**Лекція 1-2. ПЕРЕТВОРЕННЯ ВИМІРЮВАЛЬНОЇ ІНФОРМАЦІЇ
ПРО ГЕОМЕТРИЧНІ ПАРАМЕТРИ ОБ’ЄКТІВ В
ПРОЦЕСІ ФОРМУВАННЯ ТА ОБРОБКИ ЦИФРОВИХ ВІДЕОЗОБРАЖЕНЬ**

**План лекції:**

1. Загальна математична модель вимірювального каналу з
цифровими відеозображеннями

2. Геометричні перетворення та похибки цифрових
відеозображень у вимірювальному каналі

3. Вплив випадкових похибок, що виникають в пристроях
формування відеозображень

4. Квантування по рівню відеосигналу з вимірювальною
інформацією про геометричні параметри об’єктів

5. Перетворення просторових координат відеозображень в
цифрову форму

6. Динамічні викривлення форми відеосигналу з вимірювальною інформацією про геометричні параметри об’єктів

7. Визначення загальної похибки вимірювання геометричних параметрів об’єктів та заходи по її зменшенню

**2.1. Загальна математична модель вимірювального каналу з цифровими відеозображеннями**

Розробка і дослідження математичної моделі вимірювального каналу необхідні для створення вимірювальної системи з відеозображеннями, яка забезпечує підвищення точності і швидкодії, розширення функціональних можливостей вимірювання ГП об’єктів. Математичні моделі вимірювального каналу базуються на теорії автоматичного управління, теорії і методах оптимальної фільтрації, теорії вимірювань механічних величин [1, 13, 165 – 168]. Також необхідно використовувати основні положення теорії оптичних систем та цифрової обробки двовимірних сигналів [78 – 80, 84, 147, 169, 170].

При розробці математичної моделі необхідно враховувати ряд суттєвих особливостей вимірювального каналу вимірювальної системи з відеозображеннями:

– вимірювальний канал є розімкненою структурою, що складається з ряду послідовно з’єднаних блоків;

– вимірювальний канал поєднує як неперервні, так і дискретні блоки;

– у вимірювальному каналі неперервна незмінна частина, тобто пристрій формування відеозображень (ПФВЗ) міститься на початку каналу, після неї розташований аналого-цифровий перетворювач та цифрова частина, зворотне перетворення сигналів з цифрової у неперервну форму відсутнє;

– вимірювальний канал забезпечує формування і обробку відеозображень, які можуть оброблятися в цифровій ЕОМ як двовимірним фільтром, так і двома одновимірними фільтрами (по рядкам і стовпцям цифрових відеозображень);

– основною вимогою до динамічних характеристик вимірювального каналу є неспотворена передача стрибкоподібних перепадів яскравості відеозображень, що утворюють контури ОВ та використовуються для визначення ГП цих об’єктів;

– при визначенні ГП та параметрів руху ОВ (виробничого обладнання та промислових виробів в процесі їх виготовлення) необхідна обробка послідовностей відеозображень в реальному часі.

Враховуючі всі ці особливості, математичну модель вимірювального каналу можна представити у неперервній формі. Розрахунок частотних характеристик блоків алгоритмічної компенсації випадкових і динамічних похибок виконується для неперервних значень просторових частот, після чого ці блоки реалізуються цифровою ЕОМ у вигляді цифрового фільтра з відповідною дискретною передаточною функцією.

Другим варіантом є математична модель вимірювального каналу, що поєднує неперервну частину (ПФВЗ), аналого-цифровий перетворювач
відеосигналу та блоки алгоритмічної обробки цифрових відеозображень (цифрову ЕОМ).

Розглянемо передачу вимірювальної інформації про ГП ОВ в статичному режимі з врахуванням впливу геометричних та випадкових похибок відеозображень. Двовимірна проекція поверхні ОВ (промислового виробу) характеризується двовимірною функцією , де  і  – просторові координати в площині цієї поверхні, ;  [м],  [м] – розмір прямокутної області в площині виробу, що потрапляє в поле зору оптичної системи ПФВЗ. Оптична система формує відеозображення , що є функцією двох просторових координат  і  в площині відеозображення ОВ, причому

, , (2.1)

де  – статичний коефіцієнт передачі ГП в ПФВЗ, що дорівнює коефіцієнту збільшення оптичної системи; ;
 [м],  [м] – розмір відеозображення  на поверхні перетворювача «світло-сигнал».

До відеозображення  в ПФВЗ додаються випадкові похибки (динамічні похибки в статичному режимі не враховуємо). В результаті отримуємо відеозображення . На виході ПФВЗ створюється цифрове відеозображення  шляхом перетворення відеозображення  в цифрову форму. При цьому

, , , , (2.2)

де  – операція обчислення цілої частини числа, а 1 д.т. на відеозображенні відповідає відстані  [м] в площині виробу.

Також слід враховувати нелінійні перетворення координат, обумовлені геометричними похибками. Ці похибки обумовлені дисторсією оптичної системи ПФВЗ, неперпендикулярністю лицьової поверхні промислового виробу і оптичної осі ПФВЗ, відмінностями поверхні ОВ складної форми від площини при формуванні двовимірної проекції цього об’єкту.

Методи алгоритмічної компенсації похибок в цифровій ЕОМ дозволяють отримати цифрове відеозображення , що є алгоритмічною оцінкою двовимірної функції . Формули (2.1), (2.2), масштабні коефіцієнти ,  та рівняння вимірювань (1.2) використовуються при розрахунках значень ГП виробів та інших механічних величин на основі результатів вимірювань на цифровому відеозображенні . Масштабні коефіцієнти ,  визначають шляхом аналітичного розрахунку або на основі дослідження тестових ОВ з відомими лінійними розмірами. Амплітуда вимірювальної інформації про ГП виробів на відеозображеннях визначається співвідношеннями

, , (2.3)

де  – функція розподілу яскравості в площині поверхні виробу,  – функція розподілу яскравості в площині відеозображення.

В перетворювачі «світло-сигнал» ПФВЗ виконується накопичення та усереднення електричного заряду, що створюється під дією зовнішнього освітлення в межах кожної світлочутливої комірки. Така комірка формує один дискретний відлік цифрового відеозображення [171]:

,

, , , (2.4)

, ,

де  – статичні коефіцієнти передачі по амплітуді перетворювача «світло-сигнал» та електронних підсилювачів відеосигналу,  – шум, що додається в ПФВЗ до корисного вимірювального відеосигналу,  – крок квантування відеозображень за амплітудою в аналого-цифровому перетворювачі,  – кількість рівнів квантування, зазвичай ,  – розрядність двійкового коду, що використовується для представлення відеозображення у цифровій формі.

Якщо розглядати алгоритмічну обробку рядка цифрового відеозображення, то цьому рядку відповідає одновимірний сигнал , , де  – тривалість сигналу ,  – частота формування цифрових відеозображень в ПФВЗ. Дискретні відліки відеосигналу формуються аналого-цифровим перетворювачем через інтервал часу . В цьому випадку

, ,

а  визначається за формулою (2.4) при .

Формули (2.1) – (2.4) є математичною моделлю вимірювального каналу вимірювальної системи в статичному режимі та відображають процес передачі вимірювальної інформації про ГП.

Для визначення динамічних характеристик вимірювального каналу будемо розглядати його лінійну частину, що включає ПФВЗ (без врахування геометричних похибок) та блоки лінійної комп’ютеризованої обробки відеозображень, що реалізуються в цифровій ЕОМ та здійснюють алгоритмічну компенсацію випадкових та динамічних похибок.

Математична модель лінійної частини вимірювального каналу у динамічному режимі представлена структурною схемою на рис. 2.1. Вона включає двовимірні частотні передаточні функції (двовимірні комплексні частотні характеристики) окремих блоків та вимірювального каналу в цілому (рис. 2.1, а). В цифровій ЕОМ ці передаточні функції представлено двовимірними масивами дискретних відліків (рис. 2.1, б).

На рис. 2.1 позначено:

1.  – частотна передаточна функція ПФВЗ.

3.  – частотна передаточна функція блоку алгоритмічної компенсації (фільтрації) випадкових похибок та її дискретні відліки, , .

3.  – частотна передаточна функція блоку алгоритмічної компенсації динамічних похибок та її дискретні відліки.





















відеозображень





а)





δx, δy



















відеозображень

б)

Рис. 2.1. Структурні схеми лінійної частини вимірювального каналу
вимірювальної системи

4.  – частотна передаточна функція цифрової ЕОМ, що виконує алгоритмічну компенсацію випадкових і динамічних похибок, та дискретні відліки цієї передаточної функції.

5.  – частотна передаточна лінійної частини вимірювального каналу та її дискретні відліки.

6.  – неперервний спектр двовимірної функції , що характеризує яскравість поверхні виробу,  – двовимірне перетворення Фур’є.

7.  – неперервний спектр відеозображення  з динамічними похибками,

. (2.5)

8.  – неперервний спектр випадкових похибок (шуму) , що виникає в ПФВЗ.

9.  – неперервний спектр відеозображення  на виході ПФВЗ, що містить випадкові і динамічні похибки,

, . (2.6)

10.  – дискретні відліки .

11.  – неперервний спектр алгоритмічної оцінки відеозображення  на виході блоку алгоритмічної компенсації випадкових похибок,

. (2.7)

13.  – дискретні відліки .

13.  – неперервний спектр алгоритмічної оцінки відеозображення  на виході блоку алгоритмічної компенсації динамічних похибок,

. (2.8)

14.  – дискретні відліки .

Формули (2.5) – (2.8) є загальною математичною моделлю вимірювального каналу вимірювальної системи в динамічному режимі.

Далі розглянемо алгоритмічну обробку рядка цифрового відеозображення, якому відповідає одновимірний сигнал  (рис. 2.2). В цьому випадку математична модель вимірювального каналу включає неперервну передаточну функцію ПФВЗ на основі перетворення Лапласа та дискретні передаточні функції цифрової ЕОМ на основі -перетворення.



*H*алг(*z*)

*F*0(*z*)

*F*Д(*z*)

*H*кв(*z*)

*H*кд(*z*)

*F*Н(*p*)

Ξ(*p*)

*F*Н(*z*)

*F*Д(*p*)

*F*0(*p*)

δx

відеозображень

Рис. 2.2. Структурна схема лінійної частини вимірювального каналу
вимірювальної системи при обробці рядка відеозображення

На рис. 2.2 позначено:

1.  – неперервна передаточна функція ПФВЗ.

3.  – дискретна передаточна функція блоку алгоритмічної компенсації (фільтрації) випадкових похибок.

3.  – дискретна передаточна функція блоку алгоритмічної компенсації динамічних похибок.

4.  – дискретна передаточна функція цифрової ЕОМ, що виконує алгоритмічну компенсацію випадкових і динамічних похибок.

5.  – перетворення Лапласа відеосигналу , що характеризує яскравість поверхні виробу в рядку відеозображення.

6.  – перетворення Лапласа відеосигналу  з динамічними похибками, .

7.  – перетворення Лапласа випадкових похибок (шуму) , що виникає в ПФВЗ.

8.  – результат перетворення Лапласа відеосигналу  на виході ПФВЗ, що містить випадкові і динамічні похибки.

9.  – результат -перетворення відеосигналу  на виході ПФВЗ, що містить випадкові і динамічні похибки.

10.  – результат -перетворення алгоритмічної оцінки відеосигналу  на виході блоку алгоритмічної компенсації випадкових похибок, .

11.  – результат -перетворення алгоритмічної оцінки відеосигналу  на виході блоку алгоритмічної компенсації випадкових похибок, .

Так як лінійна частина вимірювального каналу повинна забезпечити передачу і відтворення відеозображень без викривлень, то бажана передаточна функція вимірювального каналу

, (2.9)

Тоді

, (2.10)

Виконання співвідношень (2.9) і (2.10) у вимірювальній системі з передаточною функцією  можливе лише наближено через наявність випадкових похибок на відеозображеннях і застосування їх фільтрації.

Передаточні функції блоку алгоритмічної компенсації випадкових похибок можуть бути визначені на основі теорії оптимальної фільтрації одновимірних і двовимірних сигналів [79, 80, 165, 166]. Передаточні функції блоку алгоритмічної компенсації динамічних похибок можуть бути визначені на основі теорії динамічних вимірювань та відновлення двовимірних сигналів і відеозображень [11, 80, 137, 172].

Таким чином, розроблено загальну математичну модель вимірювального каналу вимірювальної системи з відеозображеннями. Отримана математична модель є основою для розробки методів комп’ютеризованої обробки відеозображень, алгоритмічної компенсації похибок і підвищення точності та швидкодії вимірювальної системи.

**2.2. Геометричні перетворення та похибки цифрових відеозображень у вимірювальному каналі**

При формуванні відеозображень у вимірювальній системі виникають геометричні похибки, що впливають на точність вимірювання координат точок ОВ. Ці похибки обумовлені дисторсією оптичної системи ПФВЗ, неперпендикулярністю плоскої поверхні промислового виробу і оптичної осі ПФВЗ, відмінностями поверхні ОВ складної форми від площини при формуванні двовимірної проекції цього об’єкту.

Математичною моделлю першої складової частини геометричних похибок згідно [79] є відображення точки з координатами  в площині поверхні виробу  в точку з координатами  в площині відеозображення з геометричними похибками :

, ,

де  – деякі монотонні функції.

Найчастіше в якості  використовують поліноміальні функції, що апроксимують дану складову геометричних похибок [66, 79]:

, , (2.11)

де  – степінь апроксимуючого поліному.

Ідентифікація коефіцієнтів  математичної моделі (2.11) виконується за методом найменших квадратів шляхом мінімізації середньоквадратичної похибки, що характеризує зміщення опорних точок на відеозображенні тестового ОВ.

Коефіцієнти математичної моделі (2.11) можуть бути визначені за формулами [79]:

, , (2.12)

де  – вектори коефіцієнтів , розташованих в порядку зростання індексів, розмірність кожного з цих коефіцієнтів визначається розмірностями елементів матриці  та векторів ,

,

 – відомі координати опорних точок ОВ, ,  – кількість опорних точок,  – вектори результатів вимірювання координат опорних точок ОВ на відеозображенні з дисторсією. Середньоквадратичне значення похибки визначення координат точок після компенсації дисторсійних геометричних викривлень дорівнює:

. (2.13)

Розглянемо другу складову частину геометричних похибок, що обумовлена неперпендикулярністю плоскої поверхні промислового виробу і оптичної осі ПФВЗ. Математична модель цієї похибки основана на проекційній моделі формування відеозображень ОВ (промислових виробів) у вимірювальній системі (рис. 2.3). Для опису просторового перетворення координат згідно цієї моделі використано відомості, викладені в [173, 174].

Точка  з координатами  на поверхні промислового виробу відображається в точку  з координатами  в площині початкового відеозображення шляхом проекційного перетворення в тривимірному просторі :

, (2.14)

де  – вектор однорідних координат точки ,  – вектор однорідних координат точки ,

 –

матриця центрального проекційного перетворення,  – фокусна відстань оптичної системи ПФВЗ.

Якщо поверхня виробу перпендикулярна оптичній осі ПФВЗ, то

,

де *z*ОВ – відстань від поверхні виробу до ПФВЗ.



*O*п

*f*0(*x*вз,*y*вз)

*z*ОС

*O*вз

*y*вз

*x*вз

*x*п

*z*ОВ

*f*0(*x,y*)

*y*п

Рис. 2.3. Проекційна модель формування відеозображень ОВ
(промислових виробів) у вимірювальній системі

Якщо поверхня виробу повернута на кути ,  і  навколо координатних осей ,  і , то

, (3.15)

де , ,

 – матриці повороту,

 – матриця, що задає перенос центру системи координат з точки  в точку  після повороту.

Координати точки  в площині відеозображення дорівнюють:

, . (2.16)

У вимірювальній системі координати точок виробу  отримують шляхом перерахунку з координат точок відеозображення :

, , . (2.17)

На основі формул (2.14) – (2.17) отримуємо остаточний вираз для координат точок ОВ (промислового виробу) з геометричними похибками:

|  |  |
| --- | --- |
| , .  | (2.18) |

Відповідно, геометрична похибка, обумовлена неперпендикулярністю плоскої поверхні промислового виробу і оптичної осі ПФВЗ дорівнює:

, . (2.19)

**2.3. Вплив випадкових похибок, що виникають в пристроях формування відеозображень**

Визначимо кореляційну функцію випадкових похибок, що додаються до відеозображень у вимірювальному каналі. По своєму походження це є шум, що виникає в пристрої формування відеозображень. Цей шум присутній на відеозображеннях і впливає на результати вимірювань геометричних параметрів та параметрів руху об'єктів.

Напруга шуму у відеосигналі – це є сума напруг теплового і дробового шумів. Тепловий шум є стаціонарний випадковий процес, так як його характеристики не залежать від часу. Якщо розглядати дробовий шум для рівня яскравості *Ymax*, то його можна вважати стаціонарним випадковим процесом.

Тепловий і дробовий шум по своїм властивостям наближається до «білого» шуму. Але при проходженні шуму через електронні схеми з обмеженою смугою частот, що має місце у вимірювальному каналі, характер шуму змінюється.

В [180, 181] розглянуто проходження «білого» шуму через багатокаскадний підсилювач з частотною характеристикою

|  |  |
| --- | --- |
| , |  |

де *ω*0 – частота, на якій частотна характеристика має максимальне значення,

,

Δωп – ширина смуги перепускання підсилювача, Δωп = 2πΔfп ,

Δfп – ширина смуги перепускання в Гц.

Кореляційна функція шуму на виході багатокаскадного підсилювача [180, 181]:

|  |  |
| --- | --- |
| , |  |

де *N*0 – спектральна щільність “білого” шуму.

Коефіцієнт кореляції (нормована кореляційна функція):

|  |  |
| --- | --- |
| . |  |

В даному випадку для підсилення відеосигналу використовуються широкосмугові електронні схеми. Тому можна вважати, що ω0 = 0, , де *fв* = 5 МГц – верхня межа смуги частот підсилювача.

В результаті маємо:

|  |  |
| --- | --- |
| ; | (2.20) |
| , | (2.21) |

де *σш*2 – дисперсія шуму на виході підсилювача.

Визначимо інтервал кореляції τ0 напруги шуму на вході АЦП. Відповідно до [180, 181]:

|  |  |
| --- | --- |
| ⏐*Rш(*τ*)*⏐ < 0,05 для τ > τ0. |  |

Використовуючи формули (2.20) і (2.21), маємо:

|  |  |
| --- | --- |
| . |  |

Якщо *fв* = 5 МГц, то τ0 = 9,77 ⋅ 10-8 с.

Можливий і інший варіант визначення інтервалу кореляції. Відповідно до [180, 181], інтервал кореляції – це половина ширини основи прямокутника одиничної висоти, площа якого дорівнює площі під кривою модуля коефіцієнта кореляції:

|  |  |
| --- | --- |
| . |  |

Виходячи із цього визначення і на основі теореми Хінчина–Вінера, яка пов’язує кореляційну функцію і енергетичний спектр, для випадкового процесу з додатною кореляційною функцією в [180, 181] отримано вираз для визначення інтервалу кореляції:

|  |  |
| --- | --- |
| , |  |

де , .

В даному випадку шум на вході АЦП має додатну кореляційну функцію (див. формулу (2.20)).

|  |  |
| --- | --- |
| . |  |
| . |  |
| . |  |

В результаті маємо:

|  |  |
| --- | --- |
| . |  |

Якщо *fв* = 5 МГц, то τ0 = 5,0 ⋅ 10-8 с.

Порівнюючи два варіанти розрахунку значення інтервалу кореляції, можна зауважити, що отримані значення мають деяку розбіжність. Це пояснюється відмінностями в підході до визначення інтервалу кореляції по графіку нормованої кореляційної функції.

Перший варіант визначення інтервалу кореляції використовує тільки порівняння значень нормованої кореляційної функції з довільно вибраним пороговим значенням. Другий варіант визначення інтервалу кореляції використовує інтегральний підхід до графіка нормованої кореляційної функції і краще відповідає фізичній суті задачі, що розв’язується. Тому в подальшому доцільно використовувати результати визначення інтервалу кореляції за другим варіантом.

Після перетворення відеосигналу в цифрову форму шум присутній в дискретних відліках. Інтервал дискретності для максимального розміру відеозображення по горизонталі *H* = 720 … 800 дискретних точок [109] дорівнює δд = (7,22 … 6,50) ⋅ 10-8 с. В даному випадку τ0 < δд. Таким чином, шум присутній у відеосигналі, після оцифровки перетворюється на дискретний “білий” шум.

Визначимо ймовірнісні характеристики шуму на основі співвідношення сигнал-шум. Співвідношення сигнал-шум в телевізійній техніці – це є співвідношення повного динамічного діапазону сигналу яскравості (від рівня чорного *Uч* до рівня білого *Uб*) до діючого значення напруги шуму *Uш д* [66, 182, 183]:

|  |  |
| --- | --- |
| . | (2.22) |

Так як в формулі (2.22) використовується повний динамічний діапазон сигналу яскравості, то можна вважати, що яскравість цифрового зображення *Y = Ymax*, де *Ymax* – максимально можливе значення яскравості для відеозображення, а шум статистично незалежний від відеосигналу.

При розрахунку ймовірнісних характеристик шуму на основі співвідношення сигнал-шум необхідно знайти середньоквадратичне значення його напруги (корінь квадратний із дисперсії). В формулі (2.22) можна використовувати середньоквадратичне значення напруги шуму замість діючого значення, якщо шум є ергодичний випадковий процес.

Відповідно до [180, 181], необхідною і достатньою умовою ергодичності випадкового процесу є:

1. Його стаціонарність у вузькому значенні.

2. Його метрична транзитивність. Це означає, що будь-яка частина сукупності реалізацій випадкового процесу, вірогідність якої відрізняється від нуля або одиниці, вже не є стаціонарною у вузькому значенні.

Розглянемо питання про стаціонарність шуму на вході АЦП. В даному випадку, виходячи із визначення співвідношення сигнал-шум, шум має середнє значення і дисперсію, які не залежать від часу, а його кореляційна функція залежить тільки від різниці τ = *t2 – t1*. Таким чином, шум є стаціонарний випадковий процес, стаціонарний в широкому значенні. Для випадкового процесу з нормальним розподілом стаціонарність в широкому і вузькому значенні співпадають [180]. Так як шум має нормальний розподіл, то він стаціонарний в вузькому значенні (суворо стаціонарний).

Для того, щоб стаціонарний нормальний випадковий процес був ергодичним (виконувалася умова метричної транзитивності), достатня безперервність його енергетичного спектру, тобто збіжність інтегралу  [181].

В даному випадку шум є стаціонарним нормальним випадковим процесом, кореляційна функція якого визначається формулою (2.20).

|  |  |
| --- | --- |
| . |  |

Таким чином, даний інтеграл збігається і шум на вході АЦП ергодичний. Тому формулу (2.22) можна записати у такому вигляді:

|  |  |
| --- | --- |
| . | (2.23) |

Співвідношення сигнал-шум відомого для відеосигналу на виході конкретного пристрою (наприклад, цифрової відеокамери). Тому на основі формули (2.23) можна визначити середньоквадратичне значення шуму для цифрового зображення:

|  |  |
| --- | --- |
| . | (2.24) |

Для визначення максимального практично можливого значення шуму використовується коефіцієнт амплітуди (пік-фактор) [184, 185]. Для шуму з нормальним законом розподілу значення коефіцієнту амплітуди *Ka* = 3 (ймовірність пікових значень шуму, що перевищують максимальне значення, дорівнює 0,3 %). Тоді

|  |  |
| --- | --- |
| . | (2.25) |

В цифрових пристроях формування відеосигналу дискретизація відеосигналу виконується в ПЗЗ-матриці, а потім доповнюється квантуванням по рівню в пристрої квантування. В даному випадку забезпечується мінімальний рівень шумів у відеосигналі.

Відповідно до [138, 171], шум ПЗЗ-матриці визначається в основному тепловим і дробовим шумом її вихідного пристрою, який є підсилювальним каскадом на польових транзисторах. Тому для цифрового пристрою формування відеосигналу шум на його виході – це є випадковий процес типу “білого” шуму. Він має нормальний закон розподілу і некорельований з відеосигналом. До подібного висновку можна прийти на основі відомостей, викладених в [79, 183]. Для визначення характеристик шуму за формулами (2.24) і (2.25) в даному випадку замість співвідношення сигнал-шум приблизно можна використовувати значення динамічного діапазону корисного сигналу яскравості для ПЗЗ-матриці.

Для типових аналогових і цифрових пристроїв формування відеосигналу і систем аналогового і цифрового магнітного запису відомо співвідношення сигнал-шум.

Співвідношення сигнал-шум в каналі яскравості для ПФВЗ знаходиться в межах 40 – 55 дБ, для цифрових відеокамер в межах 50 – 55 дБ [134, 183]. Цифрові пристрої формування і запису відеозображень забезпечують співвідношення сигнал шум близько 55 дБ. Характеристики шуму на цифровому відеозображенні для типових значень співвідношення сигнал-шум розраховані по формулам (2.24), (2.25) і наведені в табл. 2.1.

# Таблиця 2.1

## Характеристики шуму на цифровому відеозображенні

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Співвідношення сигнал-шум для пристрою формування відеозображень, дБ | 40 | 43 | 45 | 50 | 55 |
| Максимальне значення напруги шуму, дискретних рівнів | 7,65 | 5,42 | 4,30 | 2,42 | 1,36 |
| Максимальне значення, виражене цілим числом, дискретних рівнів | 8 | 5 | 4 | 2 | 1 |
| Середньоквадратичне значення напруги шуму, дискретних рівнів | 2,55 | 1,81 | 1,43 | 0,81 | 0,45 |

Примітка. Значення в дискретних рівнях обчислені, виходячи із того, що динамічному діапазону сигналу яскравості від рівня чорного до рівня білого відповідають цифрові значення 0 – 255 (8-бітовий цифровий код).

В результаті проведених досліджень можна зробити такі висновки. Одним з факторів, які впливають на похибки геометричних вимірювань на цифровому зображенні, є шум, який виникає в пристрої формування відеозображень (первинному вимірювальному перетворювачі). Ймовірнісні характеристики шуму і відповідної похибки розраховано на основі співвідношення сигнал-шум для відеосигналу (див. формули (2.24), (2.25) і таблицю 2.1). Доведено, що при використанні для розрахунків співвідношення сигнал-шум цей шум можна вважати стаціонарним і ергодичним випадковим процесом з нормальним законом розподілу, статистично незалежним від відеосигналу. Визначено кореляційну функцію і інтервал кореляції для шуму, присутнього у відеосигналі. В результаті порівняння інтервалу кореляції шуму з інтервалом дискретності відеосигналу, встановлено, що цей шум після оцифровки перетворюється на дискретний «білий» шум.

**2.4. Квантування по рівню відеосигналу з вимірювальною інформацією про геометричні параметри об’єктів**

Визначимо ймовірнісні характеристики шуму квантування, що виникає при перетворенні в цифрову форму відеосигналу. Ці характеристики використовуються при розрахунку похибки визначення координат точок на цифровому відеозображенні.

В загальному випадку з відеокамери надходить композитний відеосигнал, що містить сигнал яскравості, кольорорізницеві сигнали і синхроімпульси. Якщо розглядати зображення, що містить тільки градації сірого кольору, то кольорорізницеві сигнали дорівнюють нулю. Якщо розглядати відеосигнал в межах одного кадру або одного рядка, то синхроімпульси можна не враховувати. В цифрових пристроях формування відеозображень дискретний сигнал яскравості, отриманий від ПЗЗ-матриці, квантується по рівню. Таким чином, в подальшому можна казати про квантування тільки сигналу яскравості.

Сума корисного сигналу яскравості і шуму на вході АЦП – це є деякий випадковий процес.

В загальному випадку сигнал на вході АЦП неможливо вважати стаціонарним випадковим процесом за рахунок зміни рівня сигналу яскравості в межах одного зображення або послідовності зображень.

Нестаціонарність суми сигналу яскравості і шуму можна показати на прикладі рядка, що містить як об’єкт, так і фон відеозображення. В частині рядка, що відноситься до фону, *E*[*Y(x)*] = *Yф*, в частині рядка, що відноситься до об’єкта, *E*[*Y(x)*] = *Yоб*.

Можна перетворити нестаціонарний випадковий процес в стаціонарний, якщо відняти від поточних значень випадкового процесу його математичне очікування і перейти до центрованого випадкового процесу. В даному випадку математичне очікування – це є корисний сигнал яскравості. Віднімаючи корисний сигнал яскравості, отримуємо в результаті тільки шум, який присутній в аналоговому сигналі яскравості на вході АЦП. Цей шум – стаціонарний нормальний випадковий процес (див. підрозділ 2.3).

Визначимо ймовірнісні характеристики послідовності похибок квантування (шуму квантування). Будемо вважати, що вхідний сигнал АЦП – це шум аналогового сигналу яскравості, який отримано в результаті віднімання від загального сигналу корисного сигналу яскравості (математичного очікування), тобто в результаті приведення випадкового процесу на вході АЦП до стаціонарного випадкового процесу. Для співвідношення сигнал-шум 40 – 55 дБ максимальне значення напруги шуму складає 7,65 – 1,36 дискретних рівнів (див. табл. 2.1) і не можна вважати, що діапазон зміни вхідного сигналу АЦП набагато більший за шаг квантування. Тому потрібні деякі доповнення і уточнення положень попереднього підрозділу.

В [186] закон розподілу шуму квантування знаходиться, використовуючи характеристичну функцію випадкової величини Δ, яка дорівнює похибці аналого-цифрового перетворення для поточного значення вхідної величини.

Послідовність значень похибки квантування утворює шум квантування. Характеристична функція похибки аналого-цифрового перетворення [180, 186]:

|  |  |
| --- | --- |
| , | (2.26) |

де *k* – номер інтервалу квантування в АЦП, *k* = 0, … , - 1,

*nАЦП –* кількість двійкових розрядів АЦП,

*Рs*(.) – характеристична функція вхідного сигналу АПЦ при значенні аргументу, що дорівнює .

Характеристична функція випадкової величини, яка рівномірно розподілена на інтервалі ±0,5δкв, дорівнює:

|  |  |
| --- | --- |
| . | (2.27) |

Порівнюючи формули (2.26) і (2.27), можна зробити висновок про те, що похибка квантування розподілена рівномірно, якщо [186]:

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

Ця умова виконується, якщо σ2s >> δ2кв.

У випадку квантування сигналу яскравості маємо нормальний розподіл вхідного сигналу (шуму на вході АЦП). Його характеристична функція:

|  |  |
| --- | --- |
| . |  |

Визначимо  для різних значень співвідношення сигнал-шум на вході АЦП (див. табл. 2.1):

|  |  |
| --- | --- |
| ;;;. |  |

Таким чином, розподіл похибки квантування наближається до рівномірного, так як

|  |  |
| --- | --- |
|  при *k* ≠ 0. |  |

Послідовність похибок квантування утворює шум квантування з розподілом, що наближається до рівномірного і чисельними характеристиками:

*qmax* = δкв/2; *E*[*q(t)*] = 0; σ2[*q(t)*] = δ2кв/12.

Визначимо кореляційну функцію шуму квантування.

Для співвідношення сигнал-шум 40 – 55 дБ максимальне значення напруги шуму складає 7,65 – 1,36 дискретних рівнів (див. табл. 2.1) і не можна вважати, що діапазон зміни вхідного сигналу АЦП набагато більший за шаг квантування. Тому кореляційну функцію шуму квантування в даному випадку не можна безпосередньо визначити відповідно до формул (2.20) і (2.21).

Для того, щоб дискретні значення шуму квантування були некорельовані, необхідно, щоб інтервал кореляції шуму квантування τoq був менший за інтервал дискретності цифрового відеосигналу: τoq < δд.

Будемо вважати, що енергетичний спектр *Ws(*ω*)* шуму, наявного в аналоговому відеосигналі, приблизно рівномірний в діапазоні частот 0 – 5 МГц.

Таке припущення можливе, так як цей шум утворюється в результаті проходження теплового і дробового шумів через електронні схеми з обмеженою смугою частот.

Якщо такий вхідний сигнал надходить на вхід АЦП, то інтервал кореляції шуму квантування дорівнює [180, 181]:

|  |  |
| --- | --- |
| , | (2.28) |

або

|  |  |
| --- | --- |
| , | (2.29) |

де  – спектральна щільність потужності (енергетичний спектр) шуму квантування,

 – кореляційна функція шуму квантування,

Δω = 2π*fв* – ширина смуги частот вхідного сигналу.

В даному випадку для *fв* = 5 МГц і Ψ = 40 … 55 дБ маємо:

τоq = (1,1 … 6,1) ⋅ 10-9 с.

Інтервал дискретності цифрового відеосигналу дорівнює δд = (7,22 … 6,50) ⋅ 10-8 с (див. підрозділ 2.3).

Таким чином τoq < δд і дискретні відліки шуму квантування некорельовані.

Визначимо взаємну кореляційну функцію шуму квантування і вхідного сигналу.

Для співвідношення сигнал-шум на вході АЦП 40 – 45 дБ δкв < σs і відповідно до [180, 181] шум квантування і вхідний сигнал можна вважати некорельованими, так як *Kqs*(τ) ≈ 10-8. Для співвідношення сигнал-шум на вході АЦП 50 – 55 дБ 0,5δкв ≤ σs < δкв і можна використовувати формулу (2.22):

– при Ψ = 50 дБ Kqs(τ) = Ks(τ) ⋅ 10-5;

– при Ψ = 55 дБ Kqs(τ) = Ks(τ) ⋅ 0,02.

Таким чином, шум квантування і вхідний сигнал яскравості можна вважати практично некорельованими.

В результаті проведених досліджень можна зробити такі висновки. Розглянуто процес квантування по рівню сигналу яскравості, що містить шум, який є стаціонарним нормальним випадковим процесом. Співвідношення сигнал-шум на вході АЦП складає 40 – 55 дБ, що є типовими значеннями для сигналу яскравості. Кількість розрядів АЦП дорівнює 8, що є типовим значенням для цифрових зображень.

В процесі квантування по рівню сигналу яскравості виникає шум квантування. Він має такі характеристики:

1. Розподіл значень наближається до рівномірного.

2. Діапазон значень дорівнює ±δкв/2, математичне очікування 0, дисперсія δ2кв/12.

3. Інтервал кореляції шуму квантування визначається за формулами (2.10) і (2.11). Шум квантування є дискретний "білий" шум, так як його інтервал кореляції менший, ніж період дискретності цифрового відеосигналу.

4. Взаємна кореляційна функція шуму квантування і сигналу яскравості визначається за формулами (2.21) і (2.22). Шум квантування і сигнал яскравості практично некорельовані.

**2.5. Перетворення просторових координат відеозображень в цифрову форму**

Визначимо ймовірнісні характеристики похибки дискретності як деякої випадкової величини. Ці характеристики використовуються при розрахунку загальної похибки визначення координат точок на цифровому зображенні.

Похибку дискретності можна розглядати як величину, подібну до похибки квантування відеосигналу по рівню. Для похибки квантування вхідна величина, яка перетворюється в цифровий код, – це сигнал яскравості; рівні квантування – дискретні значення яскравості з певним кроком квантування. Для похибки дискретності вхідна величина – це безперервне (точне) значення координати точки *хк*, для якої *Y(хк) = Yп*; дискретні значення координати – це координати дискретних точок цифрового зображення. Тому всі формули і співвідношення, наведені для похибки квантування (шуму квантування) в підрозділі 2.4, можна поширити на похибку дискретності з урахуванням деяких особливостей процесу дискретизації відеосигналу. При цьому необхідно замінити яскравість *Y(x)* на горизонтальну координату *x*, а крок квантування δкв – на крок дискретності δд.

На основі цього підходу визначаються ймовірнісні характеристики похибки дискретності для відеозображень промислових виробів та частин технологічного обладнання. Типова схема розташування об’єктів на таких зображеннях наведена на рис. 2.4.

Будемо вважати, що довільно вибирається деяка точка, що належить контуру об’єкта. Координата цієї точки є випадкова величина з певним законом розподілу в певному діапазоні значень. Закон розподілу і діапазон можливих значень координати визначається для конкретного зображення або типу зображень (див. рис. 2.4). В даному випадку можливий діапазон значень горизонтальної координати точок контуру *(xоб1, xоб2)*.



а) б)

Рис. 2.4. Зображення, що використовуються для вимірювань:
а) тестове зображення; б) зображення елементів технологічного обладнання

Дискретні точки контуру утворюються при перетині контуру горизонтальними лініями, що відповідають рядкам зображення. Так, як вертикальна координата точок контуру змінюється від 0 до *V*-1 і вона приймає кожне дискретне значення один раз, а кількість цих значень досить велика (*V* = 300 – 1200 дискретних точок), то можна вважати, що вертикальна координата точок контуру має рівномірний розподіл в інтервалі (0, *V*-1).

Контур без урахування похибок для зображення на рис.
2.4 а) – це є пряма лінія, що розташована під деяким кутом до вертикалі:

|  |  |
| --- | --- |
| *x = a(y – xоб1)*. |  |

Таким чином, горизонтальна координата *х* деякої випадкової точки контуру є лінійна функція вертикальної координати *у*. В результаті отримуємо рівномірний розподіл горизонтальної координати випадкової точки контуру в діапазоні *(xоб1, xоб2)*. Віднімаючи від значень горизонтальної координати середнє значення , отримуємо середньоквадратичне значення горизонтальної координати:

|  |  |
| --- | --- |
| . |  |

Похибка дискретності має рівномірний розподіл в діапазоні ±δд/2 при будь-якому законі розподілу вхідної величини *х*, якщо  [186]. Тоді середнє значення похибки дискретності , а дисперсія .

На основі цього можна сформулювати такі вимоги до цифрового зображення: , де γ = 10, δд = ±1 дискретна точка. В результаті маємо для зображення на рис. 2.6 а):

|  |  |
| --- | --- |
|  дискретні точки; дискретних точок. |  |

Наприклад, для зображення процесу механічної деформації на рис. 2.4, б) можна використовувати математичні моделі контуру об’єкта, наведені в [36, 187, 188]. Так, наприклад, для зображень, отриманих при дослідженні деформації сталевих зразків, *xоб2 – xоб1* = 1,7 мм, σx об = 0,57 мм. В результаті маємо такі вимоги до цифрового зображення:

|  |  |
| --- | --- |
|  дискретні точки; дискретних точок. |  |

Послідовність похибок дискретності для точок контуру створює деяку випадкову функцію. Ймовірнісні характеристики, визначені для похибки дискретності, як випадкової величини, не залежать від вертикальної координати *y*. Тому випадкова функція, що утворена послідовністю похибок дискретності буде мати такі ж ймовірнісні характеристики. Крім того, ця випадкова функція має деяку кореляційну функцію.

Якщо розглядати точки контуру в послідовності їх розташування на зображенні і відповідну їм послідовність похибок визначення координат, то отримуємо кореляційну функцію, яка характеризує детерміновану послідовність координат цього контуру. В даному випадку ця детермінована послідовність не суттєва, так як нас цікавить похибка вимірювання конкретної координати, а ймовірнісні характеристики похибки (математичне очікування і дисперсія) отримані шляхом додавання великої кількості похибок окремих вимірювань, незалежно від їх порядку надходження і від взаємного розташування точок, в яких виконується вимірювання.

При дослідженні точнісних характеристик JPEG-алгоритму стиснення відеозображень похибки дискретності замінюються еквівалентним адитивним шумом, який додається до рівня сигналу яскравості на лінійній ділянці перепаду яскравості.

Крім закону розподілу, включаючи числові характеристики, необхідно для адитивного шуму визначити кореляційну функцію.

При дослідженні JPEG-алгоритму розглядається вплив цього алгоритму на похибки вимірювань горизонтальних координат і відстані по горизонталі. В зв’язку з цим будуть оцінюватися зміни характеристик сигналу яскравості в рядку зображення, незалежно від сусідніх рядків. Таким чином, вказана детермінована послідовність між точками контуру об’єкта не суттєва, так як точки розташовані в різних рядках зображення.

В результаті можна вважати, що еквівалентний адитивний шум, яким замінюється похибка дискретності, є випадковим процесом типу “білого” шуму.

Таким чином, визначено вимоги до відеозображень, що використовуються для вимірювань ГП та параметрів руху об'єктів. Ці вимоги забезпечують рівномірний розподіл похибки дискретності в діапазоні ±δд/2 і зменшення загальної похибки визначення координат точок контуру. Встановлено, що похибка дискретності може бути замінена еквівалентним адитивним шумом, який додається до сигналу яскравості. Цей шум є випадковим процесом типу «білого» шуму. Така заміна використовується при дослідженні точнісних характеристик JPEG-алгоритму стиснення зображень.

**2.6. Динамічні викривлення форми відеосигналу з вимірювальною інформацією про геометричні параметри об’єктів**

Розглянемо складову частину похибки геометричних вимірювань, пов’язану із обмеженням смуги частот відеосигналу в електронних схемах. Перепад яскравості на відеозображенні, що відповідає контуру об’єкта, в початковому стані приблизно має вигляд стрибка від яскравості фону *Yф* до яскравості об’єкта *Yоб*. При проходженні відеосигналу через електронні схеми з обмеженою смугою частот, які формують і підсилюють відеосигнал, виникають викривлення форми перепаду яскравості. В результаті це приводить до того, що яскравість збільшується від *Yф* до *Yоб* за деякий інтервал часу.

При визначенні координат точок контуру використовується порівняння яскравостей точок в рядку зображення з порогом яскравості *Yп*, який в більшості випадків дорівнює середньому значенню яскравостей об’єкта і фону. Тому для розрахунку похибок необхідно визначити час затримки, тобто час, за який яскравість збільшується від *Yф* до *Yп* (рис. 2.5).

Для широкосмугових і імпульсних підсилювачів відеосигналу [189, 190] тривалість фронту (час зростання) імпульсу на виході при подачі на вхід прямокутного імпульсу дорівнює: *tфр* = (0,35 … 0,5) / *fв*. Підсилювач в області верхніх частот може бути замінений еквівалентною схемою у вигляді інтегруючого кола і час зростання *tфр* =2,2*Ti*, де *Ti* – постійна часу інтегруючого кола. Звідси *Ti* = (0,159 … 0,227) / *fв*.

Перехідна характеристика інтегруючого кола [165, 166, 189]
*h(t)* = 1 – *exp(-t/Ti)*. В даному випадку *h(tз)* = 0,5.

Звідси можна визначити час затримки:

|  |  |
| --- | --- |
| . |  |



Рис. 2.5. Викривлення форми відеосигналу при обмеженні його
смуги частот

Тривалість видимої частини рядка телевізійного растра *tпх* (час прямого ходу рядкової розгортки) складає близько 52 мкс [114, 182], а типовий розмір цифрового зображення по горизонталі *H* = 720 … 800 дискретних точок [117, 134].

В результаті отримано такий вираз для обчислення похибки, яка пов’язана з обмеженням смуги частот сигналу яскравості:

|  |  |
| --- | --- |
| . |  |

Похибка ΔFH входить до систематичної складової частини похибки визначення горизонтальної координати точки контуру на відеозображенні, отриманому від відеокамери.

Для відеосигналу в більшості випадків *fв* = (3…5) МГц.

Якщо *fв* = 3 МГц і *H* = 800 дискретних точок, то ΔFH = 0,69 дискретних точок. Якщо *fв* = 3 МГц і *H* = 640 дискретних точок, то ΔFH = 0,55 дискретних точок.

**2.7. Визначення загальної похибки вимірювання геометричних параметрів об’єктів та заходи по її зменшенню**

При визначенні точнісних характеристик вимірювань ГП та параметрів руху об'єктів необхідно враховувати вплив різних викривлень, що виникають в процесі перетворення і обробки відеоінформації. Вплив деяких із цих викривлень визначається як похибка, що додається до результатів вимірювання координат точок на цифровому відеозображенні. Це похибка дискретності, що виникає при перетворенні відеозображення в цифрову форму і похибка, пов’язана із обмеженням смуги частот відеосигналу. Вплив інших викривлень визначається як похибка, що додається до значень яскравостей точок цифрового відеозображення. Це похибка квантування відеосигналу по рівню і похибка, пов’язана із шумами в пристрої формування відеозображень. Для обчислення загальної похибки необхідно врахувати вплив всіх вказаних факторів. В процесі цих обчислень необхідно перетворити похибку квантування в еквівалентну похибку дискретності, або, навпаки, похибку дискретності в еквівалентну похибку квантування. Такий перерахунок виконується на основі лінійної апроксимації перепаду яскравості на зображенні. Цей перепад розділяє на відеозображенні об’єкт і фон.

Математична модель одновимірного перепаду яскравості в рядку відеозображення – апроксимація перепаду яскравості лінійною функцією (рис. 2.6). Така апроксимація добре відповідає перепадам на реальних відеозображеннях виробничого процесу або наукового експерименту. Контур об’єкта має координату *х*к, для якої *Y*(*х*к) = *Y*п.

Така апроксимація, яка і будь-яка інша, призводить до відтворення перепаду яскравості з деякою похибкою. Однак, для точки з координатою *x*к, що є контуром об’єкта, точне і апроксимоване значення яскравості співпадають, тобто *Y(xк) = Yапр(xk) = Yп*. Можна зробити висновок про те, що така апроксимація не вносить додаткової похибки при визначенні координати контуру об’єкта на основі порівняння яскравостей точок в рядку відеозображення з порогом яскравості.



Рис. 2.6. Лінійна апроксимація одновимірного перепаду
яскравості в рядку відеозображення

Складові частини похибок геометричних вимірювань характеризуються деякими законами розподілу. Можливі закони розподілу цих похибок:

– рівномірний (похибка квантування, похибка дискретності);

– закон розподілу, що наближається до трикутного (спільна дія дворазової дискретизації відеосигналу в ПЗЗ-матриці пристрою формування відеозображень і пристрої введення відеозображень в комп’ютер);

– нормальний (похибка, обумовлена шумом в пристрої формування відеозображень).

При перерахунку похибок геометричних вимірювань необхідно визначити закон розподілу лінійної функції випадкової величини на основі закону розподілу цієї величини. Теоретичні основи таких функціональних перетворень випадкових величин викладено в [181, 182, 190].

Розглянемо лінійне перетворення похибок квантування і дискретності (рис. 2.7).

Лінійний перепад яскравості на зображенні можна представити у вигляді функції:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2.30) |

де x1, x2 – координати початку і кінця лінійного перепаду яскравості в рядку відеозображення,

α – кут нахилу лінійного перепаду яскравості, ,

xmax – максимальне значення горизонтальної координати в рядку відеозображення.



Рис. 2.7. Взаємний зв’язок похибок квантування і дискретності
для лінійного перепаду яскравості

Нехай точка контуру об’єкта має істинну координату *хк*, яка визначена на основі порогового значення яскравості *Yп*. За результатами вимірювань можна визначити середнє значення (математичне очікування) *E(xк)* для координати даної точки. Будемо вважати, що випадкова складова частина похибки вимірювань має симетричний розподіл відносно середнього значення координати, що справедливо для названих вище законів розподілу (рівномірного, трикутного, нормального).

Поточний результат вимірювань буде знаходитися в діапазоні (*E(xк)*-Δд max, *E(xк)*+Δд max), де Δд max – максимальне значення випадкової складової частини похибки дискретності. Цьому діапазону відповідає діапазон значень яскравості (*E(Yп)*-Δкв екв max, *E(Yп)*+Δ кв екв max), де *E(Yп)* – середнє значення яскравості для середнього значення координати, Δ кв екв max – максимальне значення випадкової складової частини еквівалентної похибки квантування.

Поточні значення результату вимірювання координати точки контуру мають деякий закон розподілу з щільністю розподілу *p(x)*, а відповідні їм значення яскравості – деякий інший закон розподілу з щільністю розподілу *g(Y)*. В загальному випадку [181, 190], якщо монотонна функція *Y(x)* має похідну і для функції *Y(x)* існує обернена функція *x* = ϕ0*(Y)* (тобто функції *Y(x)* і ϕ0*(Y)* пов’язанні між собою взаємно однозначною відповідністю), то

|  |  |
| --- | --- |
| . | (2.31) |

В частковому випадку для лінійної функції *Y = ax + b*

|  |  |
| --- | --- |
| . | (2.32) |

В даному випадку для функції *Y(x)* (див. формулу (2.30)) оберненої функції не існує, так як множині (континууму) значень x на інтервалі *(*0, *x1)* відповідає одне значення *Yф*, а множині (континууму) значень x на інтервалі *(x2, xmax)* – одне значення *Yоб*.

В [180, 181] на основі використання властивостей дельта-функції розглянуто підхід, який дозволяє знайти закон розподілу функції випадкової величини, подібної до (2.30). Застосуємо цей підхід до лінійного перепаду яскравості.

Функція розподілу значень яскравості (рис. 2.8) для лінійного перепаду яскравості визначається таким виразом:

|  |
| --- |
|  |

де *u(.)* – одиничний стрибок,

*P*{.} – ймовірність того, що значення випадкової величини знаходиться у вказаному інтервалі,

*Ymax* – максимальне значення яскравості.



Рис. 2.8. Функція розподілу значень яскравості для лінійного перепаду яскравості:

1 – ; 2 – 

Щільність розподілу значень яскравості

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2.33) |

де δ*(.)* – дельта-функція,

ϕ*(Y) –* функція, обернена до функції яскравості *Y(x)* на інтервалі *(x1, x2)*.

Виходячи із експериментально отриманих значень похибки дискретності і форми перепадів яскравості на відеозображеннях механічної деформації зразків матеріалів, можна вважати, що:

– для рівномірного і трикутного законів розподілу діапазон значень координати не виходить за межі діапазону *(х1, х2)*. Тому обидва інтеграли в формулі (2.33) дорівнюють нулю.

– для нормального закону розподілу діапазон значень координати  не виходить за межі діапазону *(х1, х2)*. Тому обидва інтеграли в формулі (2.15) приблизно дорівнюють нулю.

Таким чином, для практично можливих значень координат точок контуру формула (2.15) перетворюється в формулу (2.31), а з урахуванням лінійності перепаду яскравості – в формулу (2.32). Для діапазону значень координати *(х1, х2)* і відповідного йому діапазону значень яскравості *(Yф, Yоб)* можна вважати, що

|  |  |
| --- | --- |
| ;; ;. | (2.34) |

Використовуючи формулу (2.32) з урахуванням формул (2.34), можна довести, що в разі, коли значення координати мають рівномірний, трикутний або нормальний розподіл, то значення яскравості мають такий же розподіл, але довжина інтервалу можливих значень яскравості більше в *tg*α раз за довжину інтервалу можливих значень координати.

Різниця між середніми і істинними значеннями координати контуру дорівнює систематичній складовій частині похибки визначення координати контуру, відхилення поточних значень від середніх значень – випадковій складовій частині похибки із законом розподілу, визначеним за формулами (2.32) і (2.34).

Чисельні характеристики еквівалентної похибки квантування Δкв екв, як випадкової величини, можна визначити на основі закону її розподілу або на основі чисельних характеристик похибки дискретності, використовуючи теореми про чисельні характеристики [190].

В результаті маємо:

– середнє значення (систематична складова частина)

*E*[Δкв екв] = *E*[Δд] ⋅ ⏐*tg*α⏐;

– дисперсія *D*[Δкв екв] = *D*[Δд] ⋅ *tg*2α;

– середнє квадратичне відхилення σ[Δкв екв] = σ[Δд] ⋅ ⏐*tg*α⏐;

– максимальне значення випадкової складової частини

Δкв екв max = Δд max ⋅ ⏐*tg*α⏐.

Розглянемо перерахунок похибки квантування в еквівалентну похибку дискретності для лінійного перепаду яскравості. Використовуючи формулу (2.32) з урахуванням формул (2.34), можна довести, що в разі, коли похибка квантування має рівномірний, трикутний або нормальний розподіл, то еквівалентна похибка дискретності має такий же розподіл, але довжина інтервалу її можливих значень в *ctg*α раз більше.

Чисельні характеристики еквівалентної похибки дискретності Δд екв визначаються на основі чисельних характеристик похибки квантування Δкв:

*E*[Δд екв] = *E*[Δкв] ⋅ ⏐*ctg*α⏐;

*D*[Δд екв] = *D*[Δкв] ⋅ *ctg*2α;

σ[Δд екв] = σ[Δкв] ⋅ ⏐*ctg*α⏐;

Δд екв max = Δкв max ⋅ ⏐*ctg*α⏐.

В результаті можна зробити такі висновки. Перерахунок похибки дискретності в еквівалентну похибку квантування і похибки квантування в еквівалентну похибку дискретності виконується на основі лінійної апроксимації перепаду яскравості для контуру об’єкта на цифровому відеозображенні. Отримано формули для визначення ймовірнісних характеристик результатів таких розрахунків. Ці формули необхідні для теоретичного розрахунку точнісних характеристик вимірювань ГП та параметрів руху об'єктів.

Однією із переваг алгоритмічної обробки відеозображень в процесі вимірювань ГП та параметрів руху об'єктів є можливість оцінки різних складових частин похибки вимірювань і прийняття заходів по їх зменшенню і компенсації. Розглянемо ці заходи, виходячи із математичної моделі процесу перетворення відеоінформації при вимірюваннях ГП та параметрів руху об'єктів.

Важливою складовою частиною похибки вимірювань є похибка дискретності при визначенні координат об’єкта. Її величина визначається кількістю дискретних точок на цифровому відеозображенні. Для зменшення похибки дискретності необхідно збільшувати розмір відеозображення в дискретних точках. Але цей розмір обмежено можливостями апаратних засобів формування відеозображень. Тому важливо виконувати вимоги до розташування об’єктів вимірювань на відеозображеннях. Ці вимоги забезпечують рівномірний розподіл значень похибки дискретності і зменшення ймовірнісних характеристик відхилення значень координат об’єкта від точних значень.

Похибка квантування відеосигналу по рівню визначається кількістю двійкових розрядів, що використовуються для кодування цифрової інформації про кожну дискретну точку відеозображення. Вплив похибки квантування на точність геометричних вимірювань визначається шляхом перерахунку на основі лінійної форми перепадів яскравості. Виходячи із властивостей відеозображень промислових виробів та технологічного обладнання, визначено, що похибка квантування у порівнянні із іншими похибками менше впливає на точність вимірювань. Кількість двійкових розрядів в більшості засобів формування і перетворення відеозображень дорівнює 8 і це є достатнім для вимірювань ГП та параметрів руху об’єктів.

Викривлення форми відеосигналу через обмеження його смуги частот негативно впливає на відтворення контурів об’єктів на відеозображенні і приводить до виникнення систематичної складової частини похибки визначення координат об’єкта вимірювань. Величина цієї похибки визначається властивостями електронних схем в пристроях формування відеосигналу. Але розрахунок лінійних розмірів і лінійних переміщень об'єктів виконується шляхом віднімання значень координат точок об’єкта і систематична складова частина похибок визначення координат взаємно компенсується.

Геометричні похибки відеозображень є неприпустимо великими і тому у вимірювальній системі потрібно виконувати їх алгоритмічну компенсацію. Для цього необхідно ідентифікувати параметри математичних моделей (2.18) і (2.19). Особливістю ідентифікації геометричних похибок у вимірювальній системі є те, що на сформованому відеозображенні присутні як похибки, обумовлені дисторсією оптичної системи, так і похибки, обумовлені неперпендикулярністю плоскої поверхні промислового виробу і оптичної осі ПФВЗ, відмінностями поверхні ОВ складної форми від площини.

Тому використовують тестові ОВ, на плоскій поверхні яких розташовано  опорних точок з відомими координатами  (рис. 2.9).



Рис. 2.9. Тестове відеозображення для визначення
геометричних викривлень

За допомогою додаткових пристроїв (наприклад, фотоелектричного автоколіматора, що підключений до цифрової ЕОМ в складі вимірювальної системи) поверхню ОВ розташовують перпендикулярно оптичній осі ПФВЗ. Далі формують відеозображення тестового ОВ, на цьому відеозображенні вимірюють координати опорних точок, результат вимірювань перераховують за формулами (2.17) в координати  опорних точок тестового ОВ з дисторсійними геометричними похибками. За формулами (2.12) визначають коефіцієнти  математичної моделі (2.11) дисторсійних геометричних похибок.

Для розрахунку і алгоритмічної компенсації другої складової геометричної похибки (неперпендикулярність поверхні виробу і оптичної осі ПФВЗ, відмінність поверхні ОВ від площини) необхідно визначити величини , координати центра поверхні виробу  та центра відеозображення  в системі координат . Це може бути здійснено на основі координат опорних точок тестового ОВ за методами геометричних перетворень і реєстрації відеозображень [75, 80]. Також відомі методи калібрування цифрових відеокамер, визначення елементів їх зовнішнього і внутрішнього орієнтування [174, 176 – 179]. Методи калібрування дозволя­ють на основі відеозображення тестового ОВ з опорними точками одночасно визначити параметри дисторсійних і проекційних викривлень.

Розглянемо приклад розрахунку геометричних похибок відеозображень при вимірюванні ГП промислового виробу з природного каменю, що має максимальний розмір 1500х1200 мм. Розрахунок здійснено за формулами (2.18), (2.19) для відеозображення розміром 2000х1500 мм, що вміщує промисловий виріб з вказаним максимальним розміром. Геометрична похибка вимірювання координат точок повинна бути значно меншою
(в 3…5 разів) за похибку, обумовлену дискретним характером цифрового відеозображення (0,313 мм для цифрового фотоапарата, 0,5 мм для цифрової відеокамери). Аналізуючи результати розрахунку геометричної похибки, бачимо, що похибка виставлення промислового виробу відносно ПФВЗ не повинна перевищувати (0,05…0,2)°. Досягнення такої точності взаємного розташування ПФВЗ та промислового виробу, що має значну масу і габарити, є складною задачею та потребує додаткового обладнання. Тому для зменшення геометричної похибки без високоточної просторової орієнтації промислового виробу доцільно здійснювати її алгоритмічну компенсацію на основі математичних моделей (2.11), (2.18).

Таким чином, математичні моделі (2.11), (2.13), (2.18) і (2.19) дозволяють розрахувати величину геометричних похибок відеозображень і здійснити алгоритмічну компенсацію цих похибок у вимірювальній системі.

Шуми, що виникають в пристроях формування відеозображень, також негативно впливають на точність вимірювань ГП та параметрів руху об'єктів. Для зменшення цього впливу необхідно виконувати фільтрацію шумів на відеозображенні в процесі алгоритмічної обробки. При відповідному виборі параметрів JPEG-алгоритму стиснення відеозображень забезпечується зменшення похибки геометричних вимірювань за рахунок фільтрації шумів.

Таким чином, основною похибкою вимірювань ГП та параметрів руху, яка не може бути скомпенсована, є похибка дискретності. Вона дорівнює ± δд/2, тобто половині відстані між сусідніми дискретними точками цифрового відеозображення. Ця похибка визначає максимально можливу точність вимірювань за умови, що інші похибки зменшені або скомпенсовані до незначного рівня. Тому для вимірювань ГП та параметрів руху об'єктів важливим є розмір відеозображення в дискретних точках, отриманий в пристрої формування цифрових відеозображень. Наприклад, при розмірі відеозображення 800х600 точок, отриманому в пристрої введення відеозображень в комп’ютер, і зйомці площі розміром 80х60 мм похибка вимірювань дорівнює 0,05 мм, при розмірі відеозображення 2048х1536 точок в цифровому фотоапараті – 0,02 мм. Це є достатнім для багатьох задач з визначення ГП об’єктів.