

## Лекція 5-6

### Застосування методів кодування і стиснення двовимірних сигналів до часових послідовностей відеозображень

1. Методи стиснення відеозображень та JPEG-алгоритм стиснення відеозображень.
2. Аналіз впливу стиснення відеозображень на вимірювальну інформацію про механічні величини.
3. Похибки методу JPEG стиснення кадрів у часовій послідовності відеозображень.

#### 1. Методи стиснення відеозображень та JPEG-алгоритм стиснення відеозображень.

Розглянемо методи стиснення відеозображень з точки зору можливості виникнення похибок визначення геометричних параметрів та параметрів руху об'єктів, що обумовлені наведеними вище трьома видами похибок цифрових обчислювальних пристроїв, що виконують стиснення часових послідовностей відеозображень. Розгляд похибок будемо вести на прикладі найпоширенішого методу стиснення та формату графічних файлі JPEG, що може застосовуватися як до стиснення окремих відеозображень, так і до кадрів у складі часових послідовностей відеозображень [68, 100, 104, 146, 149].

Цьому методу відповідає JPEG-алгоритм стиснення відеозображень, який представлено на рис. 3.1.

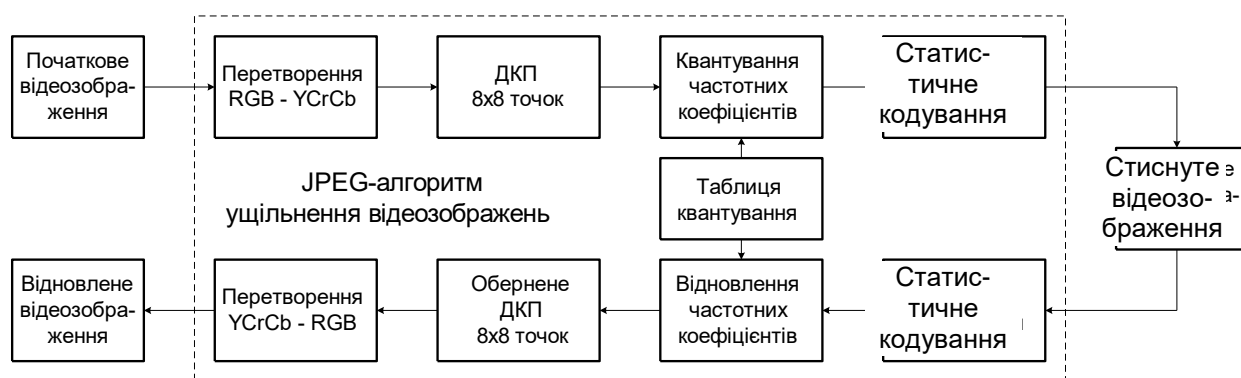


Рис. 3.1. Схема JPEG-алгоритму стиснення відеозображень

Стиснення цифрових відеозображень за JPEG-алгоритмом включає чотири етапи [104, 107, 144 - 146].

Перший етап – перетворення початкового відеозображення з метою розподілу інформації про яскравість і колір точок відеозображення, субдискретизація інформації про колір. Розподіл інформації про яскравість і

колір точок зображення виконується шляхом перетворення кольорової схеми  $RGB$  в схему  $YCrCb$  [100, 103, 146]:

$$\begin{cases} Y &= 0,299R + 0,587G + 0,114B, \\ Cb &= -0,169R - 0,331G + 0,500B + 128, \\ Cr &= 0,500R - 0,419G - 0,081B + 128, \end{cases}$$

де  $R$ ,  $G$ ,  $B$  – червона, зелена і синя складові частини інформації про колір дискретної точки відеозображення,

$Cr$ ,  $Cb$  – інформація про колір точки, відокремлена від інформації про яскравість (кольорорізницева інформація),

$Y$  – інформація про яскравість цієї точки.

Зворотне перетворення виконується відповідно до формул:

$$\begin{cases} R &= Y + 1,402(Cr - 128), \\ G &= Y - 0,344(Cb - 128) - 0,714(Cr - 128), \\ B &= Y + 1,772(Cb - 128). \end{cases}$$

Субдискретизація інформації про колір полягає в збереженні тільки кожного другого або четвертого дискретного значення  $Cb$  і  $Cr$ .

У випадку застосування JPEG-алгоритму для розв'язання задач, пов'язаних із геометричними вимірюваннями на відеозображеннях, слід відзначити:

1. Існує обернена операція для відновлення цифрових даних.
2. В багатьох пристроях цифрові дані початкового відеозображення вже розділені на дані про яскравість і колір. Наприклад, у більшості відеокамер ці дані формуються окремо, їх перетворення в цифрову форму при введенні в комп'ютер також виконується окремо [108, 134, 147, 148].
3. Для геометричних вимірювань використовуються, як правило, напівтонові зображення, отримані шляхом перетворення кольорових відеозображень.

В результаті можна вважати, що перший етап JPEG-алгоритму не приводить до виникнення похибок геометричних вимірювань, крім похибки виконання обчислень.

Другий етап JPEG-алгоритму – розподіл відеозображення на блоки (матриці) розміром  $K \times K$  дискретних точок (зазвичай,  $K = 8$ ) і виконання дискретного косинусного перетворення (ДКП) для кожного блоку. Із матриці розміром  $K \times K$ , що містить інформацію про яскравість дискретних точок відеозображення  $f(n, m)$ , утворюється матриця розміром  $K \times K$ , що містить частотні коефіцієнти ДКП  $F(u, v)$ , тобто спектр відеозображення. В результаті інформація про яскравість і колір (кожна окремо) переводиться в частотну область.

Обчислення частотних коефіцієнтів (пряме ДКП) виконується за формулою [67, 144, 149]:

$$F(u, v) = \frac{1}{\sqrt{2K}} \cdot C(u) \cdot C(v) \sum_{n=0}^{K-1} \sum_{m=0}^{K-1} f(n, m) \cdot \cos \frac{(2n+1)u\pi}{2K} \cdot \cos \frac{(2m+1)v\pi}{2K},$$

де  $u = 0, 1, \dots, K-1$ ,  $v = 0, 1, \dots, K-1$ ,  
 $n = 0, 1, \dots, K-1$ ,  $m = 0, 1, \dots, K-1$ ,

$C(u)$ ,  $C(v)$  – постійні коефіцієнти,

$$C(u) = \begin{cases} 1/\sqrt{2}, & u = 0, \\ 1, & u > 0, \end{cases} \quad C(v) = \begin{cases} 1/\sqrt{2}, & v = 0, \\ 1, & v > 0. \end{cases}$$

Відновлення інформації про яскравість точок (обернене ДКП) виконується за формулою:

$$f(n, m) = \frac{1}{\sqrt{2K}} \cdot \sum_{u=0}^{K-1} \sum_{v=0}^{K-1} C(u) \cdot C(v) \cdot F(u, v) \cdot \cos \frac{(2n+1)u\pi}{2K} \cdot \cos \frac{(2m+1)v\pi}{2K}.$$

Наведені формули фактично є визначенням прямого і оберненого ДКП, але їх застосування при обробці відеозображень не вигідно, так як потрібна велика кількість обчислювальних операцій. Існує швидкий алгоритм обчислення прямого і оберненого ДКП, який реалізується через стандартні операції множення матриць [160]:

$$F = C_1 \cdot Y \cdot C_1^T,$$

$$Y = C_1^T \cdot F \cdot C_1,$$

де  $C_1$  – матриця постійних коефіцієнтів ДКП,

$$C_1(u, v) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{K}}, & v = 0, \\ \sqrt{\frac{2}{K}} \cdot \cos \frac{(2u+1)v\pi}{2K}, & v > 0, \end{cases}$$

$C_1^T$  – транспонована матриця  $C_1$ .

Так як ДКП має обернене перетворення (обернене ДКП), то другий етап JPEG-алгоритму не приводить до втрат відеоінформації і виникнення похибок, крім похибок виконання обчислень.

Третій етап JPEG-алгоритму – квантування частотних коефіцієнтів, отриманих в результаті ДКП:

$$F_q(u, v) = \text{int} \left\{ \frac{F(u, v)}{Q(u, v)} + 0,5 \right\},$$

де  $\text{int}\{\cdot\}$  – операція виділення цілої частини числа,

$Q(u, v)$  – вагові коефіцієнти в таблиці квантування частотних коефіцієнтів.

Відновлення частотних коефіцієнтів при відновленні відеозображень виконується за формулою:

$$F'(u, v) = F_q(u, v) \cdot Q(u, v).$$

В процесі квантування верхні частоти можуть бути вилучені із спектра цифрового відеозображення. Це залежить від співвідношення значень елементів таблиці квантування і значень частотних коефіцієнтів. Вилучення верхніх частот приводить до викривлення форми перепадів яскравості, що відповідають контурам ОБ на відеозображеннях. В результаті виникає ще одна складова частина похибки визначення координат точок контурів об'єктів на цифровому відеозображенні. Інші частотні коефіцієнти, що залишаються в спектрі, в результаті квантування можуть дещо змінитися і це теж є джерело похибок визначення координат точок.

Четвертий етап JPEG-алгоритму – кодування частотних коефіцієнтів після квантування за методом Хаффмена або арифметичне кодування для вилучення інформаційної надлишковості. Ці методи кодування не приводять до втрат інформації і виникнення похибок.

Для відновлення стиснутого відеозображення всі вказані етапи виконуються в зворотному порядку.

Початкове відеозображення, що надходить в JPEG-алгоритм для стиснення, має певний рівень шумів та інших похибок, що виникли в процесі формування цього відеозображення. Ці похибки перетворюються в трансформовану похибку на виході JPEG-алгоритму.

JPEG-алгоритм містить багато обчислювальних операцій над цифровими даними [104, 107, 146]. Обмеження розрядності цифрових даних приводить до виникнення похибки виконання обчислень.

Значення похибки виконання обчислень залежить від варіанту обчислень ДКП, який реалізовано в засобах стиснення відеозображень, і від розрядності цифрових даних в цих засобах. Безпосереднє визначення цієї похибки є досить складним через велику кількість обчислювальних операцій в JPEG-алгоритмі. Крім того, для стандартних технічних засобів потрібна початкова інформація не завжди доступна. Більш доцільним слід вважати підхід, при якому похибка виконання обчислень може бути оцінена за результатами експериментальних досліджень стиснення деяких тестових відеозображень.

Для розв'язання задачі визначення впливу стиснення за JPEG-алгоритмом на точність геометричних вимірювань необхідно розробити математичні моделі трансформованої похибки і похибки, пов'язаної з квантуванням і вилученням частотних коефіцієнтів в спектрі відеозображення. Це дозволить:

- оцінити точність геометричних вимірювань на цифровому відеозображенні в залежності від параметрів JPEG-алгоритму;
- визначити максимально можливу степінь стиснення цифрових відеозображень в залежності від потрібної точності геометричних вимірювань;
- в результаті, сформулювати вимоги до технічних і програмних засобів вимірювання механічних величин.

Для розв'язання вказаної задачі пропонується розглядати JPEG-алгоритм на основі теорії цифрової обробки сигналів [150 - 152]. З цієї точки зору JPEG-алгоритм відповідає нерекурсивному цифровому фільтру нижніх частот, що виконує фільтрацію сигналу в частотній області.

Точнісні характеристики цифрового фільтра можна визначити відомими методами на основі детермінованого або ймовірнісного підходів [153 - 155]. Особливості застосування ймовірнісних методів до JPEG-алгоритму розглянуті в даному розділі.

Для спрощення подальших міркувань будемо розглядати одновимірний сигнал яскравості  $f(n)$ , що відповідає послідовності дискретних точок в рядку або стовпці відеозображення. Цей сигнал яскравості містить горизонтальні або вертикальні одновимірні перепади яскравості. Вказані перепад визначають координати контурів ОВ в рядку або стовпцю відеозображення.

Якщо розглядається горизонтальний одновимірний перепад яскравості (сигнал  $f(n)$  однаковий у всіх рядках блоку розміром  $K \times K$  дискретних точок), то,

виходячи із властивостей ДКП, цей перепад визначається першим рядком ( $u = 0, 1, \dots, K-1, v = 0$ ) матриці частотних коефіцієнтів  $F(u, v)$ . В цьому випадку для визначення похибок вимірювань потрібно досліджувати перший рядок матриці частотних коефіцієнтів, перший рядок таблиці квантування і перший рядок блоку точок на відновленому після стиснення відеозображенні.

Якщо розглядається вертикальний одновимірний перепад яскравості, то потрібно досліджувати перший стовпець ( $u = 0, v = 0, 1, \dots, K-1$ ) матриці частотних коефіцієнтів, таблиці квантування і блоку точок на відновленому відеозображенні.

Таким чином, актуальною є задача визначення впливу стиснення відеозображень за JPEG-алгоритмом на точність вимірювання геометричних параметрів та параметрів руху об'єктів.

В JPEG-алгоритмі виникають такі похибки геометричних вимірювань:

- трансформована похибка, обумовлена перетворенням похибок, що наявні на початковому нестиснутому відеозображенні;
- похибка, що обумовлена квантуванням частотних коефіцієнтів;
- викривлення форми перепадів яскравості в результаті вилучення верхніх частот із спектра зображення, що є наслідком квантування частотних коефіцієнтів;
- похибки виконання обчислень, що виникають внаслідок обмеженої розрядності цифрових даних.

Для визначення цих похибок пропонується дослідити JPEG-алгоритм на основі теорій цифрової обробки сигналів. Даний алгоритм відповідає нерекурсивному цифровому фільтру нижніх частот, що виконує фільтрацію сигналу в частотній області.

## **2. Аналіз впливу стиснення відеозображень на вимірювальну інформацію про механічні величини**

Цифрове відеозображення, що надходить в JPEG-алгоритм для стиснення, містить шуми та інші похибки, які виникли в процесі його формування. До таких похибок відносяться:

- шум в електронних схемах пристроїв формування відеозображень;
- шум квантування по рівню при перетворенні відеосигналу в цифрову форму;
- еквівалентна похибка квантування, отримана в результаті перерахунку похибки дискретності на основі лінійної форми перепаду яскравості [139].

Будемо вважати, що вказані похибки утворюють адитивний шум, що присутній в сигналі яскравості. Цей сигнал відповідає послідовності значень яскравості в дискретних точках одного рядка цифрового відеозображення. Вказаний шум перетворюється в процесі стиснення відеозображення в деякий інший шум, що присутній в сигналі яскравості на виході JPEG-алгоритму.

Визначимо дисперсію шуму на виході JPEG-алгоритму (на відеозображенні після стиснення) на основі параметрів JPEG-алгоритму і статистичних характеристик шуму на вході цього алгоритму (на початковому відеозображенні).

Для стійкого цифрового фільтра, при подачі на вхід стаціонарного випадкового процесу з нульовим середнім значенням, дисперсія випадкового процесу на виході дорівнює [153, 154]:

$$\sigma_{вих}^2 = R_{вих}(0) = \frac{T}{\pi} \cdot \int_0^{\pi/T} W_{вих}(\omega) d\omega, \quad (3.1)$$

де  $R_{вих}$  – кореляційна функція випадкового процесу на виході фільтра,

$T$  – інтервал дискретності відліків сигналу в фільтрі,

$W_{вих}$  – спектральна щільність потужності випадкового процесу на виході фільтра.

Відповідно до [153]

$$W_{вих}(z) = D(z^{-1}) \cdot D(z) \cdot W_{вх}(z), \quad (3.2)$$

де  $D$  – передаточна функція фільтра,

$W_{вх}$  – спектральна щільність потужності випадкового процесу на вході фільтра.

У випадку, коли вхідний шум є некорельований стаціонарний випадковий процес з нульовим середнім значенням, некорельований з корисним сигналом, можна отримати на основі формул (3.1) і (3.2) вираз для розрахунку дисперсії шуму на виході цифрового фільтра [154, 155]:

$$\sigma_{вих}^2 = \sigma_{вх}^2 \cdot \frac{T}{\pi} \int_0^{\pi/T} A^2(\omega) d\omega, \quad (3.3)$$

де  $\sigma_{вх}^2$  – дисперсія шуму на вході фільтра,

$A(\omega)$  – амплітудно-частотна характеристика фільтра.

Для цифрових відеозображень з вимірювальною інформацією шум є некорельованим стаціонарним випадковим процесом з нульовим середнім значенням і він некорельований з сигналом яскравості [63, 67, 68]. Нерекурсивний фільтр, який відповідає JPEG-алгоритму, завжди стійкий. Тому можна використовувати формулу (3.3). Будемо вважати, що розмір цифрового відеозображення в дискретних точках не змінюється за допомогою програмних засобів після його перетворення в цифрову форму. Тоді інтервал дискретності для цифрового фільтра дорівнює кроку дискретності  $\delta_d$  відеосигналу при його перетворенні в цифрову форму, тобто  $T = \delta_d$ .

Визначимо амплітудно-частотну характеристику цифрового фільтра, що відповідає JPEG-алгоритму стиснення відеозображень. При стисненні відеозображень мають місце деякі зміни амплітуди сигналу яскравості в рядку відеозображення (зміни яскравості дискретних точок відеозображення). Вони пов'язані із деякою зміною значень частотних коефіцієнтів в процесі їх квантування. Ці зміни яскравості будуть враховані окремо у вигляді похибки, пов'язаної із квантуванням частотних коефіцієнтів. Тому будемо вважати, що стиснення за JPEG-алгоритмом не змінює амплітуди сигналу яскравості, а відповідний цифровий фільтр нижніх частот має в смузі перепускання амплітудно-частотну

$$A(\omega) = 1.$$

Визначимо верхню межу смуги перепускання цифрового фільтра. Цей фільтр виконує фільтрацію сигналу в частотній області. В даному випадку  $L$  – порядковий номер (рахуючи з 0) останнього частотного коефіцієнту в першому рядку матриці частотних коефіцієнтів, що залишається в спектрі одновимірного

сигналу яскравості в рядку відеозображення. Вилучення частотних коефіцієнтів з більшими номерами здійснюється при квантуванні цих коефіцієнтів в процесі стиснення відеозображення за JPEG-алгоритмом. Скільки частотних коефіцієнтів буде вилучено, залежить від співвідношення значень частотних коефіцієнтів і значень елементів таблиці квантування.

Визначимо на основі теореми відліків і властивостей ДКП частоти, що відповідають номерам частотних коефіцієнтів. Максимальна частота, що може бути присутня в рядку цифрового відеозображення, відповідає порядковому номеру  $K = 8$  і дорівнює:  $\omega_{\max} = 2\pi f_{\max} = \pi/\delta_d$ , де  $f_{\max} = 1/(2\delta_d)$ . Для будь-якого довільного порядкового номера “ $i$ ” частота  $\omega_i = \frac{i \cdot \pi}{\delta_d \cdot K}$ .

В результаті маємо амплітудно-частотну характеристику цифрового фільтра, що відповідає JPEG-алгоритму стиснення відеозображень (рис. 3.2).

Використовуючи формулу (3.3) і отриману амплітудно-частотну характеристику, маємо:

$$\sigma_{\text{вих}}^2 = \sigma_{\text{вх}}^2 \cdot \frac{\delta_d}{\pi} \int_0^{\omega_L} 1^2 \cdot d\omega = \sigma_{\text{вх}}^2 \cdot \frac{L}{K}. \quad (3.4)$$

Таким чином, формула (3.4) дозволяє розв’язати поставлену задачу, тобто знайти дисперсію шуму на виході JPEG-алгоритму.

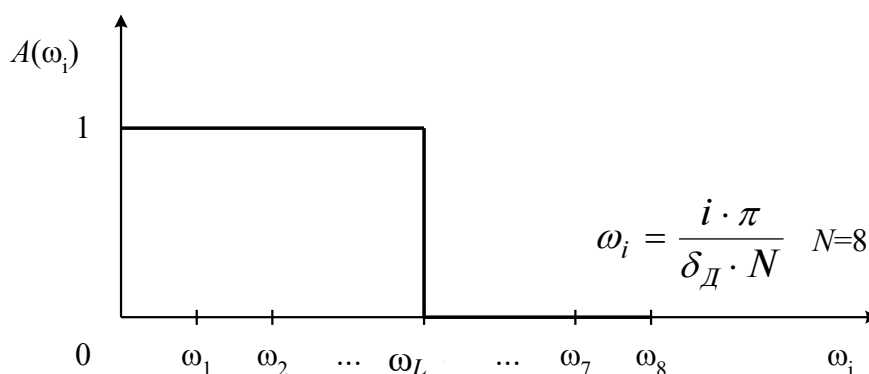


Рис. 3.2. Амплітудно-частотна характеристика JPEG-алгоритму

Так як  $L = 0, 1, \dots, 7$ ;  $K = 8$ , то JPEG-алгоритм зменшує рівень шуму, який присутній на початковому зображенні.

Величина, на яку зменшується рівень шуму, залежить від співвідношення значень частотних коефіцієнтів і елементів таблиці квантування. Таким чином, перетворення вхідного шуму в JPEG-алгоритмі залежить від характеру зміни яскравості на конкретному типі відеозображень і від параметрів алгоритму.

При використанні формули (3.4) потрібно враховувати співвідношення максимальної частоти  $\omega_{\max}$ , що може бути присутня в рядку відеозображення, і верхньої межі смуги частот сигналу яскравості, яка визначається в процесі його формування і перетворення. Якщо верхня межа смуги частот сигналу яскравості менша за максимальну частоту  $\omega_{\max}$ , то потрібно визначити номер частотного коефіцієнту  $N'$ , що відповідає цій верхній межі. Тоді формула (3.4) набуває вигляду:

$$\sigma_{вих}^2 = \begin{cases} \sigma_{вх}^2 \cdot \frac{L}{K'}, & L < K', \\ \sigma_{вх}^2, & L \geq K'. \end{cases}$$

Таким чином, на основі теорії цифрової обробки сигналів визначено дисперсію шуму на виході JPEG-алгоритму. Встановлено, що при відповідному виборі параметрів JPEG-алгоритму можна зменшити рівень шуму на відеозображенні і, в результаті, зменшити похибки геометричних вимірювань.

### 3. Похибки методу JPEG стиснення кадрів у часовій послідовності відеозображень

#### 3.1. Похибка, що є результатом вилучення верхніх частот з спектру відеозображення

В процесі квантування частотних коефіцієнтів (результатів ДКП), відбувається вилучення верхніх частот із спектра відеозображення. Це приводить до викривлення форми перепаду яскравості, який утворює контур об'єкта на відеозображенні.

Поставимо задачу визначити величину викривлень форми перепаду яскравості і оцінити їх вплив на точність визначення координат контуру об'єкта, яке виконується на основі сегментації відеозображень на ОВ і фон.

Виходячи із властивостей ДКП, можна вважати, що виконується розкладання в ряд Фур'є сигналу яскравості  $f(x)$ , який доповнений його дзеркальним відображенням відносно точки  $x = 0$ . Так як розмір блоку відеозображення, над яким виконується ДКП, дорівнює 8 дискретним точкам ( $K = 8$ ), то в результаті маємо парну періодичну функцію з періодом  $2T_f$ , де  $T_f = K \cdot \delta_d = 8 \cdot \delta_d$ .

Ряд Фур'є для даної функції має вигляд [156, 157]:

$$f(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{i=1}^{\infty} a_i \cdot \cos \frac{i\pi \cdot x}{T_f},$$

де

$$a_0 = \frac{2}{T_f} \int_0^{T_f} f(x) dx,$$

$$a_i = \frac{2}{T_f} \int_0^{T_f} f(x) \cdot \cos \frac{i\pi \cdot x}{T_f} dx.$$

Так як в результаті ДКП обчислюється тільки 8 частотних коефіцієнтів і деяка їх кількість замінюється нулями при квантуванні, то початковий сигнал яскравості замінюється частковою сумою ряду Фур'є:

$$f^*(x, L) = \frac{a_0}{2} + \sum_{i=1}^L a_i \cdot \cos \frac{i\pi \cdot x}{T_f}. \quad (3.5)$$

Часткова сума ряду Фур'є періодичної функції  $f(x)$  з періодом  $2\pi$  також може бути обчислена через інтеграл Діріхле [156]:



$$f^*(x, L) = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x + \mu) \cdot \frac{\sin \left[ (2L + 1) \frac{\mu}{2} \right]}{\sin \frac{\mu}{2}} d\mu, \quad (3.6)$$

де  $\mu$  – допоміжна змінна інтегрування.

Різниця між  $f(x)$  і  $f^*(x, L)$  визначає похибку, яку вносить вилучення верхніх частот при стисненні відеозображення.

Існуючі методи оцінки цієї похибки орієнтовані на визначення розбіжності амплітуд сигналів  $f(x)$  і  $f^*(x, L)$ , наприклад на основі середньоквадратичного критерію [67]. Також оцінюють розбіжності візуальної якості початкового і стиснутого відеозображення на основі об'єктивних і суб'єктивних критеріїв [100, 105, 158].

Координати точок контуру при сегментації відеозображення визначаються на основі порівняння яскравостей точок в рядку відеозображення з пороговим значенням яскравості  $f_n$ . Величина викривлень дорівнює різниці між значенням координати після вилучення верхніх частот  $x^*_k$  і точним значенням координати  $x_k$ , тобто:  $x^*_k - x_k$ . Значення  $x^*_k$  можна знайти із рівняння:

$$f^*(x^*_k, L) = f_n. \quad (3.7)$$

Значення часткової суми ряду Фур'є в рівнянні (3.7) визначається на основі формули (3.5) або (3.6).

Оскільки аналітичний розв'язок рівняння (3.7) для сигналів, що утворюють перепад яскравості на реальних відеозображеннях, досить ускладнений, було проведене чисельне моделювання даного типу похибок геометричних вимірювань.

Чисельне моделювання включає таку послідовність дій:

1. Формування сигналу  $f(n)$ , що містить одновимірний перепад яскравості в межах блоку із 8x8 дискретних точок. При моделюванні використовувалися такі типи перепадів яскравості:

- ступеневий перепад;
- лінійний перепад;
- середній профіль перепаду яскравості для реальних відеозображень, отриманих від відеокамери в робочих умовах вимірювання механічних величин на промислових підприємствах;
- середній профіль перепаду яскравості для реальних відеозображень, отриманих від цифрового фотоапарату в стандартних умовах вимірювання механічних величин в лабораторії;

2. Обчислення прямого ДКП.

3. Вилучення частотних коефіцієнтів із спектра, тобто  $F(u, v) = 0$  для  $u > L$ .

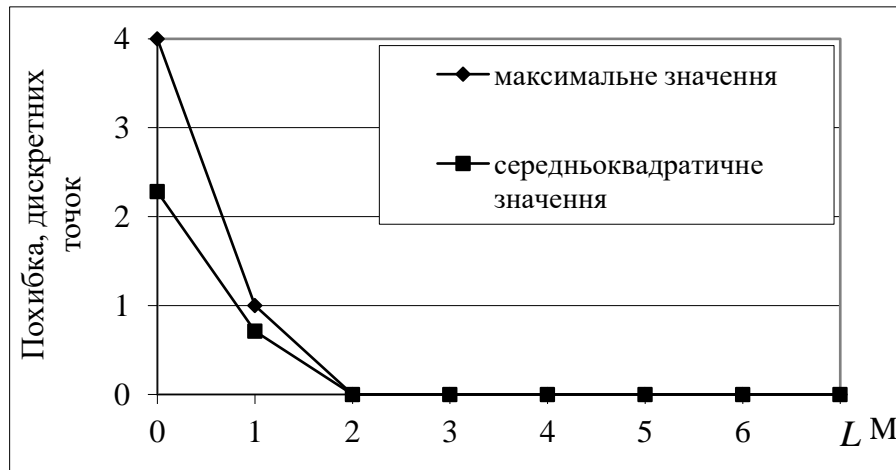
4. Обчислення оберненого ДКП.

5. Визначення точного значення координати контура і значення з похибкою, обчислення похибки  $x^*_k - x_k$ .

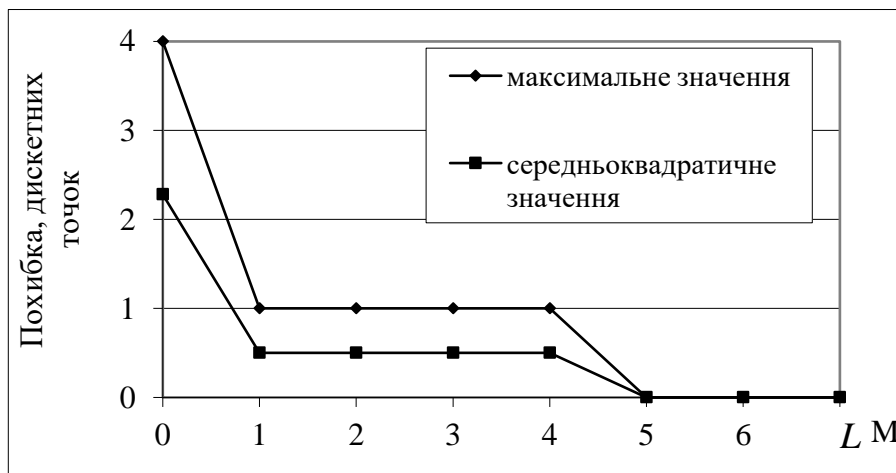
6. Накопичення даних про похибку визначення координати для різних значень  $L$  (кількості частотних коефіцієнтів ДКП, що залишаються) і різних варіантів розташування одновимірного перепаду яскравості в середині блоку розміром 8x8 дискретних точок.

Результати проведеного моделювання для різних типів перепадів яскравості наведено на рис. 3.3.

Аналіз результатів моделювання вказує на те, що для відеозображень, які містять ОВ відносно великих розмірів і з плавною формою контурів, можливе вилучення частотних коефіцієнтів, що відповідають верхнім частотам в спектрі. Це дозволить досягти значного стиснення даного типу відеозображень без суттєвого збільшення похибок геометричних вимірювань. За результатами чисельного моделювання похибка визначення координати при  $L \geq 3$  дорівнює нулю.

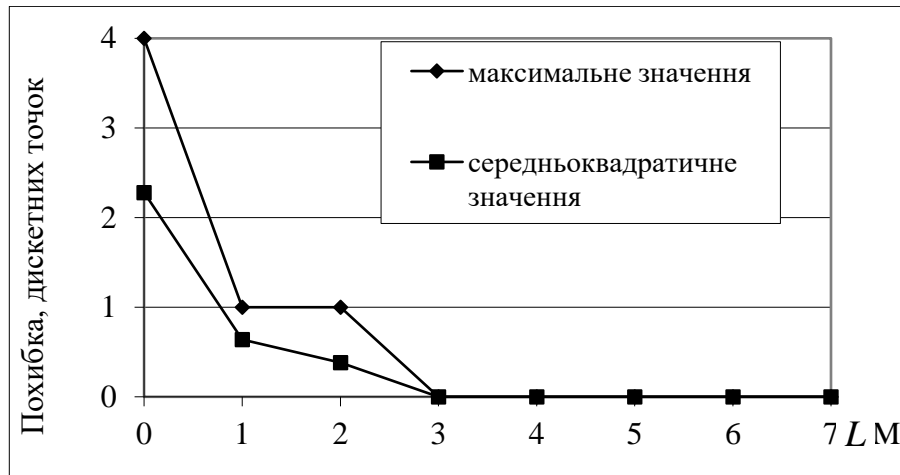


а) ступеневий перепад яскравості

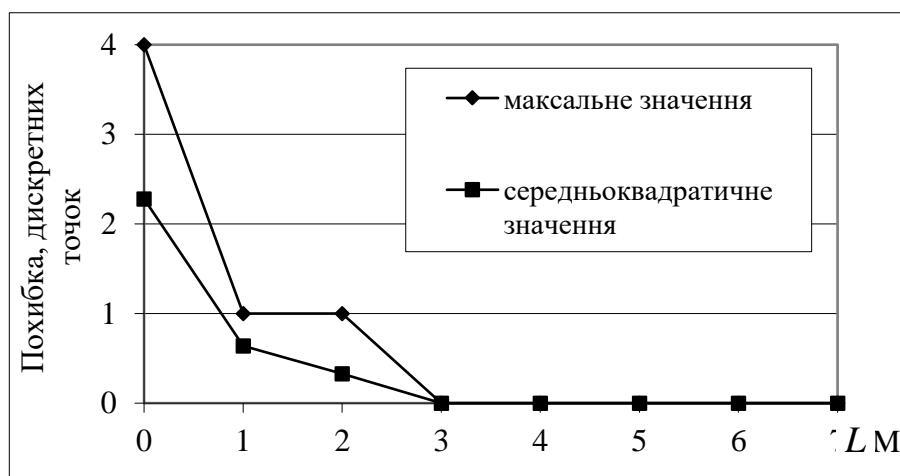


б) лінійний перепад яскравості

Рис. 3.3. Похибка визначення координат точок контуру при вилученні верхніх частот із спектра відеозображення (чисельне моделювання)



в) перепад яскравості на відеозображенні від відеокамери



г) перепад яскравості на відеозображенні від цифрового фотоапарату

Рис. 3.3 (продовження)

### 3.3.2. Похибка, що є результатом квантування частотних коефіцієнтів в спектрі відеозображення

Розглянемо похибки геометричних вимірювань, пов'язані із квантуванням частотних коефіцієнтів спектра цифрового відеозображення в JPEG-алгоритмі.

В загальному випадку квантування частотних коефіцієнтів – це є нелінійне перетворення відеозображення. Але, подібно тому, як це робиться при дослідженні аналого-цифрового перетворення, пропонується похибку квантування частотних коефіцієнтів розглядати як адитивний шум, що додається до відеозображення, відновленого після стиснення. При такому підході JPEG-алгоритм можна вважати лінійним цифровим фільтром [153, 155, 157].

Визначимо ймовірнісні характеристики цього адитивного шуму. Кожному частотному коефіцієнту відповідає деяке коливання в складі сигналу яскравості в рядку відеозображення. Амплітуда коливання визначається амплітудою цього частотного коефіцієнту.

Максимальне значення похибки квантування частотного коефіцієнту  $F(u, v)$  дорівнює  $Q(u, v) / 2$ . В даному випадку розглядається одновимірний перепад яскравості в рядку відеозображення і він однаковий для всіх рядків відеозображення в блоці  $8 \times 8$  дискретних точок. Тому на основі властивостей ДКП маємо такий спектр: частотні коефіцієнти в першому рядку матриці частотних коефіцієнтів визначають форму одновимірного перепаду; частотні коефіцієнти в інших рядках дорівнюють нулю, тобто  $F(u, v) = 0$  при  $v = 1, 2, \dots, K-1$ .

В даному випадку формулу оберненого ДКП можна записати так:

$$f(n) = \frac{1}{2\sqrt{K}} \cdot \sum_{u=0}^{K-1} C(u) \cdot F(u,0) \cdot \cos \frac{(2n+1)u\pi}{2K}.$$

Виконаємо оцінку згори амплітуди шуму квантування. Це можна зробити на основі підходу, викладеного в [153, 155, 157]. Максимальне значення похибки результату обчислень визначається як сума максимальних значень похибок початкових даних. Для спрощення обчислень також будемо вважати, що  $\cos \frac{(2n+1)u\pi}{2K} = 1$  для будь-яких значень  $u$ . В результаті маємо максимальне значення амплітуди шуму квантування частотних коефіцієнтів:

$$\Delta_{\text{кв ч}} \max = \frac{1}{4\sqrt{K}} \cdot \sum_{u=0}^{K-1} C(u) \cdot Q(u,0). \quad (3.8)$$

З урахуванням виключення верхніх частот із спектра відеозображення маємо:

$$\Delta_{\text{кв ч}} \max = \frac{1}{4\sqrt{K}} \cdot \sum_{u=0}^K C(u) \cdot Q(u,0). \quad (3.9)$$

Для більш точної оцінки величини похибки визначення координат краще використовувати формулу (3.9), ніж (3.8). Тому при аналізі похибок геометричних вимірювань на конкретному типі відеозображень необхідно визначити: скільки частотних коефіцієнтів вилучається із спектра, а скільки залишається і квантується. Для цього необхідна така інформація:

– максимальне і середнє значення частотних коефіцієнтів для конкретного типу відеозображень;

– значення вагових коефіцієнтів в таблиці квантування, яка використовується при стисненні за JPEG-алгоритмом.

В результаті порівняння максимальних значень частотних коефіцієнтів і значень вагових коефіцієнтів можна визначити  $L$ , тобто номер останнього частотного коефіцієнту, що залишився в спектрі одновимірного сигналу яскравості в рядку відеозображення. Для порівняння використовується співвідношення  $F(u,0) < \frac{Q(u,0)}{2}$  і той факт, що для реальних відеозображень амплітуда частотних коефіцієнтів значно зменшується із збільшенням частоти.

Закон розподілу значень амплітуди шуму можна вважати нормальним, так як шум утворюється в результаті дії багатьох незалежних факторів (процес квантування кожного частотного коефіцієнта не залежить від квантування інших коефіцієнтів, кількість коефіцієнтів, що залишаються в спектрі, звичайно

дорівнює 3–7). Середньоквадратичне значення амплітуди шуму  $\sigma_{кв ч} = \Delta_{кв ч \max} / 3$ .

Перерахунок значень шуму квантування в еквівалентну похибку визначення координат точок контуру можна виконати на основі лінійної апроксимації перепаду яскравості [139].

Результати розрахунку максимальних і середніх значень частотних коефіцієнтів для різних типів зображень в складі експериментальних даних наведено на рис. 3.4.

В результаті проведених досліджень отримано формули для оцінки максимального і середньоквадратичного значення похибок геометричних вимірювань, пов'язаних із квантуванням частотних коефіцієнтів при стисненні відеозображень за JPEG-алгоритмом. Розраховано максимальні і середні значення частотних коефіцієнтів. Ці значення необхідні для визначення похибок геометричних вимірювань, пов'язаних із вилученням і квантуванням частотних коефіцієнтів.