

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»
Факультет комп'ютерно-інтегрованих технологій, мехатроніки і робототехніки
Кафедра інформаційно-вимірювальних технологій

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до кваліфікаційної роботи
магістра

на тему: **Комп'ютеризована система контролю якості поверхні
промислових виробів на основі фрактальних моделей**

Виконав: 2 курсу, ІВТ
студент групи -3м
Спеціальності: 175 «Інформаційно-
вимірювальні технології»
Молнар Владислав Олексійович
(прізвище та ініціали)

Керівник д.т.н., професор
:
Подчашинській Юрій Олександрович
(науковий ступінь, вчене звання, посада, прізвище та
ініціали)

Рецензент
:

(науковий ступінь, вчене звання, посада, прізвище та
ініціали)

Житомир – 2025

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»
Факультет комп'ютерно-інтегрованих технологій, мехатроніки і робототехніки
Кафедра метрології та інформаційно-вимірювальної техніки
Спеціальність 175 «Інформаційно-вимірювальні технології»

ЗАТВЕРДЖУЮ
 Завідувач кафедри інформаційно-
 вимірювальних технологій
 д.т.н., професор Подчашинський
 Ю.О.

« 1 » листопада 202
 4 5 р.

ЗАВДАННЯ
 на кваліфікаційну роботу магістра

Студент Молнар Владислав Олексійович

1. Тема роботи: Комп'ютеризована система контролю якості поверхні промислових виробів на основі фрактальних моделей

Керівник роботи: д.т.н., професор Подчашинський Юрій Олександрович

затверджена наказом по університету від

2. Термін здачі закінченої роботи на кафедру 4 листопада 2026
22/с

3. Вихідні дані до роботи 3 грудня 2025р.
функції комп'ютеризованої системи

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які підлягають розробці) Огляд та аналіз існуючих систем вимірювання фрактальної розмірності, розрахунок та втведення поточних значень фрактальної розмірності на екран

5. Перелік графічного матеріалу
структурна схема вимірювань, блок-схема алгоритму роботи вимірювальної системи

6. Консультанти кваліфікаційної роботи магістра із зазначенням розділів

роботи, що їх стосуються

Розділ 1-2			
3-4	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
	Подчашинській Ю.О.		
	Подчашинській Ю.О.		
7. Дата видачі завдання			

Календарний план

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз літературних джерел	14.10.2025-15.10.2025	
2	Збір літературних даних за темою дипломної роботи та відомих систем виявлення дефектів	16.10.2025-20.10.2025	
3	Ознайомитись з основними принципами побудови систем вимірювання фрактальних розмірностей	21.10.2025-24.10.2025	
4	Розробка структурної схеми системи вимірювання	25.10.2025-29.10.2025	
5	Побудова алгоритму	01.11.2025-3.11.2025	
6	Проведення експериментів	10.11.2025-13.11.2025	
7	Обчислення надійності системи	14.11.2025-17.11.2025	
8	Обчислення точності системи	18.11.2025-24.11.2025	
9	Оформлення пояснювальної записки та презентаційного матеріалу	01.12.2025-20.12.2025	

Молнар В.О

(підпис)

Подчашинській
Ю.О.

(підпис)

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота бакалавра присвячена розробці комп'ютеризованої системи контролю якості поверхні промислових виробів із використанням фрактальних моделей. Робота спрямована на підвищення точності та об'єктивності контролю якості поверхні шляхом автоматизації процесу аналізу зображень та зменшення впливу людського фактора.

У роботі проаналізовано сучасні методи та системи контролю якості поверхні промислових виробів, визначено їх основні переваги та недоліки. Показано, що традиційні методи контролю не завжди забезпечують необхідну точність та стабільність результатів, особливо при виявленні дрібних або прихованих дефектів. Обґрунтовано доцільність використання фрактального аналізу як ефективного інструменту для кількісної оцінки складності та неоднорідності поверхні.

Розглянуто теоретичні основи фрактальних моделей та принципи їх застосування для аналізу зображень поверхні виробів. Описано метод визначення фрактального розміру поверхні за допомогою методу підрахунку квадратів. На основі проведеного аналізу розроблено структурну схему комп'ютеризованої системи контролю якості поверхні, яка включає засоби отримання зображень, програмний модуль обробки даних та блок прийняття рішень.

У практичній частині роботи розроблено алгоритм обробки зображень та програмне забезпечення для автоматизованого визначення фрактальних параметрів поверхні і класифікації дефектів. Реалізовано функції попередньої обробки зображень, обчислення фрактального розміру, визначення типу дефекту та візуалізації результатів аналізу. Проведено експериментальні дослідження з використанням зображень поверхні промислових виробів, які підтвердили працездатність і ефективність запропонованої системи.

Результати роботи свідчать про можливість практичного застосування розробленої комп'ютеризованої системи для автоматизованого контролю якості поверхні у промислових умовах. Запропонований підхід може бути використаний для підвищення якості продукції, зменшення кількості бракованих виробів та оптимізації виробничих процесів.

ABSTRACT

The bachelor's qualification work is devoted to the development of a computerized system for quality control of the surface of industrial products using fractal models. The work is aimed at increasing the accuracy and objectivity of surface quality control by automating the image analysis process and reducing the influence of the human factor.

The paper analyzes modern methods and systems for surface quality control of industrial products and identifies their main advantages and disadvantages. It is shown that traditional control methods do not always provide the required accuracy and stability of results, especially in the detection of small or hidden defects. The feasibility of using fractal analysis as an effective tool for the quantitative assessment of surface complexity and heterogeneity is substantiated.

The theoretical foundations of fractal models and the principles of their application for surface image analysis are considered. A method for determining the fractal dimension of a surface using the box-counting method is described. Based on the performed analysis, a structural diagram of a computerized surface quality control system has been developed, which includes image acquisition devices, a software data processing module, and a decision-making block.

In the practical part of the work, an image processing algorithm and software for the automated determination of fractal surface parameters and defect classification were developed. Functions of image preprocessing, fractal dimension calculation, defect type identification, and visualization of analysis results were implemented. Experimental studies using images of industrial product surfaces were carried out, which confirmed the operability and effectiveness of the proposed system.

The results of the work demonstrate the possibility of practical application of the developed computerized system for automated surface quality control in industrial conditions. The proposed approach can be used to improve product quality, reduce the number of defective items, and optimize production processes.

Реферат

Магістерська робота присвячена розробці комп'ютеризованої системи контролю якості поверхні промислових виробів на основі фрактальних моделей.

Робота орієнтована на автоматизацію процесів аналізу зображень поверхні виробів з метою підвищення точності, об'єктивності та оперативності контролю якості у промисловому виробництві.

Актуальність теми зумовлена зростаючими вимогами до якості поверхні промислових виробів, оскільки саме стан поверхні значною мірою визначає експлуатаційні характеристики, надійність та довговічність продукції. Наявність мікродефектів, таких як тріщини, подряпини, нерівності та інші структурні аномалії, може призводити до передчасного зносу виробів і значних економічних втрат. Існуючі традиційні методи контролю якості поверхні не завжди забезпечують необхідний рівень точності та стабільності результатів і значною мірою залежать від людського фактора. У зв'язку з цим застосування фрактальних моделей та методів цифрової обробки зображень є перспективним напрямом підвищення ефективності систем контролю якості.

Метою магістерської роботи є розробка комп'ютеризованої системи контролю якості поверхні промислових виробів на основі фрактального аналізу зображень, яка забезпечує автоматизоване оцінювання стану поверхні, а також визначення точності та надійності функціонування системи.

Для досягнення поставленої мети в роботі вирішено такі основні задачі:
 проведено аналіз існуючих методів і систем контролю якості поверхні промислових виробів;
 досліджено теоретичні основи фрактального аналізу та обґрунтовано доцільність його застосування для оцінювання якості поверхні;
 розроблено структурну та функціональну схеми комп'ютеризованої системи контролю;
 здійснено вибір та обґрунтування апаратних і програмних компонентів системи;
 розроблено алгоритм роботи та програмне забезпечення для аналізу зображень поверхні із використанням фрактальних моделей;
 проведено експериментальні дослідження та виконано оцінювання точності й надійності розробленої системи.

Об'єктом дослідження є процеси контролю якості поверхні промислових виробів.

Предметом дослідження є комп'ютеризована система контролю якості поверхні промислових виробів на основі фрактальних моделей.

Методи дослідження базуються на методах цифрової обробки зображень, фрактального аналізу, аналітичному описі параметрів поверхні, методах комп'ютерного моделювання, а також статистичній обробці результатів експериментальних досліджень для оцінювання похибок, точності та надійності системи.

У першому розділі роботи виконано огляд і аналіз сучасних методів та існуючих систем контролю якості поверхні промислових виробів. Розглянуто їх функціональні можливості, переваги та недоліки, а також визначено основні обмеження традиційних підходів до контролю якості поверхні.

У другому розділі досліджено теоретичні основи фрактального аналізу та обґрунтовано доцільність використання фрактальних моделей для кількісної оцінки складності та неоднорідності поверхні виробів. Визначено склад і структуру комп'ютеризованої системи контролю якості та побудовано її структурну схему.

У третьому розділі здійснено вибір апаратних і програмних компонентів комп'ютеризованої системи контролю якості поверхні. Розроблено принципову схему системи, а також визначено засоби отримання, передавання та попередньої обробки зображень поверхні промислових виробів.

У четвертому розділі розроблено алгоритм роботи комп'ютеризованої системи контролю якості поверхні та відповідне програмне забезпечення для аналізу зображень із використанням фрактальних моделей. Проведено експериментальні дослідження, виконано обчислення фрактальної розмірності поверхонь, а також здійснено первинне оцінювання характеристик роботи системи.

У п'ятому розділі виконано детальне оцінювання точності та надійності комп'ютеризованої системи контролю якості поверхні. Застосовано статистичні методи обробки результатів вимірювань, розраховано показники похибок, дисперсії та середньоквадратичного відхилення, а також визначено ймовірність безвідмовної роботи системи, що дозволило зробити висновки щодо ефективності та практичної придатності розробленої системи.

Наукова новизна роботи полягає в удосконаленні структурної організації комп'ютеризованої системи контролю якості поверхні промислових виробів шляхом інтеграції фрактальних моделей у процес аналізу цифрових зображень поверхні, а також у розвитку програмно-алгоритмічних методів оцінювання якості поверхні на основі визначення фрактальної розмірності. Це дозволяє підвищити інформативність та об'єктивність контролю складних мікроструктур поверхонь промислових виробів.

Практичне значення роботи полягає в можливості використання розробленої комп'ютеризованої системи для автоматизованого контролю якості поверхні промислових виробів, виявлення та оцінювання дефектів поверхні, підвищення точності й надійності результатів контролю, а також зменшення впливу людського фактора. Отримані результати можуть бути використані під час створення та модернізації систем контролю якості на промислових підприємствах різних галузей.

Структура та обсяг роботи. Магістерська робота складається з реферату, вступу, п'яти розділів, висновків, переліку використаних літературних джерел та додатків. Робота містить пояснювальну записку з основним текстом, структурні та функціональні схеми, результати експериментальних досліджень, графічні матеріали, таблиці та рисунки, що ілюструють принципи роботи комп'ютеризованої системи контролю якості поверхні та результати оцінювання її точності й надійності.

Ключові слова: комп'ютеризована система контролю якості, фрактальні моделі, контроль поверхні, промислові вироби, цифрова обробка зображень, точність і надійність вимірювань.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	.....
1. ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ.....	.....
1.1. Призначення та область застосування.....	.....
1.2. Умови експлуатації .....	.....
1.3. Технічні параметри системи.....	.....
1.4.Вимоги до конструктивного оформлення.....	.....
Висновки до розділу 1 .....	.....
2. ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ СИСТЕМ .....	.....
Висновок до розділу 2.....	.....
3. РОЗРОБКА СТРУКТУРНОЇ ТА ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СХЕМ.....	.....
3.Обґрунтування	
складових.....	.....
Висновок до розділу 3.....	.....
4.РОЗРОБКА ПРОГРАМИ ТА	
АЛГОРИТМУ. ....	.....
4.1.Побудова алгоритму .....	.....
Висновок до розділу 4.....	.....
4.2 ЕКСПЕРЕМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА.....	.....
4.3 Визначення фрактальної розмірності цифрових відеозображень	
об’єктів вимірювань .....	.....
4.4 Розробка коду .....	.....
Висновки до розділу 5.....	.....
5. ТОЧНІСТЬ ТА НАДІЙНІСТЬ	
СИСТЕМИ.....	.....
ВИСНОВОК	
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	
Додаток А	

ВСТУП

Актуальність теми. У сучасному промисловому виробництві постійно зростають вимоги до якості поверхні виробів, оскільки саме стан поверхні значною мірою визначає експлуатаційні характеристики, надійність та довговічність продукції. Наявність дефектів поверхні може призводити до передчасного зносу деталей, погіршення їх функціональних властивостей та економічних втрат підприємств.

Незважаючи на широке застосування різноманітних методів контролю якості поверхні, значна частина з них базується на візуальному контролі або використанні контактних засобів вимірювання. Такі методи є трудомісткими, залежать від кваліфікації оператора та не завжди забезпечують необхідну об'єктивність і повторюваність результатів. Особливо складним є контроль мікронерівностей і складної структури поверхні, що потребує застосування сучасних методів цифрової обробки та аналізу.

У зв'язку з цим актуальним є впровадження комп'ютеризованих систем автоматизованого контролю якості поверхні промислових виробів. Використання фрактальних моделей дозволяє більш повно описати геометричну структуру поверхні, кількісно оцінити її складність та виявляти дефекти, які важко ідентифікувати традиційними методами.

Отже, актуальність розробки комп'ютеризованої системи контролю якості поверхні промислових виробів на основі фрактальних моделей полягає у підвищенні точності та об'єктивності контролю, зменшенні впливу людського фактора та автоматизації процесу оцінювання якості поверхні.

Метою даної роботи є розробка комп'ютеризованої системи контролю якості поверхні промислових виробів з використанням фрактальних моделей, яка забезпечує автоматизований аналіз поверхні та підвищені метрологічні характеристики контролю.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі **задачі**:

провести аналіз існуючих методів і систем контролю якості поверхні промислових виробів;

обґрунтувати доцільність застосування фрактальних моделей для аналізу поверхні;

розробити структуру комп'ютеризованої системи контролю якості поверхні;

розробити алгоритм роботи системи та програмне забезпечення для аналізу зображень поверхні;

виконати оцінювання точності та надійності розробленої системи.

Об'єкт дослідження – процеси контролю якості поверхні промислових виробів.

Предмет дослідження – комп'ютеризована система контролю якості поверхні промислових виробів на основі фрактальних моделей.

Методи дослідження базуються на методах цифрової обробки зображень, фрактального аналізу, аналітичному описі параметрів поверхні, використанні алгоритмів комп'ютерного моделювання та статистичній обробці результатів досліджень.

Наукова новизна роботи полягає в тому, що:

удосконалено структуру комп'ютеризованої системи контролю якості поверхні промислових виробів;

удосконалено програмно-алгоритмічний метод оцінювання якості поверхні на основі фрактальних моделей.

Практична цінність роботи полягає в тому, що:

запропоновано комп'ютеризовану систему автоматизованого контролю якості поверхні промислових виробів;

розроблено програмне забезпечення для аналізу поверхні з використанням фрактального підходу;

результати роботи можуть бути використані для підвищення ефективності систем контролю якості на промислових підприємствах.

Структура та обсяг роботи.

Дана робота складається з анотації, вступу, 5 основних розділів, висновків, переліку використаних літературних джерел та додатку. Робота викладена на сторінках основного тексту і містить рисунків, таблиці та джерел.

1.ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ

1.1 Призначення та область застосування

Комп'ютеризовані системи контролю якості поверхні промислових виробів на основі фрактальних моделей призначені для автоматизованого, високоточного аналізу та оцінки стану поверхонь виробів. Головне завдання цих систем полягає у виявленні та класифікації дефектів поверхні, таких як тріщини, подряпини, нерівності, та інші аномалії, що можуть впливати на якість і функціональність виробів. Використання фрактальних моделей дозволяє аналізувати складні геометричні форми та мікроструктури поверхонь з високою точністю.

Області застосування:

1. Металургія та машинобудування:Металеві вироби, які можуть мати тріщини, подряпини, нерівності.
2. Авіаційна та космічна промисловість:Композитні матеріали, що використовуються в авіаційній та космічній промисловості.
3. Електроніка та мікроелектроніка:Електронні компоненти та мікросхеми з мікроструктурними дефектами.
4. Автомобільна промисловість:Автомобільні деталі, що мають поверхневі дефекти.
5. Виробництво медичного обладнання:Медичне обладнання, яке потребує високої якості поверхні.
6. Виробництво побутової техніки:Побутова техніка з різноманітними поверхневими дефектами.
7. Енергетика:Енергетичні установки та їх компоненти, що вимагають високої точності поверхні.

Початок розробки:квітень 2024

Кінець розробки:червень 2024

1.2 Умови експлуатації

Робоча температура: Підтримання стабільної температури в діапазоні від +10°C до +35°C для забезпечення стабільної роботи обладнання.

Вологість: Відносна вологість повітря в межах 30-70%, що дозволяє уникнути конденсації та корозії компонентів системи.

Фільтрація повітря: Використання систем фільтрації для зменшення кількості пилу та інших забруднень у повітрі, що може впливати на роботу оптичних систем.

Регулярне очищення поверхонь обладнання для зменшення впливу забруднень на точність вимірювань.

Вібрації:Відсутні

1.3. Технічні параметри прилада

1.Об'єм інформації на вхід:

Вхідні дані: Зображення високої роздільної здатності, отримані за допомогою камер або сканерів.

Роздільна здатність зображень: Мінімум 12 МП.

Частота кадрів: До 30 кадрів за секунду (для режиму реального часу).

Обсяг даних: До 1 ГБ на зображення залежно від роздільної здатності та формату.

2. Об'єм інформації на виході:

Вихідні дані: Звіти про виявлені дефекти, аналітичні дані про якість поверхні, фрактальні параметри поверхні.

Формат даних: PDF звіти, CSV файли для аналітики, графічні зображення з позначеннями дефектів.

3.Режими роботи системи:

Автоматичний режим:

4.Технічні характеристики

1) Швидкодія:

Процесор: Багатоядерний (не менше 8 ядер), частота мінімум 3.0 ГГц.

Обробка зображень: До 10 зображень в секунду при повній роздільній здатності.

2) Точність:

Виявлення дефектів: До 10 мкм для точних поверхневих дефектів.

3) Запізнення:

Обробка даних: Мінімальне запізнення до 100 мс при обробці зображень в реальному часі.

4) Надійність:

Середній час напрацювання на відмову (MTBF): Не менше 50 000 годин.

Гарантійний термін: Мінімум 2 роки при умові регулярного технічного обслуговування.

Споживча потужність

1. Енергоспоживання:

Система: До 1000 Вт залежно від комплектації.

Камери та освітлення: Додатково до 300 Вт.

Вимоги до взаємозамінності блоків та вузлів

1. Уніфіковані блоки:

Використання стандартних інтерфейсів: USB, Ethernet, HDMI, що забезпечує легку заміну компонентів.

Модульна архітектура: Забезпечує легку заміну окремих модулів (камери, сканери, процесорні блоки).

2. Взаємозамінність:

Заміна компонентів: Можливість швидкої заміни окремих блоків без значного простою системи.

Сумісність: Використання стандартних протоколів передачі даних і форматів зображень для забезпечення сумісності з різними компонентами.

1.4.Вимоги до конструктивного оформлення

Надійність: середній час безвідмовної роботи (MTBF) системи може складати від 10 000 до 50 000 годин, залежно від умов експлуатації та якості компонентів.

Точність: похибка виявлення дефектів складає менше 0,1 мм, що забезпечує високу точність контролю якості поверхні.

Розміри конструкції:

– Вхідний блок з датчиками: 500 мм x 300 мм x 200 мм

- Блок обробки інформації (комп'ютер та додаткове обладнання): 600 мм x 400 мм x 300 мм
- Вихідний блок (візуалізація результатів та керування): 400 мм x 300 мм x 200 мм

Висновки до 1 розділу

У даному розділі було визначено призначення та область застосування комп'ютеризованої системи контролю якості поверхні промислових виробів на основі фрактальних моделей. Показано, що система орієнтована на автоматизований аналіз складних поверхневих структур з метою виявлення та класифікації дефектів, які можуть негативно впливати на експлуатаційні характеристики виробів.

Проаналізовано основні умови експлуатації системи, які забезпечують її стабільну та надійну роботу в промислових умовах. Визначені вимоги до температурного режиму, вологості, чистоти повітря та відсутності вібрацій дозволяють гарантувати точність вимірювань і довговічність обладнання.

Наведено технічні параметри приладу, що характеризують обсяги вхідної та вихідної інформації, режими роботи, швидкодію, точність, затримку обробки даних, надійність та енергоспоживання системи. Встановлено, що запропоновані характеристики відповідають вимогам сучасних систем технічного контролю та дозволяють використовувати систему в режимі реального часу.

Окрему увагу приділено вимогам до взаємозамінності блоків і вузлів та конструктивного оформлення системи. Модульна архітектура та використання стандартних інтерфейсів забезпечують гнучкість, зручність обслуговування та можливість подальшої модернізації системи без суттєвих змін її структури.

Таким чином, сформульовані у розділі вимоги створюють необхідну основу для подальшої розробки структурної схеми, алгоритмічного та програмного забезпечення комп'ютеризованої системи контролю якості поверхні на основі фрактального аналізу.

2. ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ СИСТЕМ

Сучасний контроль якості поверхні промислових виробів ґрунтується на широкому застосуванні комп'ютеризованих систем, які використовують методи цифрової обробки зображень та фрактального аналізу. Такі системи забезпечують автоматизацію процедур контролю, що дозволяє суттєво підвищити точність, стабільність і ефективність виявлення поверхневих дефектів. Використання фрактальних моделей надає можливість аналізувати складні геометричні та текстурні характеристики поверхонь, які складно оцінити традиційними методами.

Фрактальні системи здійснюють аналіз текстурних властивостей поверхні виробів шляхом застосування математичних моделей, що описують нерегулярні та складні геометричні структури. Одним з основних параметрів такого аналізу є фрактальна розмірність, яка використовується для оцінки шорсткості, неоднорідності та інших характеристик поверхні.

Приклади фрактальних систем:

FRACTAL ANALYSIS SYSTEMS (FAS)

Дана система застосовує фрактальні алгоритми для кількісної оцінки якості поверхні виробів.

Сфера застосування: металургійна галузь, виробництво електронних компонентів.

Переваги: висока точність виявлення дефектів, ефективний аналіз складних текстур.

Недоліки: значні вимоги до обчислювальних ресурсів та складність процесу налаштування.

SURFACE INSPECTION SYSTEMS BASED ON FRACTAL GEOMETRY (SIS-FG)

Система використовує методи фрактальної геометрії для аналізу поверхневих дефектів.

Сфера застосування: автомобільна та аерокосмічна промисловість.

Переваги: висока швидкість обробки даних та повна автоматизація процесу контролю.

Недоліки: висока вартість обладнання та необхідність використання спеціалізованого програмного забезпечення.

Останнім часом у системах контролю якості поверхні все частіше застосовуються методи машинного навчання та штучного інтелекту, які дозволяють автоматично аналізувати зображення та класифікувати виявлені дефекти.

Machine Learning-Based Surface Inspection Systems (ML-SIS)

Системи даного типу використовують алгоритми машинного навчання для класифікації дефектів поверхні.

Сфера застосування: виробництво друкованих плат, текстильна промисловість.

Переваги: висока точність, адаптивність та здатність до самонавчання.

Недоліки: потреба у великому обсязі навчальних даних та складність інтеграції у наявні виробничі лінії.

Deep Learning Surface Inspection Systems (DL-SIS)

Дані системи застосовують методи глибокого навчання для аналізу зображень поверхні.

Сфера застосування: медична техніка, оптична промисловість.

Переваги: висока ефективність виявлення мікродефектів та можливість обробки великих обсягів інформації.

Недоліки: значні вимоги до обчислювальних ресурсів і необхідність регулярного оновлення моделей.

До традиційних систем контролю належать методи, що базуються на оптичних та контактних вимірюваннях.

Optical Surface Inspection Systems (OSIS)

Використовують оптичні методи для виявлення дефектів поверхні виробів.

Сфера застосування: виробництво скла та напівпровідникових матеріалів.

Переваги: висока швидкість аналізу та надійність роботи.

Недоліки: обмежені можливості виявлення мікродефектів та залежність від умов освітлення.

Contact-Based Surface Inspection Systems (CB-SIS)

Застосовують контактні методи для оцінки шорсткості та інших параметрів поверхні.

Сфера застосування: металургія, виробництво механічних компонентів.

Переваги: висока точність вимірювань та простота використання.

Недоліки: низька швидкість контролю та можливість пошкодження поверхні виробу.

На сьогоднішній день існує низка комп'ютеризованих систем контролю якості поверхні промислових виробів, що використовують фрактальні моделі або методи аналізу поверхні. До таких систем належать Wyko NT9100 Optical Profiler, Veeco Wyko Profilometer, Bruker ContourGT Surface Metrology System та Zygo NewView Surface Profilometer. Зазначені системи широко застосовуються в різних галузях промисловості для вимірювання та аналізу параметрів поверхні, зокрема шорсткості, текстури та фрактальних характеристик. Кожна з цих систем має власні особливості та переваги, які визначають сферу її практичного використання.

Wyko NT9100 Optical Profiler є високоточним оптичним профілометром, призначеним для детального аналізу поверхонь виробів з високою роздільною здатністю. Дана система дозволяє не лише виконувати вимірювання шорсткості, але й досліджувати текстуру, форму та інші геометричні параметри поверхні, що є важливими для забезпечення якості виробів.

До основних характеристик Wyko NT9100 належать:

- висока роздільна здатність, яка забезпечує можливість аналізу мікроскопічних дефектів та нерівностей;

- широкий діапазон вимірювань, що дозволяє працювати з плоскими, криволінійними, пористими та оптично прозорими поверхнями;

- висока швидкість сканування, що забезпечує ефективний контроль якості навіть при великих обсягах виробництва;

- зручний та інтуїтивно зрозумілий інтерфейс користувача;

розширені функціональні можливості, включаючи фрактальний аналіз, оцінку рельєфу, вимірювання шорсткості та геометричний аналіз.

Wyko NT9100 Optical Profiler широко застосовується у машинобудуванні, електронній промисловості, виробництві медичної техніки та інших галузях, де контроль якості поверхні є критично важливим етапом технологічного процесу.



Рис 2.1 Зовнішній вигляд Wyko NT9100 Optical Profiler[2]

2. Veeco Wyko Profilometer є ще однією високоточною системою, призначеною для аналізу поверхні промислових виробів. Даний прилад використовується для вимірювання тривимірних профілів поверхні з високою точністю та роздільною здатністю. Назва «Veeco» походить від компанії-розробника системи, тоді як «Wyko» є торговою маркою, під якою було представлено цей профілометр.

До основних характеристик Veeco Wyko Profilometer належать:

Висока точність вимірювань, що забезпечує отримання детальної інформації про форму та мікроструктуру поверхні виробів.

Широкий діапазон вимірювання, який дозволяє проводити аналіз різних типів поверхонь, зокрема плоских, криволінійних, пористих та оптично прозорих.

Висока швидкість вимірювань, що робить можливим ефективний контроль якості навіть за умов масового виробництва.

Розширені можливості аналізу, включаючи визначення шорсткості, оцінку рельєфу поверхні, обчислення фрактальних параметрів та інші аналітичні функції.

Зручний та інтуїтивно зрозумілий інтерфейс користувача, який спрощує керування процесом вимірювань і обробку отриманих результатів.

Veeco Wyko Profilometer широко застосовується в промисловості для контролю якості виробів, дослідження поверхневих властивостей матеріалів, а також у науково-дослідних і лабораторних умовах.



Рис 2.2 Зовнішній вигляд Veeco Wyko Profilometer[3]

3. Bruker ContourGT Surface Metrology System є високоточною системою метрології поверхонь, призначеною для детального аналізу та вимірювання параметрів поверхні промислових виробів із високою просторовою роздільною здатністю. Система розроблена компанією *Bruker* та широко застосовується в різних галузях промисловості для забезпечення контролю якості продукції та дослідження властивостей поверхонь матеріалів.

До основних характеристик Bruker ContourGT Surface Metrology System належать:

Можливість тривимірних вимірювань поверхні, що дозволяє отримувати високоточні 3D-профілі поверхонь та детально аналізувати їх мікрорельєф.

Широкий діапазон вимірювання, який забезпечує аналіз різних типів поверхонь, зокрема плоских, криволінійних, пористих і оптично прозорих матеріалів.

Розширені функціональні можливості аналізу, що включають вимірювання параметрів шорсткості, оцінку рельєфу, визначення фрактальних характеристик поверхні та інші метрологічні показники.

Висока швидкість вимірювань, яка дозволяє здійснювати оперативний контроль якості виробів навіть в умовах серійного та масового виробництва.

Зручний та інтуїтивно зрозумілий інтерфейс користувача, що спрощує налаштування системи, керування процесом вимірювань та аналіз отриманих результатів.

Додатковою перевагою системи Bruker ContourGT є можливість інтеграції з автоматизованими виробничими лініями та використання програмних модулів для статистичного аналізу результатів вимірювань. Це дозволяє не лише виявляти дефекти поверхні, але й здійснювати моніторинг стабільності технологічних процесів.

Таким чином, Bruker ContourGT Surface Metrology System забезпечує підвищення ефективності контролю якості виробів і надає достовірну

інформацію про стан поверхні, що може бути використана для оптимізації та вдосконалення технологічних процесів виробництва.



Рис 2.3 Зовнішній вигляд Bruker ContourGT Surface Metrology System[4]
 Zygo NewView Surface Profilometer є високоточним оптичним профілометром, призначеним для вимірювання та аналізу тривимірних профілів поверхонь з високою просторовою роздільною здатністю. Дана система розроблена компанією *Zygo Corporation* і широко застосовується в різних галузях промисловості для контролю якості виробів, а також для наукових досліджень поверхневих властивостей матеріалів.

До основних характеристик Zygo NewView Surface Profilometer належать:

Висока точність вимірювань, що забезпечує отримання детальної та достовірної інформації про геометричну структуру та форму поверхні виробів.

Широкий діапазон вимірювання, який дозволяє проводити аналіз плоских, криволінійних, пористих та оптично прозорих поверхонь.

Висока просторова роздільна здатність, завдяки якій система здатна виявляти мікродефекти, нерівності та мінімальні відхилення поверхні.

Розширений набір аналітичних функцій, що включає вимірювання параметрів шорсткості, аналіз рельєфу, обчислення фрактальних характеристик та інші методи оцінки якості поверхні.

Зручний і інтуїтивно зрозумілий інтерфейс користувача, який спрощує процес керування вимірюваннями та обробку результатів.

Додатковою перевагою Zygo NewView Surface Profilometer є використання безконтактної інтерферометричної технології, що усуває ризик механічного пошкодження досліджуваної поверхні та забезпечує високу повторюваність результатів. Система також підтримує інтеграцію з програмними засобами статистичного аналізу, що дозволяє застосовувати її у складі автоматизованих систем контролю якості.

Таким чином, Zygo NewView Surface Profilometer є ефективним інструментом для високоточного контролю та дослідження поверхонь виробів, забезпечуючи достовірні дані, необхідні для оптимізації та вдосконалення технологічних процесів виробництва.



Рис 2.4 Зовнішній вигляд Zygo NewView Surface Profilometer [5]

5. Zygo NewView Surface Profilometer забезпечує ефективний контроль якості промислових виробів і надає достовірну інформацію про стан та характеристики їхніх поверхонь. Отримані дані можуть бути використані для подальшої оптимізації технологічних процесів виробництва, зниження відсотка браку та підвищення загальної якості продукції.

1. Традиційні методи візуального контролю

Суб'єктивність оцінювання: результати перевірки значною мірою залежать від досвіду та індивідуальних критеріїв оператора, що знижує повторюваність і об'єктивність контролю.

Обмежена точність: виявлення дрібних і мікроскопічних дефектів є ускладненим або взагалі неможливим.

Висока трудомісткість: ручний контроль потребує значних часових витрат, що негативно впливає на продуктивність виробництва.

2. Методи механічного сканування

Фізичний контакт із поверхнею: під час вимірювань існує ризик пошкодження виробу, що є критичним для високоточних або крихких матеріалів.

Обмежена чутливість: механічні системи часто не здатні виявляти дефекти мікрорівня.

Високі витрати на обслуговування: регулярна заміна зношених елементів збільшує експлуатаційні витрати.

3. Традиційні оптичні системи

Чутливість до зовнішніх факторів: зміни освітлення, наявність пилу або вібрацій можуть суттєво впливати на точність результатів.

Обмежена роздільна здатність: не всі оптичні системи забезпечують достатній рівень деталізації для виявлення мікродефектів.

Складність налаштування та калібрування: потреба у частому коригуванні параметрів ускладнює експлуатацію.

4. Методи на основі класичних статистичних моделей

Неповнота математичних моделей: класичні підходи не завжди враховують складну структуру поверхонь і різноманіття дефектів.

Висока залежність від якості вхідних даних: похибки у вибірці можуть призводити до некоректних результатів аналізу.

Низька адаптивність: складність пристосування до нових типів матеріалів або змін умов виробництва.

1. Покращення алгоритмів обробки даних

Застосування гібридних підходів: поєднання фрактальних моделей із методами машинного навчання дозволяє суттєво підвищити точність виявлення та класифікації дефектів.

Розширення бази навчальних зразків: використання різноманітних типів поверхонь і дефектів підвищує універсальність та надійність алгоритмів.

2. Оптимізація програмного забезпечення

Інтеграція з виробничими системами: забезпечення сумісності з автоматизованими лініями виробництва та системами управління якістю.

Покращення інтерфейсу користувача: створення інтуїтивно зрозумілого інтерфейсу для зменшення ймовірності помилок оператора та підвищення зручності роботи.

3. Апаратні вдосконалення

Використання високочутливих сенсорів: впровадження сучасних оптичних і сенсорних технологій для підвищення точності вимірювань.

Зменшення впливу зовнішніх факторів: застосування захисних і стабілізаційних рішень для мінімізації впливу пилу, змін освітлення та температурних коливань.

4. Адаптивність та масштабованість системи

Модульна архітектура: можливість швидкого розширення функціональності та адаптації системи до різних типів поверхонь і виробничих умов.

Алгоритми самонавчання: впровадження механізмів автоматичного вдосконалення на основі нових даних без необхідності повного переналаштування системи.

Висновок до розділу 2

У результаті аналізу сучасних систем контролю якості поверхні встановлено, що існуючі рішення, незважаючи на високу точність і широкі функціональні можливості, мають низку суттєвих недоліків, зокрема високу вартість, складність експлуатації, значні апаратні вимоги та обмежену адаптивність.

Застосування фрактального аналізу у поєднанні з сучасними методами обробки зображень і машинного навчання є перспективним напрямом розвитку систем контролю якості поверхні. Запропоновані напрями вдосконалення дозволяють підвищити точність і надійність виявлення дефектів, зменшити залежність від зовнішніх факторів та забезпечити гнучку інтеграцію системи у різні виробничі процеси.

Отримані результати обґрунтовують доцільність розробки власної комп'ютеризованої системи контролю якості поверхні на основі фрактальних моделей, що буде розглянуто в наступних розділах роботи.

3. РОЗРОБКА СТРУКТУРНОЇ СХЕМИ

3.1. Обґрунтування складових комп'ютеризованої системи

Вхідний блок:

- Збір даних від сенсорів (камери, сканери) з об'єкта контролю.
- Попередня обробка сигналів (фільтрація, посилення).
- Перетворення сигналів для подальшої обробки.

Блок обробки інформації:

- Аналіз зображень за допомогою фрактальних моделей.
- Виявлення дефектів та аномалій на поверхні виробів.
- Сортування та класифікація виявлених дефектів.

Вихідний блок:

- Відображення результатів на моніторі або інтерфейсі користувача.
- Виведення сигналів для керування подальшими процесами (наприклад, автоматичне сортування виробів).
- Збереження даних для подальшого аналізу та звітності.

Вхідний блок:

- Сенсори та камери: Збирають дані з поверхні виробу.
- Підсилювачі та фільтри: Обробляють сигнали від сенсорів.
- Перетворювачі: Преобразують сигнали у формат, зручний для аналізу.

Блок обробки інформації:

- Модуль обробки зображень: Використовує фрактальні алгоритми для аналізу поверхні.
- Модуль виявлення дефектів: Виявляє та класифікує дефекти.
- Модуль зберігання даних: Зберігає результати для подальшого аналізу.

Вихідний блок:

- Інтерфейс користувача: Відображає результати аналізу.
- Система керування: Відправляє сигнали на сортувальні або інші машини для подальших дій.

3.2 Структурна схема

Структурна схема — схема, яка визначає основні функціональні частини виробу, їх взаємозв'язки та призначення. Під функціональною частиною розуміють складову частину схеми: елемент, пристрій, функціональну групу, функціональну ланку.

Структурна схема призначена для відображення загальної структури пристрою, тобто його основних блоків, вузлів, частин та головних зв'язків між ними. Із структурної схеми повинно бути зрозуміло, навіщо потрібний даний пристрій і як він працює в основних режимах роботи, як взаємодіють його частини. Позначення елементів структурної схеми можуть обиратись довільно, хоча загальноприйнятих правил виконання схем слід дотримуватись.

На структурних електричних схемах (ГОСТ 2.702-75) у вигляді прямокутників або умовних графічних познач зображають всі основні частини виробу (елементи, пристрої, функціональні групи) і показують взаємозв'язок

між ними. При цьому графічна побудова схеми має давати наочне уявлення про послідовність взаємодії функціональних частин виробу, яка простежується за допомогою стрілок, що наносяться на лінії взаємозв'язку.

У разі виконання функціональних частин у вигляді прямокутників найменування функціональної частини, тип елемента і позначення документа записують всередині них. При великій кількості функціональних частин допускається замість найменування, типів і позначень проставляти порядкові номери справа від зображення або над ним, як правило, зверху вниз в напрямку зліва направо. У цьому випадку найменування, типи і позначення записують у вигляді таблиці, розміщеній на полі схеми.

Структурна схема комп'ютеризованої системи контролю якості поверхні промислових виробів на основі фрактальних моделей може бути представлена наступним чином:

1. Захоплення зображення:
 - Камера: Використовується для захоплення зображення поверхні виробу.
 - Об'єktiv: Забезпечує детальне зображення текстури поверхні.
 - Освітлення: Забезпечує рівномірне освітлення для чіткого зображення.
 2. Обробка зображення:
 - Комп'ютер: Обробляє зображення, захоплене камерою.
 - Програмне забезпечення для обробки зображень: Використовується для перетворення зображення в відтінки сірого, розрахунку фрактальної розмірності та візуалізації фрактальної маски.
 3. Аналіз фрактальної розмірності:
 - Алгоритм фрактальної розмірності: Використовується для розрахунку фрактальної розмірності зображення.
 - Фрактальна розмірність: Числове значення, яке характеризує складність та неоднорідність текстури поверхні.
 4. Виявлення дефектів:
 - Порогове значення: Використовується для виділення ділянок зображення з високою фрактальною розмірністю, які можуть бути дефектами.
 - Класифікатор дефектів: Використовується для класифікації дефектів за типом (наприклад, подряпини, тріщини, пори).
 5. Візуалізація та звітування:
 - Візуалізація: Відображення фрактальної маски та класифікованих дефектів.
 - Звітування: Генерація звітів про результати контролю якості, включаючи фрактальну розмірність, типи дефектів та їх розташування.
- Зв'язки між компонентами:
1. Камера надсилає зображення до комп'ютера.
 2. Програмне забезпечення для обробки зображень обробляє зображення та надсилає його на алгоритм фрактальної розмірності.
 3. Алгоритм фрактальної розмірності розраховує фрактальну розмірність зображення та надсилає її на порогове значення.

4. Порогове значення виділяє ділянки з високою фрактальною розмірністю та надсилає їх на класифікатор дефектів.

5. Класифікатор дефектів класифікує дефекти та надсилає результати на візуалізацію та звітування.

6. Візуалізація та звітування відображають результати контролю якості користувачеві.

1.Захоплення зображення:

Камера: Використовується для захоплення зображення поверхні виробу.

– Цифрова камера, або цифровий апарат — пристрій, що використовується для створення фото-знімків, в якому світлочутливим матеріалом є матриця або кілька матриць, котрі складаються з окремих пікселів, сигнал з яких представляється, обробляється і зберігається в самому апараті в цифровому вигляді. Це найпоширеніший пристрій для створення цифрових фотознімків. Більшість камер 21-го сторіччя є цифровими



Рис 3.1 Цифрова камера[6]

– Об'єтив з макрозйомкою: Забезпечує детальне зображення текстури поверхні.

Макрооб'єтив - це тип об'єктива, який використовується для зйомки дрібних об'єктів з близької відстані. Він має велику фокусну відстань і невелику глибину різкості, що дозволяє отримувати детальні зображення з розмитим фоном.

Переваги використання макрооб'єктива для комп'ютеризованої системи контролю якості:

- Деталізація: Макрооб'єтив дозволяє отримувати чіткі та детальні зображення дрібних дефектів, які можуть бути невидимі неозброєним оком.
- Глибина різкості: Невелика глибина різкості макрооб'єктива дозволяє зосередитися на дефекті, розмиваючи фон, що полегшує його аналіз.
- Універсальність: Макрооб'єктиви можна використовувати для зйомки різноманітних поверхонь, включаючи метал, пластик, текстиль та харчові продукти.

Приклади використання макрооб'єктивів у системі контролю якості:

- Перевірка електронних компонентів: Макрооб'єктиви можуть використовуватися для виявлення дефектів на друкованих платах, таких як тріщини, паяльні містки та відсутні компоненти.
- Інспекція механічних деталей: Макрооб'єктиви можуть використовуватися для виявлення дефектів на механічних деталях, таких як подряпини, тріщини, пори та нерівності.
- Контроль якості харчових продуктів: Макрооб'єктиви можуть використовуватися для виявлення дефектів на харчових продуктах, таких як синці, гниль, пліснява та сторонні предмети.

Вибір макрооб'єктива:

При виборі макрооб'єктива для системи контролю якості слід враховувати такі фактори:

- Фокусна відстань: Фокусна відстань об'єктива визначає, наскільки близько ви можете підійти до об'єкта. Більша фокусна відстань дозволяє вам підійти ближче, але також може призвести до більшої дисторсії.
- Максимальна діафрагма: Максимальна діафрагма об'єктива визначає, скільки світла потрапляє на датчик камери. Більша максимальна діафрагма дозволяє використовувати більш короткі витримки затвора та зменшувати шум зображення.
- Якість зображення: Якість зображення об'єктива визначається його різкістю, контрастністю та аберациями. Вибирайте об'єктив із високою якістю зображення, щоб отримати чіткі та детальні зображення.



Рис 3.3 Макрооб'єктив[7]

- Джерело світла: Забезпечує рівномірне освітлення для чіткого зображення.
2. Передача зображення:
 - Кабель USB: Передає зображення з камери на комп'ютер.
 3. Обробка зображення:
 - Комп'ютер: Обробляє зображення, захоплене камерою.
 - Програмне забезпечення для обробки зображень: Використовується для:
 - Перетворення зображення в відтінки сірого.
 - Застосування алгоритму фрактальної розмірності для розрахунку фрактальної розмірності зображення.
 - Візуалізації фрактальної маски.
 - Виявлення дефектів на основі фрактальної маски та порогового значення.

- Класифікації виявлених дефектів.
- 4. Зберігання та візуалізація:
 - Зберігання: Зберігає результати аналізу (зображення, фрактальну розмірність, класифіковані дефекти) на комп'ютері або в хмарному сховищі.
 - Візуалізація: Відображає:
 1. Оригінальне зображення.
 2. Фрактальну маску.
 3. Класифіковані дефекти.
 - 5. Звітування:
 - Генерація звітів: Створює звіти про результати контролю якості, включаючи фрактальну розмірність, типи дефектів, їх розташування та зображення.
- Взаємодія компонентів:
 1. Камера захоплює зображення поверхні виробу.
 2. Зображення передається на комп'ютер через кабель USB.
 3. Програмне забезпечення для обробки зображень:
 - Перетворює зображення в відтінки сірого.
 - Застосовує алгоритм фрактальної розмірності для розрахунку фрактальної розмірності зображення.
 - Візуалізує фрактальну маску.
 - Виявляє дефекти на основі фрактальної маски та порогового значення.
 - Класифікує виявлені дефекти.
 4. Результати аналізу зберігаються на комп'ютері або в хмарному сховищі.
 5. Відображаються:
 - Оригінальне зображення. Фрактальна маска.
 - Класифіковані дефекти.
 6. Створюються звіти про результати контролю якості.
- Переваги використання фрактальних моделей для контролю якості:
 - Ефективність: Фрактальні моделі можуть ефективно аналізувати складні та неоднорідні текстури.
 - Стійкість до шуму: Фрактальні моделі стійкі до шуму та варіацій освітлення.

Аналіз у реальному часі: Фрактальні алгоритми можуть бути реалізовані для аналізу зображень у реальному часі.

Прилади використані в роботі:

Ноутбук: ASUS TUF Gaming F15[8] — це високопродуктивний ігровий ноутбук, розроблений для геймерів і професіоналів, які потребують потужного апаратного забезпечення. Цей ноутбук поєднує в собі міцний дизайн, високоякісні компоненти та сучасні технології, що робить його відмінним вибором для інтенсивних ігрових сесій та продуктивної роботи.

Технічні характеристики

Процесор:

Модель: Intel Core i5-11400H @ 2.70GHz 2.69 GHz Ядра/потоки: 4/8 (i5)

Тактова частота: До 5.0 ГГц з Turbo Boost

Графічний процесор:

Модель: RTX 3050

Відеопам'ять: 4 ГБ GDDR6

Оперативна пам'ять:

Тип: DDR4

Обсяг: 16 ГБ

Частота: 2933 МГц або 3200 МГц

Зберігання даних:

Тип: NVMe SSD

Обсяг: 500 ГБ, можливість розширення за допомогою другого слота M.2

Дисплей:

Розмір: 15.6 дюймів

Роздільна здатність: Full HD (1920x1080)

Частота оновлення: 144 Гц

Покриття: Матове антиблікове

Акумулятор:

Ємність: 48 Вт·год

Час роботи: До 8-10 годин у режимі звичайного використання

Охолодження:

Технологія: Два вентилятори, кілька теплових трубок, самоочищуюча система охолодження

Вентиляційні отвори: Множинні, з додатковими отворами для ефективного відведення тепла

Порти:

USB: 3x USB 3.2 Type-A, 1x USB 3.2 Type-C

HDMI: 2.0b

Ethernet: RJ-45

Аудіо: 3.5 мм комбінований аудіороз'єм

Допоміжні: Порт для замка Kensington

Бездротові з'єднання:

Wi-Fi: Wi-Fi 6 (802.11ax)

Bluetooth: 5.1

Дизайн та конструкція:

– Корпус: Виготовлений з високоміцного пластику з металевими елементами, відповідає військовим стандартам MIL-STD-810H для захисту від ударів і вібрацій.

– Клавіатура: Підсвічування RGB з кількома зонами, спеціальні клавіші WASD, довговічність до 20 мільйонів натискань.

– Габарити: 359 x 256 x 24.9 мм

– Вага: Приблизно 2.3 кг

Програмне забезпечення та функції

– Armoury Crate: Фірмове програмне забезпечення ASUS для налаштування продуктивності, моніторингу системи та керування підсвічуванням.

– Anti-Dust Cooling: Система охолодження з анти-пиловими каналами для продовження терміну служби компонентів.

– DTSUltra: Аудіосистема з підтримкою віртуального об'ємного звуку для кращого занурення у гру.

Камера: Raspberry Pi Camera Module V2

Raspberry Pi Camera Module V2[9] — це компактна та високоякісна камера, спеціально розроблена для використання з мікрокомп'ютерами Raspberry Pi. Вона ідеально підходить для різних проєктів, таких як спостереження, відео-конференції, а також наукові дослідження, де важлива висока роздільна здатність і гнучкість у використанні.

Технічні характеристики:

Сенсор:

Модель сенсора: Sony IMX219

Роздільна здатність: 8 мегапікселів

Розмір сенсора: 1/4 дюйма

Максимальна роздільна здатність зображення: 3280 x 2464 пікселів

Відеозапис:

Роздільна здатність відео: 1080p30, 720p60, 640x480p90

Формати відео: H.264, MJPEG

Об'єктив:

Фокусна відстань: 3.04 мм

Діафрагма: f/2.0

Кут огляду: 62.2 градуса по діагоналі

Інтерфейс:

З'єднання: CSI (Camera Serial Interface), який підключається до спеціального порту на платі Raspberry Pi

Розміри:

Габарити: 25 мм x 23 мм x 9 мм

Вага: Приблизно 3 грами

Особливості:

– Висока роздільна здатність: 8 МП дозволяє отримувати чіткі та детальні зображення, що підходять для аналізу якості поверхні промислових виробів.

– Компактний розмір: Невеликі габарити камери дозволяють інтегрувати її в різні системи без зайвого збільшення розмірів пристрою.

– Гнучкість у використанні: Камера може бути використана в різних проєктах, включаючи машинне бачення, фотозйомку, та наукові дослідження.

– Проста інтеграція: Легко підключається до Raspberry Pi через CSI-інтерфейс, а також підтримується багатьма програмними бібліотеками, такими як OpenCV та Python.

Переваги:

– Низька вартість: Це одна з найекономічніших камер на ринку, яка забезпечує високу якість зображення за доступну ціну (~30-40 USD).

– Підтримка програмного забезпечення: Підтримується безліччю програмних бібліотек, що спрощує розробку і інтеграцію в існуючі проєкти.

– Широка спільнота: Велика спільнота користувачів Raspberry Pi забезпечує доступ до численних ресурсів, прикладів та технічної підтримки.

Застосування:

- Контроль якості поверхні: Використовується для детального аналізу та моніторингу поверхонь промислових виробів за допомогою фрактальних моделей та інших методів обробки зображень.

- Системи спостереження: Ідеально підходить для створення систем відеоспостереження завдяки високій роздільній здатності та можливості запису відео у форматі Full HD.

- Освітні проєкти: Часто використовується у навчальних закладах для навчання робототехніці, програмуванню та системам машинного бачення.

Об'єктив:

Raspberry Pi Camera Lens Kit[9]

Raspberry Pi Camera Lens Kit — це набір об'єктивів, який дозволяє розширити функціональні можливості Raspberry Pi Camera Module V2. Він забезпечує можливість змінювати фокусну відстань та інші параметри зображення для різних застосувань.

Технічні характеристики

Фокусна відстань об'єктивів:

6 мм

12 мм

16 мм

Тип кріплення:

Можливість використання з C- або CS-матрицею.

Перехідники для сумісності з Raspberry Pi Camera Module V2.

Діафрагма:

Зазвичай об'єктиви мають фіксовану діафрагму, яка залежить від конкретної моделі об'єктива.

Кут огляду:

Від 20 градусів до 180 градусів залежно від об'єктива.

Особливості:

- Гнучкість у використанні: Дозволяє змінювати фокусну відстань для різних типів зйомки (макрозйомка, ширококутна зйомка тощо).

- Покращена якість зображення: Використання спеціальних об'єктивів може значно покращити якість зображення порівняно з вбудованим об'єктивом камери.

- Легка інтеграція: Просте кріплення та налаштування для швидкого використання з Raspberry Pi Camera Module V2.

Переваги:

- Висока якість зображення: Можливість використання об'єктивів з високою оптичною якістю для досягнення більш чітких і детальних зображень.

- Змінювані об'єктиви: Легко замінюються об'єктиви залежно від вимог проєкту.

- Розширення можливостей: Можливість адаптації камери для різних застосувань, таких як спостереження, макрозйомка, фотографія з високою деталізацією.

Застосування:

Контроль якості поверхні: Ідеально підходить для проєктів, де потрібна висока деталізація поверхні промислових виробів.

Наукові дослідження: Використовується в різних наукових експериментах, де необхідна точність і чіткість зображень.

– Системи спостереження: Дозволяє налаштовувати кут огляду та фокусну відстань для кращого контролю за об'єктами.

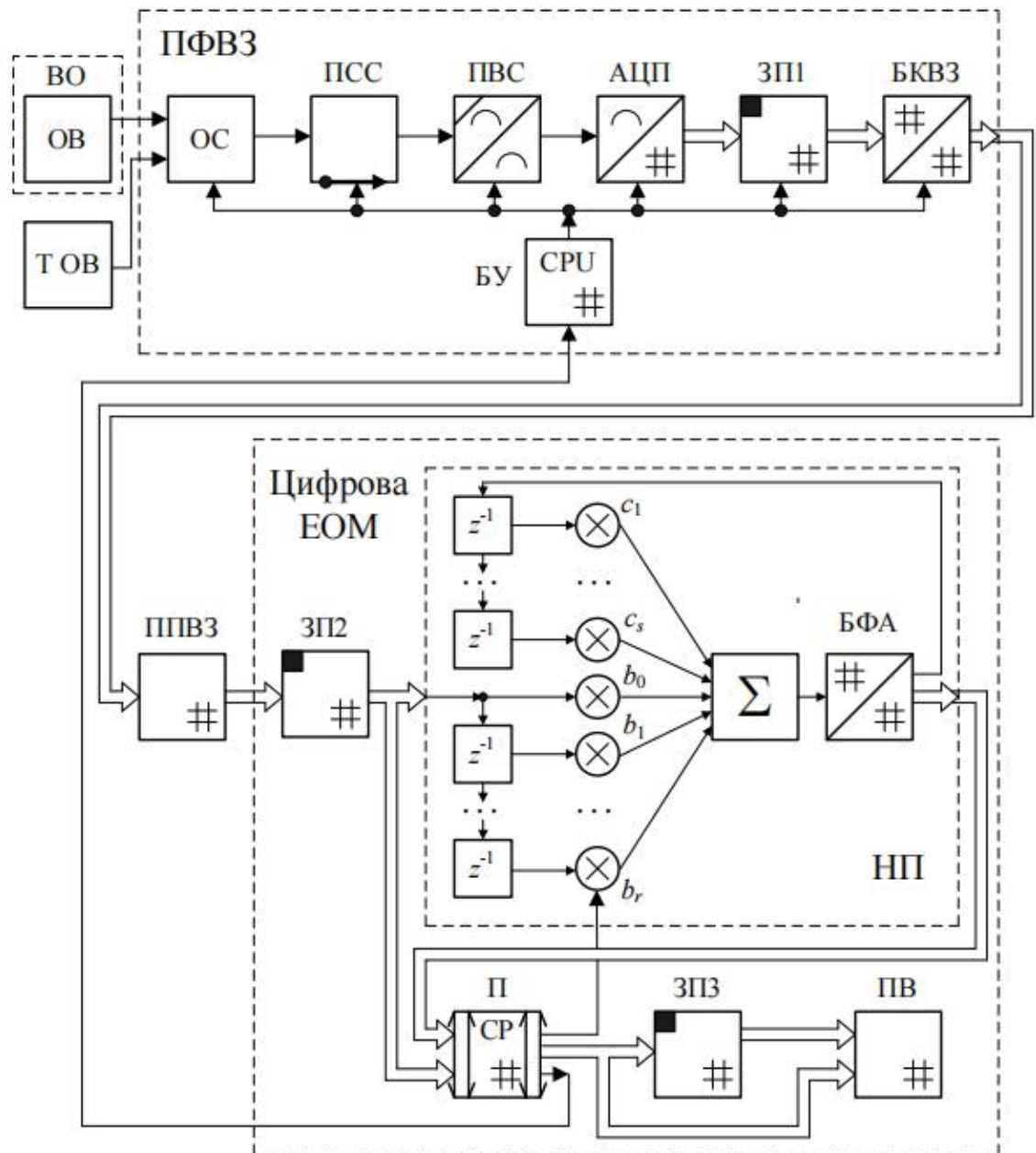


Рис 3.4 Структурна схема роботи

На рис. 3.4 позначено: ОВ – об'єкт вимірювань; ВО – виробниче обладнання; Т ОВ – тестовий ОВ для калібрування вимірювального каналу;

ПФВЗ є пристроєм формування відеозображень, до складу якого входить оптична система (ОС), перетворювач типу «світло–сигнал» (ПСС), підсилювач відеосигналу (ПВС) та аналого-цифровий перетворювач (АЦП). Для зберігання відеоінформації використовуються запам'ятовуючі пристрої ЗП1...ЗП3, а кодування відеозображень здійснюється блоком кодування відеозображень (БКВЗ). Керування роботою ПФВЗ виконується блоком

управління (БУ). Передача цифрових відеозображень до електронно-обчислювальної машини здійснюється за допомогою пристрою передачі відеозображень (ППВЗ). У складі цифрової ЕОМ використовується нейропроцесор (НП), що забезпечує апаратну реалізацію елементів штучних нейронних мереж. До складу системи також входять блок затримки (БЗ), блок функції активації нейронної мережі (БФА), процесор цифрової ЕОМ (П) та пристрій візуалізації (ПВ). Вагові коефіцієнти нейронної мережі $c_1 \dots c_s, b_0 \dots b_{rc1} \dots c_s, b_0 \dots b_{rc1}$ змінюються та налаштовуються відповідно до поточних умов вимірювань.

Для обробки відеозображень у вимірювальній системі застосовується цифрова ЕОМ, додатково оснащена нейропроцесором, що містить базові структурні елементи штучних нейронних мереж. Ці елементи з'єднані у визначеній конфігурації та використовуються для відновлення відеозображень, спотворених випадковими та динамічними похибками вимірювальної інформації про геометричні параметри об'єктів. Крім того, нейронні мережі забезпечують пошук, ідентифікацію та виділення об'єктів вимірювання і їх структурних елементів на відеозображеннях. Завдяки адаптивним властивостям нейронних мереж алгоритми обробки можуть автоматично коригуватися з урахуванням змін умов вимірювання та властивостей об'єктів, що дозволяє компенсувати додаткові похибки та суттєво підвищити точність вимірювань.

У структурі вимірювальної системи вихід другого запам'ятовуючого пристрою відеозображень під'єднано до додаткового входу пристрою візуалізації. Це забезпечує паралельну роботу: результати обробки поточного відеозображення та вимірювання геометричних параметрів відображаються у реальному часі, тоді як цифрова ЕОМ одночасно виконує обробку наступного кадру. Такий підхід дозволяє істотно підвищити швидкість всієї вимірювальної системи.

У системі реалізовано комп'ютеризовану обробку відеозображень об'єктів вимірювання для визначення їх геометричних параметрів. Відеозображення формується оптико-електронним способом шляхом растрового сканування двовимірного образу об'єкта, створеного оптичною системою ПФВЗ на поверхні матричного перетворювача «світло–сигнал». Для подальшої цифрової обробки в ЕОМ застосовуються методи фільтрації та відновлення зображень, алгоритми пошуку та виділення контурів, а також визначення множини точок, що належать об'єкту вимірювання. На основі вимірюваних координат цих точок обчислюються геометричні параметри об'єктів, зокрема лінійні розміри, кути, площі, координати центра мас, орієнтація головної осі інерції, морфометричні характеристики та коефіцієнти геометричної форми. Параметри руху виробів і інші механічні величини визначаються шляхом аналізу часових послідовностей відеозображень з уже виміряними геометричними параметрами.

Під час калібрування вимірювального каналу використовуються тестові об'єкти з відомими лінійними розмірами для визначення масштабних коефіцієнтів у рівняннях вимірювань, а також еталонні об'єкти з наперед заданими характеристиками поверхні. Процедури адаптації та навчання

штучних нейронних мереж дозволяють компенсувати вплив нестаціонарних та несприятливих факторів, характерних для умов промислової експлуатації. У результаті система забезпечує підвищену точність вимірювань (у 2,5–3 рази), з похибкою вимірювання лінійних розмірів до 0,1 мм та кутів до 26 кутових секунд для виробів розмірами до 1500×1200 мм, а також високу швидкодію — час вимірювання одного виробу становить близько 3 секунд.

Технічні засоби системи забезпечують формування та алгоритмічну обробку відеозображень і включають ПФВЗ, ППВЗ та цифрову ЕОМ. Як пристрої формування відеозображень можуть використовуватися аналогові та цифрові відеокамери або цифрові фотоапарати, які формують вихідні сигнали в аналоговій або цифровій формі. На сучасному етапі найбільш ефективними та поширеними є цифрові засоби формування відеозображень, роздільна здатність і швидкодія яких повністю відповідають вимогам вимірювальної системи. Передача відеозображень до цифрової ЕОМ здійснюється через інтерфейси USB або IEEE1394. Для вимірювання швидкорухомих об'єктів у реальному часі застосовуються спеціалізовані високошвидкісні цифрові камери та плати підключення до системної шини ЕОМ.

Підвищення точності вимірювальної системи досягається шляхом алгоритмічної компенсації похибок за рахунок цифрової обробки відеозображень. Існують оптичні та цифрові обчислювальні засоби обробки зображень. Оптичні засоби забезпечують високу швидкодію завдяки паралельній обробці, однак мають обмежену точність через технологічні особливості виготовлення. Тому в даній системі застосовуються цифрові обчислювальні засоби, які забезпечують значно вищу точність результатів. Для додаткового підвищення швидкодії до складу цифрової ЕОМ введено нейропроцесор, що реалізує паралельну обробку відеозображень на основі штучних нейронних мереж.

Відповідно до розроблених принципів побудови, штучні нейронні мережі є ключовим елементом комп'ютеризованої обробки відеозображень у вимірювальній системі. Вони використовуються для виконання лінійних і нелінійних операцій обробки сигналів, що містять вимірювальну інформацію про геометричні параметри об'єктів, зокрема для компенсації динамічних похибок та аналізу відеозображень. Застосування нейропроцесора дозволяє істотно підвищити як точність, так і швидкодію вимірювальної системи.

Для уточнення та налаштування алгоритмів обробки відеозображень можуть використовуватися додаткові запам'ятовуючі пристрої, блок затримки, пристрій візуалізації та інші допоміжні технічні засоби. Вони забезпечують ефективний обмін інформацією між функціональними блоками системи та дозволяють здійснювати вимірювання геометричних параметрів об'єктів у реальному часі з високою точністю та надійністю.

Висновок до розділу 3

У даному розділі було розглянуто структурну побудову та принципи функціонування комп'ютеризованої системи контролю якості поверхні промислових виробів на основі фрактальних моделей. Детально описано склад і призначення вхідного, обчислювального та вихідного блоків системи, а також взаємодію між основними апаратними і програмними компонентами.

Показано, що застосування сучасних засобів захоплення зображень, зокрема цифрових камер з макрооб'єктивами та контрольованим освітленням, забезпечує отримання високоякісних відеозображень, придатних для подальшого аналізу.

Використання фрактальних моделей у поєднанні з методами цифрової обробки зображень і штучними нейронними мережами дозволяє ефективно аналізувати складні та неоднорідні текстури поверхонь, виявляти дефекти різної природи та виконувати їх класифікацію з високою точністю. Запропонована структурна схема забезпечує паралельну обробку та візуалізацію результатів, що суттєво підвищує швидкодію системи і дає можливість реалізувати контроль у режимі реального часу.

Розглянуті технічні засоби, зокрема обчислювальна платформа на базі сучасного ноутбука та камера Raspberry Pi Camera Module V2 з можливістю використання змінних об'єктивів, підтверджують практичну реалізованість та економічну доцільність запропонованого підходу. Завдяки модульній архітектурі та адаптивним алгоритмам система може бути легко інтегрована у різні виробничі процеси та налаштована під конкретні умови експлуатації.

Отже, розроблена структурна схема та принципи побудови комп'ютеризованої системи контролю якості поверхні забезпечують високу точність вимірювань, стійкість до завад, гнучкість у використанні та перспективи подальшого розвитку, що робить дану систему ефективним інструментом для сучасних промислових застосувань.

4. РОЗРОБКА ПРОГРАМИ ТА АЛГОРИТМУ

4.1. Побудова алгоритму

Алгоритм - це точно визначена послідовність дій або інструкцій, які виконуються для розв'язання певної задачі або досягнення певної мети. Алгоритм можна розглядати як набір кроків, які потрібно виконати, щоб отримати бажаний результат.

Алгоритми використовуються в різних галузях, включаючи математику, науку, програмування, комп'ютерні науки та багато інших. Вони є основою для розв'язання проблем, автоматизації процесів і керування системами.

Хороший алгоритм має наступні властивості:

1. **Чіткість:** Кожен крок алгоритму повинен бути ясним і точно визначеним, без неоднозначностей або сумнівів.
2. **Ефективність:** Алгоритм повинен бути ефективним, тобто виконувати задачу швидко та ефективно в межах доступних ресурсів (часу, пам'яті тощо).
3. **Коректність:** Алгоритм повинен давати правильний результат для всіх можливих вхідних даних.
4. **Масштабованість:** Алгоритм повинен бути придатним для використання в різних масштабах, від невеликих до великих задач.

Алгоритми можна описувати за допомогою різних формальних методів, таких як блок-схеми, псевдокод або спеціалізовані мови програмування. Вони дозволяють систематично описувати послідовність дій, взаємозв'язки та умови виконання.

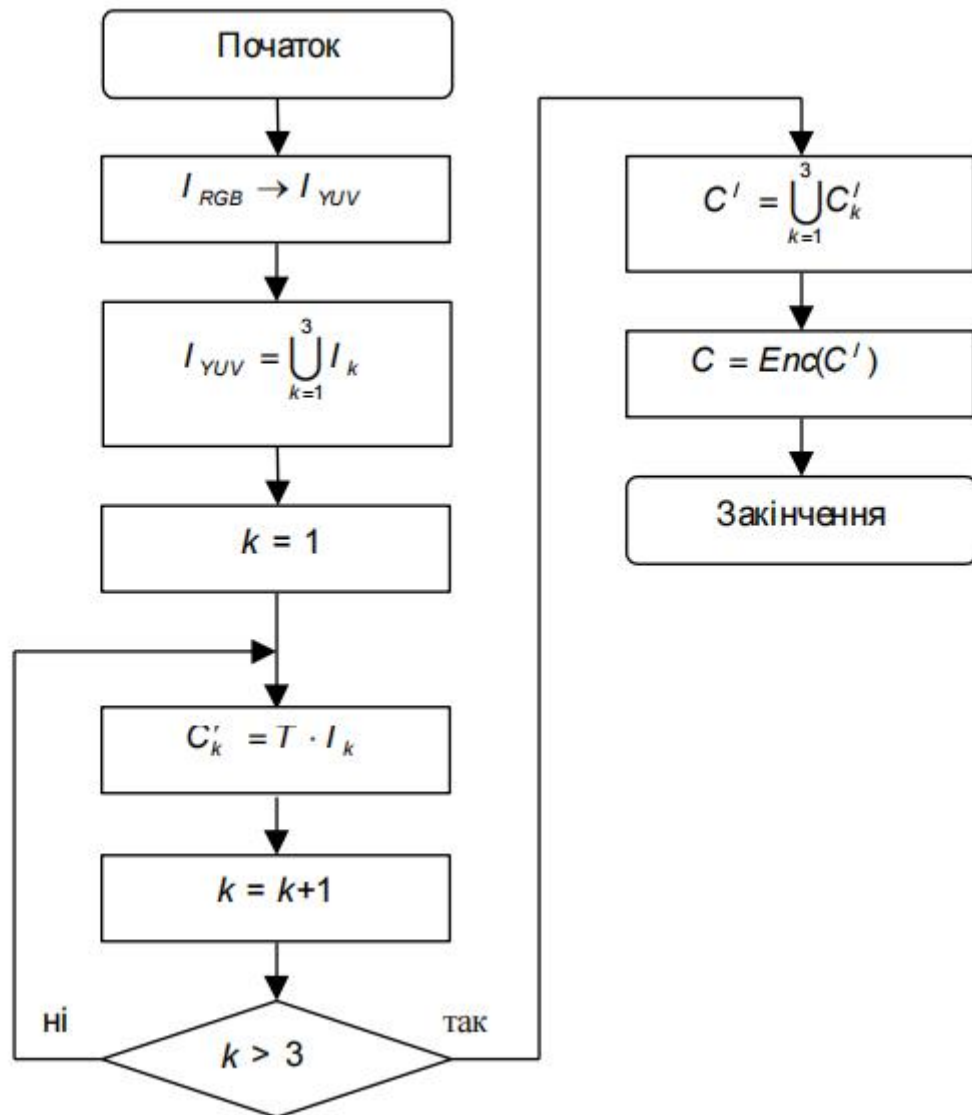


Рис 4.1. Алгоритм програми

Ось опис алгоритму

Цей алгоритм описує процес аналізу поверхні промислових виробів з метою виявлення та класифікації дефектів за допомогою фрактальних моделей.

1. Захоплення зображення:

- Використовується камера з високою роздільною здатністю та об'єktiv з макрозйомкою для отримання чіткого та детального зображення поверхні виробу.

- Забезпечується рівномірне освітлення для мінімізації тіней та отримання якісного зображення.

2. Перетворення зображення в відтінки сірого:

- Кольорове зображення, отримане на попередньому кроці, перетворюється в монохромне (відтінки сірого) для спрощення подальшого аналізу.

- Це дозволяє зосередитися на текстурних особливостях поверхні, ігноруючи вплив кольору.

3. Розрахунок фрактальної розмірності:

- Застосовується алгоритм фрактальної розмірності, наприклад, алгоритм Хайно-Охаси, до зображення в відтінках сірого.

- Фрактальна розмірність кількісно описує складність та неоднорідність текстури поверхні.

- Цей показник є ключовим для виявлення дефектів, які зазвичай характеризуються більш складною текстурою, ніж бездоганні ділянки.

4. Виявлення дефектів:

- Використовується порогове значення фрактальної розмірності, встановлене на основі досвіду та характеристик поверхні, для виділення ділянок з високою фрактальною розмірністю.

- Ці ділянки розглядаються як потенційні дефекти.

- Застосовується алгоритм кластеризації для групування сусідніх потенційних дефектів, що дозволяє об'єднати дрібні дефекти в більші.

5. Класифікація дефектів:

- Використовується алгоритм машинного навчання, наприклад, метод опорних векторів (SVM), навчений на наборі даних зображень з різними типами дефектів.

- Алгоритм класифікує кожен виявлений дефект за його типом (наприклад, подряпина, тріщина, пори).

- Це дозволяє розрізнити різні види дефектів та дати їм більш точну характеристику.

6. Візуалізація та звітування:

- На оригінальному зображенні візуалізується фрактальна маска, яка підкреслює ділянки з високою фрактальною розмірністю, ймовірно, дефекти.

- Класифіковані дефекти також візуалізуються та позначаються відповідно до їхнього типу.

- Складається звіт про результати контролю якості, який включає фрактальну розмірність, типи дефектів, їх розташування та зображення.

- Цей звіт може використовуватися для документування результатів інспекції та прийняття рішень щодо якості продукції.

У наведеному розділі було сформульовано поняття алгоритму та обґрунтовано його ключову роль у процесах автоматизованого аналізу й контролю якості поверхонь промислових виробів. Розглянутий алгоритм аналізу поверхні на основі фрактальних моделей є чітко структурованою послідовністю дій, що охоплює всі етапи — від захоплення зображення до візуалізації результатів і формування підсумкового звіту.

Застосування перетворення зображення у відтінки сірого та розрахунку фрактальної розмірності дозволяє ефективно виділяти текстурні особливості поверхні, які є інформативними для виявлення дефектів. Використання

порогових значень і методів кластеризації забезпечує локалізацію потенційних дефектних зон, а залучення алгоритмів машинного навчання, зокрема методу опорних векторів, підвищує точність класифікації дефектів за типами.

Запропонований алгоритм відповідає основним вимогам до сучасних алгоритмічних рішень, а саме: чіткості, коректності, ефективності та масштабованості. Його можна адаптувати до різних типів поверхонь і умов контролю, а також реалізувати в режимі реального часу. Таким чином, описаний алгоритм є ефективним інструментом автоматизованого контролю якості, що забезпечує об'єктивність оцінювання, зменшення впливу людського фактора та підвищення надійності прийняття рішень у виробничих процесах.

4.2 Визначення фрактальної розмірності цифрових відеозображень об'єктів вимірювань

В цьому розділі досліджується використання методів фрактального аналізу відеозображень для обробки та стиснення інформації про механічні величини. Розглянуто фрактальні властивості цифрових відеозображень, які містять такі дані. Надані рекомендації щодо вибору параметрів процедур обробки і стиснення двовимірної вимірювальної інформації про механічні величини. Обробка цифрових відеозображень для отримання вимірювальної інформації передбачає виконання певного набору процедур аналізу відеозображень за визначеними алгоритмами. Використання фракталів для аналізу відеозображень, що містять вимірювальну інформацію, дозволяє виконати сегментацію цих зображень, визначити контури об'єктів, а також виконати допоміжні операції, як фрактальне стиснення відеозображень та визначення їх фрактальної розмірності. Всі ці процедури мають багато різних параметрів, що впливають на результати обробки відеозображень. Тому актуальним є дослідження фрактальних властивостей відеозображень, які містять вимірювальну інформацію, для визначення параметрів процедур обробки, що знижують похибки вимірювальної інформації про механічні величини.

Існують різні методи для обробки та стиснення цифрових відеозображень, які поділяються на дві великі групи:

1. Методи обробки відеозображень для візуального сприйняття людиною, спрямовані на покращення їх візуальної якості.
2. Методи обробки відеозображень у системах технічного зору та інформаційно-вимірювальних системах для отримання інформації про досліджувані об'єкти.

Ці методи мають обмеження, пов'язані зі складною структурою відеозображень, складністю їх математичного опису та обмеженнями на обсяг оброблюваної інформації. Розвиток інформаційно-комп'ютерних технологій дозволяє поступово знімати ці обмеження і використовувати нові математичні методи та алгоритми обробки відеозображень. Одним з перспективних методів є застосування математичної теорії фракталів для обробки відеозображень.

Особливо перспективним цей напрямок є для відеозображень об'єктів зі складною формою та структурою природного або штучного походження,

таких як промислові вироби з природного каменю з природною текстурою і структурою, які потрібно вимірювати та контролювати у процесі виробництва. Існують різні методи фрактальної обробки та стиснення цифрових відеозображень, а також обробки вимірювальної і діагностичної інформації на таких зображеннях. Проте більшість з них орієнтована на пошук і розпізнавання об'єктів з певною формою або текстурою. Висвітлення питань вимірювання ГП, похибок вимірювань та стиснення вимірювальної інформації є недостатнім.

Мета проведених досліджень – застосування методів фрактального аналізу до цифрових відеозображень з вимірювальною інформацією про механічні величини і визначення характерних особливостей об'єктів на основі розрахунку їх фрактальної розмірності. Можливість і ефективність застосування фрактальних методів до відеозображень залежить від наявності у них фрактальних властивостей, які можуть бути оцінені за допомогою фрактальної розмірності D . Фрактальна розмірність, або розмірність Хаусдорфа-Безиковича, відрізняється від топологічної розмірності DT і для об'єктів з фрактальними властивостями є дробною величиною. Визначення фрактальної розмірності включає поняття міри M_d , що характеризує відстань між точками множини точок Ω та їх взаємне розташування у просторі. В даному випадку d – це розмірність міри M_d , яка при виконанні певних умов дорівнює фрактальній розмірності D об'єкта, що досліджується і складається з множини точок Ω . Ці умови визначаються з рівняння.

$$M_d = \gamma(d)N(\delta)\delta^d \xrightarrow{\delta \rightarrow 0} \begin{cases} 0 & \text{якщо } d > D, \\ \infty & \text{якщо } d < D, \end{cases} \quad (5.1)$$

де $\gamma(d)$ – коефіцієнт, що враховує геометричну форму просторової фігури, за допомогою якої покривається множина точок (для квадратів і кубів $\gamma(d) = 1$), N – кількість квадратів або кубів, які повністю покривають множину, δ – довжина ребра цих квадратів або кубів.

Для розробки обчислювальних алгоритмів фрактальної розмірності використовують той факт, що при $\delta \rightarrow 0$ з формули (5.1) впливає залежність:

$$N(\delta) \sim \frac{1}{\delta^D},$$

де a – коефіцієнт пропорційності.

$$\lg(N(\delta)) = aD \lg(\delta), \quad (5.2)$$

Відповідно до формули (5.2) будують графік залежності $\lg(N(\delta))$ від $aD \lg(\delta)$ і по ньому визначають фрактальну розмірність D .

Для відеозображень, що містять вимірювальну інформацію фрактальна розмірність може визначена за двома варіантами:

– фрактальна розмірність функції яскравості точок відеозображення, що розташована в тривимірному просторі (дві координати x і y – це

координати в площині відеозображення, третя координата B – яскравість) і має значення в інтервалі $2 \leq D \leq 3$;

– фрактальна розмірність контурів структурних елементів відеозображення, що розташовані в площині відеозображення, в даному випадку $1 \leq D \leq 2$.

Розглянемо приклад визначення фрактальної розмірності відеозображення, що містить поверхню будівельних виробів з природного каменю. Функція яскравості такого відеозображення наведена на (рис. 5.1) Зауважимо, що в даному випадку поверхня каменю (габро) є ахроматичною і достатньо досліджувати функцію яскравості, інакше для хроматичних поверхонь потрібно розглядати 3 функції у відповідності до однієї з стандартних колориметричних систем.

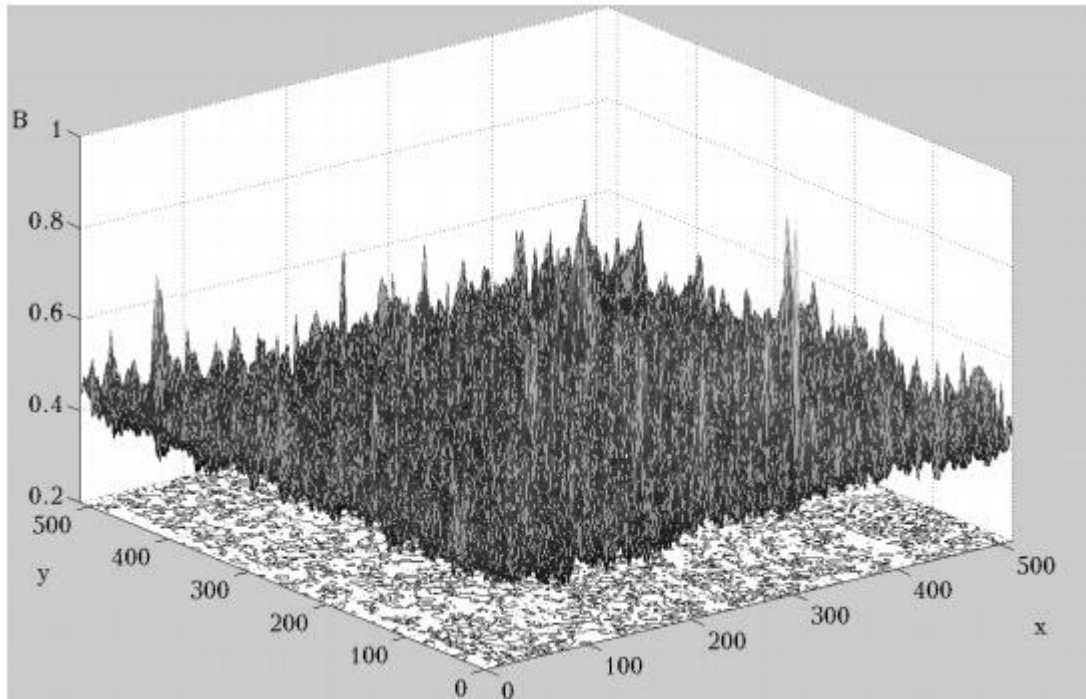
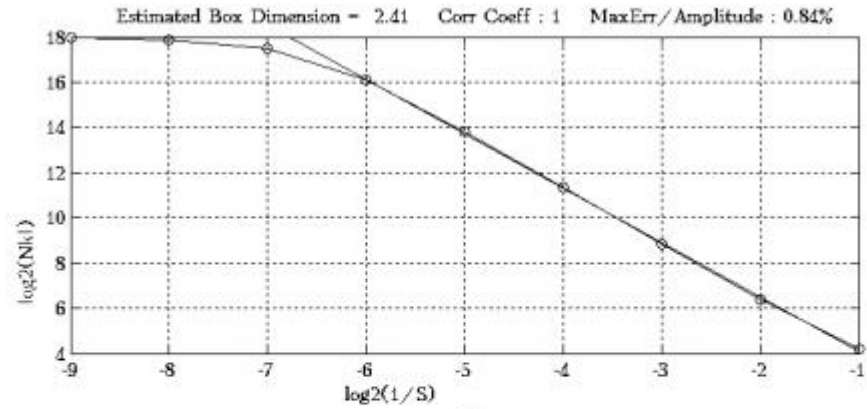


Рис. 4.2. Приклад функції яскравості для цифрового відеозображення поверхні природного каменю

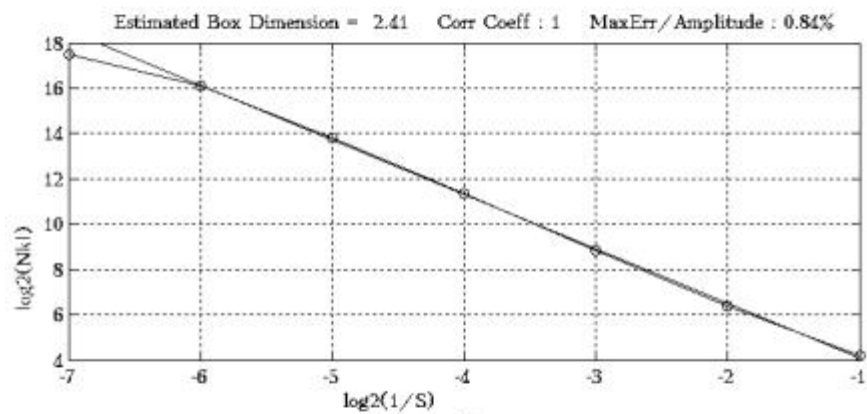
Для таких відеозображень були побудовані графіки залежностей $\lg(N(\delta))$ від $\lg(\delta)$ (точки і крива на рис. 6.2) і по них визначалась фрактальна розмірність D функції яскравості шляхом лінійної апроксимації за методом найменших квадратів (прямі лінії на рис. 6.2). Також розглядався варіант обчислення фрактальної розмірності функції яскравості при меншому розмірі в дискретних точках цифрового відеозображення (рис.6.3) та варіант обчислення фрактальної розмірності контурів структурних елементів цифрового відеозображення (рис. 6.4).

Аналіз цих результатів дозволяє відзначити певні особливості обчислення фрактальної розмірності і застосування фрактальних методів обробки і стиснення до цифрових відеозображень, що містять вимірювальну інформацію про механічні величини. На фрактальні властивості об'єктів впливає дискретний характер відеозображення, так як теоретично розмір блоку, що аналізується, наближається до нуля, а реально

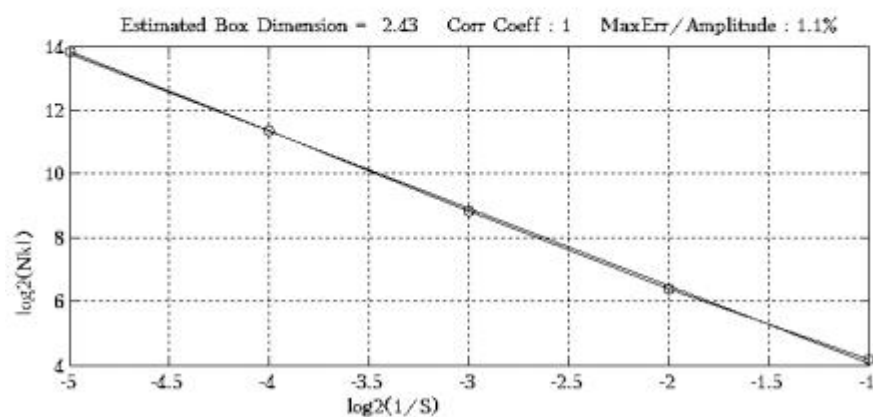
він не може бути меншим, ніж одна дискретна точка. Зменшувати розмір квадратів або кубів, які покривають множину Ω , до нуля можна для безперервного зображення, а для цифрового відеозображення мінімальний розмір квадратів або кубів – це є розмір дискретної точки відеозображення.



a)



б)



в)

Рис. 4.3. Розрахунок фрактальної розмірності функції яскравості (розмір цифрового відеозображення 512×512 дискретних точок, мінімальний розмір блоку, що аналізується, 1×1 дискретних точок (а), 4×4 дискретних точок (б), 16×16 дискретних точок (в))

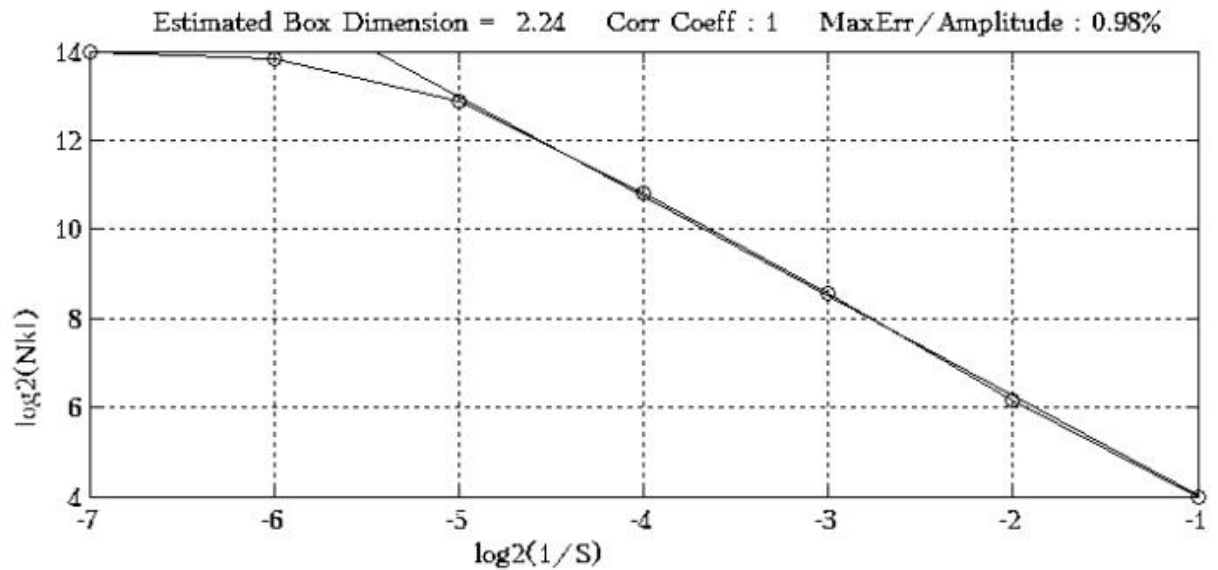


Рис. 4.4 Розрахунок фрактальної розмірності функції яскравості (розмір цифрового відеозображення 128×128 дискретних точок, мінімальний розмір блоку, що аналізується, 1×1 дискретних точок)

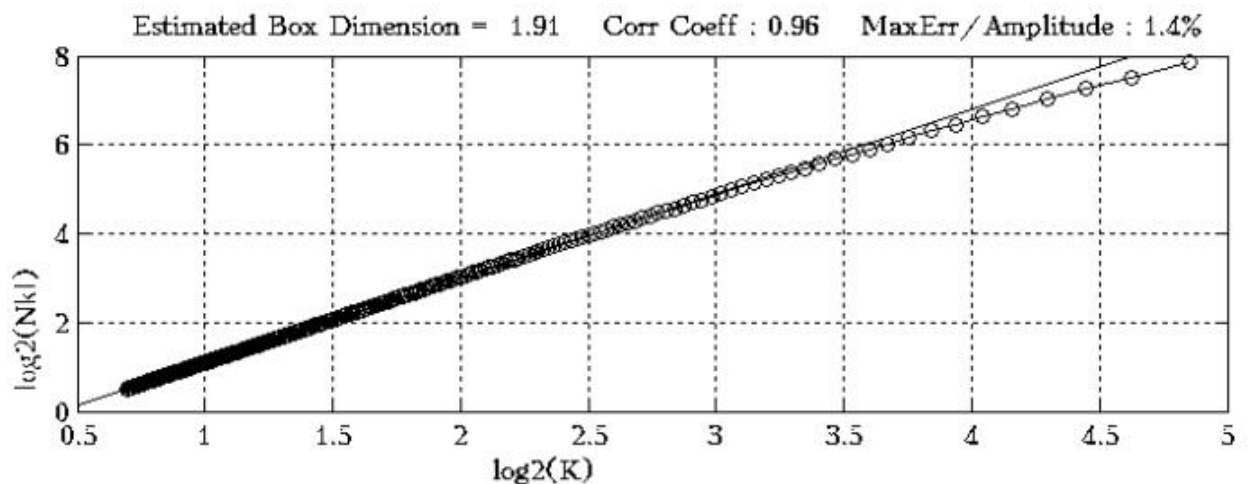


Рис. 4.5 Розрахунок фрактальної розмірності контурів структурних елементів цифрового відеозображення (розмір 512×512 дискретних точок)

Вплив усіх вищезазначених факторів призводить до того, що графік залежності $\lg(N(\delta))$ від $\lg(\delta)$ при малому розмірі блоків, що аналізуються, не відповідає фрактальній теорії (немає постійного нахилу графіка). Це і є вплив дискретності на фрактальні властивості цифрового відеозображення. Для правильного обчислення фрактальної розмірності цифрового відеозображення

цю ділянку графіка потрібно виключити з розгляду. Тому мінімальний розмір рангового блоку квадродрева не повинен бути меншим за мінімальний розмір структурного елемента, що має фрактальні властивості, за умови правильного вибору роздільної здатності відеозображення.

Відповідно до графіка, мінімальний розмір блоків, що мають фрактальні властивості, складає 8×8 дискретних точок. Враховуючи, що роздільна здатність цього відеозображення дорівнює 300 dpi (дискретних точок на

дюйм), отримуємо мінімальний розмір структурного елемента відеозображення близько 0,7 мм. Це добре узгоджується з тим фактом, що для даного природного каменю (дрібнозернисте габро) розмір зерен становить менше 1 мм.

Результати обчислення фрактальної розмірності дозволяють зробити висновки щодо фрактальних властивостей відеозображення, що містить вимірювальну інформацію, і визначити параметри фрактальних методів обробки та стиснення цих відеозображень:

1. Роздільна здатність відеозображення повинна бути такою, щоб на один структурний елемент відеозображення припадало не менше 5-7 дискретних точок.
2. В алгоритмі фрактального стиснення мінімальний розмір рангового блоку не повинен бути меншим за мінімальний розмір структурного елемента, що має фрактальні властивості. Інакше під час стиснення будуть виконуватись зайві обчислення і збільшиться час виконання стиснення. Це потребує врахування індивідуальних особливостей відеозображень, що стискаються.
3. Можливий і універсальний підхід до вибору мінімального розміру рангового блоку, враховуючи лише інтегруючі властивості вимірювального каналу. В цьому випадку розмір рангового блоку повинен складати 2×2 дискретні точки.
4. Зазначені обмеження також потрібно враховувати для інших процедур фрактальної обробки цифрових відеозображень, що містять вимірювальну інформацію (сегментація, виділення контурів об'єктів тощо).

Іншим цікавим застосуванням фрактальних методів аналізу відеозображень може бути контроль якості поверхні будівельних виробів з природного каменю під час їх механічної обробки. Зовнішній вигляд поверхні будівельних виробів з природного каменю є однією з їх важливих характеристик. Контроль і відбракування цих виробів здійснюється під час їх виготовлення з блоків природного каменю та під час механічної обробки їх поверхні. Такий контроль потребує визначення ряду показників якості. Для будівельних виробів з природного каменю використовуються показники якості їх поверхні:

- вигляд лицьової поверхні (включаючи структуру, текстуру і фактуру цієї поверхні);
- колір лицьової поверхні;
- відхилення показників зовнішнього вигляду (наявність пазирів, плям тощо).

Відомі способи контролю якості поверхні включають застосування експертних оцінок, а також вимірювальних приладів (блискоміри, колориметри тощо) для отримання чисельних оцінок якості. Однією зі складових частин такого контролю є визначення здатності природного каменю до полірування на етапі оцінки якості сировини родовища та визначення якості фактури поверхні на етапі виробництва будівельних виробів. Існуючі способи контролю якості поверхні потребують використання значного обсягу ручної праці і через це мають низьку продуктивність. При

використанні методу експертних оцінок також можлива наявність похибок, обумовлених суб'єктивними факторами. Тому досить перспективним способом контролю якості поверхні будівельних виробів з природного каменю є формування цифрових відеозображень їх поверхні, введення цих зображень в обчислювальне середовище цифрової ЕОМ з подальшою цифровою обробкою відеозображень. З метою оцінки якості фактурної обробки поверхні будівельних виробів з природного каменю при їх поетапній обробці пропонується використання фрактального аналізу відеозображень. Такий аналіз виконується шляхом обчислення фрактальної розмірності відеозображень обробленої поверхні цих виробів. Це дозволяє отримати об'єктивні чисельні характеристики якості поверхні, не користуючись спеціальним і часто важкодоступним обладнанням, еталонами тощо, а також підвищити продуктивність процедури контролю. Розглянемо використання фрактального аналізу для оцінки якості поверхні виробів на прикладі природного каменю, видобутого з Букинського родовища габро і лабрадориту (Малинський район Житомирської області). Після кожного етапу обробки поверхні за допомогою цифрового фотоапарату формувалося відеозображення цієї поверхні і обчислювалась фрактальна розмірність двовимірної функції яскравості в площині відеозображення, а також фрактальна розмірність контурів структурних елементів поверхні (рис. 5.5 табл. 5.1).

Етап обробки	Найменування технологічної операції	Характеристика поверхні після механічної обробки	Фрактальна розмірність відеозображення	
			функція яскравості	контури структурних елементів поверхні
1	Грубе шліфування	Шорсткість до 0,5 мм	2,41	1,91
2	Шліфування	Відсутність слідів розпилу, шорсткість до 0,2 мм	2,38	1,84
3	Тонке шліфування	Шорсткість до 0,05 мм	2,35	1,79
4	Перше лощіння	Відсутність слідів обробки, гладка матова поверхня з повним виявом рисунку каменю	2,33	1,76
5	Друге лощіння	Відсутність слідів обробки, гладка матова поверхня з повним виявом рисунку каменю, повне видалення мікротріщинуватості	2,33	1,74
6	Полірування	Рівномірний дзеркальний блиск, чітке відображення оточуючих предметів	2,32	1,72

табл.(6.1)

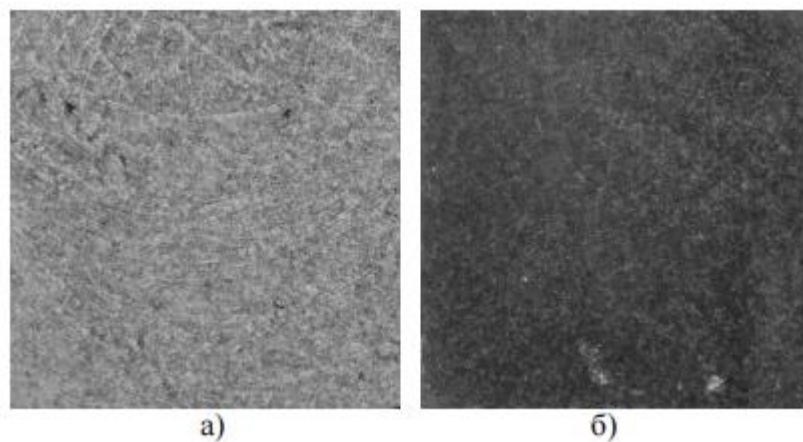


Рис. 4.6 Поверхня природного каменю після 1 та 6 етапів фактурної абразивної обробки

Фрактальна розмірність чітко залежить від якості фактурної обробки поверхні природного каменю і може використовуватись як об'єктивний

показник якості поверхні будівельних виробів. Таким чином, отримані показники фрактальної розмірності відеозображень поверхні природного каменю дозволяють контролювати якість сировини з родовищ природного каменю (здатність каменю до полірування), а також якість поверхні будівельних виробів з природного каменю в процесі їх виготовлення. Ці показники можуть бути застосовані на таких етапах технологічного циклу:

- оцінка якості сировини родовищ природного каменю;
- розробка та впровадження технологічних операцій виготовлення будівельних виробів з природного каменю та фактурної обробки поверхні цих виробів;

- контроль якості при прийманні готової продукції з природного каменю.

Таким чином, розглянуто особливості застосування методів фрактального аналізу до обробки вимірювальної інформації про механічні величини, представлені у формі цифрових відеозображень. Можливість і ефективність застосування цих методів обумовлені наявністю фрактальних властивостей у об'єктів, що містяться на відеозображеннях. Для оцінки цих властивостей необхідно визначити фрактальну розмірність відеозображень і об'єктів, що досліджуються.

Результати обчислення фрактальної розмірності дозволяють зробити висновки щодо фрактальних властивостей відеозображення, що містить вимірювальну інформацію, і надати рекомендації щодо параметрів фрактальних методів обробки і стиснення цих відеозображень, які забезпечують зменшення похибок вимірювальної інформації та часу її обробки. Проведеними дослідженнями встановлено, що розмір відеозображення повинен бути не менший, ніж 512×512 дискретних точок.

Такий підхід дозволяє зменшити кількість операцій та час обчислення процедур фрактального стиснення та аналізу відеозображень, що містять вимірювальну інформацію, при заданій точності передачі та зберігання цієї

інформації. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на встановлення залежностей і розробку математичних моделей для обчислення точнісних і часових характеристик процесу вимірювань механічних величин, який включає фрактальну обробку та стиснення цифрових відеозображень.

5.2 Розробка коду для проведення обчислень

Для реалізації програмної частини роботи було обрано середовище PyCharm. PyCharm є інтегрованим середовищем розробки для мови програмування Python, яке надає широкий набір інструментів для написання, аналізу та налагодження програмного коду. Дане середовище підтримує статичний аналіз коду, графічний налагоджувач, засоби запуску та контролю юніт-тестів, а також можливості веброзробки, зокрема з використанням фреймворку Django. PyCharm розроблене компанією JetBrains на основі платформи IntelliJ IDEA.

PyCharm є потужною та універсальною IDE, орієнтованою насамперед на розробку програм мовою Python. Вона забезпечує підвищення продуктивності розробника, покращення якості програмного коду та зручність у процесі створення програмного забезпечення. До основних функціональних можливостей PyCharm належать:

Інтелектуальне редагування коду.

Середовище забезпечує підсвічування синтаксису, що полегшує сприйняття та аналіз програмного коду. Функція автоматичного доповнення коду формує підказки з урахуванням контексту, що дозволяє зменшити кількість помилок та скоротити час розробки. PyCharm також виконує статичний аналіз коду з метою виявлення можливих логічних помилок, порушень стилю програмування та проблем, що можуть ускладнити подальший супровід. Інструменти рефакторингу дають змогу змінювати структуру коду (перейменування змінних, винесення методів, оптимізація структури) без впливу на його функціональність.

Інтегрований налагоджувач.

PyCharm містить візуальний налагоджувач, який дозволяє покроково виконувати програму, переглядати значення змінних і встановлювати контрольні точки. Підтримується також віддалене налагодження програм, що виконуються на інших пристроях або у віртуальних середовищах. Інструменти профілювання допомагають аналізувати продуктивність програмного коду та виявляти потенційні вузькі місця.

Тестування та контроль покриття коду.

Середовище підтримує роботу з популярними фреймворками модульного тестування, зокрема unittest та pytest. PyCharm дозволяє запускати, налагоджувати тести та аналізувати рівень покриття коду, що дає змогу оцінити якість тестування та надійність програмного забезпечення.

Інтеграція з системами контролю версій.

PyCharm підтримує роботу з такими системами керування версіями, як Git, Mercurial та Subversion. Середовище забезпечує зручну візуалізацію змін у коді, спрощує процес коміту, створення гілок та колективної роботи над проєктом.

Засоби веброботи.

IDE надає розширену підтримку фреймворку Django, включаючи шаблони проєктів, інтелектуальне доповнення коду та налагодження вебзастосунків. Також реалізована підтримка редагування HTML і JavaScript, що дозволяє використовувати PyCharm для повноцінної frontend- і backend-розробки. Передбачена можливість віддаленого розгортання застосунків.

Підтримка наукових обчислень та аналізу даних.

PyCharm інтегрується з IPython та дозволяє працювати з інтерактивними обчисленнями. Середовище оптимізоване для використання бібліотек NumPy, SciPy та Matplotlib, забезпечуючи автодоповнення, аналіз та налагодження коду, що застосовується для наукових досліджень і обробки даних.

Кросплатформність та розширюваність.

PyCharm доступний для операційних систем Windows, macOS та Linux. Наявність великої кількості плагінів дозволяє розширювати функціональність середовища відповідно до потреб розробника.

Програмний код у даній роботі було написано в середовищі PyCharm мовою програмування Python з використанням бібліотек OpenCV та NumPy. Бібліотека OpenCV (Open Source Computer Vision Library) є відкритим програмним засобом для комп'ютерного зору та машинного навчання, що

містить значну кількість оптимізованих алгоритмів для обробки зображень і відео. Вона широко застосовується для виконання таких задач, як обробка зображень, виявлення об'єктів, аналіз відеопотоків, а також побудова тривимірних моделей.

До основних можливостей OpenCV належать операції масштабування, повороту, фільтрації та перетворення зображень, виявлення контурів і об'єктів, підтримка алгоритмів машинного навчання та засобів відеоаналізу.

Бібліотека NumPy призначена для ефективної роботи з багатовимірними масивами та виконання математичних операцій над ними. Вона є базовим інструментом для чисельних обчислень у Python і забезпечує високу швидкодію. NumPy підтримує векторизовані арифметичні операції, функції лінійної алгебри, статистичного аналізу та добре інтегрується з іншими науковими бібліотеками, такими як SciPy, Matplotlib і pandas.

Поєднання бібліотек OpenCV та NumPy дозволяє ефективно реалізовувати алгоритми аналізу зображень і виконувати складні чисельні обчислення, що значно спрощує розробку високопродуктивних програмних рішень. Саме з використанням цих бібліотек було реалізовано програмний код для даної роботи.

Розроблена програма призначена для автоматизованого виявлення дефектів на зображеннях поверхні виробів із застосуванням фрактального аналізу. Алгоритм роботи програми складається з кількох основних етапів. На першому етапі здійснюється обчислення фрактального розміру зображення. Для цього функція `calculate_fractal_dimension` перетворює вхідне кольорове зображення у відтінки сірого та визначає фрактальний розмір методом підрахунку квадратів (`box-counting method`).

На другому етапі виконується класифікація дефекту. Функція `classify_defect` визначає тип дефекту на основі отриманого значення фрактального розміру, використовуючи наперед задані порогові значення, які дозволяють віднести зображення до категорії подряпин, тріщин або поверхонь без дефектів.

На завершальному етапі здійснюється візуалізація результатів аналізу. Функція `visualize_defect` за допомогою засобів OpenCV формує прямокутне виділення області з виявленим дефектом на оригінальному зображенні. Колір рамки змінюється залежно від типу дефекту, що забезпечує наочне представлення результатів роботи програми.

```
import cv2
import numpy as np
- import cv2: Цей рядок імпортує бібліотеку OpenCV для роботи з
обробкою зображень.
- import numpy as np: Цей рядок імпортує бібліотеку NumPy, яка
використовується для роботи з масивами та обчислень, та надається
псевдонім np, щоб зробити код більш компактним.
def calculate_fractal_dimension(image):
    image_gray = cv2.cvtColor(image, cv2.COLOR_BGR2GRAY)
    fractal_dimension = box_counting(image_gray)
    return fractal_dimension
```

- `def calculate_fractal_dimension(image)::` Ця стрічка починає оголошення функції `calculate_fractal_dimension`, яка обчислює фрактальний розмір зображення.
 - `image_gray = cv2.cvtColor(image, cv2.COLOR_BGR2GRAY):` Конвертує вхідне кольорове зображення `image` у відтінки сірого за допомогою функції `cvtColor` з `OpenCV`.
 - `fractal_dimension = box_counting(image_gray):` Викликає функцію `box_counting` для обчислення фрактального розміру зображення у відтінках сірого.
 - `return fractal_dimension:` Повертає обчислений фрактальний розмір.
- ```
def box_counting(image, epsilon=0.01):
 height, width = image.shape
 min_box_size = min(height, width)
 box_counts = []
 for box_size in range(min_box_size, 1, -1):
 n_boxes_x = int(width // box_size) + 1
 n_boxes_y = int(height // box_size) + 1
 box_counts.append(0)

 for y in range(n_boxes_y):
 for x in range(n_boxes_x):
 box = image[y * box_size:(y + 1) * box_size, x * box_size:(x + 1) * box_size]
 if np.sum(box) > epsilon:
 box_counts[-1] += 1
```
- `def box_counting(image, epsilon=0.01)::` Оголошує функцію `box_counting`, яка реалізує алгоритм підрахунку кількості квадратів для обчислення фрактального розміру.
  - `height, width = image.shape:` Отримує висоту та ширину зображення.
  - `min_box_size = min(height, width):` Обчислює мінімальний розмір квадрата для підрахунку.
  - `box_counts = []:` Створює пустий список для зберігання кількості знайдених квадратів.
  - Цикл `for box_size in range(min_box_size, 1, -1)::` Проходиться по розмірам квадратів від максимального до мінімального.
  - `n_boxes_x = int(width // box_size) + 1` та `n_boxes_y = int(height // box_size) + 1:` Обчислює кількість квадратів по горизонталі та вертикалі.
  - Цикли `for y in range(n_boxes_y):` та `for x in range(n_boxes_x)::` Проходяться по кожному квадрату на зображенні.
  - `box = image[y * box_size:(y + 1) * box_size, x * box_size:(x + 1) * box_size]:` Обирає кожний квадрат зображення.
  - `if np.sum(box) > epsilon::` Перевіряє, чи сума значень пікселів в квадраті перевищує деяке мінімальне значення `epsilon`.
  - `box_counts[-1] += 1:` Збільшує лічильник квадратів у відповідній позиції у списку `box_counts`.

```

if not any(box_counts):
 return 0.0
log_box_sizes = np.log2(np.arange(min_box_size, 1, -1))
log_box_counts = np.log2(box_counts)
slope, _ = np.polyfit(log_box_sizes, log_box_counts, 1)
fractal_dimension = -slope
return fractal_dimension
def classify_defect(fractal_dimension):
 defect_thresholds = {
 0: 1.5, # No defect
 1: 1.7, # Scratch
 2: 1.9, # Crack
 }
 defect_type = None
 for defect_class, threshold in defect_thresholds.items():
 if fractal_dimension < threshold:
 defect_type = defect_class
 break
 return defect_type
def visualize_defect(image, defect_type):
 if defect_type == 1: # Scratch
 color = (0, 255, 0) # Green
 elif defect_type == 2: # Crack
 color = (0, 0, 255) # Red
 else:
 return image # No defect, return original image
 height, width, _ = image.shape
 start_point = (width // 4, height // 4)
 end_point = (3 * width // 4, 3 * height // 4)
 thickness = 2
 image_with_defect = cv2.rectangle(image.copy(), start_point, end_point, color,
thickness)
 return image_with_defect
if __name__ == "__main__":
 image = cv2.imread(r'C:\Users\Notebook\Desktop/image1.jpg')
 fractal_dimension = calculate_fractal_dimension(image)
 print("Fractal Dimension:", fractal_dimension)
 defect_type = classify_defect(fractal_dimension)
 print("Defect Type:", defect_type)
 image_with_defect = visualize_defect(image, defect_type)
 cv2.imshow("Image with Defect", image_with_defect)
 cv2.waitKey(0)
 cv2.destroyAllWindows()
- · if not any(box_counts):: Перевіряє, чи не всі елементи box_counts рівні нулю (тобто, чи було знайдено якісь квадрати).
```

- `· return 0.0`: Повертає 0.0 як фрактальний розмір у випадку, якщо не було знайдено жодного квадрата.
- `· log_box_sizes = np.log2(np.arange(min_box_size, 1, -1))`: Обчислює логарифмічні значення розмірів квадратів.
- `· log_box_counts = np.log2(box_counts)`: Обчислює логарифмічні значення кількості знайдених

Цей код обчислює фрактальний розмір зображення та класифікує дефекти на основі цього розміру. Ось що робить кожна функція у коді:

`calculate_fractal_dimension(image)`: Ця функція приймає зображення у форматі BGR (Blue-Green-Red) та обчислює його фрактальний розмір. Вона перетворює зображення у відтінки сірого за допомогою `cv2.cvtColor()`, а потім викликає функцію `box_counting()` для обчислення фрактального розміру.

`box_counting(image, epsilon=0.01)`: Ця функція обчислює фрактальний розмір зображення за допомогою методу підрахунку кількості квадратів. Вона поділяє зображення на квадратні області різного розміру, рахує кількість ненульових областей в кожному квадраті, а потім використовує метод лінійної апроксимації для обчислення фрактального розміру.

`classify_defect(fractal_dimension)`: Ця функція класифікує дефекти на зображенні на основі фрактального розміру. Вона порівнює отриманий фрактальний розмір з певними пороговими значеннями, щоб визначити тип дефекту (наприклад, подряпина або тріщина).

`visualize_defect(image, defect_type)`: Ця функція візуалізує виявлений дефект на зображенні, малюючи прямокутник навколо області дефекту. Якщо дефект не виявлено, вона повертає оригінальне зображення.

Ось приклад цього аналізу:

Fractal Dimension: 1.592019395639602

Defect Type: 1



Рис.4.7 Показ дефекту

Таким чином, цей код виконує аналіз зображень для виявлення дефектів на основі їх фрактального розміру та візуалізує результати цього аналізу.

#### Удосконалений код

```
import cv2
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
def load_image(path):
 img = cv2.imread(path, cv2.IMREAD_GRAYSCALE)
 if img is None:
 raise ValueError
 return img
def preprocess_image(img):
 img_blur = cv2.GaussianBlur(img, (5, 5), 0)
 img_norm = cv2.normalize(img_blur, None, 0, 255, cv2.NORM_MINMAX)
 return img_norm
def fractal_dimension(Z):
 assert len(Z.shape) == 2
 Z = Z > np.mean(Z)
 sizes = np.array([2, 4, 8, 16])
 counts = []
 for size in sizes:
```

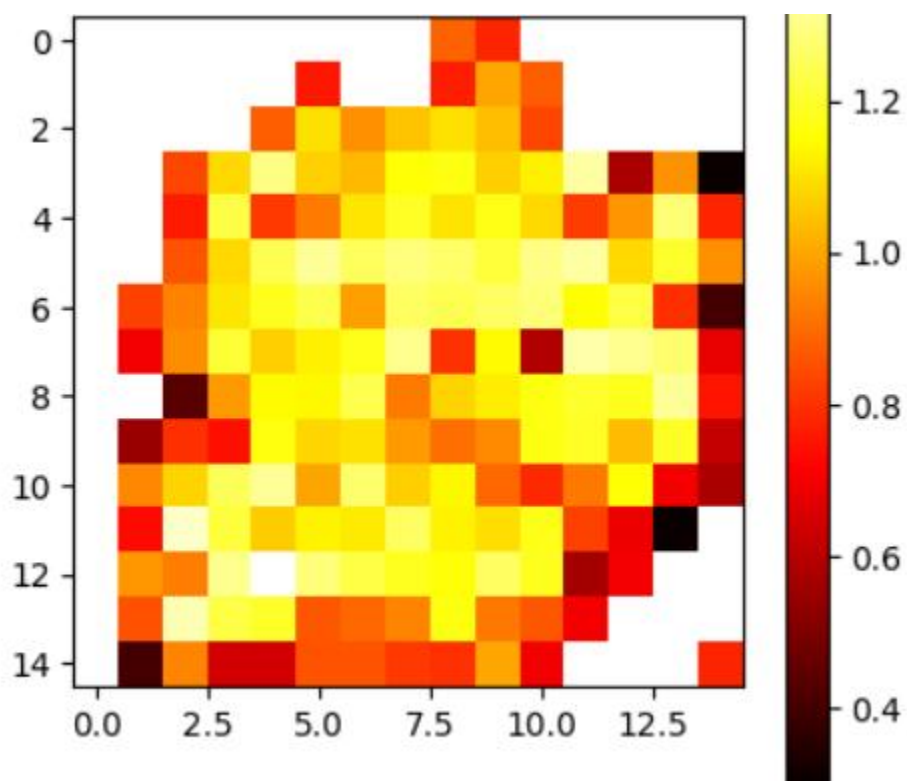
```

count = 0
for i in range(0, Z.shape[0], size):
 for j in range(0, Z.shape[1], size):
 block = Z[i:i+size, j:j+size]
 if np.any(block) and not np.all(block):
 count += 1
 counts.append(count)
coeffs = np.polyfit(np.log(sizes), np.log(counts), 1)
return -coeffs[0]
def local_fractal_map(img, window=32):
 h, w = img.shape
 fmap = np.zeros((h//window, w//window))
 for i in range(0, h-window, window):
 for j in range(0, w-window, window):
 block = img[i:i+window, j:j+window]
 fmap[i//window, j//window] = fractal_dimension(block)
 return fmap
def visualize(img, fmap, threshold=2.4):
 defect_mask = fmap > threshold
 plt.figure(figsize=(12,4))
 plt.subplot(1,3,1)
 plt.title
 plt.imshow(img, cmap='gray')
 plt.axis('off')
 plt.subplot(1,3,2)
 plt.title
 plt.imshow(fmap, cmap='hot')
 plt.colorbar()
 plt.subplot(1,3,3)
 plt.title
 plt.imshow(defect_mask, cmap='gray')
 plt.axis('off')
 plt.show()
image = load_image("surface.jpg")
image_prep = preprocess_image(image)
fmap = local_fractal_map(image_prep)
visualize(image_prep, fmap)

```



Рис 4.8 Зображення у сірому кольорі



Рис, 4.9 Карта фрактальної розмірності



Рис.5.10 Виявлені області з високою D

Удосконалене програмне забезпечення шляхом впровадження локального фрактального аналізу поверхні з використанням ковзного вікна та морфологічної постобробки, дозволило підвищити точність виявлення дефектів та зменшити кількість хибних спрацювань.

```
import cv2
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

def calculate_fractal_dimension(image, box_sizes=None):
 gray = cv2.cvtColor(image, cv2.COLOR_BGR2GRAY)
 _, binary = cv2.threshold(gray, 120, 255, cv2.THRESH_BINARY)

 if box_sizes is None:
 box_sizes = np.array([2, 4, 8, 16, 32])

 counts = []

 for size in box_sizes:
 count = 0
 for y in range(0, binary.shape[0], size):
 for x in range(0, binary.shape[1], size):
 box = binary[y:y+size, x:x+size]
 if np.any(box == 0):
 count += 1
```

```

counts.append(count)

coeffs = np.polyfit(np.log(box_sizes), np.log(counts), 1)
return -coeffs[0]

def calculate_surface_quality_index(fd, fd_ref):
 return 1 - abs(fd - fd_ref) / fd_ref

image = cv2.imread("surface_defect.png")
reference_image = cv2.imread("surface_reference.png")

if image is None:
 raise FileNotFoundError("Файл surface_defect.png ")
if reference_image is None:
 raise FileNotFoundError("Файл surface_reference.png не знайдено")

fd_test = calculate_fractal_dimension(image)
fd_ref = calculate_fractal_dimension(reference_image)

sqi = calculate_surface_quality_index(fd_test, fd_ref)

print(f'Фрактальний розмір (досліджувана поверхня): {fd_test:.3f}')
print(f'Фрактальний розмір (еталон): {fd_ref:.3f}')
print(f'Індекс якості поверхні (SQI): {sqi:.3f}')

labels =
values = [fd_ref, fd_test]

plt.figure(figsize=(6, 4))
plt.bar(labels, values)
plt.ylabel
plt.title
plt.grid(True)

plt.show()

```

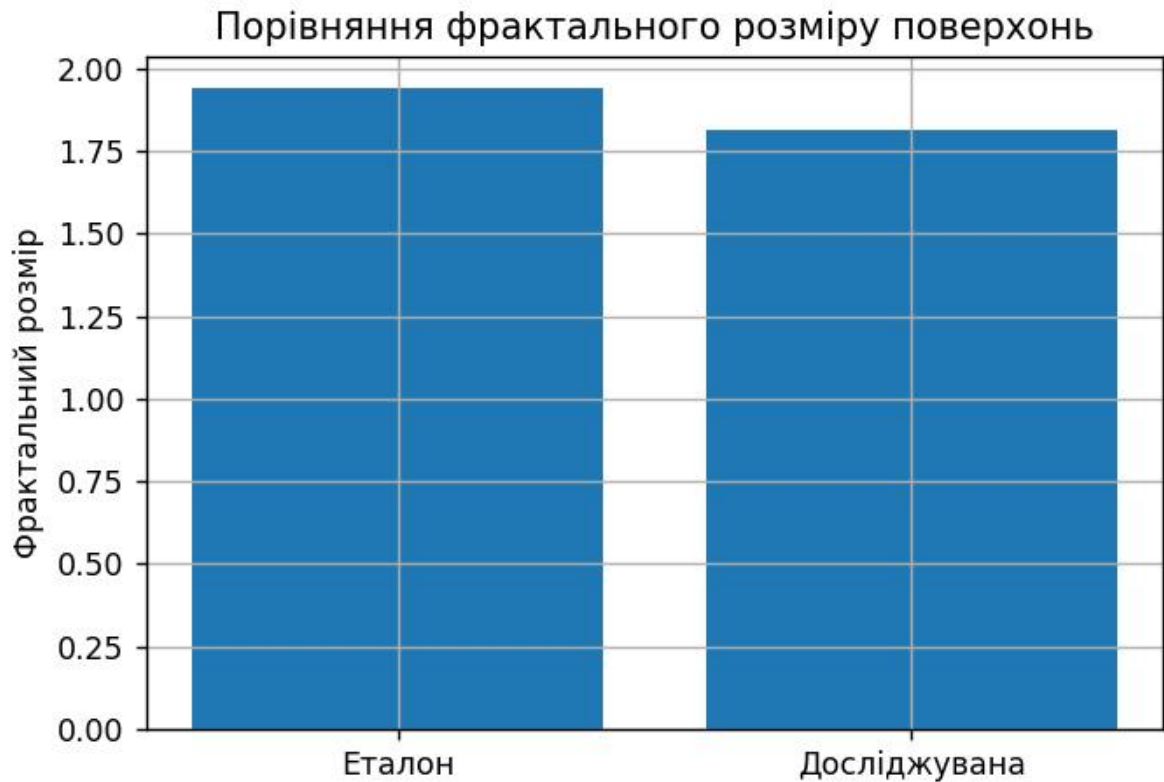


Рис 5.11 Гістограма порівняння фрактального розміру поверхонь

Фрактальний розмір (досліджувана поверхня): 1.817

Фрактальний розмір (еталон): 1.940

Індекс якості поверхні (SQI): 0.937

Було додано програму для порівняння якості поверхонь обчислення їх фрактальних розмірів та виводу індексу якості поверхонь. За допомогою якої можна порівняти еталонний об'єкт та досліджуваний

### Висновки до 4 розділу

У наведеному розділі було сформульовано поняття алгоритму та обґрунтовано його ключову роль у процесах автоматизованого аналізу й контролю якості поверхонь промислових виробів. Розглянутий алгоритм аналізу поверхні на основі фрактальних моделей є чітко структурованою послідовністю дій, що охоплює всі етапи — від захоплення зображення до візуалізації результатів і формування підсумкового звіту.

Застосування перетворення зображення у відтінки сірого та розрахунку фрактальної розмірності дозволяє ефективно виділяти текстурні особливості поверхні, які є інформативними для виявлення дефектів. Використання порогових значень і методів кластеризації забезпечує локалізацію потенційних дефектних зон, а залучення алгоритмів машинного навчання, зокрема методу опорних векторів, підвищує точність класифікації дефектів за типами.

Запропонований алгоритм відповідає основним вимогам до сучасних алгоритмічних рішень, а саме: чіткості, коректності, ефективності та масштабованості. Його можна адаптувати до різних типів поверхонь і умов контролю, а також реалізувати в режимі реального часу. Таким чином,

описаний алгоритм є ефективним інструментом автоматизованого контролю якості, що забезпечує об'єктивність оцінювання, зменшення впливу людського фактора та підвищення надійності прийняття рішень у виробничих процесах та у процесі виконання роботи було проведено вдосконалення програмного забезпечення для аналізу зображень поверхні на основі методів фрактального аналізу. Початковий варіант програми передбачав обчислення глобальної фрактальної розмірності, що не забезпечувало можливості визначення просторового розташування дефектів.

Удосконалення програмного забезпечення полягає у впровадженні локального аналізу фрактальних властивостей поверхні. Для цього зображення після попередньої фільтрації та нормалізації розбивається на локальні області, в межах яких обчислюється фрактальна розмірність. Такий підхід дозволяє отримати просторовий розподіл значень фрактальної розмірності у вигляді карти.

На основі отриманої карти реалізовано алгоритм автоматичного виділення ділянок з підвищеною фрактальною розмірністю шляхом порогової обробки. Це дає змогу здійснювати автоматизований контроль якості поверхні без участі оператора.

Структура програмного коду була модифікована шляхом поділу на окремі функціональні модулі, що підвищує зручність налагодження, розширення та подальшої модернізації програмного забезпечення.

Результати роботи удосконаленого програмного забезпечення підтверджують доцільність застосування локального фрактального аналізу для задач контролю якості поверхонь складної структури. Було додано програму для порівняння якості поверхонь обчислення їх фрактальних розмірів та виводу індексу якості поверхонь.

## 5.ТОЧНІСТЬ ТА НАДІЙНІСТЬ СИСТЕМИ

Розробка методики оцінювання похибок на стиснутих відеозображеннях Роботу алгоритму стиснення JPEG-2000 розглянемо на конкретному прикладі, пов'язаному з стисненням цифрових відеозображень промислових виробів з природного каменю

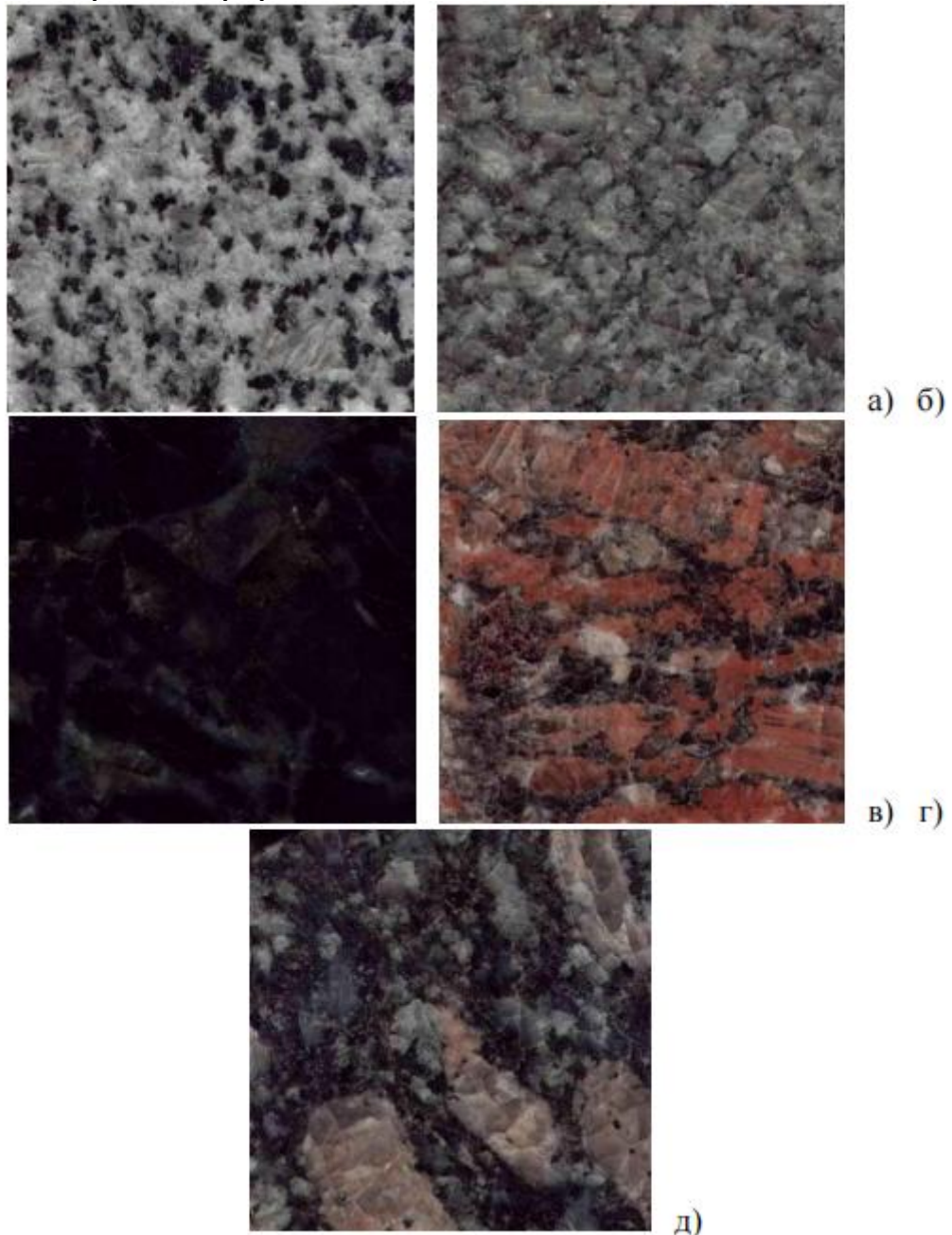


Рис. 5.1. Відеозображення поверхні промислових виробів з природного каменю: а) зображення №1; а) зображення №1; б) зображення №2; в) зображення №3; г) зображення №4; д) зображення №5

Слід зауважити, що одним з найважливіших способів зменшення обсягу відеозображення (тобто його стиснення) є вибір оптимальних параметрів розподільчої здатності для яскравості, кольору та просторових ознак елементів відеозображення. Перевищення цих параметрів понад видимі

людським оком значення призведе лише до збільшення обсягу відеозображення без покращення його візуальної якості. На відміну від цього, при вимірюванні механічних параметрів об'єктів потрібно вибирати такі значення параметрів, що забезпечать необхідну точність вимірювальної відеоінформації. Основним параметром алгоритму стиснення є таблиця квантування частотних коефіцієнтів, отриманих на основі вейвлет-перетворення. Змінюючи елементи цієї таблиці, можна змінювати коефіцієнт стиснення. Крім того, вона впливає на точність відтворення відеозображення після стиснення. Розглянемо критерії оцінки похибок вимірювальної інформації, відновленої після стиснення. Оскільки при цьому може бути втрачена інформація, що представляє інтерес, бажано мати засоби кількісних оцінок характеру і величини втрат інформації. В основу такого визначення можуть бути покладені як суб'єктивні, так і об'єктивні числові критерії точності відтворення. Основним є критерій середньоквадратичного відхилення (СКВ) різниці між початковим і відновленим відеозображеннями. Нехай  $f(x, y)$  означає

початкове відеозображення, а  $\bar{f}(x, y)$  – його наближення, що отримується в результаті операцій стиснення і наступного відновлення. Для будь-яких та

помилка (нев'язка)  $e(x, y)$  для елементів відеозображень  $f(x, y)$  і  $\bar{f}(x, y)$

визначається як  $e(x, y) = \bar{f}(x, y) - f(x, y)$  а величина повної невязки двох відеозображень дорівнює  $f(x, y)$ , де розміри відеозображення дорівнюють  $M \times N$ . Величина середньоквадратичного відхилення  $e_{СКВ}$  різниці відеозображень і буде дорівнює:

$$\|e(x, y)\| = \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} [\bar{f}(x, y) - f(x, y)]^2$$

Іншим об'єктивним критерієм вірності відтворення є співвідношення «сигнал-шум» для відновленого відеозображення. Якщо розглядати відновлене відеозображення як суму початкового відеозображення

$=130$  і шуму, доданого результаті стиснення, то співвідношення

«сигнал-шум» буде дорівнювати:

$$e_{CKO} = \left[ \frac{1}{MN} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} [\bar{f}(x, y) - f(x, y)]^2 \right]^{1/2}$$

Результати чисельного моделювання та експериментальних досліджень вейвлет-стиснення цифрових відеозображень

Іншим об'єктивним критерієм вірності відтворення є співвідношення «сигнал-шум» для відновленого відеозображення. Якщо розглядати відновлене відеозображення як суму початкового відеозображення

$f(x, y)$  і шуму, доданого результаті стиснення, то співвідношення «сигнал-шум» буде дорівнювати:

$$SNR_{CK} = \frac{\sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} [\tilde{f}(x, y)]^2}{\sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} [\tilde{f}(x, y) - f(x, y)]^2}$$

Результати чисельного моделювання та експериментальних досліджень вейвлет-стиснення цифрових відеозображень. Стиснення тестових відеозображень (рис. 4.6) виконувалося за допомогою безкоштовної версії програми ACDSee. Використовувався метод

стиснення JPEG 2000, заснований на wavelet-перетворенні.

Було обрано декілька рівнів стиснення з коефіцієнтами стиснення (відношенням об'єму цифрових даних початкового відеозображення до об'єму стиснутих даних) 100:1, 50:1, 25:1, 10:1, 8:1, 4:1, 2:1 та 1:1. При стисненні 100:1 візуально якість відеозображення значно погіршувалась, тому такий режим був прийнятий як режим максимального стиснення, який

варто використовувати для подібних відеозображень. Стиснення 1:1 було прийнято до розгляду для оцінки максимально можливої якості, яка зберігається при вейвлет-перетворення цифрових відеозображень.

Стиснення проводилося для оригінальних кольорових відеозображень та для їх напівтонових (відтінки сірого) еквівалентів.

Для відновлених після стиснення відеозображень було виконано аналіз на наявність похибок відтворення кольору та геометричних параметрів об'єктів.

Похибки відтворення кольору об'єктів

Похибки відтворення кольору можна розглядати як загальну міру відхилення значень кольору стиснутого відеозображення відносно початкового:

$$\Delta = \sum_{i=1}^3 k_i \Delta_i,$$

де  $i = 1, 2, 3$  – номер каналів для передачі кольору (в даному випадку: R (червоний), G (зелений), B (синій)), відповідно  $k_1 = 0.3$ ,  $k_2 = 0.59$ ,  $k_3 = 0.11$ .

Значення  $i$  обчислюються за формулою:

$$\Delta_i = \sqrt{\frac{1}{M \cdot N} \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N (Y_{vost.}(x, y, i) - Y_{orig.}(x, y, i))^2}$$

Похибки відтворення кольору об'єктів обчислювалися для кольорових відеозображень та їх напівтонових еквівалентів окремо. Основною відмінністю між цими підрахунками було те, що у кольорового відеозображення 3 кольорових канали, а у напівтонового 1.

Текст програми для підрахунку похибки відтворення кольору об'єктів для кольорового відеозображення:

```
file_original = 'st5_512x512.bmp'
```

```
file_vost = 'st5_512x512_4.bmp'
```

```

inf_original = imfinfo(file_original);
inf_vost = imfinfo(file_vost);
image_original = imread(file_original);
image_vost = imread(file_vost);
koef = [0.3 0.59 0.11]
delta = 0;
for color_channel = 1:3
 channel_original =
double(image_original(:,:,color_channel));
 channel_vost = double(image_vost(:,:,color_channel));
 channel_quad_summ = 0;
 for i = 1:inf_original.Width
 for j = 1:inf_original.Height
 channel_quad_summ = channel_quad_summ +
(channel_vost(i,j) - channel_original(i,j))^2;
 end
 end
 deltaT =
sqrt(channel_quad_summ/(inf_original.Width*inf_original.Height))
 delta = delta + koef(color_channel) * deltaT;
end

```

В змінні `file_original`, `file_vost` заносимо назви відеозображень, які досліджуємо. В даному прикладі це `st5_512x512.bmp` (файл початкового відеозображення), `st5_512x512_4.bmp` (файл ідеозображення, стиснутого з коефіцієнтом 4:1).

```

inf_original = imfinfo(file_original);
inf_vost = imfinfo(file_vost);

```

В

`inf_original`

та

`inf_vost`

заносимо інформацію про

відеозображення, використовуючи функцію `imfinfo()`. До цієї інформації належать: назва файлу, дата останнього редагування, розмір файлу у

байтах,

формат відеозображення, версія формату, висота, ширина, глибина кольору (кількість байт для зберігання кольору одного пікселя) та тип кольору.

```

image_original = imread(file_original);

```

```

image_vost = imread(file_vost);

```

За допомогою функції `imread()` читаємо безпосередньо самі

початкове та відновлене відеозображення і записуємо отримані дані у

змінні

```

image_original, image_vost.

```

Далі в циклі знаходимо значення виразу

для похибки

$M \times Y$

*Avost x y i Aorig x y i*

1 1

. ( , , ) . ( , , ) та поміщуємо його у змінну `channel_quad_summ`.

for i = 1:inf\_original.Width

for j = 1:inf\_original.Height

`channel_quad_summ = channel_quad_summ +`

`(channel_vost(i,j) - channel_original(i,j))^2;`

end

end

Тут `channel_vost` та `channel_original` – це двовимірні масиви, елементами яких є значення для кожного пікселя відеозображення відповідного кольору (червоного, зеленого чи синього). Їх розмірність рівна розмірам відеозображення.  $\Delta T =$

$\sqrt{\text{channel\_quad\_summ} / (\text{inf\_original.Width} * \text{inf\_original.Height})}$

В змінну  $\Delta T$  записуємо значення похибки для поточного кольору.

$\Delta = \Delta + \text{koef}(\text{color\_channel}) * \Delta T;$

В  $\Delta$  записуємо загальне значення похибки відтворення кольору об'єктів.

Приклад результат виконання програми:

>>

`file_original = st5_512x512.bmp`

`file_vost = st5_512x512_4.bmp`

`koef = 0.3000 0.5900 0.1100`

`deltaR = 0.9533`

`deltaG = 0.8644`

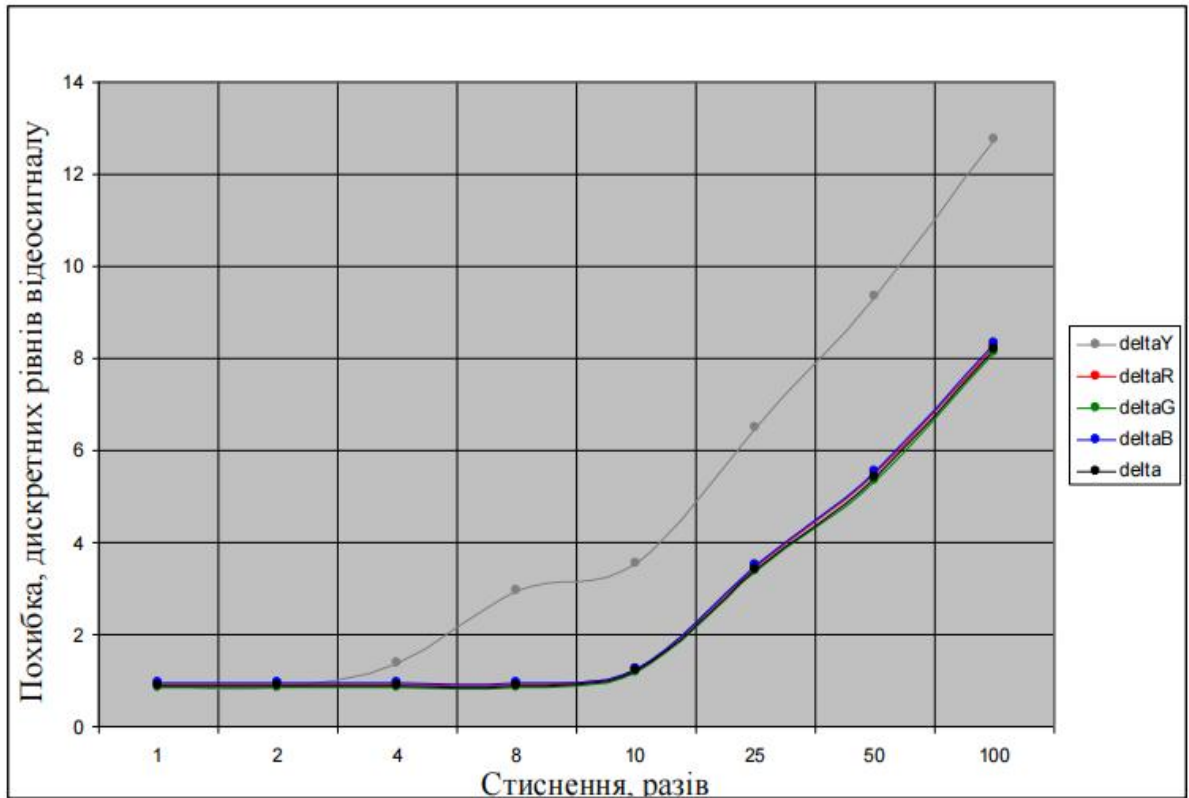
`deltaB = 1.0118`

`delta =`

`0.9072`

Три значення  $\Delta R$ ,  $\Delta G$ ,  $\Delta B$  відповідають похибкам для червоного, зеленого та синього кольорів відповідно,  $\Delta$  – загальне значення похибки відновленого кольорового відеозображення,  $\Delta Y$  – значення похибки відновленого напівтонового відеозображення.

За допомогою цієї програми було знайдено значення похибки відтворення кольору об'єктів для усіх п'яти відеозображень (див. рис. 7.2), стиснутих з усіма наведеними коефіцієнтами. Далі було побудовано графіки залежності похибки відтворення кольору об'єктів від коефіцієнту стиснення. За допомогою цієї програми було знайдено значення похибки відтворення кольору об'єктів для усіх п'яти відеозображень (див. рис. 7.2), стиснутих з усіма наведеними коефіцієнтами. Далі було побудовано графіки залежності похибки відтворення кольору об'єктів від коефіцієнту стиснення



Стиснення тестових відеозображень (рис. 5.2) було виконано за допомогою безкоштовної версії програми ACDSee, використовуючи метод стиснення JPEG 2000, заснований на wavelet-перетворенні. Було обрано кілька рівнів стиснення з коефіцієнтами стиснення (відношенням обсягу цифрових даних початкового відеозображення до обсягу стиснутих даних) 100:1, 50:1, 25:1, 10:1, 8:1, 4:1, 2:1 та 1:1. При стисненні 100:1 візуально якість відеозображення значно погіршувалася, тому цей режим був прийнятий як максимальний рівень стиснення, який варто використовувати для таких відеозображень. Стиснення 1:1 було прийнято для оцінки максимально можливої якості, яка зберігається при wavelet-перетворенні цифрових відеозображень. Стиснення проводилося для оригінальних кольорових відеозображень та для їх напівтонових (відтінки сірого) еквівалентів. Для відновлених після стиснення відеозображень був проведений аналіз на наявність похибок.

Надійність – це здатність виконувати задані функції протягом певного часу, зберігаючи експлуатаційні показники в допустимих межах. Для оцінки надійності використовують різні кількісні показники, такі як інтенсивність

відмов, середній наробіток на відмову (MTBF) та ймовірність безвідмовної роботи.

Основні показники надійності:

- Ймовірність безвідмовної роботи системи на заданий час.
- Параметр потоку відмов.
- Середнє напрацювання до відмови.

Загальноприйняте тлумачення надійності системи: Надійність системи – властивість технічних та нетехнічних об'єктів зберігати значення всіх

параметрів системи, які характеризують здатність виконувати свої функції в заданих режимах та умовах експлуатації.

Ймовірність безвідмовної роботи – ймовірність, що в межах певного періоду часу відмова пристрою не відбудеться. Відмова – подія, що виникає внаслідок порушення працездатного стану об'єкта. Інтенсивність відмов – сума ймовірностей появи відмов. Середнє напрацювання до відмови – математична величина, яка очікує напрацювання об'єкта до його першої відмови.

Виріб використовується в таких умовах:

- температура навколишнього середовища +20 °С;
- вологість повітря 80%;
- призначений для роботи в закритому приміщенні.

Відмовою системи буде вважатись відмова будь-якої складової системи, що приводить до порушення роботоздатності і неможливості подальшого використання за прямим призначенням. Відновлення роботи складових системи вирішується шляхом заміни відмовившої частини.

1.Інтенсивність відмов

$$\lambda = \frac{1}{MTBF} \quad (6.1)$$

2.Середній наробіток до відмови (MTBF)

$$MTBF = \frac{\sum T_i}{N} \quad (6.2)$$

де  $\sum T_i$  — сумарний час роботи всіх компонентів до відмови,  $N$  — кількість відмов.

3.Ймовірність безвідмовної роботи ( $R(t)$ )

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (6.3)$$

Приклад розрахунків

Вихідні дані:

- Час роботи системи до відмови для кожного компонента:  $T_1, T_2, \dots, T_N$
- Кількість компонентів системи:  $N$
- Сумарний час роботи до відмови:  $\sum T_i = 50000$  годин
- Кількість компонентів:  $N=5$

Розрахунок MTBF:

$$MTBF = \frac{50000}{5} = 10000 \text{ годин} \quad (6.4)$$

Розрахунок ймовірності безвідмовної роботи:

$$R(t) = e^{-\lambda t}$$

$$\text{Де } \lambda = \frac{1}{10000} = 0.0001 \text{ відмов/годину}$$

Таблиця 6.1 – Імовірність відмов по групам приладів

|      |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Год  | 10  | 50  | 10  | 20  | 30  | 40  | 50  | 60  | 70  | 80  | 90  | 10  |
| ини  | 0   | 0   | 00  | 00  | 00  | 00  | 00  | 00  | 00  | 00  | 00  | 000 |
| P(t) | 0.  | 0.  | 0.  | 0.  | 0.  | 0.  | 0.  | 0.  | 0.  | 0.  | 0.  | 0.3 |
|      | 990 | 951 | 904 | 818 | 740 | 670 | 607 | 549 | 496 | 449 | 405 | 68  |

Формула для розрахунку ймовірності безвідмовної роботи:

$$P(t) = e^{-\lambda t} \quad (6.5)$$

де  $\lambda=0.0001$

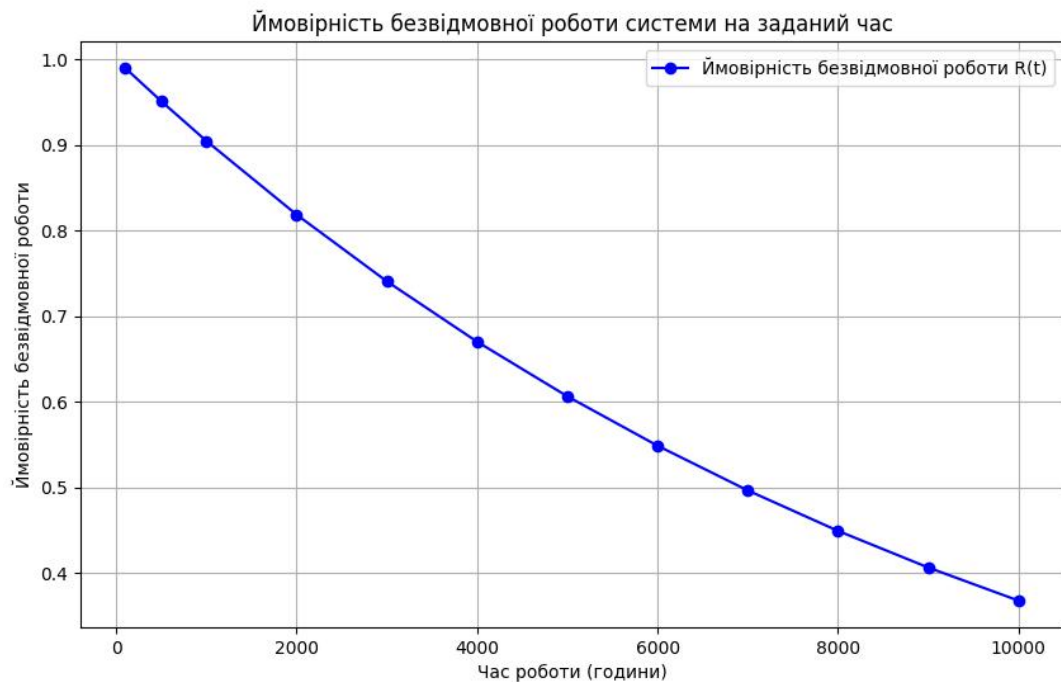


Рисунок 5.3: Ймовірність безвідмовної роботи виробу протягом часу  $t$

Використовуючи дані, я розрахував основні показники надійності та побудували таблицю ймовірності відмов для різних годин роботи. Це дозволяє оцінити надійність системи і зробити відповідні висновки.

### 6.1 Обрахунок похибок

1. Estimates of the actual value

Mean value: 19.39

Geometric mean: 19.3854

Median: 19.45

2. Estimates of the random value

Estimation of variance: 0.4303

Estimation of RMS: 0.096218

Conclusion: values dont exceed the allowable range.

3.1 Irwin criterion

3.2 Romanovsky criterion

3.3 Dixon criterion

Estimates of the eliminated array

Mean value: 19.39

Allowable range: 19.39 +/- 0.167419

Проведемо експеримент з вибіркою в 20 значень та отримаємо відповідні дані табл.4.1.

Вибірка X1:

$X1 = [18,5; 18,6; 18,8; 19,0; 19,2; 19,4; 19,5; 19,6; 19,8; 19,9; 20,0; 19,9; 19,8; 19,7; 19,6; 19,5; 19,4; 19,3; 19,2; 19,1];$

Середньоарифметичного значення результатів багатократних вимірювань опору для вибірки X1:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_i x_i = 19.39 .$$

Середньо геометричного значення результатів багатократних вимірювань опору для вибірки X1:

$$G(x) = \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n x_j} = 19.3854.$$

Значення медіани результатів багатократних вимірювань фізичної величини опору для вибірки X1:

$$M = \frac{x_{(n/2)} + x_{(n/2)+1}}{2} = 19.45.$$

Оцінки випадкової величини наступні:

Оцінка дисперсії: 0,4303

Середньоквадратичного відхилення середнього значення: 0,096218.

Висновок: значення не перевищують допустимий діапазон.

Визначаємо закон розподілу результатів вимірювань на основі побудови гістограми для вибірки X1 рис.5.4.

## Histogram of measurement results

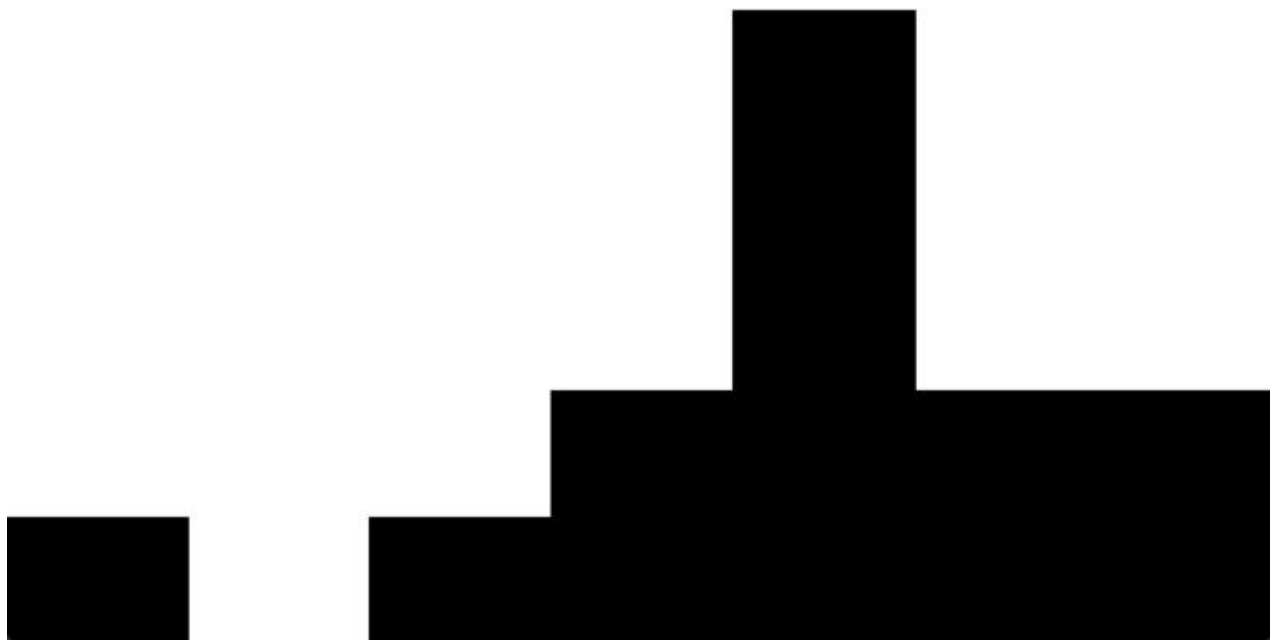


Рис.5.4. Закон розподілу результатів вимірювань на основі побудови гістограми для вибірки X1

Виконуємо перевірку на наявність грубих помилок за критерієм Ірвіна, для цього визначаємо коефіцієнти по формулі (4.1).

Перевірка результатів на наявність грубих похибок

### 3.1 Критерій Ірвіна

У результаті застосування критерію Ірвіна різких стрибків між сусідніми вимірюваннями не виявлено, отже грубі похибки за даним критерієм відсутні.

### 3.2 Критерій Романовського

Перевірка за критерієм Романовського не виявила результатів вимірювань з грубими похибками, що підтверджує однорідність вибірки.

### 3.3 Критерій Діксона

Застосування критерію Діксона також не виявило крайніх аномальних значень, тому елімінування результатів вимірювань не проводилось.

Оцінки елімінованого масиву за критерієм Діксона.

Оскільки жодне з вимірювань не було визнано грубою похибкою, статистичні характеристики елімінованого масиву співпадають з початковими:

Середнє значення елімінованої вибірки:

Середнє значення: 19,39.

Допустимий діапазон значень:  $19,39 \pm 0,167419$

Це підтверджує високу стабільність та достовірність експериментальних даних.

## ВИСНОВОК

У результаті виконання кваліфікаційної роботи розроблено комп'ютеризовану систему контролю якості поверхні промислових виробів на основі фрактальних моделей.

У першому розділі проведено загальний огляд існуючих методів та систем контролю якості поверхні промислових виробів. До основних недоліків розглянутих аналогів можна віднести значну залежність результатів контролю від людського фактора, складність автоматизації процесу та обмежені можливості виявлення дрібних і прихованих дефектів поверхні. Також розглянуто основні підходи до аналізу поверхонь, серед яких обґрунтовано доцільність використання фрактального аналізу.

У другому розділі розглянуто теоретичні основи фрактального аналізу поверхонь та фізичні принципи застосування фрактальних моделей для оцінювання якості поверхні. Описано математичні співвідношення, що використовуються для визначення фрактальних параметрів. Обґрунтовано вибір програмно-апаратних засобів та побудовано структурну схему комп'ютеризованої системи контролю якості поверхні.

У третьому розділі обрано складові комп'ютеризованої системи контролю якості поверхні, наведено їх основні технічні характеристики та описано принципи взаємодії між ними. На основі обраних компонентів розроблено алгоритм отримання та обробки зображень поверхні виробів. Також побудовано логічну структуру системи аналізу та виявлення дефектів поверхні.

У четвертому розділі розроблено програмне забезпечення для реалізації алгоритмів аналізу поверхні з використанням фрактальних моделей. Для роботи системи в цілому складено блок-схему алгоритму та реалізовано програму для автоматизованого визначення фрактальних параметрів поверхні і виявлення дефектних ділянок.

Було проведено експериментальне дослідження з використанням зображень поверхні промислових виробів. Побудовано розподіли отриманих фрактальних параметрів та виконано їх статистичний аналіз. Для оцінювання якості контролю розраховано середні значення, медіану, дисперсію та середньоквадратичне відхилення. Отримані результати підтвердили можливість застосування розробленої комп'ютеризованої системи для автоматизованого контролю якості поверхні промислових виробів.

Розроблена система дозволяє підвищити точність та об'єктивність контролю якості поверхні, зменшити вплив людського фактора та може бути рекомендована для використання у виробничих умовах.

У результаті виконання кваліфікаційної роботи розроблено комп'ютеризовану систему контролю якості поверхні промислових виробів на основі фрактальних моделей.

У першому розділі проведено загальний огляд існуючих методів та систем контролю якості поверхні промислових виробів. До основних недоліків розглянутих аналогів можна віднести значну залежність результатів контролю від людського фактора, складність автоматизації процесу та обмежені можливості виявлення дрібних і прихованих дефектів поверхні. Також

розглянуто основні підходи до аналізу поверхонь, серед яких обґрунтовано доцільність використання фрактального аналізу.

У другому розділі розглянуто теоретичні основи фрактального аналізу поверхонь та фізичні принципи застосування фрактальних моделей для оцінювання якості поверхні. Описано математичні співвідношення, що використовуються для визначення фрактальних параметрів. Обґрунтовано вибір програмно-апаратних засобів та побудовано структурну схему комп'ютеризованої системи контролю якості поверхні.

У третьому розділі обрано складові комп'ютеризованої системи контролю якості поверхні, наведено їх основні технічні характеристики та описано принципи взаємодії між ними. На основі обраних компонентів розроблено алгоритм отримання та обробки зображень поверхні виробів. Також побудовано логічну структуру системи аналізу та виявлення дефектів поверхні.

У четвертому розділі розроблено програмне забезпечення для реалізації алгоритмів аналізу поверхні з використанням фрактальних моделей. Для роботи системи в цілому складено блок-схему алгоритму та реалізовано програму для автоматизованого визначення фрактальних параметрів поверхні і виявлення дефектних ділянок.

Було проведено експериментальне дослідження з використанням зображень поверхні промислових виробів. Побудовано розподіли отриманих фрактальних параметрів та виконано їх статистичний аналіз. Для оцінювання якості контролю розраховано середні значення, медіану, дисперсію та середньоквадратичне відхилення. Отримані результати підтвердили можливість застосування розробленої комп'ютеризованої системи для автоматизованого контролю якості поверхні промислових виробів.

Розроблена система дозволяє підвищити точність та об'єктивність контролю якості поверхні, зменшити вплив людського фактора та може бути рекомендована для використання у виробничих умовах.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

Традиційні системи контролю якості:

1. "Traditional Optical and Contact-Based Surface Inspection Methods" - порівняння традиційних методів контролю якості поверхні.[Електронний ресурс]<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474667017555810>
2. Wyko NT9100 Optical Profiler:[Електронний ресурс] – Режим доступу: WYKO NT9100 — <https://cni.columbia.edu/wyko-nyt9100>
3. Veeco Wyko Profilometer:[Електронний ресурс] – Режим доступу:<https://www.artisanng.com/Ecotech/74603-1/Veeco-Wyko-NT1100-Optical-Profiler>
4. Bruker ContourGT Surface Metrology System:[Електронний ресурс] – Режим доступу: Bruker Corporation - <https://ir.bruker.com/press-releases/press-release-details/2012/Bruker-Releases-New-Benchmark-3D-Optical-Microscope-System/default.aspx>
5. Zygo NewView Surface Profilometer:[Електронний ресурс] – Режим доступу:<https://www.zygo.com/products/metrology-systems/3d-optical-profilers/newview-9000>
6. Цифрова камера:[Електронний ресурс] – Режим доступу: Цифрова камера — Вікіпедія (wikipedia.org).
7. Макрооб'єктив:[Електронний ресурс] – Режим доступу: [www.sony.ua/electronics/obyektyvy-dlya-makrozyomky](http://www.sony.ua/electronics/obyektyvy-dlya-makrozyomky)
8. Комп'ютер ASUS TUF Gaming F15:[Електронний ресурс] – Режим доступу:<https://www.asus.com/laptops/for-gaming/tuf-gaming/asus-tuf-gaming-f15/techspec/>
8. Raspberry Pi Camera Module V2:[Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.raspberrypi.com/documentation/accessories/camera.html>
9. Raspberry Pi Camera Lens Kit:[Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.raspberrypi.com/products/camera-module-v2/>
10. П44 Стиснення та перетворення цифрових відеозображень з вимірювальною інформацією про геометричні параметри об'єктів: Монографія // Розробник: Подчашинський Ю.О. 2019 – 200 с.
11. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної роботи освітнього ступеня «бакалавр» // Розробники: Подчашинський Юрій, Чепюк Ларіна, Петросян Руслан, 2021. – 60с.

## Додатки

//

```

import cv2
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
def load_image(path):
 img = cv2.imread(path, cv2.IMREAD_GRAYSCALE)
 if img is None:
 raise ValueError
 return img
def preprocess_image(img):
 img_blur = cv2.GaussianBlur(img, (5, 5), 0)
 img_norm = cv2.normalize(img_blur, None, 0, 255, cv2.NORM_MINMAX)
 return img_norm
def fractal_dimension(Z):
 assert len(Z.shape) == 2
 Z = Z > np.mean(Z)
 sizes = np.array([2, 4, 8, 16])
 counts = []
 for size in sizes:
 count = 0
 for i in range(0, Z.shape[0], size):
 for j in range(0, Z.shape[1], size):
 block = Z[i:i+size, j:j+size]
 if np.any(block) and not np.all(block):
 count += 1
 counts.append(count)
 coeffs = np.polyfit(np.log(sizes), np.log(counts), 1)
 return -coeffs[0]
def local_fractal_map(img, window=32):
 h, w = img.shape
 fmap = np.zeros((h//window, w//window))
 for i in range(0, h-window, window):
 for j in range(0, w-window, window):
 block = img[i:i+window, j:j+window]
 fmap[i//window, j//window] = fractal_dimension(block)
 return fmap
def visualize(img, fmap, threshold=2.4):
 defect_mask = fmap > threshold
 plt.figure(figsize=(12,4))
 plt.subplot(1,3,1)
 plt.title
 plt.imshow(img, cmap='gray')
 plt.axis('off')

```

```
plt.subplot(1,3,2)
plt.title
plt.imshow(fmap, cmap='hot')
plt.colorbar()
plt.subplot(1,3,3)
plt.title
plt.imshow(defect_mask, cmap='gray')
plt.axis('off')
plt.show()
image = load_image("surface.jpg")
image_prep = preprocess_image(image)
fmap = local_fractal_map(image_prep)
visualize(image_prep, fmap)
```

```
//
import cv2
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

def calculate_fractal_dimension(image, box_sizes=None):
 gray = cv2.cvtColor(image, cv2.COLOR_BGR2GRAY)
 _, binary = cv2.threshold(gray, 120, 255, cv2.THRESH_BINARY)

 if box_sizes is None:
 box_sizes = np.array([2, 4, 8, 16, 32])

 counts = []

 for size in box_sizes:
 count = 0
 for y in range(0, binary.shape[0], size):
 for x in range(0, binary.shape[1], size):
 box = binary[y:y+size, x:x+size]
 if np.any(box == 0):
 count += 1
 counts.append(count)

 coeffs = np.polyfit(np.log(box_sizes), np.log(counts), 1)
 return -coeffs[0]

def calculate_surface_quality_index(fd, fd_ref):
 return 1 - abs(fd - fd_ref) / fd_ref

image = cv2.imread("surface_defect.png")
reference_image = cv2.imread("surface_reference.png")

if image is None:
 raise FileNotFoundError("Файл surface_defect.png ")
if reference_image is None:
 raise FileNotFoundError("Файл surface_reference.png не знайдено")

fd_test = calculate_fractal_dimension(image)
fd_ref = calculate_fractal_dimension(reference_image)

sqi = calculate_surface_quality_index(fd_test, fd_ref)

print(f'Фрактальний розмір (досліджувана поверхня): {fd_test:.3f}')
print(f'Фрактальний розмір (еталон): {fd_ref:.3f}')
print(f'Індекс якості поверхні (SQI): {sqi:.3f}')
```

```
labels =
values = [fd_ref, fd_test]

plt.figure(figsize=(6, 4))
plt.bar(labels, values)
plt.ylabel
plt.title
plt.grid(True)

plt.show()
```