

Міністерство освіти і науки України  
Національний університет “Львівська політехніка”

**ВЕРЕС ЗЕНОВІЙ ЄВГЕНОВИЧ**

УДК 004.932

**МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ МАСШТАБУВАННЯ РУХОМИХ  
ТА НЕРУХОМИХ ЗОБРАЖЕНЬ**

05.13.23 – Системи та засоби штучного інтелекту

**АВТОРЕФЕРАТ**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Львів– 2015

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Національному університеті «Львівська політехніка» Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор  
**Наконечний Адріан Йосифович**,  
Національний університет  
«Львівська політехніка»,  
Міністерство освіти і науки України,  
завідувач кафедри комп'ютеризованих систем автоматички

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор  
**Березький Олег Миколайович**,  
Тернопільський національний економічний університет,  
Міністерство освіти і науки України,  
завідувач кафедри комп'ютерної інженерії

доктор технічних наук, професор  
**Литвиненко Володимир Іванович**,  
Херсонський національний технічний університет,  
Міністерство освіти і науки України,  
завідувач кафедри інформатики і комп'ютерних наук

Захист відбудеться «26» серпня 2015 р. о 14<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 35.052.14 у Національному університеті «Львівська політехніка» за адресою: 79013, м. Львів, вул. Степана Бандери, 28а, ауд. 807, V навч. корп.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного університету «Львівська політехніка» за адресою: 79013, м. Львів, вул. Професорська, 1.

Автореферат розісланий «\_\_\_\_\_» липня 2015 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради  
к.т.н., доцент

А.Є. Батюк

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

### Актуальність теми.

Використання високоефективних методів опрацювання зображень є ключовим при проведенні цілого ряду експериментальних досліджень. Однією з поширених операцій, яка виконується над зображеннями в цифровому форматі, є збільшення їх масштабу або збільшення певних фрагментів. При масштабуванні зображень на основі старої сітки пікселів будується нова, яка містить нові пікселі. Значення новоутворених пікселів обчислюються за допомогою алгоритмів інтерполяції. Особливу актуальність ця задача має при отриманні та обробці зображень об'єктів, побудові поверхонь та ландшафтів, в процесі наукових досліджень у фізиці, астрономії, космонавтиці, медицині.

Розв'язання даної задачі, як правило, полягає у застосуванні комплексних методів і суттєво залежить від особливостей людської зорової системи (ЛЗС). Повне перетворення зображення стандартної роздільної здатності (англ. Standard Definition Television - SDTV) у формат високої роздільної здатності (англ. High-Definition Television - HDTV) вимагає проведення операції деінтерлейсінгу – створення одного кадру з двох напівкадрів черезстрічкової розгортки та перетворення частоти кадрів. Кожен з цих пунктів вимагає якісного опрацювання зображень з компенсацією руху.

Найпростіші алгоритми масштабування полягають у проведенні найближчої сусідньої та лінійної інтерполяції у відповідних точках. Завдяки теорії інформації, введеної Шенноном в кінці 1940-х, sinc функція була прийнята як функція інтерполяції вибірки. Проте ідеальний інтерполятор має нескінченний імпульсний відгук, і це зумовлює неможливість його використання для локальної інтерполяції.

В останній час розроблено низку методів та алгоритмів для масштабування зображень, які відносяться до нелінійного типу та демонструють кращі результати у порівнянні з методами масштабування відеозображень на основі лінійної теорії. З метою досягнення кращих показників в процесі оцінки, частина з цих методів орієнтована на використання об'єктивних метрик. Переважно в ролі такої метрики виступає лише найменша середньоквадратична похибка (англ. Mean Square Error - MSE). Інші методи направлені на отримання кращих результатів суб'єктивних оцінювань.

Незважаючи на певні успіхи при проведенні масштабування зображень, існує багато невирішених задач, серед яких головними є забезпечення високої швидкодії опрацювання та якості результуючих зображень.

Розглянуті у даній роботі нові підходи до створення моделей та засобів масштабування зображень базуються на доробку багатьох світових вчених, зокрема: А.Бовіка, А.Гросмана, І.Добеші, В.Кінзнера, С.Маллата, Й.Мейера, Д.Морлета, У.Претта, Д.Хана, Ч.Чуї, Д.Шапіро та ін. Вагомий внесок у розвиток теоретичних і прикладних основ даного напрямку внесли також вітчизняні автори: Є.В.Бодянський, Р.А.Воробель, В.О.Геранін, В.К.Задірака, Р.М.Камінський, І.О.Кіренко, В.В.Лукін, А.Й.Наконечний, Д.Д.Пелешко, Ю.М. Рашкевич, Б.П.Русин, Я.Я.Рушицький, Л.Д.Писаренко та ін.

Суттєвим недоліком існуючих методів масштабування зображень є складність їх застосування до рухомих зображень, які необхідно опрацьовувати в режимі

реального часу, оскільки необхідно виконувати велику кількість математичних операцій для масштабування границь зображень.

Таким чином, актуальною є наукова задача, що полягає у необхідності удосконалення існуючих методів та розроблення нових моделей і алгоритмів масштабування зображень, які включатимуть в себе переваги існуючих методів та алгоритмів, при цьому даватимуть змогу отримання результуючих зображень суттєво вищої якості із швидкістю, необхідною для виконання масштабування в режимі реального часу.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційне дослідження виконувалась відповідно до напрямків наукової діяльності кафедри «Комп'ютеризовані системи автоматики» Національного університету «Львівська політехніка». Основний зміст дисертації складають результати теоретичних та практичних розробок, проведених автором в рамках науково-дослідних робіт: «Розроблення методів та засобів цифрової обробки інформації на базі її малохвильового (вейвлет) перетворення», (номер державної реєстрації 0109U008855) яка виконувалась з 02.07.2010р. по 10.12.2012р.; «Використання тренуваних фільтрів для просторового розширення зображення з оптимізацією індекса структурної подібності» (англ. «Adaptive Trained Filters for Video Upscaling Using Structural Similarity Index Metric Optimization»), яка виконувалась за замовленням фірми Філіпс (Philips Electronics Nederland B.V., м. Ейндховен, Нідерланди) у Національному університеті «Львівська політехніка», згідно з договором RWC-061-EP-08054-gvg з 01.08.2008р. по 31.12.2010р.

**Мета і завдання дослідження.** Мета роботи полягає у покращенні існуючих методів та розробленні нових ефективних засобів масштабування рухомих і нерухомих зображень, які забезпечують високу якість вихідного зображення в режимі реального часу.

Задачами дослідження є:

- аналіз методів та засобів масштабування рухомих та нерухомих зображень, які використовуються при їх обробці;
- аналіз та вибір метрики оцінки якості зображень з вищим ступенем кореляції з суб'єктивною оцінкою якості;
- удосконалення методів та алгоритмів масштабування зображень з використанням вибраної метрики об'єктивної оцінки якості;
- аналіз методів масштабування зображень, які базуються на малохвильовому (вейвлет) перетворенні;
- розроблення нового інтерполятора на основі адаптивного кодування в межах динамічного діапазону (АКДД) та малохвильового (вейвлет) перетворення;
- дослідження адекватності розроблених моделей та алгоритмів;
- побудова засобів масштабування рухомих і нерухомих зображень на основі розроблених моделей та алгоритмів;
- проведення комп'ютерного моделювання розроблених алгоритмів масштабування зображень і відео та здійснення їх програмної реалізації.

*Об'єкт дослідження* – процеси перетворення та масштабування цифрових зображень.

*Предмет дослідження* – методи перетворення та масштабування цифрових зображень з метою їх масштабування на основі інтерполяції оригінальних даних.

*Методи дослідження* – методи цифрової обробки зображень, основні положення лінійної алгебри, теорії рядів і цифрової фільтрації, спектрального та вейвлет аналізів, математичне і комп'ютерне моделювання.

**Наукова новизна одержаних результатів** полягає в тому, що:

**Вперше:**

- запропоновано та обґрунтовано використання індексу структурної подібності і розроблено математичну модель для обчислення вагових коефіцієнтів інтерполятора на основі АКДД, що дало змогу врахувати особливості системи зору людини та структурну інформацію зображення і, таким чином, підвищити якість масштабованих зображень шляхом усунення недоліків, пов'язаних з використанням найменшої середньоквадратичної похибки в ролі оптимізаційного критерію.

**Вдосконалено:**

- метод інтерполяції на основі АКДД, шляхом використання ромбоподібного вікна та «м'якого» порогування результуючого значення пікселя, що дало змогу уникнути появи «зубчастих» спотворень на границях результуючого зображення та підвищити об'єктивну оцінку якості вихідних зображень.

- метод обчислення вагових коефіцієнтів інтерполятора на основі АКДД, що дало змогу зменшити час обчислення коефіцієнтів, підвищити їх надійність при проведенні одночасних паралельних обчислень на декількох багатоядерних процесорах.

**Отримав подальший розвиток:**

- метод інтерполяції на основі АКДД шляхом його застосування для масштабування зображень, представлених у малошхвильовій області, що зробило зображення більш інформативними та прийнятними для подальшого аналізу і дало змогу отримати кращі результати при масштабуванні зображень із низьким бітрейтом.

**Практичне значення одержаних результатів:**

- реалізація розроблених моделей та алгоритмів масштабування зображень з використанням індексу структурної подібності у ролі оптимізаційного критерію забезпечила можливість проведення масштабування в режимі реального часу і покращення результатів для зображень із значним рухом сцени та бітрейтом 512 Кб/с на 6-10%;

- застосування малошхвильового перетворення зображень дало змогу локалізувати високо- та низькочастотні складові відеозображень та проводити інтерполювання низько-низької складової незалежно від інших складових, що підвищило якість масштабованих зображень при значних змінах сцен в кадрах та високих рівнях стиснення зображень на 7-12%;

- реалізація запропонованого алгоритмічного та програмного забезпечення масштабування зображень дала змогу проводити масштабування зображень як у часовій, так і в часо-частотній областях;

- розроблені алгоритми збільшили швидкодію етапу знаходження вагових коефіцієнтів інтерполятора, підвищили надійність процесу обчислення коефіцієнтів

при проведенні обчислень паралельно на декількох багатоядерних процесорах одночасно.

Проведені автором дослідження та розробки використані як математично-алгоритмічна основа масштабування зображень, що розроблялась в рамках науково-дослідної роботи “Розроблення методів та засобів цифрової обробки інформації на базі її малохвильового (вейвлет) перетворення”.

Результати дисертаційного дослідження використані при розробленні програмно-апаратних засобів уніфікованої системи обробки цифрової інформації в рамках спільного проекту з науковою лабораторією Філіпс (Philips Electronics Nederland B.V). Теоретичні та практичні результати використані в курсі лекцій “Цифрові методи обробки сигналів та зображень”, який читається для студентів за напрямком підготовки магістрів і спеціалістів «Системна інженерія» Національного університету “Львівська політехніка”, а також при виконанні магістерських робіт, дипломних проектів і наукових досліджень аспірантів.

**Особистий внесок здобувача.** Дисертаційна робота є самостійно виконаним науковим дослідженням. У роботах, виконаних у співавторстві, здобувачеві належить: [1] – реалізовано модифікований метод обчислення вагових коефіцієнтів інтерполятора на основі АКДД; [2] – розроблено математичну модель масштабування зображень інтерполятором на основі АКДД з “м’яким” порогуванням результуючих значень пікселів; [4, 13] – розроблено математичну модель обчислення вагових коефіцієнтів інтерполятора на основі АКДД; [5, 15] – проведено аналіз і запропоновано класифікацію методів масштабування (просторового розширення) зображень; [6] – визначено основні недоліки метрики MSE та проаналізовано метрики оцінки якості відеозображень; [7] – проаналізовано метод надрозширення зображень; [8] - розроблено математичну модель масштабування зображення з “жорстким” порогуванням результуючого значення пікселя та використанням ромбоподібного вікна; [9] – запропоновано алгоритм масштабування зображень з використанням методу надрозширення; [10] – запропоновано модифікований метод масштабування зображень представлених у малохвильовій області інтерполятором на основі АКДД; [11] – визначено оптимальний підхід «м’якого» порогування результуючих пікселів при використанні інтерполятора на основі АКДД; [14] – запропоновано використання структурної інформації для обчислення вагових коефіцієнтів інтерполятора на основі АКДД.

У наукових працях, виконаних одноосібно, здобувачем представлено такі наукові результати: [3] – запропоновано проведення процесу обчислення вагових коефіцієнтів інтерполятора на основі АКДД у два етапи; [12] – запропоновано використання структурної інформації зображень для обчислення вагових коефіцієнтів інтерполятора на основі АКДД.

**Апробація результатів дисертації.** Результати досліджень доповідалися на таких конференціях: Міжнародна науково-технічна конференція «Комп’ютерні науки та інформаційні технології (CSIT-2009)» (Львів, 15-17 жовтня 2009 р.); Perspective Technologies and Methods in MEMS Design (MEMSTECH), – Міжнародна науково-технічна конференція MEMSTECH 2010 «Перспективні технології і методи проектування МЕМС" (Львів-Поляна, 20-23 квітня 2010 р.); 18-а Міжнародна

конференція з автоматичного управління «АВТОМАТИКА 2011» (Львів, 28-30 вересня, 2011 р.); 6-th International Scientific and Technical Conference «Computer Sciences and Information Technologies (CSIT-2011)». (Львів, 16-19 листопада 2011 р.); I Міжнародна конференція з автоматичного управління та інформаційних технологій (Львів, 15-17 грудня, 2011 р.); The 7th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS'2013), (Berlin, Germany, September 12-14, 2013); The Second International Conference on Automatic Control and Information Technology (Krakow, Poland, December 7-8, 2013); XXI Міжнародна конференція з автоматичного управління, АВТОМАТИКА-2014 (Київ, 24-26 вересня, 2014 р.).

**Публікації.** Результати досліджень опубліковано у 15 наукових працях, з них 6 публікацій у фахових виданнях, з них 1 одноосібна, 1 публікація у закордонному науковому періодичному виданні та 8 публікацій за матеріалами наукових конференцій, з них 2 у міжнародній наукометричній базі даних Scopus [8, 9].

**Структура та обсяг роботи.** Дисертаційна робота складається з вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел і 5 додатків. Загальний обсяг дисертації 236 сторінок, з яких основний текст викладено на 129 сторінках друкованого тексту, містить 55 рисунків, 3 таблиці. Список використаних джерел складається з 103 найменувань.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність роботи, проаналізовані наукові дослідження з даної тематики, сформульовано мету та задачі досліджень, наукову новизну та практичне значення одержаних результатів, а також описано структуру дисертації та наведено дані про особистий внесок здобувача, апробацію роботи і публікації.

У **першому розділі** дисертаційної роботи запропоновано класифікацію методів масштабування зображень, розглянуто особливості лінійних та нелінійних методів масштабування зображень та описано підходи до надрозширення зображень.

Масштабування зображень можна класифікувати в залежності від величини масштабу. Коли масштаб менший одиниці, розмір зображення відповідно зменшується, одночасно погіршується роздільна здатність. Такий вид масштабування використовується на практиці у випадку необхідності одночасної передачі більшого числа зображень з меншою якістю, або ж у випадку вибору користувачем кількох телевізійних каналів, які подають на телевізійному екрані.

Найбільше зацікавлення, наукову і практичну цінність має випадок, коли масштаб зображень має бути більший одиниці. Зрозуміло, що у цьому випадку якість збільшеного зображення суттєво погіршується і залежить вона від величини самого масштабу. Для покращення якості зображень використовуються різні методи, які дозволяють прогнозувати значення додаткових пікселів. Зокрема, для цього використовуються методи апроксимації або інтерполяції для обчислення значень новоутворених пікселів.

На даний момент розроблено ряд методів масштабування зображень. Серед інтерполяторів, що працюють за цими методами, найбільш відомим і поширеним є

інтерполятор, побудований на основі адаптивного кодування з динамічним діапазоном (АКДД, англ. Adaptive Dynamic Range Coding – ADRC). Значення вагових коефіцієнтів, які використовуються протягом інтерполяції, залежать від вмісту локального блоку зображення. Даний інтерполятор характеризується високою швидкістю і може працювати в режимі реального часу. Знаходження коефіцієнтів проводиться протягом етапу навчання одноразово. Однак даний інтерполятор має ряд недоліків, з яких слід виокремити наступні:

- вагові коефіцієнти обчислюються шляхом мінімізації квадратичної помилки; такий підхід враховує лиш абсолютне відхилення між значеннями пікселів;
- обчислення вагових коефіцієнтів інтерполятора залежить від навчального базису: для його використання із зображеннями з різними типами спотворень необхідні додаткові набори коефіцієнтів;
- адаптивне кодування є нестійким до шумів.

Незважаючи на те, що традиційні методи інтерполяції характеризуються високою швидкістю, вони вносять ряд спотворень у результуюче зображення, а саме: відбувається розмивання зображень, розкид пікселів вздовж їх границь. Сучасні методи намагаються внести в інтерпольоване зображення височастотні спектральні складові. Класифікаційні просторові методи проводять інтерпольовання з врахуванням вмісту локального блоку та вимагають проведення додаткового процесу обчислення вагових коефіцієнтів (так званого процесу навчання).

Алгоритми на основі надрозширення вимагають значного об'єму пам'яті для зберігання декількох кадрів відеопослідовності, а також є неефективними при інтерполяції зображень із швидкою зміною сцени.

Основним недоліком класифікаційних методів є використання метрики MSE як оптимізаційного критерію під час обчислення вагових коефіцієнтів, оскільки дана метрика слабо корелюється із суб'єктивним сприйняттям якості. Таким чином, дані методи можуть бути удосконалені при використанні метрик з високим ступенем кореляції із суб'єктивними оцінками якості, що дозволить збільшити якість інтерпольованого зображення. Такі вдосконалення приведуть до ускладнення кількості обчислювальних операцій та розрахунків на етапі визначення вагових коефіцієнтів інтерполяторів, але не впливатимуть на швидкість процесу інтерполяції.

В результаті проведеного аналізу основних методів масштабування зображень встановлено, що інтерполятор на основі АКДД характеризується найвищою швидкістю та найменшою складністю в процесі роботи. Заміна метрики MSE у процесі обчислення вагових коефіцієнтів інтерполятора на метрику, яка краще корелюється із суб'єктивними оцінками якості зображень, дозволить підвищити якість результуючого зображення.

На основі проведеного аналізу зроблено висновок про актуальність задачі розроблення високоефективних методів та алгоритмів, для вирішення задач масштабування зображень в режимі «реального часу» та одночасного забезпечення високої їх якості.

У **другому розділі** розглянуто процедуру обчислення вагових коефіцієнтів інтерполятора на основі АКДД, проаналізовані основні підходи до оцінки якості



зображень, при цьому особлива увага зосереджена на оцінці якості зображень з використанням індексу структурної подібності. Проаналізована можливість використання дискретного малошвилювального перетворення зображень для подальшого їх масштабування.

З метою аналізу процесу інтерполювання зображень з використанням інтерполятора на основі АКДД, слід розглянути структуру його алгоритму, яка наведена на рисунку 1. На вхід подається зображення формату стандартної роздільної здатності. Інтерполяція проводиться в межах блоку  $3 \times 3$  пікселі. У кожному блоці виконується адаптивне кодування і знаходиться бітова маска блоку. На основі отриманої маски з пошукової таблиці вибираються коефіцієнти інтерполятора і обчислюється результуюче значення пікселя.

Якщо припустити, що  $F_{HD}$  – яскравість оригінальних пікселів формату високої роздільної здатності, тоді  $F_{HI}$  – значення яскравості, отримане в результаті інтерполювання, є зваженою сумою 9-ти пікселів формату стандартної роздільної здатності  $F_{SD}(k)$ ,  $k = 0, 1, \dots, 8$ , що належать до інтерполяційного вікна і обчислюється згідно виразу:

$$F_{HI} = \sum_{k=0}^8 w_c(k) \cdot F_{SD}(k), \quad (1)$$

де  $w_c(k)$  – вагові коефіцієнти класу  $c$ ,

$c$  – клас блоку, визначений під час адаптивного кодування.

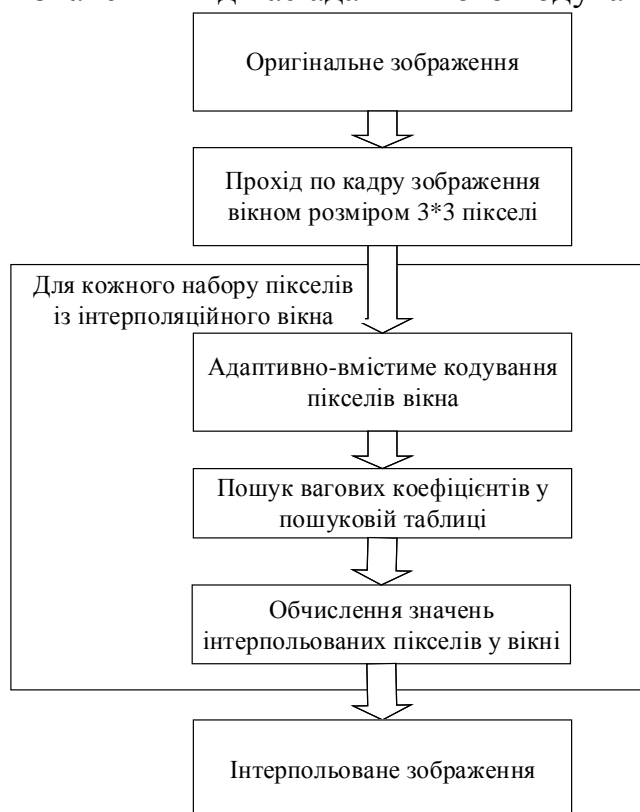


Рисунок 1 – Структура алгоритму масштабування зображень на основі АКДД

Обчислення вагових коефіцієнтів інтерполятора проводиться одноразово на так званому етапі навчання.

При адаптивному кодуванні з динамічними границями кожен піксель кодується одним бітом:

$$Q = \left\lfloor \frac{F_{IN} - F_{MIN}}{F_{MAX} - F_{MIN}} + 0.5 \right\rfloor, \quad (2)$$

де  $F_{IN}$  – значення яскравості пікселя вхідного зображення,

$F_{MAX}$  та  $F_{MIN}$  – максимальне та мінімальне значення яскравості пікселів у ковзаючому вікні відповідно.

Адаптивне кодування відбувається наступним чином: кодування проводиться у вікні  $3 \times 3$  пікселі; для пікселів блоку визначається середнє значення, яке виступає в ролі порогового. Пікселі, значення яких є більшими від порогового значення, кодуються 1, інші – 0. Таким чином, отримується бітова послідовність, яка є маскою блоку. Ця процедура називається операцією класифікування блоку.

Основною перевагою адаптивного кодування є простота реалізації. Використання виразу (2) зменшує число класів з  $256^9$  до  $2^9$  для розміру вікна  $3 \times 3$  пікселі. У випадку інвертування зображення коефіцієнти в пошуковій таблиці залишаються незмінними. Використання двох спряжених класів дозволяє зменшити число класів у два рази без втрат якості зображення, тобто до  $2^8$ .

В процесі знаходження коефіцієнтів інтерполятора на основі АКДД здійснюється мінімізація сумарної квадратичної помилки між блоками оригінального та інтерпольованого зображення. При такому підході ігнорується інформація про структуру зображення в блоці. У випадку її врахування інтерпольовані зображення забезпечуватимуть вищу суб'єктивну оцінку якості. Вимірювання структурних спотворень дозволяє проводити оцінку спотворень зображень, які сприймаються спостерігачем. В результаті цього здійснюється перехід від оцінки абсолютних значень помилок до обчислення структурних спотворень. Саме спотворення зображення повинно розглядатися як структурна інформаційна втрата.

Якщо  $x$  і  $y$  зображення, які були зрівноважені один з одним (наприклад, два фрагменти виділені з одного просторового розташування з порівнюваних зображень), тоді  $\mu_x$  – середнє значення  $x$ ,  $\mu_y$  – середнє значення  $y$ ,  $\sigma_x$  – дисперсія  $x$ ,  $\sigma_y$  – дисперсія  $y$ ,  $\sigma_{xy}$  – коваріація між  $x$  і  $y$  відповідно. Середнє і стандартне відхилення вважаються наближеними оцінками яскравості і контрасту. Коваріація показує наскільки одне зображення змінене відносно іншого. Структурна подібність  $S(x, y)$  між зображеннями  $x$  і  $y$  та статичні характеристики оцінюються наступним чином:

$$\mu_x = \bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i, \quad \mu_y = \bar{y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i, \quad (3)$$

$$\sigma_x^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2, \quad \sigma_y^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2, \quad (4)$$

$$S(x, y) = \frac{4\mu_x \mu_y \sigma_{xy}}{(\mu_x^2 + \mu_y^2)(\sigma_x^2 + \sigma_y^2)}, \quad (5)$$

де  $N$  – кількість пікселів, для яких проводиться оцінка даних параметрів.

При обчисленні індекса згідно виразу (5), коли  $(\mu_x^2 + \mu_y^2)$  або  $(\sigma_x^2 + \sigma_y^2)$  близькі до нуля, результат обчислення є нестійким. Даний ефект часто спостерігається при роботі з однорідними областями зображення. Для уникнення такої ситуації на практиці використовують підхід, який отримав назву індекса структурної подібності (Structural SIMilarity (SSIM)) між зображеннями  $x$  і  $y$ :

$$SSIM = \frac{(2\mu_x \mu_y + C_1)(2\sigma_{xy} + C_2)}{(\mu_x^2 + \mu_y^2 + C_1)(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + C_2)}, \quad (6)$$

Дві константи  $C_1$  і  $C_2$  обчислюються згідно наступних виразів:

$$C_1 = (K_1 L)^2, \quad C_2 = (K_2 L)^2, \quad (7)$$

де  $L$  – динамічний діапазон зміни значень пікселя (для 8-ми бітного зображення у тонах сірого  $L = 255$ );  $K_1$  та  $K_2$  дві константи. Авторами метрики запропоновані такі значення констант:  $K_1 = 0,01$  і  $K_2 = 0,03$ .

В результаті проведеного аналізу зроблено висновок, що для підвищення якості масштабованих зображень, в процесі обчислення вагових коефіцієнтів інтерполятора на основі АКДД в ролі оптимізаційного критерію необхідно використовувати метрику  $SSIM$  замість метрики  $MSE$ .

У **третьому розділі** розроблена математична модель обчислення коефіцієнтів інтерполятора на основі АКДД з використанням індексу структурної подібності. Теоретично визначена можливість використання ромбоподібного інтерполяційного вікна з «м'яким» порогуванням результуючого значення пікселя. Досліджена можливість поєднання малохвильового перетворення та інтерполяції на основі АКДД з метою покращення якості зображень із нечіткими границями та наведено алгоритм обчислення вагових коефіцієнтів інтерполятора при масштабуванні зображення, представленого у малохвильовій області.

З метою досягнення високих якісних показників інтерпольованого зображення в роботі запропоновано враховувати структурну інформацію під час знаходження вагових коефіцієнтів інтерполятора. Схема запропонованого алгоритму обчислення коефіцієнтів наведена на рисунку 2.

Оригінальна послідовність зображень з високим розширенням проріджується двічі. Отримані зображення використовуються в ролі навчального базису. Протягом етапу класифікації обчислюються класи усіх пікселів проріджених зображень та проводиться групування пікселів на основі належності до певного класу  $c$ . Коефіцієнти інтерполятора отримуються внаслідок статичної оптимізації індексу структурної подібності для кожного класу окремо.

Якщо  $F_{HD}$  представляє оригінальний блок пікселів формату HD, а  $F_{HI}$  – відповідні інтерпольовані значення масштабованого зображення, то значення

індексу структурної подібності для всіх пікселів, що належать даному класу, обчислюються згідно виразу:

$$SSIM_c = \frac{(2\mu_{F_{HI}}\mu_{F_{HD}} + C_1)(2\sigma_{F_{HI}F_{HD}} + C_2)}{(\mu_{F_{HI}}^2 + \mu_{F_{HD}}^2 + C_1)(\sigma_{F_{HI}}^2 + \sigma_{F_{HD}}^2 + C_2)}, \quad (8)$$

де:

$$\mu_{F_{HI}} = \overline{F_{HI}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N F_{HIi}, \quad \mu_{F_{HD}} = \overline{F_{HD}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N F_{HDi}, \quad (9)$$

$$\sigma_{F_{HI}}^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (F_{HIi} - \overline{F_{HI}})^2, \quad \sigma_{F_{HD}}^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (F_{HDi} - \overline{F_{HD}})^2, \quad (10)$$

$$\sigma_{F_{HI}F_{HD}} = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (F_{HIi} - \overline{F_{HI}})(F_{HDi} - \overline{F_{HD}}), \quad (11)$$

Знаходження значення метрики  $SSIM_c$  та обчислення оптимальних коефіцієнтів, при яких значення даної метрики буде максимальним, відбувається для всіх пікселів, що належать певному класу  $c$ . Дані обчислення повторюються для усіх класів протягом процесу навчання.

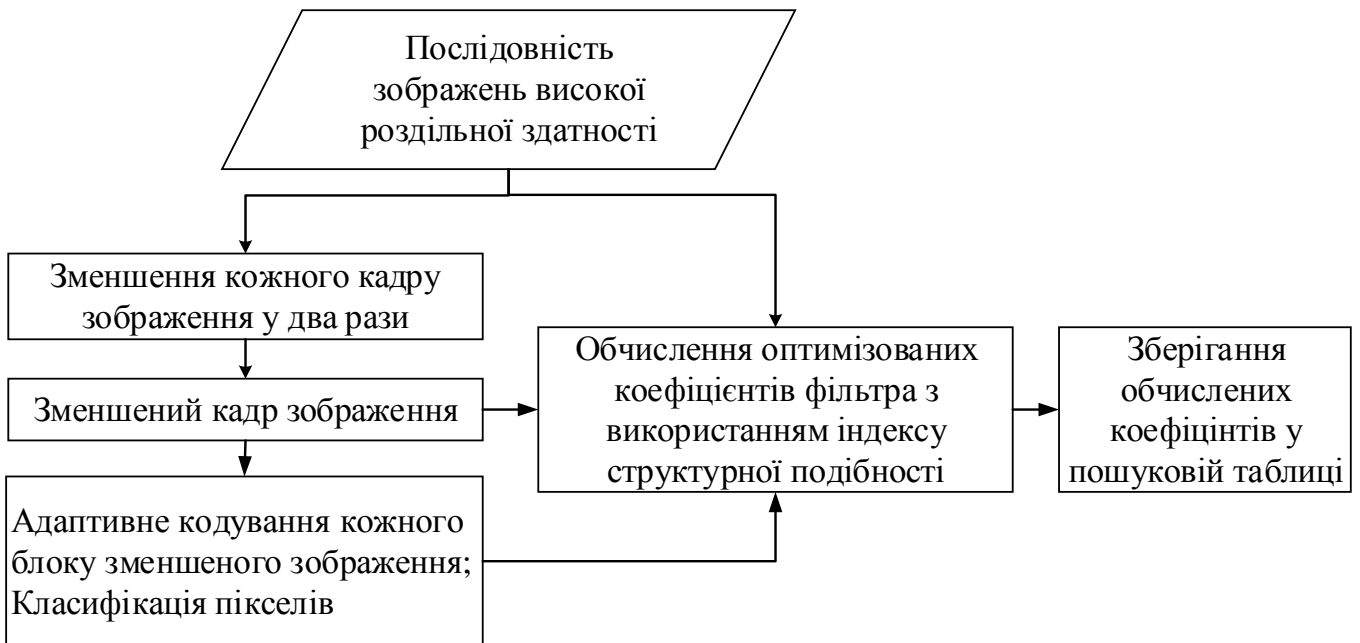


Рисунок 2 – Схема алгоритму обчислення коефіцієнтів інтерполятора з використанням індексу структурної подібності

Значення метрики  $SSIM_c$  функціонально залежить від  $n$  коефіцієнтів  $w_c(k)$  тобто  $SSIM_c(w_c(1), w_c(2), \dots, w_c(n))$ . Для знаходження оптимальних коефіцієнтів  $w_c(k)$  необхідно знайти максимум даної функції. Для цього обчислюються частинні похідні першого порядку відносно кожного коефіцієнта  $\frac{\partial(SSIM)}{\partial w_c(k)}$  і отримані вирази прирівнюються до нуля:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial(SSIM)}{\partial w_c(1)} = 0; \\ \frac{\partial(SSIM)}{\partial w_c(2)} = 0; \\ \dots \\ \frac{\partial(SSIM)}{\partial w_c(n)} = 0; \end{array} \right. , \quad (12)$$

Для розв'язання системи нелінійних рівнянь (12) використовується метод Ньютона в результаті чого отримано набір вагових коефіцієнтів  $w_c(k)$  класу  $c$ . Для обчислення коефіцієнтів усіх 256 класів система рівнянь (12) незалежно розв'язується 256 разів.

Використання метрики SSIM в ролі оптимізаційного критерію, у порівнянні з використанням метрики MSE, приводить до зменшення швидкодії обчислення вагових коефіцієнтів. Одночасно зростає необхідний об'єм оперативної пам'яті, оскільки на кожному кроці ітерації за методом Ньютона потрібно зберігати значення пікселів кожного блоку зображення для обчислення матриці Якобі. Об'єм необхідної оперативної пам'яті напряму залежить від розмірів та кількості кадрів відеопослідовностей, що використовуються в ролі навчального базису.

Оскільки використання метрики SSIM в ролі оптимізаційного критерію не впливає на роботу інтерполятора в режимі реального часу, то її використання є особливо перспективним.

Для знаходження коефіцієнтів інтерполятора на основі адаптивного кодування з динамічним діапазоном використовується класифікаційне вікно розміром  $3 \times 3$  пікселі (Рис. 3.б). Одним з варіантів підвищення якості результуючого зображення є збільшення розміру вікна до  $5 \times 5$  пікселів. Однак, під час класифікації зростає число класів до  $2^{24}$ . Як альтернативний варіант в роботі запропоновано використання класифікаційного вікна ромбоподібної форми (Рис. 3.а).

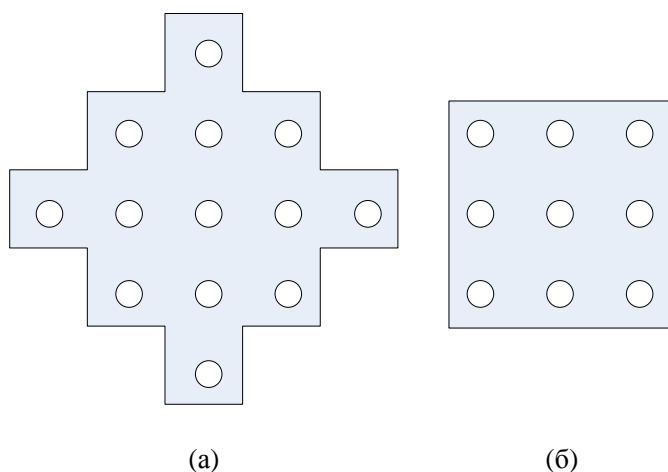


Рисунок 3 – Схематичне позначення інтерполяційного вікна а) ромбоподібного; б) квадратного

При використанні такого вікна інтерпольоване значення пікселя додатково залежить від чотирьох пікселів. При цьому число вагових коефіцієнтів інтерполятора рівне 13. Кодування блоку зображення вимагає додаткових 4 біти для представлення цих пікселів. Отже, число можливих комбінацій класів становить  $2^{12}$ .

Застосування ромбоподібного класифікаційного вікна дозволяє зменшити число класів зображення у порівнянні із вікном  $5 \times 5$  пікселів в 4096 разів при збереженні відповідної якості результуючого зображення.

Згідно виразу (1) може виникати ситуація, при якій значення інтерпольованого пікселя  $F_{HI}$  буде меншим від мінімального значення класифікаційного вікна  $F_{SDMIN}$ , або більшим від максимального значення  $F_{SDMAX}$ :

$$F_{HI}(i, j) < F_{SDMIN} \quad (13)$$

$$F_{HI}(i, j) > F_{SDMAX} \quad (14)$$

Дана ситуація виникає при інтерполюванні гладких областей зображень. Поява таких спотворень закладена в алгоритмі обчислення вагових коефіцієнтів зображень з використанням метрики  $SSIM$ , де використовується метод Ньютона для обчислення розв'язку системи нелінійних рівнянь, який є наближенням.

При використанні індексу структурної подібності такі спотворення помилково сприймаються як границі і підсилюються у вихідному зображенні. Для уникнення такого ефекту в роботі запропоновано встановлювати межі для значень інтерпольованого пікселя  $F_{HI}$ : значення пікселя  $F_{HI}$  не може бути меншим від мінімального значення з класифікаційного вікна  $F_{SDMIN}$ , або більшим від максимального значення  $F_{SDMAX}$ . В процесі експериментальних досліджень підтверджена неможливість виконання нерівності (13). З огляду на це дана умова може не враховуватися. Для отримання більш повільного переходу між значеннями пікселів на границях слід здійснювати «м'яке» порогування результуючого значення пікселя, тобто перевищення результуючого значення  $F_{HI}$  не повинно перевищувати максимальне значення  $F_{SDMAX}$  на 1%. З врахуванням цього, математична модель виглядатиме наступним чином:

$$F_{HI}(i, j) = \begin{cases} \sum_{k=0}^N F_{SD}(k) \cdot w_c(k), & \sum_{k=0}^N F_{SD}(k) \cdot w_c(k) < 1.01 \cdot F_{SDMAX} \\ F_{SDMAX}, & \sum_{k=0}^N F_{SD}(k) \cdot w_c(k) \geq 1.01 \cdot F_{SDMAX} \end{cases} \quad (15)$$

Отримана математична модель (15) описує роботу інтерполятора на основі АКДД.

При використанні структурної інформації для знаходження коефіцієнтів інтерполятора відбувається операція неявного згладжування. Остання зумовлена запропонованим підходом, який використовується для отримання інтерполяційних коефіцієнтів, за рахунок використання пікселів зменшеного і оригінального зображення. Таким чином, обчислені інтерполяційні коефіцієнти виконують роль неявного згладжування.

Однак при спробі інтерполяції зображень із нечіткими границями (сцени руху зображення), додаткове згладжування призводить до їх значного розмиття. З метою

уникнення такої ситуації в роботі пропонується комплексне використання малохвильового перетворення та інтерполятора на основі адаптивного кодування з динамічним діапазоном. Такий підхід дозволяє одночасно зменшувати рівень шумів у зображенні за рахунок проведення операцій порогування малохвильових коефіцієнтів.

На рисунку 4 наведено блок-схему проведення інтерполяції зображення запропонованим способом. Результуюче зображення отримується в результаті наступних кроків:

- над кадром вхідного зображення виконується малохвильове перетворення;
- отримана низько-низька складова  $LL_{1\text{ВХ}}$  подається на вхід інтерполятора на основі АКДД;
- крок 2 повторюється для складових високо-низької  $HL_{1\text{ВХ}}$ , низько-високої  $LH_{1\text{ВХ}}$  та високо-високої  $HH_{1\text{ВХ}}$ ;
- на основі отриманих складових  $LL_{1\text{ІНТ}}$ ,  $HL_{1\text{ІНТ}}$ ,  $LH_{1\text{ІНТ}}$  і  $HH_{1\text{ІНТ}}$  проводиться обернене малохвильове перетворення і отримується кадр інтерпольованого зображення.

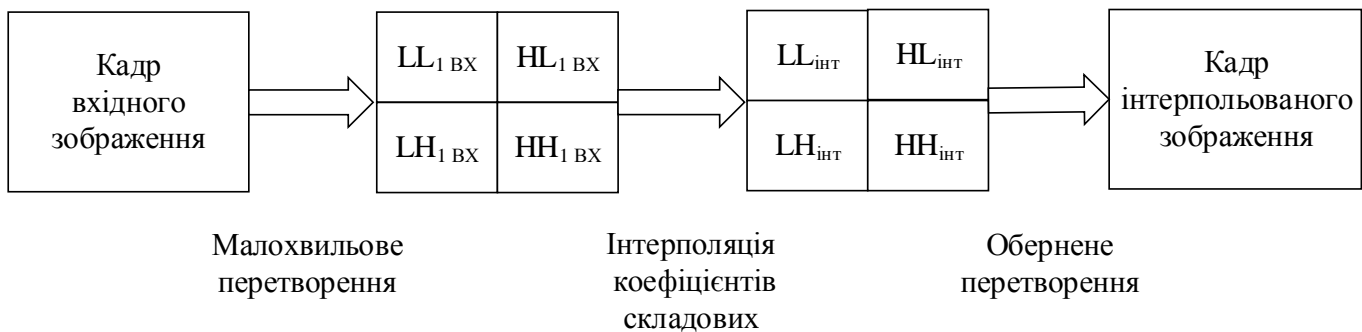


Рисунок 4 – Блок-схема алгоритму масштабування зображення з використанням інтерполятора на основі АКДД та малохвильовим перетворенням

Використання запропонованої моделі вимагає застосування інтерполятора на основі АКДД для отримання масштабованих малохвильових коефіцієнтів кожної із складових. Такий процес вимагає значного числа обчислень.

Для зменшення об'єму таких обчислень, а відповідно збільшення швидкодії, для інтерполяції  $HL_{1\text{ІНТ}}$ ,  $LH_{1\text{ІНТ}}$  і  $HH_{1\text{ІНТ}}$  складових, пропонується виконання наступних кроків:

- над кадром вхідного зображення виконується малохвильове перетворення для представлення вхідного зображення у малохвильовій області;
- подача низько-низької часо-частотної складової  $LL_{1\text{ВХ}}$  на вхід інтерполятора на основі АКДД;
- перенесення коефіцієнтів  $HL_{1\text{ВХ}}$ ,  $LH_{1\text{ВХ}}$ ,  $HH_{1\text{ВХ}}$  складових на відповідні координати складових  $HL_{1\text{ІНТ}}$ ,  $LH_{1\text{ІНТ}}$  і  $HH_{1\text{ІНТ}}$  без змін; відсутні значення коефіцієнтів заповнюються нулями;

- з отриманих  $LL_{1INT}$ ,  $HL_{1INT}$ ,  $LH_{1INT}$  і  $HH_{1INT}$  складових здійснюється обернене малохвильове перетворення та отримується кінцевий кадр інтерпольованого зображення.

Таким чином, можна зробити висновок, що незважаючи на зниження швидкодії обчислення вагових коефіцієнтів інтерполятора на основі АКДД, процес знаходження коефіцієнтів інтерполятора відбувається одноразово і не впливає в подальшому на роботу алгоритму з реальними даними, а схема отримання результуючого зображення в режимі реального часу залишається незмінною. Запропоновані підходи з використанням малохвильового перетворення впливають на час проведення масштабування зображення, проте дозволяють зменшувати рівень шумів та підвищувати якість результуючого зображення.

У **четвертому розділі** розглядаються особливості та переваги оптимізованого алгоритму знаходження вагових коефіцієнтів інтерполятора на основі АКДД, порівняння розроблених моделей та алгоритмів масштабування у малохвильовій області з аналізованими раніше з метою вибору оптимальних рішень і наводяться результати порівняльного аналізу інтерполяторів на основі АКДД.

Проведення обчислень вагових коефіцієнтів для інтерполяції зображень різних типів доцільне лише за умови використання зображень із подібною структурою. Це потребує використання значного числа тестових відеопослідовностей, які представляють різні сцени. Оскільки обчислення коефіцієнтів проводиться одноразово, то такий підхід має суттєві недоліки: зростання об'єму пам'яті, необхідної для збереження пікселів зменшеного зображення для кожного класу; виникнення критичної помилки під час обчислення вагових коефіцієнтів потребує повторного проведення всіх обчислень; неможливість отримання інтерполяційних коефіцієнтів для конкретних класів.

Для усунення вказаних недоліків і підвищення надійності процесу обчислення коефіцієнтів існуючий метод пропонується розділити на два етапи (Рис. 5.).

На першому етапі (Рис. 5.а.) тестові відеопослідовності зменшуються у два рази. Для кадрів зменшеного зображення відбувається адаптивне кодування і класифікація кожного блоку та знаходження значення відповідного пікселя із оригінальної послідовності. Отримані дані для кожного класу зберігаються у відповідні файли на файловій системі. Число таких файлів рівне  $2^{n-1} - 1$ , де  $n$  - кількість пікселів, що входить у блок. Дані, що відповідають нульовому класу, ігноруються. Отримані множини файлів використовуються як база тестових даних. Знаходження вагових коефіцієнтів відбувається послідовно на другому етапі (Рис. 5.б.). Дані для кожного класу зчитуються з відповідного файлу, після чого відбувається ітеративне знаходження вагових коефіцієнтів. Обчислені значення коефіцієнтів зберігаються у пошуковій таблиці.

Модифікований метод дозволяє проводити обчислення, які необхідні для знаходження вагових коефіцієнтів конкретного класу. При цьому, будь-які допущені помилки при обчисленнях ізолюються для кожного класу окремо і не впливають на обчислення коефіцієнтів інших класів. Обчислення коефіцієнтів може проходити одночасно паралельно на декількох багатоядерних процесорах.



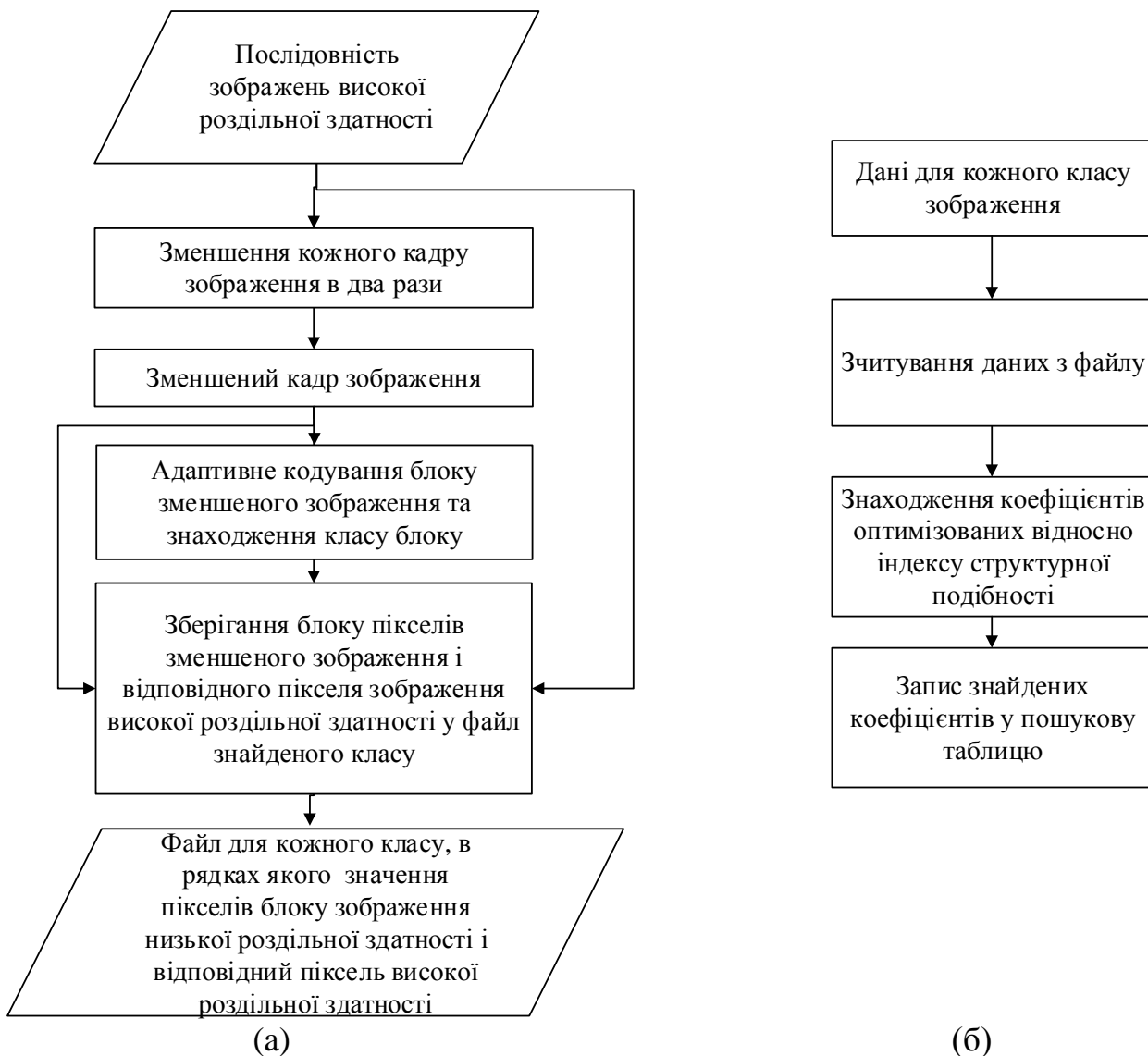


Рисунок 5 – Схема модифікованого методу знаходження коефіцієнтів інтерполятора а) перший етап – підготовка тестових наборів даних; б) знаходження коефіцієнтів інтерполятора для кожного класу

При визначенні вагових коефіцієнтів з використанням малохвильового перетворення, перший етап процесу навчання, наведеного на рисунку 5, доповнюється наступними кроками:

- після проведення операції зменшення зображення проводиться його малохвильове перетворення. Аналогічна операція здійснюється над оригінальним зображенням;
- здійснюється класифікація блоків малохвильових коефіцієнтів та їх адаптивне кодування. Дані кроки проводяться для кожної з отриманих складових *LL*, *HL*, *LH* і *HH* незалежно;
- для кожного блоку проводиться пошук значення відповідного малохвильового коефіцієнта із складової оригінальної послідовності;
- отримані дані для кожного класу та складової записуються у файлах на файловій системі. Число таких файлів рівне  $4 \cdot (2^{n-1} - 1)$ , де  $n$  - число пікселів, що входить у блок.

У роботі використовувалися базові функції Добеші 8-го порядку  $D8$ , які забезпечують кращу концентрацію енергії кадру зображення, дозволяють проводити відсікання коефіцієнтів на рівнях, нижчих від порогового значення, а також дозволяють зменшувати рівень шумів під час масштабування скомпресованих зображень.

В результаті досліджень запропонованих моделей масштабування зображень на основі малохвильового перетворення встановлено, що найкраща якість результуючих зображень та швидкодія процесу масштабування отримується при використанні 1-го рівня розкладу та:

- застосуванні інтерполятора з квадратним вікном до кожної із складових окремо, або
- масштабуванні складової  $LL_{1_{BX}}$  та перенесенням коефіцієнтів складових  $HL_{1_{BX}}$ ,  $LH_{1_{BX}}$  і  $HH_{1_{BX}}$  у складові  $HL_{1_{INT}}$ ,  $LH_{1_{INT}}$  і  $HH_{1_{INT}}$  без змін.

Для об'єктивного оцінювання результатів роботи алгоритмів масштабування зображень необхідні «ідеальне» та масштабоване зображення одного зразка. Об'єктивне оцінювання складалося з наступних кроків:

- прорідження вхідної відеопослідовності у два рази в кожному напрямку;
- масштабування прорідженого зображення тестовим алгоритмом.

Для “ідеальної” та масштабованої послідовності обчислювалися значення контрольних метрик  $MSE$  і  $SSIM$ .

При тестуванні запропонованих моделей та алгоритмів з бази експертної групи якості відеозображень (Video Quality Experts Group – VQEG) було обрано 5 відеопослідовностей (New York 2, Mobile & Calendar, Football, Sailboat, Suite) з різними ступенями стиснення та величинами руху. Результати обчислень метрик  $MSE$  і  $SSIM$  для інтерполятора з ваговими коефіцієнтами оптимізованими відносно даних метрик, а також для інтерполятора з використанням малохвильового перетворення наведено в Таблиці 1.

Таблиця 1.

**Значення метрик  $MSE$  і  $SSIM$  при використанні вагових коефіцієнтів інтерполятора оптимізованих відносно даних метрик**

Відеопослідовність	Бітрейт	Інтерполятор з ваговими коефіцієнтами оптимізованими відносно $MSE$		Інтерполятор з ваговими коефіцієнтами оптимізованими відносно $SSIM$		Інтерполятор з ваговими коефіцієнтами оптимізованими відносно $SSIM$ та використанням малохвильового перетворення	
		3	4	5	6	7	8
		$SSIM$	$MSE$	$SSIM$	$MSE$	$SSIM$	$MSE$
New York 2	768 Kb/s	0,621	191,7	0,657	199,21	0,661	192,9
	1.5 Mb/s	0,712	174,54	0,724	179,50	0,725	174,8
	3 Mb/s	0,817	164,8	0,828	172,2	0,815	174,1
	Без компресії	0,912	120,1	0,912	128,2	0,89	129,1

1	2	3	4	5	6	7	8
Mobile & Calendar	768 Kb/s	0,293	819,15	0,293	846,78	0,293	845,1
	1.5 Mb/s	0,324	812,3	0,348	851,2	0,348	850,1
	3 Mb/s	0,358	801,4	0,379	854,5	0,379	855,7
	Без компресії	0,41	649,8	0,409	670,1	0,401	680,88
Football	768 Kb/s	0,231	1495,66	0,251	1505,1	0,259	1493,1
	1.5 Mb/s	0,249	1451,98	0,263	1499,7	0,265	1440,1
	3 Mb/s	0,287	1415,31	0,291	1424,33	0,287	1420,8
	Без компресії	0,301	1347,11	0,301	1355,2	0,299	1341,1
Sailboat	768 Kb/s	0,722	221,11	0,735	241,2	0,728	239,45
	1.5 Mb/s	0,754	209,8	0,761	220,7	0,758	220,7
	3 Mb/s	0,811	189,31	0,799	205,9	0,798	204,78
	Без компресії	0,901	179,58	0,891	194,43	0,887	193,1
Suzie	768 Kb/s	0,7871	44,87	0,791	47,54	0,809	46,41
	1.5 Mb/s	0,851	35,88	0,858	36,8	0,854	37,11
	3 Mb/s	0,897	25,77	0,899	26,12	0,895	28,77
	Без компресії	0,946	13,79	0,958	14,07	0,939	16,09

Згідно з отриманими результатами оптимізація вагових коефіцієнтів інтерполятора відносно метрики *SSIM* негативно впливає на значення метрики *MSE*. Такий результат є очікуваним, оскільки під час обчислення коефіцієнтів відбувається зміна оптимізаційного критерію на основі метрики *MSE*. Одночасно можна зробити висновок, що зменшення значення метрики *MSE* залежить від типу зображення та рівня його стиснення. При використанні метрики *SSIM* та запропонованого хрестоподібного вікна, обчислене значення метрики *SSIM* починає зростати із збільшенням рівня компресії для зображень із значною кількістю руху (тестові зображення New York 2, Football).

На рисунках 6-7 наведено зміни значень метрик *SSIM* та *MSE* у відсотках при проведенні масштабування тестових зображень з рівнем стиснення 768 Kb/s. Зміна значень метрик *SSIM* та *MSE* для запропонованих інтерполяторів обчислюється відносно результатів масштабування зображень інтерполятором з ваговими коефіцієнтами, отриманими при використанні метрики *MSE*.

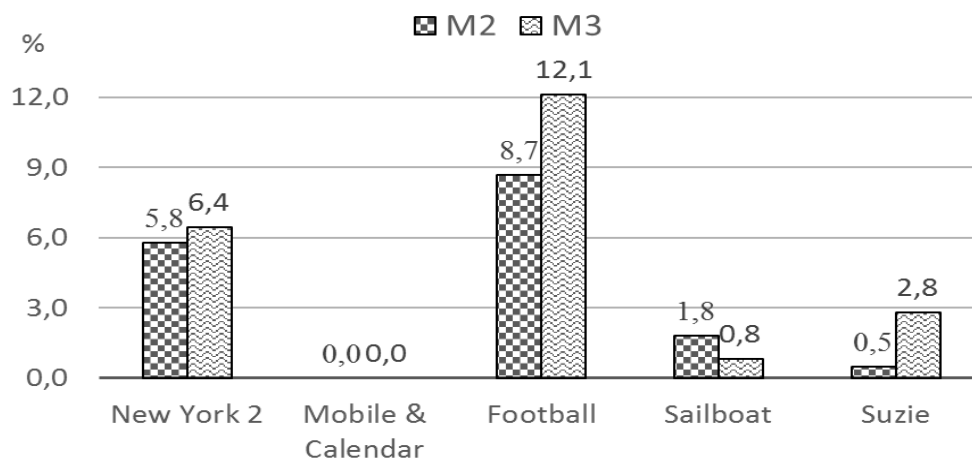


Рисунок 6 – Зміна метрики *SSIM* при використанні запропонованих підходів у порівнянні з існуючим (у відсотках)

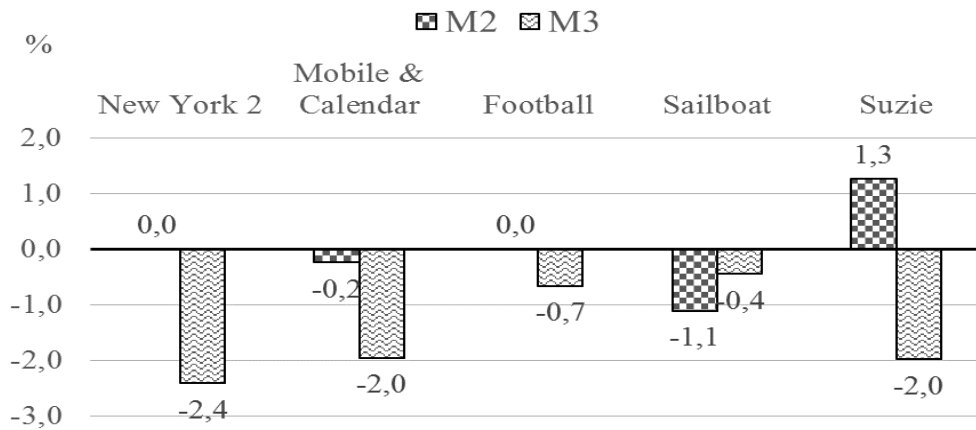


Рисунок 7 – Зміна метрики  $MSE$  при використанні пропонованих підходів у порівнянні з існуючим (у відсотках)

На рисунках 6-7 використані наступні умовні позначення:

- M2 – Інтерполятор з ваговими коефіцієнтами оптимізованими відносно  $SSIM$  ;
- M3 – Інтерполятор з ваговими коефіцієнтами оптимізованими відносно  $SSIM$  та використанням малохвильового перетворення.

При аналізі отриманих результатів встановлено, що заміна метрики  $MSE$  на метрику  $SSIM$  позитивно впливає на відеозображення з наявністю значних рухів сцени (*Football*, *New York 2*) і погано впливає на малорухомі послідовності (*Sailboat*, *Suize*). Використання моделі, яка базується на малохвильовому перетворенні зображень, під час інтерполяції є доцільним при рівні стиснення зображень 768 Kb/s. Проте, коли рівень стиснення зменшується, така модель поступається моделі інтерполятора з  $SSIM$  або  $MSE$  оптимізованими коефіцієнтами.

Таким чином, враховуючи вищенаведені результати, можна зробити висновок, що інтерполятор з  $SSIM$  оптимізованими коефіцієнтами є найбільш практичним, оскільки його використання не вносить жодних змін у процес масштабування, а додаткова обчислювальна складність впливає лише на процес обчислення його вагових коефіцієнтів.

Наведені у роботі моделі дозволяють проводити обробку зображень з коефіцієнтом масштабування  $k=2$ . Для отримання зображень із коефіцієнтом масштабування  $k=4$  інтерполювання проводять двічі: спочатку відбувається масштабування оригінального вхідного зображення, а потім отримане зображення подається на вхід повторно.

У **висновках** сформульовано основні результати дисертаційних досліджень.

В **додатках** описано розроблене програмне забезпечення, подано тексти програм та впровадження результатів роботи.

## ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі на основі виконаних автором досліджень запроваджено нові та розвинуто відомі теоретичні та практичні засади масштабування рухомих та нерухомих зображень. Завдяки цьому вирішена наукова задача, яка полягає у вдосконаленні методів та створенні математичних моделей і

алгоритмів швидких перетворень, орієнтованих на реалізацію операції масштабування в різних програмно-апаратних засобах з метою підвищення якісних характеристик результуючих зображень.

1. Проаналізовано відомі класичні та існуючі сучасні методи і моделі інтерполяції зображень, проведено їх класифікацію, наведено переваги та недоліки кожного з них. На основі аналізу встановлено, що в процесі проведення масштабування зображень вони відзначаються низькою ефективністю та якістю. Для підвищення вказаних показників обґрунтовано необхідність використання малохвильового перетворення та комплексної метрики оцінювання якості зображень. Досліджено існуючі підходи масштабування зображень з використанням малохвильового перетворення.

2. Проаналізовано метод проведення адаптивного кодування з динамічним діапазоном, що дозволило провести класифікацію блоків зображень і полегшити подальше обчислення масштабованих значень пікселів. Проаналізовано принцип роботи, розглянуто математичну модель та процес отримання вагових коефіцієнтів інтерполятора, побудованого на основі адаптивного кодування з динамічним діапазоном. Наведено модифікації моделі адаптивного кодування. Встановлено основні недоліки метрики  $MSE$  при її використанні для оцінювання якості зображення.

3. Проаналізовано і наведено математичну модель та основні властивості метрики  $SSIM$ , проаналізовані можливості такої метрики для зображень із різним ступенем стиснення та основні підходи до оцінки якості зображень і відео на основі індексу  $SSIM$ , визначені основні переваги використання такого індекса у порівнянні з метрикою  $MSE$ . В результаті проведеного аналізу запропоновано використання метрики  $SSIM$  в ролі оптимізаційного критерію для обчислення вагових коефіцієнтів інтерполятора на основі АКДД.

4. Удосконалено метод масштабування зображень, який базується на використанні індексу структурної подібності, для обчислення вагових коефіцієнтів інтерполятора на основі АКДД. Таким чином, були отримані вихідні зображення кращої якості в процесі масштабування зображень з високим рівнем стиснення та значним рухом сцени. Значення метрики  $SSIM$  зросли на 6-9% у порівнянні з існуючими методами.

5. Запропоновано ввести обмеження результуючого значення масштабованого пікселя за допомогою здійснення «м'якого» порогування значення для інтерполятора на основі АКДД. Це забезпечило отримання більш гладкого зображення у малозмінних областях вхідного зображення та усунуло спотворення, які можуть сприйматись як границі зображення і підсилюватись у результуючому зображенні.

6. Запропоновано і обґрунтовано використання ромбоподібного вікна для знаходження коефіцієнтів інтерполятора на основі АКДД, що дало змогу враховувати додатково інформацію 4 пікселів та підвищити якісь результуючого зображення.

7. Запропоновано моделі інтерполяції з використанням інтерполятора на основі АКДД і малохвильового перетворення. На основі проведених досліджень вибрано і обґрунтовано використання моделі, яка забезпечує найкраще

співвідношення між швидкодією і обчислювальною складністю. Встановлено, що оптимальний розмір інтерполяційного вікна для масштабування низько-низько частотної складової з використанням метрики *SSIM* має бути квадратної форми розміром 3×3 пікселі.

8. Розроблено алгоритмічне та програмне забезпечення для обчислення вагових коефіцієнтів інтерполятора на основі АКДД з використанням метрики *SSIM* в ролі оптимізаційного критерію. Також розроблено програмне забезпечення для масштабування зображень інтерполятором на основі АКДД з використанням малохвильового перетворення.

9. Вдосконалено метод обчислення вагових коефіцієнтів інтерполятора на основі АКДД шляхом поділу процесу обчислення на два етапи, що дало змогу зменшити час обчислення коефіцієнтів, підвищити їх надійність при проведенні одночасних паралельних обчислень на декількох багатоядерних процесорах.

10. В результаті досліджень встановлено, що запропоновані моделі дозволяють отримати зображення з вищою об'єктивною оцінкою якості для зображень із значними рухомими сценами та високим ступенем стиснення: значення метрики *SSIM* покращується в середньому на 6-9% для інтерполяторів з *SSIM* оптимізованими ваговими коефіцієнтами, та на 6.5-12% для інтерполяторів з використанням малохвильового перетворення.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Nakonechnyy A. Adaptive trained filters with *SSIM* optimization for video upscaling with soft pixel value truncation / Adrian Nakonechnyy, Zenoviy Veres // *Czasopismo Techniczne, Automatyka Zeszyt 4-AC*. - 2013. - 12. - pp. 89-101.

2. Наконечний А. Й. Використання індексу структурної подібності та м'якого порогування для знаходження коефіцієнтів інтерполяційного фільтра з адаптивним кодуванням / А. Й. Наконечний, З. Є. Верес // *Вісник Національного університету „Львівська політехніка”*, серія Автоматика, вимірювання та керування. – 2014. – № 802. – с. 55-64.

3. Верес З. Є. Модифікований алгоритм знаходження коефіцієнтів інтерполяційного фільтра на основі адаптивного кодування з динамічними границями // *Комп'ютерні технології друкарства*.- 2012.- № 28. – С. 223-228.

4. Верес З. Є. Використання індексу структурної подібності для знаходження коефіцієнтів інтерполяційного фільтра / З.Є. Верес, А.Й. Наконечний // *Комп'ютерні технології друкарства*.- 2011.-№ 26. - С. 92-100.

5. Верес З.Є. Класифікація методів просторового розширення зображення/ З.Є.Верес, А.Й. Наконечний // *Методи та прилади контролю якості*.- 2009.- №22. – С. 76-80.

6. Верес З.Є. Методи оцінки якості зображень та шляхи їх вдосконалення / З.Є.Верес, А.Й. Наконечний // *Комп'ютерні технології друкарства*. – 2008. – №20. – С. 69-81.

7. Наконечний А. Й. Алгоритм просторового розширення зображень для зменшення спотворень у рухомих та нерухомих зображеннях / А. Й. Наконечний, В. І. Федак, З. Є. Верес // *Методи та прилади контролю якості*. - 2009. - № 23. - С. 115-119.

8. Veres Z. Adaptive Trained Filters With SSIM Optimization and Pixel Value Truncation for Video Upscaling / Z. Veres, A. Nakonechnyy // 7th International Conference Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems. – Berlin, Germany. – 12-14 September 2013. – pp. 404-407.

9. Fedak V. Image and video super-resolution via accurate motion estimation / V.Fedak, Z.Verese, A. Nakonechnyy // Perspective Technologies and Methods in MEMS Design (MEMSTECH).- April 2010.- Lviv.- pp. 223-225.

10. Nakonechnyy A. The wavelet based trained filter for the image interpolation / A.Y. Nakonechnyy, Z.Y Veres // XXI Міжнародна конференція з автоматичного управління АВТОМАТИКА-2014. – м. Київ. - 24-26 вересня 2014.- с. 174-175.

11. Nakonechnyy A. Selection of optimal pixel value truncation threshold for video upscaling with ssim based adaptive trained filters [Електронний ресурс]/ Adrian Nakonechnyy, Zenoviy Veres // The Second International Conference on Automatic Control and Information Technology, – Krakow, Poland. – 2013. – Режим доступу до ресурсу: 1 електрон. опт. диск (CD-ROM).

12. Верес З.Є. Використання структурної інформації зображення для знаходження коефіцієнтів інтерполяційного фільтра/ З.Є. Верес // 18-а Міжнародна конференція з автоматичного управління «АВТОМАТИКА 2011». – Львів/ – 28-30 вересня, 2011 р. – С. 361-362.

13. Nakonechnyy A. SSIM-optimized trained filters for video upscaling / A. Nakonechnyy, Z. Veres // I Міжнародна конференція з автоматичного управління та інформаційних технологій. – м. Львів. – 15-17 грудня, 2011 р. – С. 8-9.

14. Nakonechnyy A. Usage of structural information for trained filters coefficients calculation / Nakonechnyy Adrian, Veres Zenoviy // 6th International Scientific and Technical Conference “Computer Sciences and Information Technologies” (CSIT’2011). – Lviv 2011. – pp. 50-51.

15. Верес З.Є. Дослідження просторово-частотних методів розширення зображення / Верес Зеновій, Ігор Кіренко // Міжнародна науково-технічна конференція "Комп'ютерні науки та інформаційні технології" (CSIT-2009). – м. Львів. – 15-17 жовтня 2009 р. – С. 167-170.

## АНОТАЦІЯ

**Верес Зеновій Євгенович. Методи та засоби масштабування рухомих та нерухомих зображень.** – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.23 – системи та засоби штучного інтелекту – Національний університет «Львівська політехніка» Міністерства освіти і науки України, Львів, 2015.

Дисертація присвячена вдосконаленню та розробленню методів та засобів масштабування зображень. Використовуючи структурну інформацію, запропоновані модифіковані методи та розроблені моделі дозволяють отримати результуючі зображення суттєво вищої якості із швидкодією, необхідною для виконання масштабування в режимі реального часу.

Проведено класифікацію методів масштабування зображень. Створено модифіковані моделі масштабування зображень з використанням інтерполятора на основі адаптивного кодування з динамічними границями. Це дозволяє врахувати структурну інформацію під час процесу масштабування шляхом використання індексу структурної подібності в ролі оптимізаційного критерію. Запропоновано здійснювати «м'яке» порогоування результуючого значення пікселя. Обґрунтовано доцільність використання ромбоподібного вікна для знаходження коефіцієнтів інтерполятора. Запропоновано моделі використання інтерполятора на основі АКДД в малохвильовій області.

З метою підвищення швидкодії та надійності запропонований поділ навчального процесу обчислення коефіцієнтів інтерполятора на два етапи.

Якість масштабованих зображень, які містять рухомі сцени та характеризуються високим ступенем стиснення, підвищена на 6-9% для інтерполяторів з оптимізованими ваговими коефіцієнтами відносно індексу структурної подібності, та 6.5-12% при додатковому малохвильовому перетворенні.

**Ключові слова:** масштабування зображення, інтерполяція, індекс структурної подібності, оцінювання якості рухомих і нерухомих зображень, малохвильове перетворення

## SUMMARY

**Veres Zenoviy Y. The methods and tools for video and image up-scaling. – Manuscript.**

The thesis for candidate of technical science degree within the specialty 05.13.23 – the systems and tools of the artificial intelligence. – Lviv Polytechnic National University of Ministry of Education and Science of Ukraine, Lviv, 2015.

The thesis is devoted to the development and improvement of methods and tools for video and image up-scaling with the performance level required to perform the upscaling in the real time mode.

The known classical and modern methods and existing approaches for the image and video upscaling are analyzed and classified; the advantages and disadvantages of each; based on the analysis of theirs' algorithms are presented. The low efficiency and quality are identified as a root cause of the poor output quality of the result video and images. To address this challenges the wavelet transform is employed for video and images upscaling by ADRC based trained filters.

The principles of the ADRC coding are analyzed. The method, mathematical model and the process of the ADRC based training filters weighting coefficients are analyzed. The basic disadvantages of the MSE metric for the image quality assessment are investigated and presented.

The SSIM metric for video and image quality assessment is analyzed. The assessment shows the main advantages of the SSIM index compared to the MSE metric. As a consequence of this analysis the use of SSIM metrics as optimization criterion for calculating the weighting coefficients of the ADRC based trained filters is proposed.

The developed method of the video and image upscaling based on the use of structural similarity index to calculate the weighted coefficients of the ADRC based



trained filters allows to get a better quality image output in the result video and images with high compression and significant movement of the scene image and provide increasing value of the SSIM metric in 6-9% compared with existing methods.

The trained filters are adjusted by use of diamond-shaped interpolation window. It allowed to take into account additional information from the 4 neighbor's pixels and improve the quality for the resulting image. Additionally, it is proposed to make soft truncation of the result pixel value during the interpolation process and allow pixel overshoot limited by 1% from the maximum pixel value which ensured a smooth image in flat regions of the video and images and avoid distortions that could be perceived as the edges and enhanced improperly in the resulting image.

The approaches to combine wavelet transform with ADRC based trained filter is proposed and investigated. The interpolation is run over wavelet coefficients of each of the components. The experimental results shown the most reasonable algorithm is to run the interpolation only for low-low subband of the wavelet coefficients – it provides the best balance between performance and computational complexity.

The algorithms and software are developed to calculate weight coefficients of the ADRC based trained filter with SSIM metrics as optimization criterion and video and images upscaling using wavelet domain.

The weight coefficients calculation process is proposed to be split into the two steps to improve its performance and reliability.

It is shown that the proposed model can get high quality scalable images for cases where input images contain moving scenes and are characterized by high compression, 6-9% for upscaling with SSIM usage, and 6.5-12% with additional wavelet transformation

**Keywords:** - image interpolation, image upscaling, structural similarity index, video quality assessment, wavelet transform

## АНОТАЦИЯ

**Верес Зеновий Евгеньевич. Методы и средства масштабирования подвижных и неподвижных изображений.** – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.23 – системы и средства искусственного интеллекта. – Национальный университет «Львовская политехника» Министерства образования и науки Украины, Львов, 2015.

Диссертация посвящена совершенствованию и разработке методов и средств масштабирования изображений, которые, используя структурную информацию, позволяют получить результирующие изображения существенно более высокого качества с быстродействием, необходимым для выполнения масштабирования в режиме реального времени.

Проведена классификация методов масштабирования изображения. Создано модифицированные модели масштабирования изображения с использованием интерполятора на основе адаптивного кодирования с динамическими границами, которые позволяют учесть структурную информацию в процессе масштабирования путем использования индекса структурного сходства в роли оптимизационного

критерия. Предложено осуществлять «мягкое» округление результирующего значения пиксела. Предложено и обосновано использование ромбовидного окна для нахождения коэффициентов интерполятора. Предложены модели использования интерполятора на основе АКДД в вейвлет области. Для повышения быстродействия и надежности предложено разделение учебного процесса вычисления коэффициентов фильтра на два этапа.

Увеличено качество масштабируемых изображений, содержащих подвижные сцены и характеризующихся высокой степенью сжатия, на 6-9% при использовании интерполятора с оптимизированными весовыми коэффициентами относительно индекса структурного сходства, и 6.5-12% при дополнительном использовании вейвлет преобразования.

**Ключевые слова:** Масштабирование изображения, интерполяция, индекс структурного сходства, оценка качества видеоизображений, вейвлет преобразование

Підписано до друку 21.07.2015 р.  
Формат 60×84/16.  
Папір друкарський. Ум. друк. арк. 0,9.  
Зам. № 203. Наклад 100 пр.

Видавництво «ПАІС»  
Реєстраційне свідоцтво ДК № 3173 від 23 квітня 2008 р.  
вул. Гребінки 5, оф. 1, м. Львів, 79007  
тел.: (032) 225-60-14, (032) 261-24-15  
e-mail: pais@mail.lviv.ua; <http://www.pais.com.ua>