

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Електронної та біомедичної інженерії
(повна назва)

Кафедра Мікроелектроніки, електронних приладів та пристроїв
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
Пояснювальна записка

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Розробка та дослідження методів контролю якості виготовлення металевих
деталей за допомогою систем технічного зору
(тема)

Виконав:

здобувач 2 року навчання, групи ЕПМ-24-1

Селіванов С.І.

(прізвище, ініціали)

Спеціальність 171 Електроніка

(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна

(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма Електронні прилади та
пристрої

(повна назва освітньої програми)

Керівник проф. Стрілкова Т. О.

(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри

(підпис)

Бондаренко І. М.

(прізвище, ініціали)

2025 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет _____ Електронної та біомедичної інженерії _____
(повна назва)
Кафедра _____ Мікроелектроніки, електронних приладів та пристроїв _____
(повна назва)
Рівень вищої освіти _____ другий (магістерський) _____
Спеціальність _____ 171 «Електроніка» _____
(код і повна назва)
Тип програми _____ освітньо-професійна _____
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)
Освітня програма _____ «Електронні пристрої та системи» _____
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____
(підпис)
« _____ » _____ 20 ____ р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові _____ Селіванову Сергію Ігоревичу _____
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Розробка та дослідження методів контролю якості виготовлення металевих деталей за допомогою систем технічного зору»

затверджена наказом по університету від 24 листопада 2025 р. № 1056 Ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 18 грудня 2025 р.

3. Вихідні дані до роботи _____

Матеріал контрольованих деталей – конструкційна сталь.

Товщина деталей – від 2 мм до 30 мм

Температурний діапазон від 0°C до 40°C

Типи можливих дефектів – тріщини, пори, неметалеві вclusions

Мінімальний розмір дефектів, що підлягають виявленню – від 0,5 мм.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі _____

1 Огляд систем технічного зору у металообробці

2 Основні типи дефектів металевих поверхонь та їх особливості

3 Методи збільшення контрастності систем технічного зору

4 Експериментальна частина

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (слайдів) Слайди 1 - 17

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Інформаційно-тематичний пошук та огляд літературних джерел	24.11.25	Виконано
2	Дослідження	24.11.25 – 01.12.25	Виконано
3	Виконання чисельних розрахунків характеристик	24.11.25 – 01.12.25	Виконано
4	Аналіз розрахунків та параметрів	24.11.25 – 01.12.25	Виконано
5	Оформлення пояснювальної записки	01.12.25 – 14.12.25	Виконано
6	Оформлення графічних та демонстраційних матеріалів	01.12.25 – 14.12.25	Виконано
7	Пройдення нормоконтролю і отримання рецензії	15.12.25 – 20.12.25	Виконано
8	Підготовка та захист атестаційної роботи	17.12.25	Виконано

Дата видачі завдання 24 листопада 2025 р.

Студент _____
(підпис)

Керівник роботи _____ проф. Стрілкова Т. О.
(підпис) (посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка атестаційної роботи магістра містить: 69 с., 35 рис., 2 додатки, 19 джерел.

ТЕХНІЧНИЙ ЗІР, КОНТРОЛЬ ЯКОСТІ, МЕТАЛЕВІ ДЕТАЛІ, ОБРОБКА ЗОБРАЖЕНЬ.

Об'єкт дослідження – процес автоматизованого контролю якості металевих деталей.

Предмет дослідження – методи та алгоритми обробки зображень і сигналів у системах технічного зору для контролю якості металевих деталей.

Мета роботи – розробка та дослідження методу обробки інформації в системі технічного зору, спрямованого на підвищення точності та надійності виявлення поверхневих дефектів металевих деталей шляхом поєднання методів просторово-часової та ентропійної обробки сигналів.

Методи дослідження – аналіз науково-технічної літератури, аналіз існуючих систем технічного зору, комп'ютерне моделювання, алгоритмічна обробка зображень та експериментальні дослідження.

У дипломному проекті розглянуто сучасні методи автоматизованого контролю якості металевих деталей, проведено аналіз алгоритмів обробки зображень та запропоновано метод підвищення ефективності виявлення поверхневих дефектів.

ABSTRACT

The explanatory note of the master's graduation project contains: 69 pages, 35 figures, 2 appendices, 19 sources.

MACHINE VISION, QUALITY CONTROL, METAL PARTS, IMAGE PROCESSING.

The object of the research is the process of automated quality control of metal parts.

The subject of the research is methods and algorithms of image and signal processing in machine vision systems for quality control of metal parts.

The aim of the study is the development and investigation of an information processing method in a machine vision system aimed at improving the accuracy and reliability of surface defect detection in metal parts by combining spatio-temporal and entropy-based signal processing methods.

The research methods include analysis of scientific and technical literature, analysis of existing machine vision systems, computer simulation, algorithmic image processing, and experimental studies.

The graduation project considers modern methods of automated quality control of metal parts, analyzes image processing algorithms, and proposes a method for increasing the efficiency of surface defect detection.

ЗМІСТ

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ	8
ВСТУП	9
1 ЗАСТОСУВАННЯ СИСТЕМ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ В ПРОМИСЛОВОСТІ	10
1.1 Основні типи поверхневих дефектів металевих деталей	11
1.2 Сучасний стан та перспективи використання технічного зору у виробництві металевих деталей	16
1.3 Призначення та функціональні завдання систем технічного зору	19
1.4 Структура системи технічного зору: компоненти та їх взаємодія	20
1.5 Архітектура та принципи побудови систем технічного зору	24
2 ФОРМУВАННЯ ТА ОБРОБКА ЗОБРАЖЕНЬ У СИСТЕМАХ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ	25
2.1 Процес формування цифрового зображення	25
2.1.1 Флуктуації та шуми	26
2.2 Проблема нерівномірності освітлення	27
2.3 Енергетичний та просторовий аналіз зображень дефектів на металевих поверхнях	29
2.4 Математична модель формування зображення	33
2.5 Методи компенсації нерівномірності освітлення	34
2.6 Алгоритми обробки зображень	36
3 МЕТОДИ ОЦІНЮВАННЯ ЯКОСТІ ТА ІНФОРМАТИВНОСТІ ЗОБРАЖЕНЬ	37
3.1 Критерії оцінювання якості цифрових зображень.	37
3.2 Оцінка інформаційної ентропії цифрового зображення	39

3.2.1	Практичний приклад розрахунку ентропії	40
3.3	Дослідження методів підвищення контрастності зображень для виявлення дефектів	44
3.4	Методика експериментальних досліджень	46
3.4.1	Методика математичного моделювання зображень	46
3.4.2	Методика дослідження методів підвищення контрастності	47
3.4.3	Методика фізичного експерименту	48
3.4.4	Методика порівняльної оцінки алгоритмів	48
4	ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА	50
4.1	Математичне моделювання	51
4.2	Фізичний експеримент	61
	ВИСНОВКИ	67
	ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	69
	ДОДАТОК А	71
	ДОДАТОК Б	72

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАЧКИ

СТЗ – система технічного зору

PSF – Point Spread Function

RMS – Root Mean Square

СКВ – середнє квадратичне відхилення

ВСТУП

Сучасне машинобудівне та приладобудівне виробництво характеризується високими вимогами до точності та якості виготовлення металевих деталей. Традиційні методи візуального контролю залежать від впливу людського фактору та ґрунтуються на суб'єктивній оцінці оператора. Вони є малоефективними та трудомісткими та можуть призводити до пропуску дефектів і, як наслідок, до випуску бракованої продукції [1]. Згідно з даними «Quality Control in Manufacturing» (2023), близько 5-10% продукції в машинобудуванні є бракованою через дефекти, що підкреслює важливість автоматизації контролю якості [2]. Актуальним є впровадження автоматизованих СТЗ, які забезпечують об'єктивний, швидкий та надійний контроль якості з високою точністю [3].

Ефективність СТЗ значною мірою залежить від алгоритмів обробки зображень, спрямованих на виявлення та класифікацію дефектів. Окремо стоїть питання виявлення малорозмірних та малоконтрастних видів дефектів, таких як тріщини, подряпини, вм'ятини та задирки на тлі металевої поверхні через її високу відбивну здатність. Ускладнюючим фактором виявлення дефектів у цьому випадку також виступають нерівномірність освітлення та наявність технологічної текстури [4].

З огляду на розвиток та ускладнення виробничих процесів постає потреба у вдосконаленні методів обробки зображень, які застосовуються у системах технічного зору для технічної діагностики та автоматизованого контролю якості. Дослідження базується на роботах вітчизняних учених, зокрема Балицького Є.І. у галузі обробки технологічних зображень [3], а також Селіванова С.І. та Стрілкової Т.О. [4], у яких розглядаються сучасні підходи до аналізу зображень для виявлення дефектів металевих деталей.

1 ЗАСТОСУВАННЯ СИСТЕМ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ В ПРОМИСЛОВОСТІ

У сучасному промисловому виробництві забезпечення високої якості металевих деталей є одним із ключових факторів підвищення надійності продукції. Зростання вимог до точності виготовлення, швидкості виробничих процесів та стабільності якості зумовлює необхідність упровадження автоматизованих систем контролю, здатних працювати в режимі реального часу та мінімізувати вплив людського фактора.

Одним із найбільш перспективних напрямів автоматизації контролю якості є використання систем технічного зору. Такі системи дозволяють здійснювати безконтактний контроль геометричних параметрів, стану поверхні та наявності дефектів металевих деталей шляхом аналізу цифрових зображень. Порівняно з традиційними методами контролю, системи технічного зору забезпечують вищу продуктивність, повторюваність результатів та можливість інтеграції в автоматизовані виробничі лінії.

Особливу складність у процесі контролю якості металевих деталей становить виявлення поверхневих дефектів, таких як тріщини, подряпини, вм'ятини та неоднорідності структури матеріалу. Варіативність умов освітлення, відбивні властивості металевих поверхонь та різноманітність форм деталей ускладнюють застосування універсальних алгоритмів обробки зображень. У зв'язку з цим актуальним є розроблення та дослідження ефективних методів обробки зорової інформації, здатних підвищити точність і надійність автоматизованого контролю.

Важливу роль відіграють сучасні алгоритми обробки зображень і сигналів, зокрема методи просторово-часового аналізу та ентропійної оцінки інформації. Поєднання таких підходів у системах технічного зору відкриває нові можливості для підвищення ефективності виявлення дефектів та оптимізації процесів контролю якості металевих деталей.

1.1 Основні типи поверхневих дефектів металевих деталей

Штамування металевих деталей є одним із найпоширеніших технологічних процесів у машинобудуванні та суміжних галузях промисловості, завдяки можливості виготовлення деталей високої точності з великою продуктивністю. У процесі штампування метал піддається пластичній деформації або розділенню під дією зовнішніх сил у штампувальному інструменті, що складається з пуансона, матриці та допоміжних елементів. Успішність технологічного процесу значною мірою визначається точним вибором зазорів, станом інструменту та режимами обробки матеріалу [5].

Одним із найчастіших дефектів, що виникають при пробиванні, вирубуванні та інших операціях розділення матеріалу, є задирки (заусенці) – витягнуті або рвані частинки металу на краях і контурі деталі. Вони утворюються при неповному відриві матеріалу у зоні різання внаслідок недостатнього технологічного зазору між пуансоном і матрицею, зносу ріжучих кромek штампів, а також при нерівномірності властивостей матеріалу в зоні деформації. Задирки погіршують точність геометричних розмірів, можуть заважати складанню деталей і сприяти механічному пошкодженню суміжних поверхонь [5]. Вони являють собою витягнуті частинки металу на краях деталі або отворів. Задирки можуть мати висоту від декількох мікрометрів до декількох міліметрів [6].

Дефекти планарності, такі як викривлення, хвилястість або локальні деформації поверхні, виникають у результаті нерівномірного розподілу деформаційних зусиль, неточної фіксації заготовки у штампувальному інструменті або зносу напрямних елементів штампа. Це може призводити до невідповідності деталі геометричним допускам. Контроль таких дефектів здійснюється за допомогою повірочних плит, індикаторів годинникового типу та щупів для оцінки планарності поверхні [5].



Рисунок 1.1 – Контроль якості зварного з'єднання

На рисунку 1.1 показано приклад застосування спеціалізованого вимірювального інструменту для контролю якості та геометрії зварного шва штампованих деталей. У цьому випадку можуть мати місце декілька видів дефектів, зокрема можуть бути присутні задирки після штампування.

Зниження якості різку, підвищене утворення задирок та інші дефекти можуть бути наслідком зносу ріжучих кромek пуансона та матриці. З часом кромки інструменту притуплюються, що погіршує якість штампування, збільшує теплові навантаження та сприяє утворенню дефектів поверхні.

Також у процесі штампування можуть виникати розриви чи зморшки матеріалу, що залежать від пластичності та властивостей заготовки, режимів деформації, а також конструкції штампувального інструменту.

Тріщини є одними з найнебезпечніших дефектів, оскільки можуть призвести до руйнування деталі під навантаженням [6, 7]. Вони виникають внаслідок перевищення допустимих напружень при деформації металу, недостатньої пластичності матеріалу або порушення технологічних режимів. Тріщини класифікуються на поверхневі, які видно неозброєним оком або при невеликому збільшенні, та внутрішні, що виявляються тільки методами неруйнівного контролю [8]. За орієнтацією розрізняють поздовжні, поперечні та сітчасті тріщини.



Рисунок 1.2 – Тріщина на металевій циліндричній поверхні

Як видно з рисунка 1.2, тріщини проявляються у вигляді темних ліній на металевій поверхні. На даному зображенні спостерігаються три групи тріщиноподібних дефектів, розташованих на циліндричній поверхні. Виявлення таких дефектів ускладнюється через нерівномірне освітлення та наявність технологічних слідів обробки [9,10].

Також до поверхневих дефектів відносять подряпини, які виникають внаслідок тертя заготовки об інструмент або при транспортуванні деталей [8]. Вони мають меншу глибину порівняно з тріщинами, але можуть бути концентраторами напружень. Подряпини характеризуються прямолінійною або дугоподібною формою та незначною шириною (зазвичай менше 0,5 мм).

Вм'ятини являють собою локальні деформації поверхні без порушення цілісності матеріалу [7]. Вони виникають при ударних навантаженнях, падінні деталей або неправильному зберіганні. Вм'ятини можуть мати круглу, овальну або неправильну форму залежно від характеру механічного

впливу. Геометричні параметри вм'ятини включають діаметр (або характерний розмір), глибину та площу ушкодженої зони [6].



Рисунок 1.3 – Вм'ятини на полірованій металевій поверхні

На рисунку 1.3 червоним колом виділено зону вм'ятини на полірованій поверхні. Такий дефект характеризується зміною відбивної здатності поверхні та створює характерний світло-тіньовий малюнок [10]. Для показаного на рисунку 1.2 дефекту характерний розмір становить приблизно 15-20 мм, що відноситься до категорії середніх вм'ятин.

Забоїни – це локальні ушкодження поверхні деталі, що характеризуються деформацією металу з утворенням гострих країв, вибоїн та відривів частинок матеріалу. Такі дефекти виникають внаслідок ударних або контактних навантажень об тверді поверхні, елементи обладнання чи сторонні предмети під час обробки, транспортування або експлуатації виробу [5].

На відміну від вм'ятин, які є наслідком чисто пластичної деформації без порушення цілісності поверхневого шару, забоїни супроводжуються локальним руйнуванням металу, включно з розривом волокон і зривом частинок поверхневого шару. Це призводить до зниження міцнісних і втомних характеристик деталі, підвищує імовірність концентрації напружень і може стати джерелом подальших тріщин у процесі експлуатації [5].

Окремо слід виділити корозійні пошкодження[5]. Корозія металевих деталей – це процес хімічного або електрохімічного руйнування матеріалу під дією зовнішнього середовища, що призводить до втрати експлуатаційних характеристик та зниження довговічності виробу. Вона може виникати як під час зберігання, так і у процесі експлуатації, особливо при порушенні умов зберігання чи експлуатаційних режимів.

Основними факторами, що сприяють корозії, є:

- висока вологість, контакт з агресивними середовищами (солі, кислоти, луги);
- неправильне або тривале зберігання без захисних покриттів;
- використання технологічних мастил або рідин, що містять корозійно активні компоненти;
- електрохімічні явища при контактному з'єднанні різнорідних металів.

Корозійні ушкодження проявляються у вигляді:

- плям і точкових уражень (локальна корозія),
- раковин або заглиблень на поверхні (піттинг),
- суцільного ураження поверхні металу (рівномірна корозія).

Наслідки корозії:

- зниження міцності та жорсткості деталей,
- погіршення геометричних параметрів та поверхневої точності,
- підвищена ймовірність появи тріщин і передчасного руйнування.

Різні типи дефектів характеризуються різним рівнем критичності та потребують застосування відповідних методів контролю [6,11]. До висококритичних дефектів належать тріщини, корозійні ушкодження та значні деформації, які можуть призвести до передчасної відмови деталей під час експлуатації.

Задирки та інші поверхневі нерівності зазвичай мають нижчий рівень критичності та в багатьох випадках можуть бути усунені шляхом додаткової механічної обробки.

Системи технічного зору є особливо ефективними для виявлення поверхневих дефектів, таких як подряпини, вм'ятини та забоїни. Водночас для виявлення внутрішніх і підповерхневих дефектів, зокрема тріщин, застосовують інші методи неруйнівного контролю, зокрема капілярну та ультразвукову дефектоскопію.

Окрім дефектів, що виникають у процесі штампування, металеві деталі можуть мати дефекти, пов'язані з подальшою механічною обробкою [5,9]. Для їх виявлення широко застосовуються методи неруйнівного контролю. Зокрема, ультразвукові товщиноміри використовуються для контролю товщини стінок і виявлення підповерхневих дефектів.

Портативні ультразвукові прилади дозволяють здійснювати експрес-контроль безпосередньо у виробничих умовах [7, 8] і є ефективними для контролю товщини покриттів та внутрішніх неоднорідностей матеріалу.

1.2 Сучасний стан та перспективи використання технічного зору у виробництві металевих деталей

Аналіз сучасного стану впровадження СТЗ у різні галузі промисловості свідчить про значне поширення даних систем у виробництві металевих деталей. Згідно з дослідженнями, проведеними провідними аналітичними агентствами, обсяг світового ринку систем технічного зору для промислового застосування продемонстрував стійке зростання [2]. За даними «Market Research Future», загальний обсяг ринку склав понад 15 млрд доларів США у 2024 році з прогнозованим щорічним зростанням на 12-15% до 2030 року. Згідно з дослідженням «Machine Vision Market Analysis» (2023), обсяг світового ринку систем технічного зору для промислового застосування досягне 20 млрд доларів США до 2028 року. В Україні також спостерігається активізація впровадження систем технічного зору на промислових підприємствах, що обумовлено необхідністю підвищення конкурентоспроможності вітчизняної продукції [2, 3]. Провідні

машинобудівні підприємства, такі як «ЗАЗ», «Хартрон» та «Ukrenergymachines» (колишній «Турбоатом»), інтегрують системи технічного зору у виробничі процеси для забезпечення високої якості критично важливих компонентів.

Системи технічного зору займають проміжне положення між традиційним візуальним контролем та високоточними координатно-вимірювальними машинами, що робить їх оптимальними для серійного та масового виробництва.

Сучасні тенденції розвитку технологій машинного зору характеризуються кількома ключовими напрямками. По-перше, це інтеграція методів штучного інтелекту та глибокого навчання, що дозволяє підвищити точність розпізнавання дефектів [3]. По-друге, розвиток 3D-технологій, які забезпечують повний аналіз геометричних параметрів деталей. Також варто відзначити появу хмарних платформ для обробки даних та розвиток автономних систем, здатних до адаптації до змін виробничих умов.

Порівняльний аналіз існуючих методів контролю якості металевих деталей дозволяє визначити оптимальні сфери застосування систем технічного зору [7, 11]. Аналіз даних, наведених у таблиці 1.1, свідчить, що жоден із методів контролю якості не є універсальним і кожен має обмежену сферу ефективного застосування. Традиційний візуальний контроль оператором характеризується низькою точністю та значною залежністю від людського фактору, що обмежує його використання переважно попереднім контролем або дрібносерійним виробництвом.

Координатно-вимірювальні машини та оптичні 3D-сканери забезпечують високу та дуже високу точність вимірювань, однак відзначаються низькою продуктивністю і значними витратами на впровадження, що обмежує їх застосування у масовому виробництві. Ультразвуковий контроль є ефективним для виявлення внутрішніх та підповерхневих дефектів, проте не дозволяє здійснювати повноцінний контроль геометрії та стану поверхні.

Системи технічного зору поєднують високу швидкодію, достатню точність і можливість автоматизації, що робить їх найбільш доцільними для серійного та масового виробництва, особливо при контролі поверхневих дефектів і геометричних параметрів деталей.

Таблиця 1.1 – Порівняльна характеристика методів контролю якості металевих деталей

Метод контролю	Точність вимірювань	Швидкість контролю	Вартість впровадження	Область застосування
Візуальний контроль оператором	Низька	Середня	Низька	Попередній контроль, дрібносерійне виробництво
Системи технічного зору	Висока	Висока	Середня	Масове та серійне виробництво
Координатно-вимірювальні машини	Дуже висока	Низька	Висока	Прецизійні деталі, дослідницькі роботи
Ультразвуковий контроль	Висока	Середня	Висока	Виявлення внутрішніх дефектів
Оптичні 3D-сканери	Висока	Середня	Дуже висока	Деталі складної геометричної форми

1.3 Призначення та функціональні завдання систем технічного зору

Системи технічного зору (СТЗ) стали одним з ключових компонентів сучасної індустрії. При автоматизації виробництва СТЗ забезпечують:

- охоронні та безпекові функції (виявлення присутності або проникнення, контроль зон небезпеки, стеження за операторами та транспортом);
- системи контролю якості (пошук поверхневих дефектів, геометричний контроль, перевірка збірок і маркування);
- керування роботами та верстатами (локалізація деталей у 2D/3D просторі, відстеження траєкторій руху);
- моніторинг процесів (2D/3D вимірювання, триангуляція, ToF, калібрування, компенсація руху);
- вимірювання та метрологію (оцінка зносу інструменту, контроль зварювання, фарбування та лакування, виявлення відхилень у режимах обробки).

Основне призначення систем технічного зору у виробництві металевих деталей полягає у забезпеченні об'єктивного, швидкого та безперервного контролю якості. На відміну від традиційних методів візуального контролю, системи технічного зору забезпечують стабільність результатів, що особливо важливо при масовому виробництві [4].

За допомогою систем технічного зору можна виявляти основні типи поверхневих дефектів металевих деталей, зокрема тріщини, подряпини, сліди корозії, а також визначати геометричні відхилення. Такі системи базуються на методах обробки зображень, метою яких є відокремлення та ідентифікація дефектів. Для підвищення точності аналізу використовуються алгоритми просторово-часової обробки сигналів, що дозволяють покращити якість зображень малорозмірних, малоконтрастних і близько розташованих об'єктів.

1.4 Структура системи технічного зору: компоненти та їх взаємодія

Сучасна система технічного зору для контролю якості металевих деталей має модульну архітектуру та складається з кількох функціонально взаємопов'язаних підсистем. Такий підхід забезпечує гнучкість системи, можливість масштабування та адаптації до умов конкретного виробництва.

Підсистема захоплення зображення включає цифрові камери (CCD або CMOS), оптичні елементи (об'єктиви, світлофільтри), систему освітлення та механічні засоби позиціонування об'єктів контролю [12]. Вона відповідає за формування зображення з необхідними просторовими та фотометричними характеристиками.

Підсистема обробки даних забезпечує аналіз отриманих зображень і включає процесор обробки зображень, програмні модулі попередньої обробки, алгоритми виділення ознак і класифікації дефектів, а також базу даних еталонних зразків. На цьому рівні реалізуються основні алгоритми вимірювання геометричних параметрів та виявлення дефектів.

Підсистема керування містить керуючий комп'ютер, програмне забезпечення верхнього рівня, інтерфейс оператора та засоби моніторингу стану системи. Вона забезпечує налаштування параметрів контролю, візуалізацію результатів і збереження даних.

Підсистема інтеграції з виробничим обладнанням забезпечує обмін даними з технологічними лініями, роботизованими маніпуляторами та системами автоматизації через стандартні інтерфейси й протоколи передачі даних.

Камери та сенсори є ключовими елементами підсистеми захоплення зображення. У промислових системах технічного зору застосовуються переважно CCD-камери (Charge-Coupled Device) та CMOS-камери (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor) [8, 12].



Рисунок 1.4 – Структурна схема системи технічного зору

CCD-камери характеризуються високою якістю зображення та низьким рівнем шумів, що робить їх придатними для задач, де потрібна підвищена точність вимірювань [4]. CMOS-камери відзначаються вищою швидкістю та

нижчим енергоспоживанням, що є важливим для систем контролю в реальному часі. Крім того, у практиці застосовуються лінійні камери для сканування протяжних поверхонь, а також 3D-камери для просторового контролю геометрії виробів [9].

Технічні характеристики сучасних промислових камер охоплюють роздільну здатність від 2 до 50 мегапікселів, швидкість зйомки до 500 кадрів за секунду та динамічний діапазон від 60дБ до 90 дБ [8,9]. Для підключення камер до обчислювальних модулів використовуються стандартні інтерфейси GigE Vision, USB3 Vision та Camera Link. До поширених промислових рішень належать камери серії FLIR Blackfly, які наведено на рисунку 1.5. Вони підтримують інтерфейс GigE Vision, забезпечують роздільну здатність до 20 мегапікселів при швидкості зйомки до 75 кадрів за секунду та широко застосовуються в системах технічного зору для автоматизованого контролю якості металевих деталей [4,12].



Рисунок 1.5 – Промислові камери FLIR Blackfly

Системи освітлення відіграють ключову роль у забезпеченні якості зображень під час візуального контролю поверхонь деталей. Вибір типу освітлення безпосередньо впливає на можливість виявлення дефектів різного характеру, зокрема вм'ятин, подряпин, тріщин та інших поверхневих

ушкоджень. Залежно від геометрії розташування джерела світла та об'єкта контролю розрізняють кілька основних конфігурацій освітлення[9].

Яскравопольне освітлення передбачає пряме спрямування світлового потоку на поверхню деталі та є ефективним для виявлення дефектів, що супроводжуються помітною зміною відбивної здатності або контрасту. Темнопольне освітлення здійснюється під малими кутами до поверхні, унаслідок чого світло відбивається від дефектів із порушеною геометрією. Такий спосіб освітлення дозволяє чітко виділяти тріщини, подряпини та інші мікронерівності, які малопомітні при прямому освітленні[9].

Кільцеве освітлення забезпечує рівномірне підсвічування об'єкта по всьому периметру, що дає змогу зменшити тіньові ділянки та небажані відблиски. Куполоподібне освітлення формує м'яке дифузне світлове поле і є особливо ефективним для контролю полірованих та високо відбивних металевих поверхонь, оскільки мінімізує дзеркальні відображення. Коаксіальне освітлення, за якого світло подається вздовж оптичної осі камери, застосовується для виявлення поверхневих дефектів на плоских деталях і забезпечує високу чутливість до локальних порушень структури поверхні[9].

Виявлення поверхневих дефектів реалізується через комплексний аналіз текстур поверхні, виявлення аномалій яскравості, контроль цілістності контурів та аналіз спектральних характеристик. Ефективність виявлення дефектів значною мірою залежить від правильного вибору методу освітлення.

Вибір типу освітлення критично важливий для виявлення конкретних типів дефектів [9,10]. Як видно з рисунка 1.3, вм'ятина на полірованій металевій поверхні створює характерну зміну відбивної здатності, яка може бути виявлена при правильному освітленні [7, 10]. Для такого типу дефектів найефективнішим є яскравопольне або куполоподібне освітлення, яке забезпечує контраст між деформованою та неушкодженою областями.

1.5 Архітектура та принципи побудови систем технічного зору

Сучасні системи технічного зору використовують багаторівневу архітектуру обробки даних, що дає змогу оптимізувати швидкодію та точність контролю [13].

На першому (сенсорному) рівні здійснюється захоплення зображення, його попереднє оцифрування та синхронізація з системою освітлення. Час відгуку на цьому рівні, як правило, не перевищує 10 мс.

На другому рівні виконується попередня обробка зображення, яка включає корекцію геометричних спотворень, компенсацію нерівномірності освітлення та фільтрацію шумів [13,14]. Час обробки на цьому етапі зазвичай становить від 20мс до 50 мс.

Третій рівень відповідає за аналіз зображення, зокрема сегментацію, виділення інформативних ознак і вимірювання геометричних параметрів об'єктів. Тривалість обробки на цьому етапі складає 50-200 мс залежно від складності алгоритмів.

На четвертому рівні здійснюється прийняття рішень на основі класифікації дефектів, порівняння з еталонними зразками та статистичного аналізу результатів контролю [3, 11]. Формування остаточного висновку займає 10-30 мс.

Застосування багаторівневої архітектури забезпечує загальний час обробки однієї деталі в межах від 100мс до 300 мс, що відповідає вимогам промислових систем автоматизованого контролю.

2 ФОРМУВАННЯ ТА ОБРОБКА ЗОБРАЖЕНЬ У СИСТЕМАХ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ

2.1 Процес формування цифрового зображення

Формування цифрового зображення в системах технічного зору є багатоступеневим процесом, що включає фізичні, оптичні та електронні перетворення сигналів [15]. Розуміння механізмів формування зображення є необхідною передумовою для побудови математичних моделей, а також розробки ефективних методів обробки та компенсації спотворень.

На першому етапі здійснюється освітлення об'єкта контролю. Джерело світла формує світловий потік, який падає на поверхню металевої деталі. Взаємодія світла з поверхнею визначається її матеріалом, мікрогеометрією, шорсткістю та наявністю дефектів. При цьому частина світла відбивається дзеркально, а частина – дифузно, що зумовлює просторовий розподіл яскравості у сформованому зображенні. Саме на цьому етапі закладаються передумови для появи нерівномірності освітлення та контрастних спотворень.

На другому етапі відбите світло проходить через оптичну систему камери, у результаті чого формується оптичне зображення на світлочутливій поверхні сенсора. Оптична система може вносити спотворення, зокрема геометричну дисторсію, віньєтування та аберації, які впливають на точність відтворення геометричних параметрів об'єкта.

Третій етап полягає у перетворенні світлового сигналу в електричний. Фотони, що потрапляють на фоточутливі елементи сенсора, викликають генерацію електричних зарядів унаслідок фотоелектричного ефекту. Накопичення заряду відбувається протягом заданого часу експозиції, після чого здійснюється його зчитування: послідовно по рядках у CCD-камерах або

паралельно в CMOS-камерах. На цьому етапі формуються шумові складові сигналу, пов'язані з фізичними властивостями сенсора та електроніки.

На завершальному етапі виконується аналого-цифрове перетворення сигналу. Розрядність аналого-цифрового перетворювача, яка зазвичай становить 8, 10, 12 або 14 біт, визначає динамічний діапазон та градаційну здатність системи. Результатом є цифрова матриця пікселів, що представляє яскравісний розподіл зображення об'єкта та слугує вхідними даними для подальшої обробки.

2.1.1 Флуктуації та шуми.

У процесі формування цифрового зображення в системах технічного зору виникають флуктуації та шуми різної природи, які призводять до зниження контрастності, точності вимірювань і ускладнюють виявлення поверхневих дефектів [11]. Джерела шумів можуть бути пов'язані як із фізичними властивостями світлового потоку та сенсора, так і з особливостями електронної обробки сигналу.

Фотонний шум має квантову природу та зумовлений дискретністю потоку фотонів, що потрапляють на світлочутливі елементи сенсора. Цей тип шуму описується пуассонівським розподілом, а відношення сигнал/шум є пропорційним квадратному кореню з кількості зареєстрованих фотонів. Зменшення впливу фотонного шуму можливе шляхом підвищення освітленості або збільшення часу експозиції, однак ці заходи обмежуються вимогами до швидкодії системи.

Темновий шум виникає внаслідок теплової генерації носіїв заряду у фотодіодах сенсора за відсутності освітлення. Інтенсивність темного струму істотно залежить від температури та приблизно подвоюється при її зростанні на 8-10 °C. Типові значення темного струму становлять 1-50 електронів на піксель за секунду. Для зменшення цього виду шуму застосовують охолодження сенсора, а також процедури калібрування з використанням темнових кадрів.

Шум зчитування пов'язаний з роботою електронних схем зчитування та підсилення сигналу. Його рівень зазвичай становить 2–20 електронів середньоквадратичного відхилення і зростає зі збільшенням швидкості зчитування даних. Цей тип шуму є критичним для систем, що працюють у режимі високошвидкісного контролю.

Квантизаційний шум виникає під час аналого-цифрового перетворення сигналу та зумовлений скінченною розрядністю аналого-цифрового перетворювача. Для 8-бітного АЦП рівень квантизаційного шуму становить приблизно 0,2 % від повного динамічного діапазону, тоді як для 12-бітного АЦП – близько 0,01 %. Вибір розрядності АЦП визначається компромісом між вимогами до точності вимірювань і обсягом оброблюваних даних.

Таким чином, сумарний рівень шумів у цифровому зображенні визначається сукупною дією декількох незалежних джерел, що необхідно враховувати при побудові математичних моделей формування зображення та розробці алгоритмів його обробки.

2.2 Проблема нерівномірності освітлення

Нерівномірність освітлення є однією з основних причин погіршення якості зображень у системах технічного зору, що застосовуються для контролю металевих деталей. Висока відбивна здатність металевих поверхонь зумовлює появу бліків, локальних пересвічених ділянок та зон із недостатньою освітленістю, що істотно знижує стабільність алгоритмів автоматичного виявлення дефектів [13, 10].

Залежно від характеру прояву нерівномірність освітлення доцільно класифікувати на просторову, часову та спектральну.

Просторова нерівномірність проявляється у вигляді неоднорідного розподілу яскравості по полю зображення. До її основних форм належать віньетування, яке характеризується затемненням периферійних ділянок кадру та може досягати 30–40 % зниження яскравості, а також градієнтне

освітлення, за якого яскравість плавно змінюється в одному або декількох напрямках. Окрім цього, на відбивних металевих поверхнях часто виникають локальні засвітки у вигляді дзеркальних бликів, пов'язані з геометрією освітлення та орієнтацією поверхні [10].

Часова нерівномірність освітлення зумовлена нестабільністю параметрів джерел світла у часі. Вона може проявлятися у вигляді пульсацій світлового потоку LED-освітлення з частотою від 50Гц до 120 Гц, що пов'язано з мережевим живленням. Додатковими чинниками є старіння джерел світла, яке може призводити до зниження яскравості до 20 % протягом року експлуатації, а також температурний дрейф, що викликає зміну інтенсивності та спектрального складу випромінювання [13,14].

Спектральна нерівномірність характеризується неоднорідністю спектрального розподілу освітлення по полю зображення. Вона може бути пов'язана зі зміною колірної температури світла в різних ділянках сцени, а також із хроматичними аберациями об'єктива, що призводять до залежності фокусування та масштабу зображення від довжини хвилі випромінювання [15].

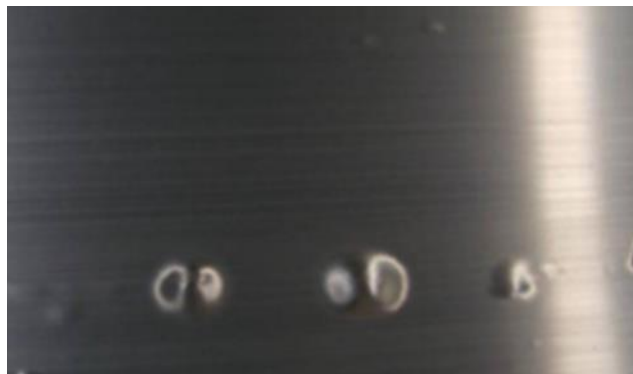


Рисунок 2.1 – Металева поверхня з вм'ятинами

На рисунку 2.1 наведено приклад зображення металевої поверхні з вм'ятинами, отриманого в умовах нерівномірного освітлення. Як видно з рисунка, спостерігаються градієнтна зміна яскравості зліва направо, локальні блики в зоні дефектів та тіньові ефекти, які істотно ускладнюють автоматичне

виділення дефектів і потребують застосування спеціальних методів компенсації.

2.3 Енергетичний та просторовий аналіз зображень дефектів на металевих поверхнях

Енергетичний та просторовий аналіз зображень є важливими етапами у процесі автоматичного виявлення дефектів на металевих поверхнях [16,17,18,19]. Ці методи дозволяють оцінити як геометричні особливості (розміри, форму, орієнтацію дефектів), так і інтенсивнісні характеристики (контраст, яскравість, спектральну відмінність).

Нерівномірність освітлення поверхні є однією з основних проблем під час візуального контролю металевих деталей. На рисунку 2.2 показано приклад зображення, де дефекти частково потрапляють у тіні або надмірно освітлені ділянки, що ускладнює їх автоматичне виявлення.

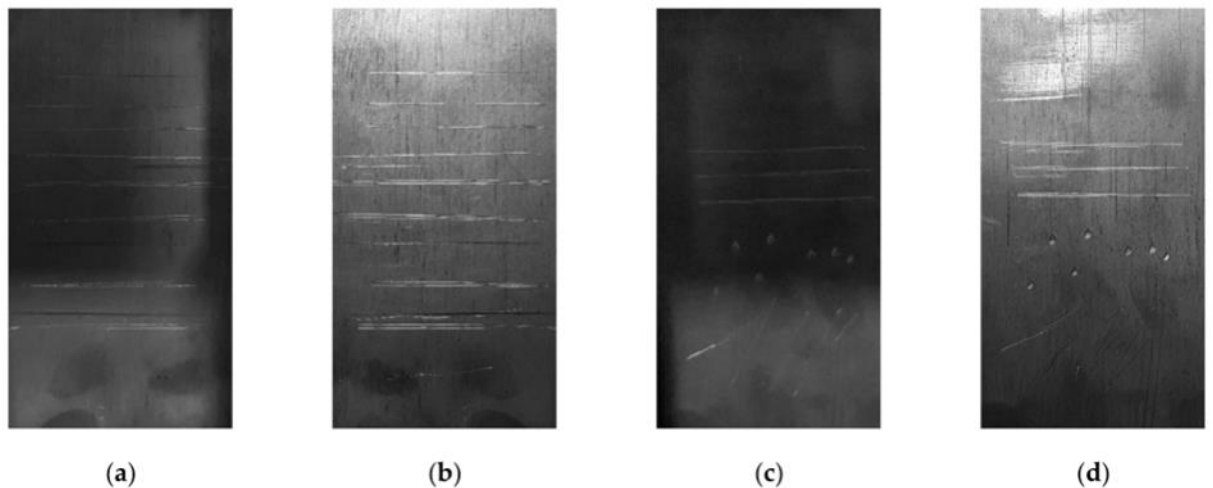


Рисунок 2.2 – Дефект при нерівномірному освітленні

Просторовий аналіз: змінна яскравість фону спотворює контури дефектів, що знижує точність визначення форми та меж дефектів.

Енергетичний аналіз: гістограма яскравості змінюється через нерівномірне освітлення, що призводить до втрати контрастності дефектів на деяких ділянках зображення.

Такий аналіз дозволяє визначати критичні області зображення, де необхідне посилення освітлення, застосування компенсаційних методів або локальна обробка зображення.

Низька контрастність виникає, коли дефект має слабку відмінність у яскравості від фону. Межі такого дефекту розмиті, і він погано ідентифікується навіть візуально.

Проблеми для просторового аналізу: нечіткі межі дефектів ускладнюють визначення форми та розміру.

Проблеми для енергетичного аналізу: гістограма зображення має вузький динамічний діапазон у зоні дефекту, що знижує ефективність порогових та адаптивних методів сегментації.

Для покращення видимості та точності виявлення рекомендується застосовувати алгоритми нормалізації освітлення та підсилення контрасту, включаючи CLAHE, гомоморфну фільтрацію та морфологічні методи.

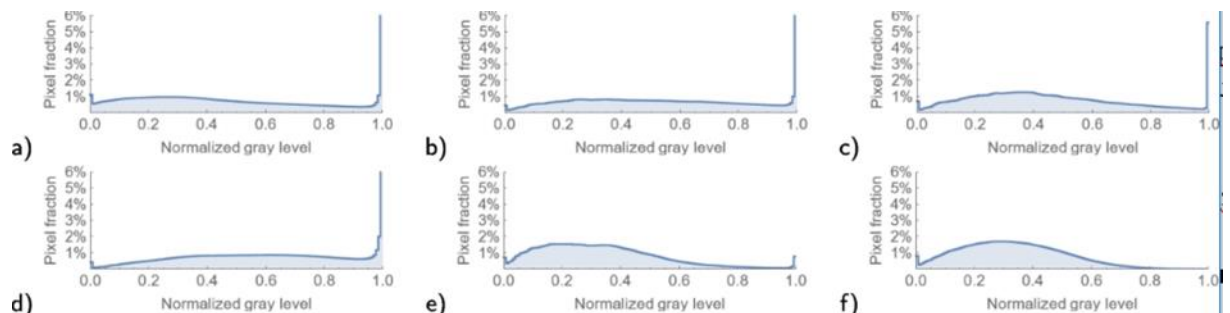


Рисунок 2.3 – Дефект з низькою контрастністю

Деякі дефекти мають мікроскопічні розміри (мікропори, включення, тонкі подряпини), що ускладнює їх фіксацію засобами комп'ютерного зору.

Вимоги до обладнання: висока роздільна здатність камер, точне фокусування та стабільне освітлення.

Проблеми для алгоритмів обробки: малорозмірні дефекти займають лише кілька пікселів, що ускладнює їх сегментацію та виділення ознак.

На рисунку 2.4 показано малий дефект на поверхні сталі, який займає лише кілька пікселів.

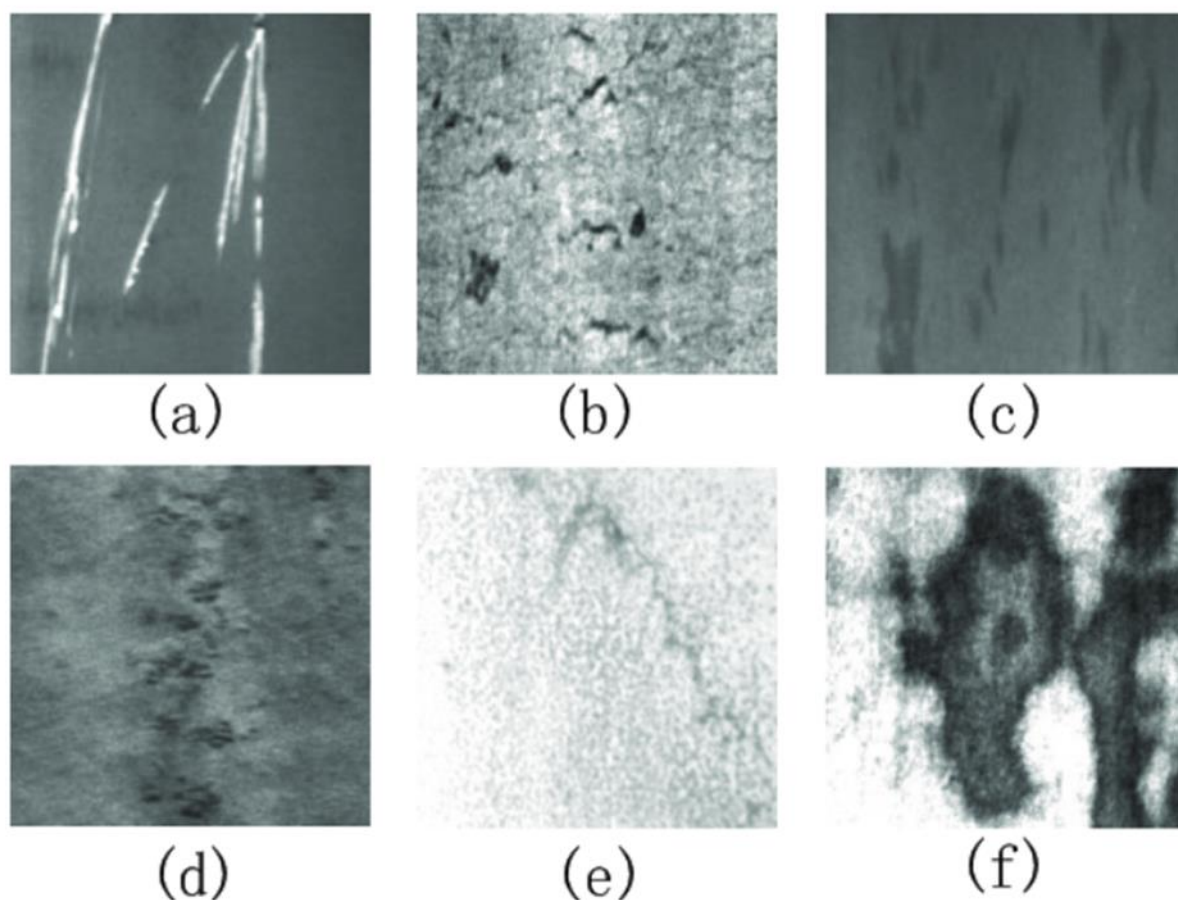


Рисунок 2.4 – Малорозмірний дефект на поверхні металу

Засвічення або блиск виникає через дзеркальне відбиття джерела світла від металевої поверхні. Камера реєструє перенасичені пікселі, що призводить до втрати інформації про структуру поверхні.

Просторовий аспект: дефект стає малопомітним або частково зливається з освітленою ділянкою.

Енергетичний аспект: локальні пікселі з максимальною яскравістю спотворюють розподіл інтенсивностей, знижуючи ефективність алгоритмів виявлення.

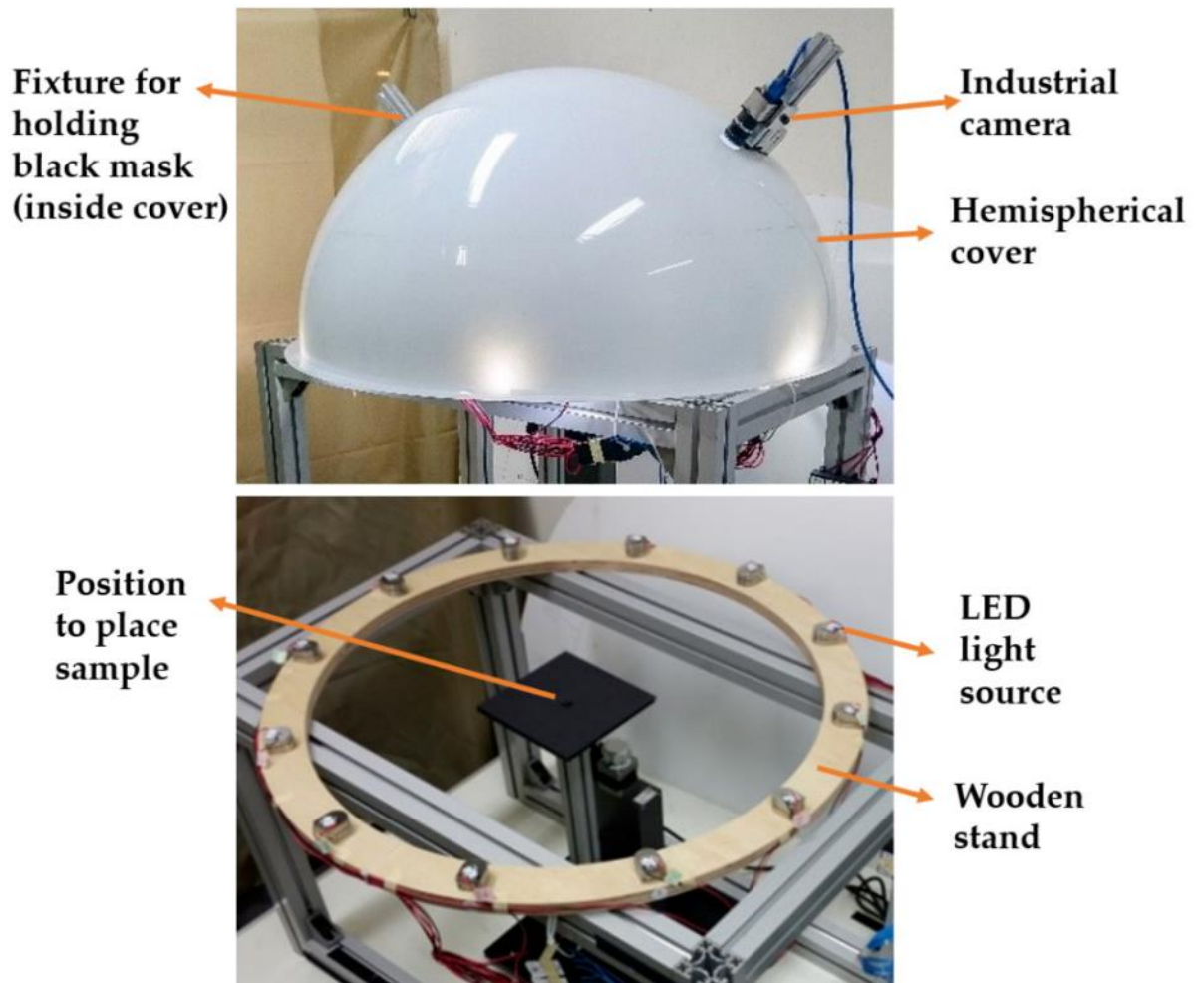


Рисунок 2.4 – Засвічення поверхні металу

Енергетичний та просторовий аналіз зображень дефектів дозволяє комплексно оцінити характер пошкоджень металевих поверхонь. Поєднання обох підходів підвищує точність ідентифікації дефектів у складних умовах освітлення та при низькій контрастності. Для практичної реалізації систем контролю доцільно застосовувати алгоритми фільтрації, компенсації освітлення та підсилення контрасту зображень.

2.4 Математична модель формування зображення

Для аналізу процесів формування цифрового зображення використовується наступна математична модель [6]:

$$I(x, y) = (R(x, y) \cdot O(x, y) \cdot L(x, y)) * PSF(x, y) + N(x, y), \quad (2.1)$$

де $I(x, y)$ – результуюче зображення на сенсорі;

$R(x, y)$ – відбивна здатність поверхні;

$O(x, y)$ – властивості об'єкта (структура, текстура, рельєф);

$L(x, y)$ – просторовий розподіл освітлення;

$PSF(x, y)$ – функція розсіювання точки оптичної системи;

$*$ – операція згортки;

$N(x, y)$ – адитивний шум (флуктуації фотонного потоку, темновий шум та інші джерела).

Відбивна здатність металу розраховується за формулою:

$$R(x, y) = R_0 + \Delta R \cdot \cos(\theta(x, y)), \quad (2.2)$$

де R_0 – базова відбивна здатність металу (характерно для полірованих поверхонь 0,5–0,9);

ΔR – максимальна амплітуда коливань відбивної здатності;

$\theta(x, y)$ – кут між нормаллю поверхні та напрямком спостереження.

Нерівномірність освітлення розраховується за формулою:

$$L(x, y) = L_0 \cdot [1 - V(r)] + L_l(x, y), \quad (2.3)$$

де L_0 – номінальна освітленість;

$V(r)$ – функція віньєтування (0...1);

$$r = \sqrt{x^2 + y^2};$$

$L_l(x, y)$ – локальні нерівномірності освітлення (бліки, тіні).

Модель адитивного шуму розраховується за формулою:

$$N(x, y) = N_\phi + N_m + N_s, \quad (2.4)$$

де N_ϕ – фотонний шум;

N_m – темновий шум;

N_s – шум зчитування.

Ця модель відображає вплив поверхневих властивостей, нерівномірності освітлення, оптичних спотворень та шумів сенсора на кінцеве зображення, що є основою для розробки алгоритмів компенсації та фільтрації.

2.5 Методи компенсації нерівномірності освітлення

Для усунення впливу нерівномірності освітлення в системах технічного зору застосовуються різні методи корекції зображень, спрямовані на відокремлення фонові складові освітлення від корисної інформації про поверхню деталі [10]. Розглянемо найбільш поширені з них.

Метод калібрування плоского поля (flat-field correction) ґрунтується на попередньому вимірюванні характеристик системи захоплення зображень. На першому етапі реєструється темновий кадр при закритій камері, який відображає власні шумові складові сенсора. На другому етапі знімається зображення рівномірно освітленої еталонної поверхні. Даний метод забезпечує високу точність компенсації просторової нерівномірності, однак потребує періодичного повторення калібрування у зв'язку зі старінням джерел освітлення та зміною характеристик сенсора.

Корекція вихідного зображення здійснюється за формулою:

$$I_{ск}(x, y) = \frac{I_{вих}(x, y) - D(x, y)}{F(x, y) - D(x, y)}, \quad (2.5)$$

де $I_{вих}$ – вихідне зображення;

$D(x, y)$ – темновий кадр;

$F(x, y)$ – зображення еталонної рівномірно освітленої поверхні.

Гомоморфна фільтрація дозволяє розділити мультиплікативну складову освітлення та відбивні властивості поверхні. Метод базується на логарифмічному перетворенні зображення, яке переводить мультиплікативну модель у адитивну, з подальшою фільтрацією у частотній області. Низькочастотна складова, що відповідає повільно змінюваному освітленню, пригнічується, тоді як високочастотні компоненти, пов'язані з дефектами поверхні, зберігаються.

Адаптивне вирівнювання гістограми з обмеженням контрасту (CLAFHE) застосовується для локальної компенсації нерівномірності освітлення. Зображення розбивається на блоки розміром 8×8 або 16×16 пікселів, у межах яких виконується вирівнювання гістограми з обмеженням максимального підсилення контрасту з метою запобігання посиленню шумів. Для забезпечення плавних переходів між блоками використовується інтерполяція.

Морфологічна корекція базується на застосуванні морфологічних операцій відкриття або закриття з використанням структурного елемента великого розміру. У результаті формується оцінка фонові складові освітлення, яка надалі віднімається від вихідного зображення. Цей підхід є ефективним для усунення повільно змінюваних просторових неоднорідностей.

2.6 Алгоритми обробки зображень

Алгоритми обробки зображень є важливим складником систем технічного зору та визначають ефективність автоматичного виявлення та аналізу дефектів металевих поверхонь. Вибір алгоритмів обробки залежить від характеру дефектів, умов зйомки та вимог до точності і швидкодії системи.

На етапі попередньої обробки зображень застосовуються методи, спрямовані на підвищення якості вхідних даних. До них належать фільтрація шумів із використанням гаусівського та медіанного фільтрів, методи підвищення контрасту, зокрема вирівнювання гістограми та адаптивне підсилення контрасту, а також алгоритми компенсації нерівномірності освітлення.

Сегментація зображень є одним із ключових етапів обробки та полягає у відокремленні дефектних ділянок від фону. Для виявлення тріщин та подряпин ефективними є краєві методи сегментації, зокрема алгоритм Кенні, тоді як для вм'ятин та корозійних уражень доцільно застосовувати порогові та адаптивні методи сегментації, а також алгоритми зростання областей.

Після сегментації виконується виділення ознак, яке є завершальним етапом перед класифікацією дефектів. Для опису дефектів використовуються геометричні ознаки (площа, периметр, компактність), текстурні ознаки (ентропія, контраст, однорідність), а також спектральні характеристики. Сукупність цих ознак забезпечує формування інформативного опису дефектів для подальшого аналізу.

3 МЕТОДИ ОЦІНЮВАННЯ ЯКОСТІ ТА ІНФОРМАТИВНОСТІ ЗОБРАЖЕНЬ

3.1 Критерії оцінювання якості цифрових зображень

Якість цифрового зображення в системах технічного зору визначається його інформативністю та придатністю для подальшої автоматизованої обробки і виявлення дефектів. На відміну від візуальної оцінки оператором, автоматичний контроль потребує використання формалізованих кількісних критеріїв, які дозволяють об'єктивно оцінювати якість зображень, порівнювати результати обробки та визначати ефективність застосованих алгоритмів компенсації нерівномірності освітлення.

Критерії оцінювання якості цифрових зображень умовно поділяються на кілька груп: статистичні, контрастні, інформаційні та структурні. Статистичні критерії ґрунтуються на аналізі розподілу рівнів яскравості пікселів, контрастні – на оцінюванні відмінностей між окремими ділянками зображення, інформаційні – на положеннях теорії інформації, а структурні – на аналізі геометричних і текстурних особливостей зображення. Статистичні та інформаційні критерії є найбільш чутливими до змін умов освітлення та контрастності, що є критичним для виявлення дефектів металевих поверхонь.

Одним з найпростіших статистичних показників якості є середня яскравість зображення, яка визначається як середнє арифметичне значень інтенсивності всіх пікселів:

$$\mu = \frac{1}{MN} \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N I(x, y), \quad (3.1)$$

де $I_{вих}$ – яскравість пікселя з координатами (x, y) ;

M – розміри зображення по горизонталі;

N – розміри зображення по вертикалі.

Середня яскравість характеризує загальний рівень освітлення сцени. Надто низькі або надто високі значення цього показника можуть призводити до втрати деталей у тінях або засвічених ділянках, що ускладнює автоматичне виявлення дефектів.

Для оцінювання контрастності зображення часто використовують дисперсію або стандартне відхилення яскравості, які визначаються за формулою:

$$\sigma^2 = \frac{1}{MN} \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N (I(x, y) - \mu)^2, \quad (3.2)$$

Дисперсія яскравості характеризує розкид значень інтенсивності пікселів і може використовуватися як кількісний показник глобального контрасту зображення. Збільшення цього показника, як правило, свідчить про кращу розрізняваність дефектів на фоні основної поверхні.

Окрім глобальних статистичних показників, для аналізу якості зображень застосовуються контрастні критерії, зокрема середньоквадратичний контраст, який чисельно дорівнює стандартному відхиленню яскравості. RMS-контраст є особливо ефективним для оцінювання зображень з нерівномірним освітленням, оскільки враховує варіації яскравості по всьому полю зображення.

Більш узагальнену оцінку інформативності цифрового зображення забезпечують інформаційні критерії, що базуються на положеннях теорії інформації. Одним з найбільш поширених інформаційних показників є ентропія Шеннона, яка характеризує ступінь невизначеності або різноманітності рівнів яскравості в зображенні. На відміну від простих статистичних показників, інформаційна ентропія враховує не лише розкид яскравостей, але й форму їх розподілу, що робить її чутливою до змін контрасту, появи дефектів та ефективності алгоритмів корекції освітлення.

Таким чином, використання формалізованих критеріїв оцінювання якості цифрових зображень дозволяє об'єктивно аналізувати вплив умов освітлення та ефективність методів попередньої обробки. Серед розглянутих показників інформаційна ентропія є найбільш універсальним критерієм, оскільки комплексно відображає інформативність зображення і доцільна для подальшого застосування в експериментальних дослідженнях, що розглядаються в наступних підрозділах.

3.2 Оцінка інформаційної ентропії цифрового зображення

У теорії інформації ентропія розглядається як міра невизначеності або непередбачуваності інформаційного джерела. Концепція інформаційної ентропії була запропонована К. Шенноном і визначає кількість інформації як величину, що зменшує ступінь невизначеності щодо стану об'єкта або системи.

Інформаційна ентропія дискретної випадкової величини X описується формулою Шеннона:

$$H(X) = -\sum_{i=1}^M p_i \log_2 p_i, \quad (3.3)$$

де p_i – ймовірність появи i -го стану (символу) випадкової величини X ;

M – кількість можливих станів;

\log_2 – логарифм за основою 2, що забезпечує вимірювання ентропії в бітах.

Ентропія характеризує мінімальну середню кількість бітів, необхідну для кодування одного символу джерела інформації. У випадку цифрових зображень ентропія відображає ступінь невизначеності розподілу рівнів яскравості пікселів і може використовуватися як кількісний показник інформативності зображення.

Для обчислення інформаційної ентропії цифрового зображення використовується наступна послідовність дій:

Отримується вхідне цифрове зображення в градаціях сірого.

Будується гістограма розподілу рівнів яскравості, що визначає кількість пікселів для кожного можливого значення яскравості (від 0 до 255 для 8-бітного зображення).

Обчислюється відносна частота появи кожного рівня яскравості:

$$p_i = \frac{n_i}{N}, \quad (3.4)$$

де n_i – кількість пікселів з рівнем яскравості i ;

N – загальна кількість пікселів у зображенні.

Значення ентропії визначається за формулою Шеннона шляхом підсумовування внесків усіх можливих рівнів яскравості.

3.2.1 Практичний приклад розрахунку ентропії.

Для демонстрації методики обчислення інформаційної ентропії було використано модельне зображення представлене на рисунку 3.1. Воно містить плавний градієнт яскравості з центральною світлою областю.

Зображення характеризується просторово неоднорідним розподілом яскравості з плавними переходами від темних периферійних областей до світлішої центральної зони. Значення яскравості в периферійних ділянках знаходяться в межах 60–80, тоді як у центральній області досягають 180–200. Такий характер розподілу є типовим для реальних зображень металевих поверхонь, отриманих за умов нерівномірного або природного освітлення.



Рисунок 3.1 – Модельне зображення для оцінювання інформаційної ентропії

Аналіз зображення дозволив визначити наступні початкові характеристики:

- мінімальне значення яскравості: $I_{\min} \approx 45$;
- максимальне значення яскравості: $I_{\max} \approx 205$;
- динамічний діапазон яскравості: $\Delta I = I_{\max} - I_{\min} = 160$.

Після підрахунку частот появи кожного рівня яскравості було побудовано гістограму розподілу інтенсивностей пікселів.

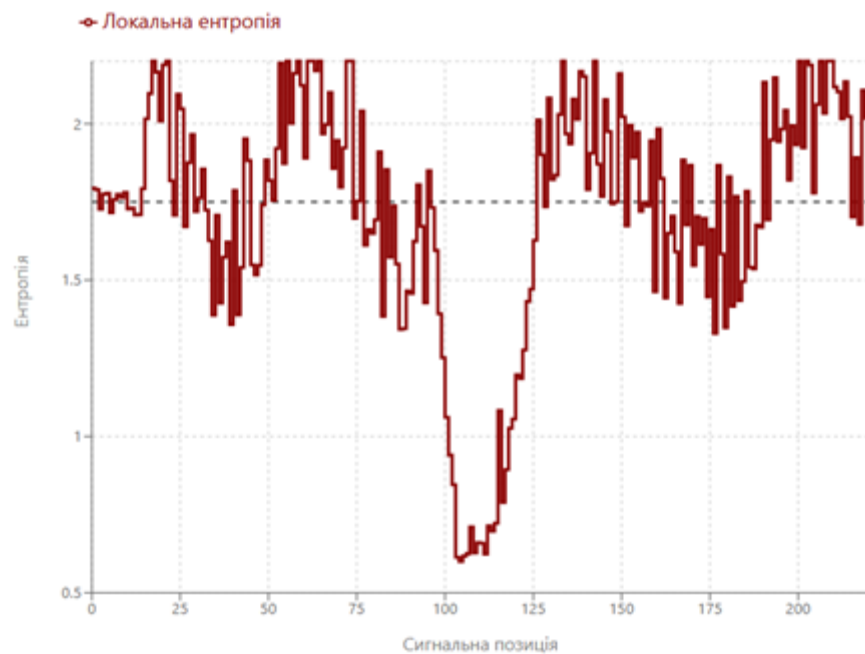


Рисунок 3.2 – Гістограма розподілу значень яскравості модельного зображення

Гістограма розподілу яскравостей демонструє нерівномірний характер розподілу інтенсивностей пікселів із підвищеною концентрацією значень у середньому діапазоні від 100 до 150. Такий розподіл відповідає зображенню з переважно середнім рівнем яскравості та наявністю локальних світлих і темних областей, що характерно для зображень з градієнтним освітленням.

Для кожного рівня яскравості i , що присутній у зображенні, було обчислено ймовірність його появи за виразом 3.4. Приклад розрахунку для окремих значень яскравості наведено в Таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Розрахунок ймовірностей для характерних значень яскравості

Значення яскравості (i)	Опис області	Відносна частота, p_i	Внесок в ентропію, $p_i \log_2 p_i$
60	Темна периферія	0.0185	0.1048
100	Середньо-темна зона	0.0342	0.1689
130	Основна область	0.0428	0.1953
160	Світла зона	0.0311	0.1563
190	Яскравий центр	0.0156	0.0973

Загальна ентропія обчислюється сумуванням внесків усіх 256 можливих значень яскравості:

$$H(X) = -\sum_{i=0}^{255} p_i \log_2 p_i, \quad (3.5)$$

Результати обчислення ентропії для модельного зображення наведено в Таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Статистичні характеристики та ентропія модельного зображення

Параметр	Значення
Діапазон значень яскравості	45-205
Кількість унікальних значень	161
Середнє значення яскравості	122.4
СКВ	38,7
Обчислена ентропія $H(X)$	6,82 біт/піксель
Максимально можлива ентропія	8,00 біт/піксель
Коефіцієнт використання ємності η	85,3%

Отримане значення $H(X) = 6,82$ біт/піксель вказує, що для ефективного кодування даного зображення необхідно близько 7 біт на піксель (округлено до найближчого цілого).

Максимально можлива ентропія для 8-бітного зображення:

$$H_{\max} = \log_2 256 = 8 \text{ біт / піксель} , \quad (3.6)$$

Коефіцієнт використання інформаційної ємності розраховується як:

$$\eta = \frac{H(X)}{H_{\max}} = \frac{6,82}{8} \approx 0,853 = 85,3\% , \quad (3.7)$$

Значення ентропії $H(X) = 6,82$ біт/піксель свідчить про:

- рівень невизначеності: Зображення має високий рівень невизначеності розподілу яскравості, що відображає наявність різноманітної інформації;
- можливість стиснення: Різниця між максимальною та обчисленою ентропією ($8 - 6,82 = 1,18$ біт/піксель або 14.7%) показує потенціал для безвратного стиснення за допомогою ентропійного кодування;

- нерівномірність розподілу: Ентропія нижча від максимальної, що вказує на нерівномірний розподіл яскравості, характерний для природних зображень із градієнтами та локальними особливостями.

Граничні випадки:

- максимальна ентропія $H = 8$ біт/піксель досягається при рівномірному розподілі всіх 256 значень ($p_i = 1/256$), що відповідає випадковому шуму;

- мінімальна ентропія $H = 0$ відповідає ситуації, коли всі пікселі мають однакове значення, тобто зображення повністю детерміноване.

Отримане $H(X) = 6,82$ біт/піксель знаходиться у типовому діапазоні для природних зображень (зазвичай 6–7.5 біт/піксель), що підтверджує адекватність моделі та правильність розрахунків.

3.3 Дослідження методів підвищення контрастності зображень для виявлення дефектів

Однією з ключових характеристик цифрового зображення, що безпосередньо впливає на ефективність автоматизованого виявлення дефектів на металевих поверхнях, є контрастність. Низький рівень контрастності ускладнює розрізнення дефектів, таких як тріщини, подряпини або вм'ятини, на фоні основної поверхні, що знижує точність систем технічного зору. У зв'язку з цим актуальним є застосування методів підвищення контрастності зображень у задачах контролю якості металевих виробів.

Контрастність – це характеристика зображення, яка визначає ступінь відмінності між яскравими та темними ділянками. Вона відображає, наскільки сильно об'єкти на зображенні відрізняються за інтенсивністю яскравості від фону. Чим більшою є різниця між яскравістю об'єкта та фонові області, тим вищою є контрастність і, відповідно, тим простіше системі технічного зору виявляти дефекти поверхні.

Математично контрастність C може бути визначена за формулою:

$$C = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}, \quad (3.8)$$

де I_{\max} – максимальне значення яскравості пікселів зображення;

I_{\min} – мінімальне значення яскравості.

Для зображень у градаціях сірого контрастність тісно пов'язана з гистограмою яскравості. Чим ширшим є діапазон значень яскравості, тим більш насиченим і деталізованим виглядає зображення, що позитивно впливає на якість подальшої обробки та аналізу.

Одним із найбільш простих і водночас ефективних методів підвищення контрастності є метод лінійного розтягування контрасту. Теоретично контрастність цифрового зображення визначається різницею між мінімальним і максимальним значеннями яскравості пікселів. У багатьох практичних випадках ці значення займають лише частину доступного динамічного діапазону, що призводить до зниження візуальної виразності зображення.

Метод лінійного розтягування контрасту полягає у перетворенні значень яскравості таким чином, щоб вони займали весь доступний діапазон інтенсивностей. Математична модель даного методу описується виразом:

$$I_{new(x,y)} = \frac{I_{old}(x,y) - I_{\min}}{I_{\max} - I_{\min}} \cdot 255, \quad (3.9)$$

де $I_{new}(x, y)$ – нове значення яскравості пікселя з координатами (x, y) ;

I_{old} – початкове значення яскравості пікселя;

I_{\min} – мінімальне значення яскравості у вихідному зображенні;

I_{\max} – максимальне значення яскравості у вихідному зображенні;

255 – максимальне значення яскравості для 8-бітного зображення.

Суть методу полягає у визначенні граничних значень яскравості у вихідному зображенні та подальшому лінійному перетворенні всіх проміжних значень у повний інтервал $[0;255]$. У результаті підвищується візуальна контрастність зображення, що сприяє кращому виділенню дефектів на металевих поверхнях.

3.4 Методика експериментальних досліджень

Експериментальні дослідження мають бути спрямовані на оцінювання ефективності методів моделювання, попередньої обробки та аналізу зображень металевих поверхонь з дефектами за умов як змодельованих, так і реальних даних. Методика досліджень включає етапи математичного моделювання, та фізичного експерименту з використанням реальних зразків.

3.4.1 Методика математичного моделювання зображень.

На першому етапі дослідження має виконуватися математичне моделювання зображень металевих поверхонь з метою апробації алгоритмів обробки за контрольованих умов. Для цього використовувалося програмне середовище Microsoft Excel, яке дозволяє формувати числові масиви, виконувати статистичний аналіз та візуалізувати результати.

Моделювання зображень здійснюється шляхом генерації двовимірних числових масивів, що імітують розподіл яскравостей пікселів зображення. Для формування таких масивів застосовувався вбудований генератор випадкових чисел (Random Number Generation) надбудови Analysis ToolPak. Параметри генерації мають бути обрані таким чином, щоб наблизити змодельовані дані до характеристик реальних зображень металевих поверхонь, а саме: нормальний закон розподілу, нульове середнє значення, одиничне стандартне відхилення та розмір матриці 50×50 елементів.

Сформовані числові масиви будуть інтерпретовані як матриці яскравості зображень і будуть використані для:

- аналізу статистичних характеристик яскравості;
- дослідження варіації інтенсивності в зонах можливих дефектів;
- перевірки стійкості алгоритмів фільтрації, нормалізації освітлення та підсилення контрасту.

Додатково для підвищення достовірності досліджень буде використано реальні зображення металевих поверхонь з низьким рівнем контрастності, які будуть оцифровані та подані у вигляді матриць яскравостей. На основі цих матриць буде виконано подальше моделювання та візуалізацію зображень.

3.4.2 Методика дослідження методів підвищення контрастності.

Для оцінювання ефективності методів підвищення контрастності буде застосовано метод лінійного розтягування динамічного діапазону яскравостей. Вихідні зображення з обмеженим діапазоном значень яскравості (45-175) буде оброблено шляхом лінійного перетворення, що забезпечить приведення значень до повного діапазону 0-255.

Ефективність методу буде оцінюватися за такими показниками:

- мінімальне та максимальне значення яскравості;
- динамічний діапазон;
- коефіцієнт використання доступного діапазону;
- візуальна якість зображення.

Порівняльний аналіз вихідних та оброблених зображень дозволить оцінити вплив розтягування контрасту на інформативність зображень та їх придатність для подальшого автоматизованого аналізу.

3.4.3 Методика фізичного експерименту.

Фізичні експерименти буде проведено з метою дослідження впливу нерівномірності освітлення та параметрів зйомки на якість виявлення дефектів металевих поверхонь. У якості об'єктів дослідження буде використано тестові металеві зразки з контрольованими дефектами у вигляді вм'ятин.

Зображення будуть отримані за допомогою камери FLIR Blackfly S з роздільною здатністю 20 мегапікселів у поєднанні з системою світлодіодного освітлення, яка дозволить змінювати геометрію, інтенсивність та спектральний склад світла. Зйомку буде виконано за умов нерівномірного освітлення з метою моделювання реальних виробничих умов.

Для аналізу зображень буде використано спеціалізований програмний інтерфейс, який забезпечує:

- візуалізацію зображень та гістограм яскравості;
- виділення області інтересу;
- вимірювання геометричних параметрів дефектів;
- застосування алгоритмів порогової обробки та фільтрації.

Оцінювання якості зображень буде здійснено на основі статистичних показників, зокрема середнього значення яскравості, коефіцієнта варіації, динамічного діапазону та співвідношення сигнал/шум (SNR). Для візуалізації просторового розподілу інтенсивності буде побудовано тривимірні гістограми та профілі яскравості.

3.4.4 Методика порівняльної оцінки алгоритмів.

Для порівняльного аналізу ефективності методів попередньої обробки буде застосовувано гаусівський, медіанний, гомоморфний та комбінований методи обробки зображень.

Оцінювання буде проведено за такими критеріями:

- значення PSNR;
- ступінь підвищення контрасту;
- час обробки зображення.

Також буде досліджено вплив параметрів освітлення, зокрема кута падіння світла, інтенсивності та спектрального складу, на ймовірність виявлення дефектів. Отримані результати дозволять визначити оптимальні умови освітлення для різних типів металевих поверхонь та дефектів.

4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА

Експериментальна частина роботи спрямована на перевірку працездатності та ефективності запропонованих методів моделювання, попередньої обробки та аналізу зображень металевих поверхонь з дефектами. Основною метою експериментальних досліджень є оцінювання впливу контрастності зображень, нерівномірності освітлення та параметрів зйомки на якість автоматизованого виявлення дефектів.

План проведення експерименту передбачає виконання двох взаємопов'язаних етапів: математичного моделювання та фізичного експерименту. Такий підхід дозволяє поєднати дослідження алгоритмів обробки зображень за контрольованих умов із перевіркою їх ефективності на реальних даних, отриманих у наближених до виробничих умовах.

Етап математичного моделювання полягає у створенні числових моделей зображень, що імітують кадри, отримані системою технічного зору. Моделювання здійснюється шляхом формування двовимірних матриць яскравості, у яких кожен елемент відповідає значенню інтенсивності окремого пікселя зображення металевої поверхні.

Змодельовані зображення використовуються для дослідження властивостей алгоритмів попередньої обробки, зокрема фільтрації шумів, нормалізації освітлення та підсилення контрасту. Застосування математичного моделювання дозволяє варіювати параметри зображень у широких межах і аналізувати вплив окремих факторів на якість виявлення дефектів без необхідності проведення великої кількості фізичних експериментів.

Окрім штучно згенерованих даних, у межах моделювання використовуються оцифровані реальні зображення з низьким рівнем контрастності, подані у вигляді матриць яскравостей. Це дозволяє

забезпечити більшу відповідність змодельованих даних реальним умовам функціонування систем технічного зору.

Фізичний експеримент полягає у безпосередньому отриманні цифрових зображень об'єкта дослідження за допомогою промислової камери та подальшому аналізі цих зображень з використанням розроблених методів обробки.

Для проведення експерименту застосовувалася промислова камера FLIR Blackfly S, яка забезпечує високу просторову роздільну здатність та стабільні параметри зйомки, що є необхідними умовами для дослідження дефектів металевих поверхонь. Зйомка виконувалася за різних умов освітлення з метою оцінювання впливу нерівномірності фону та відблисків на якість зображень.

Об'єкт експерименту повинен мати оптичні властивості, що відрізняються від фону, та містити локальні неоднорідності, які відповідають характерним дефектам металевих поверхонь. У якості об'єкта дослідження використано металеву деталь з поверхневими дефектами у вигляді вм'ятин та нерівностей, що дозволяє оцінити здатність системи технічного зору до їх виявлення та аналізу.

Отримані під час фізичного експерименту зображення використовуються для кількісної та якісної оцінки ефективності алгоритмів обробки, а також для порівняння результатів, отриманих на змодельованих і реальних даних.

4.1 Математичне моделювання

Для дослідження процесів виявлення дефектів на металевих поверхнях використовувалося програмне середовище Microsoft Excel, яке забезпечує можливість попереднього числового аналізу, моделювання даних та візуалізації результатів обчислень. Використання цього середовища є

доцільним на етапі апробації алгоритмів обробки зображень завдяки його доступності та наявності вбудованих інструментів статистичного аналізу.

Ключовим інструментом у межах даного дослідження став вбудований генератор випадкових чисел (Random Number Generation), що входить до складу надбудови Analysis ToolPak. За його допомогою формувалася масив числових даних, який імітує розподіл яскравостей або інтенсивностей пікселів зображення металевої поверхні. Такий підхід дозволяє перевірити адекватність та стійкість алгоритмів фільтрації й виявлення дефектів за різних умов.

Параметри генерації випадкових чисел підбиралися з метою наближення змодельованих даних до характеристик реальних експериментальних зображень:

- закон розподілу – нормальний;
- середнє значення (Mean) – 0, що забезпечує симетричність розподілу;
- стандартне відхилення (Standard Deviation) – 1, для формування контрольованого рівня флуктуацій;
- кількість змінних – 50;
- кількість випадкових чисел – 50, у результаті чого формується матриця розміром 50×50 елементів;
- режим виведення – Output Range, що визначає діапазон комірок для запису згенерованого масиву.

Після виконання генерації формується числова матриця, у якій кожен елемент відповідає рівню яскравості окремого пікселя або локального сегмента поверхні. Таке представлення даних дозволяє виконувати подальші обчислення, зокрема:

- розрахунок середнього значення яскравості;
- оцінку варіації інтенсивності в областях, що потенційно містять дефекти;
- побудову поверхневих графіків для візуального аналізу структури зображення.

На рисунку 4.1 представлено вікно генератора випадкових чисел у середовищі Microsoft Excel.

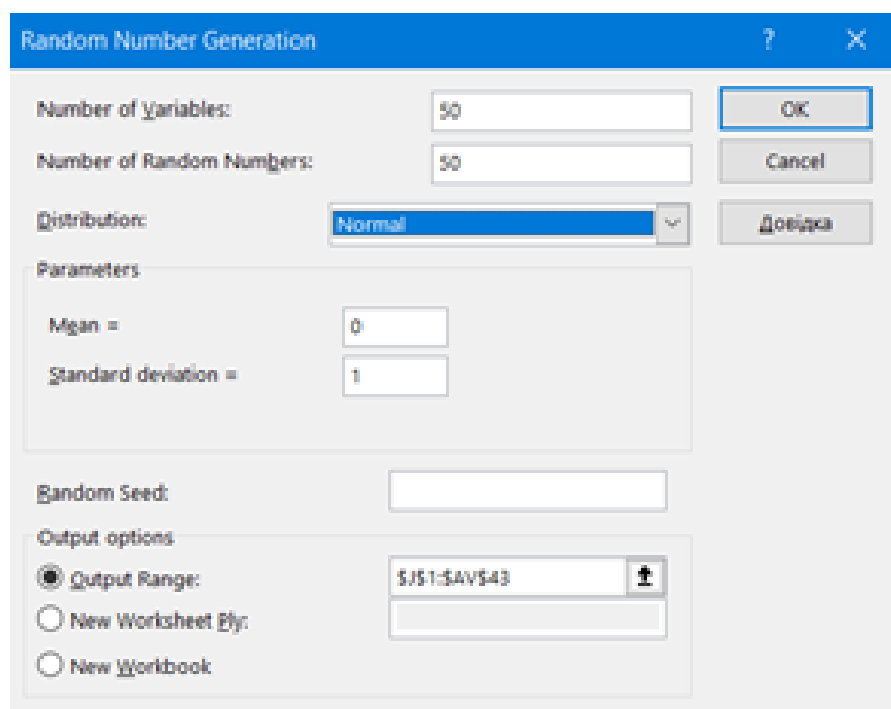


Рисунок 4.1 – Вікно генератора випадкових чисел у середовищі Excel

Отримані змодельовані дані можуть бути використані для перевірки стабільності методів попередньої обробки зображень, зокрема нормалізації освітлення, фільтрації шумів та підсилення контрасту. Крім того, такі масиви слугують тестовою базою для оцінки ефективності алгоритмів виявлення мікродефектів на основі порогових і статистичних методів аналізу.

Для демонстрації роботи методу було використано реальні зображення з низьким рівнем контрастності, які було оцифровано з метою створення матриці значень яскравості, де кожен елемент відповідає яскравості окремого пікселя. Після чого з отриманої матриці яскравостей було змодельовано зображення.

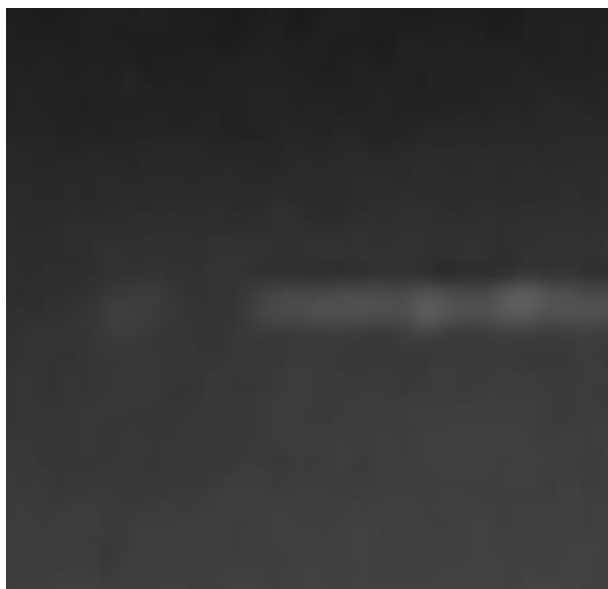


Рисунок 4.2 – Вихідне зображення 1

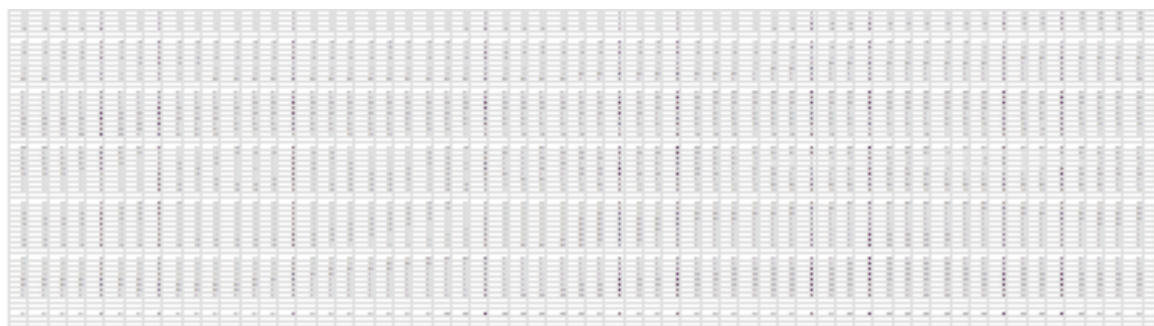


Рисунок 4.3 – Сформований числовий масив 1

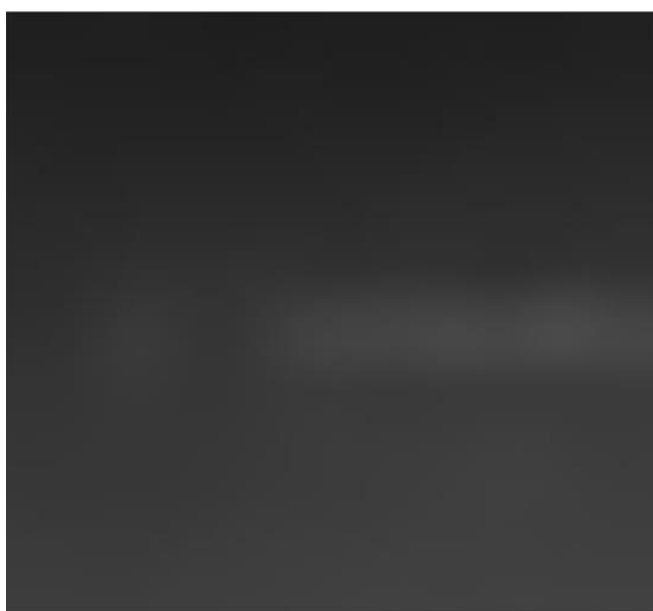


Рисунок 4.4 – Результат моделювання 1

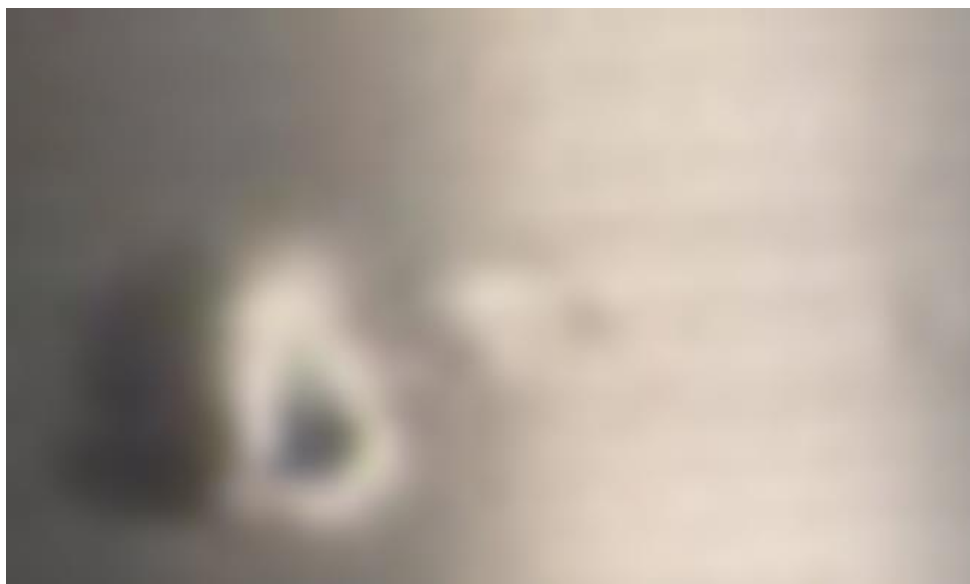


Рисунок 4.5 – Вихідне зображення 2

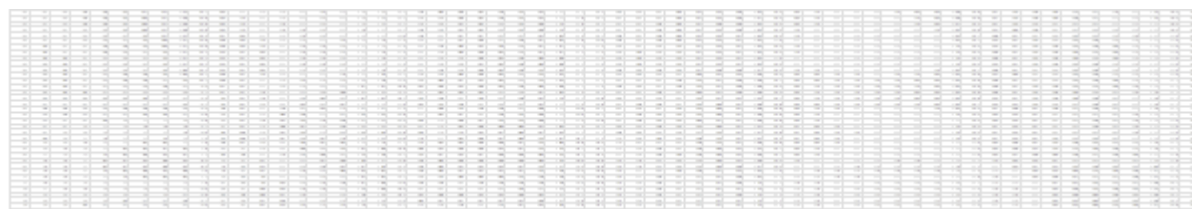


Рисунок 4.6 – Сформований числовий масив 2

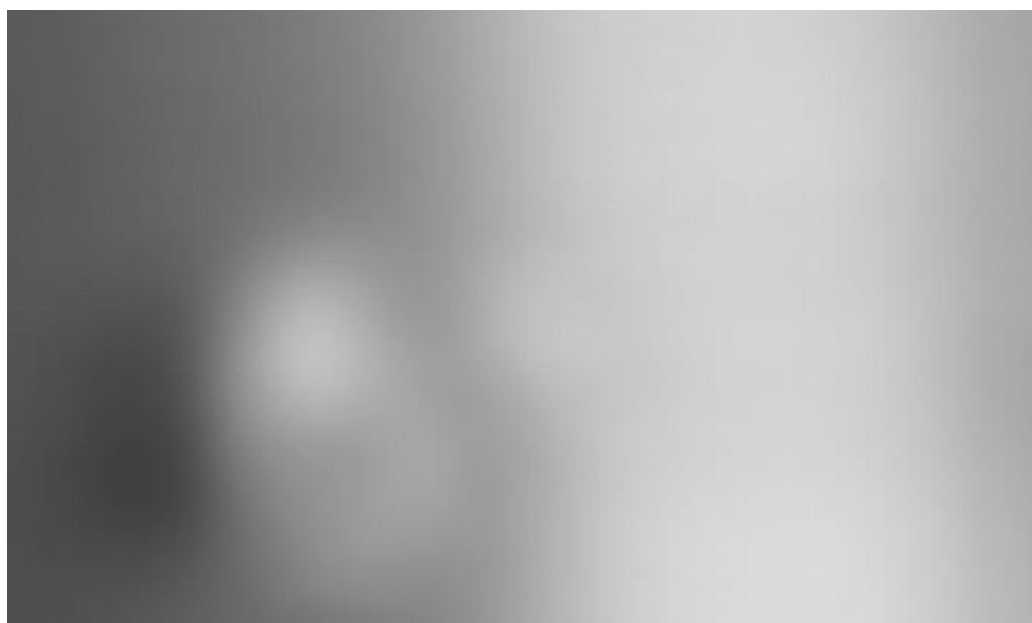


Рисунок 4.7 – Результат моделювання 2

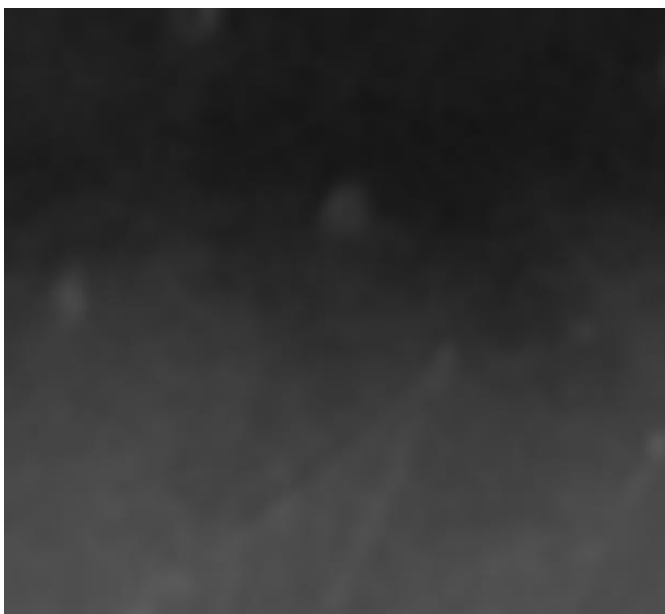


Рисунок 4.14 – Вихідне зображення 5

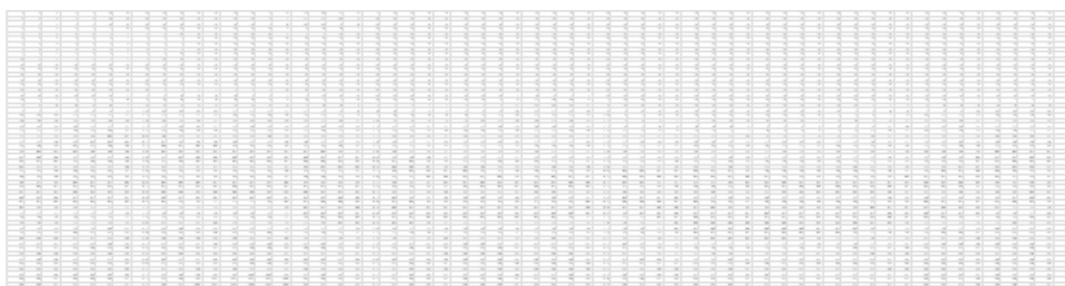


Рисунок 4.15 – Сформований числовий масив 5

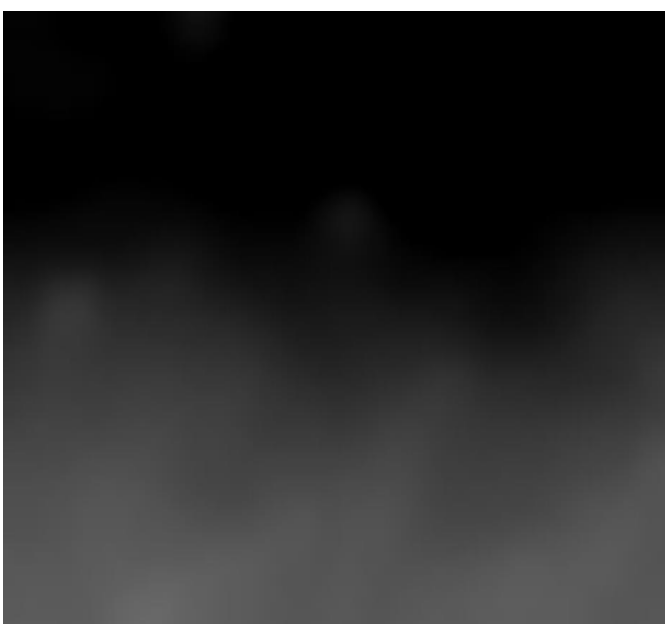


Рисунок 4.16 – Результат моделювання 5

динамічного діапазону призводить до зниження візуальної інформативності зображення, яке сприймається як сіре та недостатньо деталізоване.

Для підвищення контрастності до кожного елемента матриці було застосовано формулу лінійного перетворення, яка забезпечує автоматичне розтягування вузького діапазону значень 45-175 на повний діапазон яскравостей 0-255.

Результат застосування методу лінійного розтягування контрасту наведено на рисунку 4.19 Порівняно з вихідним зображенням, оброблене зображення характеризується суттєво покращеною контрастністю та підвищеною візуальною чіткістю.

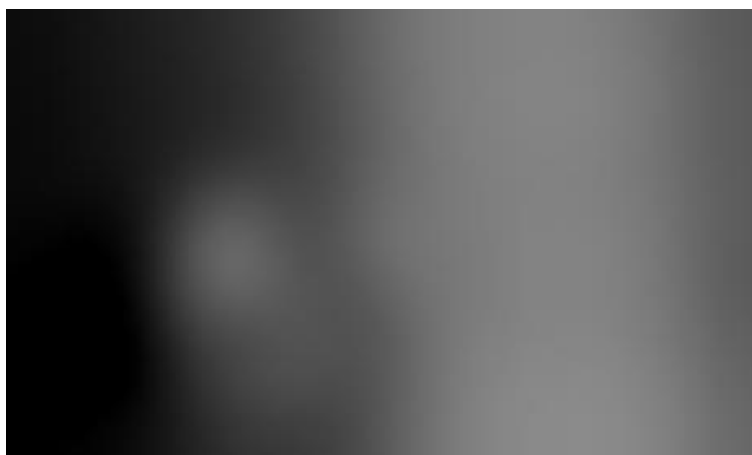


Рисунок 4.19 – Результат застосування методу лінійного розтягування контрасту

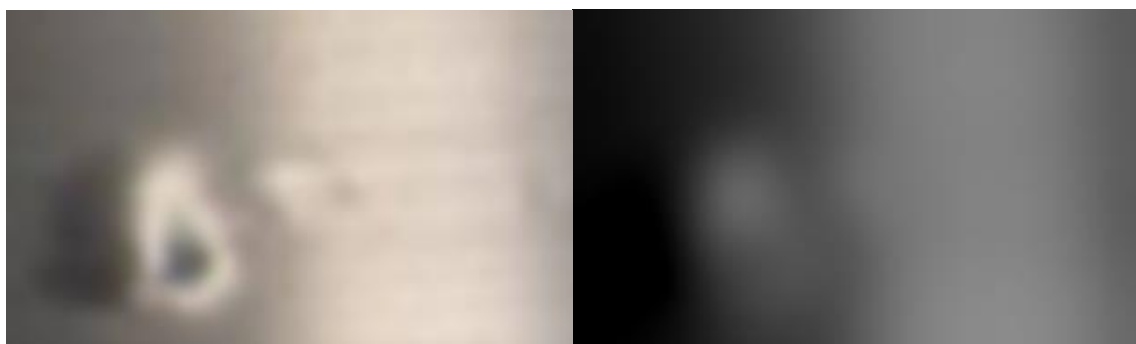


Рисунок 4.20 – Порівняльний аналіз вихідного (з ліва) та отриманого (з права) зображень

На рисунку 4.20 наведено порівняння вихідного та обробленого зображень, яке наочно демонструє ефективність застосованого методу.

Порівняльний аналіз основних характеристик вихідного та обробленого зображень наведено в таблиці 4.1. Як видно з наведених даних, застосування методу дозволило збільшити динамічний діапазон яскравостей зі 130 до 255 одиниць, тобто досягти повного використання доступного діапазону.

Таблиця 4.2 – Відношення сигнал/шум з застосуванням методу накопичення

Параметр	Вихідне зображення	Оброблене зображення
Мінімальна яскравість	45	0
Максимальна яскравість	175	255
Динамічний діапазон	130	255
Коефіцієнт використання діапазону	51%	100%

Візуальний аналіз підтверджує, що лінійне розтягування контрасту є ефективним засобом покращення якості зображень: темні ділянки стають більш виразними, світлі – яскравішими, що загалом призводить до підвищення інформативності та якості зображення і створює передумови для подальшого автоматизованого виявлення дефектів.

4.2 Фізичний експеримент

Для оцінки впливу нерівномірності освітлення на ефективність виявлення дефектів металевих поверхонь було проведено експериментальне дослідження. У якості об'єкта дослідження використовувалася тестова металева деталь з контрольованими дефектами у вигляді вм'ятин. Аналіз здійснювався на основі цифрових зображень, отриманих за умов нерівномірного освітлення.

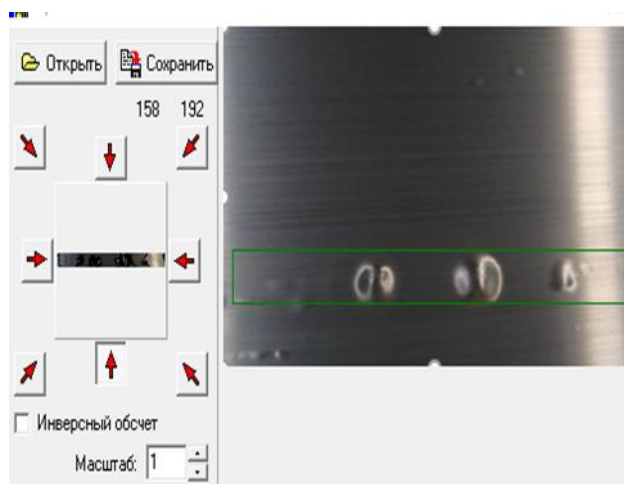


Рисунок 4.21 – Програмний інтерфейс для аналізу зображень дефектів металевих поверхонь

Кількісний аналіз вихідного зображення представленого на рисунку 4.21 показав, що діапазон значень яскравості пікселів становить від 40 до 220 відносних одиниць при максимальному можливому значенні 255. Середнє значення яскравості дорівнює 128 ± 35 одиниць, а коефіцієнт варіації сягає 27%, що свідчить про значну просторову нерівномірність освітлення.

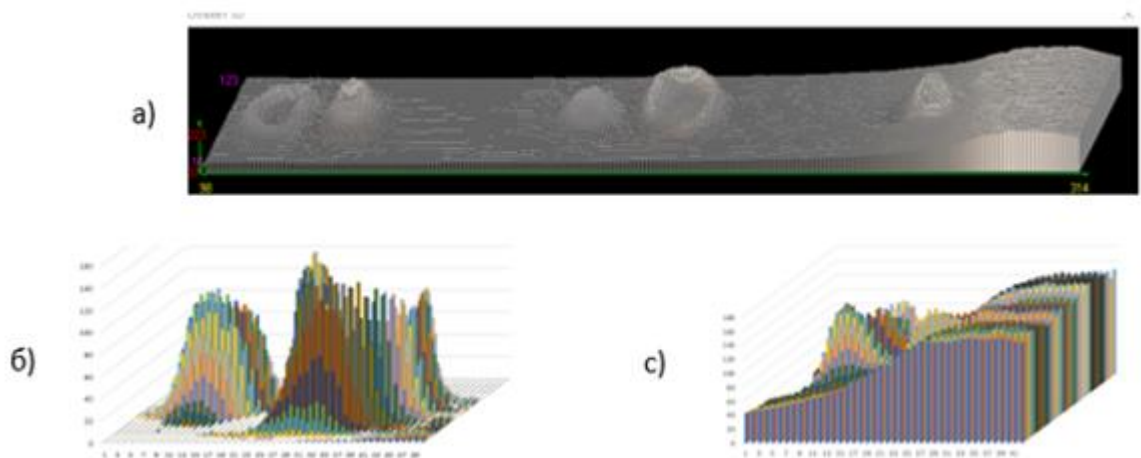
З метою детального аналізу якості зображень було розроблено спеціалізований програмний інтерфейс, який забезпечує можливість візуалізації, вимірювання та обробки зображень дефектів металевих поверхонь. Інтерфейс програми наведено на рисунку 4.21.

Як видно з рисунка 4.21, програмний інтерфейс дозволяє виділяти область інтересу, виконувати вимірювання геометричних параметрів дефектів, а також застосовувати різні алгоритми обробки зображень. У верхній частині інтерфейсу відображаються локальні значення яскравості (158 та 192), що підтверджує наявність суттєвих перепадів освітлення в межах одного зображення.

Співвідношення сигнал/шум (SNR) для вихідного зображення становить 18 дБ, що є недостатнім для надійного виявлення малорозмірних

дефектів. Для впевненого автоматизованого виявлення дефектів значення SNR повинно перевищувати 20-25 дБ. Гістограмний аналіз розподілу яскравості виявив мультимодальний характер розподілу, що зумовлено наявністю кількох зон з різним рівнем освітлення. Також спостерігається значне розширення динамічного діапазону та асиметрія гістограми.

Для візуалізації просторового розподілу інтенсивності було побудовано тривимірні гістограми та профілі яскравості. Результати експериментального дослідження процесу обробки зображень наведено на рисунку 4.22.



а) 3D-гістограма просторового розподілу яскравості; б) результат порогової обробки фрагменту зображення з рівним фоном, в) результат порогової обробки фрагменту зображення з відблиском від зовнішнього джерела освітлення

Рисунок 4.22 – Результати експерименту

Як видно з рисунка 4.22а, тривимірна гістограма яскравості дозволяє чітко локалізувати дефекти у вигляді характерних піків інтенсивності. Рисунок 4.22б демонструє ефективність порогової сегментації на ділянках з відносно рівномірним освітленням. Водночас результати, наведені на рисунку 4.22в, свідчать про обмеження порогових методів у випадках значної нерівномірності фону, що призводить до пропуску дефектів або появи хибних спрацювань.

На рисунку 4.23 наведено результати тривимірної візуалізації профілю металеві поверхні. Отримана тривимірна реконструкція поверхні дозволяє ідентифікувати вм'ятини у вигляді локальних заглиблень та оцінити їх геометричні параметри, зокрема глибину та об'єм, що є важливим для подальшої класифікації дефектів за ступенем критичності.

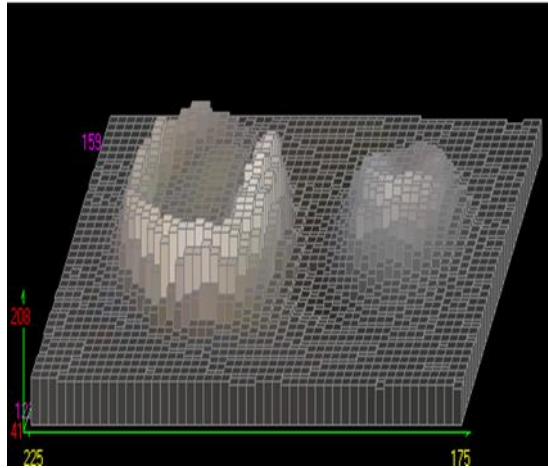


Рисунок 4.23 – 3D-візуалізація профілю металеві поверхні з дефектами

Для якісної оцінки впливу різних підходів до компенсації нерівномірності освітлення було виконано порівняльний аналіз результатів обробки зображень. Аналіз показав, що методи flat-field та гомоморфної фільтрації забезпечують найбільш виражене зменшення фонові неоднорідності, тоді як локальні методи підвищення контрастності демонструють обмежену ефективність у зонах з різким градієнтом освітлення.

Для оцінювання ефективності запропонованих алгоритмів обробки зображень було проведено серію експериментальних досліджень. Експерименти виконувалися на спеціально розробленому лабораторному стенді, до складу якого входили камера FLIR Blackfly S з просторовою роздільною здатністю 20 мегапікселів, система світлодіодного освітлення з можливістю зміни геометрії та інтенсивності освітлення, а також набір тестових металевих зразків із контрольованими дефектами поверхні.

Результати дослідження методів попередньої обробки зображень показали, що застосування комбінації гомоморфної фільтрації та адаптивного підсилення контрасту забезпечує найкращі показники якості для металевих поверхонь з високою відбивною здатністю. Порівняльні характеристики розглянутих методів наведено в таблиці

Таблиця 4.3 – Порівняльні характеристики методів попередньої обробки зображень

Метод обробки	PSNR, дБ	Час обробки, мс	Підвищення контрасту
Гаусівський фільтр	28,5	15	+25 %
Медіанний фільтр	29,2	18	+30 %
Гомоморфна фільтрація	32,8	25	+45 %
Комбінований метод	34,2	40	+55 %
Метод обробки	PSNR, дБ	Час обробки, мс	Підвищення контрасту

Аналіз наведених даних свідчить, що комбінований метод характеризується найвищим значенням співвідношення сигнал/шум (34,2 дБ) та максимальним рівнем підвищення контрасту (+55 %). Водночас застосування даного методу супроводжується збільшенням часу обробки до 40 мс, що є допустимим для задач офлайн-аналізу та контролю якості.

У межах дослідження було проведено аналіз впливу параметрів освітлення на ефективність виявлення дефектів металевих поверхонь. Розглядалися такі параметри, як кут падіння світла, інтенсивність освітлення та спектральний склад випромінювання.

Експериментально встановлено, що для виявлення тріщин оптимальний кут падіння світла становить від 25° до 35° відносно нормалі до поверхні. За таких умов досягається контраст дефекту на рівні 0,42 та співвідношення сигнал/шум близько 28 дБ, що забезпечує ймовірність виявлення дефектів на рівні до 95 %.

Інтенсивність освітлення також суттєво впливає на якість формованого зображення. Для матових металевих поверхонь оптимальний діапазон освітленості становить 5000-8000 лк, для полірованих – 3000-5000 лк, для дзеркальних поверхонь – 1500–3000 лк. Перевищення зазначених значень призводить до появи пересвічених ділянок, тоді як їх зменшення зумовлює недостатній рівень контрасту дефектів.

Спектральний склад освітлення визначає чутливість системи до різних типів дефектів. Біле світло є універсальним для загального контролю якості поверхні, однак для спеціалізованих задач доцільним є використання монохроматичного освітлення. Зокрема, синє світло виявилось ефективним для виявлення вм'ятин, червоне – для ідентифікації корозійних уражень, а ультрафіолетове – для детекції поверхневих забруднень.

ВИСНОВКИ

У даній роботі було проведено комплексне дослідження методів моделювання, попередньої обробки та аналізу зображень металевих поверхонь з дефектами. Основна увага приділялася оцінюванню впливу контрастності, нерівномірності освітлення та параметрів зйомки на ефективність автоматизованого виявлення дефектів.

У ході дослідження було розроблено та апробовано підхід до математичного моделювання зображень металевих поверхонь на основі формування числових матриць яскравості. Показано, що використання змодельованих масивів дозволяє ефективно перевіряти стійкість алгоритмів попередньої обробки за контрольованих умов та слугує зручною тестовою базою для налагодження методів аналізу зображень.

Експериментально підтверджено, що низький динамічний діапазон яскравостей істотно знижує інформативність зображень і ускладнює виявлення дефектів. Застосування методу лінійного розтягування контрасту дозволило розширити динамічний діапазон з 130 до 255 одиниць, забезпечивши повне використання доступного діапазону яскравості та суттєве покращення візуальної чіткості зображень.

У межах фізичного експерименту встановлено, що нерівномірність освітлення є одним із визначальних факторів, які обмежують ефективність порогових методів сегментації. При значних градієнтах освітлення спостерігається зниження співвідношення сигнал/шум та поява хибних спрацювань, що підтверджує необхідність застосування методів компенсації фонові неоднорідності.

Порівняльний аналіз методів попередньої обробки показав, що комбіноване використання гомоморфної фільтрації та адаптивного підсилення контрасту забезпечує найкращі показники якості зображень. Зокрема, досягнуто максимальне значення PSNR на рівні 34,2 дБ та

підвищення контрасту до 55 %, при допустимому для практичних застосувань часі обробки.

Дослідження впливу параметрів освітлення дозволило визначити оптимальні умови зйомки для різних типів дефектів і поверхонь. Встановлено, що для виявлення тріщин оптимальним є кут падіння світла 25–35° відносно нормалі до поверхні, а вибір інтенсивності освітлення повинен здійснюватися з урахуванням типу обробки поверхні. Також показано, що використання монохроматичного освітлення підвищує чутливість системи до окремих видів дефектів.

Отримані результати підтверджують доцільність комплексного підходу, який поєднує математичне моделювання, адаптивну попередню обробку зображень та оптимізацію параметрів освітлення. Запропоновані рішення можуть бути використані для підвищення ефективності автоматизованих систем технічного зору при контролі якості металевих поверхонь у виробничих умовах.

Автоматизація контролю якості значно підвищує продуктивність та знижує рівень браку. Сучасні методи цифрової обробки зображень [8, 9] надають потужний інструментарій для розв'язання задач виявлення дефектів.

Наукова новизна роботи полягає в комбінуванні методів просторово-часової обробки зображення з подальшим ентропійним аналізом, який застосовують для локалізації та класифікації дефектів, що дозволяє підвищити ефективність виявлення аномалій на металевих поверхнях.

Практичне значення отриманих результатів. Розроблений метод може бути реалізований у вигляді програмного модуля для інтеграції в існуючі системи технічного зору промислових підприємств, що дозволить автоматизувати процес контролю якості, знизити частку браку та мінімізувати вплив суб'єктивного людського фактору.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Селіванов С. І., Стрількова Т. О. Візуальні методи контролю якості виготовлення металевих деталей за допомогою технічного зору // Радіоелектроніка та молодь у ХХІ столітті: матеріали 29-го міжнародного молодіжного форуму, 16-19 квітня 2025 р. Харків: ХНУРЕ, 2025. Т. 1. С. 61-63.
2. Коваленко І. В., Петров С. М. Системи технічного зору в промисловості : навч. посібник. Харків : НТУ "ХПІ", 2022. 324 с.
3. Васильєв О. С. Методи машинного навчання в системах контролю якості : монографія. Київ : Наукова думка, 2023. 286 с.
4. Steger C., Ulrich M., Wiedemann C. Machine Vision Algorithms and Applications. 2nd ed. Weinheim : Wiley-VCH, 2018. 516 p.
5. Власенко А. М. Способи виготовлення металевих виробів : навч. посібник / А. М. Власенко. – Вінниця : Вінн. нац. техн. ун-т, 2009. – 256 с
6. Kumar A. Computer-Vision-Based Fabric Defect Detection: A Survey // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2008. Vol. 55, no. 1. P. 348–363. DOI: 10.1109/TIE.2007.896479
7. Newman T. S., Jain A. K. A survey of automated visual inspection // Computer Vision and Image Understanding. 1995. Vol. 61, no. 2. P. 231–262. DOI: 10.1006/cviu.1995.1017
8. Davies E. R. Computer Vision: Principles, Algorithms, Applications, Learning. 5th ed. London : Academic Press, 2017. 900 p.
9. Szeliski R. Computer Vision: Algorithms and Applications. 2nd ed. Cham: Springer, 2022. 925 p.
10. Tsai D.-M., Huang C.-Y. A fast surface inspection scheme for flat panel display using level set method and nonhomogeneous illumination correction // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2010. Vol. 59, no. 9. P. 2368–2377. DOI: 10.1109/TIM.2009.2037873

11. Malamas E. N., Petrakis E. G. M., Zervakis M., Petit L., Legat J.-D. A survey on industrial vision systems, applications and tools // Image and Vision Computing. 2003. Vol. 21, no. 2. P. 171–188. DOI: 10.1016/S0262-8856(02)00152-X
12. Hornberg A. Handbook of Machine and Computer Vision: The Guide for Developers and Users. 2nd ed. Weinheim : Wiley-VCH, 2017. 800 p.
13. Gonzalez R. C., Woods R. E. Digital Image Processing. 4th ed. Harlow : Pearson, 2018. 1168 p.
14. Jähne B. Digital Image Processing. 6th ed. Berlin : Springer, 2005. 607p.
15. Pratt W. K. Digital Image Processing. – 2nd ed. – New York : John Wiley & Sons, 1991. – 720 p.
16. MDPI. Machines – Surface Defect Detection in Metal Materials, 2023.
17. Springer. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2024.
18. ResearchGate. Studies of Metal Surface Defects, 2023.
19. MDPI. Metals – Analysis of Surface Illumination Effects, 2023.