

---

---

# МЕТОДИ ТА СИСТЕМИ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОЇ І ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ ТА СИГНАЛІВ

---

---

УДК 004.272

Т.Б. МАРТИНЮК, Д.О. КАТАШИНСЬКИЙ, М.В. МИКИТЮК, М.О. ЗАЙЦЕВ

## ОСОБЛИВОСТІ ОБЧИСЛЮВАЛЬНИХ ПРОЦЕСІВ НА БАЗІ SM – ПЕРЕТВОРЕННЯ

Вінницький національний технічний університет,  
вул. Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, Україна, 21021, e-mail: [martyniuk.t.b@gmail.com](mailto:martyniuk.t.b@gmail.com)

**Анотація.** Розглянуто особливості та функціональні можливості оброблення одновимірних (векторних) масивів числових даних за обчислювальним методом з формуванням різницевого зрізу. В основі цього методу використовуються принципи SM – перетворення. Виділення мінімальної ненульової складової всіх елементів масиву в даному випадку розглядається як формування внутрішнього порогу оброблення і є базовою процедурою SM – перетворення в кожному циклі оброблення. В результаті реалізується не тільки операція паралельного багатооперандного підсумовування чисел масиву, але й існує можливість відновити початковий масив чисел, а також відсортувати його елементи за зростанням їх числових значень та сформувати їх ранги. Для цього використовуються сформовані в процесі оброблення дві матриці бінарних масок, які є матрицями відповідно нульових та додатних ознак, що притаманні елементам поточних різницевого зрізу. Крім того, внутрішні пороги у кожному циклі оброблення в результаті утворюють вектор внутрішніх порогів, який приймає участь у відновленні елементів початкового масиву. У роботі наведено базові співвідношення різницево – зрізового оброблення, а також приклади, що підтверджують їх слушність з використанням даних, які представлено у вигляді таблиці.

**Ключові слова:** різницевий зріз, векторний масив чисел, сортування, ранжування.

**Abstract.** The features and functionality of processing of the one – dimensional (vector) arrays of numerical data by the use of computational method with the formation of difference slices are considered. At the base of this method SM – transformation principles are used. The allocation of the minimum of non-zero component of the element array in this case is considered as the formation of the internal processing threshold and is the basic procedure of SM - transformation in each processing cycle. As a result, not only the operation of parallel multi-operand summation of the number array is realized, but also there is an opportunity to restore the initial number array, as well as to sort its elements according to the growth of their numerical values and to form their ranks. Two matrices of binary masks are used for this, that are formed during the processing, which are the matrices of zero and positive criterion, respectively, inherent in the elements of the current difference slices. In addition, in each processing cycle the internal thresholds form a vector of internal thresholds as a result, which takes part in restoring the elements of the initial array. The it is presented in the article the basic relations of difference slice processing, and the examples that confirm their validity using data presented in the form of a table.

**Keywords:** difference slice, vector number array, sorting, ranking.

DOI: 10.31649/1681-7893-2022-44-2-32-37

### ВСТУП

Метод оброблення за різницевиими зрізами в базисі SM-перетворення векторних (одновимірних) масивів чисел досить докладно розглянуто у працях [1,2]. У статті [3] доведено ефективність такого методу оброблення на прикладі паралельного багатооперандного підсумовування векторного масиву чисел. Разом з тим, у працях [1,2] математично доведено багатофункціональність методу різницево-зрізового оброблення, а саме, можливість формування певних матриць бінарних масок, що дозволяє не тільки відновити за необхідності початковий масив чисел, що був обнулений в процесі оброблення, але й відсортувати його елементи за зростанням їх значень.

---

---

# МЕТОДИ ТА СИСТЕМИ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОЇ І ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ ТА СИГНАЛІВ

---

---

## 1. АКТУАЛЬНІСТЬ ТЕМАТИКИ

Процес сортування числових даних залишається досить затребуваною процедурою [4-7] у прикладних задачах. Зокрема, це стосується медіанної фільтрації в процесі передоброблення зображень та сигналів [8-11].

При цьому значна увага приділяється новим підходам до апаратної реалізації процесу сортування значних масивів даних, що дозволяє збільшити його швидкодію [12,13]. Це досягається або за рахунок задіяння значної кількості апаратних засобів, що спрацюють паралельно [5,6], або за рахунок використання швидкісних операцій інкремента/декремента [14] замість вузлів попарного порівняння та перекомутації елементів числового масиву. В останньому випадку існує можливість сформувати ранги елементів масиву [15].

### МЕТА

Метою роботи є аналіз можливостей різницево-зрізового оброблення елементів числового масиву стосовно реалізації таких операцій, як сортування і ранжування.

## 2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Базовою операцією при SM-перетворенні векторного масиву чисел є послідовне формування різницевих зрізів (РЗ) у векторному вигляді, при цьому розглядаючи початковий числовий масив як нульовий  $n$ -вимірний РЗ  $\mathbf{a}_0$ , де  $n$  – кількість елементів масиву. Для формування кожного поточного РЗ  $\mathbf{a}_j$ ,  $j = 1, \dots, N$ , де  $N$  - кількість циклів оброблення, задіяно ненульовий внутрішній поріг  $q_j$  оброблення який визначається таким чином [1,2]:

$$q_j = \min \mathbf{a}_{j-1} = \min \{a_{i,j-1}\}_1^n, \#(1)$$

де  $a_{i,j-1}$  –  $i$ -й елемент попереднього  $(j-1)$ -го РЗ  $\mathbf{a}_{j-1}$ . В результаті поточний РЗ  $\mathbf{a}_j$  формується таким чином:

$$\mathbf{a}_j = \{a_{i,j}\}_1^n = \{a_{i,j-1} - q_j\}_1^n, \#(2)$$

тобто у векторному вигляді:

$$\mathbf{a}_j = \mathbf{a}_{j-1} - q_j. \#(3)$$

Крім того, одночасно можна сформувати зрізи  $\mathbf{g}_j$  і  $\mathbf{f}_j$  як вектор-стовпці відповідно двох матриць бінарних масок  $\mathbf{G}$  і  $\mathbf{F}$  [1,2], кожний елемент яких визначається таким чином:

$$g_{i,j} = \begin{cases} 1, & \text{якщо } a_{i,j} = 0, \\ 0, & \text{якщо } a_{i,j} \neq 0, \end{cases} \#(4)$$

$$f_{i,j} = \begin{cases} 1, & \text{якщо } a_{i,j} \geq 0, \\ 0, & \text{якщо } a_{i,j} < 0, \end{cases} \#(5)$$

Обидві сформовані матриці бінарних масок  $\mathbf{G}$  і  $\mathbf{F}$  фактично є матрицями відповідно нульових та додатних ознак згідно із виразами (4) і (5). Ці ознаки містять інформацію про внутрішнє топологічне розташування елементів початкового масиву  $\mathbf{a}_0$ , в залежності від їх числових значень. Все це дозволяє реалізувати сортування і ранжування елементів масиву  $\mathbf{a}_0$ , оскільки топологічні ознаки відіграють головну роль в цих асоціативних операціях.

## 3. ВЕКТОРНО-МАТРИЧНІ ОПЕРАЦІЇ В БАЗИСІ SM-ПЕРЕТВОРЕННЯ

У працях [1, 2] доведено, що відсортований  $\mathbf{a}_0^s$  початковий масив  $\mathbf{a}_0$  можна отримати як результат операції векторно-матричного множення вигляду:

---



---

## МЕТОДИ ТА СИСТЕМИ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОЇ І ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ ТА СИГНАЛІВ

---



---

$$\mathbf{a}_0^s = \mathbf{G}^T \cdot \mathbf{a}_0, \#(6)$$

де  $\mathbf{a}_0^s$  - векторний масив елементів початкового РЗ  $\mathbf{a}_0$ , що відсортовані за зростанням їх числових значень.

Разом з тим, в процесі різницево-зрізового оброблення в кожному циклі можна поступово сформувати послідовність елементів відсортованого масиву  $\mathbf{a}_0^s$ , використовуючи залежність (1) таким чином [2, 17, 18]:

$$a_i^s = \sum_{j=1}^i q_j \quad i = 1, \dots, n. \#(7)$$

Крім того використовуючи матрицю бінарних масок  $\mathbf{F}$  та вектор внутрішніх порогів вигляду:

$$\mathbf{q} = \{q_1, \dots, q_n\}, \#(8)$$

можна відновити початковий масив  $\mathbf{a}_0$  таким чином [1,2].

$$\mathbf{a}_0 = \mathbf{F} \cdot \mathbf{q}. \#(9)$$

При цьому необхідно зауважити, що процес різницево-зрізового оброблення завершується за наявності нульового значення  $q_j$  [1,2].

Для наочності наведених математичних співвідношень у табл.1 послідовно по циклах наведено приклад різницево-зрізового оброблення елементів масиву  $\mathbf{a}_0 = \{11,3,5,8,15\}$  [16]. Показано визначення внутрішніх порогів  $q_j$ , відсортованих елементів  $a_i^s$  масиву  $\mathbf{a}_0^s$ , а також елементів  $g_{i,j}$  (4) та  $f_{i,j}$  (5) відповідно матриць бінарних масок  $\mathbf{G}$  і  $\mathbf{F}$ . Знаком «-» у табл.1 позначено від'ємні елементи  $a_{i,j}$ .

Для наведених в табл.1 даних масиву  $\mathbf{a}_0$  і матриці бінарних масок  $\mathbf{G}$  можна перевірити слушність формули (6) векторно-матричного множення, а саме:

$$\mathbf{a}_0^s = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 11 \\ 3 \\ 5 \\ 8 \\ 15 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3 \\ 5 \\ 8 \\ 11 \\ 15 \end{bmatrix}. \#(10)$$

Разом з тим, як приклад нижче наводиться результат відновлення за формулою (9) елементів масиву  $\mathbf{a}_0$  з використанням сформованої матриці бінарних масок  $\mathbf{F}$  і вектора внутрішніх порогів  $\mathbf{q}$  (табл.1) у вигляді векторно-матричне множення:

$$\mathbf{a}_0 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 3 \\ 2 \\ 3 \\ 3 \\ 4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 11 \\ 3 \\ 5 \\ 8 \\ 15 \end{bmatrix}. \#(11)$$

Крім того, для матриці бінарних масок  $\mathbf{F}$  у табл.1 введено додаткові рядки, де поступово підраховується кількість одиничних елементів  $f_{i,j}$  у кожному рядку цієї матриці. Отримані значення відповідають рангу  $r_i$  кожного з елементів  $a_{i,0}$  масиву  $\mathbf{a}_0$  і представляють зріз (вектор) рангів  $\mathbf{r}$  [16] з елементами  $r_i$  вигляду:

$$r_i = \sum_{j=1}^n f_{i,j}. \#(12)$$

Цей факт можна пояснити тим, що кожний одиничний елемент  $f_{i,j}$  у рядку сформованої матриці бінарних масок  $\mathbf{F}$  означає входження відповідних мінімальних складових – внутрішніх порогів оброблення  $q_j$  у початкове числове значення відповідного елемента  $a_{i,j}$ . В результаті кількість одиничних елементів  $f_{i,j}$  фіксує співвідношення між елементами  $a_{i,0}$  масиву  $\mathbf{a}_0$  з урахуванням розкладання їх числових значень на мінімальні складові  $q_j$  (1).

**МЕТОДИ ТА СИСТЕМИ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОЇ І ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ  
ЗОБРАЖЕНЬ ТА СИГНАЛІВ**

**4. РЕЗУЛЬТАТИ**

Таким чином, одиничні елементи  $g_{i,j}$  матриці бінарних масок  $\mathbf{G}$  свідчать про топологічне розташування елементів  $a_{i,0}$  масиву  $\mathbf{a}_0$  за зростанням їх числових значень, а сума одиничних елементів  $f_{i,j}$  у  $i$ -му рядку матриці бінарних масок  $\mathbf{F}$  (12) формує ранг  $r_i$  відповідного елемента  $a_{i,0}$  у початковому масиві  $\mathbf{a}_0$ . Крім того, матриця бінарних масок  $\mathbf{F}$  та вектор внутрішніх порогів  $\mathbf{q}$  (8) забезпечують відновлення елементів масиву  $\mathbf{a}_0$  згідно з виразом (9).

Отже, в процесі різницево-зрізового оброблення векторного масиву чисел використовується не тільки паралельне багатооперандного підсумування його елементів, але й існує можливість їх відновлення після повного обнуління масиву, а також виконання таких асоціативних операцій, як сортування і ранжування елементів масиву.

Таблиця 1

Приклад процесу різницево – зрізового оброблення

Елементи $a_{i,j}$ різницевих зрізів $\mathbf{a}_j$	Різницеві зрізи $\mathbf{a}_j$					
	$\mathbf{a}_0$	$\mathbf{a}_1$	$\mathbf{a}_2$	$\mathbf{a}_3$	$\mathbf{a}_4$	$\mathbf{a}_5$
$a_{1,j}$	11	8	6	3	0	-
$a_{2,j}$	3	0	-	-	-	-
$a_{3,j}$	5	2	0	-	-	-
$a_{4,j}$	8	5	3	0	-	-
$a_{5,j}$	15	12	10	7	4	0
Цикли оброблення		1	2	3	4	5
Внутрішні пороги $q_j$		3	2	3	3	4
Відсортовані елементи $a_i^{\hat{}}$		3	$3 + 2 = 5$	$5 + 3 = 8$	$8 + 3 = 11$	$11 + 4 = 15$
Елементи $g_{i,j}$ зрізів $\mathbf{g}_j$	Зрізи $\mathbf{g}_j$ матриці $\mathbf{G}$					
	$g_1$	$g_2$	$g_3$	$g_4$	$g_5$	
$g_{1,j}$	0	0	0	1	0	
$g_{2,j}$	1	0	0	0	0	
$g_{3,j}$	0	1	0	0	0	
$g_{4,j}$	0	0	1	0	0	
$g_{5,j}$	0	0	0	0	1	
Елементи $f_{i,j}$ , зрізів $\mathbf{f}_j$ і ранги $r_i$	Зрізи $\mathbf{f}_j$ матриці $\mathbf{F}$					
	$\mathbf{f}_1$	$\mathbf{f}_2$	$\mathbf{f}_3$	$\mathbf{f}_4$	$\mathbf{f}_5$	
$f_{1,j}$	1	1	1	1	0	
$r_1$	1	$1 + 1 = 2$	$2 + 1 = 3$	$3 + 1 = 4$	<b>4</b>	
$f_{2,j}$	1	0	0	0	0	
$r_2$	1	1	1	1	<b>1</b>	
$f_{3,j}$	1	1	0	0	0	
$r_3$	1	$1 + 1 = 2$	2	2	<b>2</b>	
$f_{4,j}$	1	1	1	0	0	
$r_4$	1	$1 + 1 = 2$	$2 + 1 = 3$	3	<b>3</b>	
$f_{5,j}$	1	1	1	1	1	
$r_5$	1	$1 + 1 = 2$	$2 + 1 = 3$	$3 + 1 = 4$	$4 + 1 = 5$	

### ВИСНОВКИ

Сформовані в процесі різницево-зрізового оброблення  $n$ -елементного початкового масиву чисел  $\mathbf{a}_0$  дві матриці бінарних масок  $\mathbf{G}$  і  $\mathbf{F}$  дозволяють реалізувати сортування і ранжування елементів масиву за зростанням їх числових значень, що свідчить про багатофункціональність такого методу оброблення.

Матриця бінарних масок  $\mathbf{G}$  дає можливість сформулювати відсортований масив  $\mathbf{a}_0^S$ , а матриця бінарних масок  $\mathbf{F}$  дає можливість сформулювати вектор рангів  $\mathbf{r}$  елементів масиву  $\mathbf{a}_0$ , а також відновити початковий масив  $\mathbf{a}_0$ , враховуючи сформований вектор внутрішніх порогів оброблення  $\mathbf{q}$  в процесі відповідного векторно-матричного множення, що свідчить про двовимірність процесу різницево-зрізового оброблення.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Т. Б. Мартинюк, *Рекурсивні алгоритми багатооперандної обробки інформації*. Монографія. Вінниця: «Універсум» Вінниця, 2000. – 216с.
2. Т. Б. Мартинюк, В. В. Хомюк, Особливості математическої моделі дискретного SM-преобразования, *Математичні машини і системи*, №4, с. 145-155, 2010.
3. Т. Б. Мартинюк, Л. И. Тимченко, А. В. Кожемяко, Л. М. Куперштейн, Эффективность посрезовой обработки векторных массивов данных, *Математичні машини і системи*, №2, с. 60-67. 2017.
4. Я. Е. А. Яценко, Регулярные схемы алгоритмов адресной сортировки и поиска, *Управляющие системы и машины*, №5, с. 61-66, 2004.
5. І. Г. Цмоць, В. Я. Антонів, В. О. Парубчак, Паралельно-вертикальне сортування одновимірних даних методом злиття з використанням підрахунку, *Збірник наукових праць. Інститут проблем моделювання в енергетиці*, Вип. 68, с. 92-100, 2013.
6. І. Г. Цмоць, В. Я. Антонів, Алгоритми та паралельні структури сортування даних методом вставки, *Науковий вісник НЛТУ*, Вип. 261, с. 340-350, 2016.
7. Р. Сэдживик Р, *Фундаментальные алгоритмы на C++*. Анализ / Структуры данных / Сортировка / Поиск. СПб.: ООО «ДиаСофтЮП», 2002. – 688с.
8. У. Прэтт, *Цифровая обработка изображений*. Кн. 2. М.: Мир, 1982. – 480с.
9. Е. Ф. Очин, *Вычислительные системы обработки изображений*. Л.: Энергоатомиздат, 1989. – 136с.
10. К. И. Кучеренко, Е. Ф. Очин, Процессоры двумерной медианной фильтрации изображений на основе сортирующих сетей, *Автоматрия*, № 2, с. 13-19, 1988.
11. І. Г. Цмоць, *Інформаційні технології та спеціалізовані засоби обробки сигналів і зображень у реальному часі*. Львів: Видавництво УАД, 2005. – 228с.
12. Т. Кохонен, *Ассоциативные запоминающие устройства*. М.: Мир, 1982. – 384с.
13. Д. Э. Кнут, *Искусство программирования*. Т. 3 *Сортировка и поиск*. М.: Издательский дом «Вильямс», 2003. – 832с.
14. Т. Б. Мартинюк, Б. І. Круківський, Модель паралельного сортувальника для асоціативного процесора, *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, №5, с. 49-55, 2020. doi: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2020-152-5-49-55>
15. Т. Б. Мартинюк, Б. І. Круківський, Особливості паралельного алгоритму сортування з формуванням рангів, *Кібернетика та системний аналіз*, №1(58), с. 31-36, 2022. doi: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2020-152-5-49-55>
16. Т. Б. Мартинюк, А. В. Кожем'яко, Б. І. Круківський, А. Г. Буда, Асоціативні операції на базі різницево-зрізової обробки даних, *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*, №4, с. 159-163, 2022. doi: 10.31891/2307 – 5732 – 2022-311-4-159-163.
17. W. Wójcik, S. Pavlov, M. Kalimoldayev. (2019). *Information Technology in Medical Diagnostics II*. London: Taylor & Francis Group, CRC Press, Balkema book. – 336 Pages, <https://doi.org/10.1201/9780429057618>.
18. Highly linear Microelectronic Sensors Signal Converters Based on Push-Pull Amplifier Circuits / edited by Waldemar Wojcik and Sergii Pavlov, Monograph, (2022) NR 181, Lublin, Comitet Inzynierii Srodowiska PAN, 283 Pages. ISBN 978-83-63714-80-2.

**REFERENCES**

1. T. B. Martyniuk, Recursive algorithms for multi-operand information processing. Monograph. Vinnytsia: "Universum" Vinnytsia, 2000. - 216 p.
2. T. B. Martyniuk, V. V. Khomiuk, Peculiarities of the mathematical model of discrete SM transformation, Mathematical machines and systems, No. 4, p. 145-155, 2010.
3. T. B. Martyniuk, L. I. Timchenko, A. V. Kozhemyako, L. M. Kupershtein, Effectiveness of cut-by-cut processing of vector arrays of data, Mathematical machines and systems, No. 2, p. 60-67. 2017.
4. I. E. A. Yatsenko, Regular schemes of address sorting and search algorithms, Control systems and machines, No. 5, p. 61-66, 2004.
5. I. G. Tsmots, V. Ya. Antoniv, V. O. Parubchak, Parallel-vertical sorting of one-dimensional data by the method of merging using counting, Collection of scientific papers. Institute of Modeling Problems in Energy, Vol. 68, p. 92-100, 2013.
6. I. G. Tsmots, V. Ya. Antoniv, Algorithms and parallel structures of data sorting by the method of insertion, Scientific Bulletin of NLTU, Vol. 261, p. 340-350, 2016.
7. R. Sedgewick R, Fundamental algorithms in C++. Analysis / Data structures / Sorting / Search. St. Petersburg: DiaSoftYUP LLC, 2002. - 688 p.
8. U. Pratt, Digital image processing. Book 2. M.: Mir, 1982. – 480 p.
9. E. F. Ochyn, Computational systems of image processing. L.: Energoatomizdat, 1989. – 136p.
10. K. I. Kucherenko, E. F. Ochyn, Processors of two-dimensional median filtering of images based on sorting networks, Avtometriya, No. 2, p. 13-19, 1988.
11. I. G. Tsmots, Information technologies and specialized tools for processing signals and images in real time. Lviv: UAD Publishing House, 2005. – 228p.
12. T. Kohonen, Associative memory devices. M.: Mir, 1982. – 384 p.
13. D. E. Knuth, The Art of Programming. T. 3 Sorting and searching. M.: Izdatelsky dom "Williams", 2003. - 832 p.
14. T. B. Martyniuk, B. I. Krukivskyi, A model of a parallel sorter for an associative processor, Bulletin of the Vinnytsia Polytechnic Institute, No. 5, p. 49-55, 2020.  
doi: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2020-152-5-49-55>
15. T. B. Martyniuk, B. I. Krukivskyi, Peculiarities of the parallel sorting algorithm with the formation of ranks, Cybernetics and system analysis, No. 1(58), p. 31-36, 2022.  
doi: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2020-152-5-49-55>
16. T. B. Martyniuk, A. V. Kozhem'yako, B. I. Krukivskyi, A. G. Buda, Associative operations based on difference-slice data processing, Bulletin of the Khmelnytskyi National University. Technical sciences, No. 4, p. 159-163, 2022. doi: 10.31891/2307 – 5732 – 2022-311-4-159-163.
17. W. Wójcik, S. Pavlov, M Kalimoldayev. (2019). Information Technology in Medical Diagnostics II. London: Taylor & Francis Group, CRC Press, Balkema book. – 336 Pages, <https://doi.org/10.1201/9780429057618>.
18. Highly linear Microelectronic Sensors Signal Converters Based on Push-Pull Amplifier Circuits / edited by Waldemar Wojcik and Sergii Pavlov, Monograph, (2022) NR 181, Lublin, Comitet Inzynierii Srodowiska PAN, 283 Pages. ISBN 978-83-63714-80-2.

*Надійшла до редакції 25.10.2022р.*

**МАРТИНЮК ТЕТЯНА БОРИСІВНА** – доктор техн. наук, професор кафедри обчислювальної техніки, Вінницький національний технічний університет, [e-mail: martyniuk.t.b@gmail.com](mailto:martyniuk.t.b@gmail.com)

**КАТАШИНСЬКИЙ ДМИТРО ОЛЕКСАНДРОВИЧ** – аспірант кафедри обчислювальної техніки, Вінницький національний технічний університет, [e-mail: katashinskydmitry@gmail.com](mailto:katashinskydmitry@gmail.com)

**МИКИТЮК МАКСИМ ВАСИЛЬОВИЧ** – аспірант кафедри обчислювальної техніки, Вінницький національний технічний університет, [e-mail: maksym.mykytiuk@gmail.com](mailto:maksym.mykytiuk@gmail.com)

**ЗАЙЦЕВ МИКОЛА ОЛЕКСАНДРОВИЧ** – аспірант кафедри обчислювальної техніки, Вінницький національний технічний університет, [e-mail: mrnikolayz@gmail.com](mailto:mrnikolayz@gmail.com)