

---

---

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

---

---

УДК 681.3;004.93

В.П. КОЖЕМ'ЯКО<sup>а</sup>, Л.І. ТИМЧЕНКО<sup>б</sup>, А.А. ЯРОВИЙ<sup>а</sup>

### МЕТОДОЛОГІЧНІ ПІДХОДИ ДО ПАРАЛЕЛЬНО-ІЄРАРХІЧНОЇ ОБРОБКИ ПЛЯМОВИХ ЗОБРАЖЕНЬ ЛАЗЕРНИХ ПУЧКІВ ТА ЇХ ПРИКЛАДНА РЕАЛІЗАЦІЯ

<sup>а</sup> *Вінницький національний технічний університет*  
95, Хмельницьке шосе, Вінниця, 21021, Україна  
Тел.: +380 (432) 580019, E-mail: kyp@vstu.vinnica.ua

<sup>б</sup> *Київський університет економіки і технологій транспорту*  
19, вул. Лукашевича, Київ, 03049, Україна  
E-mail: timchen@svitonline.com

**Анотація.** В даній роботі зосереджено увагу на дослідженні відповідностей між функцією деформації та геометричними характеристиками 2D зображень профілю лазерного променя, а також на розробці методологічних підходів для аналізу розкиду геометричних характеристик сигналу лазерної траси та їх подальшого відновлення. На основі розроблених методів здійснено програмну реалізацію обробки плямових зображень лазерних пучків у реальному часі з підвищеною точністю вимірювання координат енергетичних центрів, як складових характеристик профілю лазерного променя.

**Аннотация.** В данной работе сосредоточено внимание на исследовании соответствий между функцией деформации и геометрическими характеристиками 2D изображений профиля лазерного луча, а также на разработке методологических подходов для анализа разброса геометрических характеристик сигнала лазерной трассы и их дальнейшего восстановления. На основе разработанных методов осуществлено программную реализацию обработки пятенных изображений лазерных пучков в реальном времени с повышенной точностью измерения координат энергетических центров, как составных характеристик профиля лазерного луча.

**Abstract.** The research of conformity between deformation function and geometrical characteristics of the 2D images of laser beam profile and development of the methodological approaches for the analysis of the signal geometrical characteristics dispersion in the laser trace and their further restoration is concentrated in the given work.

On the basis of the developed methods, the program realization of processing of the laser beam spot images in real time with the increased measurement accuracy of energy centres coordinates, as compound characteristics of a laser beam profile is carried out.

**Ключові слова:** паралельні обчислення, паралельно-ієрархічне перетворення, обробка зображень, плямові зображення лазерних пучків, профіль лазерного променя.

#### ВСТУП

На даний час в галузях лазерної обробки матеріалів, лазерній локації, оптичному зв'язку, поліграфії й інших областях техніки відчувається гостра необхідність більш широкого впровадження оптико-електронних паралельно-ієрархічних систем з автоматичним коректуванням похибок формованого світлового випромінювання. Причинами цих похибок можуть бути: дестабілізуючий вплив механічних чи кліматичних факторів, нестабільність характеристик джерела випромінювання, перешкоди в оптичному тракті і т.п. Забезпечення прийнятної якості корекції вимагає безупинного

динамічного контролю характеристик світлового випромінювання, наприклад його профілю, просторового розподілу його інтенсивності, у тому числі оцінки відхилення зазначеного розподілу від вихідного чи еталонного розподілу.

Значення вимірювання профілю променя полягає в тому, що густина енергії, концентрація і колімація світла є його взаємопов'язаними складовими характеристиками. Розповсюдження лазерного променя у просторі значно змінює його профіль. Наприклад, на рис. 1 приведено звичайні профілі лазерного променя, які ілюструють існуючу їх різновидність. Так як наведені різновидності присутні в профілях лазерного променя, то важливого значення набуває проблема вимірювання профілю лазерного променя для різноманітних практично-прикладних застосувань, особливо якщо густина енергії пов'язана із продуктивністю лазера [1].

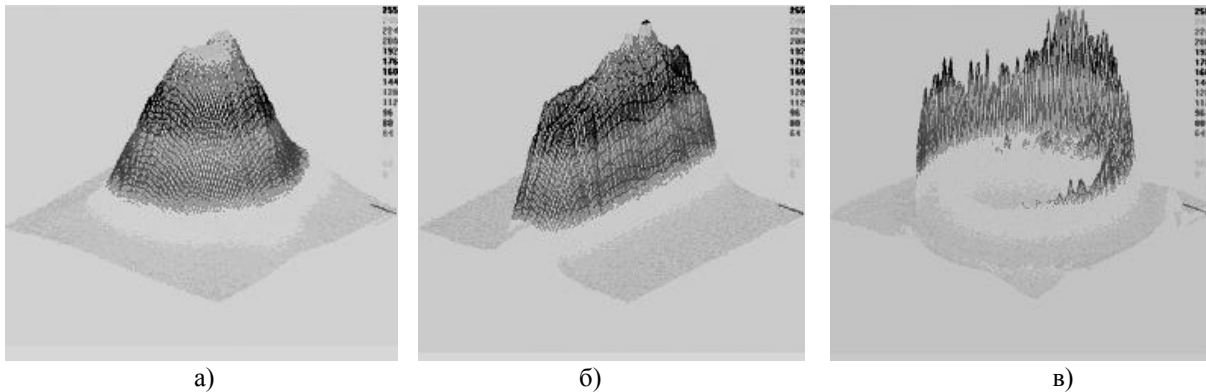


Рис. 1. Різновидності лазерних профілів:  
а) HeNe, б) ексимерний лазер, в) азотний кільцевий лазер

Прикладом двох різних типів профілів ідеальних лазерних променів для різних практичних цілей є промінь Гауса та промінь з плоскою вершиною [1]. Промінь Гауса передбачає найвищу сконцентрованість сфокусованого світла, а промені з плоскою вершиною передбачають незмінний розподіл енергії у визначеній ділянці. Приклади профілів цих двох променів зображено на рис 2.

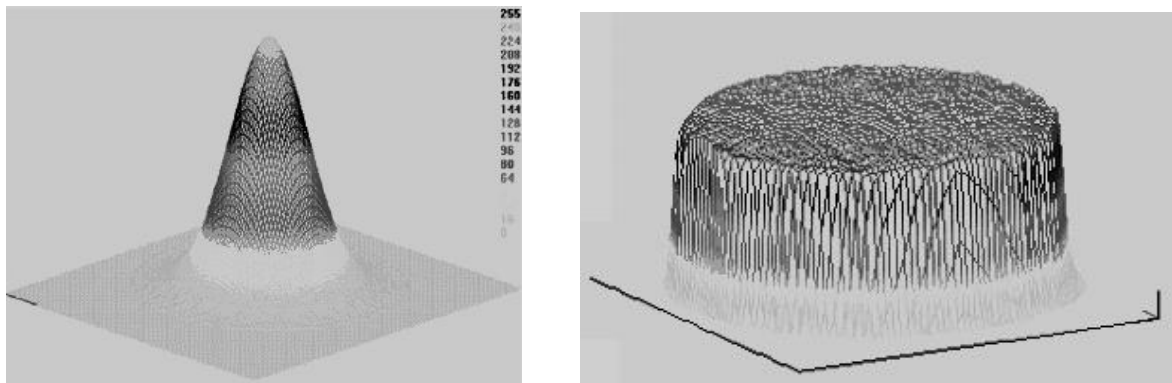


Рис. 2. Типи профілів ідеальних лазерних променів:  
а) ідеальний промінь Гауса для найбільшої концентрації енергії;  
б) ідеальний промінь з плоскою вершиною для стабільного лазерного освітлення

Проте, на практиці лазери рідко відображають найбільш незмінний інфрачервоний профіль. Деколи лазерні промені Гауса нерівномірно високоструктуровані, а лазерні промені з плоскою вершиною – нерівномірні по всій вершині або нахилені відносно енергії з однієї сторони до іншої. Рис. 3 ілюструє деякі реальні приклади деформованих профілів променя. Наприклад, високоструктурований промінь не фокусував би енергію, як ідеальний промінь Гауса (рис. 3а). Нахилений промінь з плоскою вершиною не давав би рівномірного освітлення як ідеальний, і міг би спричинити значні деформації в процесі його застосування (рис. 3б) [1,2].

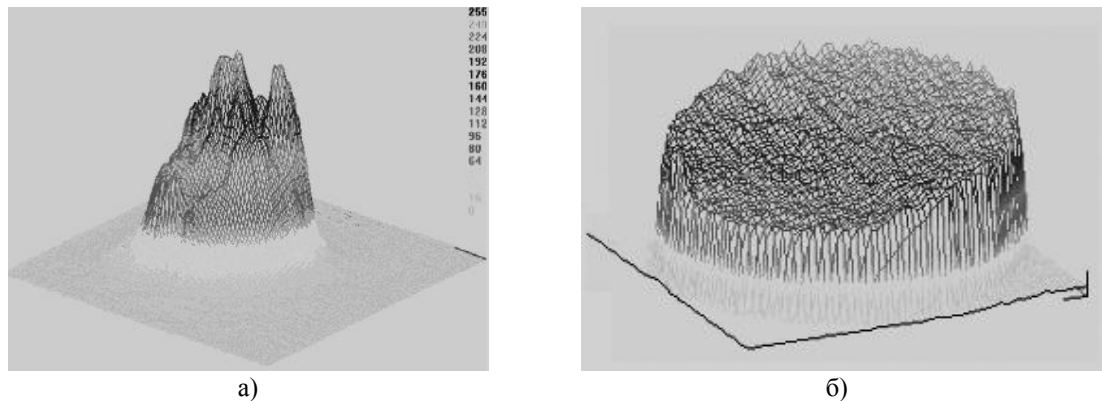


Рис. 3. Приклади деформованих профілів лазерного променя Гауса та променя з плоскою вершиною

Значення деформованих профілів лазерного променя змінюються в залежності від практичного застосування. В наукових застосуваннях нелінійні процеси прямо пропорційні до квадратів або кубів значень густини випромінювання. Такі „не Гаусові” профілі можуть мати пікову енергію меншу за 50% від тієї, що промінь Гауса мав би від загальної потужності або енергії при тих самих умовах. Тому нелінійний процес може призводити до 12 % або 25 % втрат від очікуваних значень пікової енергії. Це призводить в свою чергу до 300% або 700% помилки на експерименті, який має бути точним в межах  $\pm 5\%$  [2].

Пристрої, які використовують лазери, такі як принтери, волоконна оптика, пристрої зв'язку та ін. потребують високого ступеня контролю лазерним променем, щоб коректно виконувати задані користувачем завдання. Рівномірність, направленість і стабільність, а також картина поля моди лазерного променя звичайного лазерного діоду, що застосовується в пристроях, може різко спотворюватись за рахунок розрегулювання та нецентрованості колімуруючої оптики установки, що спричиняє до неочікуваного зниження продуктивності пристрою.

Актуальність даних досліджень також підтверджується надзвичайно активним застосуванням лазерів в медицині. Одним з них є фоторефракційна кератотомія (ФРК), в якій промінь з плоскою вершиною застосовується для того, щоб виконувати корекцію зору. Якщо гомогенізатор, який формує плоску вершину профілю лазерного променя, знаходиться за межею регулювання та існує 50% нахил на плоскій вершині, то корекція гостроти зору ока може становити 4 діоптрії на одній стороні райдужної оболонки, з лише 2 діоптріями на протилежній стороні. Цей факт необхідно враховувати для ФРК операцій, які можуть спричинити до того, що пацієнт залишиться з невідповідною корекцією зору після операції [1].

В промислових застосуваннях лазерів найбільш потужні лазери Nd:YAG та CO<sub>2</sub> лазери застосовуються багаторазово. Промислові процеси різання та зварювання прямо пов'язані із вимірюванням характеристик профілю лазерного променя. Наприклад, Nd:YAG лазер з подвійним піком може спричинити одну вирізку в напрямку X та різні вирізки в напрямку Y. Також, промінь зі „збідненим профілем” може спричинити до свердління отворів невідповідного різного діаметру.

Тому для різних прикладних задач є актуальними наукові розробки спрямовані на точне визначення характеристик профілю лазерного променя, а також координатних характеристик зображень лазерної траси з подальшою можливістю прогнозування координат лазерних зображень у довільні моменти часу. Велика увага приділяється даному науковому напрямку і в США, підтвердженням чого є аналогічні наукові дослідження та програмно-апаратні розробки деяких провідних американських корпорацій, таких як Spigicon Inc., Coherent, Inc.

## 1. МЕТОДОЛОГІЧНІ ПІДХОДИ ДО ОБРОБКИ ПЛЯМОВИХ ЗОБРАЖЕНЬ ЛАЗЕРНИХ ПУЧКІВ

Існує велика кількість груп методів вимірювання профілю лазерного променя, такі як неелектричні методи, електронні методи, методи на основі механічних скануючих пристроїв, на основі спеціалізованих камер (в тому числі CCD). Найбільшого застосування набули методи вимірювання профілю лазерного променя на основі CCD-камер.

Обладнання систем профілювання лазерного променя на основі камери містить сучасний

комп'ютер, карту механізму захоплення кадру, щоб перетворити сигнал у цифрову форму, а також програмне забезпечення, щоб управляти картою механізму захоплення кадру, показуючи профілі лазерного променя та здійснювати відповідні кількісні обчислення необхідних характеристик, які є складовими профілю. Такі камери як CCD використовуються для хвиль видимого діапазону або піроелектричних хвиль, для інших довжин хвиль використовуються відповідно інші види камер. Таким чином, камера, по суті, є цифровим перетворювачем оптичних сигналів для подальшої їх комп'ютерної обробки. Сучасне програмне забезпечення дає дуже чіткі 2D та 3D зображення лазерної траси (рис. 4), а також виконує надскладні цифрові операції аналізу відповідних складових характеристик профілю лазерного променя [1,2].

В даній роботі автори зосереджують увагу на дослідженні відповідностей між функцією деформації та геометричними характеристиками 2D зображень профілю лазерного променя, зокрема на розробці методів аналізу розкиду геометричних характеристик сигналу лазерної траси та їх відновлення, а також на основі цього розробки апаратно-програмних засобів обробки плямових зображень лазерних пучків у реальному часі з підвищеною точністю вимірювання координат енергетичних центрів, як складових характеристик профілю лазерного променя.

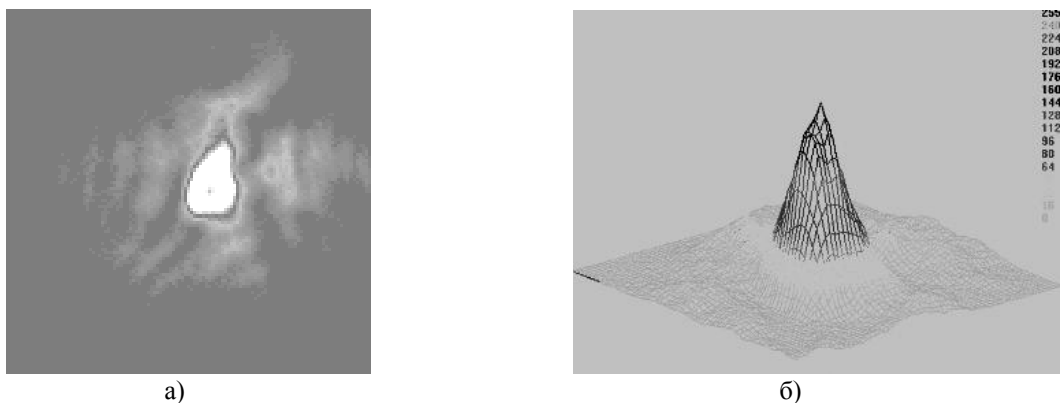


Рис. 4. Високоструктурований лазерний промінь, виміряний за допомогою CCD камери в 2D (а) і 3D (б) форматі

Мету запропонованого підходу [3] можна узагальнити таким чином. Нехай  $Y(t)$  - вихідний вектор сигналу, і  $Y'(t)=X(g(t))$  - аналізований деформований вектор, який обумовлюється дією дестабілізуючих факторів. Щоб здійснити аналіз, за допомогою якого можливо відновити вектор  $Y'(t)$  потрібно геометрично охарактеризувати сигнал. Ключова ідея полягає в наступному:

- 1) для незміщеного деформованого вектора знаходяться оптимальні нелінійні ваги усіх компонент;
- 2) для зсунутого деформованого вектора знаходиться його зсув за допомогою взаємозв'язку коефіцієнтів апроксимації;
- 3) усунення помилок, що відбуваються від дискретизації і статистичних параметрів.

У попередніх роботах ми показали, що є ряд відповідностей між функцією деформації  $g(t)$  і факторами апроксимації, а також розкидом геометричних характеристик сигналу, що обмежений різноманітними порогами [4]. У проведених експериментах достовірність відновлення геометричних характеристик сигналу перевершує інші методи, засновані на традиційних засобах апроксимації.

Розглянемо вихідні сигнали на прикладі послідовностей серій лазерних зображень [5]. Подані методи можуть бути поширені на багатомірні зображення.

#### Оцінка параметрів точки прив'язки.

Під координатами точки прив'язки  $(x, y)$  (далі - точкою прив'язки) ми розуміємо координати енергетичного центру зображення  $X(g(t))$ , що повинні залежати тільки від сигналу  $X(t)$  й інваріантні до функції деформації  $g(t)$ . Координати  $(x, y)$  енергетичного центру двовимірному сигналу з питомою нелінійною щільністю  $\omega(f(x, y))$ , що відповідає даному значенню  $f(x, y)$  (далі щільністю), виражаються так:

$$x = \frac{1}{M} \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} \omega(f(x,y)) \cdot x_0 \quad (1)$$

$$y = \frac{1}{M} \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} \omega(f(x,y)) \cdot y_0, \quad M = \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} \omega(f(x,y)), \quad (2)$$

де  $M$  - моментна ознака.

Для опису методу, спочатку припустимо, що, для аналізованої вибірки зображень, координати центрів ваги фігур одичної щільності, утворених крайовими лініями яскравості, (далі часткові центри) значно не змінюються. У цьому випадку, щоб знайти точку прив'язки, необхідно знайти оптимальну щільність  $\omega(f(x,y))$ . Для її визначення можна застосувати такі вирази:

$$\sum_{i=0}^{n-1} x^{(i)} = x_e, \quad \sum_{i=0}^{n-1} \omega'_i y^{(i)} = y_e, \quad (3)$$

де  $\omega_i$  - шукані щільності, що відповідають заданій яскравості ( $\omega_i$  - для параметрів  $x$ ,  $\omega'_i$  - для параметрів  $y$ );  $\sum y^{(i)}$  - значення  $x$ ,  $y$ , що відповідають  $i$ -му зображенню;  $x_e, y_e$  - шаблонні параметри. Вираз (3) інакше виражається як:

$$\sum_{i=0}^{n-1} \omega_i x_i = x_e, \quad \sum_{i=0}^{n-1} \omega_i y_i = y_e x_i \quad (4)$$

де  $x_i, y_i$  - координати часткових центрів для ділянок, обмежених крайовими лініями яскравості, що відповідає індексу  $i$ . У роботі за  $x_e$  і  $y_e$  прийняті усереднені значення часткових центрів такого зображення, що має найменший розкид їх значень.

Таким чином, можна знайти узгоджену точку прив'язки для зображень, що задовольняють вищевказане припущення.

Тепер відкинемо припущення, що в поточній вибірці зображень часткові центри близькі.

Тоді координати точки прив'язки можуть виражатися так:

$$x = \frac{1}{M} \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} \omega(f(x,y)) \cdot (x + \delta_x); \quad (5)$$

$$y = \frac{1}{M} \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} \omega(f(x,y)) \cdot (y + \delta_y). \quad (6)$$

де  $\delta_x$  і  $\delta_y$  - зсуви, що відповідають даному зображенню стосовно шаблонового або початкового зображення.

Таким чином, можна обчислити щільності з виразів:

$$\sum_{i=0}^{n-1} \omega_i \sum (x^{(i)} + \Delta x) = x_e, \quad (7)$$

$$\sum_{i=0}^{n-1} \omega'_i \sum (y^{(i)} + \Delta y) = y_e. \quad (8)$$

для групи зображень із близькими зсувами часткових центрів ( $\Delta x$ ,  $\Delta y$ ) дійсного і перекрученого сигналів. Формалізація визначення точок прив'язки можлива за допомогою багаторівневої ієрархічної мережі, запропонованої в [3,4].

У роботі [6] було показано, що для природних зображень при апроксимації крайових ліній можна використовувати відношення квадратного і кубічного коефіцієнтів апроксимації. При цьому одноманітні компоненти мають близьке дане відношення, і було показано, що різноманітні компоненти (фази) одноманітного зображення мають мале, але зрозуміле розходження.

У даних дослідженнях для вибору груп зображень із близькозміщеними сигналами використовувалася апроксимація методом найменших квадратів. Було помічено, що близькозміщені зображення можуть мати близьке відношення квадратного і кубічного коефіцієнта. Додатково використовувався коефіцієнт сьомого ступеня для виявлення малих зсувів і для критерію точності порівняння коефіцієнтів.

На основі вищесказаного, здійснювалась процедура навчання для оцінки координат точки прив'язки, яка детально подана в [7], а також використовувалася операція тунелювання коефіцієнтів апроксимації для досягнення більшої вірогідності [8].

Після закінчення навчання ненавчена вибірка зображень класифікується не лише за значеннями відношень коефіцієнтів апроксимації  $c_2/c_3$ , але також з врахуванням обчислених щільностей чи знайдених зсувів точок прив'язки.

Після закінчення навчання, вибірка зображень, що не навчається, класифікується за значеннями відношення  $c_2/c_3$  коефіцієнтів апроксимації відповідних крайових ліній і з урахуванням обчислених щільностей або знайдених зсувів точок прив'язки.

При цій класифікації діапазон значень коефіцієнтів  $\nu^* = \frac{c_2^*}{c_3^*}$  лежить у тунелі навколо еталона

$e$ , межі якого вибираються так, щоб виконувалися умови:

$$\begin{aligned} x_{e-} - x^* &< E_{\max}, \\ y_{e-} - y^* &< E_{\max}, \\ \omega_{e-} - \omega^* &< \min(E(\omega^*) \geq E_{\max}), \end{aligned}$$

де  $E_{\max}$  - максимальна помилка координати,  $E(\nu)$  - відповідна  $\nu$  помилка.

При обчисленні точки прив'язки крайові лінії можуть проходити через банк фільтрів для усунення помилки дискретизації і ефектів, що відбуваються з особливих статистичних параметрах [5].

#### Етапи для вимірювання координат енергетичних центрів лазерних зображень.

1. Виділення граничних ліній.

Починаючи від максимальної яскравості формуються  $N$  її значень –  $T_{\max-w}$ ,  $w=1, \dots, N$ . Крайні точки з яскравістю  $T_{\max-w}$  утворюють граничну лінію. Таким чином, визначено 6 граничних контурів.

2. Визначення попередніх центрів відповідно до виразів (1) та (2).

3. Сегментування граничних ліній.

Для розбивки граничних контурів на кілька частин (сегментування) як центральну точку (точку прив'язки) використовуються координати попереднього центра.

Здійснюється сканування кожної ділянки граничної лінії (сегмента), у полярних координатах, через визначений інтервал (реально брався інтервал  $9^\circ$ ). Обрані точки будуть використовуватися як дані для апроксимації (перебування коефіцієнтів апроксимації  $c_2, c_3$ ). Для кожного сегмента граничної лінії знаходиться зсув граничної лінії в цьому напрямі ( $\Delta X, \Delta Y$ ).

4. Апроксимація граничних ліній.

Для кожного сегмента методом найменших квадратів проводиться апроксимація і знаходяться коефіцієнти  $c_2, c_3$ .

5. Пошук еталонного зображення.

Для навчальної вибірки знаходяться для кожного сегмента усереднені значення відношення коефіцієнтів апроксимації ( $\bar{C}_i = \frac{C_2}{C_3}$ ,  $i$  – номер сегмента,  $i=1, \dots, 4$ ). Для навчальної вибірки

використовувалося 50% зображень.

6. Етап тунелювання.

Здійснювався за усередненими коефіцієнтами апроксимації. Границі тунелю визначаються з тих зображень, у яких найбільш близько, по мінімуму середньоквадратичного відхилення, підходять поточні значення  $\bar{C}_1, \bar{C}_2, \bar{C}_3, \bar{C}_4$  до еталонних значень  $\bar{C}_1, \bar{C}_2, \bar{C}_3, \bar{C}_4$  ліворуч і праворуч від них. Потім ці близькозміщені значення усереднюються і формуються границі тунелю ліворуч і праворуч.

7. Етап навчання ПІ мережі.

Формується еталонна структура ПІ мережі для еталонного зображення. Формується еталонна ПІ мережа для тих зображень, що формують визначені границі тунелю ліворуч і праворуч від центрального тунелю.

8. Етап обробки поточних зображень.

На цьому етапі також знаходиться відношення  $C_2/C_3$  для кожного сегмента (виконуються пункти 1 - 6 алгоритму). У випадку влучення  $C_2/C_3$  в один із тунелів і збігу ПІ мереж для еталонного і поточного

зображень останнє вважається «хорошим», у протилежному випадку – «поганим». Якщо поточне зображення буде «хорошим», то відповідно з п. 3 для нього обчислюється зсув  $\delta_x, \delta_y$ .

9. Оптимізація ваг. Здійснюється у відповідності із вищенаведеними виразами (5) і (6).

Для збільшення точності результатів бажано робити декілька ітерацій, узявши за початкові значення раніше визначені шаблони, використовуючи при формуванні коефіцієнтів систем рівнянь (7) та (8). При використанні другої ітерації, точність буде підвищена приблизно в 1,5 рази. Для скорочення числа невизначених зображень і встановлення походження спотворень можна використовувати набір, що апроксимує відповідності тривимірному наборові тунельних порогів із різноманітними значеннями. Для вибору оптимальних порогів можна використовувати динамічну тунелюючу систему їх установки [9].

Альтернативним варіантом є вибір оптимального порогу із застосуванням процедури навчання паралельно-ієрархічної мережі на основі формування нормуючого рівняння, що детально описаний в [7]

Тестування проводилось за допомогою п'ятих наборів даних. Фрагмент бази даних однієї траси лазерних зображень показано на рис. 5.

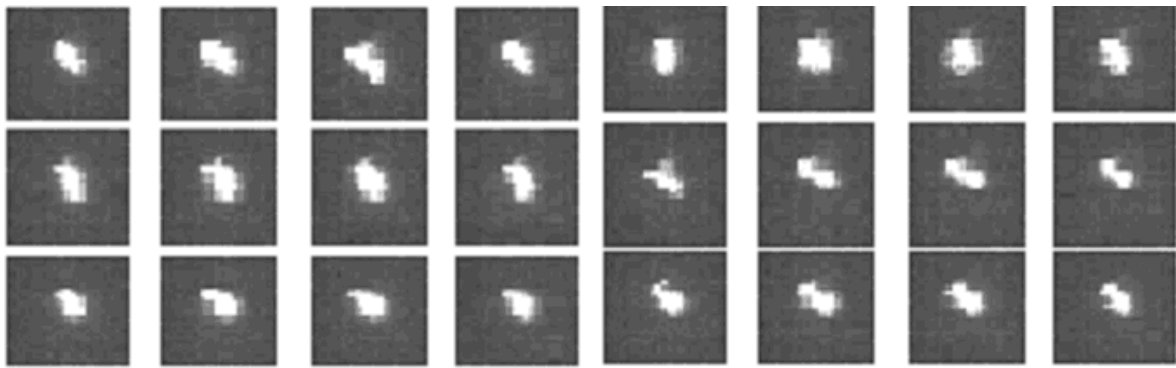


Рис. 5. Фрагмент лазерної траси [5]

Покажемо, що еталони  $x_e$  і  $y_e$  можуть бути визначені як зображення з малим розкидом їх часткових центрів. З експериментів було отримано, що ці зображення мають близькі коефіцієнти апроксимації  $c_2, c_3$ . З роботи [6] випливає, що ці зображення мають одноманітні фази. Очевидно, що у випадку великих деформацій з'являється нерівномірний розподіл енергії, що призводить у результаті до зсуву координат локальних центрів. У результаті запропонованого навчання похибка визначення точки прив'язки не перевищує 1,5 пікселя. Вона складається з неточності прийнятого поняття еталона, неточності зсуву при навчанні, неабсолютної кореляції квадратного і кубічного коефіцієнта апроксимації для фіксованого зсуву, а також з неточності від ефектів дискретизації і впливу на статистичні параметри. На рис. 6 показані крайові лінії використаного еталонного зображення лазерної траси і відповідне зображення (рис. 7).

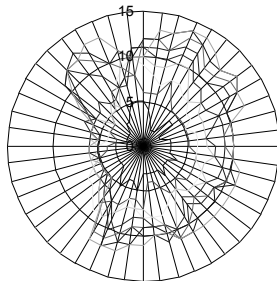


Рис. 6. Крайові лінії еталонного зображення



Рис. 7. Вибране еталонне зображення (128×128)

Табл. 1 показує результати оцінки опорної точки двох трас по 140 використаних зображень, 70 зображень використовувалися для навчання, інші використовувалися для визначення точки прив'язки. Рис. 8 показує графік розподілу відношень  $c_2/c_3$  від значень часткових центрів. Координати точки

прив'язки – X=69.0279; Y=59.6733. З табл. 1 слідує, що кількість зображень, відношення коефіцієнтів апроксимації яких попадає в тунель, дорівнює 36.

При обробці послідовності зображень (в нашому випадку, плямових зображень лазерних трас) використовувалось нормуюче рівняння для сусідніх двох зображень, у яких перше приймається еталонним. Нормуюче рівняння має такий вигляд:

$$d = \frac{\bar{w}_1(a_{11}^1)^j}{\sum_{t=1}^k (a_{11}^t)^{j-1}} + \frac{\bar{w}_2(a_{11}^2)^j}{\sum_{t=1}^k (a_{11}^t)^{j-1}} + \dots + \frac{\bar{w}_{k-1}(a_{11}^{k-1})^j}{\sum_{t=1}^k (a_{11}^t)^{j-1}} + \frac{\bar{w}_k(a_{11}^k)^j}{\sum_{t=1}^k (a_{11}^t)^{j-1}} = \frac{\sum_{t=1}^k \bar{w}_t(a_{11}^t)^j}{\sum_{t=1}^k (a_{11}^t)^{j-1}},$$

де коефіцієнти налаштування  $\bar{w}_1 \div \bar{w}_k$  отримані при попередній обробці на перших зображеннях набору;  $(a_{11}^t)^j, (a_{11}^t)^{j-1}$  - хвостові елементи відповідно поточного і попередніх зображень. У ході обробки послідовності зображень були отримані дані, які зображені на рис. 9.

Таблиця 1.

Значення точки прив'язки в центральному тунелі

№ зображення	Координата X	Координата Y	Δx	Δy	№ зображення	Координата X	Координата Y	Δx	Δy
2	69.1541	59.3275	-0.1261	0.3459	72	68.9252	60.0516	0.1027	-0.3782
5	70.1457	60.2265	-1.1178	-0.5532	73	67.6251	60.8029	1.4028	-1.1295
6	69.2075	59.4605	-0.1796	0.2128	76	69.0926	59.2218	-0.0647	0.4516
8	69.3655	59.5653	-0.3376	0.1081	78	68.9992	58.5592	0.0287	1.1142
9	70.1315	59.2236	-1.1036	0.4497	99	70.3965	60.9546	-1.3686	-1.2812
11	69.4858	60.5077	-0.4579	-0.8343	101	69.0978	60.8558	-0.0699	-1.1825
14	69.2673	60.7730	-0.2394	-1.0996	108	69.5562	60.7843	-0.5283	-1.1109
23	68.1827	60.8750	0.8452	-1.2016	110	68.7018	59.3707	0.3262	0.3026
26	68.4473	59.3144	0.5806	0.3590	113	69.9831	58.4035	-0.9552	1.2699
27	67.8406	59.8413	1.1873	-0.1679	121	69.4342	58.4801	-0.4063	1.1933
29	69.8535	59.1702	-0.8256	0.5031	122	69.2161	59.1879	-0.1882	0.4854
31	68.9937	60.1161	0.0342	-0.4428	124	67.7009	59.8151	1.3270	-0.1417
36	68.5798	59.1570	0.4482	0.5164	130	68.2052	58.3177	0.8227	1.3557
39	68.2861	58.3387	0.7418	1.3347	131	68.3098	58.3269	0.7181	1.3465
60	68.0184	60.5156	1.0096	-0.8423	132	67.7106	58.2851	1.3173	1.3883
62	67.6880	60.9058	1.3399	-1.2325	137	69.1311	58.9851	-0.1032	0.6883
66	68.5222	59.4425	0.5057	0.2309	139	69.1083	60.5518	-0.0804	-0.8784
70	69.6574	58.2494	-0.6295	1.4240	140	68.1227	59.9511	0.9052	-0.2778

Для подальшої обробки необхідно вибирати тільки визначені значення  $d$ , що більші деякого порогу. Наприклад, для обробленої лазерної траси (рис. 9) деякі з  $d$  приймають малі значення, початкові зображення яких можна виключити. Тим самим із лазерної траси ми можемо прибрати "погані" зображення й опрацювати їх аналогічним способом. Порівняльний аналіз показує, що запропоновані методи дозволяють вимірювати координати центру лазерних зображень на основі операцій урівноваження і апроксимації крайових ліній з точністю визначення точки прив'язки не більше ніж 1,5 пікселя, які по точності перевищують відомі, наприклад, на основі визначення центру ваги за допомогою моментних ознак, в середньому в 1,5 рази. У проведених експериментах були застосовані 5 лазерних трас з кількістю зображень – 2044 в кожній трасі. Проведені експерименти показують, що для зображень плям лазерних пучків у результаті дії різноманітних дестабілізуючих чинників майже неможливо точно



виміряти координати їх енергетичних центрів. Тому був використаний запропонований раніше метод виміру координат на основі аналізу взаємного розташування двох сусідніх лазерних зображень. Результатом аналізу такого взаємного розташування двох сусідніх зображень явилось скориговане значення координат енергетичного центру поточного зображення, які можна вимірювати так, як це зроблено в роботі [4,10]. Такий принцип виміру координат енергетичного центру дозволяє виключити застосування неточних процедур на основі різноманітних апроксимуючих операторів [4,8,11].

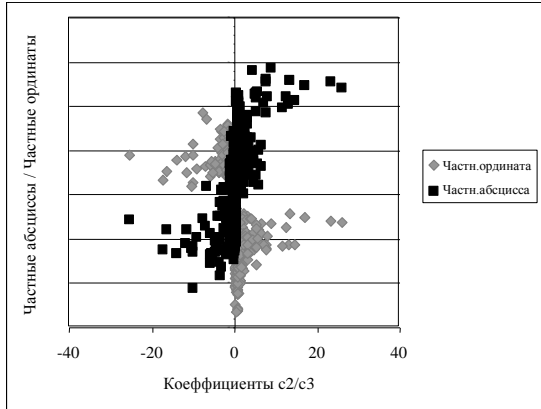


Рис. 8. Залежність координати від відношення  $c_2/c_3$

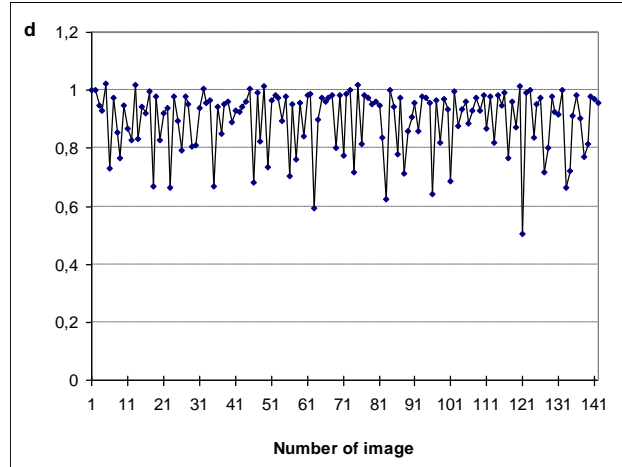


Рис. 9. Результати обробки зображень лазерної траси на навченій ПІ мережі

## 2. РОЗРОБКА ПРОГРАМНИХ ЗАСОБІВ РЕАЛІЗАЦІЇ ОБРОБКИ ПЛЯМОВИХ ЗОБРАЖЕНЬ ЛАЗЕРНИХ ПУЧКІВ У РЕАЛЬНОМУ ЧАСІ

Для дослідження розроблених методів і алгоритмів для обробки зображень лазерних пучків було створено програмне забезпечення [12]. На рис. 10 представлений інтерфейс працюючої програми обробки зображень. Розроблена програма працює під керуванням операційної системи Windows 95/98/XP. Мінімальні вимоги запропоновані до апаратної частини комп'ютера для забезпечення необхідної швидкодії і коректної роботи програми такі: мікропроцесор – не нижче Intel Pentium 1 GHz, оперативна пам'ять - не менше 128 MB, вільної пам'яті на жорсткому диску HDD – не менше 50 MB відеоадаптер і монітор - не нижче SVGA 800×600.

При натисканні кнопки „Analise” в новому вікні на екран виводяться обчислені результати координат енергетичних центрів зображень лазерної траси, зокрема мінімальні та максимальні, а також середнє значення координат центру максимальної інтенсивності, координати центру максимальної інтенсивності для кожного окремо взятого зображення, координати „хороших” зображень, що при процедурі тунелювання попали в тунель.

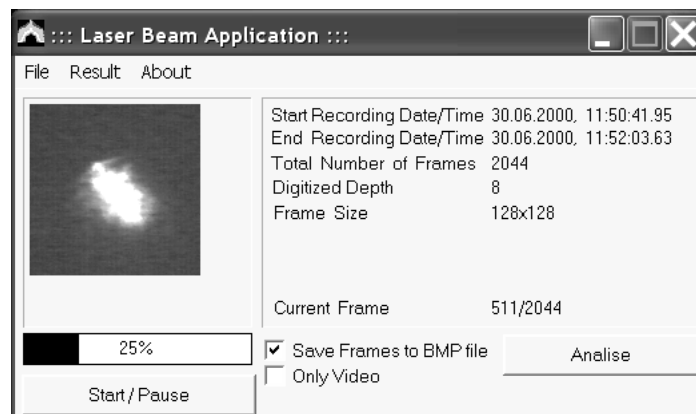


Рис. 10. Розроблена програма обробки зображень лазерних пучків

**Опис алгоритму, що використовувався в програмній реалізації.**

1. На зображенні визначається точка з максимальною яскравістю.  
 2. Від визначеного значення яскравості на зображенні вибираються 5 значень яскравості, кожне на одиницю менше від попереднього. Крайні точки кожного з 6 діапазонів утворюють крайові лінії. У результаті виходить 6 крайових ліній (див. рис. 6).

3. Для кожного крайового контуру визначається попередній центр, після чого обчислюється усереднений центр для координат X та Y.

Координати  $(x,y)$  енергетичного центра двовимірного сигналу з питомою нелінійною щільністю  $w(f(x,y))$ , що відповідає даному значенню  $f(x,y)$ , виражаються у відповідності із вищенаведеними виразами (1) і (2).

4. Отримані крайові лінії розбиваються на 4 сегменти. За центральну точку використовують координати попереднього центра (усередненого центра).

5. У межах кожного сегмента вибираються координати 5 точок через  $9^\circ$  (1 сегмент =  $45^\circ$ ). Ці точки використовуються як дані для апроксимації (визначення коефіцієнтів апроксимації  $c_2, c_3$ ).

6. Для кожного окремо взятого сегмента, методом найменших квадратів проводиться апроксимація і знаходяться коефіцієнти  $c_2, c_3$ .

**Пошук еталонного зображення.**

7. Для навчальної вибірки (50% всіх використовуваних зображень) знаходяться для кожного сегмента усереднені значення відношень коефіцієнтів апроксимації  $\bar{c} = \frac{c_2}{c_3}$ . У результаті для кожної крайової лінії одержимо 4 усереднених значення  $\bar{c}_1, \bar{c}_2, \bar{c}_3, \bar{c}_4$ .

8. Етап тунелювання проводиться за усередненими значеннями коефіцієнтів апроксимації. На рис. 11 всередині пунктирних ліній знаходяться значення відповідних  $c_1, c_2, c_3, c_4$  для всіх зображень і для них знаходились усереднені значення  $\bar{c}_1, \bar{c}_2, \bar{c}_3, \bar{c}_4$ . Суцільні лінії є границями тунелю для відповідних сегментів.

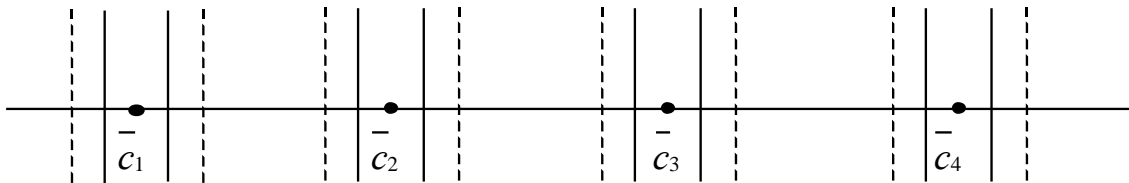


Рис. 11. Етап тунелювання

**Обробка поточних (тестових) зображень.**

9. Для кожного зображення також знаходимо значення  $\bar{c} = \frac{c_2}{c_3}$  для кожного сегмента (виконуються п.1÷6). У випадку влучення отриманих значень  $\bar{c}$  в один з тунелів, зображення вважається "хорошим", в протилежному випадку "поганим".

10. Для хорошого зображення проводиться оптимізація вагових коефіцієнтів у відповідності із вищенаведеними виразами (5) і (6). Координати цих центрів формують остаточний результат.

На рис. 12 представлено вікно опції „Детальний розгляд”, що дозволяє користувачеві, за допомогою опції „Open Frame Image”, завантажити початкове зображення та розрахувати його крайові лінії та їх центри, з їх одночасним відображенням на екрані за шістьма рівнями інтенсивності, а також визначити координати енергетичного центра зображення.

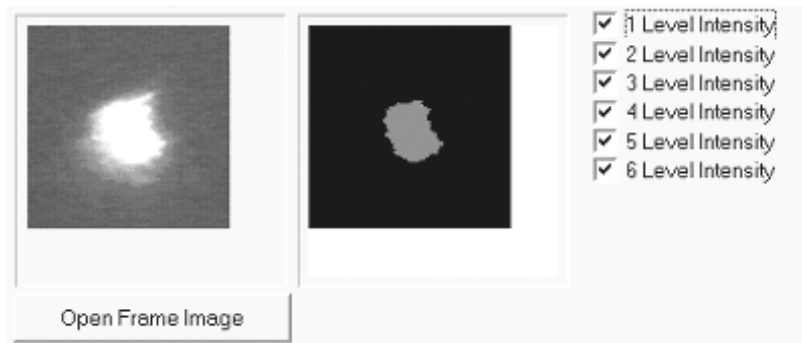


Рис. 12. Вікно опції „Open Frame Image”

## ВИСНОВКИ

Таким чином, в даній роботі на основі дослідження відповідностей між функцією деформації та геометричними характеристиками 2D зображень профілю лазерного променя, запропоновано методологічні підходи аналізу розкиду геометричних характеристик сигналу лазерної траси та їх відновлення, що дозволяють виявляти взаємозв'язок між коефіцієнтами апроксимації сигналу і геометричними характеристиками сигналу (наприклад, енергетичним центром, моментом інерції). Досліджено численні приклади, що переконливо демонструють доцільність застосування методів для задачі точного визначення координат при компенсації зміщення зображень у лазерній трасі. Отримані результати програмної емуляції дають максимальну помилку визначення точки прив'язки 1,5 елемента розкладання (пікселя), що, при тих самих умовах, приблизно в 1,5 рази менше, ніж при використанні традиційних методів апроксимації. Для збільшення точності результатів вимірювань пропонується робити обчислення, застосовуючи кілька ітерацій, узявши за початкові значення раніше визначені параметри. Розроблено програмне забезпечення і досліджено достатнє число лазерних трас довжиною в 2044 зображення. Також, отримано попередні результати по розробці методу і програмного забезпечення для прогнозування координат зображень лазерних трас у довільні моменти часу з приблизно такими ж параметрами точності їхнього вимірювання.

Результати роботи можуть знайти широке застосування в різних областях техніки для систем, у яких необхідно здійснювати автоматичне коректування спотворень лазерного джерела світлового випромінювання. Це системи світлової навігації з використанням лазерів при розповсюдженні лазерного випромінювання в умовах зі зниженою видимістю в атмосфері, системи точного орієнтування, із можливістю визначати просторове положення об'єкту у різних метеорологічних умовах, лазерні навігаційні системи. Це також лазерні системи зв'язку і передачі інформації, локації і дальнометрування, трасування і навігації і т.п., для яких необхідні кількісні дані про вплив атмосфери на параметри профілю лазерного променя, що несе певну корисну інформацію.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Carlos B. Roundy Current Technology of Laser Beam Profile Measurements. – Spiricon. Inc., 2000.
2. C.B. Roundy The importance of beam profile. – Physics World, July 1990. – pp. 65-66.
3. Паралельно-ієрархічне перетворення як системна модель оптико-електронних засобів штучного інтелекту. Монографія / В.П. Кожем'яко, Ю.Ф. Кутаєв, С.В. Свечніков, Л.І. Тимченко, А.А. Яровий – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2003. – 324 с.
4. L.I. Timchenko, Yu.F. Kutaev, V.P. Kozhemyako, A.A. Yarovy, A.A. Gertsy, A.T. Terenchuk, Nafez Shweiki Method for Training of a Parallel-Hierarchical Network, Based on Population Coding for Processing of Extended Laser Paths Images // Proceedings of SPIE, Volume 4790, 2002. – p. 465-479.
5. Basov N.G., Zemskov E.M., Kutaev Y.F. et. al. Laser Control of Near Earth Space and Possibilities for Removal of Space Debris from Orbit with Explosive Photo-Dissociation Lasers with Phase Conjugation // Proc. GCL/HPL 98. SPIE Symposium. - St-Petersburg (Russia). - 1998.
6. Sugimura H., Takashima K. On a fractal approach to actual plant images // Proc. of Int. Conf. Pattern Recognition and Image Processing'99. - Minsk (Belarus). - 1999. – p. 130-133.
7. В.П. Кожем'яко, Л.І. Тимченко, А.А. Яровий Паралельно-ієрархічні мережі як структурно-функціональний базис для побудови спеціалізованих моделей образного комп'ютера.

- Монографія. – Вінниця: Універсум-Вінниця, 2005. – 161 с.
8. V.P. Kozhemyako, L.I. Timchenko, Yu.F. Kutaev, A.A. Gertsy, A.A. Yarovy, N.I. Kokryatskaya, N.P. Grebenyuk, O.A. Poplavskyu Analysis of the methodological approaches in connection with the problem solving of extrapolation of object trajectory // Proceedings of SPIE, Volume 5175, 2003. – p. 222-236.
  9. Ta-Hsin Li, Gibson J.D. Time correlation analysis of a class of nonstationary signals with an application to radar imaging // IEEE Intl. Conf. Acoust., Speech and Signal Proc. (ICASSP97). – Vol 5. – Munich (Germany). – 1997. – P. 3765-3769.
  10. V.P. Kozhemyako, L.I. Tymchenko, Yu.F. Kutaev, A.A. Yarovy Approach for real-time image recognition. // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – 2001 р. – №1. – С. 110-124.
  11. L. Timchenko, Yu. Kutaev, V. Kozhemyako, A. Gertsy, A. Yarovy, N. Kokryatskaya Method for Processing of Extended Laser Paths Images // Advances in Electrical and Computer Engineering – “Stefan cel Mare” University of Suceava, Romania – Volume 3 (10), Number 2 (20), 2003, p. 66-78.
  12. Кожем'яко В.П., Тимченко Л.І., Яровий А.А., Зарезенко Д. Програмні засоби реалізації обробки плямових зображень лазерних пучків у реальному часі – Збірник тез доповідей третьої міжнародної науково-технічної конференції “Фотоніка ОДС–2005”, м. Вінниця, 27-28 квітня 2005 року. – Вінниця: „УНІВЕРСУМ-Вінниця”, 2005. – С. 92-93.

Надійшла до редакції 14.10.2005 р.

**КОЖЕМ'ЯКО В.П.** – академік АІНУ, д.т.н., професор, завідуючий кафедрою лазерної і оптоелектронної техніки, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, Україна.

**ТИМЧЕНКО Л.І.** – д.т.н., професор, завідуючий кафедрою автотетрії і систем передачі інформації, Київський університет економіки і технологій транспорту, Київ, Україна.

**ЯРОВИЙ А.А.** – к.т.н., старший викладач кафедри інтелектуальних систем, науковий співробітник кафедри лазерної і оптоелектронної техніки, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, Україна.