

УДК 004.932.2

Д. Д. ЛУП'ЯК, Р. Н. КВЕТНИЙ

## ШЛЯХИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ МАТУВАННЯ ЗОБРАЖЕНЬ

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

**Анотація.** В роботі проведено аналітичний огляд сучасних методів матування зображення. Визначено ключові ідеї методів, що існують та наведено порівняння їхньої точності. Визначено проблеми та завдання для подальшого дослідження методів матування зображення.

**Ключові слова:** глибоке навчання, матування, сегментація, комп'ютерний зір

**Abstract.** The analytical review of modern methods of image matting is carried out in the work. The key ideas of existing methods are identified, and their accuracy is compared. Problems and tasks for further research of image matting methods are identified.

**Keywords:** deep learning, matting, segmentation, computer vision

**DOI:** 10.31649/1681-7893-2021-41-1-33-38

### ВСТУП

Цифрове матування зображення є одною з основних задач комп'ютерного зору, завдання якої полягає в визначенні переднього плану зображення та оцінці прозорості кожного пікселя. Дані методи мають широкий спектр застосувань, здебільшого в сфері цифрової обробки фото та відео.

Формальна постановка задачі має наступний вигляд: розділити вхідне зображення  $I$  на зображення об'єкта переднього плану  $F$ , зображення заднього плану  $B$  і карту прозорості переднього плану  $\alpha$  (рис. 1) таким чином, щоб виконувалось наступне рівняння [1]:

$$I = \alpha F + (1 - \alpha)B, \quad \alpha \in [0, 1] \quad (1)$$

Зауважемо, що данна задача є некоректно поставленою, оскільки при трьох відомих  $I_R, I_G,$  та  $I_B$  потрібно визначити сім невідомих:  $F_R, F_G, F_B, B_R, B_G, B_B$  та  $\alpha$ .

На практиці, задача зводиться до визначення лише карти прозорості (рис. 1, в).

Окрім вхідного зображення більшість методів вимагають вхідний тримап, де білим та чорним кольором позначено передній та задній план відповідно, а сірим – цільову область, пікселям якої потрібно визначити належність до переднього, або заднього плану та ступінь прозорості (Рис. 1, б).

Іншими способами зменшення області можливих розв'язків є:

- часткова розмітка пікселів заднього та переднього плану
- розмітка рамки переднього плану
- надання зображення заднього плану
- наперед відомий монохромний фон

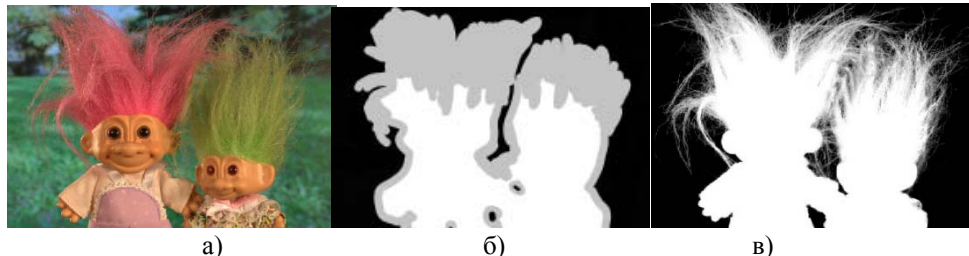


Рис. 1. Вхідні та вихідні данні (а – вхідне зображення, б – вхідний тримап, в – карта прозорості зображення).

Метою статті є аналіз методів цифрового матування зображень та визначення шляхів підвищення їх ефективності шляхом розробки нових методів та засобів чи модифікації існуючих.

### ЗВ'ЯЗОК З ЗАДАЧЕЮ СЕГМЕНТАЦІЇ ЗОБРАЖЕННЯ

Якщо у рівнянні 1 можливі значення  $\alpha$  лише 0, або 1, тоді задача матування трансформується в іншу класичну задачу – бінарну сегментацію зображення на передній та задній план, що зводить задачу регресії до задачі класифікації кожного пікселя [2].

Для якісного визначення об'єкту переднього плану результат сегментації не є задовільний, оскільки об'єкт зазвичай не має чіткі межі та може містити напівпрозорі елементи [3].

Матування зображення використовується якраз для точно відділення переднього плану від заднього і методи матування повинні коректно опрацювати такі ділянки як волосся, сітка, скло, шаль тощо.

Проте, сегментація зображення може використовуватись для автоматичного генерування тримапу, який використовується як вхідні дані в методах матування.

### КЛАСИЧНІ МЕТОДИ

Існує досить велика кількість робіт присвячених розв'язанню проблеми матування зображення. Багато підходів полягає в тому, що вони використовують колір (іноді також положення) зазначених користувачем прикладів переднього плану та фону для розрахунку невідомих значень карти прозорості зображення. Наявні класичні методи дотримуються підходу на основі зразків (sampling), або підходу поширення (propagation).

Підхід на основі зразків полягає в тому, що альфа-значення для переднього і заднього планів на невідомих пікселях можуть бути отримані на основі зразків (samples) пікселів, які знаходяться поруч. Методи які засновані на цьому припущенні: bayesian matting [4], iterative matting [5], shared sampling matting [6], [7] та новіші методи, такі як sparse coding [8]. Даний підхід працює лише на вхідних зображеннях з однорідними ділянками та з чітко визначеним тримапом, що забезпечує сильну кореляцію між невідомими пікселями та відомими.

Матування поширенням (propagation) працює за допомогою розповсюдження відомих альфа-значень від заданих пікселів до невідомих. Такі методи, як poisson matting [9], random walk [10], geodesic matting [11], spectral matting [12], close-form matting [13] та fuzzy connectedness matting [14] є найбільш відомими представниками методів на основі поширення. Даний підхід є більш надійним при роботі зі складними зображеннями ніж підхід на основі зразків. Недоліком даних методів є те, що помилка в оцінці альфа-значення біля відомих пікселів може поширюватись далі, в результаті виникає все більша помилка матування і в результаті якість може бути й гіршою ніж в підході на основі зразків.

Існують методи які комбінують данні два підходи, що дозволяє знайти баланс між точністю та стійкістю [15].

### МЕТОДИ НА ОСНОВІ ГЛИБОКОГО НАВЧАННЯ

За останні роки запропоновано багато різних методів матування зображення з використанням нейронних мереж. За потребою додаткових даних, методи на основі нейронних мереж можна класифікувати на наступні групи:

1. методи, що потребують тримап [16- 29]
2. методи, що потребують зображення фону [31-33]
3. методи, що не потребують додаткових даних [34-42]

**Методи, що потребують тримап.** Вперше застосування нейронних мереж до задачі матування зображення було запропоновано у [16]. У [17] запропоновано метод Deep Image Mating (DIM) з використанням глибокої згорткової нейронної мережі з архітектурою VGG-16, яка вже успішно використовувалась в задачі семантичної сегментації. DIM показав значно кращу якість та стабільність ніж класичні методи матування. Також у [17] було запропоновано набір даних для навчання Adobe Composition-1k, що стало поштовхом для нових досліджень. У [18] запропонували замінити мережу VGG-16 з [17] на меншу та швидшу MobileNetv2, без значної якості матування. У [19] запропоновано застосування генеративно-змагальної мережі до задачі матування. У [20] запропонували метод з використанням підходу класичного методу на основі зразків, використовується три нейронні мережі, одна визначає передній план, друга визначає задній план, а третя доповнює невідомі області подібно до методів доповнення зображень. У [21] запропонували модуль для визначення контекстної уваги. У [22] запропонували метод матування зображення великих розмірів, запропоновано розбивати зображення на частини та матувати кожен окремо, при цьому зберігати глобальну семантичну інформацію. У [23]

запропонували підхід, що містить три модулі: модуль вилучення семантичної інформації, в основі якого лежить енкодер з мережі для сегментації SegNet, модуль визначення спорідненості та модуль побудови карти прозорості. У [24] запропоновано використовувати два енкодери для визначення для розширення контекстної інформації зображення, а також два декодери, один для побудови карти прозорості, другий для отримання переднього плану. У [25] було запропоновано метод AdaMatting, який містить додатковий крок адаптації вхідного тримапу з використанням мультинавчання. AdaMatting мережа приймає на вхід алгоритму не чітко розмічений тримап і тренується давати на вихід чітко розмічений тримап і маску прозорості. У [26] запропоновано архітектуру нейронної мережі, яка натренована визначати не лише  $\alpha$ , а і  $F$  та  $B$ . У [27] акцент зроблено на матування прозорих об'єктів, запропоновано новий блок для нейронної мережі, який відповідає за визначення прозорості. У [28] запропоновано використовувати ієрархічний механізм уваги для кращого визначення меж об'єктів. У [29] запропонували стратегію вирівнювання інформації зв'язавши відповідні шари енкодера та декодера. У [31] Запропоновано робити класифікацію пікселів тримапу на 20 груп і використовувати цю інформацію при матуванні.

У таблиці 1 наведено оцінку точності основних методів матування з використанням тримапу на основі тестового набору даних Adobe Composition-1k.

Метод	SAD	MSE
ClosedForm [13]	168.1	91
AlphaGAN [19]	52.4	30
DIM [17]	51.4	15
HAttMatting [28]	48.8	16
IndexNet [30]	45.8	13
AdaMatting [25]	41.7	10
SampleNet [20]	40.4	10
Context-aware [24]	35.8	8.2
GCA[21]	35.3	9.1
PIAMatting [29]	35.2	9
HDMatt [22]	33.5	7.3
SIM [31]	28	5.8

**Методи, що потребують зображення фону.** У роботі [32] запропоновано метод, де на вхід нейронної мережі подається зображення заднього плану, проте у метод має значені обмеження щодо розширення вхідного зображення та демонструє повільну швидкість роботи. У [33] запропоновано метод, що дозволяє робити матування відео у реальному часі при відомому задньому плані зображення.

**Методи, що не потребують додаткових даних.** У роботі [34] запропоновано метод, що дозволяє робити матування портретного фото людини без необхідності в додаткових даних. Для розв'язання цієї задачі запропоновано згорткову нейронну мережу, яка класифікує пікселі на передній план, задній план та невизначену область, далі ця інформація використовується при матуванні. Проте, даний метод має велику обчислювальну складність та працює повільно навіть з використанням графічного процесора. У [35] запропоновано метод м'якої семантичної сегментації, який може використовуватись для автоматичної генерації тримапу. У [36] Запропоновано метод, що дозволяє робити автоматичне матування зображення людини та на відміну від [34] - не лише портретного фото. Для тренування використано набір даних з 35000 зображень людей. У [37] акцент зроблено на матуванні прозорих об'єктів, спершу паралельно робиться сегментації вхідного зображення та побудова маски уваги, потім отримана інформація використовується при матуванні. У методі [38] запропоновано спершу завдяки двом нейронним мережам зробити визначення переднього плану та заднього, а потім нейрона мережа для змішування будує фінальну карту прозорості. Даних підхід показав посередній результат через результуючі не чіткі межі об'єктів. У [39] метод, що дозволяє робити матування завдяки одній згортковій мережі. Енкодер використовується для визначення семантики, декодер відразу будує карту прозорості. В основі мережі лежить архітектура MobileNetV2, що надає високу швидкодію. У [40] запропоновано методологію для навчання матуванню людей на грубо розмічених даних, Запропоновано використання трьох нейронних мереж з їхнім навчанням на різних вхідних даних. Наприклад, перша мережа відповідає за вилучення семантичних даних і для цього достатньо грубо розміченого набору даних, але з більшим об'ємом, а для мережі що відповідає за чітке визначення країв можна використати менший набір даних,

але зі значно вищою якістю розмітки. У [41] запропоновано мережу для генерування тримапу, та запропоновано механізм визначення уваги. У [42] запропонували робити класифікацію зображення на три групи: зображення з не прозорим об'єктом, зображення з прозорим об'єктом та зображення без об'єкта та в залежності від цього генерувати різні види тримапу.

## ВИСНОВКИ

В статті проведений аналіз методів для розв'язання задачі матування зображення. Визначено, що методи з використанням глибокого навчання значно переважають по якості класичні методи. Проаналізовано методи зі вхідним тримапом. Найкраще себе показують методи на основі згорткових нейронних мереж [43]. В розглянутих статтях пропонується багато модифікацій архітектур, різні методи та способи комбінування кількох нейронних мереж для досягнення якісного матування. Наведено таблицю порівняння точності наявних методів.

Останні роки досліджуються способи автоматичного матування зображення з мінімальною кількістю вхідних даних від користувача. Удосконалюються методи з використанням зображення заднього плану замість тримапу в якості вхідних даних. Також знаходять застосування та розвиток сучасні методи матування, що окрім вхідного зображення не потребують додаткових даних на вхід. Наявні методи здебільшого орієнтовані на матування певних класів об'єктів, наприклад людей, або тварин. Певну перспективу мають універсальні методи автоматичного матування. Шляхи подальшого вдосконалення методів цифрового матування пов'язані саме з розробкою універсальних підходів, які поєднують переваги різних методів. При цьому для побудови ефективних архітектур засобів для інтелектуальних систем необхідною умовою є використання програмно-апаратної архітектури паралельних обчислень [44].

Проблемою при розв'язанні даної задачі є необхідність додаткових даних, які зазвичай надаються у вигляді чітко розміченого тримапу, тому що методи, які працюють без вхідного тримапу можуть робити матування об'єкту певного класу, і працюють з більшою помилкою.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Y. Mishima, "Soft edge chroma-key generation based upon hexoctahedral color space," in U.S. Patent 5,355,174, 1993.
- [2] Луп'як Д. Д., «Використання методів сегментації та матування в задачі визначення переднього плану зображення» Матеріали конференції «L Науково-технічна конференція підрозділів Вінницького національного технічного університету (2021)», Вінниця, 2021. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/allvntu/index/pages/view/zbirn2021>  
(Lupiak D. D., «Vykorystannia metodiv sehmentatsii ta matuvannia v zadachi vyznachennia perednoho planu zobrazhennia» Materialy konferentsii «L Naukovo-tekhnichna konferentsiia pidrozdiliv Vinnytskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu (2021)», Vinnytsia, 2021. [Elektronnyi resurs]. Rezhym dostupu: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/allvntu/index/pages/view/zbirn2021>)
- [3] Білинський Й. Й. Метод сегментації ультразвукових зображень на основі аналізу локальної статистики гістограм / Білинський Й.Й., Мельничук А.О., Чумак О.А. // Вісник Вінницького політехнічного інституту 2010. – №6. – С.102-107.  
(Bilynskiy Y. Y. Metod sehmentatsii ultrazvukovykh zobrazhen na osnovi analizu lokalnoi statystyky histohram / Bilynskiy Y.I., Melnychuk A.O., Chumak O.A. // Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu 2010. – №6. – S.102-107.)
- [4] Yung-Yu Chuang, Brian Curless, David Salesin, and Richard Szeliski. A bayesian approach to digital matting. In 2001 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR 2001), with CD-ROM, 8-14 December 2001, Kauai, HI, USA, pages 264–271, 2001.
- [5] Jue Wang and Michael F. Cohen. An iterative optimization approach for unified image segmentation and matting. In 10th IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV 2005), 17-20 October 2005, Beijing, China, pages 936–943, 2005.
- [6] Eduardo Simoes Lopes Gastal and Manuel M. Oliveira. Shared sampling for realtime alpha matting. *Comput. Graph. Forum*, 29(2):575–584, 2010.
- [7] Kaiming He, Christoph Rhemann, Carsten Rother, Xiaoou Tang, and Jian Sun. A global sampling method for alpha matting. In The 24th IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, CVPR 2011, Colorado Springs, CO, USA, 2011.

- [8] Xiaoxue Feng, Xiaohui Liang, and Zili Zhang. A cluster sampling method for image matting via sparse coding. In *Computer Vision - ECCV 2016 - 14th European Conference, Amsterdam, The Netherlands, Proceedings, Part II*, pages 204–219, 2016.
- [9] Jian Sun, Jiaya Jia, Chi-Keung Tang, and Heung-Yeung Shum. Poisson matting. *ACM Trans. Graph.*, 23(3):315–321, 2004.
- [10] Leo Grady, Thomas Schiwietz, Shmuel Aharon, and RÅijdiger Westermann. Random walks for interactive alpha-matting. In *IN PROCEEDINGS OF VIIP 2005*, pages 423– 429, 2005
- [11] Yung-Yu Chuang, Brian Curless, David Salesin, and Richard Szeliski. A bayesian approach to digital matting. In *2001 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR 2001)*, Kauai, HI, USA, pages 264–271, 2001.
- [12] Anat Levin, Alex Rav-Acha, and Dani Lischinski. Spectral matting. In *2007 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR 2007)*, 18-23 June 2007, Minneapolis, Minnesota, USA, 2007.
- [13] Anat Levin, Dani Lischinski, and Yair Weiss. A closed-form solution to natural image matting. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, 30(2):228–242, 2008.
- [14] Yuanjie Zheng, Chandra Kambhampettu, Jingyi Yu, Thomas L. Bauer, and Karl V. Steiner. Fuzzymatte: A computationally efficient scheme for interactive matting. In *2008 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR 2008)*, 24-26 June 2008, Anchorage, Alaska, USA, 2008.
- [15] J. Wang and M. Cohen, “Optimized color sampling for robust matting,” in *Proc. of IEEE CVPR*, 2007.
- [16] Donghyeon Cho, Yu-Wing Tai, and Inso Kweon. Natural image matting using deep convolutional neural networks. In *European Conference on Computer Vision*, pages 626–643. Springer, 2016
- [17] Ning Xu, Brian Price, Scott Cohen, and Thomas Huang. Deep image matting. In *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pages 2970– 2979, 2017
- [18] Hao Lu, Yutong Dai, Chunhua Shen, and Songcen Xu. Indices matter: Learning to index for deep image matting. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision*, pages 3266–3275, 2019
- [19] Sebastian Lutz, Konstantinos Amplianitis, and Aljosa Smolic. Alphagan: Generative adversarial networks for natural image matting. *arXiv preprint arXiv:1807.10088*, 2018
- [20] Jingwei Tang, Yagiz Aksoy, Cengiz Oztireli, Markus Gross, and Tunc Ozan Aydin. Learning-based sampling for natural image matting. In *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pages 3055– 3063, 2019
- [21] Yaoyi Li and Hongtao Lu. Natural image matting via guided contextual attention. In *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*, volume 34, pages 11450–11457, 2020
- [22] Haichao Yu, Ning Xu, Zilong Huang, Yuqian Zhou, and Humphrey Shi. High-resolution deep image matting. *arXiv preprint arXiv:2009.06613*, 2020
- [23] Y. Wang, Y. Niu, P. Duan, J. Lin, and Y. Zheng. Deep propagation based image matting.
- [24] Hou, Q., Liu, F.: Context-aware image matting for simultaneous foreground and alpha estimation. In: *Proceedings of the International Conference on Computer Vision (October 2019)*
- [25] Cai, S., Zhang, X., Fan, H., Huang, H., Liu, J., Liu, J., Liu, J., Wang, J., Sun, J.: Disentangled image matting. In: *Proceedings of the International Conference on Computer Vision (October 2019)*
- [26] Marco Forte and Francois Pitie. F,b, alpha matting. *arXiv preprint arXiv:2003.07711*, 2020
- [27] Yaoyi Li, Qingyao Xu, and Hongtao Lu. Hierarchical opacity propagation for image matting. *arXiv preprint arXiv:2004.03249*, 2020
- [28] Yu Qiao, Yuhao Liu, Xin Yang, Dongsheng Zhou, Mingliang Xu, Qiang Zhang, and Xiaopeng Wei. Attention-guided hierarchical structure aggregation for image matting. In *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pages 13676–13685, 2020
- [29] Yuhao Liu, Jiake Xie, Yu Qiao. Prior-Induced Information Alignment for Image Matting. *arXiv:2106.14439v1*, 2021
- [30] H. Lu, Y. Dai, C. Shen, and S. Xu, “Index networks,” *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, 2020.
- [31] Yanan Sun, Chi-Keung Tang, Yu-Wing Tai. Semantic Image Matting. *arXiv:2104.08201v1*, 2021
- [32] Soumyadip Sengupta, Vivek Jayaram, Brian Curless, Steven M Seitz, and Ira Kemelmacher-Shlizerman. Background matting: The world is your green screen. In *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pages 2291–2300, 2020

- [33] Shanchuan Lin, Andrey Ryabtsev, Soumyadip Sengupta, Brian Curless, Steve Seitz, and Ira Kemelmacher-Shlizerman. Real-time high-resolution background matting. arXiv preprint arXiv:2012.07810, 2020
- [34] Xiaoyong Shen, Xin Tao, Hongyun Gao, Chao Zhou, and Jiaya Jia. Deep automatic portrait matting. In European Conference on Computer Vision, pages 92–107. Springer, 2016
- [35] Yagiz Aksoy, Tae-Hyun Oh, Sylvain Paris, Marc Pollefeys, and Wojciech Matusik. Semantic soft segmentation. ACM Transactions on Graphics (TOG), 37(4):1–13, 2018
- [36] Quan Chen, Tiezheng Ge, Yanyu Xu, Zhiqiang Zhang, Xinxin Yang, and Kun Gai. Semantic human matting. In 2018 ACM Multimedia Conference on Multimedia Conference, pages 618–626. ACM, 2018
- [37] Guanying Chen, Kai Han, and Kwan-Yee K. Wong. Tom-net: Learning transparent object matting from a single image. In CVPR, 2018
- [38] Yunke Zhang, Lixue Gong, Lubin Fan, Peiran Ren, Qixing Huang, Hujun Bao, and Weiwei Xu. A late fusion cnn for digital matting. In Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pages 7469–7478, 2019
- [39] Zhanhan Ke, Kaican Li, Yurou Zhou, Qiuhua Wu, Xiangyu Mao, Qiong Yan. Is a Green Screen Really Necessary for Real-Time Portrait Matting? arXiv:2011.11961v2, 2020
- [40] Jinlin Liu, Yuan Yao, Wendi Hou, Miaomiao Cui, Xuansong Xie, Changshui Zhang, and Xian-sheng Hua. Boosting semantic human matting with coarse annotations. In Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pages 8563–8572, 2020.
- [41] Yuhongze Zhou, Liguang Zhou, Tin Lun Lam, Yangsheng Xu. Semantic-guided Automatic Natural Image Matting with Light-weight Non-local Attention. arXiv:2103.17020v2, 2021
- [42] Jizhizi Li, Jing Zhang. Deep Automatic Natural Image Matting. arXiv:2107.07235v1, 2021
- [43] Піддубецька М.П. Особливості використання нейронних мереж в задачах обробки графічних зображень / Піддубецька М.П., Романюк О.Н., Тимченко Л.І. // Електронні інформаційні ресурси: створення, використання, доступ // Збірник матеріалів Міжнародної науково-практичної Інтернет-конференції, м.Вінниця, 2015. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://conf.vntu.edu.ua/eiron/2014>  
(Pidubetska M.P. Osoblyvosti vykorystannia neironnykh merezh v zadachakh obrobky hrafichnykh zobrazhen / Pidubetska M.P., Romaniuk O.N., Tymchenko L.I. // Elektronni informatsiini resursy: stvorennia, vykorystannia, dostup // Zbirnyk materialiv Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi Internet-konferentsii, m.Vinnytsia, 2015. [Elektronnyi resurs]. Rezhym dostupu: <http://conf.vntu.edu.ua/eiron/2014>)
- [44] Мартинюк Т. Б. Аналіз тенденцій розвитку сучасних комп'ютерних систем / Т. Б. Мартинюк, А. В. Кожем'яко, Л. М. Круперштейн // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – 2016. – № 2. – С. 5-13.  
(Martyniuk T. B. Analiz tendentsii rozvytku suchasnykh komp'uternykh system / T. B. Martyniuk, A. V. Kozhem'iako, L. M. Krupershtein // Optyko-elektronni informatsiino-enerhetychni tekhnolohii. – 2016. – № 2. – S. 5-13.)

#### Відомості про авторів

**Дмитро Дмитрович Луп'як** — аспірант, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, email: [dima.lupyak@gmail.com](mailto:dima.lupyak@gmail.com).

**Квєтний Роман Наумович** — д.т.н., професор кафедри автоматики та інформаційно-вимірювальної техніки, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, email: [rkvetny@mail.ru](mailto:rkvetny@mail.ru).

**Dmytro D. Lupyak** — postgraduate, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, email: [dima.lupyak@gmail.com](mailto:dima.lupyak@gmail.com).

**Roman N. Kvyetnyy** — D.Sc., Professor of Automatics and Information-Measuring Techniques Department, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, email: [rkvetny@mail.ru](mailto:rkvetny@mail.ru).