

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОБЧИСЛЮВАЛЬНІ МЕТОДИ

УДК 004.627

О. О. Кавка, В. П. Майданюк, О. Н. Романюк, Є. К. Завальнюк

АНАЛІЗ АЛГОРИТМІВ СТИСНЕННЯ ЗОБРАЖЕНЬ ІЗ
ВТРАТАМИ

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

Анотація. У статті розглянуто та проведено аналітичний огляд алгоритмів стиснення зображень зі втратами. Обґрунтовано актуальність дослідження за допомогою статистичних даних. Розглянуто та проаналізовано метод колірної субдискретизації. Розглянуто, описано та проаналізовано метод квантування кольорів, зокрема наявні дослідження із застосування квантування кольорів у поєднанні з дискретним косинусним перетворенням. Виділено недоліки наявного дослідження та сформульовано можливість подальшого дослідження з використанням розширеної вибірки зображень. Детально розглянуто та проаналізовано стиснення на основі дискретного косинусного перетворення. Виділено пошук оптимальних матриць квантування як перспективний напрямок подальших досліджень з підвищення ефективності застосування дискретного косинусного перетворення. Виділено адаптивне виділення більших, кратних стандартному, блоків даних, як перспективний напрямок дослідження. Розглянуто та проаналізовано метод стиснення зображень на основі вейвлет-перетворення. Сформульовано напрями подальших досліджень із застосування інших вейвлетів окрім вейвлета Коен-Добеші-Фюво та вейвлета ЛеГал-Табатабай для стиснення зображень. Розглянуто та проаналізовано метод фрактального стиснення. Сформульовано напрями подальших досліджень, таких як обмеження глибини пошуку і застосування фрактального стиснення у поєднанні із дискретним косинусним перетворенням. Підсумовано напрями подальших досліджень для покращення функціональних характеристик розглянутих алгоритмів. Основним науковим результатом проведеного дослідження є виділення переліку перспективних тем досліджень, що дозволять збільшити обсяг даних про методи, моделі та засоби стиснення зображень. Практична цінність проведеного дослідження полягає у тому, що воно містить перелік тем досліджень, які можуть бути використані науковими працівниками як матеріал для подальшої наукової діяльності.

Ключові слова: стиснення зображень, стиснення даних, колірна субдискретизація, квантування кольорів, дискретне косинусне перетворення, вейвлет-перетворення, фрактальне стиснення.

Abstract. The article discusses and conducts an analytical review of lossy image compression algorithms. Substantiated the relevance of the research with the help of statistical data. Considered and analyzed the color subsampling method. Reviewed, described, and analyzed the color quantization method, in particular, existing studies on the application of color quantization in combination with the discrete cosine transform. Highlighted the shortcomings of the existing research and formulated the possibility of further research using an expanded sample of images. Considered and analyzed in detail the compression based on the discrete cosine transform. Singled out the search for optimal quantization matrices as a promising direction of further research on improving the efficiency of the application of discrete cosine transformation. Highlighted the adaptive allocation of larger, multiples of the standard data blocks as a promising direction of research. Considered and analyzed the image compression method based on the wavelet transform. Formulated the direction of further research on the use of wavelets other than Cohen-Dobechy-Feuvo and LeGall-Tabatababay wavelet for image compression. Considered and analyzed the method of fractal compression. Formulated directions for further research, such as limiting the search depth and applying fractal compression in combination with discrete cosine transformation. Summarized directions for further research to improve the functional characteristics of the considered algorithms. The main scientific result of the conducted research is the selection of a list of promising research topics that will allow increasing the amount of data on methods, models and means of image compression. The practical value of the research is that it contains a list of research topics that can be used by researchers as material for further research.

Key words: image compression, data compression, chroma subsampling, color quantization, discrete cosine transform, wavelet transform, fractal compression.

DOI: <https://doi.org/10.31649/1999-9941-2023-58-3-59-64>.

Вступ

В епоху цифрових технологій більша частина людства отримала доступ до приладів, здатних створювати медійні матеріали, такі як фото, відео та звукозаписи. Обсяги цифрового контенту невпинно зростають, що зберігає актуальний статус проблеми пошуку шляхів підвищення ефективності збереження цифрових медіаданих. Одним із таких шляхів є покращення алгоритмів стиснення зображень із втратами, адже такі алгоритми дозволяють досягати значно нижчих показників надлишковості даних у порівнянні із алгоритмами стиснення зображень без втрат.

Актуальність

Кількість цифрових фото- та відеоматеріалів постійно зростає. За оцінками, у 2020 році було зроблено 1,12 трильйона фотографій і передбачалось зростання кількості нових фото до 1,4 трильйона у 2021 році [1]. Разом з цим, постійно зростає і роздільна здатність фотокамер. До прикладу, iPhone 3G, що вийшов у продаж в 2008 році, мав основну камеру на 2 мегапікселі. У свою чергу, iPhone 14 Pro, презентований в 2022 році, мав основну камеру на 48 мегапікселів, що покращує якість зйомки, а також призводить до збільшення розміру відповідного файлу зображення. Зрештою, опосередкованим

маркером актуальності проблеми є дослідження 2022 року [2], яке прогнозує, що ринок зберігання даних протягом 2023-2030 років буде зростати в середньому на 17,8% щороку.

Таким чином, пошук шляхів зменшення надлишковості при зберіганні цифрових зображень залишається актуальною проблемою.

Мета

Метою статті є аналіз сучасних алгоритмів стиснення зображень із втратами для визначення потенційних векторів дослідження для підвищення ефективності стиснення даних.

Задачі

1. Аналітичний огляд сучасних методів стиснення зображень із втратами.
2. Визначення перспективних напрямків дослідження для підвищення ефективності методів стиснення зображень із втратами.

Аналітичний огляд сучасних методів стиснення зображень із втратами

Виділимо сучасні методи стиснення зображень із втратами для проведення дослідження. До таких методів відносяться:

1. Колірна субдискретизація.
2. Квантування кольорів.
3. Стиснення даних на основі дискретного косинусного перетворення [3].
4. Стиснення даних на основі вейвлет-перетворення.
5. Фрактальне стиснення.

Колірна субдискретизація базується на особливості людської візуальної системи, яка полягає у більшій чутливості зору людини до яскравості зображення, аніж до кольоровості [4]. Цей метод широко використовується у стисненні зображень у поєднанні з іншими методами – до прикладу, в форматі JPEG. Для застосування цього методу зображення має бути приведено до кольорового простору YCbCr. Коефіцієнт стиснення даних залежить від формату субдискретизації:

$$J: a: b$$

де J – частота дискретизації каналу яскравості (ширина блоку), a – число вибірок кольірних сигналів у першому рядку з J пікселів, b – число вибірок кольірних сигналів у другому рядку з J пікселів.

Зазвичай, коефіцієнт J дорівнює 4, тобто ширина блоку для субдискретизації становить 4 пікселі. За винятком деяких специфічних випадків, коефіцієнт b зазвичай або дорівнює 0, або відповідає коефіцієнту a . Коефіцієнт a конфігурує роздільну здатність по горизонталі, а коефіцієнт b – по вертикалі (рис. 1).

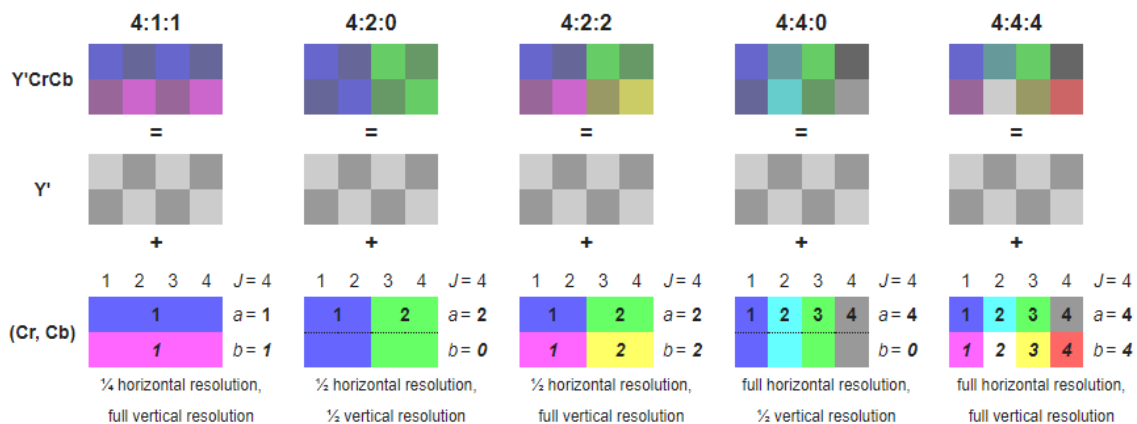


Рисунок 1 – Візуалізація методу колірної субдискретизації

Квантування кольорів – ще одна техніка, що застосовується у стисненні зображень із втратами. Суть цього методу полягає у квантуванні простору кольорів, що містяться на зображенні (рис. 2). Таким чином досягається зменшення розміру зображення із візуально незначними втратами у якості.

Більшість стандартних алгоритмів квантування кольорів розглядають цю проблему як задачу кластеризації точок у тривимірному просторі, де осі відповідають кольоровим каналам [5]. Квантування кольорів не застосовується у методах стиснення, що використовують дискретне косинусне перетворення, оскільки результат зазвичай характеризується погіршеною якістю зображення, а також меншим коефіцієнтом стиснення [6]. Тим не менш, як у статті зазначають самі автори, дослідження проведено на

невеликій вибірці, тому наявне дослідження не є вичерпним і наявний потенціал для подальших спроб покращення методів стиснення зображень у цьому напрямку.

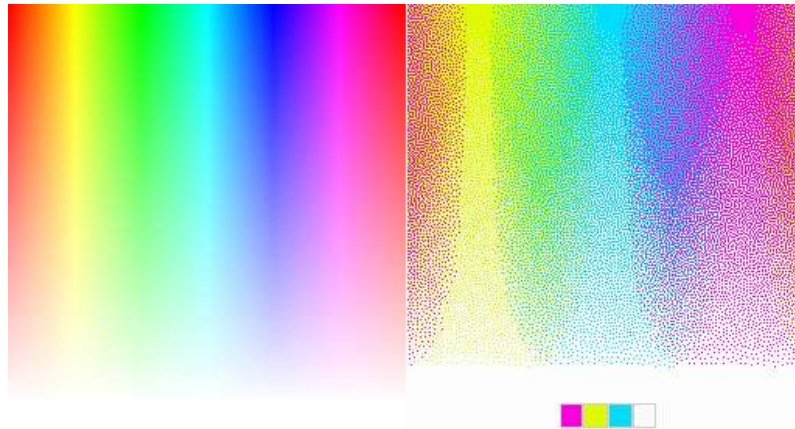


Рисунок 2 – Кольоровий спектр, зведений до палітри з 4 кольорів

Стиснення зображень за стандартом JPEG зазвичай складається з кількох етапів:

1. Зображення переводиться з RGB у YCbCr. Цей етап може бути пропущено.
2. До зображення, представленого в кольоровому просторі YCbCr, застосовується колірна субдискретизація (найчастіше в форматі 4:2:0 – тобто роздільна здатність колірної компоненти зменшується удвічі як за горизонталлю, так і за вертикаллю).
3. Кожен колірний канал розбивається на блоки 8x8, для кожного з яких застосовується дискретне косинусне перетворення.
4. Отримані в результаті перетворення значення частот квантуються за попередньо визначеними стандартом матрицями (які визначають коефіцієнт стиснення, а також впливають на втрату якості зображення). На рисунку 3 наведено приклад матриці квантування. Значення поступово зростають від лівого верхнього до правого нижнього кута, що призводить до відкидання менш значущих частотних характеристик.
5. Отримані в результаті квантування блоки кодується за допомогою алгоритмів стиснення даних без втрат – спершу через кодування довжин серій (run-length encoding), після цього – через кодування Хафмана.

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

Рисунок 3 – Приклад матриці квантування JPEG-1 з коефіцієнтом стиснення 50%

Коефіцієнт стиснення в даному методі залежить переважно від вибору матриці квантування. Відповідно, перспективним є пошук більш оптимальних матриць квантування. Наприклад, дослідження 2022 року розглядає застосування частотного аналізу зображення для підбору оптимальної матриці квантування для конкретного зображення [7]. Враховуючи суттєве зростання пропускної здатності мереж, а також ємності носіїв даних, може бути доцільним формування великого набору матриць квантування і їх вибіркоче застосування в залежності від частотних характеристик конкретних зображень.

Ще одним шляхом до оптимізації стиснення зображень є адаптивне виділення більших блоків даних (16x16, 32x32, 64x64), їх масштабування до блоків 8x8 і подальше стиснення за допомогою звичайного дискретного косинусного перетворення. Такий метод може суттєво покращити коефіцієнт стиснення зображень з високою роздільною здатністю, але невеликою варіативністю – наприклад,

пейзажів, градієнтів, тощо. При цьому, застосування кратного розміру блоків спрощує масштабування, розширюючи діапазон можливих алгоритмів масштабування зображення.

Також є можливим застосування частотного аналізу для виділення повторюваних блоків і зменшення надлишковості при їх повторному кодуванні.

Алгоритм стиснення зображень за допомогою вейвлет-перетворення описано в стандарті JPEG 2000. Попри те, що стандарт JPEG 2000 не набув поширеності свого попередника, таке стиснення характеризується вищою якістю результуючого зображення, а також більш ефективним стисненням [8].

За цим стандартом, спершу виконується приведення кольорових компонент з RGB до іншого кольорового простору – або до YCbCr (незворотне перетворення, оскільки в результаті виникає похибка округлення дробових чисел), або до варіації YUV (зворотне перетворення).

Після кольорового перетворення проводиться розбиття зображення на блоки – над відміну від JPEG-1, не обов'язково розміром 8x8, але після вибору розміру блоку він застосовується до всього зображення. Зображення також може складатись лише з одного блоку. Перевагою такого підходу є можливість декодувати частину зображення, що покращує користувацький досвід у випадку роботи з дуже великими зображеннями, повне завантаження яких у оперативну пам'ять може бути проблемою. Недоліком такого підходу є зниження якості зображення. Використання великої кількості блоків може призводити до артефактів на декодованому зображенні, подібних до тих, що виникають при застосуванні JPEG-1.

Утворені блоки проходять через одне з двох вейвлет-перетворень:

1. Вейвлет Коен-Добеші-Фюво [9] для стиснення із втратами.
2. Вейвлет ЛеГал-Табатабай [10] для стиснення без втрат.

Після вейвлет-перетворення коефіцієнти квантуються задля зменшення кількості інформації, що призводить до втрати якості. Результат цих операцій – набір цілочисельних коефіцієнтів – кодується за процедурою EBCOT [11].

Перспективним вектором дослідження є застосування інших вейвлетів для стиснення зображень.

Фрактальне стиснення є перспективним методом стиснення зображень, що дозволяє забезпечити високі коефіцієнти стиснення при помірних втратах якості у порівнянні із дискретним косинусним перетворенням, особливо при стисненні текстур чи пейзажів. Фрактальне стиснення супутникових зображень дозволило досягнути коефіцієнту стиснення 172:1 [12].

Головною проблемою застосування фрактального стиснення є висока обчислювальна складність. Можливим способом подолання цієї проблеми є обмеження глибини пошуку і застосування у поєднанні із дискретним косинусним перетворенням [13].

Висновки

1. Наявні дослідження застосування квантування кольорів у поєднанні із дискретним косинусним перетворенням при стисненні зображень не є вичерпними, що свідчить про потенційну користь подальших досліджень у цьому напрямку.

2. Перспективним напрямком досліджень є використання розширеного набору таблиць квантування при стисненні зображень із застосуванням дискретного косинусного перетворення.

3. Перспективним напрямком досліджень є адаптивне виділення більших блоків даних (16x16, 32x32, 64x64), їх масштабування до блоків 8x8 і подальше стиснення за допомогою звичайного дискретного косинусного перетворення.

4. Є можливим застосування частотного аналізу для виділення повторюваних блоків і зменшення надлишковості при їх повторному кодуванні.

5. Одним зі шляхів розвитку методів стиснення зображень за допомогою вейвлет-перетворень є практичне дослідження застосування інших вейвлет-перетворень, окрім вейвлету Коен-Добеші-Фюво чи вейвлета ЛеГал-Табатабай.

6. Перспективним напрямком досліджень оптимізації фрактального стиснення є обмеження глибини пошуку і застосування методу у поєднанні з іншими методами стиснення – наприклад, дискретним косинусним перетворенням.

Список літератури

- [1] Pantic, N. (2022, February 2). *How Many Photos Will Be Taken in 2021?* – Mylio Blog. Mylio Blog. <https://blog.mylio.com/how-many-photos-will-be-taken-in-2021-stats>
- [2] *Data Storage Market Size, Share, Trends | Growth [2023-2030]*. (n.d.). <https://www.fortunebusinessinsights.com/data-storage-market-102991>
- [3] N. Ahmed, T. Natarajan and K. R. Rao, "Discrete Cosine Transform" in *IEEE Transactions on Computers*, vol. C-23, no. 1, pp. 90-93, Jan. 1974, doi: 10.1109/T-C.1972.223784.
- [4] Van Den Branden Lambrecht, C. J. (2001). *Vision Models and Applications to Image and Video Processing*. Springer Science & Business Media.

- [5] P. Heckbert. "Color Image Quantization for Frame Buffer Display", *Computer Graphics*, Vol 16, #3, pp. 297-303, 1982.
- [6] Leonardo C. Araujo, Joao P. H. Sansao, and Mario C. S. Junior. (2020). Effects of Color Quantization on JPEG Compression. *International Journal of Image and Graphics*. <https://doi.org/10.1142/s0219467820500266>
- [7] Qijun Wang, Ping Liu, Lei Zhang, Fan Cheng, Jianfeng Qiu, and Xingyi Zhang. (2022b). Rate-distortion optimal evolutionary algorithm for JPEG quantization with multiple rates. *Knowledge Based Systems*, 244, 108500. <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2022.108500>
- [8] S. Naveen Kumar, M. V. Vamshi Bharadwaj and S. Subbarayappa, "Performance Comparison of Jpeg, Jpeg XT, Jpeg LS, Jpeg 2000, Jpeg XR, HEVC, EVC and VVC for Images," *2021 6th International Conference for Convergence in Technology (I2CT)*, Maharashtra, India, 2021, pp. 1-8, doi: 10.1109/I2CT51068.2021.9418160.
- [9] M. Unser and T. Blu, "Mathematical properties of the JPEG2000 wavelet filters," in *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 12, no. 9, pp. 1080-1090, Sept. 2003, doi: 10.1109/TIP.2003.812329.
- [10] D. Le Gall and A. Tabatabai, "Sub-band coding of digital images using symmetric short kernel filters and arithmetic coding techniques," *ICASSP-88., International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, New York, NY, USA, 1988, pp. 761-764 vol.2, doi: 10.1109/ICASSP.1988.196696.
- [11] Fresia, M., Natu, A., & Lavagetto, F. (2023b). Turbo Codes for the Transmission of JPEG2000 Compressed Imagery over Flat Rayleigh Fading Channels. *ResearchGate*. https://www.researchgate.net/publication/228943799_Turbo_Codes_for_the_Transmission_of_JPEG2000_Compressed_Imagery_over_Flat_Rayleigh_Fading_Channels
- [12] Wee Meng Woon, Anthony Tung Shuen Ho, Tao Yu, Siu Chung Tam, Siong Chai Tan and Lian Teck Yap, "Achieving high data compression of self-similar satellite images using fractal," *IGARSS 2000. IEEE 2000 International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Taking the Pulse of the Planet: The Role of Remote Sensing in Managing the Environment. Proceedings* (Cat. No.00CH37120), Honolulu, HI, USA, 2000, pp. 609-611 vol.2, doi: 10.1109/IGARSS.2000.861646
- [13] Ali, A. H., Abbas, A. N., George, L. E., & Mokhtar, M. R. (2019). Image and audio fractal compression: Comprehensive review, enhancements and research directions. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 15(3), 1564-1570.

Стаття надійшла: 19.09.2023

References

- [1] Pantic, N. (2022, February 2). *How Many Photos Will Be Taken in 2021? – Mylio Blog*. Mylio Blog. <https://blog.mylio.com/how-many-photos-will-be-taken-in-2021-stats>
- [2] *Data Storage Market Size, Share, Trends | Growth [2023-2030]*. (n.d.). <https://www.fortunebusinessinsights.com/data-storage-market-102991>
- [3] N. Ahmed, T. Natarajan and K. R. Rao, "Discrete Cosine Transform" in *IEEE Transactions on Computers*, vol. C-23, no. 1, pp. 90-93, Jan. 1974, doi: 10.1109/T-C.1972.223784.
- [4] Van Den Branden Lambrecht, C. J. (2001). *Vision Models and Applications to Image and Video Processing*. Springer Science & Business Media.
- [5] P. Heckbert. "Color Image Quantization for Frame Buffer Display", *Computer Graphics*, Vol 16, #3, pp. 297-303, 1982.
- [6] Leonardo C. Araujo, Joao P. H. Sansao, and Mario C. S. Junior. (2020). Effects of Color Quantization on JPEG Compression. *International Journal of Image and Graphics*. <https://doi.org/10.1142/s0219467820500266>
- [7] Qijun Wang, Ping Liu, Lei Zhang, Fan Cheng, Jianfeng Qiu, and Xingyi Zhang. (2022b). Rate-distortion optimal evolutionary algorithm for JPEG quantization with multiple rates. *Knowledge Based Systems*, 244, 108500. <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2022.108500>
- [8] S. Naveen Kumar, M. V. Vamshi Bharadwaj and S. Subbarayappa, "Performance Comparison of Jpeg, Jpeg XT, Jpeg LS, Jpeg 2000, Jpeg XR, HEVC, EVC and VVC for Images," *2021 6th International Conference for Convergence in Technology (I2CT)*, Maharashtra, India, 2021, pp. 1-8, doi: 10.1109/I2CT51068.2021.9418160.
- [9] M. Unser and T. Blu, "Mathematical properties of the JPEG2000 wavelet filters," in *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 12, no. 9, pp. 1080-1090, Sept. 2003, doi: 10.1109/TIP.2003.812329.
- [10] D. Le Gall and A. Tabatabai, "Sub-band coding of digital images using symmetric short kernel filters and arithmetic coding techniques," *ICASSP-88., International Conference on Acoustics, Speech, and*

Signal Processing, New York, NY, USA, 1988, pp. 761-764 vol.2, doi: 10.1109/ICASSP.1988.196696.

- [11] Fresia, M., Natu, A., & Lavagetto, F. (2023b). Turbo Codes for the Transmission of JPEG2000 Compressed Imagery over Flat Rayleigh Fading Channels. *ResearchGate*. https://www.researchgate.net/publication/228943799_Turbo_Codes_for_the_Transmission_of_JPEG2000_Compressed_Imagery_over_Flat_Rayleigh_Fading_Channels
- [12] Wee Meng Woon, Anthony Tung Shuen Ho, Tao Yu, Siu Chung Tam, Siong Chai Tan and Lian Teck Yap, "Achieving high data compression of self-similar satellite images using fractal," *IGARSS 2000. IEEE 2000 International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Taking the Pulse of the Planet: The Role of Remote Sensing in Managing the Environment. Proceedings* (Cat. No.00CH37120), Honolulu, HI, USA, 2000, pp. 609-611 vol.2, doi: 10.1109/IGARSS.2000.861646.
- [13] Ali, A. H., Abbas, A. N., George, L. E., & Mokhtar, M. R. (2019). Image and audio fractal compression: Comprehensive review, enhancements and research directions. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 15(3), 1564-1570.

Відомості про авторів

Кавка Олексій Олександрович – аспірант кафедри програмного забезпечення, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця

Kavka Oleksii Oleksandrovych – Graduate Student of the Department of Software Engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia

Майданюк Володимир Павлович – к. т. н., доцент кафедри програмного забезпечення, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця

Maidaniuk Volodymyr Pavlovych – Doctor of Philosophy (Tech.), Associate Professor of the Department of Software Engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia

Романюк Олександр Никифорович – д. т. н., професор, завідувач кафедри програмного забезпечення, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця

Romanyuk Oleksandr Nykyforovych – Doctor of Science (Tech.), Professor of the Department of Software Engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia

Завальнюк Євген Костянтинович – аспірант кафедри програмного забезпечення, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця

Zavalniuk Yevhen Kostiantynovych – Graduate Student of the Department of Software Engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia

O. O. Kavka, V. P. Maidaniuk, O. N. Romanyuk, Y. K. Zavalniuk

ANALYSIS OF THE LOSSY IMAGE COMPRESSION ALGORITHMS

Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia