

---

---

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

---

---

УДК 681.3:004.93

В.П. КОЖЕМ'ЯКО, В.І. МАЛІНОВСЬКИЙ, Р.М. НОВИЦЬКИЙ, Р.Ю. ДОВГАЛЮК

## МЕТОДИ І МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ПАРАЛЕЛЬНОГО ПОРІВНЯННЯ ЗОБРАЖЕНЬ ЛОГІКО-ЧАСОВОГО ТИПУ НА ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІЙ ЕЛЕМЕНТНІЙ БАЗІ ДЛЯ ЗАДАЧ РЕАЛЬНОГО ЧАСУ

*Вінницький національний технічний університет,  
21021, Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, Україна  
E-mail: rdovgaliuk@yandex.ua*

**Анотація.** В статті запропоновано та досліджено високоефективний метод та математичну модель паралельного порівняння зображень з використанням оптико-електронної елементної бази на основі KVP-перетворення. Розроблений метод дозволяє проводити порівняння зображень великої розмірності в масштабі реального часу з високою достовірністю. Проведено комп'ютерне моделювання процесу порівняння в середовищах MathCAD та MATLAB, яке показало високу ефективність запропонованого методу та моделі.

**Анотация.** В статье предложено и исследовано высокоэффективный метод и математическую модель параллельного сравнения изображений с использованием оптико-электронной элементной базы на основе KVP-преобразования. Разработанный метод позволяет проводить сравнение изображений большой размерности в масштабе реального времени с высокой достоверностью. Проведено компьютерное моделирование процесса сравнения в средах MathCAD и MATLAB, которое показало высокую эффективность предложенного метода и модели.

**Abstract.** Highly effective method and a mathematical model of the parallel comparison of images using optoelectronic components based on KVP-transformations is proposed and investigated. Developed method allows comparing high dimensional images in real time with high reliability. A computer simulation of comparison process in MathCAD and MATLAB environments showed high efficiency of the proposed method and model.

**Ключові слова:** KVP-перетворення, логіко-часові функції, порівняння зображень.

### ВСТУП

Створення швидкодіючих засобів оброблення і порівняння візуальної інформації стало однією з основних задач обчислювальної техніки та систем технічного зору в 21 ст. Швидкісні оптико-електронні методи і засоби оброблення інформації [1, 4-9] дозволяють використати головні переваги оптоелектроніки – природній паралелізм та «безінерційні» світлові сигнали в якості носіїв інформації, що дозволяють виконувати обчислення з надвисокими швидкодіями в режимі реального часу.

Порівняння зображень широко використовується в різних галузях науки і техніки. У поєднанні з використанням оптико-електронної елементної бази паралельні методи порівняння та ідентифікації зображень дозволяють організовувати високопродуктивні структури оброблення візуальної інформації, що можуть використовуватись у задачах реального часу, де необхідна висока швидкодія порівняння образів у нано- і фемтосекундному діапазоні. Оптико-електронні методи [4-9] дуже вигідно відрізняються від інших методів і систем обробки інформації тим, що вони мають можливість побудови систем з багатоканальним обробленням динамічних зображень в реальному часі. Ці методи доцільно застосовувати з метою попередньої обробки зображень для формування первинних параметрів опису вхідного образу. Позитивні позиції оптичної реалізації обчислювальних компонентів – можливість повністю паралельного оброблення аналогових двовимірних і багатовимірних масивів [1, 2, 6] даних великої розмірності зі швидкістю близькою до швидкості світла, а разом з тим і недоліки оптичної реалізації обчислювачів – складність представлення даних і високі вимоги до надійності архітектури, що ускладнює перепрограмування обчислювача – все це визначає умови адекватності алгоритму способу порівняння зображень оптичними структурами.

## ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ KVP-ПЕРЕТВОРЕННЯ ДЛЯ ПОРІВНЯННЯ ЗОБРАЖЕНЬ

У попередніх дослідженнях було встановлено, що при виконанні операції порівняння обов'язковим і необхідним є попереднє оброблення візуальної інформації, зокрема виконання операції центрування зображень [11]. Останнє значно впливає на використання обчислювальних ресурсів та займає значну частину обчислювального часу на апаратних засобах з послідовною архітектурою. Для усунення цього недоліку, в якості універсальних функцій для подання сигналів доцільно застосовувати функції логіко-часового (ЛЧФ) типу [4-7]. Оскільки інформаційні величини для цих функцій представляються відрізками існування  $T_i$  і виражаються паралельними часовими інтервалами, що скорочує витрати часу виконання операції попереднього оброблення при використанні оптоелектронної елементної бази і представленні інформації тривалістю часових інтервалів імпульсів [4, 6].

Для формування ЛЧФ виконується перетворення на площині в поточний момент часу  $t_i$  величини яскравості або інтенсивності світлового потоку у відповідні тривалості часових інтервалів. Такий підхід до оброблення надзвичайно важливий у пристроях око-процесорного типу, які автоматизують процес оброблення зображень, особливо в динамічних системах. Для створення високоефективного засобу порівняння зображень для систем штучного технічного зору та штучного інтелекту необхідно використовувати симбіоз оптоелектронної бази та логіко-часового представлення і оброблення на базі методу KVP-перетворення. Для цього необхідно чітко спланувати кожний етап оброблення та аналізу інформації, що надходить від об'єкта.

Для виконання ефективного порівняння зображень необхідно створити єдину ЛЧФ системи визначників  $F_L(\omega_i, f_i, p_i)$ , яка б об'єднувала в собі всі властивості всіх визначників. Тоді постає питання про аналітичну залежність єдиної функції зображення від кожного з визначників окремо при їх одночасному взаємовпливі. Для врахування впливу кожного визначника один на одного вводиться нова математична функціональна залежність, яка називається оператором впливу. З його допомогою описується формування функції, яка буде характеризувати конкретну систему визначників. Отже, за наявності функцій системи неявно виражених визначників з'являється необхідність формування кінцевої єдиної ЛЧФ. Така функція у фізичному змісті повинна максимально повно описувати зображення, яке порівнюється, і формувати в графічному вигляді своєрідний аналог «ключа-ідентифікатора». Це досягається за допомогою того, що зміні визначників  $p_j$  під дією оператора впливу діють на різноманітних рівнях суперпозиції, що дозволяє формувати ЛЧФ складної конфігурації. Рівні суперпозиції визначаються за ваговими коефіцієнтами кожного з визначників. Цей процес можна описати за допомогою формули [4, 7, 8]:

$$F_L(\omega_i, f_i, p_i) = \int_m F_i d\omega_i = \int (f_i \vee \Psi_{j=1}^m p_j) d\omega_i, \quad (1)$$

де  $F_i$  – зведена інтегрована ЛЧФ – ключова функція;  $f_i$  – інформація, яка міститься в  $i$ -му визначнику;  $\Psi_{j=1}^m$  – оператор впливу визначників один на одного;  $m$  – кількість функцій, що були отримані;  $p_j$  – змінна, яка характеризує фізичний зміст функції, що містить кількісно-якісну інформацію;  $\omega_j$  – вагові коефіцієнти функцій систем визначників;  $\vee$  – знак операції кон'юнкції;  $\int_m F_i$  – оператор узагальненого інтегрування

кількісного результату паралельних вхідних змінних з визначенням фізичних розмірностей та неявно виражених визначників.

## ВДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ KVP-ПЕРЕТВОРЕННЯ ДЛЯ ПОРІВНЯННЯ ЗОБРАЖЕНЬ У РЕЖИМІ РЕАЛЬНОГО ЧАСУ

За допомогою однієї ЛЧФ (1) неможливо точно описати зображення, зокрема всі його характеристики та властивості. Тому для точного опису зображень необхідно використовувати деякий набір універсальних функцій – масив ЛЧФ, в якому кожний елемент зображення (піксель) буде описуватись власною ЛЧФ, яка буде характеризувати інформацію, що знаходиться в ньому, зокрема рівні яскравості, колір, градації. Такий масив позначимо вектором  $\overline{F}_L(\omega_i, f_i, p_i)_{[M \times N]}$ . Для такого масиву ключових ЛЧФ  $\overline{F}_L(\omega_i, f_i, p_i)_{[M \times N]}$ , які описують вхідне зображення і формуються від нього з інформацією  $f_{ij}$  для кожного елемента масиву та відповідної йому змінної фізичного змісту  $p_{ij}$ , за умов  $i=1..N$ ;  $j=1..M$  та  $i \in n$ ;  $j \in m$ , враховуючи (1) та операцію суми над масивами, справедливою буде запропонована формула:

$$\overline{F}_L(\omega_i, f_{ij}, p_{ij})_{[M \times N]} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (f_{ij} \vee p_{ij} \Psi_{j=1}^n) d\omega_{ij}, \quad (2)$$

Таким чином масив-вектор логіко-часових функцій ключових ідентифікаторів  $\overline{F}_L(\omega_i, f_{ij}, p_{ij})_{[M \times N]}$  (2) достатньо повно описує властивості і характеристики масиву даних зображення і притаманний тільки йому, тобто є єдиним оригінальним просторово-часовим ключем зображення, або його логіко-часовим ключовим ідентифікатором (ЛЧКІ). Інформація  $f_{ij}$  в кожному пікселі зображення, при цьому представляється у вигляді багатозначної функції кольору, градацій та яскравості  $B(x, y)$  у вигляді:

$$f_{ij} = f(K, B(x, y), \Lambda), \quad (3)$$

де  $K$  – показник кольору,  $B(x, y)$  – яскравість;  $\Lambda$  – кількість градацій.

У випадку використання одного параметру для порівняння зображень – розподілу яскравості  $B(x, y)$  у піксельному полі, інформація  $f_{ij}$  в кожному елементі представляється миттєвим значенням яскравості  $f_{ij} = f(B_{ij})$ . А у випадку опису відразу світлового поля зображень поле інформації зображення  $f[M, N]$  відповідає загальному розподілу яскравості, тобто  $f[M, N] = f(B(x, y))$ , що зручно використовувати при паралельних процесах оброблення візуальної інформації.

Для реалізації операції порівняння, за аналогічним правилом формується масив ЛЧ ключових ідентифікаторів другого, еталонного зображення. Після закінчення формування ключової функції ідентифікатора, яка є відображенням конкретного зображення, закінчується етап аналізу інформації. Кінцевий результат порівняння, враховуючи метод KVP-перетворення, отримується при визначенні відповідності зображень за допомогою модульно-кореляційної функції (МКФ) [75, 114], що є своєрідним аналогом кореляційної функції. Масив ЛЧ ключових ідентифікаторів еталонного зображення має вигляд:

$$\overline{F}_E(\omega_i, f_{Eij}, p_{Eij})_{[M \times N]} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (f_{Eij} \vee p_{Eij} \Psi_{j=1, i=1}^{m, n}) d\omega_{ij}, \quad (4)$$

Функція  $\overline{F}_E(\omega_i, f_{Eij}, p_{Eij})_{[M \times N]}$  повною мірою описує еталонне друге зображення, на основі власної інформації елементів цього зображення  $f_{Eij}, p_{Eij}$ .

З формул (1), (3) та (4) виходить, що в процесі вдосконалення методу KVP-перетворення [4-7] має виконуватися саме паралельна обробка і формування універсальних масивів сигналів для порівняння не за одним конкретним визначником, а за деякою кількістю, причому ця кількість визначена не на початку, а в процесі попередньої обробки інформації. Одночасно із процесом відокремлення загальних частин ЛЧФ виконується аналіз характеристик отриманих визначників всього зображення, в результаті якого вони поділяються на якісні та кількісні. Кожен з класів визначників подається на окремий канал оброблення інформації відповідно до якісного типу визначника. У кожному з каналів виконується одночасне кінцеве оброблення.

У каналі якісного оброблення виконується синтезування визначників. В основу генерації також покладений спосіб паралельного додавання [9], у даному випадку виконується багатократне формування загальних частин. Така операція була названа ієрархічним додаванням [7, 9], оскільки операції здійснюються відповідно до побудови ієрархії. Побудова ієрархії базується на умові достатності формування визначників, які здатні повністю описати зображення при кінцевому розпізнаванні. Кожен ієрархічний рівень забезпечує генерацію деякого визначника зображення.

Можна відзначити, що чим більше рівнів містить операція ієрархічного додавання, тим точніше та повніше буде описане зображення. Результуюче правило порівняння та прийняття кінцевого рішення про відповідність, або невідповідність зображень  $\theta(\tau_1)$ ,  $\theta(\tau_2)$  за методом KVP-перетворення передбачає формування модульно-кореляційної функції виду [9]:

$$MKF[\theta(\tau_1), \theta(\tau_2)] = \sum_i \sum_j R_{ij}[\theta(\tau_1) \oplus \theta(\tau_2)], \quad (5)$$

де  $R_{ij}$  – значення операції “додавання за модулем 2”  $ij$ -точок (пікселів) перетинів зображень  $\theta(\tau_1)$  та  $\theta(\tau_2)$ .

Обчислювальна складність при цьому визначається добутком елементів на їх кількість  $(iN_i + 1) \times (jN_j + 1)$  і відповідає розмірності масивів зображень  $\theta(\tau_1)$  та  $\theta(\tau_2)$ . Застосувавши отримані і попередньо сформовані паралельним способом масиви (4) та (5), операція отримання МКФ носитиме також паралельний характер. Таким чином МКФ буде отримуватись безпосередньо, без оброблення сум кожного з елементів зображення (пікселя) за допомогою логічної операції “додавання за модулем 2”, а паралельно над кожним елементом:

$$MKF[\theta(\tau_1), \theta(\tau_2)] = \hat{\uparrow} \overline{R}_{ij}[\overline{F}_L(\omega_i, f_{ij}, p_{ij})_{[M \times N]} \oplus \overline{F}_E(\omega_i, f_{Eij}, p_{Eij})_{[M \times N]}], \quad (6)$$

де  $\bar{R}_{ij}$  – результуюче значення операції “додавання за модулем 2” попередньо паралельно сформованих масивів універсальних логіко-часових ключових ідентифікаторів вхідного  $\bar{F}_L(\omega_i, f_{ij}, p_{ij})_{[M \times N]}$  та еталонного  $\bar{F}_E(\omega_i, f_{Eij}, p_{Eij})_{[M \times N]}$  зображень;  $\uparrow$  – знак паралельного виконання операції над масивами ЛЧКІ.

За умов представлення інформації в елементах зображення у вигляді значень яскравостей, формула (6), враховуючи (3), визначиться за запропонованою формулою:

$$MKF[\theta(\tau_1), \theta(\tau_2)] = \uparrow \bar{R}_{ij} [\bar{F}_L(\omega_i, f(B_L(x, y)), p_{ij})_{[M \times N]} \oplus \bar{F}_E(\omega_i, B_E(x, y), p_{Eij})_{[M \times N]}] \quad (7)$$

де  $f(B_L(x, y))$ ,  $f(B_E(x, y))$  – функції яскравостей вхідного та еталонного зображень, від яких формуються масиви ЛЧФ-ідентифікаторів  $\bar{F}_L(\omega_i, f_{ij}, p_{ij})_{[M \times N]}$  та  $\bar{F}_E(\omega_i, f_{Eij}, p_{Eij})_{[M \times N]}$  цих зображень.

У більш грубому уточненні, коли не враховуються інші параметри ознак зображень: змінна фізичного змісту функції  $p$ , та вагові коефіцієнти систем визначників  $\omega$ , кінцевий результат порівняння за формулою (7) може бути отриманий тільки по значенням яскравостей зображень у вигляді:

$$MKF[\theta(\tau_1), \theta(\tau_2)] = \uparrow \bar{R}_{ij} [\bar{F}_L(B_L(x, y))_{[M \times N]} \oplus \bar{F}_E(B_E(x, y))_{[M \times N]}]. \quad (8)$$

Але в такому випадку, хоча і досягається значне скорочення обчислювальних ресурсів (за рахунок меншої кількості операцій), достовірність порівняння значно зменшується, оскільки не враховуються уточнюючі ознаки.

У випадку використання одного параметру для порівняння зображень – розподілу яскравості  $B(x, y)$  у піксельному полі, інформація  $f_{ij}$  в кожному елементі представляється миттєвим значенням яскравості  $f_{ij} = f(B_{ij})$ . А у випадку опису відразу світлового поля зображень поле інформації зображення  $f[M, N] = f(B(x, y))$ , що зручно використовувати при паралельних процесах обробки візуальної інформації.

Кінцеве рішення (результат) порівняння визначається на базі прийняття рішення по оцінці значення МКФ:

1.  $MKF[\theta(\tau_1), \theta(\tau_2)] = 1$  – вхідне та еталонне зображення повністю співпадають (позитивний результат порівняння);

2.  $MKF[\theta(\tau_1), \theta(\tau_2)] \neq 1$  ( $MKF[\theta(\tau_1), \theta(\tau_2)] < 1$ ) – часткові елементи вхідного та еталонного зображень не співпали. Зображення співпадають лише частково.

Обмеження по значенню МКФ визначаються її областю визначення на проміжку:  
 $0 \leq MKF[\theta(\tau_1), \theta(\tau_2)] \leq 1$ .

Отже, вдосконалений метод KVP-перетворення при порівнянні, складається з таких етапів:

1. Формування та паралельний аналіз вхідного та еталонного зображень за 2-ма каналами: кількісному і якісному;

2. Створення та перетворення масиву сигналів від кожного елемента зображення в масиви (2), (4) логіко-часових функцій на базі відокремлених визначників – масиви вектора логіко-часових функцій ключових ідентифікаторів (ЛЧКІ) та формуванні їх систем для виконання кінцевої відповідності;

3. Формування МКФ на базі паралельного порівняння масивів ЛЧКІ вхідного та еталонного зображень (6)-(8);

4. Прийняття рішення (результат порівняння) на основі аналізу МКФ.

Слід також відмітити, що реалізація та переваги (вищі достовірність та швидкодія) модифікованого методу KVP-перетворення при порівнянні матимуть місце тільки на апаратних засобах оброблення з паралельною архітектурою, що гарантує паралельне виконання операцій визначення масивів ЛЧКІ та МКФ. В іншому випадку, необхідним буде послідовне обчислення сум функцій за формулами (4) та (5) для кожного елемента (пікселя) вхідного та еталонного зображень, і досягнення підвищення ефективності цього методу буде неможливим. Це обґрунтовує необхідність розробки паралельних оптико-електронних засобів, в яких кожний елемент вхідного зображення ставиться і аналізується з відповідним елементом еталонного паралельно в момент часу  $t_i$ .

### СИНТЕЗ НЕЯВНО ВИРАЖЕНИХ ОЗНАК ТА МЕТОД “КЛЮЧА-ІДЕНТИФІКАТОРА” ДЛЯ ФОРМУВАННЯ ПРИКІНЦЕВОГО РЕЗУЛЬТАТУ ПОРІВНЯННЯ

Якість процесу порівняння в більшій мірі залежить від того, наскільки сукупність знайдених ознак відображає найсуттєвішу різницю об’єктів різних класів і схожість об’єктів одного і того ж класу. Але

універсального підходу для виявлення інформативних ознак не існує [1-2, 6, 9], і для кожної задачі порівняння проблему ознак потрібно вирішувати окремо. Ознаки зображення поділяють на кількісні, що безпосередньо вимірюються, та якісні, що позначаються символами.

Для здійснення операції порівняння, конкретна функція матиме свої характеристики, які можуть бути більш вагомими, ніж в іншій логічній функції. Тому виникає необхідність у зважуванні кожної ЛЧФ – визначенні вагових коефіцієнтів. А це передбачає багаторівневість функції [2, 5]. В результаті виділення ознак відбувалась певна інтеграція різноманітних частин кожної функції з подібними частинами інших.

Для цього потрібно ввести новий оператор впливу  $\Phi_{j=1}^m$ , який здатний описати взаємодію всіх функцій в наборі, – оператор впливу функцій одна на одну, що враховує їх зв'язок в класі цих ознак  $\Omega_{iL}$  (клас неявно виражених ознак). Тільки після визначення всіх умов утворення, зокрема (1)-(4) єдиної ЛЧФ, або „ключа-ідентифікатора” зображення ця операція може бути описана як:

$$F_L = \int_m F_i \Theta_{iL} d\omega_i = \int_m (f_i \oplus \Phi_{j=1}^m p_j) \Theta_{iL} d\omega_i, \quad (9)$$

де  $F_L$  – зведена інтегрована ЛЧФ;  $f_i$  – інформація, що міститься в  $i$ -й ЛЧФ (ознаці);  $\Phi_{j=1}^m$  – оператор впливу ознак (ЛЧФ) одна на одну;  $m$  – кількість отриманих ЛЧФ;  $p_j$  – змінна, що характеризує фізичний зміст ЛЧФ, що містить у собі інформацію;  $\omega_i$  – вагові коефіцієнти ЛЧФ системи ознак;  $\Theta_{iL}$  – визначник (аналог ознаки зображення), що належать до класу неявно виражених ознак  $\Omega_{iL}$ ,  $\Theta_{iL} \in \Omega_{iL}$ ;  $\int_m F_i$  – оператор узагальненого інтегрування кількісного результату паралельних вхідних змінних з урахуванням якісних характеристик ознак.

Отримана функція (9) у фізичному змісті дозволяє максимально повно описувати зображення, що порівнюється, формуючи в графічному вигляді універсальну функцію “ключа-ідентифікатора”. Це досягається за допомогою того, що змінні  $p_j$  під дією оператора впливу діють на різноманітних рівнях суперпозиції, що дозволяє формувати ЛЧФ складної конфігурації (рис. 1), а також враховує вплив неявно виражених ознак в межах їх класу  $\Omega_{iL}$ .

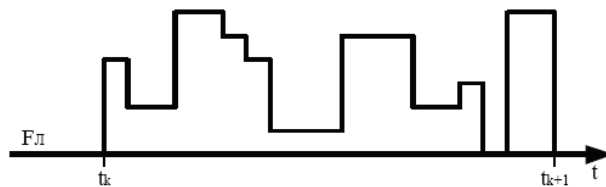


Рис. 1. ЛЧ-функція ключового ідентифікатора для формування прикінцевого результату порівняння

Оптимізація методу паралельного порівняння на базі KVP-перетворення повинна включати обов'язкову операцію центрування зображення з метою виключення похибки неспівпадіння елементів.

Оптимізований метод KVP-перетворення при порівнінні полягає:

1. Формування та паралельний аналіз вхідного та еталонного зображень за 2-ма каналами;
2. Позичювання вхідного і еталонного зображень та визначення центра мас з координатами  $X_C, Y_C$ ;
3. Перетворення масиву сигналів від елементів центра мас  $X_C, Y_C$  в ЛЧФ на базі відокремлених визначників – ЛЧ ключових ідентифікаторів (ЛЧКІ);
4. Формування та обчислення МКФ на основі ЛЧКІ від елементів центра мас  $X_C, Y_C$  вхідного та еталонного зображень за формулою (8)
5. Прийняття рішення порівняння про відповідність центральних координат (результат порівняння) на основі аналізу МКФ (8) від сигналів центра мас  $X_C, Y_C$ : якщо є невідповідність, то здійснюється позиціонування зображення з повторним виконанням стадій 1-5 (до 2-3 разів). Якщо результат порівняння центральних координат позитивний виконуються подальші кроки (6-8).
6. Створення та перетворення масиву сигналів від інших елементів зображення в масиви (2), (4) логіко-часових функції на базі відокремлених визначників – масиви вектора логіко-часових ключових ідентифікаторів (ЛЧКІ) та формуванні їх систем для виконання кінцевої відповідності;
7. Формування МКФ на базі паралельного порівняння масивів ЛЧКІ вхідного та еталонного зображень (6);
8. Прийняття результуючого рішення порівняння на основі аналізу МКФ.

Стадії 1-5 дозволяють здійснити позиціонування вхідного та еталонного зображень для забезпечення чіткої відповідності їх елементів. Це дозволить значно зменшити похибку порівняння і підвищити

достовірність результату. Під час операцій порівняння з координатами центра мас  $X_C$  і  $Y_C$  немає необхідності здійснювати операції для інших елементів масиву, що дозволить значно скоротити обчислювальні ресурси. Вже на основі відповідності координат центрів мас вхідного та еталонного зображень слід проводити операції з іншими елементами масивів.

Операція центрування зображень повинна бути обов'язковим етапом попередньої обробки перед порівнянням зображень на базі методу KVP-перетворення. Основною перевагою такого підходу є зменшення похибок невідповідності при визначенні мір близькості елементів зображень в конфігуруючому просторі. Визначення координат центру мас зображення впливає на загальну ефективність і достовірність методу.

Для збільшення швидкодії операції порівняння отриманих методів на базі KVP-перетворення необхідною умовою є використання нанотехнологічної оптоелектронної елементної бази, яка дозволяє паралельно проводити операції по формуванню масивів ЛЧФ та паралельний аналіз отриманих з ЛЧФ модульно-кореляційних функцій.

### МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ МЕТОДУ ПОРІВНЯННЯ ЗОБРАЖЕНЬ НА БАЗІ KVP-ПЕРЕТВОРЕННЯ ПО ЯСКРАВОСТІ ЕЛЕМЕНТІВ ЗОБРАЖЕННЯ

Найбільш придатною характеристикою зображень, яка дозволяє як кількісно, так і якісно дозволяє їх оцінити є яскравість. Остання найбільш точно описує просторовий розподіл поля інтенсивності на площині зображення та відповідає концепції і архітектурі вхідних каналів порівняння на базі структур „око-процесорного” типу на паралельній оптоелектронній елементній базі. Яскравість також є однією з базових ознак в системах розпізнавання образів, та дозволяє достатньо точно оцінити зображення.

Яскравість зображення максимально описуватиме реальний процес порівняння в моделі на паралельних оптико-електронних системах, оскільки дозволяє найбільш точно описати фізичне перетворення інформаційних параметрів в аналогові рівні електричної напруги і струму в первинному тракці перетворювачів на фотоприймачах. Для такого перетворення може бути використаний перетворювач напруги в часовий інтервал [8, 9], або перетворювач яскравості в тривалість імпульсів [8, 11].

Побудова математичної моделі базується на принципі перетворення значення поточних середніх яскравостей  $Hbriht(f_{ij})$ ,  $Hbriht(fe_{ij})$  вхідного  $F$  та еталонного  $Fe$  зображень, з відповідними елементами  $f_{ij}$ ,  $fe_{ij}$  у відповідні значення тривалостей часових інтервалів  $t_{ij}$ , та  $te_{ij}$ , тобто ( $Hbriht(f_{ij}) \rightarrow t_{ij}$ ; ), ( $Hbriht(fe_{ij}) \rightarrow te_{ij}$ ), що відповідає основному принципу опису логіко-часових функцій (ЛЧФ), інформація в яких описується саме тривалостями часових інтервалів, а не амплітудами як в більшості інформаційних базисів.

При цьому повинно бути враховано, що перетворення елементів зображень з яскравостями  $Hbriht(f_{ij})$  і  $Hbriht(fe_{ij})$ , формується з деякою природною невідповідністю, обумовленою шумами в зображеннях та у первинних перетворювачах елементної бази. Тому цю невідповідність можна описати з деякою вирогідністю за статистичною теорією формування випадкових величин (що робиться для максимальної наближеності математичної моделі реальним системам порівняння на базі методів KVP-перетворення з використанням ЛЧФ апарату). Для опису шумів, що мають місце в оптоелектронній і електронній елементній базі, випадкова величина традиційно описується нормальним законом розподілу.

Процес формування тривалостей часових інтервалів ЛЧФ  $t_{ij}$ , та  $te_{ij}$  та їх масивів, що описують вхідне та еталонне зображення в контексті представлення логіко-часових функцій можна подати рівнянням перетворення:

$$\begin{aligned} t_{ij} &= k_p(x) \times Hbriht(f_{ij}); \\ te_{ij} &= k_p(x) \times Hbriht(fe_{ij}), \end{aligned} \quad (10)$$

де  $k_p(x)$  – коефіцієнт перетворення, що враховує імовірнісну зміну (випадковий процес, що описує шум та похибки перетворення) даних часових інтервалів в кожному з елементів масивів даних вхідного та еталонного зображень і визначається відповідним законом розподілу (у більшості випадків нормальним).

Це відповідає першому етапу попередньої обробки у вдосконаленому методі KVP-перетворення. Описуючи процес перетворення значень яскравостей елементів зображень (яскравості пікселів) і формування їх масивів даних, з урахуванням загального правила утворення ЛЧФ (1), коефіцієнт перетворення визначиться як:

$$k_p(x) = K_A \cdot p(x), \quad (11)$$

де  $K_A$  – коефіцієнт зміни та нормування амплітуди значень елементів;  $p(x)$  – густина розподілу імовірності за відповідним обраним законом, що імітує розкид параметрів тривалостей часових інтервалів у реальних системах.

Використання змінних випадкових величин  $x$  дозволяє максимально точно наблизити математичну модель порівняння зображень до реального процесу компаратції, оскільки передбачає врахування випадкових змін тривалостей апаратними перетворювачами. Процес перетворення яскравості в тривалість імпульсів залежить від температури, параметрів елементів та багатьох інших чинників, що враховує коливання значень

тривалостей коефіцієнтом перетворення  $k_p(x)$ .

Формування ж самих ЛЧФ для вхідного та еталонного зображень по значенням яскравості відповідних елементів зображення, враховуючи математичний опис ЛЧФ (1) та відповідний коефіцієнт перетворення (11) буде утворюватись за правилом:

$$\begin{aligned} LGF(t_{ij}) &= \begin{cases} t_{ij} = k_p(x) \times Hbriht\{f_{ij}\}, & f_{ij} \geq f_{ij\,por}; \\ 0, & f_{ij} < f_{ij\,por}; \end{cases} \\ LGFe(t_{ij}) &= \begin{cases} te_{ij} = k_p(x) \times Hbriht\{fe_{ij}\}, & fe_{ij} \geq f_{ij\,por}; \\ 0, & fe_{ij} < f_{ij\,por}, \end{cases} \end{aligned} \quad (12)$$

де  $f_{ij}$ ,  $fe_{ij}$  – елементи матриці вхідного та еталонного зображень;  $Hbriht\{t_{ij}\}$ ,  $Hbriht\{fe_{ij}\}$  – поточні середні значення яскравостей елементів (пікселів) вхідного та еталонного зображень;  $t_{ij}$ ,  $te_{ij}$  – відповідні (після перетворення) значення тривалостей інтервалів для часових логіко-часових функцій, що відповідають елементам масивів ЛЧФ;  $f_{ij\,por}$  – деяке порогове значення кількості градацій в елементах зображень, необхідне для порівняння з поточними значеннями градацій елементів вхідного  $f_{ij}$ , еталонного  $fe_{ij}$  масивів зображень.

Слід зазначити, що логіко-часові функції  $LGF(t_{ij})$  та  $LGFe(t_{ij})$ , описують кожен елемент вхідного та еталонного зображень по відповідному значенню яскравості та кількості градацій відтінків по кожному елементу. На основі масивів даних зображення формуються відповідні масиви логіко-часових функцій  $\overline{LGF(t_{ij})}$  та  $\overline{LGFe(t_{ij})}$ , поелементно, тобто кожна ЛЧФ описує відповідний тільки їй елемент (піксель) вхідного та еталонного зображень. При цьому всі елементарні ЛЧФ вхідного  $LGF(t_{ij})$  і еталонного  $LGFe(t_{ij})$  зображень входять до складу масивів ЛЧФ, тобто:

$$\begin{aligned} \overline{LGF(t_{ij})} &= \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M LGF(t_{ij}) \quad i = 1..N; j = 1..M; \\ \overline{LGFe(t_{ij})} &= \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M LGFe(t_{ij}) \quad i = 1..N; j = 1..M, \end{aligned} \quad (13)$$

де  $\overline{LGF(t_{ij})}$ ,  $\overline{LGFe(t_{ij})}$  – масиви ЛЧФ вхідного та еталонного зображень;  $LGF(t_{ij})$ ,  $LGFe(t_{ij})$  – елементарні ЛЧФ вхідного та еталонного зображень, що описують їх елементи.

Сам процес порівняння на паралельних оптико-електронних засобах відбувається паралельно за один машинний такт, та передбачає паралельну компарацію елементарних ЛЧФ вхідного та еталонного зображень для масивів  $\overline{LGF(t_{ij})}$ ,  $\overline{LGFe(t_{ij})}$ , до числа яких вони входять. Результатом є модульно-кореляційна функція  $MKF$ , що приймає значення «0» або «1» в ідеальному випадку і свідчить про вірність результату:

$$MKF = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \neg a_{ij} [LGF(f_{ij}) \oplus LGFe(fe_{ij})], \quad (14)$$

де  $a_{ij} [LGF(f_{ij}) \oplus LGFe(fe_{ij})]$  – результат операції „сума за модулем 2” над масивами ЛЧФ вхідного та еталонного зображень;  $\oplus$  – знак операції „сума за модулем 2”;  $\neg$  – знак операції інверсії.

Формула (14) описує весь процес порівняння відповідних елементарних масивів ЛЧФ поелементно. Для паралельної матричної форми, що найбільш відповідає природі паралельних систем порівняння зображень на оптико-електронній елементній базі. З урахуванням (14) та (15), справедливим буде матрична форма запису паралельного процесу порівняння за один машинний такт:

$$MKF = \neg \uparrow a_{ij} [\overline{LGF(f_{ij})} \oplus \overline{LGFe(fe_{ij})}], \quad (15)$$

де  $a_{ij} [\overline{LGF(f_{ij})} \oplus \overline{LGFe(fe_{ij})}]$  – результат операції „сума за модулем 2 над масивами ЛЧФ  $\overline{LGF(t_{ij})}$  і  $\overline{LGFe(t_{ij})}$ ”,  $\oplus$  – знак операції „сума за модулем 2”;  $\neg$  – знак операції інверсії;  $\uparrow$  – знак паралельного

виконання операції над масивами ЛЧФ.

Порівнюючи (14) і (15), можна побачити, що остання формула (15) не включає ітераційну операцію обчислення сум поелементно, що дозволяє досягти пріоритетний вигравш у швидкодії за рахунок паралельності обчислювального процесу на оптико-електронній елементній базі. Враховуючи, що одинична операція суми теоретично на послідовних обчислювальних архітектурах займає в середньому  $\log_2 N$  машинного часу, де  $N$  – кількість тактів, то теоретична оцінка вигравшу по швидкодії складає :

$$T = \log_2(N \times M) / \log_2(1 + \Delta t) \approx \log_2(N \times M) / 1 + \Delta t, \quad (16)$$

де  $\Delta t$  – розширення одного такту (апаратна похибка) паралельного обчислення результату порівняння на оптико-електронній елементній базі, в ідеальному випадку  $\Delta t \rightarrow 0$ , а вигравш наближається до  $\log_2(N \times M)$ ;  $N \times M$  – розмірність масиву зображення.

Звісно, формула (16) є наближеною теоретичною оцінкою вигравшу по швидкодії. В реальних системах вигравш буде дещо меншим завдяки ненульовому розширенню одного машинного такту  $\Delta t$ , що обумовлено часом затримки різних елементів схеми паралельного порівняння та змінним часом латентності цих елементів в різних тактах. Але в середньому, як відомо, вигравш паралельних систем є значним у порівнянні їх з послідовними аналогами.

Як і будь-які системи, засоби порівняння дають певну помилку процесу порівняння  $\xi$ , і тому при оціненні значення модульно-кореляційної функції (МКФ) необхідно враховувати певний допуск, що враховує помилку процесу порівняння. Як показує аналіз відомих методів порівняння, точність процесу грубо може знаходитись в межах 75-85%.

Отже, можна ввести умовний допуск  $R$  на значення МКФ, що дозволить підвищити достовірність прийняття рішення процесу порівняння комп'ютерної моделі в умовах обмеженої точності. Але цей допуск повинен визначатися в межах елементів масиву і по відношенню до них, а не до самого результату МКФ, оскільки МКФ – булева функція і може приймати тільки значення «0» або «1». Тому, очевидно, що похибка процесу порівняння матиме дискретний характер і залежатиме від кількості вірно порівняних елементів зображення та кількості елементів, в яких результат є хибним. Модульно-кореляційна функція  $MKF$  у вірно порівняних елементах (пікселі зображення, які співпали в еталоні і вхідному зображенні) прийматиме значення «1», а там де результат порівняння елементів ЛЧФ є негативним  $MKF$  дорівнюватиме «0». Отже кількісну оцінку похибки процесу порівняння за допомогою цього методу можна визначити як:

$$\xi = \frac{N_v}{N_z} 100\%, \quad (17)$$

де  $N_v$  – кількість елементів зображення, результат порівняння в яких є позитивним ( $MKF=1$ );  $N_z$  – загальна кількість всіх елементів зображення, яка визначається розмірністю  $N_z = N \times M$ .

Аналізуючи (17), можна стверджувати, що значення похибки буде пропорційно залежати від розмірності, через накопичення її за рахунок збільшення кількості елементів. Для визначення закону залежності  $\xi(N_z)$ , буде необхідним проведення комп'ютерного моделювання процесу порівняння, що буде проведено в наступних розділах.

Також із (17) слідує, що ще однією витікаючою характеристикою точності порівняння буде коефіцієнт виникнення помилки порівняння:

$$\eta = \frac{N_p}{N_z}, \quad (18)$$

де  $N_p$  – кількість елементів зображення, результат порівняння в яких є негативним ( $MKF=0$ );  $N_z$  – загальна кількість всіх елементів зображення.

При комп'ютерному моделюванні процесу порівняння необхідно буде враховувати динаміку змін величини  $\eta$ , при збільшенні розмірності зображень.

Очевидно, що помилка процесу порівняння також буде зумовлена й іншими параметрами зображення, такими як кількість градацій, що впливатимуть на результат формування ЛЧФ і к наслідок – на результат обчислення МКФ. Для аналізу обчислювальної швидкодії паралельних структур складають баланси часів виконання операцій, що входять в обчислювальний процес.

Для методу KVP-перетворення для порівняння зображень приведений повний час виконання операцій у вигляді суми складових:

$$T = \sum_{i=1}^n t_i = t_f + t_{лчф} + t_{центр} + t_{МКФ} + t_{кінць}, \quad (19)$$



де  $t_f$  – час формування масивів даних вхідного та еталонного зображень;  $t_{лчф}$  – час формування масивів ключових ідентифікаторів логіко-часових функцій;  $t_{центр}$  – час виконання операції центрування зображень;  $t_{МКФ}$  – час визначення масивів МКФ вхідного та еталонного зображень;  $t_{кінц}$  – час визначення кінцевого рішення на базі МКФ.

Розглянемо складові кожного компонента загального часу порівняння  $T$ , враховуючи узагальнені коефіцієнти розмірності  $k_z$  та градацій  $k_A$  зображень.

Час формування масивів даних вхідного та еталонного зображень розраховується у вигляді добутку кількості тактів  $n_f$  на тривалість одного процесорного такту, тобто:  $t_f = k_A k_z n_f \tau_f$ . Слід нагадати, що операції виконуються паралельно, тому сумарне накопичення кількості елементів масиву і обчислення сум по координатам – не мають місця.

Час формування масивів ключових ідентифікаторів логіко-часових функцій  $t_{лчф}$ , які повною мірою описують зображення визначається як:  $t_{лчф} = n_{лчф} k_A k_z (\tau_{визн} + \tau_{озн} + \tau_{пор} + \tau_{интгр})$ .  $t_{лчф}$  складається з таких складових:  $\tau_{визн}$  – час обчислення визначників;  $\tau_{озн}$  – час визначення неявновиражених ознак;  $\tau_{пор}$  – час порівняння за допомогою операції логічної кон'юнкції;  $\tau_{интгр}$  – час обчислення інтегралу ЛЧФ (формування ЛЧФ);  $n_{лчф}$  – кількість процесорних тактів, необхідних для порівняння.

Час виконання операції центрування зображень  $t_{центр}$ , можна визначити як:  $t_{центр} = k_A \cdot k_z \cdot n_{ц} (\tau_{ХсУс} + \tau_{лчф} ХсУс + \tau_{МКФ} ХсУс + \tau_{кінц} ХсУс)$ , де  $\tau_{ХсУс}$  – час визначення центрів мас зображень;  $\tau_{лчф} ХсУс$  – час обчислення ключових ЛЧФ ідентифікаторів від координат центрів мас зображення;  $\tau_{МКФ} ХсУс$  – час обчислення МКФ від координат центрів мас;  $\tau_{кінц} ХсУс$  – час прийняття рішення про порівняння координат центрів мас.

Час визначення масивів МКФ вхідного та еталонного зображень  $t_{МКФ}$  складається з добутку  $t_{МКФ} = k_A n_{МКФ} \tau_{СМ2}$ , де  $\tau_{СМ2}$  – час паралельного визначення «суми за модулем 2» масивів ЛЧФ вхідного та еталонного зображень;  $n_{МКФ}$  – кількість процесорних тактів на обчислення МКФ.

Час прийняття кінцевого рішення  $t_{кінц}$  визначається добутком кількості процесорних тактів  $n_K$  на тривалість про порівняння рішення  $\tau_{Кінц}$ , тобто  $t_{кінц} = n_K \tau_{Кінц}$ .

Отже, враховуючи складові паралельного процесу порівняння на базі методу KVP-перетворення, підставляючи їх у (19), отримуємо:

$$T = k_A k_z n_f \tau_f + k_A k_z n_{лчф} (\tau_{визн} + \tau_{озн} + \tau_{пор} + \tau_{интгр}) + k_A k_z n_{ц} (\tau_{ХсУс} + \tau_{лчф} ХсУс + \tau_{МКФ} ХсУс + \tau_{кінц} ХсУс) + k_A n_{МКФ} \tau_{СМ2} + n_K \tau_{Кінц} . \quad (20)$$

Враховуючи паралельність операцій, максимальна кількість машинних тактів обчислювальних структур око-процесорного типу для найскладніших операції наближена рівна 4 [7, 8], а коефіцієнти розмірності та градацій зображень рівні 1 ( $k_A = 1$ ;  $k_z = 1$ ) формула повного часу порівняння (20) прийме вигляд:

$$T \approx 4 (\tau_f + \tau_{визн} + \tau_{озн} + \tau_{пор} + \tau_{интгр} + \tau_{ХсУс} + \tau_{лчф} ХсУс + \tau_{МКФ} ХсУс + \tau_{кінц} ХсУс + \tau_{СМ2} + \tau_{Кінц}) . \quad (21)$$

Посилаючись на роботи [2-6, 8-10], в яких було розглянуто граничні можливості і максимальні тривалості тактів оптоелектронної елементної бази і структур око-процесорного типу, можна аналітично визначити повний час порівняння зображень на базі методу KVP-перетворення, враховуючи що оптико-електронні око-процесорні структури мають приблизно однакові тривалості тактів для всіх операції  $\tau_f \approx 8.5 \cdot 10^{-12}$  с (8.5пс) [6, 9]. Отже загальний час тривалості операції порівняння зображень око-процесорною структурою з урахуванням (21) визначиться як:  $T \approx 64 \tau_f = 544 \cdot 10^{-12}$  с (544пс  $\approx 0.5$ нс). Порівнюючи це значення з часом порівняння зображень на базі паралельних високопродуктивних комп'ютерів  $T_{КП} \sim 1.2-1.6$ нс [9-10], отримуємо орієнтований вииграш по швидкодії:

$$\Delta T = T_{КП} / T = 2.22 - 2.95 \text{ разів} .$$

Звісно, вииграш у 2.22 – 2.95 разів є результатом наближеної аналітичної оцінки, оскільки параметри часу виконання операцій враховувались наближено. Але для точного визначення часу виконання операцій оброблення необхідні чіткі параметри складових архітектури засобів оброблення і елементної бази, що може бути зроблено тільки при практичній реалізації засобів порівняння зображень.

Відповідно до грубої оцінки часу повного порівняння зображень, узагальнена середня продуктивність методів KVP-перетворення на базі структур око-процесорного типу з урахуванням (21):

$$F = \frac{1}{T} = \frac{1}{0.544 \cdot 10^{-12}} = 1.84 \cdot 10^{12} \text{ оп.плав.ком./с (1.84 Tflops)} .$$

Основним критерієм забезпечення стабільного значення продуктивності та швидкодії є стає значення навантажувальної спроможності між обчислювальними елементами око-процесорної структури. Якщо прийняти в якості  $n_0$  максимальне число обчислювальних елементів око-процесорної структури, які можуть функціонувати одночасно без зниження номінальної швидкодії роботи.

## МОДЕЛЮВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ПАРАЛЕЛЬНИХ МЕТОДІВ ЗОБРАЖЕНЬ У КОМП'ЮТЕРНИХ СЕРЕДОВИЩАХ MATHCAD ТА MATLAB

Для дослідження методів порівняння зображень на базі KVP-перетворення були побудовані комп'ютерні моделі системи порівняння зображень в середовищах MathCAD PRO 2001 та MATLAB 7.13. Оскільки у методі KVP-перетворення інформація кодується часовим параметром (тривалістю імпульсів), то можна зробити апіорний висновок, що традиційні цифрові системи числення та інформаційні пакети для моделювання сигналів не можуть бути використані для задачі прямого моделювання. Тому необхідним є застосування прийомів імітаційного моделювання, коли реальний фізичний процес замінюється імітаційним з певною, конкретно визначеною долею ймовірності.

В імітаційній моделі такі характеристики зображення, як кількість градацій, колір, яскравість та роздільна здатність можуть бути перетворені у відповідні масиви даних – «псевдочасових тривалостей інтервалів» (ПЧТІ), з певною долею ймовірності випадкового процесу перетворення в часовий інтервал. Псевдочасові тривалості інтервалів (ПЧТІ) – масиви числових даних у цифровому вигляді на ЕОМ, які утворюються за певним правилом імітаційної моделі при моделюванні в комп'ютерному середовищі з певною долею ймовірності випадкового процесу, та замінюють реальний процес утворення часових тривалостей. ПЧТІ є імітаційною моделлю логіко-часових ключових ідентифікаторів (ЛЧКІ) у модифікованому методі KVP-перетворення. Різниця полягає в тому, що у комп'ютерній моделі масиви ПЧТІ замінюють масиви ЛЧКІ все ж таки не по параметру тривалості часового інтервалу, як на реальній оптоелектронній елементній базі, а по параметру чисельних значень, коли тривалість імпульсу часового інтервалу представляється кількісною оцінкою – пропорційним числовим значенням в масиві з певною долею ймовірності виникнення похибки.

При цьому, в імітаційній моделі повинно передбачатись правило формування ПЧТІ, що відповідає з максимальною точністю процесам утворення і перетворення імпульсів на оптоелектронній елементній базі. Так зокрема часові характеристики утворення імпульсів в реальних оптоелектронних системах можуть бути найбільш точно описані нормальним законом розподілу (розподіл Гауса) із густиною розподілу [12]:

$$p(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x - M\xi)^2}{2\sigma^2}\right), \quad (22)$$

де  $M\xi$  – математичне сподівання;  $D\xi = \sigma^2$  – дисперсія.

Формула (22) дозволяє проводити оцінку меж утворення випадкових величин при побудові імітаційної моделі, яким є параметри псевдочасових тривалостей інтервалів (ПЧТІ), що утворюються від значень яскравості елементів зображень у імітаційній моделі KVP-перетворення.

Придатність нормального закону розподілу для оптоелектронних систем зумовлена тим, що він задовільно апроксимує розподіл значень багатьох кількісних показників, спричинених дією множини рівносильних факторів, якими є інформаційні дані в масивах зображень при їх обробці. Тому цей закон можна приймати як ймовірнісну модель процесу утворення масивів даних псевдочасових тривалостей інтервалів із інформаційних параметрів (ознак) зображень, що порівнюються.

Як вже зазначалось, основною і найбільш придатною для порівняння зображень характеристикою є яскравість зображень, оскільки вона найбільш точно описує просторовий розподіл поля інтенсивності на площині зображення. Тому яскравість обирається в якості основного параметру перетворення масиву зображення у масив ПЧТІ, що максимально відповідатиме реальному процесу порівняння на паралельних оптико-електронних системах. Яскравість елемента (пікселя) зображення  $Hbriht(f_{ij})$  дозволяє найбільш точно провести фізичне перетворення інформаційних параметрів в аналогові рівні електричної напруги і струму в первинному тракті перетворювачів на фотоприймачах. Для такого перетворення може бути використаний перетворювач напруги в часовий інтервал [9].

Основною задачею імітаційної частини комп'ютерної моделі є перетворення значення яскравостей  $Hbriht(f_{ij})$ ,  $Hbriht(fe_{ij})$ , що відповідає елементам  $f_{ij}$ ,  $fe_{ij}$  вхідного  $F$  та еталонного  $Fe$  зображень у відповідні значення псевдочасових тривалостей інтервалів  $t'_{ij}$ , та  $te'_{ij}$  ( $Hbriht(f_{ij}) \rightarrow t'_{ij}$ ;  $Hbriht(fe_{ij}) \rightarrow te'_{ij}$ ) за правилом нормального закону розподілу. На основі сформованих числових значень псевдочасових тривалостей інтервалів  $t'_{ij}$ , та  $te'_{ij}$  формуються їх масиви, що описують вхідне та еталонне зображення вже в контексті представлення логіко-часових функцій. Це відповідає першому етапу попередньої обробки у вдосконаленому методі KVP-перетворення.

Процес перетворення значень яскравостей елементів зображень і формування масивів даних ПЧТІ при імітаційному моделюванні може бути описаний як:

$$\begin{aligned} t'_{ij} &= k_p(x) \times Hbriht(f_{ij}); \\ te'_{ij} &= k_p(x) \times Hbriht(fe_{ij}) \end{aligned} \quad (23)$$

де  $k_p(x)$  – коефіцієнт перетворення, що враховує імовірнісну зміну (імітаційна частина моделі) даних часових інтервалів в кожному з елементів масивів даних вхідного та еталонного зображень і найбільш точно описується нормальним розподілом:

$$k_p(x) = K_A \cdot p(x) = \frac{K_A}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(\frac{-(x - M\xi)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (24)$$

де  $K_A$  – коефіцієнт зміни та нормування амплітуди значень елементів;  $p(x)$  – густина розподілу імовірності за нормальним законом, що імітує (симулює) розкид параметрів тривалостей часових інтервалів у реальних системах порівняння на оптоелектронній елементній базі.

Використання змінних випадкових величин  $x$  дозволяє максимально точно наблизити імітаційну модель порівняння зображень до реального процесу компаратції, оскільки передбачає врахування випадкових змін тривалостей апаратними перетворювачами, процес перетворення яскравості в тривалість імпульсів залежить від температури, параметрів елементів та багатьох інших чинників, що враховує коливання значень тривалостей коефіцієнтом перетворення  $k_p(x)$ .

Отже алгоритм комп'ютерної моделі процесу порівняння передбачає такі етапи:

1. На початковому етапі передбачає введення вхідного  $F$  та еталонного  $F_e$  напівтонових зображень  $100i \times 100j$  ( $i$ -коефіцієнт масштабування роздільної здатності) у середовищах MathCAD і MATLAB за допомогою влаштованих функції.

2. Формування масивів псевдочасових тривалостей інтервалів (ПЧТІ) у вигляді простих логіко-часових функцій ЛЧФ (проста ЛЧФ – це функція квантована за рівнем зі значимістю 2 – приймає значення "0" або "1"). Формування відбувається за отриманими цифровими масивами даних вхідному  $F$  та еталонного  $F_e$  зображень із певним допуском в комп'ютерній та математичній (22)-(24) моделях. На цьому етапі необхідне обов'язкове попереднє задання параметрів:  $k_p(x)$ ,  $K_A$ , та  $p(x)$ . Густина розподілу  $p(x)$  визначається за заданими значеннями математичного сподівання, дисперсії та межами змін випадкової змінної  $x$ . Утворення значень ПЧТІ відбувається по принципу: чим вища яскравість елемента матриці зображення – тим більше значення даних в масивах ПЧТІ.

3. Організація самого процесу порівняння сформованих масивів ПЧТІ та прийняття кінцевого рішення за допомогою модульно-кореляційної функції МКФ за формулою (15).

4. Точність порівняння оцінюється похибкою процесу порівняння  $\xi$  (17)-(18), і оцінюється кількістю елементів зображення, для яких значення МКФ = 1. Похибка порівняння  $\xi$  визначається по кількості відповідних елементів масиву які співпали або ні, оскільки МКФ – дискретна булева функція і може приймати тільки значення «0» або «1».

Для середовища MATLAB обчислення МКФ може бути виконана з паралелізмом процесу співставлення масивів ПЧТІ, тобто за одну машинну операцію:  $MKF = \neg \uparrow a_{ij} \left[ \overline{LGF(f'_{ij})} \oplus \overline{LGF_e(fe'_{ij})} \right]$ , де  $a_{ij} \left[ \overline{LGF(f'_{ij})} \oplus \overline{LGF_e(fe'_{ij})} \right]$  – результат операції „сума за модулем 2 над масивами ПЧТІ  $\overline{LGF(f'_{ij})}$  і  $\overline{LGF_e(fe'_{ij})}$ ”,  $\oplus$  – знак операції „сума за модулем 2”;  $\neg$  – знак операції інверсії;  $\uparrow$  – символ паралелізму виконання порівняння.

5. Враховуючи удосконалений метод KVP-перетворення, для підвищення точності результату порівняння моделі (відповідне зменшення похибки  $\xi$ ) необхідним є визначення координат центру мас вхідного та еталонного зображень  $X_C$  і  $Y_C$  [11] по нормам  $\|H_{mn}\|$  їх матриць  $H_{mn}$  [11]. Вже після цього, якщо результат порівняння МКФ для цих координат  $X_C$  і  $Y_C$  є позитивним, то проводиться порівняння для всіх масивів зображень.

Потім здійснюється оцінка виграшу по швидкодії за рахунок паралелізму тривалості паралельної фази порівняння (19)-(21). Наближена оцінка виграшу по швидкодії буде дещо більшою ніж у реальних системах, де  $\Delta t$  є змінною величиною, в залежності від зовнішніх умов і деякої малої залежності від розмірності зображень. Ненульове розширення одиничної фази процесу порівняння  $\Delta t$  обумовлено часом затримки різних елементів схеми паралельного порівняння в різних тактах.

Оцінка виграшу по швидкодії комп'ютерної моделі методу KVP-перетворення для паралельного порівняння зображень здійснюється по тривалості паралельної фази порівняння (17) з урахування відношення ушунення тактів як:

$$T \approx \log_2(N[i,j] \times M[i,j]) T_i / (T_i + \Delta t) \times \log_2(N \times M) = T_i / (T_i + \Delta t), \quad (25)$$

де  $T_i$  – час повного апаратного такту порівняння;  $\Delta t$  – середнє розширення одного такту (апаратна похибка)

паралельного обчислення результату порівняння на оптико-електронній елементній базі, в ідеальному випадку  $\Delta t \rightarrow 0$ , а вигравш наближається до  $\log_2(N \times M)$ ;  $N \times M$  – розмірність масиву.

Не нульове розширення одиничної фази процесу порівняння  $\Delta t$  обумовлено часом затримки різних елементів схеми паралельного порівняння в різних тактах. Час обчислень для методів на базі KVP-перетворення практично не залежить від розмірності зображення, на відміну від традиційних методів алгоритмів. Це пояснюється тим, що процес порівняння відбувається паралельно за один машинний такт, коли всі елементи вхідного та еталонного зображень комплементарно порівнюються з відповідними за одну умовну часовий період  $T$  (часова фаза). При цьому незначна залежність сумарної похибки обчислень  $acc$  обумовлюється адитивним накопиченням шумів (похибок перетворень) у первинних і проміжних ланках утворення мисивів логіко-часових ключових ідентифікаторів по всьому полі зображень. Але величина  $acc$  є не значною, і залежить від якості виконання елементної бази (формується технологічно), і тому не впливає істотно на кінцевий результат.

Враховуючи переваги по паралелізму обчислень методів порівняння зображень на базі KVP-перетворення, вигравш по часовому параметру є пріоритетним у порівнянні з традиційними методами. Графік аналітичної залежності часу обчислень наведено на рис. 2.

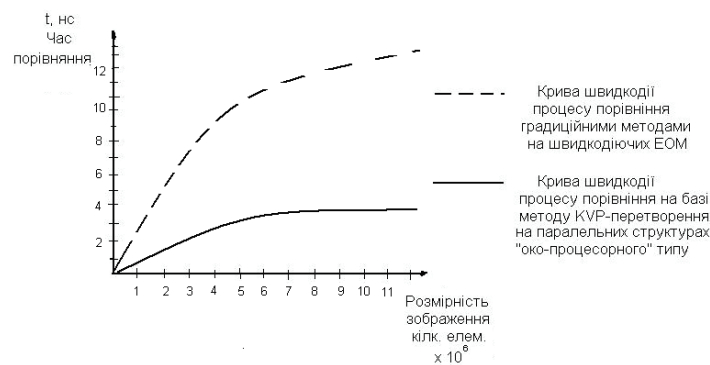


Рис.2. Аналітична залежність часу обчислень: а) для традиційних методів і систем; б) для методів і систем на базі KVP-перетворення

Отримана в результаті моделювання в середовищі MathCAD 2001 PRO аналітична залежність (рис. 2) свідчить про незначну на відміну від традиційних (класичних) методів порівняння залежність часу обчислень повної операції порівняння від розмірності зображень, що обумовлено природним паралелізмом обчислювального процесу на оптикоелектронній елементній базі з логіко-часовим представленням. Повний час операції порівняння зображення розмірністю  $2100 \times 3200 (7 \cdot 10^6)$  елементів масиву) для стандартного зображення високої якості визначений на рівні до 3-4 нс ( $3-4 \cdot 10^{-9}$  с), і включає як час повного апаратного такту порівняння  $T_i$ , так і розширення цього такту  $\Delta t$  (апаратна похибка паралельного обчислення). При цьому тривалість самого розширення такту становить не більше 50% від основного  $T_i$ , тобто основний такт в найкращому випадку складає 0.5-2.5нс.

Час розширення апаратного такту порівняння  $\Delta t$  представляється неоднорідністю спрацювання елементів масивів порівняння апаратної частини, зумовлений неоднорідністю параметрів елементної бази. Деякі елементи з апаратного масиву системи порівняння спрацьовують раніше в часі за основну більшість (час спрацювання основної частини представляє собою повний одиничний такт  $T_i$ ), цей інтервал «випередження» наближено рівний  $+\Delta t/2$ , а інші деякі елементи апаратного масиву – навпаки «відстають» по часу від основної більшості в середньому на  $-\Delta t/2$ . В результаті цього процесу повна реальна тривалість такту з уширенням формується як:  $|\Delta t/2| + T_i + |\Delta t/2|$ , або  $T_i + \Delta t$ , що враховує формула (25) по оцінюванні швидкодії. На рис. 3 показано природу формування неоднорідностей (розширення такту) в часі спрацювання апаратних елементів паралельної оптико-електронної системи порівняння зображень.

Середнє розширення одного такту  $\Delta t$  (апаратна похибка) процесу порівняння може бути зменшене за рахунок підбору оптимальних параметрів оптико-електронної елементної бази та вибору максимально однорідних періодичних структур масивів елементів оброблення. Тривалість  $\Delta t$  суттєво впливає як на загальну швидкість повного процесу порівняння (може складати половину від тривалості одного повного такту  $T_i$ ), так і на рівень шумів, які як було показано вище визначають достовірність результату. Тому з метою досягнення найвищої ефективності паралельних оптикоелектронних засобів параметр  $\Delta t$  повинен бути зведений до мінімуму.

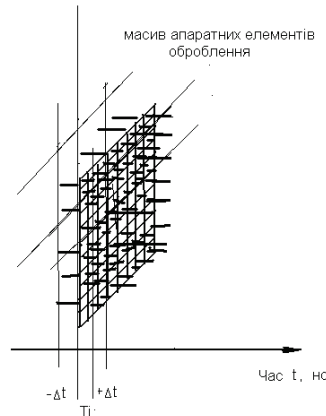


Рис. 3. Процес формування розширення машинного такту  $\Delta t$  паралельного порівняння зображень

На другому етапі моделювання часових параметрів задавались значення тактів і їх уширення на рівні:  $T_i = 0.5 \cdot 10^{-9}$  (0.5нс)с;  $\Delta t = 0.2 \cdot 10^{-9}$  с, зображення задавалось квадратним з розмірністю  $2.1 \cdot 10^3 \times 2.1 \cdot 10^3$  елементів (або квадрат з розмірністю масиву 2100 елементів). Враховуючи формулу (25) були отримані графіки часових характеристик в залежності від розмірності зображення для цих заданих параметрів (рис.4).

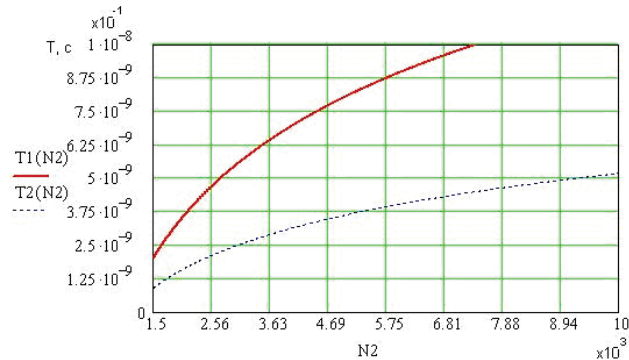


Рис.4. Аналітичні залежності часових параметрів методів порівняння зображень з попередньо визначеними параметрами моделі:  $T_i = 0.5 \cdot 10^{-9}$  с;  $\Delta t = 0.2 \cdot 10^{-9}$  с ;  $N \times M = 2.1 \cdot 10^3 \times 2.1 \cdot 10^3$

Нижня крива на рис. 4 характеризує процес порівняння на базі модифікованого методу KVP-перетворення, а верхня справедлива для традиційного методу компаратора зображень на базі різниць елементів. Як видно з графіку (рис. 4), швидкодія реального процесу порівняння на базі методу KVP-перетворення вища на порядок (на рівні 0.5 нс) порівняно з відомим компаратором зображень ( $0.5-0.75 \cdot 10^{-7}$ с) для одного і того ж зображення з розмірністю  $N \times M = 2.1 \cdot 10^3 \times 2.1 \cdot 10^3$ . До того ж, динаміка залежності швидкодії від розмірності традиційних алгоритмів – компараторів зображень значно вища ніж паралельних методів на базі KVP-перетворення. В традиційних алгоритмах і методах ця динаміка залежності носить квадратичний характер (рис. 4, верхня крива).


Для дослідження можливостей і характеристик модифікованого методу порівняння зображень на базі KVP-перетворення було обрано зображення поверхні земної кулі з космосу (рис. 5) з роздільною здатністю 678x842.



Рис.5. Зображення  $F$  поверхні земної кулі з космосу обране для дослідження процесу порівняння

Зовнішній вигляд реалізованого в MathCAD 2001 PRO програмного модуля порівняння зображень на базі модифікованого методу KVP-перетворення показаний на рис. 6 , рис. 7 та рис. 8.

Traducijnuj algorithn kilkisnj ocinku riznuc' elementiv zobrazhen'

$$F_d := F - F_e \quad F_{dinvers} := F - F_e$$


$MKF_0 := \sum_{i=1}^{99} \sum_{j=1}^{99} F_{d,i,j}$        $MKF_{por} := 1500$   
 $MKF_0 = 0$        $MKF_0 = 0$

funkcija porivnjannja:

$$f_{opmare} := \begin{cases} 1 & \text{if } MKF_0 \geq MKF_{por} \quad \text{zobrazhennja ne spivpadajut,} \\ 0 & \text{if } MKF_0 < MKF_{por} \quad \text{zobrazhennja spivpadajut,} \end{cases}$$

$f_{opmare} = 0$

dopusk po to4nosti 15% - porogova summa  $MKF_{por} = 1500$

Рис.6. Стадія реалізації традиційного алгоритму та визначення різниць зображень

Mathcad Professional - [workR4(1).mcd]

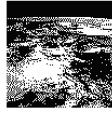
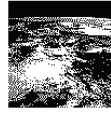
файл Редактирование Вид Вставка Формат Математика Символика Окно Помощь

Normal Arial 10 B I U

Experimental'ne zobrazhennja dlja porivnjannja ("zobrazhennja Zemnoj Kuli")  
 Poperefnja obrobka zobrzhenja !! :  
 ORIGIN := 1 (formyvannja shabloniv-masok intensivnostej vıdnogo i etelonnogo obraziv  
 y vugljinapivtonovux zobrazhenj rozmiristju 100x100 )

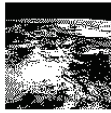
$i := 1..100 \quad j := 1..100$

$F_0 := (\text{READBMP}(\text{"image0"}))$   
 $F := \text{READBMP}(\text{"image0r"}) \quad F_e := \text{READBMP}(\text{"image0r"})$

F Zobrazhennja      Fe Etalon

Massiv jaskravosti zobrazhennja       $F\_Light := \text{READ\_HLS\_LIGHT}(\text{"image0r"})$



F\_Light

Poperedna obrobka !: vukonannja Centruvannja vıdnigi na etelonnogo zobrazhen':

Test patern compare MKF test    R := 0    T := 0

for i=50 Fcentr=F<sub>i+1</sub>; Fe centr=F<sub>e+1</sub>  
 j=50 Fcentr=F<sub>j+1</sub>; Fe centr=F<sub>e+1</sub>       $Acent_{i,j} := -( |F_{i,j} | \oplus |F_{e,j} | )$   
 $DD := -( |F_{50,50} | \oplus |F_{e,50} | ) \quad DD := 1$   
 $MKF_{Acent_{50,50}} := -( F_{50,50} \oplus F_{e,50} )$

Рис.7. Зовнішній вигляд попередньої частини (стадія попередньої обробки) програмного модуля порівняння зображень в середовищі MathCAD 2001 PRO





Програмна реалізація методу KVP-перетворення показала високу достовірність і адаптованість методів до рівня шумів (еталонне зображення було зашумлене як на початковому етапі попередньої обробки так і в процесі накладання шуму за нормальним законом в процесі обробки). Результат MKF(98)=1 свідчить про співпадіння зображень, точніше більшої частини їх елементів із заданим критичним порогом точності по неспівпадінню 5%. Також було програмно прораховано похибку при порівнянні цих зображень за допомогою програми-функції, реалізованої у програмному модулі порівняння зображень. Побудована програма-функція NvirnMKF(m) (рис. 11) дозволяє обраховувати похибку на різних ділянках масиву зображень за допомогою підрахунку співпадіннь/неспівпадіннь одиничних елементів.

$$\begin{aligned}
 \text{NzagMKF}(m) &:= \begin{cases} \text{for } i \in m \\ \text{for } j \in m \\ \text{NzagMKF} \leftarrow \\ \text{NzagMKF} \end{cases} & \text{NvirnMKF}(m) &:= \begin{cases} \text{for } i \in m \\ \text{for } j \in m \\ \text{MKF1}_{i,j} \leftarrow \neg(\text{LGF}(99)_{i,j} \oplus \text{LGF}e(99)_{i,j}) \\ \text{NvirnMKF} \leftarrow \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \text{MKF1}_{i,j} \text{ if } \text{MKF1}_{i,j} \neq 0 \\ \text{NvirnMKF} \end{cases} \\
 \text{NzagMKF}(98) &= 9.604 \times 10^3 & \text{NvirnMKF}(98) &= 1
 \end{aligned}$$

Dostovirnist'(poxubka) porivnjannj metody KVP-peretvorennja:

$$\text{acc} := \frac{\text{NvirnMKF}(98)}{\text{NzagMKF}(98)} \cdot 100 \quad \text{acc} = 0.01 \%$$

Рис. 11. Реалізована програмна функція NvirnMKF(m) для визначення похибки порівняння вхідного  $F$  та еталонного  $F_e$  зображень

Як видно з рис. 11 для даного випадку процесу порівняння зображень кінцева похибка реалізованого програмно методу KVP-перетворення складає 0.01%, що свідчить про достатньо високу точність методу.

В процесі експерименту були проведені дослідження похибки порівняння для 50 зображень, в результаті чого було встановлено, що похибка порівняння модифікованого методу KVP-перетворення включаючи стадії попереднього центрування (попередня обробка) знаходилась в межах  $\text{acc}=0.008$  до 5%, в залежності від рівня зашумленості зображень і меж задання аргументів випадкових величин у функціях Гауса.

Максимальна похибка 5% методу KVP-перетворення свідчить про вищу достовірність результату у порівнінні з традиційними методами, де похибка 10-15%. Аналітичну залежність величини похибки  $\text{acc}$  від представлено на рис. 12.

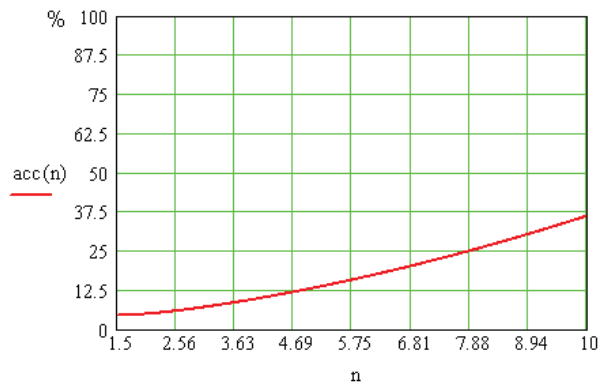


Рис. 12. Нелінійна залежність похибки  $\text{acc}$  [%] від рівня шумів  $n$  [дБ]

З графіку (рис. 12) спостерігається нелінійна залежність похибки  $\text{acc}$  від рівня шумів  $n$  (за розподілом Гауса), що вводяться в моделі і також наявні в реальних системах паралельного порівняння в трактах первинних перетворювачів яскравості в тривалості часових інтервалів. На рівні з допустимою точністю 15% для систем порівняння, критичний рівень шумів в первинних трактах яскравості зображень визначений приблизно на рівні  $n=5.75$  дБ. Далі слідує неминуче зростання похибки  $\text{acc}$  із розтом шуму  $n$ . Тому експеримент та моделювання методу порівняння зображень на базі KVP-перетворення показав, що в реальних системах необхідно утримувати шуми на рівні 0.01 – 5.75дБ в трактах первинних перетворювачів на фотоприймачах (ПЗЗ-лінійках, або лавинних матриць р-і-п -фотодіодів) для забезпечення достатньо високої точності порівняння. Також критичним і необхідним є прецизійне виконання схем утворення і формування масивів ЛЧФ для зменшення цих шумів на попередній стадії обробки.

Для перевірки ефективності алгоритму порівняння растрових зображень на базі модифікованого KVP-перетворення було створено функцію для середовища MATLAB, яка забезпечує наочне представлення результатів у вигляді графіків. Для створення масивів простих логіко-часових функцій ЛЧФ зображень,



проводилась попередня обробка даних зображень. Оскільки при побудові масивів ЛЧФ необхідна інформація про яскравість кожного пікселя зображення, необхідно перетворити вхідні кольорові компоненти зображень в градації сірого. У функції перевірки алгоритму даний етап реалізується за допомогою функції *rgb2gray* наступною послідовністю команд:

```
firstImageGray = rgb2gray(firstImage);
secondImageGray = rgb2gray(secondImage);
```

Для врахування даної особливості значення пікселів кожного з вхідних зображень попередньо спотворювались гаусівським шумом за допомогою влаштованої в MATLAB функції *imnoise* з параметрами: тип – *gaussian*, математичне очікування – 0, та змінною дисперсією *disp*, для перевірки ефективності алгоритму при різних ступенях спотворення зображень шумами у вигляді функцій:

```
firstImageGrayNoised = imnoise(firstImageGray, 'gaussian', 0, disp);
secondImageGrayNoised = imnoise(secondImageGray, 'gaussian', 0, disp);
```

Створення масивів ЛЧФ функцій для порівнюваних зображень виконується за допомогою процесу бінаризації даних зображень та задається наступною формулою:

$$LGF(t_{ij}) = \begin{cases} 1, & f_{ij} \geq binLvl; \\ 0, & f_{ij} < binLvl, \end{cases} \quad (26)$$

де  $f_{ij}$  – значення пікселів вхідного та еталонних зображень.

Отриманий масив ЛЧФ функцій має таку ж розмірність як й вхідне зображення та приймає значення 1 для тих елементів зображення, яскравість яких вища або дорівнює порогу бінаризації *binLvl*, та 0 – для елементів, які менші порогу. Це здійснюється за допомогою наступної команди в MATLAB:

```
firstImageLGF = (firstImageGrayNoised >= binarisationLevel);
```

де *firstImageGrayNoised* зображення в градаціях сірого після накладання шумів, а *binarisationLevel* – поріг бінаризації. На рис. 13 наведено демонстраційне зображення та створений на основі нього масив ЛЧФ функцій при значенні порогу бінаризації рівному 60.

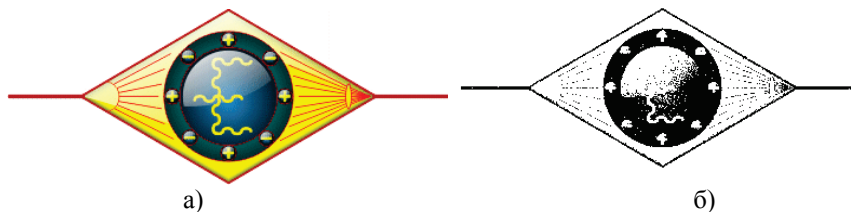


Рис. 13. Демонстраційне зображення а) та його масив простих ЛЧФ функцій у вигляді зображення б)

Порівняння масивів сформованих ЛЧФ проводилось на базі модульно-кореляційної функції (15).

Результатом застосування МКФ буде кількість однакових елементів ЛЧФ обох зображень. Реалізацію модульно-кореляційної функції можливо здійснити в MATLAB за допомогою цикла *for* та змінної *matchedPixels*, в якій зберігається кількість однакових елементів масивів ЛЧФ функцій зображень:

```
for i = 1:r*c
    if secondImageLGF(i) == firstImageLGF(i),
        matchedPixels = matchedPixels + 1;
    end
end ,
```

де *r* – висота зображень; *c* – ширина; *secondImageLGF* та *firstImageLGF* – масиви ЛЧФ функцій зображень.

Маючи даний результат можливо провести розрахунок відсотку подібності двох зображень (визначення похибки) як:  $R = \frac{Matched}{Total} * 100\%$ , де *Matched* – кількість однакових елементів обох зображень;

*Total* – загальна кількість елементів еталонного зображення.

Для застосування функції в середовищі Matlab необхідно попередньо завантажити в середовище порівнювані зображення за допомогою функції *imread*. Послідовність команд, яку необхідно ввести для застосування функції моделювання алгоритму порівняння растрових зображень на базі модифікованого KVP перетворення для вищенаведених зображень, порогу бінаризації 120 та дисперсії шуму 0.01 має наступний вигляд:

```
>> firstImage = imread('logoFull.bmp');
>> secondImage = imread('logoPart.bmp');
>> LGF(firstImage, secondImage, 120, 0.01)
```

При введенні послідовності вищенаведених команд середовище Matlab створить змінну `ans` та присвоїть їй значення відсотку співпадіння обох зображень. Застосування середовища Matlab для перевірки ефективності алгоритму дає можливість провести комплексне дослідження ефективності алгоритму залежно від дисперсії шуму, порогу бінаризації та розміру зображень.

Для визначення залежності відсотку співпадіння зображень від їх розміру вищенаведений алгоритм послідовно застосовувався до серії однакових зображень розміром від 100 x 100 пікселів до 2000 x 2000 з кроком розміру в 100 пікселів. Оскільки ефективність алгоритму не залежить від значень пікселів зображення, графічні файли для даного дослідження автоматично генерувались наступним чином:

```
firstGeneratedImage = randi([0, 255], newSize, newSize, 'uint8');
secondGeneratedImage = firstGeneratedImage;
```

де `newSize` – розмір нового зображення.

Для даного дослідження значення дисперсії шуму зазначалось рівним 0.01, а поріг бінаризації – 60. На рис. 14 наведені графіки, отримані після чотирьох серій дослідів.

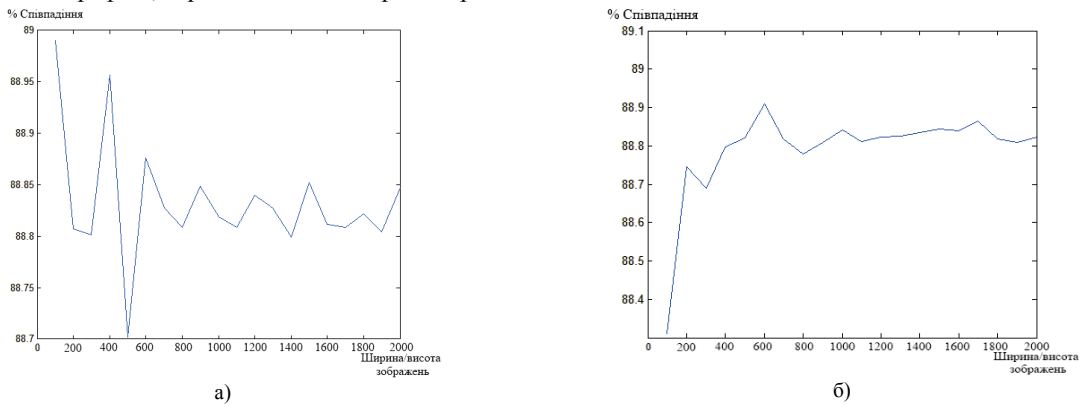


Рис. 14. Графіки залежності відсотку співпадіння зображень залежно від їх розміру

Наведені графіки наочно показують відсутність залежності відсотку співпадіння зображень залежно від їх розміру. Всі відмінності між однаковими зображеннями створюються лише шумами, тому наступним етапом дослідження ефективності алгоритму є аналіз залежності відсотку співпадіння зображень від дисперсії шумів. Для цього однакові зображення розмірами 2000 x 2000 пікселів, одне з яких зображено на рис. 15 а), послідовно порівнювалися при дисперсії шумів від 0.01 до 1.01 з кроком 0.05 та порогові бінаризації 60. Отриманий графік залежності відсотку співпадіння зображень від рівня шумів наведений на рис. 15 б).

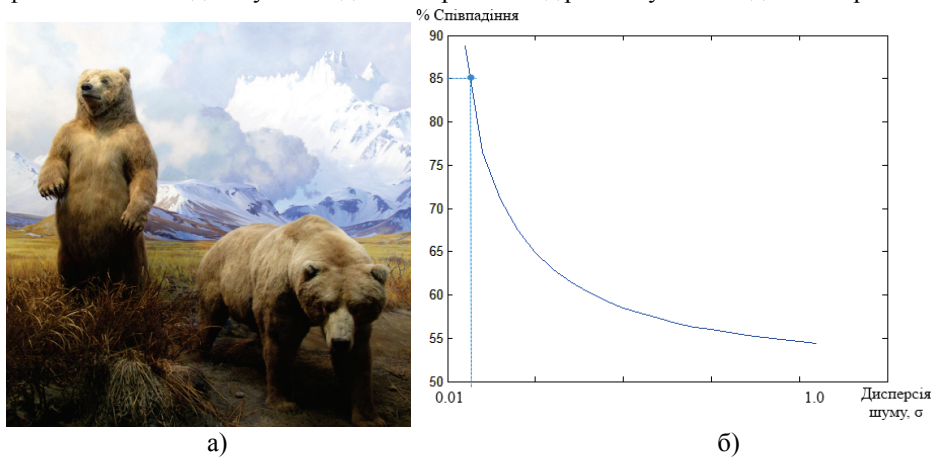


Рис. 15. Експериментальне зображення для визначення залежності відсотку співпадіння елементів від дисперсії шуму: а) вхідне зображення; використане, а) результуючий графік залежності

Наведений вище графік (рис. 15, б) дозволяє стверджувати про експоненційну залежність відсотку співпадіння зображень залежно від дисперсії шуму. Для дисперсії 0.01 однакові зображення співпадають на 89%, а при 1.0 – на 55%, тому при побудові систем на базі модифікованого методу KVP-перетворення важливо максимально зменшити рівень шумів на етапі отримання вхідних зображень. Якщо припустити, що у реальних систем дисперсія шуму буде складати 0.05, можна очікувати результату порівняння однакових зображень в 85%.

Застосування пакету MATLAB 7 та створення функції для перевірки алгоритму порівняння зображень на базі модифікованого KVP-перетворення дозволило також оцінити його швидкість на звичайних комп'ютерних системах за допомогою вбудованих в Matlab функції `tic/toc`. Для системи на базі центрального

процесора Intel Core 2 Duo E6700 з двома ядрами, що працюють на частоті 2.66 ГГц, створення масивів ЛЧФ функцій та порівняння двох зображень розміром 2000 \* 2000 пікселів тривало 38.3 мс. Використовуючи функцію `gpuArray` можливо перевірити швидкість алгоритму на відеокартах з підтримкою технології CUDA, оскільки найближчим комп'ютерним аналогом оптико-електронних паралельних систем є саме відеокарти. Проте використання відеокарт для паралельних обчислень в MATLAB на даний час має ряд обмежень. Оскільки оператор `>=` в поточній версії MATLAB (7.13 - R2011b) для відеокарт не підтримує масиви типу `uint8`, а заміна даної операції еквівалентною з використанням циклу `for` неможлива через відсутність можливості індексувати масиви, що зберігаються в пам'яті відеокарти, формат зображень попередньо розширювався до формату `uint32`, а стадія накладання шуму була опущена через відсутність підтримки командою `imnoise` масивів типу `uint32`. Експериментальні дані дослідження швидкості алгоритму наведено в табл. 1 та табл. 2.

Таблиця 1.

**Час порівняння зображень при використанні центральних процесорів**

CPU						
Назва моделі	Кількість ядер	Тактова частота роботи, GHz	Час порівняння зображень T, мс	Час створення масивів ЛЧФ функцій	Час порівняння одного пікселя, $t = \frac{T}{n}$ , n – к-сть пікселів; мкс	Частота роботи оперативної пам'яті, MHz
Intel Core 2 Duo E6700	2	2.66	16.3	22.3	4.07	800
Intel Core i5 2410M	2	2.30	12.6	15.7	3.15	1333

Таблиця 2.

**Час порівняння зображень при використанні графічних процесорів**

GPU						
Назва моделі	Кількість потокових процесорів	Частота роботи ядра, MHz	Час порівняння зображень, мс	Час створення масивів ЛЧФ функцій	Час порівняння одного пікселя, $t = \frac{T}{n}$ , n – к-сть пікселів; мкс	Частота роботи графічної пам'яті, MHz
nVidia GeForce GTX460	336	715	5.44	6.9	1.36	1800
nVidia GeForce GT540M	96	672	6.5	6.6	1.62	900

Для точної оцінки виграшу по швидкодії і точності процесу порівняння на базі модифікованого методу KVP-перетворення, в ідеальному випадку необхідна реалізація апаратного дослідного макету або експериментального зразка паралельного оптоелектронного пристрою для порівняння образів. Це б дало змогу повною мірою оцінити реальний виграш, на відміну від моделювання паралельних алгоритмів на послідовних обчислювальних платформах персональних ЕОМ. В ідеальному випадку в апаратній моделі оптоелектронного пристрою порівняння зображень повинен бути також реалізований запропонований алгоритм компаратії з утворенням реальних логіко-ключових ідентифікаторів зображень, а не їх імітаційних аналогів – псевдо-часових тривалостей інтервалів, що дозволить оцінити переваги реального виграшу по швидкодії за рахунок глибшого паралелізму процесу порівняння.

**ВИСНОВКИ**

В роботі модифіковано метод KVP-перетворення, як основний для паралельного порівняння зображень, що дозволило проводити порівняння з більшою достовірністю і швидкодією в режимі реального часу завдяки паралелізму операцій порівняння і визначення модульно-кореляційної функції від масиву ЛЧФ. Це дозволяє найбільш повно описувати зображення, а також дозволяє збільшити точність процесу порівняння. Запропоновано використання в якості характеристик зображення – масив логіко-часових ключових ідентифікаторів, які дозволяють виконувати порівняння на базі паралельних структур око-процесорного типу із високою швидкодією.

Також в статті розвинуто математичну модель багаторівневої логіко-часової функції, яка на відміну

від відомих враховує логіко-часові ключ функції з найбільшим ваговими коефіцієнтами та розширений динамічний оператор впливу визначників, що дозволяє більш гнучко і динамічно змінювати інформацію в результаті порівняння, а також використовувати її для формування інформації від зображень в елементах масиву ЛЧФ для модифікованого методу KVP-перетворення для паралельного порівняння.

Запропоновано метод логіко-часового “ключа-ідентифікатора” для паралельного порівняння зображень, який дозволяє формувати масиви оригінальних ключ-функцій, які описують зображення тільки одним єдиним варіантом, та можуть використовуватись для формування прикінцевого результату порівняння з підвищеною швидкістю та достовірністю кінцевого рішення, що забезпечується шляхом універсального синтезу неявновиражених ознак зображення.

Проведено комп’ютерне моделювання паралельних методів порівняння в середовищах MathCAD та MATLAB, що дозволило оцінити ефективність паралельного методу порівняння зображень на базі KVP-перетворення. Дослідження показало переваги методу перед традиційними алгоритмами, зокрема вищу швидкість (час порівняння менше у 2.22 – 2.95 раз) та вищу достовірність (похибка на рівні 0.08-5%) прийняття кінцевого рішення.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Vito Di Gesù, Valery Starovoitov. Distance-based functions for image comparison // Pattern Recognition Letters. – Vol. 20. – Issue 2. – February 1999. – PP. 207-214.
2. Ким Н.В. Обработка и анализ изображений в системах технического зрения : [Монография] / Н.В. Ким. – М.: МАИ, 2009 г. –324 с.
3. Гребнев А.К. Оптоэлектронные элементы и устройства : [Текст] / А. К. Гребнев, Гридин В.Н., Дмитриев В.П. ; [Под ред. Ю.В. Гуляева ].– М.: Радио и связь, 1998. – 336 с. – ISBN 5-256-01385-8. – ISBN: 978-5-256-01385-1.
4. Кожемяко В.П. Квазиимпульсно-потенциальные оптоэлектронные элементы и устройства логико-временного типа / С.В. Свечников, В.П. Кожемяко, Л.И. Тимченко. – Киев: Наукова Думка, 1987. – 256 с.
5. Кожемяко В. П. Оптоэлектронные параллельные вычислительные устройства / В. П. Кожемяко, О. Г. Натрошвили, Л. И. Тимченко, Г. Л. Лисенко – Тбилиси: Изд-во Тбилисского университета, 1985. – 248 с.
6. Кожемяко В.П. Оптоэлектронные логико-временные информационно-вычислительные среды / В.П. Кожемяко и др. – Тбилиси: Ганатлеба, 1984. – 357 с.
7. Волонтир Л.О. Методи та системи відтворення зображень на базі логіко-часових перетворень : автореф. дис. канд. техн. наук : 05.13.05 –Комп’ютерні системи і компоненти. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2010. – 16с.
8. Оптоэлектронные параллельные вычислительные устройства / В.П. Кожемяко, О.Г. Натрошвили, Л.И. Тимченко и др. – Тбилиси: Из-во Тбилисского университета, 1985. – 248 с.
9. Квантові перетворювачі на оптоелектронних логіко-часових середовищах для око-процесорної обробки зображень: [Монографія] / В.П. Кожемяко, Т.Б. Мартинюк, О.І. Суприган, Д.І. Клімкіна. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2007. – 126 с. – ISBN 978-966-641-219-8 .
10. Xin Shu, Xiao-Jun Wu . A novel contour descriptor for 2D shape matching and its application to image retrieval // Image and Vision Computing. – Vol. 29. – Issue 4. – March 2011. – pp. 286-294.
11. Архітектура геоінформаційно-енергетичної системи управління потоками транспорту з використанням розпізнавання образів за ознаками / В.П. Кожемяко, Р.М. Новицький, В.І. Малиновський // Штучний інтелект. – 2011. – №1. –С.56-63.
12. Севастьянов Б.А. Курс теории вероятностей и математической статистики: [Текст/ ] / Б.А. Севастьянов. – М.: Наука, 1982. –256 с.

Надійшла до редакції 14.10.2011р

**КОЖЕМ’ЯКО ВОЛОДИМИР ПРОКОПОВИЧ.** – засл. діяч науки і техніки України, академік АІНУ, д.т.н., проф., завідувач кафедри лазерної та оптоелектронної техніки, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, Україна.

**МАЛІНОВСЬКИЙ ВАДИМ ІГОРЕВИЧ** – к.т.н., н.с., асистент кафедри лазерної та оптоелектронної техніки, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, Україна.

**НОВИЦЬКИЙ РУСЛАН МИХАЙЛОВИЧ** – пошукач кафедри лазерної та оптоелектронної техніки, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, Україна.

**ДОВГАЛЮК РОСТИСЛАВ ЮРІЙОВИЧ** – студент кафедри лазерної та оптоелектронної техніки, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, Україна.