніж подібні (та аналогічні, але гірші розробки), наприклад, в середньому за 4300 грн, тобто на 300 грн дешевше.

Тоді можливе збільшення чистого прибутку  $\Delta\Pi_i$ , що його може отримати потенційний інвестор від комерціалізації нашої розробки при її виведенні на ринок, становитиме:

$$\Delta\Pi_i = \sum_1^n (\Delta C_o \cdot N + C_o \cdot \Delta N)_i \cdot \lambda \cdot \rho \cdot \left(1 - \frac{v}{100}\right), \quad (5.10)$$

де  $\Delta C_0$  – зменшення ціни реалізації розробки  $\Delta C_0 = 4300 - 4600 = - 300$  грн;

$N$  – обсяг діяльності у році до впровадження розробки;  $N = 6500$  шт.;

$\Delta N$  – покращення основного кількісного показника від впровадження нашої розробки: у 2026 році – + 700 шт., у 2027 році + 900 шт., у 2028 році + 1200 шт.; у 2029 р. + 1000 шт.

$C_0$  – ціна реалізації розробленого нами модуля стискання цифрових зображень після його виведення на ринок,  $C_0 = 4300$  тисячі грн;

$n$  – кількість років, протягом яких очікується отримання позитивних результатів від впровадження розробки; для нашого випадку  $n = 4$ ;

$\lambda$  – коефіцієнт, який враховує сплату податку на додану вартість;  $\lambda = 0,8333$ ;

$\rho$  – коефіцієнт, який враховує рентабельність продукту. Рекомендується приймати  $\rho = (0,2 \dots 0,5)$ ; візьмемо рівень  $\rho = 0,5$ ;

$\nu$  – ставка податку на прибуток. У 2025 році  $\nu = 18\%$ .

Тоді можливе зростання чистого прибутку  $\Delta \Pi_1$  для потенційного інвестора протягом першого року від можливої комерціалізації нашої розробки (2026 р.) становитиме:

$$\Delta \Pi_1 = [(-300) \cdot 6500 + 4300 \cdot 700] \cdot 0,8333 \cdot 0,5 \cdot \left(1 - \frac{18}{100}\right) = 362152,18$$

або 363 тисяч грн.

Можливе зростання чистого прибутку  $\Delta \Pi_2$  для потенційного інвестора від можливої комерціалізації нашої розробки протягом другого (2027 р.) року становитиме:

$$\Delta \Pi_2 = [(-300) \cdot 6500 + 4300 \cdot 900] \cdot 0,8333 \cdot 0,5 \cdot \left(1 - \frac{18}{100}\right) = 655973,76$$

або 656 тис. грн.

Можливе зростання чистого прибутку  $\Delta\Pi_3$  для потенційного інвестора від можливої комерціалізації нашої розробки протягом третього (2028 р.) року становитиме:

$$\Delta\Pi_3 = [(-300) \cdot 6500 + 4300 \cdot 1200] \cdot 0,8333 \cdot 0,5 \cdot \left(1 - \frac{18}{100}\right) = 1096706,13$$

грн

або 1097 тисяч грн.

Можливе зростання чистого прибутку  $\Delta\Pi_4$  для потенційного інвестора від можливої комерціалізації нашої розробки протягом четвертого (2029 р.) року становитиме:

$$\Delta\Pi_4 = [(-300) \cdot 6500 + 4300 \cdot 1000] \cdot 0,8333 \cdot 0,5 \cdot \left(1 - \frac{18}{100}\right) = 802884,55$$

або 803 тисяч грн.

Приведена вартість зростання для потенційного інвестора всіх чистих прибутків від можливої комерціалізації нашої розробки становитиме:

$$\text{ПП} = \sum_1^t \frac{\Delta\Pi_i}{(1 + \tau)^t}, \quad (5.11)$$

де  $\Delta\Pi_i$  – збільшення чистого прибутку у кожному із років, протягом яких виявляються результати виконаної та впровадженої роботи, грн;

$t$  – період часу, протягом якого виявляються результати впровадженої роботи, роки. Для нашого випадку  $t = 4$  роки;

$\tau$  – ставка дисконтування (рівень інфляції). Прийmemo, що  $\tau = 0,1$  (10,0%);

$t$  – період часу (в роках) від моменту початку розробки модуля для стискання цифрових зображень до моменту отримання потенційним інвестором можливих чистих прибутків від його комерціалізації.

Тоді прогнозована приведена вартість зростання всіх можливих чистих прибутків ПП, що їх може отримати потенційний інвестор від комерціалізації нашої розробки, становитиме:

$$\text{ПП} = \frac{363}{(1+0,1)^2} + \frac{656}{(1+0,1)^3} + \frac{1097}{(1+0,1)^4} + \frac{803}{(1+0,1)^5} \approx 300+493+749+499 = 2041$$

тис. грн.

Теперішня вартість інвестицій PV (або можлива вартість придбання нашої розробки інвестором для її комерціалізації):  $PV = K \times V_{\text{заг}} = (1,0...5,0) \times V_{\text{заг}}$ , де  $V_{\text{заг}} = 131$  тисяча грн (див. підрозділ 5.1).

Для нашого випадку приймемо, що:

$$PV = (1,0...5,0) \times 131 = 3,0 \times 131 = 393 \text{ тисяч грн.}$$

Абсолютний економічний ефект для інвестора від можливої комерціалізації нашої розробки за чотири роки (2026, 2027, 2028, 2029) складе:

$$E_{\text{абс}} = \text{ПП} - PV = 2041 - 393 = 1648 \text{ тисяч грн.}$$

Далі розрахуємо внутрішню дохідність  $E_v$  вкладених інвестицій (коштів):

$$E_v = \sqrt[T_{\text{ж}}]{1 + \frac{E_{\text{абс}}}{PV}} - 1, \quad (5.12)$$

де  $E_{\text{абс}}$  – абсолютний ефект вкладених інвестицій;  $E_{\text{абс}} = 1648$  тисяч грн;

$PV$  –теперішня вартість початкових інвестицій  $PV = 393$  тисячі грн;

$T_{\text{ж}}$  – життєвий цикл розробки, роки.

$T_{\text{ж}} = 5$  роки (2025-й, 2026-й, 2027-й, 2028-й, 2029 роки).

Для нашого випадку отримаємо:

$$E_B = \sqrt[5]{1 + \frac{1648}{393}} - 1 = \sqrt[5]{1 + 4,1933} - 1 = \sqrt[5]{5,1933} - 1 = 1,39 - 1 = 0,39 \approx 39,0\%.$$

Мінімальна дохідність вкладених коштів  $\tau_{\text{мін}}$ , нижче за яку потенційному інвестору не вигідно буде займатися комерціалізацією нашої розробки, визначається за формулою:

$$\tau_{\text{мін}} = d + f, \quad (5.13)$$

де  $d$  – середньозважена ставка за депозитними операціями в комерційних банках; в 2025 році в Україні  $d = (0,10 \dots 0,16)$ . Прийmemo, що  $\tau = 12\%$ .

$f$  – показник, що характеризує ризикованість вкладень;  $f = (0,05 \dots 0,30)$ .

Прийmemo, що  $f = 25\%$ , тобто  $f = 0,25$ .

Тоді для нашого випадку отримаємо:

$$\tau_{\text{мін}} = 0,12 + 0,25 = 0,37 \text{ або } \tau_{\text{мін}} = 37\%.$$

Оскільки величина  $E_B = 39,0\% > \tau_{\text{мін}} = 37\%$ , то потенційний інвестор у принципі може бути зацікавлений у виведенні на ринок розробленого нами модуля стиснення цифрових зображень.

Термін окупності коштів, вкладених у можливу комерціалізацію розробленого нами модуля стиснення цифрових зображень, становитиме:

$$T_{\text{ок}} = \frac{1}{E_B} = \frac{1}{0,39} \approx 2,56 \text{ років} < 3 \text{ років}, \quad (5.14)$$

що також свідчить про потенційну економічну доцільність комерціалізації розробленого нами модуля стиснення цифрових зображень для системи автоматизації відділу відеоспостереження та безпеки підприємства.

Результати виконаної економічної частини магістерської кваліфікаційної роботи зведено у таблицю 4.9.

Таблиця 4.9 - Результати виконаної економічної частини магістерської кваліфікаційної роботи

Показники	Задані у ТЗ	Досягнуті у магістерській кваліфікаційній роботі	Висновок
1. Витрати на розробку	Не більше 150 тисяч грн	≈ 131 тисяча грн	Досягнуто
2. Абсолютний ефект від впровадження розробки, тисяч грн	Не менше 1500 тисяч грн (за 4 роки)	1648 тисячі грн (при 10,0% інфляції)	Виконано
3. Внутрішня дохідність інвестицій (коштів), %	Не менше 37,0%	39,0%	Виконано
4. Термін окупності інвестицій (коштів), роки	до 3-ти років	2,56 роки	Виконано

Таким чином, основні техніко-економічні показники розробленого нами модуля стиснення цифрових зображень для системи автоматизації відділу відеоспостереження та безпеки підприємства, визначені у технічному завданні, повністю виконані.

#### 4.4 Висновки до розділу

Аналізуючи економічні показники магістерської кваліфікаційної роботи, можна зробити висновок, що всі задані у технічному завданні (ТЗ) критерії успішно досягнуто або виконано. Зокрема, витрати на розробку склали приблизно 131 тисячу гривень, що не перевищує встановленої межі в 150 тисяч гривень, отже, цей показник досягнуто. Абсолютний ефект від впровадження розробки оцінено в 1648 тисяч гривень за 4 роки (з урахуванням 10,0% інфляції), що перевищує мінімальний поріг у 1500 тисяч гривень, тому виконано. Внутрішня дохідність інвестицій досягла 39,0%, що більше за мінімальні 37,0%, і цей показник також виконано. Нарешті, термін окупності інвестицій становить 2,56 роки, що вкладається в обмеження до 3 років, підтверджуючи виконання вимоги. Загалом, результати свідчать про економічну ефективність і доцільність впровадження розробленого модуля.

Отже можна зробити висновок про доцільність проведення науково-дослідної роботи за темою «Розробка модуля стиснення цифрових зображень для системи автоматизації відділу відеоспостереження та безпеки підприємств».

## ВИСНОВКИ

У магістерській роботі вирішено актуальне науково-прикладне завдання — розроблено високоефективний модуль стиснення цифрових зображень на основі вейвлет-перетворення для систем автоматизації відділу відеоспостереження та безпеки підприємства.

Проведено детальний аналіз сучасних методів стиснення зображень. Показано, що вейвлет-перетворення залишається одним із найефективніших інструментів для задач безпеки завдяки відсутності блочних артефактів, підтримці прогресивної передачі, ROI-кодування та математично безвтратних режимів.

Вивчено та систематизовано класичні вейвлет-кодеки (EZW, SPIHT, алгоритм Люїса–Ноулеса), методи оптимізації за критерієм швидкість-спотворення (RDO, PCRD-opt), а також сучасні напрями розвитку — ліфтингові схеми, гібридні нейромережеві підходи, апаратно-орієнтовані кодеки (JPEG XS, HTJ2K) та семантично-орієнтоване стиснення.

Обґрунтовано вибір мови програмування C++ (стандарт C++20) як оптимальної за продуктивністю, кросплатформеністю та можливістю інтеграції з існуючими системами відеоспостереження (Milestone, Trassir, ISS тощо).

Розроблено та реалізовано модифікований алгоритм вейвлет-стиснення, що усуває основний недолік простого порогового методу — великі накладні витрати на зберігання позицій значущих коефіцієнтів. Запропонований підхід базується на:

- блочному розбитті піраміди вейвлет-коефіцієнтів на блоки  $15 \times 15$ ;
- компактному представленні розріджених блоків за вдосконаленим форматом рядкової нумерації з фіксованими накладними витратами  $\approx 1$  байт на коефіцієнт незалежно від розміру зображення;
- спеціальній обробці повністю нульових блоків.

Експериментальні дослідження на стандартних тестових зображеннях та реальних кадрах відеоспостереження показали, що розроблений алгоритм при збереженні лише 5–8 % найбільших коефіцієнтів забезпечує коефіцієнт стиснення 12–18:1 (проти 3–5:1 у простого методу) при практично однаковому значенні PSNR. При цьому якість відновлення залишається достатньою для надійного розпізнавання облич, автомобільних номерів та інших критичних об'єктів.

Практична цінність роботи полягає в тому, що створений модуль дозволяє суттєво (у 3–5 разів) зменшити обсяги даних, що зберігаються та передаються в системах відеоспостереження підприємства, знизити витрати на дискові масиви та мережеве обладнання, скоротити час пошуку в архіві, при цьому повністю зберігаючи юридичну значущість відеоматеріалів.

Аналізуючи економічні показники магістерської кваліфікаційної роботи, можна зробити висновок, що всі задані у технічному завданні (ТЗ) критерії успішно досягнуто або виконано. Зокрема, витрати на розробку склали приблизно 131 тисячу гривень, що не перевищує встановленої межі в 150 тисяч гривень, отже, цей показник досягнуто. Абсолютний ефект від впровадження розробки оцінено в 1648 тисяч гривень за 4 роки (з урахуванням 10,0% інфляції), що перевищує мінімальний поріг у 1500 тисяч гривень, тому виконано. Внутрішня дохідність інвестицій досягла 39,0%, що більше за мінімальні 37,0%, і цей показник також виконано. Нарешті, термін окупності інвестицій становить 2,56 роки, що вкладається в обмеження до 3 років, підтверджуючи виконання вимоги. Загалом, результати свідчать про економічну ефективність і доцільність впровадження розробленого модуля.

Отже, розроблений модуль стиснення зображень на основі вдосконаленого блочно-адаптивного вейвлет-кодування повністю відповідає вимогам сучасних систем безпеки, є готовим до впровадження на підприємствах і може бути основою для подальшого розвитку інтелектуальних систем відеоспостереження з елементами машинного навчання та семантичного аналізу.

**СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ**

1. Acharya T., Ray A. *Image Processing: Principles and Applications*. Hoboken, New Jersey : John Wiley & Sons, 2005. 425 p. ISBN 0-471-71998-6.
2. Sayood K. *Introduction to Data Compression*. 5th ed. Cambridge : Morgan Kaufmann, 2017. 790 p. ISBN 978-0-12-809474-7.
3. Gonzalez R. C., Woods R. E. *Digital Image Processing*. 4th ed. New York : Pearson, 2018. 1024 p. ISBN 978-0-13-335672-4.
4. Юдін О. К., Гумен М. Б., Курінь К. О. Технологія стиснення на базі методу кодування двійкових послідовностей за кількістю бітових переходів. *Захист інформації*. 2012. Т. 14, № 4. С. 12–18.
5. Daubechies L., Sweldens W. Factoring Wavelet Transforms into Lifting Steps. *IEEE Transactions on Image Processing*. 2013. Vol. 9, No. 3. P. 480–496.
6. Petschnigg G., Agrawala M., Hoppe H. та ін. Digital photography with flash and no-flash image pairs. *ACM Transactions on Graphics*. 2014. Vol. 23, No. 3. P. 664–672.
7. Gonzales R. C., Woods R. E., Eddins S. *Digital Image Processing Using MATLAB*. Upper Saddle River, NJ : Prentice Hall, 2004. 492 p.
8. Sun Y., Wu P., Wei G. W. Evolution-Operator-Based Single-Step Method for Image Processing. *International Journal of Biomedical Imaging*. 2016. Article ID 83847. P. 1–27.
9. Dougherty E. R. *Random Processes for Image and Signal Processing*. New York : IEEE Press, 2020. 639 p.
10. Damerval C., Meignen S., Perrier V. A fast algorithm for bidimensional EMD. *IEEE Signal Processing Letters*. 2015. Vol. 12, No. 10. P. 701–704.
11. Дослідження jpeg-алгоритму стиснення цифрових відеозображень. *Grail of Science*. 2024. № 2059. URL: <https://archive.journal-grail.science/index.php/2710-3056/article/view/2059>

12. Гармаш В. В., Ольшанська Н. М. Метод стиснення цифрових зображень на основі усічення простору вейвлет-коефіцієнтів. XLVIII Науково-технічна конференція факультету комп'ютерних систем і автоматики, 2019. URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fksa/all-fksa-2019/paper/view/6617/5488>
13. Wallace G. K. JPEG algorithm for image compression standard. Communications of the ACM. 1991. Vol. 34, No. 4. P. 30–44.
14. Волошина А. О., Гармаш В. В. Модифікація алгоритму стиснення JPEG. LI Науково-технічна конференція факультету комп'ютерних систем і автоматики, 2022. URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fksa/all-fksa-2022/paper/view/15276/12923>
15. Sheikh H. R., Bovik A. C. Image Information and Visual Quality. IEEE Transactions on Image Processing. 2016. Vol. 15. P. 430–444.
16. Дослідження алгоритмів стиснення даних для забезпечення безпеки в системах відеоспостереження. Київ : КПІ, 2025. URL: <https://ela.kpi.ua/items/5c5f40c6-92e5-42c5-b0c1-f811b1232a71>
17. Learning CCTV Compression. JVSG. URL: <https://www.jvsg.com/cctv-compression-guide/>
18. Shi Y. Q., Sun H. Image and Video Compression for Multimedia Engineering: Fundamentals, Algorithms, and Standards. 2nd ed. Boca Raton : CRC Press, 2008. 576 p. ISBN 978-0-8493-7364-0.
19. Khamees T., Al-sarray H. Image Compression Techniques: A Review. International Journal of Scientific & Engineering Research. 2018. Vol. 9, No. 3. P. 142–150. URL: [https://www.researchgate.net/publication/324985978\\_Image\\_Compression\\_Techniques](https://www.researchgate.net/publication/324985978_Image_Compression_Techniques)
20. Dragan F., Munteanu G., Gavrilescu M. Image-Compression Techniques: Classical and “Region-of-Interest-Based” Approaches Applied to Medical Image Compression. Applied Sciences. 2024. Vol. 14, No. 3. P. 1034. DOI: 10.3390/app14031034

21. Huang X., Zhang J., Li C., Zhu Z. An Image Compression Method for Video Surveillance System in Temporally Correlated Image Group Based on Residual Network and DWT. *Electronics*. 2019. Vol. 8, No. 12. P. 1559. DOI: 10.3390/electronics8121559
22. Rital S., Cherifi H. Comparative survey of image compression methods across different application domains. *Signal, Image and Video Processing*. 2025. DOI: 10.1007/s11760-025-04579-6
23. Ihnatenko S., Totsky A. Video Compression and Optimization Technologies – Review. *International Journal of Electronics and Telecommunications*. 2024. Vol. 70, No. 2. P. 361–369. DOI: 10.24425/ijet.2024.149603
24. Suresh T., Sujatha S., Kumar R. S. Image compression methods for efficient storage and transmission: A review. *World Journal of Advanced Research and Reviews*. 2021. Vol. 11, No. 3. P. 166–176. DOI: 10.30574/wjarr.2021.11.3.0172
25. Bhaskaran V., Konstantinides K. *Image and Video Compression Standards: Algorithms and Architectures*. 2nd ed. New York : Springer, 2016. 454 p. ISBN 978-1-4613-7842-6.
26. Гвоздєв А. М., Гвоздєв М. О. Дослідження JPEG-алгоритму стиснення цифрових відеозображень і кодування систем технічного зору в ОС Linux. *Grail of Science*. 2024. № 36. С. 208–214. DOI: 10.36074/grail-of-science.2024-01-19.035.
27. Куц А. В., Кравченко Ю. С. Порівняння алгоритмів стиснення зображень на базі дискретного косинусного перетворення. *Технічні науки та технології*. 2024. № 5 (37), ч. 2. С. 175–183.
28. Khamees T., Al-sarray H. Image Compression Techniques: A Review. *International Journal of Scientific & Engineering Research*. 2018. Vol. 9, No. 3. P. 142–150.

29. Козловський В. О. Дослідження алгоритмів стиснення даних для забезпечення безпеки в системах відеоспостереження. Київ : КПІ, 2025. URL: <https://ela.kpi.ua/items/5c5f40c6-92e5-42c5-b0c1-f811b1232a71>
30. Кліменко А. О. Аналіз методів стиснення зображень на основі дискретно-косинусного перетворення. Харків : ХНУРЕ, 2018. URL: <http://lib.kart.edu.ua/bitstream/123456789/2248/1/Klymenko.pdf>
31. Гармаш В., Носенко В. Модуль стиснення цифрових зображень для системи автоматизації відділу відеоспостереження та безпеки підприємства. Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи (МН-2025). URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/mn/mn2025/paper/view/25574/21139>
32. Методичні вказівки до виконання економічної частини магістерських кваліфікаційних робіт / уклад. В. О. Козловський, О. Й. Лесько, В. В. Кавецький. Вінниця : ВНТУ, 2021. 42 с.
33. Кавецький В. В., Козловський В. О., Причепка І. В. Економічне обґрунтування інноваційних рішень: практикум. Вінниця : ВНТУ, 2016. 113 с.
34. Методичні вказівки до виконання магістерських кваліфікаційних робіт для студентів спеціальностей 126, 151, 174 / уклад. О. В. Біскало, Ю. Ю. Іванов, Р. В. Маслій. Вінниця : ВНТУ, 2023. 63 с. URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fksa/all-fksa-2023/paper/view/12345>

## **ДОДАТКИ**

## Додаток А (обов'язковий)

## Технічне завдання

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри АІТ

д.т.н., проф. Олег БІСІКАЛО

«17» жовтня 2025 року

## ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ

на магістерську кваліфікаційну роботу

**«РОЗРОБКА МОДУЛЯ СТИСНЕННЯ ЦИФРОВИХ ЗОБРАЖЕНЬ ДЛЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ ВІДДІЛУ ВІДЕОСПОСТЕРЕЖЕННЯ ТА БЕЗПЕКИ ПІДПРИЄМСТВА»**

08-31.МКР.008.02.000 ТЗ

Керівник роботи:

к.т.н., доц. каф. АІТ

Володимир ГАРМАШ

«16» жовтня 2025 р.

Виконавець:

ст. гр. 1АКІТР-24м

Володимир НОСЕНКО

«16» жовтня 2025 р.

### 1. Назва та галузь застосування

Розробка модуля стиснення цифрових зображень для системи автоматизації відділу відеоспостереження та безпеки підприємства.

Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та роботехніка. Автоматизація відділу безпеки підприємства.

### 2. Підстава для розробки

Розробку системи здійснювати на підставі наказу по університету № 313 від 24 вересня 2025 року та завдання до магістерської кваліфікаційної роботи, складеного та затвердженого кафедрою «Автоматизації та інтелектуальних інформаційних технологій»

### 3. Мета та призначення розробки

Метою роботи є розробка модуля стиснення цифрових зображень для системи автоматизації відділу відеоспостереження та безпеки підприємства, який забезпечить:

- Автоматичний аналіз зображень з використанням дискретного вейвлет-перетворення для виявлення частотних компонентів у багатовимірному просторі візуальних даних;
- Генерацію стиснутих потоків даних на основі розрахунку коефіцієнтів вейвлетів з використанням порогової фільтрації для оптимізації співвідношення стиснення;
- Інтеграцію з системою автоматизації відеоспостереження для автоматичного стиснення та передачі зображень з підтримкою механізмів контролю якості та безпеки;

Призначення модуля: забезпечення ефективного стиснення цифрових зображень у системі автоматизації відділу відеоспостереження та безпеки підприємства з мінімізацією втрат якості зображення та можливістю адаптації до змінних візуальних умов через періодичну оптимізацію параметрів вейвлет-перетворення.

### 4. Джерела розробки

1. 3. Gonzalez R. C., Woods R. E. Digital Image Processing. 4th ed. New York : Pearson, 2018. 1024 p. ISBN 978-0-13-335672-4.
2. Волошина А.О. Модифікація алгоритму стиснення JPEG /А. О. Волошина, В. В. Гармаш [Електронний ресурс]: LI Науково-технічна конференція факультету комп'ютерних систем і автоматики (2022). –

Режим доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fksa/all-fksa-2022/paper/view/15276/12923>

3. Sheikh H. R., Bovik A. C. Image Information and Visual Quality: IEEE Transactions on Image Processing. 2016. Vol. 15. с. 430-444.
4. Дослідження алгоритмів стиснення даних для забезпечення безпеки в системах відеоспостереження. Київ : КПІ, 2025. URL: <https://ela.kpi.ua/items/5c5f40c6-92e5-42c5-b0c1-f811b1232a71>.
5. Гармаш В., Носенко В. «Модуль стиснення цифрових зображень для системи автоматизації відділу відеоспостереження та безпеки підприємства». Матеріали наукової конференції «Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи (МН-2025)». URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/mn/mn2025/paper/view/25574/21139>

## 5. Показники призначення

### 5.1. Основні технічні характеристики системи

Функціональні можливості:

#### 5.1.1 Модуль аналізу зображень:

- Завантаження зображень з файлів форматів JPEG, PNG або реального часу через камери відеоспостереження;
- Розрахунок частотних компонентів за допомогою дискретного вейвлет-перетворення (DWT) з використанням сімейства вейвлетів Daubechies (db4) для декомпозиції на рівні 3-5;

#### 5.1.2 Модуль стиснення даних:

- Застосування порогової фільтрації (soft thresholding) для зменшення шуму та оптимізації коефіцієнтів вейвлетів;
- Квантування та кодування стиснутих коефіцієнтів з адаптивним порогом для балансу між ступенем стиснення та якістю;

### 5.2. Мінімальні системні вимоги

#### 5.2.1 Апаратне забезпечення:

- Процесор: тактова частота не менше 2.5 GHz, рекомендовано 4+ ядра для швидкого навчання FCM;
- Оперативна пам'ять: 8 GB RAM;

- Місце на диску: 2 GB для програмного забезпечення та бібліотек; 5-10 GB для історичних даних (залежить від кількості валютних пар та періоду);
- Мережа: стабільне Інтернет-з'єднання для завантаження даних та підключення до MT5 (мінімум 10 Mbps).

#### 5.2.2 Програмне забезпечення:

- Операційна система: Windows 10/11, Linux (Ubuntu 20.04+), macOS 10.15+;

#### 5.3. Вхідні дані

- мінімальна роздільна здатність зображення 128 x 128 пікселів,
- максимальна роздільна здатність 2048 x 2048 пікселів;
- коефіцієнт стиснення 2 – 50.
- виграш у стисненні від 0,5% до 15% у порівнянні з класичним алгоритмом.

#### 5.4 Результати роботи програми

##### 5.4.1 Стиснені зображення:

- Файли: стиснуті .jpg або .bin файли з метаданими (поріг стиснення, рівень DWT);
- Інтерпретація: відновлення оригінального зображення з мінімальними втратами, придатне для аналізу в системах безпеки (розпізнавання облич, об'єктів, подій).

##### 5.4.2 Звіт тестування:

Текстовий звіт у консолі з детальною статистикою:

- Original Size, Compressed Size, Compression Ratio;
- PSNR, SSIM;
- Processing Time (с), Bitrate (для відео-фреймів, kbps).

## 6. Економічні показники

До економічних показників входять:

- витрати на розробку – до 150 тис. грн. \_\_\_\_\_
- рівень комерційного потенціалу розробки – більше 30 балів \_\_\_\_\_
- термін окупності – до 3х років \_\_\_\_\_

## 7. Стадії розробки:

1. Розділ 1 «Аналіз сучасних методів стиснення зображень» має бути виконаний до 05.10.2025 р.

2. Розділ 2 «Застосування вейвлет-перетворень для стиснення зображень» має бути виконаний до 25.10.2025 р.

3. Розділ 3 «Розробка модуля стиснення цифрових зображень для системи автоматизації відділу відеоспостереження та безпеки підприємства» до 20.11.2025 р.

4. Розділ 4 «Економічний розділ» має бути виконаний до 01.12.2025 р.

#### 8. Порядок контролю та приймання

1. Рубіжний контроль провести до 14.11.2025.

2. Попередній захист магістерської кваліфікаційної роботи провести до 02.12.2025.

3. Захист магістерської кваліфікаційної роботи провести в період з 15.12.2025 р. до 19.12.2025 р.

Додаток Б  
(обов'язковий)

**ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА**

РОЗРОБКА МОДУЛЯ СТИСНЕННЯ ЦИФРОВИХ ЗОБРАЖЕНЬ ДЛЯ  
СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ ВІДДІЛУ ВІДЕОСПОСТЕРЕЖЕННЯ ТА  
БЕЗПЕКИ ПІДПРИЄМСТВА

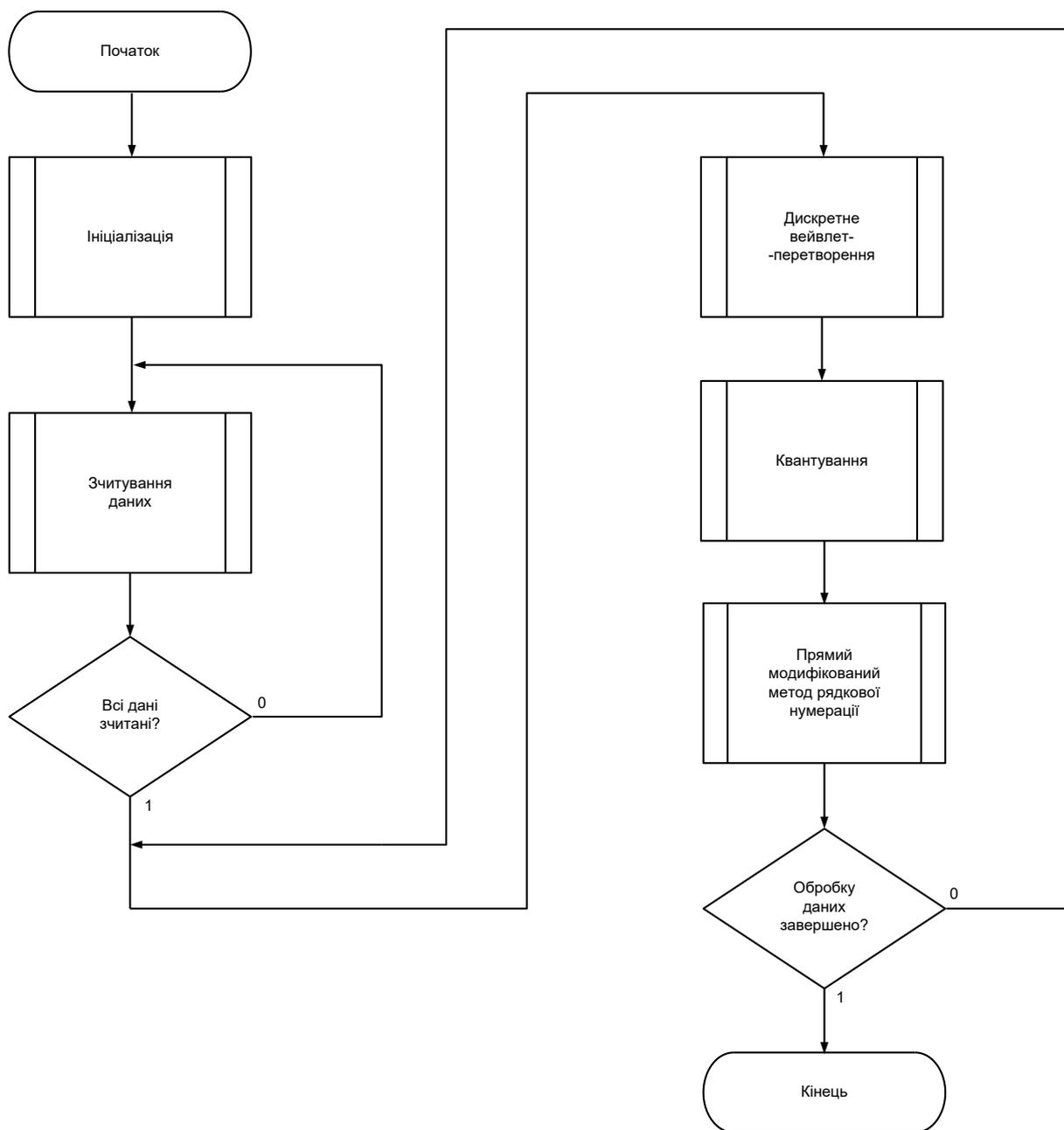


Рисунок Б.1 – Кодування зображення. Схема програми

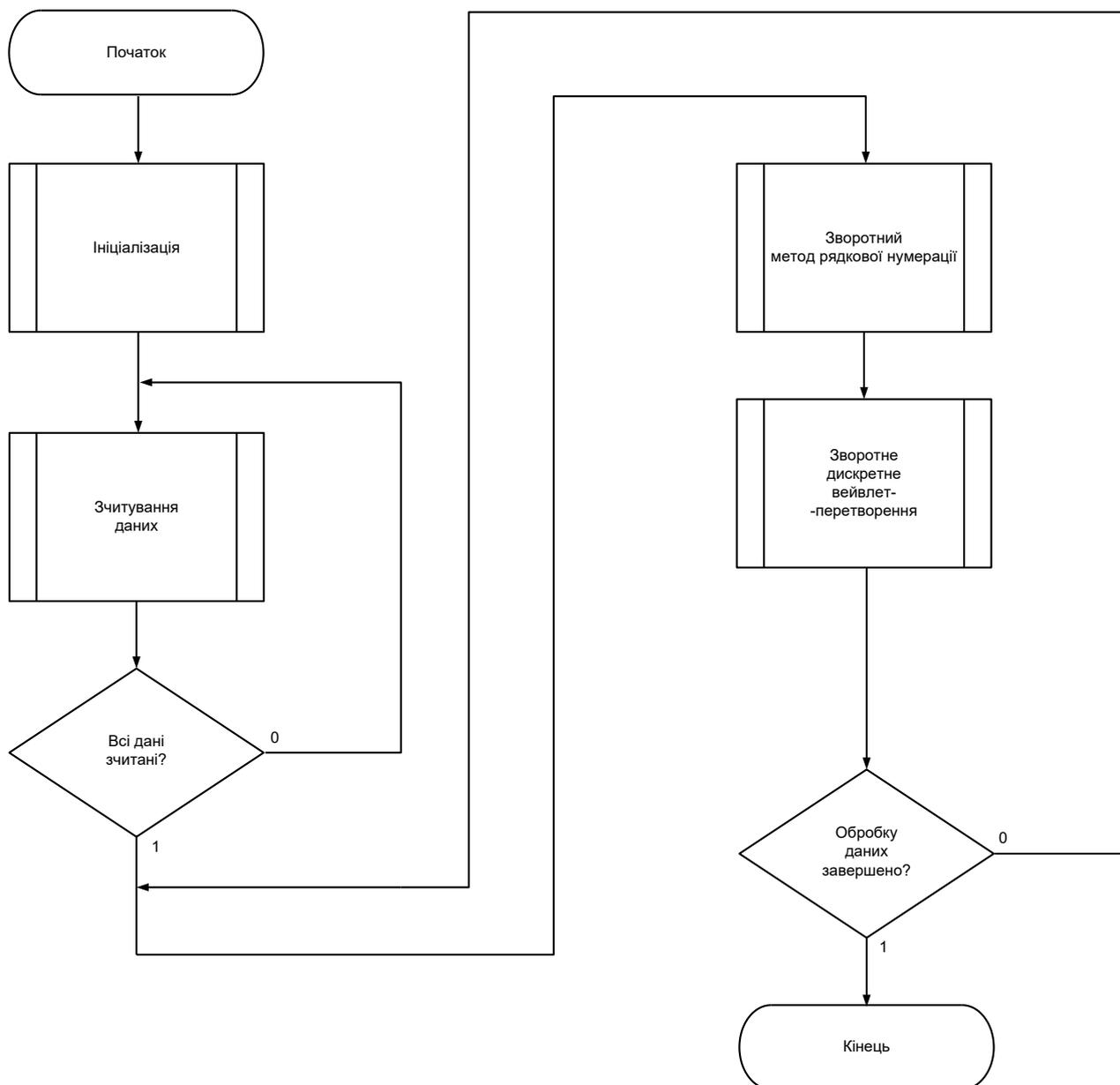


Рисунок Б.2 – Декодування зображення. Схема програми



Рисунок Б.3 – Структура роботи підсистеми відеоспостереження з модулем стиснення зображень

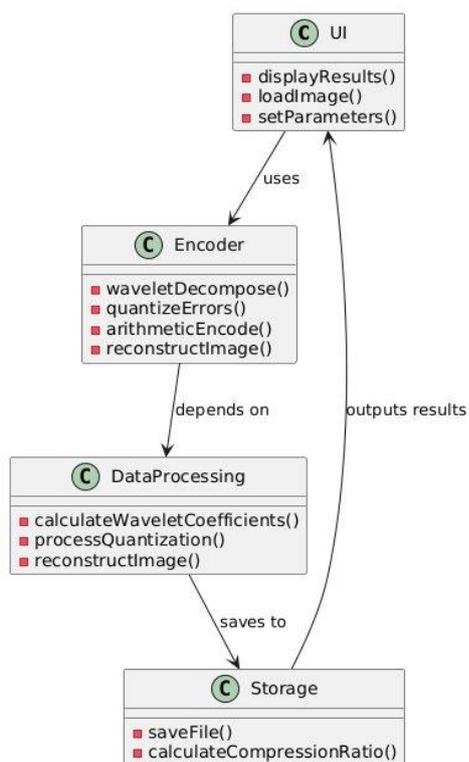


Рисунок Б.4 – Діаграма класів процесу стиснення

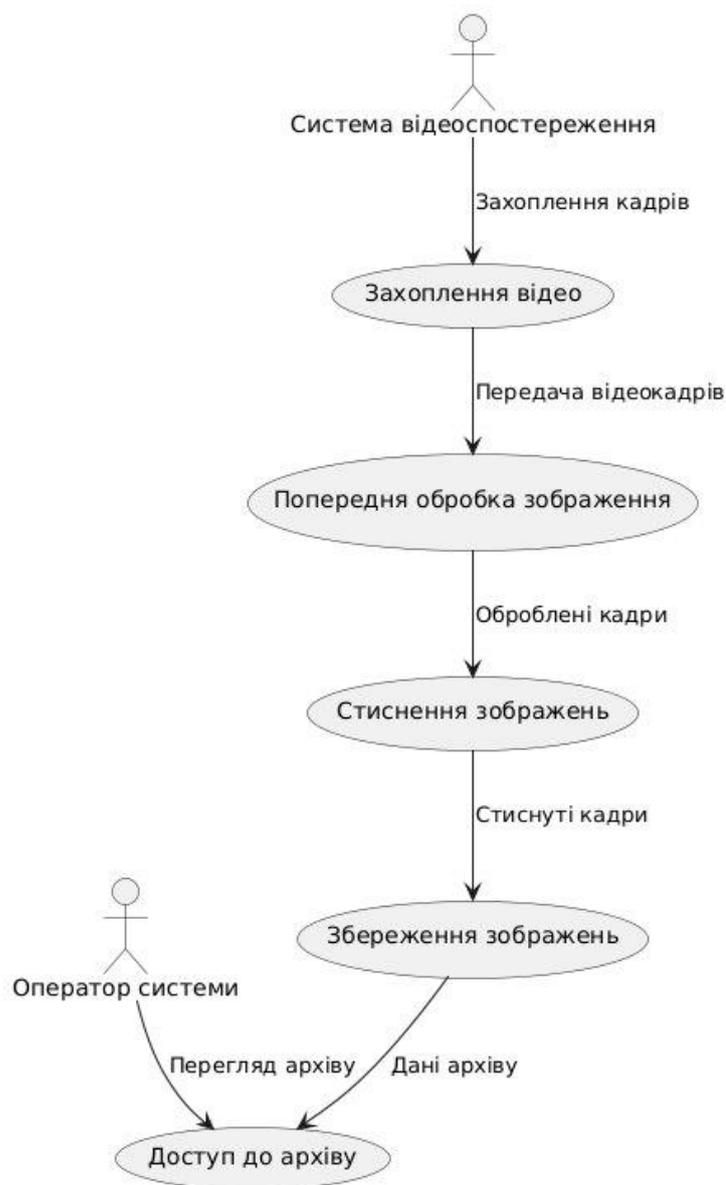


Рисунок Б.5 – Діаграма варіантів використання стиснення цифрового зображення

Результати роботи простого методу вейвлет-стиснення зображень з використанням різної кількості вейвлет-коефіцієнтів

Тип стиснення	Довжина коду	Коефіцієнт стиснення	PSNR
Звичайне вейвлет стиснення з використанням 5% вейвлет коефіцієнтів	65551	3,99963	24,73599
Звичайне вейвлет стиснення з використанням 15% вейвлет коефіцієнтів	196626	1,33339	31,47907
Звичайне вейвлет стиснення з використанням 25% вейвлет коефіцієнтів	327696	0,80007	34,64534

Результати роботи розробленого алгоритму вейвлет-стиснення зображень з використанням різних кількостей вейвлет-коефіцієнтів

Тип стиснення	Довжина коду	Коефіцієнт стиснення	PSNR
Розроблений алгоритм вейвлет стиснення з використанням 5% вейвлет коефіцієнтів	52980	4,94866	24,73181
Розроблений алгоритм вейвлет стиснення з використанням 15% вейвлет коефіцієнтів	153724	1,70552	31,47828
Розроблений алгоритм вейвлет стиснення з використанням 25% вейвлет коефіцієнтів	234324	1,11888	34,64219

Рисунок Б.6 – Результати експериментального дослідження

## Додаток В (обов'язковий)

## Лістинг модуля програми

(Лістинг коду стиснення з використанням вейвлет-перетворення)

```

void pmmrn (short * a, int n, int nmax, short * nze, unsigned char * isj)
//а-це вказівник на вхідний масив;

//n-кількість елементів рядка вхідного масиву;

//nmax-максимальне число елементів вхідного масиву;

//nze - масив містить ненульові елементи;

//isj - інформація про розміщення ненульових елементів;

{
int i = 0, j = 0;
unsigned char k;
bool zero1 = false;
for ( j = 0; j<n; j++ )
{ nze[j] = a[j*n + j];
if ( (a[j*n + j] != 0) && !zero1 )
zero1 = true;
}
isj[0] = (unsigned char) n+1;
k = n+1;
for ( i = 0; i < n; i++ ) { // цикл по рядках
for ( j = 0; j < n; j++ ) { // цикл по стовбцях
if ( i!=j )
{ if ( (int) k > nmax )
{
fprintf(stderr,"%s\n"," pmmrn: nmax too small");
exit(1);
}
}
}
}
}

```

```

    nze[(int)k] = a[i*n+j];
    isj [(int)k] = j;
k++;
}
}
isj[i+1] = k;
}
if ( !zero1 && ( k == n+1 ) )
    // установити ознаку нульового блоку isj[0] = (unsigned char) 0;
}

void omrn ( short *a, short *nze, unsigned char *isj )
// a –це вказівник на відновлений масив;
// nze – масив , що містить нульовий елемент;
// isj –інформацію про розміщення ненульових елементів;
{
int i = 0, j = 0, n = 0;
unsigned char k;
n = (int) isj[0] - 1;
for ( j = 0; j < n; j++ )
    a[j*n + j] = nze[j];
    for ( i= 0; i < n; i++ )
for ( k = isj[i]; k <= isj[i+1] - 1; k++ )
a[i*n +isj[k]] = nze[k];
}

```

Додаток Г (обов'язковий)

**ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ**

Назва роботи: «Розробка модуля стиснення цифрових зображень для системи автоматизації відділу відеоспостереження та безпеки підприємства»

Тип роботи: магістерська кваліфікаційна робота  
(бакалаврська кваліфікаційна робота / магістерська кваліфікаційна робота)

Підрозділ кафедра АІТ  
(кафедра, факультет, навчальна група)

Коефіцієнт подібності текстових запозичень, виявлених у роботі системою StrikePlagiarism (КПІ) 10,06 %

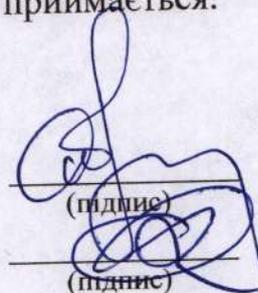
Висновок щодо перевірки кваліфікаційної роботи (відмітити потрібне)

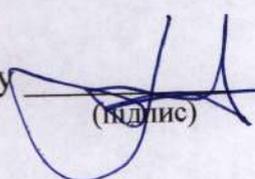
- Запозичення, виявлені у роботі, оформлені коректно і не містять ознак академічного плагіату, фабрикації, фальсифікації. Роботу прийняти до захисту.
- У роботі не виявлено ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації, але надмірна кількість текстових запозичень та/або наявність типових розрахунків не дозволяють прийняти рішення про оригінальність та самостійність її виконання. Роботу направити на доопрацювання.
- У роботі виявлено ознаки академічного плагіату та/або в ній містяться навмисні спотворення тексту, що вказують на спроби приховування недобросовісних запозичень. Робота до захисту не приймається.

Експертна комісія:

Бісікало О.В., зав. каф. АІТ  
(прізвище, ініціали, посада)

Овчинников К.В., доц. каф. АІТ  
(прізвище, ініціали, посада)

  
(підпис)

Особа, відповідальна за перевірку  Маслій Р.В.  
(підпис) (прізвище, ініціали)

З висновком експертної комісії ознайомлений(-на)

Керівник  Гармаш В.В., доц. каф. АІТ  
(підпис) (прізвище, ініціали, посада)

Здобувач  Носенко В.В.  
(підпис) (прізвище, ініціали)