

СТИСКУЮЧЕ ВІДОБРАЖЕННЯ ДЛЯ КОДУВАННЯ ЦИФРОВИХ ЗОБРАЖЕНЬ**СЖИМАЮЩЕЕ ОТОБРАЖЕНИЕ ДЛЯ КОДИРОВАНИЯ ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ****THE COMPRESSING MAPPING OF DIGITAL IMAGES FOR THEIR ENCODING**

Анотація. У статті запропоноване стискуjące відображення, що має властивість зменшення візуальної та статистичної надмірності цифрових зображень. Показано, що з використанням цього відображення хроматичні компоненти можна кодувати адаптивними рівномірними кодами, що мають довжину менше одного байта.

Аннотация. В статье предложено сжимающее отображение, которое имеет свойства, позволяющие уменьшение визуальной и статистической избыточности цифровых изображений. Показано, что с использованием этого отображения хроматические компоненты можно кодировать адаптивными равномерными кодами, имеющими длину меньше одного байта.

Summary. The compressing mapping of digital images have been proposed in the paper. This mapping has the property to decrease color and statistical redundancy of digital images. It is shown, that due to proposed mapping one could encode the chromatic components of the image using the adaptive uniform encoding with less than one byte length.

Розробка методів та алгоритмів стискання інформації, представленої у цифровій формі для оптимізації її збереження та передавання каналами зв'язку, здійснюється понад 20 років. У цій галузі наукових досліджень було отримано низку важливих для практичного використання результатів, стосовно стискання статичних зображень та відео, що, наприклад, реалізовані у JPEG (JPEG-2000), MPEG-4, H.261, H.263, H.264 та ін. Незважаючи на те, що вони широко використовуються на практиці збереження та передавання відеоданих, проблема розроблення більш ефективних методів їх стискання залишається однією з найактуальніших проблем цифрового оброблення сигналів. Завдяки розвитку цифрової техніки все більш широко використовуються технології HDR – цифрових зображень з високим динамічним діапазоном, в яких для кодування кольорного контенту зображення використовується до 48 bpp. Відеодані займають все більшу частку у загальному обсязі інформації, яка передається та зберігається у сучасних інфокомунікаційних системах, а з часом їх обсяги постійно збільшуються, що в кінцевому рахунку може привести до проблем з підтримкою належної якості обслуговування.

Найбільш ефективним рішенням щодо зменшення мережного навантаження та збереження необхідної якості обслуговування є підвищення ефективності стискання відеоданих. На сьогоднішні дослідження щодо підвищення ефективності стискання відеоданих можна поділити на два напрями:

- розроблення методів стискання відео даних, наприклад, фрактальне [1, 2] та вейвлет-стискання [3, 4];
- підвищення ефективності існуючих алгоритмів стискання, а саме: зменшення обчислювальної складності та підвищення ступеня стискання з урахуванням контекстних характеристик зображення [5, 6].

Для того, щоб забезпечити генерацію асимптотично оптимального коду і тим самим максимальну ступінь стискання, актуальним є вирішення проблеми зменшення інформаційної надмірності зображення. Для цього використовуються певні методи, мета яких – перетворення потоку інформації до такої форми, яка дозволить застосовувати контекстні моделі для подальшого ефективного кодування. На сьогодні найбільшого поширення серед методів контекстного моделювання набули методи PPM (Prediction by Partial Matching – передбачення за частковим збігом) [7], CTW (Context-Tree Weighting – зважування з використанням контекстних дерев) [8], DMC (Dynamic Markov Compression – динамічне марковське стискання) [9] та використання нейронних мереж [10].

Особливе місце серед методів контекстного моделювання займає метод BWT (Burrows-Wheeler Transformation), запропонований М. Барроузом та Д. Уїлером у роботі [11]. У цьому методі контекстне моделювання здійснюється двома етапами. На першому етапі здійснюється проадаптація даних, тобто представлення їх у виді «зручному» для подальшого кодування. На другому етапі, власне, розробляється контекстна модель для кодування. Проадаптація даних полягає у групуванні символів повідомлення за схожістю їх контекстів, що має наслідком збільшення ймовірності появи

послідовностей однакових символів. На сьогодні BWT, завдяки проадаптації даних, один з найкращих методів стискання по співвідношенню між ефективністю та продуктивністю кодування повідомлень зі значною надмірністю.

Ще одним напрямом підвищення ефективності стискання є використання стискуючих відображень, наприклад, фрактальні методи, але вони мають значну обчислювальну складність. Однак лінійні стискуючі відображення практично не використовуються у сучасних системах кодування та стискання зображень. Тому **метою даної роботи** є розроблення стискуючого лінійного відображення для кодування компонент кольору цифрових зображень та дослідження його впливу на зменшення візуальної та статистичної надмірності відеоданих.

1. Стискуюче відображення cBX2X3. На множині дійсних чисел пряме лінійне перетворення з простору RGB у BX2X3 має вид [12]:

$$\begin{pmatrix} B \\ X2 \\ X3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \lambda_1 & \lambda_2 & \lambda_3 \\ -\lambda_1 & 1-\lambda_2 & -\lambda_3 \\ -\lambda_1 & -\lambda_2 & 1-\lambda_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Тут λ_i впорядковані за спаданням власні значення ковариаційної матриці, розрахованої для компонент простору RGB, при чому власні значення нормовані так, щоб їх сума дорівнювала одиниці $-\sum_i \lambda_i = 1$. Компоненти простору RGB набувають значення з проміжку $[0,255]$. C_i – компоненти простору RGB, впорядковані у відповідності їхніми власним значеннями. З рівняння (1) слідує, що компоненти простору cBX2X3 будуть набувати значення з проміжків: $B \in [0,255]$, $X2 \in [-255(\lambda_1 + \lambda_3), 255(\lambda_1 + \lambda_3)]$ та $X3 \in [-255(\lambda_1 + \lambda_2), 255(\lambda_1 + \lambda_3)]$.

Будь-яке лінійне перетворення, ранг матриці якого дорівнює рангу розширеної матриці, є повним, тобто взаємнооднозначним та неперервним. Крім того, простори кольорів RGB та BX2X3 є метричними просторами, тому лінійне перетворення (1) – це з іншого боку, – відображення метричного простору самого в себе. Відображення F метричного простору $R = (D, \rho)$ самого в себе є стискуючим, якщо існує таке невід’ємне дійсне число $\alpha < 1$, що для будь-яких двох точок $x, y \in D$ виконується нерівність $\rho(F(x), F(y)) \leq \alpha \rho(x, y)$.

Відомо [13], що лінійне відображення $y = Ax + b$ n -вимірному простору самого в себе є стискуючим, якщо виконується умова

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ij}^2 \leq \alpha < 1. \quad (2)$$

Розглянемо простір BX2X3. Матрицю перетворення (1) позначимо через M . Тоді

$$\sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 m_{ij}^2 = 3(\lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2) + 2\lambda_1.$$

Враховуючи те, що $\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1$, отримаємо

$$3(\lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2) + 2\lambda_1 < 3 + 2\lambda_1 > 1.$$

Звідси

$$\sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 m_{ij}^2 > 1.$$

Тобто відображення у такому виді не є стискуючим. Для того щоб отримати стискуюче відображення для простору BX2X3, розглянемо матрицю

$$M_1 = \begin{pmatrix} \lambda_1 & \lambda_2 & \lambda_3 \\ -\frac{\lambda_1}{2} & \frac{1-\lambda_2}{2} & -\frac{\lambda_3}{2} \\ -\frac{\lambda_1}{2} & -\frac{\lambda_2}{2} & \frac{1-\lambda_2}{2} \end{pmatrix} \quad (3)$$

Як і у першому випадку перетворення з такою матрицею у цілому не є стискующим, але якщо розглянути відображення простору $C_1C_2C_3$ у підпростір $X2X3$, то тоді отримаємо:

$$cBX2X3 : C_1C_2C_3 \rightarrow X2X3; \sum_{i=2}^3 \sum_{j=2}^3 m_{ij}^2 < \frac{1+\lambda_1}{2} = \alpha < 1.$$

З урахуванням отриманих результатів, можна дійти висновку, що відображення кольорів простору RGB на підпростір $X2X3$ є стискующим.

У просторі $cBX2X3$ лише $B \in [0,255]$. Якщо в рівняння (1) замість матриці M підставити матрицю M_1 , то тоді отримаємо, що хроматичні компоненти будуть змінюватись у діапазонах

$$X2 \in [-128(\lambda_1 + \lambda_3), 127(\lambda_1 + \lambda_3)], X3 \in [-128(\lambda_1 + \lambda_2), 127(\lambda_1 + \lambda_2)]. \quad (4)$$

Слід зауважити, що $\lambda_1 + \lambda_2 < 1$ та $\lambda_1 + \lambda_3 < 1$, а співвідношення (4) визначають лише верхню оцінку зміни діапазонів хроматичних компонент. Більш точні значення визначаються з розв'язання задачі лінійного програмування, яка, наприклад, для максимального значення хроматичної компоненти $X2$ буде мати вид

$$X2_{\max} = -\lambda_1 C_1 + (1 - \lambda_2) C_2 - \lambda_3 C_3 \rightarrow \max$$

при обмеженнях:

$$C_1 \leq C_{1\max}; C_2 \leq C_{2\max}; C_3 \leq C_{3\max}; \\ C_1 \geq C_{1\min}; C_2 \geq C_{2\min}; C_3 \geq C_{3\min}.$$

Тут $C_{i\max}$, $C_{i\min}$ – границі динамічного діапазону i -ї компоненти кольору простору RGB. Отже, з наведених співвідношень випливає, що довжина діапазонів хроматичних компонент буде адаптивно налаштовуватись під колірний контент зображення, що враховується власними значеннями ковариаційної матриці та діапазонами компонент простору RGB. Слід також зазначити, що використання стискуючого відображення для кодування компонент кольору буде супроводжуватись зменшенням візуальної надмірності. Це зумовлено тим, що відображення $cBX2X3$ множини цілих чисел у саму себе є сюр'єктивним, отже при оберненому відображенні у простір RGB кількість кольорів буде зменшуватись.

2. Аналіз властивостей стискуючого відображення. З метою аналізу властивостей запропонованого стискуючого відображення було розроблене застосування, яке виконує перетворення з простору RGB у $cBX2X3$ та обернене перетворення. З використанням цього застосування було оброблено 100 фотореалістичних цифрових зображень з [14]. Для аналізу встановлювались мінімальні $X_{i,\min}$ і максимальні $X_{i,\max}$ значення хроматичних компонент та їх палітра, тобто кольори та їх кількість n_{xi} для кожної компоненти у діапазоні $[X_{i,\min}, X_{i,\max}]$. З використанням отриманих результатів обчислювалась довжина рівномірного коду для кодування хроматичних компонент, а також були виконані оцінки щодо можливого зменшення обсягу файла зображення у стискуючому просторі $cBX2X3$. Діапазони ахроматичної компоненти B не досліджувались, оскільки для фотореалістичних зображень при її кодуванні, у переважній більшості випадків, необхідно один байт. Винятком з цього правила можуть бути лише синтетичні зображення та ділова графіка.

На рис. 1 наведені значення ентропії хроматичної компоненти $X2$ у просторі $VX2X3$ та у стискуючому просторі $cBX2X3$. Як видно з наведеного рисунка, ентропія хроматичної компоненти $X2$ у просторі $VX2X3$ у середньому в 1,2 рази більша ніж її ентропія у просторі $cBX2X3$. Аналогічне співвідношення спостерігається й для хроматичної компоненти $X3$. Це зумовлено тим, що діапазони хроматичних компонент у просторі $cBX2X3$ менші ніж у $VX2X3$.

У табл. 1 наведені окремі експериментальні значення діапазонів хроматичних компонент та кількість кольорів у палітрі кожної компоненти n_{x2} та n_{x3} .

Якщо зберігати палітру хроматичних компонент, а значення кольорів у палітрі кодувати індексом палітри, то слід очікувати, що у переважній більшості випадків довжина рівномірного коду буде менше ніж один байт. Для кодування хроматичних компонент довжина рівномірного двійкового коду визначатиметься за формулою $k_{xi} = \lceil \log_2 n_{xi} \rceil$, тут $\lceil x \rceil$ – найближче ціле зверху.

Н

Рисунок 1 – Ентропія компоненти X2 у різних просторах

Таблиця 1 – Диференціальні ентропії

Файл	X2
01.bmp	-7
08.bmp	-5
20.bmp	-7
36.bmp	-4
45.bmp	-6
60.bmp	-5
75.bmp	-1
83.bmp	-4
99.bmp	-1

У табл. 2 наведено результати розрахунку рівномірних кодів.

Таблиця 2 – Довжини рівномірних кодів

Файл	Довжина
01.bmp	
08.bmp	
20.bmp	
36.bmp	
45.bmp	
60.bmp	
75.bmp	
83.bmp	
99.bmp	

При використанні статистичних компонентів кодів, довжина яких визначена статистичною надмірністю, розрахунок кодування здійснюється за формулою $\Delta V = n \cdot m \sum_{i=1}^m p_i \log_2 \frac{1}{p_i}$

Аналіз результатів використання стискуючих кодів показує, що для всієї множини даних стиснення становить близько 8 %, а максимальне стиснення досягає 15 %.

8

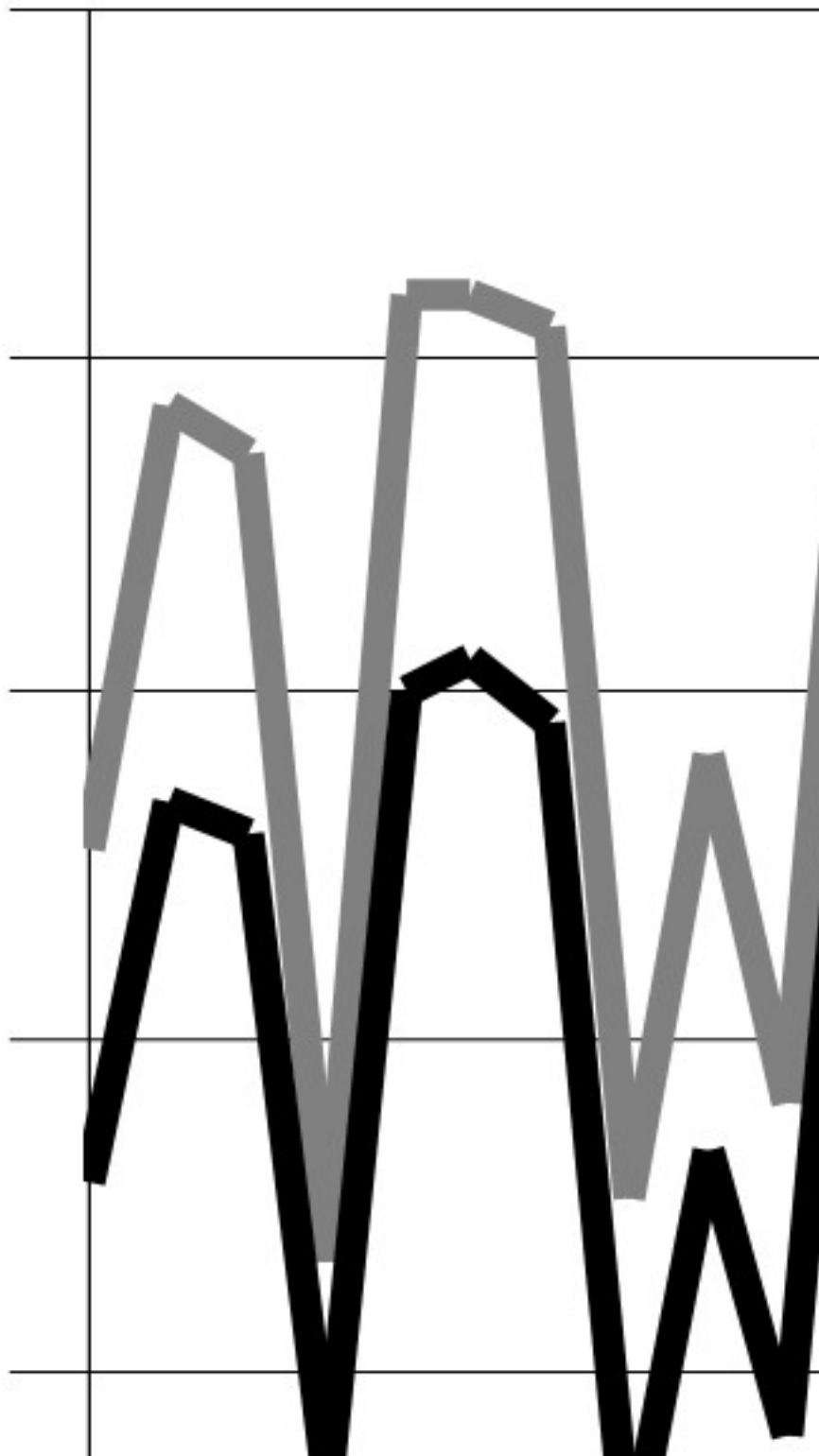
М

7

6

5

4



Таблиця 3 – Оцінки зменшення обсягів файлів

Файл	k_B	k_{X2}	k_{X3}	V_p , байт	ΔV %
01.bmp	8	7	5	665226	16,67
08.bmp	8	5	4	323172	29,17
20.bmp	8	7	7	463203	8,33
36.bmp	8	6	6	463203	16,67
45.bmp	8	7	7	463203	8,33
60.bmp	8	6	5	463203	20,83
75.bmp	8	8	7	463203	4,17
83.bmp	8	6	5	463203	20,83
99.bmp	8	5	6	463203	20,83

На відміну від стиснення текстів, де заздалегідь відомі відносні частоти символів алфавіту, для зображень, практично в усіх стандартах кодування та стиснення, частоти хроматичних компонент визначаються з контексту за допомогою процедури контекстного моделювання. Внаслідок цього довжина нерівномірного коду дещо перевищує його оптимальну довжину. У ході виконання стисуючого перетворення можна, без суттєвого збільшення обчислювальної складності, підрахувати частоти значень хроматичних компонент та використати їх при ентропійному стисненні з оптимальною довжиною коду. У цьому випадку ентропійне стиснення буде виконуватись без контекстного моделювання, що у підсумку призведе додатково до зменшення обчислювальної складності кодека.

Крім зменшення статистичної надмірності зображення, стисуюче відображення призводить також до зменшення його візуальної надмірності. На рис. 2 наведена, у логарифмічній шкалі, кількість кольорів у вхідному та обробленому зображеннях. Як видно з наведеного рисунка кількість кольорів у обробленому зображенні (після зворотного перетворення з sBX2X3 у RGB) у середньому у 1,4 рази менша ніж у вхідному. Отже використання стисуючого відображення призводить до зменшення його візуальної надмірності.

Як і у випадку з цілими числами буде зменшена візуальна якість зображення.

Враховуючи це формалізовану оцінку, що розраховувалось під час стиснення. При чому для простого стандарту Jpeg, при



наприклад ахроматичної компоненти $Y \in [16, 233]$, що у свою чергу, значно зменшує показники якості відтвореного зображення, хоча й вважається, що це не суттєво впливає на його візуальне сприйняття. Окремі результати порівняння PSNR після оброблення 100 зображень наведені в табл. 4.

На підставі отриманих результатів можна зробити висновок, що, практично у всіх випадках, якість зображення після квантування у cBX2X3 краща ніж у YCrCb. При чому є випадки, коли для одного з каналів RGB після квантування помилки відсутні.

Таблиця 4 – Значення PSNR для cBX2X3 та YCrCb

Назва файла	PSNR cBX2X3			PSNR YCrCb		
	канал R	канал G	канал B	канал R	канал G	канал B
01.bmp	65,41	54,33	54,33	46,06	49,40	39,42
08.bmp	∞	49,47	50,04	50,22	52,99	48,36
20.bmp	63,07	53,11	53,12	45,22	49,18	45,62
36.bmp	∞	49,81	48,92	49,51	52,75	48,01
45.bmp	70,32	52,95	53,33	49,61	53,66	47,50
60.bmp	∞	49,53	49,01	50,30	53,02	46,72
75.bmp	60,52	53,16	52,88	43,53	47,76	39,30
83.bmp	∞	52,74	52,38	51,01	54,09	48,72
99.bmp	53,30	∞	52,99	48,70	53,44	48,49

За результатами виконаних досліджень можна зробити наступні висновки:

- у роботі запропоновано стискуюче відображення cBX2X3, що дозволяє кодувати хроматичні компоненти рівномірними кодами довжиною менше одного байта;
- використання стискуючого відображення cBX2X3 призводить до зменшення візуальної та статистичної надмірностей зображення;
- кодування адаптивними рівномірними кодами індексів палітри хроматичних компонент призводить до зменшення обсягу файла у середньому на 15% без використання алгоритмів ентропійного стискання;
- запропоноване стискуюче відображення може використовуватись для оптимізації ентропійного стискання зображень, оскільки у ході перетворення установлюються відносні частоти значень палітри хроматичних компонент.

Подальші дослідження повинні бути спрямовані на розроблення кодека з використанням стискуючого відображення cBX2X3.

Література

1. Partial iterated function system based fractal image coding [Електронный ресурс] / Zhou Wang, Yinglin Yu – Режим доступу: \www/ URL: <http://ece.uwaterloo.ca/~z70wang/publications/spie96.pdf>.
2. Fractal compression of images with projected IFS [Електронный ресурс] / Eric Guerin, Eric Tosan, Atilla Baskurt – Режим доступу: \www/ URL: <http://liris.cnrs.fr/Documents/Liris-641.pdf>.
3. Бехтин Ю.С. Методы и алгоритмы вейвлет-кодирования зашумленных изображений в радиотехнических системах: автореф. дис. на соискание учен. степени д-ра тех. наук / Ю.С. Бехтин; – Рязань, 2009. – 34 с.
4. Antonini M. Image coding using wavelet transform / M. Antonini, M. Barlaud, P. Mathieu, I. Daubechies // IEEE Trans. Image Proc. – 1992. – Vol. 1. - № 2. – P. 205-220.
5. Лужков Ю. В. Компрессия изображений с потерями на основе адаптивной сегментации / Ю.В. Лужков // Современные проблемы науки и образования. – 2008. – Вып. 6. – С. 15.
6. Оптимизация алгоритма сжатия изображений JPEG-2000 с помощью подбора длины R-D кривых. [Електронный ресурс] / Электронный журнал «ИССЛЕДОВАНО В РОССИИ» – Режим доступу: \www/ URL: <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2005/056.pdf> – С. 625-634
7. Cleary J. G. Data Compression Using Adaptive Coding and Partial String Matching / J. G. Cleary, I. H. Witten // IEEE Trans. Commun. – 1984. – Vol. 32. - № 4. – P.396–402.
8. A Context-Tree Weighting Method for Text-Generating Sources [Електронный ресурс] / Proc. IEEE Data Compression // Режим доступу: \www/ URL: http://ei1.ei.ele.tue.nl/~paul/p_and_w/dcc97.html – Mar. 25–27, 1997. – P. 472.
9. Data Compression Using Dynamic Markov Modeling [Електронный ресурс] / G. V. Cormack, R. N. Horspool. // Режим доступу: \www/ URL: <http://www.cs.uwaterloo.ca/research/tr/1986/CS-86-18.pdf> – 1987. – Vol. 30, N 6. – P. 541–550.

10. Schmidhuber J. Sequential Neural Text Compression / J. Schmidhuber, S. Heil // IEEE Trans. Neural Networks. – 1996. – Vol. 7 – P. 142–146.
11. A Block-Sorting Lossless Data Compression Algorithm [Электронный ресурс] / DIGITAL Systems Research Center // Режим доступу: \www/ URL: <http://www.eecs.harvard.edu/~michaelm/CS222/burrows-wheeler.pdf> –1994.
12. Патент на корисну модель 47509 Україна, МПК U 2009 08153. Спосіб кодування кольорів цифрових зображень з забезпеченням необхідного рівня сигналу хроматичних компонент / Воробієнко П.П., Загребнюк В.І., Кумиш В.Ю., Ленік Д.Д.: заявл. 03.08.2009; опубл. 10.02.2010. Бюл. № 3. – 4 с.
13. Колмогоров А.Н. Элементы теории функций и функционального анализа / А.Н. Колмогоров, С.В. Фомин // Наука. – 1976. – 544 с.
14. Martin. D. A Database of Human Segmented Natural Images and its Application to Evaluating Segmentation Algorithms and Measuring Ecological Statistics / D. Martin, C. Fowlkes, D. Tal and J. Malik // Proc. Computer Vision. – 2001. – Vol. 2 – P. 416–423.