

Міністерство освіти і науки України  
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Електронної та біомедичної інженерії  
(повна назва)

Кафедра Фізичних основ електронної техніки  
(повна назва)

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**  
**Пояснювальна записка**

рівень вищої освіти другий (магістерський)

ЛАЗЕРНІ ТЕХНОЛОГІЇ ПРОМИСЛОВОЇ АВТОМАТИЗАЦІЇ  
ТА МОНІТОРИНГУ  
(тема)

Виконав:

здобувач 2 року навчання,  
групи ЛОЕТМ-24-1

Нікіта ЛУК'ЯНОВ

(Власне ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Спеціальність 175 Інформаційно-вимірювальні  
технології

(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна

(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма «Лазерна і оптоелектронна  
техніка»

(повна назва освітньої програми)

Керівник проф. каф. ФОЕТ Юрій КУРСЬКИЙ

(посада, Власне ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Допускається до захисту

Завідувач кафедри ФОЕТ \_\_\_\_\_  
(підпис)

Олександр ГНАТЕНКО

(Власне ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

2025 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет \_\_\_\_\_ Електронної та біомедичної інженерії \_\_\_\_\_

Кафедра \_\_\_\_\_ Фізичних основ електронної техніки \_\_\_\_\_

Рівень вищої освіти \_\_\_\_\_ другий (магістерський) \_\_\_\_\_

Спеціальність \_\_\_\_\_ 175 Інформаційно-вимірювальні технології \_\_\_\_\_  
(код і повна назва)

Тип програми \_\_\_\_\_ освітньо-професійна \_\_\_\_\_  
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма \_\_\_\_\_ «Лазерна і оптоелектронна техніка» \_\_\_\_\_  
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри \_\_\_\_\_  
(підпис)

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20 \_\_\_\_ р.

**ЗАВДАННЯ**  
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

здобувачеві \_\_\_\_\_ Лук'янову Нікіті Володимировичу \_\_\_\_\_  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Лазерні технології промислової автоматизації та моніторингу

затверджена наказом університету від « 10 » листопада 2023 р. № 1024 Ст \_\_\_\_\_

2. Термін подання здобувачем роботи до екзаменаційної комісії 16 грудня 2025 р.

3. Вихідні дані до роботи відомості про методи лазерної триангуляції, інтерферометрії та комп'ютерної обробки зображень; інформація про конструкцію, принципи роботи та характеристики сучасних лазерних систем вимірювання й візуального аналізу поверхонь; методи візуального аналізу поверхні: Гаусове згладжування; оператор Лапласа; сегментація Отсу; детекція контурів та аналіз дефектних областей

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі \_\_\_\_\_

1 Аналіз сфер застосування лазерних технологій у промисловості та автоматизації.

2 Вивчення методів безконтактного моніторингу та виявлення дефектів поверхонь.

3 Створення алгоритму цифрового аналізу поверхонь і виявлення дефектів.

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій  
Демонстраційний матеріал – 17 слайдів

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз предметної області та огляд літератури	03.09.25–19.09.25	Виконано
2	Збір і підготовка даних (зображень для аналізу)	24.09.25–04.10.25	Виконано
3	Розробка алгоритму обробки зображень	10.10.25–18.10.25	Виконано
4	Реалізація та тестування прототипу	22.10.25–25.10.25	Виконано
5	Оформлення пояснювальної записки	30.10.25–11.11.25	Виконано
6	Оформлення демонстраційних матеріалів	14.11.25–20.11.25	Виконано
7	Проходження нормоконтролю та перевірки тексту КВР на унікальність	26.11.25–08.12.25	Виконано
8	Отримання відгуку та рецензії	10.12.25–13.12.25	Виконано
9	Підготовка та захист кваліфікаційної роботи	15.12.25–17.12.25	Виконано

Дата видачі завдання 02 вересня 2025 р.

Здобувач \_\_\_\_\_  
(підпис)

Керівник роботи \_\_\_\_\_ проф. каф. ФОЕТ Юрій КУРСЬКИЙ  
(підпис) (посада, Власне ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка кваліфікаційної роботи: 68 с., 14 рис., 1 додаток, 20 джерел.

АВТОМАТИЗАЦІЯ, АВТОМАТИЗОВАНІ ВИМІРЮВАННЯ, ВІЗУАЛЬНИЙ АНАЛІЗ ПОВЕРХНІ, КОНТРОЛЬ ЯКОСТІ, ЛАЗЕРНІ ТЕХНОЛОГІЇ, МАШИННЕ НАВЧАННЯ, ПРОМИСЛОВІ СИСТЕМИ, PYTHON.

Метою роботи є дослідження методів візуального аналізу поверхні у промисловому контролі та створення програмного забезпечення для автоматичного виявлення дефектів.

Об'єктом дослідження є метод візуального аналізу поверхні, а предметом — алгоритми цифрової обробки зображень, що застосовуються для автоматичного визначення дефектів.

Методи дослідження – теоретичні, аналітичні та експериментальні, використані для аналізу лазерних систем, методів візуального аналізу поверхні та алгоритмів цифрової обробки зображень. Експериментальну частину реалізовано шляхом імітаційного комп'ютерного моделювання.

У практичній частині створено програмне забезпечення, що моделює роботу системи лазерного контролю поверхні, проводить цифрову обробку зображень і формує карту пошкоджень. Імітаційні експерименти показали високу ефективність моделі, зокрема точність класифікації перевищила 90 %, що свідчить про перспективність поєднання машинного навчання з лазерними технологіями.

Практичне значення полягає у розробці прототипу системи візуального аналізу поверхні, який може бути використаний як навчальний інструмент і як основа для створення промислових систем автоматичного контролю якості.

## ABSTRACT

Explanatory note of the qualification work: 68 p., 14 figures, 1 appendices, 20 sources.

AUTOMATION, AUTOMATED MEASUREMENTS, INDUSTRIAL SYSTEMS, LASER TECHNOLOGIES, MACHINE LEARNING, QUALITY CONTROL, PYTHON, VISUAL SURFACE ANALYSIS.

The aim of the work is to study methods of visual surface analysis in industrial control and to develop software for automatic defect detection.

The object of the study is the method of visual surface analysis, and the subject of the study is digital image processing algorithms used for automatic defect identification.

The research methods are theoretical, analytical and experimental used to analyze laser systems, visual surface analysis techniques, and digital image processing algorithms. The experimental part is implemented through simulation-based computer modeling.

In the practical part, software was developed that simulates the operation of a laser-based surface inspection system, performs digital image processing, and generates a damage map. Simulation experiments demonstrated high effectiveness of the model, with classification accuracy exceeding 90%, which confirms the potential of combining machine learning with laser technologies.

The practical significance lies in the development of a prototype surface analysis system that can be used as an educational tool and as a foundation for creating industrial automatic quality control systems.

## ЗМІСТ

Скорочення та умовні позначки .....	7
Вступ.....	8
1 Теоретичні основи лазерних технологій.....	10
1.1 Сфери застосування лазерних технологій у промисловості.....	10
1.2 Лазерні системи у вимірюванні, контролі та моніторингу процесів.....	13
1.3 Застосування лазерів у робототехніці, машинобудуванні, медицині та електроніці .....	20
1.4 Переваги та обмеження використання лазерів у виробничих системах	24
2 Методи лазерного контролю.....	28
2.1 Лазерна триангуляція, інтерферометрія, спектроскопія .....	28
2.2 Безконтактний моніторинг та виявлення дефектів.....	30
2.3 Обробка зображень у лазерному контролі .....	33
2.4 Комп'ютерний аналіз поверхонь у лазерних системах моніторингу ....	37
3 Технічна реалізація системи лазерного контролю якості поверхонь .....	42
3.1 Принцип дії лазерної системи контролю.....	42
3.2 Математичне моделювання аналізу зображень .....	48
3.3 Програмне забезпечення контролю якості поверхонь .....	55
3.4 Тестування програмного забезпечення контролю якості поверхонь ....	60
Висновки .....	65
Перелік джерел посилання .....	67
Додаток А Демонстраційний матеріал.....	69

## СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ

ЧПК – числове програмне керування;

CMOS – комплементарна структура метал-оксид-напівпровідник  
(Complementary Metal-Oxide-Semiconductor);

CCD – пристрій із зарядовим зв'язком (Charge-Coupled Device);

IEC – Міжнародна електротехнічна комісія (International Electrotechnical  
Commission);

ISO – Міжнародна організація зі стандартизації (International Organization for  
Standardization);

LiDAR – лазерна система виявлення та вимірювання відстані (Light Detection  
and Ranging);

OIML – Міжнародна організація законодавчої метрології (International  
Organization of Legal Metrology);

PLC – промисловий програмований логічний контролер (Programmable Logic  
Controller);

QCL – квантові каскадні лазери (Quantum Cascade Laser);

SCADA – система диспетчерського керування та збору даних (Supervisory  
Control and Data Acquisition);

ToF – метод вимірювання часу прольоту (Time of Flight).

## ВСТУП

Сучасний етап розвитку науки і техніки характеризується стрімким зростанням рівня автоматизації промислових процесів. Підприємства дедалі частіше впроваджують інтелектуальні системи моніторингу та контролю, здатні виявляти відхилення у роботі обладнання або якісні дефекти продукції в режимі реального часу. Застосування таких систем забезпечує високу якість виробів, зменшує людський фактор, підвищує безпеку та ефективність виробництва.

Одним з найбільш перспективних напрямів автоматизації контролю є використання технологій комп'ютерного зору та цифрової обробки зображень. Особливе місце в цьому займають методи візуального аналізу поверхні, що дозволяють безконтактно визначати стан матеріалів, виявляти дефекти, контролювати геометричні параметри та здійснювати сортування продукції без безпосередньої участі людини.

На відміну від традиційних засобів контролю, методи візуального аналізу забезпечують високу швидкість обробки інформації, стійкість вимірювань та можливість інтеграції у сучасні виробничі лінії. Такі підходи набувають особливо важливого значення в металургії, машинобудуванні та інших галузях, де якість поверхні є ключовим показником надійності та довговічності виробів.

У даній кваліфікаційній роботі досліджується метод візуального аналізу поверхні та можливості його застосування у промислових системах контролю. Розроблена програмна модель виконує автоматичне виявлення об'єктів на зображенні, аналіз стану поверхні, виявлення локальних дефектів за допомогою алгоритмів комп'ютерного зору. Запропонований підхід демонструє перспективність використання цифрової обробки зображень для створення промислових систем автоматичного моніторингу.

Метою роботи є дослідження методів візуального аналізу поверхні у промисловому контролі та створення програмного забезпечення, що виконує автоматичне виявлення дефектів поверхні.

Об'єктом дослідження є метод візуального аналізу поверхні.

Предметом дослідження є алгоритми цифрової обробки зображень, що використовуються для автоматичного виявлення дефектів.

Практична цінність роботи полягає у створенні програмної моделі, здатної автоматично аналізувати поверхню об'єктів та визначати наявність дефектів. Розроблений програмний продукт може застосовуватися у навчальному процесі, а також виступати основою для проектування промислових систем контролю якості.

# 1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ЛАЗЕРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

## 1.1 Сфери застосування лазерних технологій у промисловості

Лазерні технології у промисловості є одним із найдинамічніше розвинутих напрямів сучасної науки і техніки, що інтегрує досягнення квантової електроніки, матеріалознавства, оптики та автоматизації виробничих процесів. Лазери забезпечують унікальне поєднання властивостей – когерентність, монохроматичність, високу спрямованість і щільність енергії, що дає змогу реалізовувати процеси, які неможливо або економічно недоцільно виконати іншими методами. Основною перевагою лазерних технологій є можливість точного і контрольованого впливу на матеріал у мікро- і наномасштабі, що особливо важливо в умовах сучасного високоточного машинобудування та електронної промисловості.

У сфері механічної обробки матеріалів лазерні системи використовуються для різання, свердління, гравіювання, полірування та структуризації поверхонь. Лазерне різання дає змогу працювати з металами, керамікою, полімерними композиціями та навіть біоматеріалами з мінімальною зоною термічного впливу. Завдяки використанню числового програмного керування (ЧПК) і роботизованих систем, процес лазерного різання є повністю автоматизованим і характеризується високою повторюваністю та точністю. У порівнянні з традиційними механічними методами обробки, лазер не потребує контактного інструменту, що виключає зношування ріжучого елемента і зменшує кількість відходів виробництва.

У зварювальних технологіях лазери дозволяють створювати високоякісні з'єднання з мінімальною деформацією матеріалу. Лазерне зварювання використовується у виробництві автомобільних кузовів, корпусів літаків, медичних імплантів та електронних компонентів. Воно забезпечує глибоке проплавлення металу, можливість зварювання різнорідних матеріалів та надзвичайно високу швидкість процесу. Використання імпульсних і безперервних лазерів різної потужності (від кількох ват до десятків кіловат)

дає змогу адаптувати технологію до конкретних виробничих завдань. Приклад використання лазера у зварювальних технологіях зображен на рисунку 1.1.



Рисунок 1.1 – Зварювання деталей із близьким приляганням листів із мінімальним відхиленням та локалізованою зоною нагріву

Важливе місце лазер займає у галузі мікро- та нанообробки, де потрібна надзвичайна точність і контроль параметрів впливу. У мікроелектроніці лазерні технології використовуються для прецизійного різання кремнієвих підкладок, створення мікроканалів у чіпах, видалення надлишкового матеріалу або нанесення провідних доріжок. Лазери фемтосекундного діапазону дозволяють працювати з матеріалами без істотного нагрівання, здійснюючи так звану «холодну обробку». Це відкриває можливості для виготовлення наноструктурованих поверхонь із заданими оптичними чи трибологічними властивостями [1].

У адитивних технологіях лазер відіграє ключову роль як джерело енергії для селективного лазерного плавлення або селективного лазерного спікання порошкових матеріалів. Завдяки цьому можливе виготовлення деталей складної геометрії з високою точністю без необхідності у використанні

традиційних прес-форм чи інструментів. Така технологія особливо актуальна для авіакосмічної, медичної та енергетичної галузей, де потрібні індивідуалізовані вироби зі складними внутрішніми структурами та мінімальною масою.

Не менш важливою є роль лазера у поверхневому модифікуванні матеріалів, що включає термообробку, гарт, легування, наплавлення і зміцнення. Лазерна поверхнева обробка дозволяє локально змінювати структуру металу, підвищуючи його твердість, зносостійкість, корозійну стійкість і втомну міцність. При цьому основний об'єм матеріалу залишається незмінним, що забезпечує поєднання високої міцності поверхні з пластичністю серцевини. Лазерне легування дозволяє вводити в поверхневий шар легувальні елементи з високим ступенем однорідності, що є неможливим при традиційних методах термічної обробки.

У контрольних та аналітичних системах лазери застосовуються для неруйнівного контролю якості, візуального аналізу поверхонь та вимірювання геометричних параметрів об'єктів. Методи лазерної інтерферометрії, голографії, лазерного сканування та лідару забезпечують надточні вимірювання, що використовуються у приладобудуванні, мікрометрології, архітектурній геодезії та 3D-моделюванні. Використання лазерних систем для аналізу стану поверхні дозволяє виявляти дефекти, оцінювати їх розміри й геометрію, а також здійснювати дистанційний моніторинг технічного стану матеріалів у промислових умовах [2].

Особливої уваги заслуговує застосування лазерів у текстильній, харчовій, фармацевтичній та упаковочній промисловості, де вони використовуються для маркування, гравіювання та нанесення інформації на поверхні матеріалів. Лазерне маркування є екологічно безпечним і довговічним методом, який не потребує використання фарб чи хімічних реагентів. Воно широко застосовується для створення QR-кодів, серійних номерів, логотипів та інших ідентифікаційних позначень.

## 1.2 Лазерні системи у вимірюванні, контролі та моніторингу процесів

Лазерні системи займають ключове місце в сучасній метрології, контролі та моніторингу технологічних процесів завдяки їхній здатності здійснювати безконтактні, швидкі та високоточні вимірювання в найрізноманітніших промислових умовах; принципово різні класи лазерних сенсорів — лазерна триангуляція, лазерні далекоміри Time-of-Flight (ToF) та фазові методики, лідари (LiDAR), інтерферометри й лазерні трекари — охоплюють спектр завдань від мікрометрової перевірки геометрії деталей до кілометрових дистанцій і тривимірного картографування об'єктів та простору.

Лазерна триангуляція широко використовується для контролю розмірів і профілю поверхні, вимірювання товщини, відстані до точки чи контуру, а також для інспекції зварних швів і дефектів поверхні; такі датчики проєктують лазерну лінію або точку на об'єкт і за положенням відбитого зображення на приймальній матриці обчислюють дистанцію з точністю до мікрметрів, що робить їх придатними для передачі даних у систему керування технологічним процесом і в схеми зворотного зв'язку для коригування виробництва. LiDAR і ToF-системи застосовують метод вимірювання часу пробігу імпульсу або фазового зсуву сигналу, забезпечуючи надійну роботу на великих відстанях і на рухомих об'єктах; ці системи широко використовуються у навігації автоматичних транспортних засобів та роботизованих платформ, для моніторингу складських просторів, запобігання зіткненням між роботами та людьми, а також для тривимірного моделювання виробничого середовища й дистанційної перевірки великогабаритних об'єктів. Принцип роботи системи лазерної триангуляції зображен на рисунку 1.2.

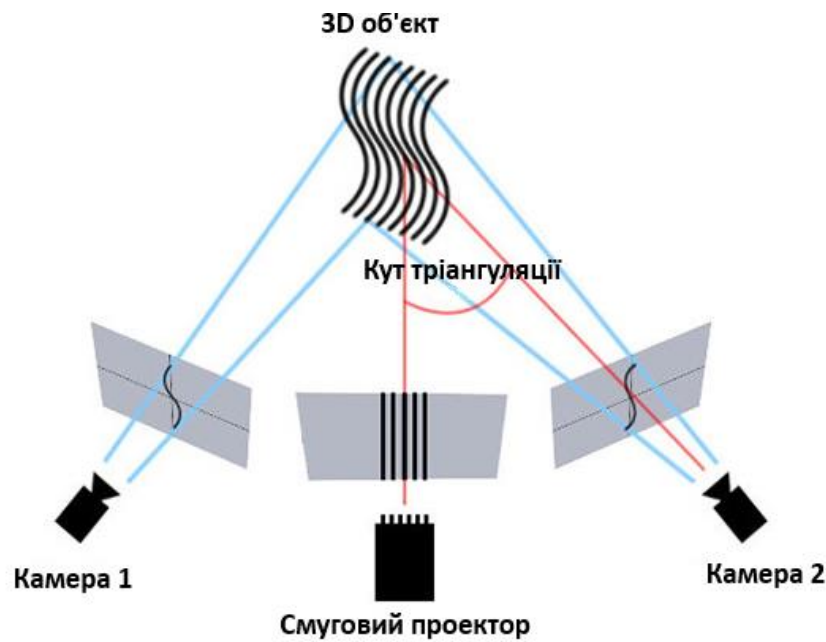


Рисунок 1.2 – Принцип роботи системи лазерної триангуляції

Інтерферометричні методи та лазерні трекери використовуються там, де потрібна надвисока точність — під час калібрування верстатів із ЧПК, у тонкій механіці та при збиранні авіаційних конструкцій — вони дають змогу вимірювати відносні переміщення й кутові відхилення з долями мікрметра та служать еталонами довжини й орієнтації у великих збірних системах.

У практичному використанні спектр завдань, які розв’язуються лазерними технологіями, надзвичайно широкий: під час операційного контролю якості лазерні лінії та сканери швидко перевіряють профіль і відхилення деталей, інтегровані у виробничий потік системи відеоконтролю на основі лазерного підсвічування підвищують контраст поверхневих дефектів, а лазерні методи неруйнівного огляду та LiDAR-системи забезпечують дистанційний моніторинг обладнання й технологічного середовища на промислових майданчиках. Додатково, лазерна доплерівська віброметрія є важливим інструментом контролю динаміки та вібрацій обладнання без прямого контакту з вимірюваною поверхнею. Основні переваги лазерних систем — висока швидкодія, можливість безперервного моніторингу в реальному часі, мінімальна інвазивність і сумісність з

автоматизованими системами керування: дані від лазерних сенсорів легко інтегруються у SCADA/PLC, системи машинного зору й алгоритми машинного навчання для предиктивного обслуговування та адаптивного керування процесами. Водночас при розгортанні лазерних методів слід враховувати фізичні обмеження: властивості поверхні (блиск, прозорість, колір і розсіювання) впливають на відбиття й якість сигналу, зовнішнє освітлення та шуми підвищують похибку, а в умовах складного середовища (пил, дим, пара) потрібна спеціальна оптика, фільтрація та алгоритми обробки сигналів для стабільної роботи.

У реальних умовах роботу лазерних систем обмежують як оптичні властивості середовища, так і характеристики поверхні об'єкта. Інтенсивність відбитого сигналу визначається коефіцієнтом відбиття  $R(\lambda, \theta)$ , що залежить від довжини хвилі та кута падіння променя:

$$I_T = I_0 \times R(\lambda, \theta). \quad (1.1)$$

Під час проходження через пил, дим або водяну пару лазерне випромінювання підлягає експоненційному затуханню відповідно до закону Бугера–Ламберта–Бера:

$$I = I_0 e^{-\alpha L}, \quad (1.2)$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт поглинання;

$L$  – довжина шляху променя.

Зі збільшенням  $\alpha$  або  $L$  інтенсивність сигналу різко зменшується, що потребує застосування алгоритмів компенсації втрат і адаптивної фільтрації. Якість вимірювань також визначається співвідношенням сигнал/шум:

$$SNR = \frac{P_s}{P_n}, \quad (1.3)$$

де  $P_s$  – потужність корисного сигналу;

$P_n$  – потужність фонових шумів.

Для забезпечення стабільної роботи лазерних сенсорів необхідно враховувати не лише геометрію та оптичні параметри поверхонь, але й оптичну прозорість середовища, стабільність джерела випромінювання та якість оптичної системи.

Сучасні дослідження й інженерна практика пропонують багато рішень для компенсації цих ефектів — від використання короткохвильових лазерів (синій/ультрафіолет) для підвищення контрастності на блискучих поверхнях до комбінованих систем (поєднання триангуляції та ToF, мультиспектральні підходи й апертурна обробка) та алгоритмів корекції на основі моделей розсіювання й референсних патернів. З точки зору побудови комплексних систем контролю та моніторингу важливою є правильна інтеграція: вибір типу лазерного сенсора залежить від потрібної роздільної здатності, швидкодії, діапазону вимірювань і умов експлуатації; вбудовування у конвеєрну лінію вимагає врахування частоти спрацювання й затримки, а для завдань великомасштабного вимірювання та складання — продуманої геометрії розміщення датчиків, калібрування й систем прив'язки. Приклади практичного використання охоплюють автоматизовану інспекцію зварних швів на металообробних лініях, онлайн-вимірювання профілю стрічки чи рулону в паперовій і текстильній промисловості, контроль положення й орієнтації деталей на збиральних роботах, моніторинг стану кранового обладнання та інфраструктури за допомогою мобільних LiDAR-сканерів, а також уточнення топології території та контейнерів у портових терміналах для оптимізації логістики. Розвиток технологій формує кілька помітних трендів: поєднання лазерної сенсорики з неймережевими алгоритмами для більш точної фільтрації й інтерпретації даних, мініатюризація й здешевлення модулів ToF і LiDAR, широке впровадження фотоніки на кристалі (integrated photonics) для підвищення надійності та зниження енергоспоживання, а також розвиток газової лазерної спектроскопії й газового LiDAR для екологічного моніторингу та виявлення витоків на промислових об'єктах. Технічно грамотний вибір, правильне калібрування та адаптація обробки сигналів дають

зможу створити системи, які не лише реєструють відхилення чи аварійні стани, а й беруть участь у циклі адаптивного керування, економлячи ресурс, знижуючи брак і підвищуючи безпеку виробництва [3].

Лазерні системи у вимірюванні, контролі та моніторингу процесів сьогодні стали невід'ємною частиною індустрії 4.0, де ключову роль відіграють автоматизація, роботизація та цифровізація виробництва. Їх застосування охоплює практично всі галузі — від машинобудування, енергетики й авіаційної промисловості до медицини, будівництва, аграрного сектору та екологічного моніторингу. Основна перевага лазерних технологій полягає в тому, що вони забезпечують точність вимірювань, недосягну для традиційних контактних методів, а також дозволяють проводити спостереження в реальному часі без зупинки процесу, що є критично важливим для безперервного виробництва.

У машинобудуванні лазерні системи активно використовуються для калібрування верстатів із числовим програмним керуванням, вимірювання геометричних параметрів деталей, контролю співвісності отворів, прямих ліній та кутів. Лазерні трекери забезпечують точність вимірювань у межах декількох мікрометрів навіть на великих відстанях, що дозволяє проводити складання великогабаритних конструкцій — корпусів літаків, турбін, вагонів або промислових пресів — із надзвичайною точністю. У металургії лазерні далекоміри застосовуються для визначення товщини гарячого прокату, контролю положення рухомих валків і моніторингу температурних деформацій металу в реальному часі.

У сфері енергетики лазерні системи використовуються для моніторингу стану вітрових турбін, лопатей, опорних конструкцій, а також для контролю вібрацій і зношування роторів. Лазерна доплерівська віброметрія дозволяє виявляти навіть мінімальні коливання, що сигналізують про початок механічних дефектів, задовго до того, як вони переростуть у аварійні поломки. У будівництві лазерне сканування (3D лазерне сканування та лідарні технології) використовується для точного створення тривимірних моделей

об'єктів, визначення деформацій споруд, аналізу геометрії мостів і тунелів, а також для контролю дотримання проектних параметрів під час спорудження.

Окремий напрям розвитку — застосування лазерних систем у сільському господарстві. Сучасні LiDAR-дрони здійснюють аеролазерне сканування полів для визначення рельєфу, стану посівів, вологості ґрунтів, кількості біомаси й точного дозування добрив. Такі технології стали основою точного землеробства (*precision farming*), що дозволяє суттєво знизити витрати ресурсів і мінімізувати вплив на довкілля. У гірничій справі лазерні системи забезпечують побудову тривимірних карт шахт і кар'єрів, контроль об'ємів видобутку та безпечності конструкцій.

У медицині лазерні вимірювальні системи використовуються для точної хірургії, офтальмології, стоматології та діагностики. Лазерна інтерферометрія застосовується для визначення мікродеформацій біологічних тканин, а лазерна доплерографія — для моніторингу кровообігу. У фармацевтичній промисловості лазери використовують для контролю розмірів часток, чистоти та структури матеріалів за допомогою лазерного розсіювання та методів візуального аналізу.

Лазерні системи активно впроваджуються й у транспортну галузь. Лідари на основі ToF-сенсорів сьогодні є невід'ємною частиною систем автономного водіння, де вони відповідають за побудову тривимірної карти навколишнього середовища, розпізнавання перешкод і безпечну навігацію. У залізничному транспорті лазери застосовують для вимірювання зносу рейок, геометрії колії, а також для моніторингу контактної мережі. На авіаційних підприємствах лазерні сканери контролюють форму лопатей турбін, стан фюзеляжу та елементів шасі.

Екологічні аспекти використання лазерів також важливі. Газові LiDAR-системи та методи лазерного візуального аналізу дозволяють виявляти мінімальні концентрації забруднювальних речовин, контролювати стан поверхонь та здійснювати дистанційний моніторинг навколишнього середовища. Такі системи застосовуються для моніторингу атмосферних

викидів, контролю витоків метану на нафтогазових родовищах і спостереження за станом лісів та водойм. Використання лазерних технологій для екологічного моніторингу має значення не лише для промисловості, а й для національної безпеки, оскільки дає змогу швидко виявляти аварії й реагувати на надзвичайні ситуації. Приклад зображений на рисунку 1.3.

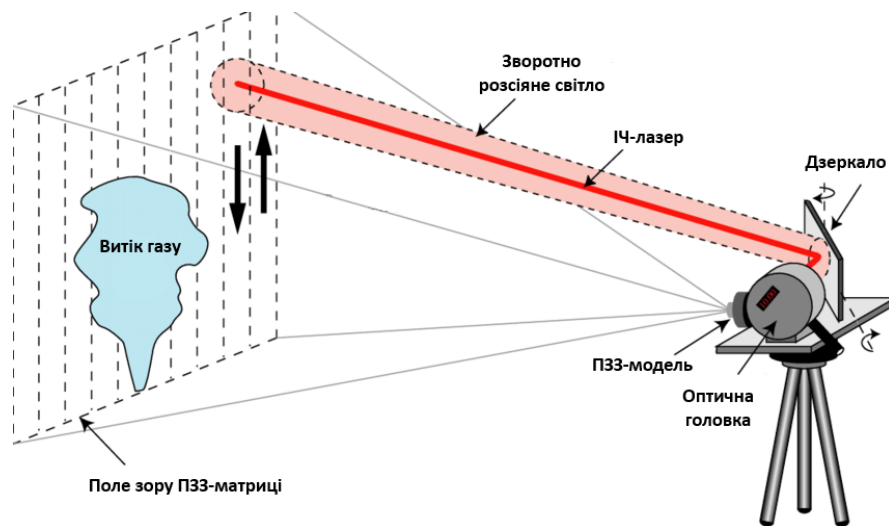


Рисунок 1.3 – Лазерний екологічний моніторинг: LiDAR-системи та спектрометри

З технічного погляду, розвиток лазерних вимірювальних систем тісно пов'язаний із прогресом у галузі оптоелектроніки, мікрофотоніки та штучного інтелекту. Новітні розробки включають лазерні сенсори на чипі, що поєднують у собі джерело випромінювання, приймач і обчислювальний модуль. Такі пристрої здатні виконувати обробку даних безпосередньо на рівні сенсора, що зменшує затримку передачі сигналу та підвищує швидкодію системи. Алгоритми машинного навчання використовуються для розпізнавання об'єктів, усунення шумів і прогнозування змін у технологічних процесах на основі даних лазерного моніторингу [4].

Варто зазначити, що впровадження лазерних систем у виробництво вимагає відповідної підготовки персоналу, оскільки робота з лазерним обладнанням передбачає дотримання вимог безпеки. Високоінтенсивні

лазерні промені можуть становити небезпеку для очей і шкіри, тому на підприємствах застосовуються захисні екрани, фільтри, спеціальні окуляри та автоматичні системи вимкнення при порушенні умов експлуатації. Крім того, необхідно враховувати стандарти калібрування лазерних систем, які регламентуються міжнародними організаціями — ISO, IEC та OIML.

Сьогодні лазерні вимірювальні технології поступово переходять на новий рівень інтеграції з «розумними» виробничими платформами. Завдяки IoT-підключенню (Internet of Things) сенсори можуть обмінюватися даними між собою та з хмарними аналітичними сервісами, що дає змогу здійснювати прогнозне обслуговування обладнання, автоматично реагувати на відхилення параметрів і мінімізувати людський фактор. У майбутньому очікується широке впровадження комбінованих систем, які поєднують лазерні, ультразвукові та оптичні методи для ще більшої точності, а також розвиток голографічних вимірювальних систем, здатних створювати повні 3D-моделі об'єктів у реальному часі.

### 1.3 Застосування лазерів у робототехніці, машинобудуванні, медицині та електроніці

Лазери сьогодні — універсальний інструмент, який радикально змінив підходи в робототехніці, машинобудуванні, медицині та електроніці; їхня здатність концентрувати велику енергію в точці з дуже малими розмірами променя забезпечує високоточну обробку матеріалів, мінімальну зону термічного впливу та велику швидкість операцій, що робить лазери особливо привабливими для серійного виробництва й автоматизації. У робототехніці лазери використовуються не тільки як інструмент обробки (лазерне різання, зварювання, наплавлення), але й як датчики та системи позиціонування: LIDAR і сканери дають роботам тривимірну картину оточення для навігації та виявлення перешкод, а візійні системи на основі лазерної триангуляції та структурованого світла забезпечують надточне визначення глибини й форму

об'єктів, що критично для роботів-маніпуляторів на зварювальних та збиральних лініях. У промисловому роботизованому зварюванні лазерні джерела дозволяють домагатися вузької шва, малої деформації та високої швидкості сполучення елементів конструкцій, що особливо важливо в автомобілебудуванні й суднобудуванні, де потрібно зменшувати масу та підвищувати міцність з'єднань; інтеграція лазерних оптичних головок з промисловими роботами дає змогу автоматизувати процес, підвищити повторюваність і знизити потребу в ручній праці.

У машинобудуванні лазери широко застосовують для різання, свердління, зварювання, маркування, термічної обробки поверхонь та адитивного виробництва; лазерні волоконні системи та CO<sub>2</sub>-лазери дозволяють точно вирізати тонкі і товсті метали, неметали і композити з мінімальною зоною нагріву, а також створювати складні геометрії без механічного контакту інструменту з матеріалом, що зменшує зношування і брак. Приклад використання технології можна побачити на рисунку 1.4.



Рисунок 1.4 – Лазерна обробка металу у машинобудуванні

Для виготовлення складних деталей підходи «лазер + робот» (роботизоване 3D-різання або зварювання) дозволяють обробляти великі або

тривимірні заготовки, комбінуючи свободу руху маніпулятора з високою потужністю лазера, що суттєво розширює можливості масштабного і гнучкого виробництва. Крім того, лазерна обробка дає конкурентні переваги у виробництві деталей з титану та нержавіючої сталі, де традиційні методи часто призводять до великих деформацій чи тривалих циклів обробки.

У медицині застосування лазерів охоплює діагностику, терапію та хірургію: від офтальмологічних операцій (корекція зору за допомогою лазерної кератомілезної і фоторефракційної хірургії) до дерматологічних процедур (видалення пігментних плям, лазерне шліфування шкіри), стоматології (лазерне лікування тканин і відбілювання), онкології (лазерна абляція пухлин, фотодинамічна терапія) та ендоскопічних хірургічних втручань, де лазер забезпечує мінімальну крововтрату й більш швидке відновлення пацієнта. Лазерні методи також використовують у флебології (лікування вен), урології (лазерне дроблення каменів у нирках) та у численних малоінвазивних втручаннях завдяки точності впливу на тканину й можливості селективного поглинання променя різними біомішенями. Паралельно розвиваються терапевтичні застосування низькоенергетичних (холодних) лазерів для стимуляції загоєння та зменшення запалення. Медичні огляди показують, що при правильному застосуванні лазери часто дають кращі коротко- та довгострокові результати порівняно з конвенційними методами.

В електроніці лазери відіграють ключову роль у мікрообробці й виробництві: мікро- та нанообробка для створення мікросхем і MEMS, лазерне свердління мікрівіа на друкованих платах, видалення шарів для прототипування друкованих плат, стерилізація контактів, формування тонких структур при фоторезистній літографії та випаровування матеріалів для прецизійного осадження. Лазерні технології дозволяють робити отвори діаметром у кілька десятків мікронів у матеріалах, які важко обробляти механічно, і вони незамінні там, де потрібна повторюваність та відсутність механічних напруг. Крім того, лазерні маркувальники забезпечують стійке і читабельне нанесення ідентифікаторів на корпуси компонентів без

пошкодження електроніки, а лазерне відпалу (annealing) і локальне опромінення використовуються для тонкого налаштування електричних властивостей напівпровідникових шарів. Приклад застосування лазерних технологій у мікрообробці зображено на рисунку 1.5.

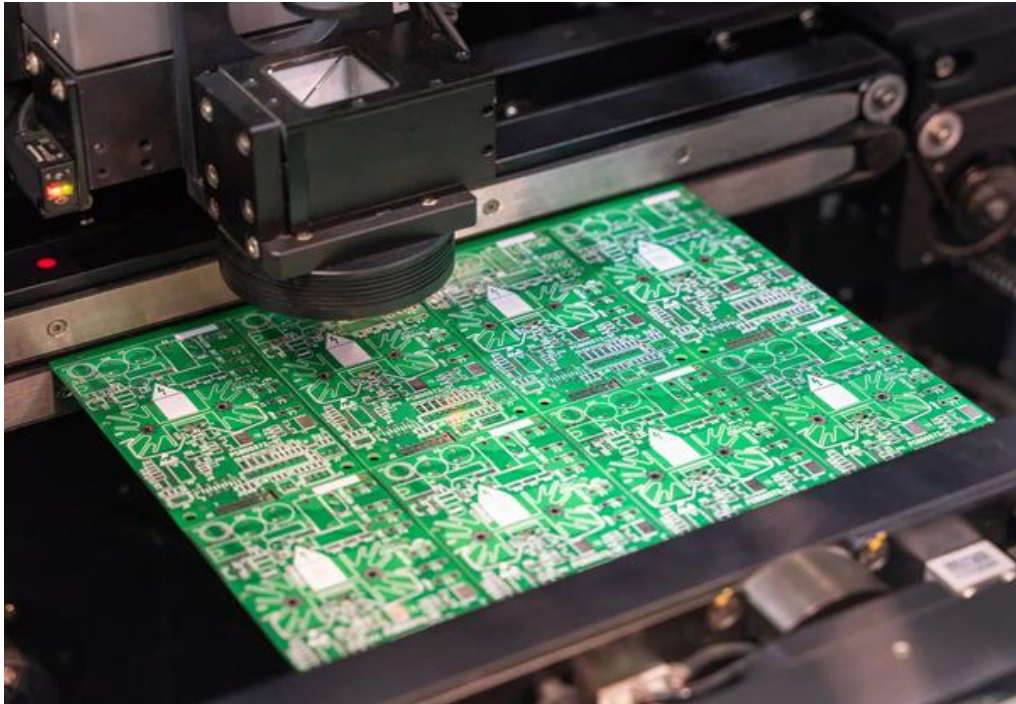


Рисунок 1.5 – Лазерна мікрообробка друкованої плати

Перспективи інновацій пов'язані з поєднанням лазерних технологій і штучного інтелекту: системи бачення та контролю якості на основі машинного навчання дозволяють оптимізувати параметри лазерної обробки в реальному часі, знижуючи брак і підвищуючи продуктивність; комбінування багатьох лазерних джерел, ультракоротких імпульсів (пікосекундних і фемтосекундних) та хвильових довжин відкриває нові можливості для мікро- й нанофабрикації, мінімізації термічних ефектів і обробки складних композитів. Водночас у застосуваннях потрібно враховувати обмеження: потреба в системах безпеки й екрануванні, контроль за тепловим навантаженням і пилоутворенням під час обробки, а також висока вартість

обладнання й потреба в кваліфікованому персоналі для налаштування й обслуговування лазерних комплексів.

#### 1.4 Переваги та обмеження використання лазерів у виробничих системах

Використання лазерних технологій у виробничих системах є одним із найперспективніших напрямів розвитку сучасної промисловості, оскільки воно поєднує в собі точність, гнучкість, високу швидкість і можливість автоматизації технологічних процесів. Лазер — це джерело когерентного, монохроматичного та спрямованого випромінювання, яке дозволяє концентрувати значну кількість енергії у дуже малій зоні обробки. Ці унікальні властивості дають змогу виконувати широкий спектр виробничих операцій — від макрообробки (різання, зварювання, поверхнева термообробка, наплавлення) до мікрообробки (гравіювання, мікросвердління, мікролітографія, виготовлення мікрочипів і сенсорів). Сьогодні лазери є невід'ємною частиною високотехнологічних галузей: авіаційно-космічної, автомобільної, електронної, медичної, суднобудівної, а також у галузях адитивного виробництва та нанотехнологій [5].

Однією з ключових переваг застосування лазерів є надзвичайно висока точність та керованість процесу обробки. Завдяки можливості сфокусувати промінь до діаметра менше одного мікрона досягається майже ідеальна локалізація зони теплового впливу. Це забезпечує формування високоякісних швів при зварюванні, точне вирізання складних контурів, мікроотвори та високоточні насічки без механічного контакту з деталлю. Безконтактний характер дії дає змогу обробляти крихкі або тонкі матеріали, уникаючи деформацій і механічного зношування інструментів. Крім того, лазерна обробка не потребує заміни інструментів, як у механічних верстатах, що скорочує час простоїв і витрати на обслуговування.

Ще однією суттєвою перевагою є гнучкість і універсальність лазерних систем. Один і той самий лазерний комплекс може бути налаштований для

різних операцій — різання, зварювання, гравіювання, маркування або мікросвердління — лише шляхом зміни параметрів випромінювання або програмного забезпечення. Завдяки цьому лазери ідеально підходять для сучасних виробничих систем типу Flexible Manufacturing System, де важлива можливість швидкої зміни продукції без зупинки всього процесу. Така адаптивність сприяє підвищенню конкурентоспроможності підприємств, оскільки дозволяє швидко реагувати на зміну ринкових потреб.

Лазерні технології також мають суттєві переваги в плані якості поверхні. Висока стабільність параметрів випромінювання дає змогу отримати ідеально рівні кромки без задирок, окалин чи деформацій, а також забезпечує мінімальну шорсткість поверхні. Це особливо важливо для високоточних деталей у приладобудуванні, оптиці чи мікроелектроніці. Крім того, лазерне різання забезпечує вузьку зону термічного впливу, що мінімізує внутрішні напруження в матеріалі та спрощує подальше складання або зварювання.

Висока енергетична щільність променя дає можливість обробляти практично всі типи матеріалів — від чорних і кольорових металів до кераміки, скла, полімерів, текстилю та навіть біоматеріалів. У металургії лазери використовуються для точного легування поверхні, зміцнення, наплавлення та модифікації мікроструктури, що покращує механічні властивості виробів. У машинобудуванні лазерне зварювання дозволяє з'єднувати матеріали різної товщини або складу, формуючи шви з мінімальною зоною розплавлення та високою герметичністю. У електронній промисловості лазери використовуються для виготовлення мікросхем, друкованих плат, точного різання напівпровідникових пластин і корпусів. У медицині — для виготовлення імплантатів, хірургічних інструментів і лазерного 3D-друку біосумісних структур.

Окремої уваги заслуговує екологічність лазерних технологій. Більшість операцій не потребує використання мастильних матеріалів, охолоджувальних рідин чи хімічних реагентів, що значно знижує кількість шкідливих відходів і полегшує утилізацію. Викиди пилу, диму чи газів мінімальні і легко

видаляються локальними системами аспірації. У порівнянні з механічною або термічною обробкою лазерна технологія є більш «чистою» і відповідає принципам зеленої енергетики та сталого виробництва.

Попри численні переваги, лазерні технології мають і певні недоліки, які обмежують їх широке впровадження. Найбільш суттєвим є висока вартість обладнання та його обслуговування. Промислові лазери, особливо високопотужні волоконні або твердотільні системи, мають складну конструкцію, яка включає систему охолодження, блоки стабілізації потужності, оптичні резонатори, дзеркала, лінзи, а також засоби керування й автоматизації. Усе це робить вартість комплексу значною, а термін окупності — тривалим. Крім того, лазерне обладнання вимагає високої кваліфікації персоналу для обслуговування, налаштування й експлуатації, що передбачає додаткові витрати на навчання та підготовку кадрів.

Іншим суттєвим недоліком є залежність ефективності лазерної обробки від фізичних властивостей матеріалу. Матеріали з високою відбивною здатністю (наприклад, алюміній, мідь, латунь) можуть відбивати значну частину випромінювання, що знижує ефективність різання чи зварювання. Крім того, деякі матеріали мають неоднорідну структуру або покриття, що ускладнює процес поглинання енергії. Для таких випадків потрібне точне налаштування параметрів — потужності, частоти імпульсів, швидкості переміщення променя, фокусної відстані, що вимагає додаткових розрахунків і досвіду [6].

До недоліків належить також високе енергоспоживання, особливо для потужних установок, що працюють у режимі безперервного випромінювання. Це підвищує витрати на електроенергію і може знижувати економічну ефективність при великосерійних процесах. У разі неправильного підбору параметрів обробки можливе утворення дефектів — оплавлення кромки, мікротріщини, зон термічного впливу або зміна мікроструктури матеріалу. У високоточних виробках такі дефекти неприпустимі, тому лазерна технологія потребує ретельного контролю якості.

Важливо враховувати і питання безпеки. Лазерне випромінювання високої інтенсивності є небезпечним для зору та шкіри людини, тому в місцях експлуатації лазерів необхідно суворо дотримуватись правил охорони праці: використовувати захисні екрани, фільтри, спеціальні окуляри, системи блокування та вентиляції. Крім того, при обробці певних матеріалів (наприклад, полімерів чи композитів) можуть виділятися шкідливі гази, що вимагає додаткової системи очищення повітря.

Окремо слід зазначити, що лазерні системи потребують стабільних умов експлуатації — чистоти повітря, відсутності вібрацій, стабільного електроживлення. Найменше відхилення у фокусуванні або забруднення оптики може призвести до втрати якості обробки чи навіть пошкодження обладнання. Регулярне технічне обслуговування, калібрування, очищення оптичних елементів і перевірка системи охолодження є обов'язковими складовими експлуатації, що збільшує поточні витрати [5].

Використання лазерів у виробничих системах забезпечує поєднання точності, швидкодії, автоматизації та екологічності, що робить їх незамінними в умовах сучасного високотехнологічного виробництва. Разом із тим лазерна технологія вимагає значних інвестицій, спеціальної підготовки персоналу та ретельного підбору технологічних параметрів. При правильному впровадженні лазерні системи дозволяють суттєво підвищити якість і ефективність виробництва, скоротити витрати на обробку та підняти рівень технологічної культури підприємства.

## 2 МЕТОДИ ЛАЗЕРНОГО КОНТРОЛЮ

### 2.1 Лазерна триангуляція, інтерферометрія, спектроскопія

Лазерна триангуляція, інтерферометрія та спектроскопія — три фундаментальні оптичні методи вимірювання й аналізу, які часто доповнюють одна одну у прикладних задачах від промислового контролю якості до фундаментальних фізичних досліджень. Лазерна триангуляція базується на простому геометричному принципі: вузький лазерний промінь проєктують на поверхню об'єкта, утворюючи пляму або лінію, яку спостерігає детектор (лінійний чи площинний сенсор). Принцип лазерної триангуляції зображено на рисунку 2.1.



Рисунок 2.1 – Лазерний триангуляційний сенсор

Змінюючи положення плями на детекторі при зміні відстані до об'єкта, система за відомою трикутною геометрією перераховує положення пікселя у відстань до поверхні, що дозволяє отримувати профілі або повні 3D-скани швидко й з високою роздільною здатністю у короткому діапазоні відстаней; метод відзначається простотою конструкції, відносно невисокою вартістю і гарною швидкістю роботи, проте точність обмежена кутовими похибками,

геометричними спотвореннями лінз та властивостями поверхні (рефлексія, колір, нахил).

Інструментально система триангуляції зазвичай містить діодний або напівпровідниковий лазер, оптичну систему для формування лінії, об'єктиви та фотодетектор або лінійний CMOS/CCD-модуль, а також електроніку для реєстрації та алгоритмів калібрування й лінійної інтерполяції; для сканування великих площ застосовують механічні або гальванометричні системи зміщення променя, іноді поєднуючи кілька лазерів для підвищення надійності вимірювань у складних геометріях. Інтерферометрія — метод, який використовує явище інтерференції когерентних хвиль для визначення надзвичайно малих різниць ходу променів, і тому дозволяє досягати винятково високих точностей (від нм і навіть пікометрового рівня у лабораторних умовах). У простих конфігураціях, наприклад у мікельсонівському інтерферометрі, промінь лазера розділяється на дві частини, вони проходять різні шляхи, повертаються і накладаються: зміна положення інтерференційної картини (франж — смуги або кільця) дає можливість лічити зміни оптичного шляху з точністю, що визначається довжиною хвилі джерела та стабільністю оптики. Інтерферометрія широко використовується як еталонний метод для калібрування довжин, у метрології для визначення подовжень і деформацій, в оптиці для контролю гладкості та фази поверхонь, в експериментальній фізиці.

Практичні обмеження інтерферометрії пов'язані з необхідністю когерентного джерела, чутливістю до вібрації та температурних змін, а також зі складністю інтерпретації багатофранжових картин на нерівних або розсіяних поверхнях; для надійних результатів застосовують середовища з контрольованою температурою, активні системи компенсації вібрацій та алгоритми фазового зрушення. Спектроскопія в широкому розумінні — це вивчення взаємодії електромагнітного випромінювання з речовиною залежно від довжини хвилі, тобто аналіз розподілу інтенсивності по довжинах хвиль (спектру) випромінювання або поглинання. За допомогою спектроскопії можна ідентифікувати елементи та сполуки, визначати концентрації,

досліджувати електронну та молекулярну структуру, найчастіше застосовуючи такі різновиди, як оптична емісійна та поглинальна спектроскопія, інфрачервона (ІЧ) і ультрафіолетова-видима спектроскопія, раманівська спектроскопія, мас-спектрометрія у поєднанні з оптичними методами [6].

Важливо зазначити, що спектрометри можуть бути дисперсійними (ґрати чи призма з детектором), фур'є-спектрометрами, або базуватись на детекторах для окремих смуг; сучасні лабораторні прилади забезпечують високу спектральну роздільну здатність і чутливість, що дозволяє працювати як з газовими, так і з твердими та рідкими зразками — спектроскопія має безліч застосувань у хімічному аналізі, матеріалознавстві, астрономії, екологічному моніторингу та біомедицині. У поєднанні ці методи дають могутні діагностичні комплекси: наприклад, триангуляція швидко дає форму і геометрію об'єкта, інтерферометрія — детальні фази й мікроскопічні дефекти поверхні, спектроскопія — хімічний склад і стан матеріалу; у промисловості це застосовується для контролю деталей на конвеєрі (3D-сканування дефектів), для калібрування лінійних масштабів і точних позиціонувань, а також для неінвазивного хімічного аналізу поверхонь і тонких плівок. При плануванні експериментальної роботи важливо враховувати джерело помилок: при триангуляції — кути і калібрування лінз, при інтерферометрії — стійкість джерела й механічні флуктуації, при спектроскопії — роздільна здатність і шум детектора; на практиці часто потрібні процедури калібрування з еталонами, корекції на температурні ефекти та спеціальні алгоритми обробки сигналу (фільтрація шуму, згладжування, фазовий аналіз, деконволюція спектрів).

## 2.2 Безконтактний моніторинг та виявлення дефектів

Методи безконтактного моніторингу та виявлення дефектів охоплюють широкий набір технологій, які дозволяють оцінювати стан об'єктів,

обладнання та інфраструктури без фізичного дотику — від тепловізійних знімків, лазерної віброметрії й фотограмметрії до дистанційного радіолокаційного та акустичного контролю, при цьому кожен метод має свої сильні та слабкі сторони, області застосування й вимоги до інтерпретації даних. Тепловізійна (інфрачервона) діагностика базується на виявленні аномальних теплових полів: дефекти контактів, перегрів підшипників, витоки тепла в будівлях, перевантаження електромережі або локальні втрати теплоізоляції виявляються як «гарячі плями» на інфрачервоному зображенні; цей метод швидкий, безпечний для персоналу і добре масштабується при оглядах великих систем, особливо коли його поєднують з регулярними інспекціями та автоматизованою обробкою кадрів для виявлення аномалій.

Лазерна доплерівська віброметрія дозволяє безконтактно вимірювати вібрацію поверхні з високою частотною та амплітудною роздільною здатністю: промінь лазера фіксує доплерівське зсуви від коливань, що дає змогу діагностувати дисбаланс, тріщини, розшарування структури або зміну жорсткості без встановлення сенсорів на сам об'єкт — цей підхід особливо корисний для обертових машин, лопаток турбін, тонкостінних елементів і складних виробів, де контактні датчики або неможливі, або впливають на вимірювання.

Фотограмметрія і 3D-сканування за допомогою камер високої роздільності або лазерного LIDAR дають можливість створювати точні тривимірні моделі будівель, мостів, трубопроводів та інших об'єктів; аналіз змін геометрії між серіями знімків дозволяє знаходити деформації, осідання, тріщини та корозійні ураження, а комбінація з алгоритмами комп'ютерного зору та машинного навчання автоматизує класифікацію дефектів і пріоритизацію ремонтів. Дрони як платформи для несучих сенсорів революціонізували інспекції важкодоступних конструкцій: оснащені оптичними, мультиспектральними або тепловізійними камерами, вони виконують швидкий обліт мостів, ліній електропередач, дахів і резервуарів,

зменшуючи ризик для інспекторів і дозволяючи збирати багатошарові дані для подальшого аналізу.

Акустичні та ультразвукові безконтактні методи включають повітряно-кабельні або лазер-акустичні підходи, коли ультразвукові джерела та приймачі розташовані на відстані або коли імпульси акустичної енергії збуджують структуру, а відбиті хвилі аналізуються для виявлення внутрішніх дефектів, мікротріщин, розшарування композитів; такі методи корисні, коли потрібно оглядати складні композитні деталі або тонкі покриття без розбирання. Радіочастотні та мікрохвильові технології (включно з GPR — георадіолокацією) дозволяють виявляти підповерхневі пустоти, армування та аномалії у конструкціях і дорожньому полотні, що важливо при інспекціях фундаментів, доріг і залізничних колій. Терегерцові та гіперспектральні системи відкривають можливості для аналізу матеріалів за спектральними характеристиками, наприклад для виявлення корозії, вологості або зміни складу покриттів; вони застосовні в авіаційній, морській та енергетичній галузях, де зміна хімічного складу матеріалу сигналізує про переддефектні стани [7].

Безконтактні оптичні методи контролю, такі як цифрова кореляція зображень (DIC), дають змогу вимірювати поле деформацій на поверхні під час навантаження, що особливо цінно в дослідженні руйнування матеріалів та при ресурсному моніторингу конструкцій. Сучасні підходи поєднують кілька сенсорних шарів: наприклад, тепловізійні знімки з дрона доповнюють оптичні високороздільні кадри та лазерні заміри відстаней, а отримані дані агрегуються в цифрового двійника для тривимірного відстеження стану й прогнозування залишкового ресурсу; важливо застосовувати алгоритми очищення даних, калібрування сенсорів і методи об'єднання химерних вимірювань, аби уникнути хибної інтерпретації. Машинне навчання і сучасні нейромережі значно підвищили точність автоматичного розпізнавання дефектів на зображеннях і теплових картах, навчання на великій кількості

прикладів дозволяє зменшити кількість помилкових спрацьовувань і прискорює сортування пріоритетних проблем для ремонтних бригад.

Переваги безконтактних методів очевидні: безпечність, швидкість, можливість огляду в експлуатаційному режимі без зупинки обладнання і широкий діапазон відстаней та масштабів інспекцій; проте існують обмеження — чутливість до погодних умов (особливо для оптичних і теплових методів), потреба в хорошому куті огляду, іноді висока вартість обладнання і необхідність кваліфікованого аналізу даних.

### 2.3 Обробка зображень у лазерному контролі

У сучасному виробництві й якісному контролі дедалі поширенішим стає поєднання лазерної технології із методами обробки зображень — це дозволяє виконувати високоточні вимірювання, виявляти дефекти, профіль деталей, контролювати форму, розміри і поверхневий стан безконтактно. Застосування лазера забезпечує високу швидкість, точність і можливість роботи з рухомими або складними за формою об'єктами. Такі системи зазвичай включають проєціювання лазерної лінії чи точки на поверхню, фіксацію її камерою або сенсором, подальшу обробку отриманого зображення або профілю та порівняння результатів з еталонними параметрами.

Наприклад, метод лазерної триангуляції широко використовується для вимірювання висоти, профілю та товщини об'єктів. Лазерна лінія проєктується на поверхню, а камера під певним кутом фіксує її відхилення. Алгоритми обробки зображення визначають положення лінії, перетворюючи його у значення відстані або профілю. Поєднання з промисловими алгоритмами дає змогу контролювати геометрію деталей на конвеєрах, перевіряти прямолінійність, рівність поверхні, глибину канавок, точність кутів і площин.

Обробка зображень у таких системах складається з кількох етапів: отримання зображення за допомогою лазерної лінії чи 3D-сканування,

передобробка для зменшення шуму і корекції освітлення, сегментація для виділення об'єкта або лазерного сліду, екстракція ознак, таких як контури, висоти, глибини та текстура, класифікація результатів та прийняття рішення щодо відповідності вимогам. Якість зображення, роздільна здатність камери, умови освітлення та відбивні властивості поверхні мають вирішальне значення для точності аналізу.

У лазерному контролі велике значення має тривимірне сканування поверхонь. За допомогою лазера створюється профіль або хмарка точок, з якої після обробки формується цифрова модель об'єкта. Це дозволяє отримувати детальну інформацію про форму, дефекти, нерівності та зміни товщини. У таких системах застосовують методи структурованого освітлення, лазерної лінії, фотометричного стерео та інші підходи. Такий підхід є особливо ефективним для об'єктів зі складною геометрією, криволінійними або відполірованими поверхнями, а також у випадках, коли потрібно контролювати товщину покриттів або внутрішні дефекти.

Алгоритми обробки зображень у таких системах дозволяють формувати хмару точок, очищати її від шумів, видаляти викиди, проводити вирівнювання із цифровою моделлю, а також аналізувати ступінь зносу або деформацій. Використання лазерних систем спільно з камерами високої роздільної здатності робить можливим отримання зображень з мікрометровою точністю навіть у складних виробничих умовах. Візуалізація результатів лазерного 3D-сканування та обробки хмари точок на рисунках 2.2 та 2.3.

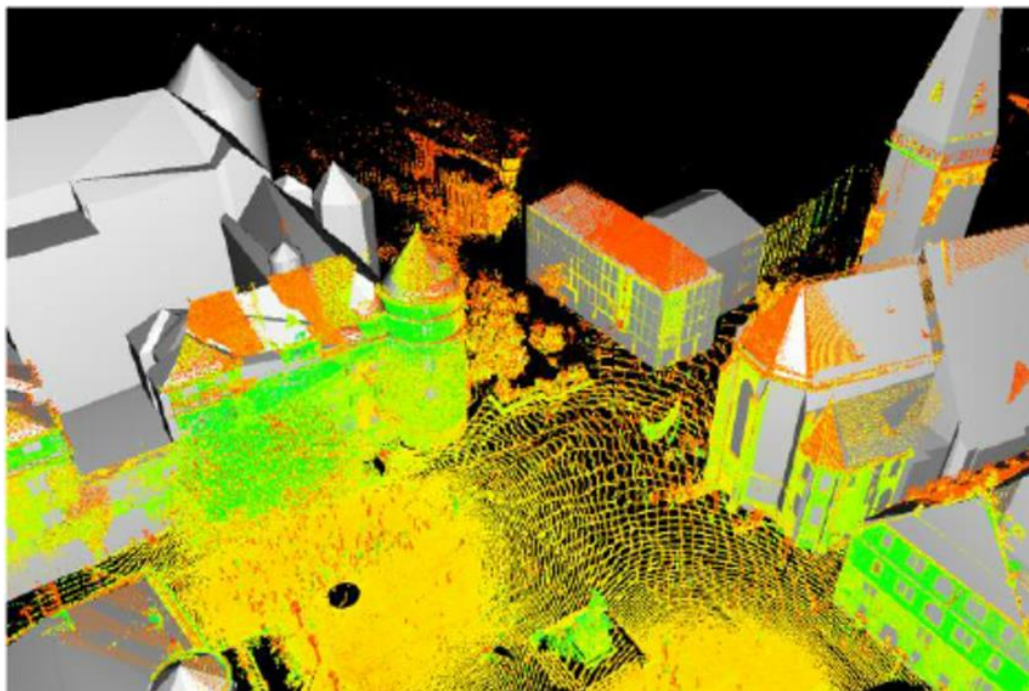


Рисунок 2.2 – Лазерне 3D-сканування об'єкта з побудовою хмари точок

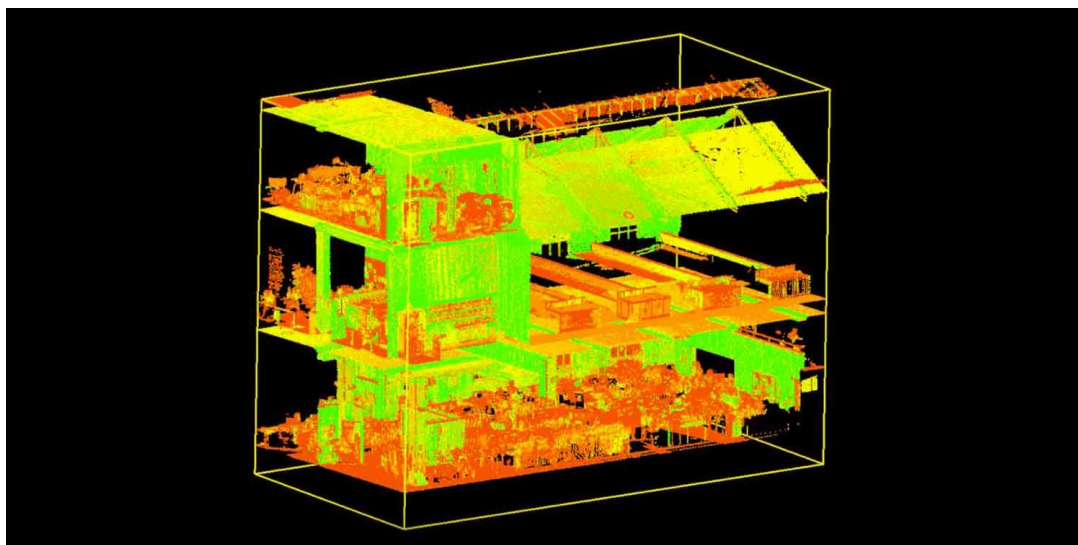


Рисунок 2.3 – Тривимірна модель будівлі, створена на основі даних лазерного сканування (LiDAR)

Сучасні методи часто поєднують лазерний контроль із алгоритмами машинного та глибинного навчання. Такі системи можуть не лише вимірювати параметри, а й розпізнавати типи дефектів — тріщини, включення, пори, нерівності поверхні, неправильну форму зварних швів. Використання

нейронних мереж забезпечує високу точність виявлення дефектів і здатність адаптуватися до нових типів поверхонь без ручного налаштування. Інтелектуальні системи аналізують зображення в режимі реального часу, формують оцінку якості та можуть передавати сигнал системам автоматизації для корекції технологічного процесу.

Серед основних переваг лазерних методів контролю — висока точність вимірювання, безконтактність, швидкість роботи, можливість автоматизації та інтеграції у виробничі лінії. Вони дозволяють проводити контроль у режимі реального часу, отримувати детальні тривимірні моделі та знижувати ризик людської помилки. До недоліків належать висока вартість обладнання, складність налаштування, чутливість до освітлення, відблисків та вібрацій, а також вимоги до обчислювальних ресурсів для обробки великої кількості даних.

Використання лазерних методів із системами обробки зображень особливо ефективно при контролі зварних швів, стану покриттів, вимірюванні товщини, перевірці форми деталей, контролі великогабаритних або рухомих поверхонь. Системи лазерного профілювання застосовуються, наприклад, для моніторингу стану рейок на залізницях, оцінки рівності дорожнього полотна або перевірки точності розмірів у машинобудуванні. У таких випадках лазерна лінія сканує поверхню, а програма виявляє навіть незначні відхилення від заданої геометрії [8].

Обмеження технології зумовлені фізичними характеристиками поверхні: матеріали з високою відбивною здатністю або прозорі структури можуть спотворювати відбитий промінь. Також складності виникають при високошвидкісному русі об'єкта, коли камера або сенсор не встигає фіксувати точні дані. Для вирішення таких проблем використовують спеціальні фільтри, компенсаційні алгоритми та системи стабілізації. Вибір довжини хвилі лазера, потужності, кута проєкції та типу сенсора суттєво впливає на кінцеву точність.

Подальший розвиток технології пов'язаний із впровадженням штучного інтелекту, здатного здійснювати аналіз у реальному часі, виявляти закономірності та прогнозувати появу дефектів ще до їх фактичного

виникнення. Інтеграція таких систем із промисловими роботами та автоматизованими лініями дозволяє створювати гнучкі комплекси для контролю якості, які не лише оцінюють стан об'єкта, але й адаптують параметри виробництва, забезпечуючи стабільність процесу.

#### 2.4 Комп'ютерний аналіз поверхонь у лазерних системах моніторингу

Сучасний рівень розвитку промисловості вимагає постійного удосконалення технологічних процесів, підвищення точності вимірювань та забезпечення стабільної якості продукції. В умовах автоматизованого виробництва усе більшу роль відіграють лазерні технології, які дозволяють здійснювати безконтактні вимірювання, обробку матеріалів, аналіз поверхні та контроль стану виробів у реальному часі. Лазерні системи моніторингу стали невід'ємною частиною сучасних систем технічного зору, автоматизованих ліній контролю та метрологічних комплексів.

Основною перевагою лазерних технологій є можливість надзвичайно точного формування і спрямування світлового потоку. Лазерне випромінювання характеризується високою когерентністю, монохроматичністю і спрямованістю, що дозволяє фокусувати енергію на дуже малих ділянках поверхні. Це робить лазери універсальним інструментом як для обробки матеріалів (різання, зварювання, маркування), так і для діагностики — зокрема у системах моніторингу стану поверхонь [9].

У промислових системах моніторингу лазери використовуються для формування світлових плям або ліній на поверхні об'єкта. Зміна відбитого або розсіяного світла фіксується оптичними сенсорами, після чого отримані дані піддаються цифровій обробці. Такий підхід дозволяє вимірювати шорсткість, геометрію, деформації, а також виявляти дефекти поверхні — тріщини, подряпини, відшарування тощо.

Цифрова обробка зображень, отриманих від лазерних систем, базується на ряді класичних методів математичного аналізу. До них належать фільтрація

шумів, порогова сегментація, виділення контурів, аналіз градієнтів та морфологічна обробка. Нижче наведено основні принципи цих методів, які найчастіше використовуються у промисловій автоматизації.

Першим етапом будь-якої системи машинного зору є фільтрація зображення. Лазерні сенсори можуть реєструвати не лише сигнал від об'єкта, але й фонові шуми, зумовлені освітленням або відблесками. Для пригнічення таких шумів використовується гауссове згладжування. Його математична модель описується як згортка функції яскравості з гаусовим ядром:

$$G(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}}, \quad (2.1)$$

$$I'(x, y) = I(x, y) \cdot G(x, y), \quad (2.2)$$

де  $I(x, y)$  – початкове зображення ;

$\sigma$  – параметр, що визначає ступінь розмиття.

Така фільтрація дозволяє усунути високочастотні коливання яскравості, зберігаючи при цьому контури об'єкта [10].

Наступним етапом є порогова обробка зображення, або бінаризація, що використовується для розділення фону та об'єкта. Одним із найпоширеніших підходів є метод Отсу, який автоматично визначає оптимальний поріг  $T$ , мінімізуючи дисперсію яскравості всередині класів «об'єкт» і «фон». Алгоритм вибирає такий поріг, що забезпечує максимальне розділення гістограми інтенсивностей:

$$\sigma_B^2(T) = \omega_0(T)\omega_1(T)[\mu_0(T) - \mu_1(T)]^2, \quad (2.3)$$

де  $\omega_0, \omega_1$ , – ймовірності двох класів;

$\mu_0, \mu_1$  – середні яскравості пікселів у кожному класі.

Порогова обробка є ключовою операцією у системах лазерного моніторингу, адже дозволяє точно виділити освітлену лазером ділянку або дефектну область.

Для виявлення меж об'єктів використовується оператор Лапласа, що ґрунтується на другій похідній від яскравості. Лапласіан дозволяє знаходити точки різкої зміни інтенсивності, які відповідають контурам або дефектам на поверхні:

$$\nabla^2 f = \frac{\delta^2 f}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 f}{\delta y^2}. \quad (2.4)$$

Після застосування оператора Лапласа отримують карту контурів, на якій видно всі ділянки із суттєвими змінами яскравості — подряпини, нерівності, виступи тощо. У системах лазерного моніторингу така обробка дозволяє формувати високоточні карти відбитої інтенсивності або профілі поверхні у мікрометровому діапазоні.

Для покращення стабільності результатів часто поєднують фільтрацію Гаусса та оператор Лапласа, утворюючи метод Лапласа-Гаусса. Його метою є спочатку згладити шум, а потім знайти чіткі границі об'єктів. Відповідна формула має вигляд:

$$\nabla^2 G = \frac{\delta^2 G}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 G}{\delta y^2}, \quad (2.5)$$

$$R(x, y) = I(x, y) \times \nabla^2 G(x, y), \quad (2.6)$$

де  $R(x, y)$  – результат фільтрації, який використовується для подальшої сегментації.

На завершальному етапі виконується аналіз зв'язаних областей (Connected Component Analysis). Після бінаризації зображення усі пікселі, що утворюють неперервну область, розглядаються як один об'єкт. Завдяки цьому можна виявляти та кількісно оцінювати дефекти на поверхні. Алгоритм ґрунтується на рекурсивному обході сусідніх пікселів із тією самою яскравістю (зазвичай «1» для білого кольору). Для кожної області визначаються такі характеристики, як площа  $A$ , периметр  $P$ , ексцентриситет  $e$ , а також координати центра мас.

Математично площу області можна описати як:

$$A = \sum_{(x,y) \in R} 1, \quad (2.7)$$

а центр мас:

$$(x_c, y_c) = \frac{1}{A} \sum_{(x,y) \in R} (x, y). \quad (2.8)$$

Аналіз форми об'єктів часто доповнюється обчисленням моментів зображення — величин, які характеризують розподіл маси яскравості. Наприклад, геометричні моменти другого порядку дають змогу обчислити орієнтацію та ступінь видовженості об'єкта, що важливо при контролі геометричних параметрів деталей.

Завдяки комбінації перелічених методів формується комплексна система лазерного контролю поверхонь. Лазерне випромінювання, взаємодіючи з матеріалом, створює зображення, яке далі аналізується математичними алгоритмами. Ці алгоритми перетворюють світлову інформацію у кількісні показники — глибину подряпини, площу дефекту, радіус вигину або ступінь шорсткості [11].

У промисловій практиці методи комп'ютерного аналізу зображень інтегруються з лазерними вимірювальними системами, утворюючи єдині комплекси автоматичного моніторингу. Такі системи здатні в реальному часі проводити контроль продукції, фіксувати відхилення від нормативних параметрів і передавати інформацію у центральну систему керування. Прикладом є лазерні профілометри, що сканують поверхню виробу тонким лазерним променем і формують тривимірну карту висот. Отримане зображення аналізується алгоритмами фільтрації, порогової обробки та сегментації, після чого визначаються параметри дефектів.

Завдяки точності лазерних вимірювань і швидкодії сучасних методів цифрової обробки зображень можливо реалізувати моніторинг із мікронною роздільною здатністю навіть у динамічних процесах — наприклад, при переміщенні конвеєрних ліній або у процесах лазерного зварювання. Такі

технології відкривають шлях до повністю автоматизованого контролю якості без участі оператора.

Для кращої візуалізації процесу обробки зображення у лазерних системах моніторингу доцільно використовувати схему, яка ілюструє основні етапи (рис. 2.4).

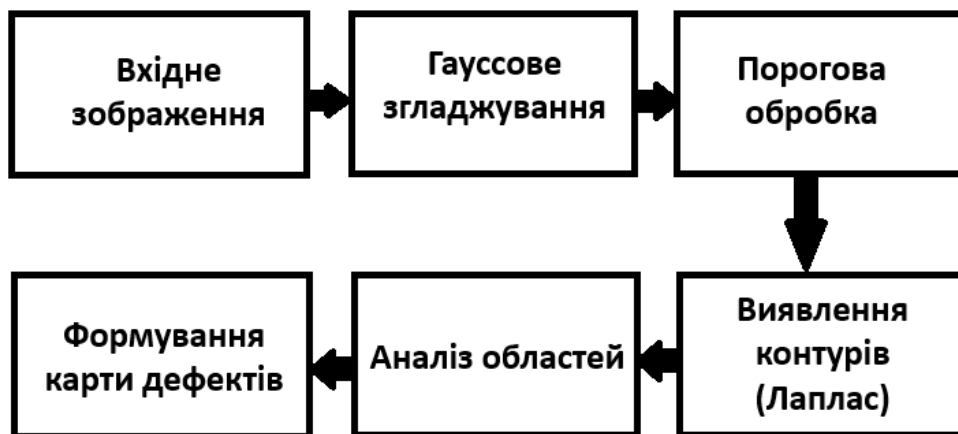


Рисунок 2.4 – Схема цифрової обробки зображення у лазерній системі моніторингу

На практиці для підвищення достовірності аналізу використовують також морфологічні операції — розширення (dilation), стискання (erosion), відкриття (opening) і закриття (closing). Вони дозволяють усувати випадкові точки шуму, з'єднувати розірвані контури або, навпаки, розділяти об'єкти, що злилися. Ці операції описуються як послідовність логічних перетворень над множинами пікселів.

Висока ефективність методів Лапласа та Гаусса полягає у їх універсальності. Вони не залежать від кольору матеріалу чи інтенсивності освітлення, а ґрунтуються на локальних змінах яскравості. Це дозволяє використовувати їх не лише в оптичних, але й у комбінованих лазерно-ультразвукових системах, у яких сигнал формується на основі взаємодії лазерного імпульсу з поверхнею твердого тіла [12].

### 3 ТЕХНІЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ ЛАЗЕРНОГО КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ ПОВЕРХОНЬ

#### 3.1 Принцип дії лазерної системи контролю

Лазерні системи контролю поверхонь ґрунтуються на використанні спрямованого когерентного випромінювання, яке дозволяє отримувати високоточну інформацію про мікрогеометрію об'єкта. Принцип їх дії базується на аналізі відбитого або розсіяного лазерного променя після взаємодії зі структурою контрольованої поверхні. У результаті зміни інтенсивності, фази або напрямку відбитого випромінювання можна зробити висновок про стан поверхні, наявність дефектів, мікротріщин або неоднорідностей матеріалу.

Основним елементом системи є лазерне джерело випромінювання, яке генерує монохроматичний пучок світла із заданою довжиною хвилі  $\lambda$  та потужністю  $P_0$ . Для задач контролю якості зазвичай використовуються напівпровідникові або гелій-неонові лазери з довжиною хвилі у діапазоні від 532 нм до 650 нм, що забезпечують високу стабільність та вузьку спектральну лінію. Лазерне випромінювання направляєється на поверхню зразка під певним кутом падіння  $\theta$ , який визначається умовами відбиття та конфігурацією оптичної системи [13].

При взаємодії з поверхнею частина енергії променя відбивається дзеркально, частина — розсіюється внаслідок мікронерівностей або дефектів. Для ідеально гладкої поверхні кут падіння дорівнює куту відбиття, а розсіяна компонента мінімальна. У разі наявності шорсткостей, подряпин, окисних плям чи краплень, структура відбитого світла змінюється — з'являються флуктуації інтенсивності та напрямку променя, які фіксуються приймальним сенсором.

Сенсор (оптична камера або фотодетекторна матриця) перетворює розподіл світлової інтенсивності  $I(x,y)$  у двовимірне цифрове зображення.

Значення яскравості кожного пікселя є функцією відбитої енергії та описується співвідношенням:

$$I(x, y) = R(x, y) \times P_0 \times \cos(\theta), \quad (3.1)$$

де  $R(x, y)$  — локальний коефіцієнт відбиття поверхні, який залежить від матеріалу та шорсткості.

Для ділянок із дефектами  $R(x, y)$  зменшується, що призводить до темніших областей на зображенні, тоді як гладкі ділянки мають вищу відбивну здатність.

Отримане зображення є інформаційною матрицею, у якій кожен піксель відображає мікрооптичний стан конкретної точки поверхні. Подальший аналіз цієї матриці дозволяє визначити просторовий розподіл інтенсивності, виявити перепади яскравості, що відповідають краям, тріщинам, включенням або відшаруванням. Саме цей етап створює основу для програмного аналізу, реалізованого в обчислювальному модулі системи.

Типова лазерна система контролю зазвичай включає джерело лазерного випромінювання, оптичну систему для спрямування й фокусування променя, що складається з лінз, дзеркал та діафрагм, а також об'єкт контролю — зразок або деталь. Отримане випромінювання сприймається приймальним пристроєм, наприклад камерою чи фотодетекторною матрицею, після чого інформація передається до блоку цифрової обробки зображення та далі аналізується програмним модулем для оцінки стану поверхні.

Світловий пучок, сфокусований на поверхні, формує зону освітлення, з якої відбите світло реєструється камерою під певним кутом. Отримане зображення передається до комп'ютера, де виконується його цифрова обробка. Важливу роль відіграє оптична геометрія системи, адже точність контролю залежить від роздільної здатності камери, фокусної відстані лінз і стабільності положення лазерного пучка [14].

Інтенсивність сигналу, зареєстрованого сенсором, може бути представлена у вигляді дискретної функції:

$$I_{ij} = f(x_i, y_i) + n_{ij}, \quad (3.2)$$

де  $f(x_i, y_j)$  – ідеальне зображення поверхні без шуму,

$n_{ij}$  – випадкова шумова компонента, спричинена флуктуаціями освітлення, електронними шумами або нерівномірністю поверхні.

На практиці для зменшення впливу шумів застосовуються оптичні фільтри та цифрові методи згладжування, такі як Гауссове фільтрування, яке моделює розсіювання енергії лазерного променя на мікронерівностях і усереднює локальні коливання яскравості.

У результаті первинного оптичного етапу формується базове зображення, що відображає структуру поверхні з урахуванням її дефектів. На наступних етапах це зображення передається до програмного модуля, який виконує цифрову обробку: сегментацію, виділення контурів і аналіз областей. У сукупності фізичні процеси розсіювання світла, оптична фокусування та цифрова інтерпретація утворюють єдину систему лазерного контролю, здатну точно визначати навіть незначні порушення геометрії поверхні.

Основна перевага таких систем полягає у високій просторовій роздільній здатності, стабільності вимірювань та можливості інтеграції з цифровими алгоритмами аналізу.

Принцип дії системи можна описати через послідовність фізичних процесів. Спочатку лазерне джерело формує когерентний, монохроматичний пучок світла з певною довжиною хвилі  $\lambda$  та потужністю  $P_0$ . Завдяки когерентності хвиль, лазерне випромінювання має високу спрямованість і майже не розходить на відстані. Це дає змогу сконцентрувати енергію на мікроділянці поверхні, формуючи вузьку зону освітлення, де інтенсивність описується як:

$$I_0(r) = I_{max} \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma^2}\right), \quad (3.3)$$

де  $I_{max}$  – максимальна інтенсивність у центрі пучка,

$r$  – відстань від осі променя,

$\sigma$  – параметр, що характеризує ширину Гауссового розподілу.

Після падіння променя на поверхню відбувається його часткове відбиття і розсіювання. Якщо поверхня гладка і дзеркальна, відбиття є переважно регулярним і кут падіння дорівнює куту відбиття. Проте при наявності шорсткостей, подряпин або інших структурних дефектів виникає дифузне розсіювання, внаслідок якого частина енергії розподіляється під різними кутами. Це створює зміни у просторовому розподілі інтенсивності світлового потоку [15].

Приймальний сенсор (зазвичай це CMOS або CCD-матриця) фіксує відбитий потік світла, перетворюючи його в цифрову матрицю яскравості  $I(x, y)$ . Значення кожного пікселя прямо пропорційне кількості фотонів, що потрапили на відповідний фоточутливий елемент.

Для плоских та ідеально відшліфованих ділянок сигнал буде однорідним, тоді як у місцях нерівностей інтенсивність зменшується, формуючи контрастні переходи, які легко виділяються під час подальшої цифрової обробки. Етапи лазерної системи контролю зображені на рисунку 3.1.



Рисунок 3.1 – Етапи лазерної системи контролю

Основні етапи дії лазерної системи контролю включають:

1) формування та спрямування лазерного пучка. Оптична система складається з діафрагм, дзеркал та лінз, які задають геометрію променя, фокусну відстань і кут падіння. Висока стабільність цих параметрів визначає точність усього вимірювання;

2) взаємодія лазерного променя з поверхнею об'єкта. При потраплянні на поверхню лазер проникає на мікрорівень матеріалу, і частина енергії поглинається, частина — відбивається. Ступінь відбиття описується коефіцієнтом  $R(x, y)$ , що залежить від матеріалу, структури і кута падіння:

$$R = \frac{I_{\text{відб.}}}{I_{\text{пад.}}} \quad (3.4)$$

Для дефектних зон  $R$  зменшується, що у цифровому форматі виражається зниженням яскравості пікселя:

1) оптична реєстрація та перетворення сигналу. Відбитий потік фокусується об'єктивом на матрицю сенсора, де відбувається перетворення фотонного потоку в електричний сигнал. Після аналого-цифрового перетворення формується двовимірний масив інтенсивностей  $I_{ij}$ , який є основою для подальшого аналізу;

2) передача даних до модуля цифрової обробки. Отримане зображення підлягає обробці — усуненню шумів, сегментації, виділенню контурів і визначенню областей дефектів.

На цьому етапі важливу роль відіграють математичні методи цифрової обробки зображень. Першим кроком є фільтрація шумів за допомогою Гауссового згладжування, що дозволяє зберегти основні контури при видаленні дрібних випадкових флуктуацій. Далі використовується порогова обробка (зокрема метод Отсу), яка розділяє фон і об'єкт за яскравістю. Потім застосовуються оператори Лапласа або Собеля для виявлення контурів, після

чого виконується аналіз областей — підрахунок об'єктів, визначення їх площі та форми.

Загальний процес цифрової інтерпретації можна представити як функцію:

$$S = \Phi(I(x, y)), \quad (3.5)$$

де  $\Phi$  – алгоритм обробки зображення, що включає послідовність операцій фільтрації, пороговання та аналізу контурів.

Результатом є карта дефектів, де кожна виявлена область має геометричні характеристики: площу, периметр, форму та координати центру [16].

У сучасних лазерних системах контролю можливе поєднання кількох методів — від класичного відбиття до інтерферометрії або триангуляційного вимірювання. Наприклад, при триангуляційному способі лазерний промінь відхиляється на певний кут, а зміна його положення на сенсорі використовується для обчислення висоти нерівностей за законом:

$$-h = \frac{b \cdot \Delta x}{f}, \quad (3.6)$$

де  $h$  – висота дефекту;

$b$  – базова відстань між лазером і сенсором;

$\Delta x$  – зсув зображення на матриці;

$f$  – фокусна відстань об'єктива.

Завдяки точності лазерного променя система здатна виявляти дефекти розміром у декілька мікрометрів, що є недосяжним для звичайних оптичних методів спостереження.

Такі системи широко застосовуються у металургії, машинобудуванні, мікроелектроніці, контролі зварних швів, а також у виробництві лез, підшипників, оптичних елементів тощо. Їх можна інтегрувати у промислові

роботи або автоматизовані лінії для безперервного моніторингу якості у режимі реального часу.

Кінцевим результатом роботи лазерної системи є не просто фотографічне зображення, а аналітична інформація, яка відображає просторову структуру поверхні, її дефекти, а також статистичні параметри, що можуть бути використані для прогнозу зносу чи пошкодження деталі.

### 3.2 Математичне моделювання аналізу зображень

Цифрова обробка зображень у лазерних системах контролю поверхонь спирається на математичні моделі та алгоритмічні процедури, що дозволяють перетворити зареєстрований сенсором світловий сигнал у набір структурованих ознак. Зображення, сформоване внаслідок відбиття лазерного променя від поверхні, містить інформацію про її геометричний стан, але також включає шумові компоненти, неоднорідності освітлення та артефакти оптичної системи. Тому першим кроком обробки є згладжування шумів. У програмі це реалізується за допомогою Гауссового фільтра, що математично описується ядром:

$$G(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}\right), \quad (3.7)$$

де  $\sigma$  – дисперсія, що визначає ступінь згладжування.

Цей фільтр виконує згортку зображення з ядром:

$$I_{blur}(x, y) = I(x, y) \cdot G(x, y). \quad (3.8)$$

Згладжуючи високолокальні коливання інтенсивності світла й залишаючи незмінними основні макроструктури зображення. У кодї ця операція зображена наступним чином:

$$\text{blur} = \text{cv2.GaussianBlur}(\text{gray}, (5, 5), 0). \quad (3.9)$$

Це забезпечує початкове зменшення шумів і готує зображення до сегментації. Після придушення шумів виконується порогова обробка методом Отсу — статистичним алгоритмом, який визначає оптимальне порогове значення на основі аналізу гістограми яскравостей. Метод Отсу мінімізує внутрішньокласову дисперсію:

$$\sigma_{\text{внут}}^2(T) = \omega_1(T)\sigma_1^2(T) + \omega_2(T)\sigma_2^2(T), \quad (3.10)$$

де  $\omega_1, \omega_2$  — відносні площі класів;

$\sigma_1^2, \sigma_2^2$  — дисперсії яскравості всередині класів.

У коді цей алгоритм можна записати як:

```
_, thresh = cv2.threshold(blur, 0, 255, cv2.THRESH_BINARY +
+cv2.THRESH_OTSU)
```

Це дозволяє формувати чистий силует об'єкта, відокремлюючи його від фону на основі яскравісного контрасту, що є критично важливим етапом у подальшому аналізі. Завдяки автоматичному добору порогу за методом Отсу система не потребує ручного налаштування та стабільно працює для різних умов освітлення та якості зображення. Отримане бінаризоване зображення забезпечує чітке виділення основної геометрії об'єкта, спрощує подальше виявлення контурів, дефектів поверхні та значно підвищує надійність алгоритмів сегментації у лазерних системах моніторингу [17].

Після сегментації формується основа для пошуку дефектів за допомогою оператора Лапласа, який обчислює другі похідні яскравості та реагує на різкі зміни світлового сигналу. Оператор описується виразом:

$$\nabla^2 I = \frac{\partial^2 I}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 I}{\partial y^2}. \quad (3.11)$$

Завдяки чутливості до локальних нерівностей, Лаплас дозволяє виявлять мікрорельєф та подряпини, що проявляються як локальні сплески градієнтів. У програмі це реалізується:

```
laplacian = cv2.Laplacian(gray, cv2.CV_64F)
edges = np.uint8(np.absolute(laplacian))
```

і створює карту контрастних структур, які надалі проходять бінаризацію. Повторне пороговання, цього разу знов методом Отсу, застосовується до карти градієнтів, щоб виділити лише ті області, які мають значущу зміну інтенсивності:

```
thresh_val = filters.threshold_otsu(edges)
binary = edges > thresh_val
binary = (binary * 255).astype(np.uint8)
```

Це дозволяє зосередитись на реальних дефектах, тоді як незначні коливання яскравості відсіюються. Після формування карти дефектів виконується аналіз зв'язаних компонент. Алгоритм знаходить окремі групи суміжних пікселів із однаковим значенням та визначає їх геометричні характеристики: площу, периметр, форму, центр мас та інші параметри. Позначення компонент виконується за допомогою функції:

```
labels = measure.label(binary)
props = measure.regionprops(labels)
defects = [p for p in props if p.area > 30]
```

Значення 30 встановлене як поріг мінімальної площі, що дозволяє відсіяти дрібні артефакти. Геометричні параметри дають змогу визначити реальні пошкодження поверхні та відрізнити їх від шумів. Для аналізу форми часто використовують компактність:

$$C = \frac{P^2}{4\pi A_S}, \quad (3.12)$$

де  $P$  – периметр області;

$A_S$  – площа.

Вищі значення компактності свідчать про витягнуті або нерівні структури, характерні для подряпин.

Після обробки даних формується візуалізація. На оригінальне зображення накладається контур основного об'єкта, який обведений червоним кольором:

```
cv2.drawContours(output, contours, -1, (0, 0, 255), 2)
```

та контури виявлених дефектів, які виділяються зеленим:

```
cv2.drawContours(output, cnts, -1, (0, 255, 0), 1).
```

Це дозволяє швидко оцінити розташування та масштаб пошкоджень. Крім того, у програму реалізовано інструменти збільшення та панорамування, що дозволяють детально переглядати мікродефекти навіть на зображеннях високої роздільності. Механізм збільшення працює через афінне перетворення:

```
M = np.float32([[zoom, 0, pan_x], [0, zoom, pan_y]])  
zoomed = cv2.warpAffine(resized, M, (w, h)),
```

а обробка подій миші реалізується в окремій функції, що переміщує зображення і змінює масштаб:

```

elif event == cv2.EVENT_MOUSEWHEEL:
    if flags > 0:
        zoom *= 1.1
    else:
        zoom /= 1.1.

```

Цифрова обробка поверхні виконується як послідовність взаємопов'язаних математичних процедур: згладжування, сегментація, виділення контурів, морфологічний аналіз областей та інтерактивна візуалізація результатів. У компактній формі весь процес можна подати як композицію перетворень:

$$D = \Psi(I) = A \left( O \left( L(G(I)) \right) \right), \quad (3.13)$$

де  $G$  – Гауссове згладжування;

$L$  – оператор Лапласа;

$O$  – порогування Отсу;

$A$  – аналіз областей;

$D$  – карта дефектів поверхні.

Така модель дозволяє отримати точний опис стану поверхні, локалізувати пошкодження та візуалізувати їх у вигляді обведених структур на зображенні. Завдяки поєднанню математичного моделювання та програмної реалізації вдається забезпечити високоточний аналіз мікрodefektів і створити інструмент, придатний як для лабораторних досліджень, так і для промислового моніторингу у реальному часі [18].

Додаткової уваги заслуговує фізична інтерпретація того, як саме цифровий аналіз відображає властивості реальної поверхні. Лазерне випромінювання, взаємодіючи з матеріалом, створює характерну картину розподілу інтенсивностей, яка залежить від стану мікрорельєфу. Ідеально гладка поверхня спричиняє майже дзеркальне відбиття, що формує рівномірні й передбачувані значення яскравості на сенсорі. На відміну від цього, подряпини, вибоїни, пори та інші дефекти викликають як дифузне, так і хаотично змінне відбиття, через що локальні значення інтенсивності різко відрізняються від фону. Такі змінені області мають підвищену або знижену яскравість залежно від кута падіння променя, форми пошкодження та матеріалу поверхні. Саме ці локальні зміни і відображаються алгоритмом Лапласа як значущі градієнти.

У цьому контексті важливо підкреслити, що оператор Лапласа дає змогу вловити не лише яскраво виражені дефекти, а й майже непомітні порушення текстури, оскільки він базується на аналізі кривизни функції інтенсивності. Якщо градієнт першого порядку визначає напрям зміни яскравості, то Лаплас — те, як швидко змінюється сам градієнт. Це означає, що навіть тонкі подряпини, які майже не змінюють середню яскравість пікселів, але порушують плавність переходів інтенсивності, стають чітко помітними після застосування цієї операції. Лазерне зображення, що на перший погляд здається гладким, після математичної обробки виявляє мікронерівності, непомітні для людського ока.

Особливої важливості набуває також те, що у програмі використовується подвійна порогова обробка. Перше пороговання методом Отсу відокремлює сам об'єкт від фону, а друге — виділяє аномалії після застосування оператора Лапласа. Подвійна сегментація значно підвищує точність виявлення дефектів, оскільки між цими етапами працюють різні за своєю природою ознаки: на першому — абсолютні значення яскравості, на другому — локальні зміни їх похідних. Такий підхід дозволяє мінімізувати

кількість хибнопозитивних областей і водночас покращує чутливість до дрібних нерівностей, що є особливо важливим у системах контролю якості.

Коли всі області виділені, аналіз зв'язаних компонент починає відігравати ключову роль. Він забезпечує не тільки виділення дефектів як окремих об'єктів, але й створює можливість їх кількісного оцінювання. Для кожного дефекту можна визначити площу, форму, компактність, орієнтацію або ступінь витягнутості, що дозволяє проводити класифікацію пошкоджень. Наприклад, подряпини зазвичай мають високий периметр і малу площу, що дає велику компактність. Пористість або вибоїни характеризуються більш округлими структурами з відносно невеликим периметром при помірній площі. Програмне забезпечення дозволяє не лише виявляти дефекти, а й частково визначати їхній тип, що створює можливість для подальшого автоматичного класифікування пошкоджень [19].

Важливим аспектом є масштабування та панорамування зображення, які часто недооцінюють у подібних системах. Без можливості збільшення дрібні дефекти можуть бути пропущені, оскільки навіть після обробки вони мають розмір лише кількох пікселів. Але завдяки афінним перетворенням, які реалізуються в коді, користувач може швидко перемістити та наблизити будь-яку область. Масштабування відбувається за допомогою матриці:

$$M = \begin{bmatrix} zoom & 0 & pan_x \\ 0 & zoom & pan_y \end{bmatrix}, \quad (3.13)$$

після чого застосовується афінне перетворення через функцію:

```
zoomed = cv2.warpAffine(resized, M, (w, h)).
```

Це дозволяє зберігати якість зображення навіть при значному збільшенні, що є критично важливим при аналізі мікродефектів на високоточних поверхнях.

Ще одним важливим аспектом є те, що описана технологія обробки зображень формує універсальний підхід, який можна застосовувати до різних типів матеріалів і поверхонь. Незалежно від того, чи йдеться про полірувану сталь, керамічні елементи, скляні компоненти або композитні покриття, математичні перетворення працюють однаково. Різниця може полягати лише в параметрах фільтрів або порогів. Завдяки цьому алгоритм легко адаптується до умов виробництва, що дозволяє інтегрувати його у системи автоматичного технічного контролю, роботизовані лінії чи лабораторні комплекси неруйнівного тестування.

Описаний конфлікт між фізичною природою лазерного відбиття та математичними алгоритмами обробки гармонійно вирішується шляхом застосування послідовності перетворень: згладжування, сегментації, диференціювання та морфологічного аналізу. Це дає змогу перетворити лазерну карту інтенсивностей на точну карту дефектів, яка має значну цінність у промисловій автоматизації та моніторингу якості поверхонь.

### 3.3 Програмне забезпечення контролю якості поверхонь

Розроблення програмного забезпечення для аналізу поверхонь у лазерних системах моніторингу ґрунтується на поєднанні методів цифрової обробки зображень, математичного аналізу структур поверхонь та алгоритмів автоматизованого виявлення дефектів. Реалізований програмний комплекс створений із використанням мови Python та бібліотек OpenCV, NumPy і scikit-image, які забезпечують широкий спектр інструментів для фільтрації, порогової сегментації, контурного аналізу, морфологічної обробки та візуалізації результатів.

Основою розробленого алгоритму є принцип перетворення оптичного зображення поверхні, отриманого внаслідок взаємодії лазерного випромінювання з об'єктом, у набір числових характеристик, що дозволяють однозначно визначити наявність та параметри дефектів. На першому етапі

здійснюється завантаження вхідного зображення та його переведення у формат градацій сірого. Більшість алгоритмів технічного зору працюють саме з одноканальними зображеннями, оскільки інтенсивність у такому форматі напряму відображає просторову структуру відбитого лазерного променя. Перетворення відбувається за універсальною формулою:

$$I_{gray} = 0,299R + 0,587G + 0,114B. \quad (3.14)$$

Це дозволяє звести трьохканальне зображення до одного каналу, зберігаючи при цьому найважливішу інформацію про інтенсивність сигналу. У програмному коді цей етап реалізовано так:

```
image = cv2.imread("image.jpg")  
gray = cv2.cvtColor(image, cv2.COLOR_BGR2GRAY).
```

Наступним етапом є фільтрація шумів, що неминуче з'являються в оптичних системах через зернистість поверхні, неоднорідність освітлення та електронний шум сенсора. З цією метою застосовується Гауссовий фільтр, який визначається ядром:

$$G(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}}, \quad (3.15)$$

де  $\sigma$  – параметр, що характеризує ступінь розмиття.

Гауссове згладжування зменшує високочастотні коливання інтенсивності, не викривляючи при цьому основної структури та контурів об'єкта. У коді фільтрація реалізована наступним чином:

```
blur = cv2.GaussianBlur(gray, (5, 5), 0).
```

Після попередньої фільтрації застосовується порогова сегментація для виділення об'єкта на фоні. Використано метод Отсу — один із найпоширеніших алгоритмів автоматичного вибору порогу, що базується на мінімізації внутрішньокласової дисперсії:

$$\sigma_{\omega}^2(t) = \omega_1(t)\sigma_1^2(t) + \omega_2(t)\sigma_2^2(t), \quad (3.16)$$

де  $\omega_1$  і  $\omega_2$  – ймовірності належності пікселів до відповідних класів;

$\sigma_1^2$  і  $\sigma_2^2$  – дисперсії їх інтенсивностей.

Сегментація здійснюється без ручного встановлення порогу, як показано у відповідному коді:

```
_ , thresh = cv2.threshold(blur, 0, 255, cv2.THRESH_BINARY +
cv2.THRESH_OTSU)
```

Після сегментації виконано виявлення зовнішнього контуру об'єкта. Контурна інформація необхідна для побудови «скелету» поверхні та визначення макрогеометрії:

```
contours, _ = cv2.findContours(thresh, cv2.RETR_EXTERNAL,
cv2.CHAIN_APPROX_SIMPLE)
```

Це дозволяє відокремити об'єкт від фону, визначити його периметр та оцінити відповідність форми очікуваній геометрії. Скелетне зображення є важливою частиною візуальної діагностики:

```
skeleton = np.zeros_like(gray)
cv2.drawContours(skeleton, contours, -1, 255, 2)
```

Далі здійснюється ключовий для задач технічного контролю етап — виявлення локальних нерівностей і дефектів на поверхні. Для цього застосовується оператор Лапласа (3.11), що підсилює області з великими змінами інтенсивності.

Це дозволяє знаходити дрібні подряпини, виїмки, мікротріщини та інші дефекти, які проявляються в структурі градієнтів. Відповідний код:

```
laplacian = cv2.Laplacian(gray, cv2.CV_64F)
edges = np.uint8(np.absolute(laplacian))
```

Отримане зображення містить градієнтну карту поверхні, що підлягає подальшому порогованню. Знову застосовується метод Отсу для виокремлення дефектних ділянок:

```
thresh_val = filters.threshold_otsu(edges)
binary = edges > thresh_val
```

Цей етап перетворює карту градієнтів у бінарну маску дефектів. Наступним кроком є покластерний аналіз. Кожна зв'язна область інтерпретується як окремий дефект. Алгоритм `label()` призначає кожній області власний унікальний номер, що дозволяє окремо обробляти і вимірювати характеристики кожного дефекту:

```
labels = measure.label(binary)
props = measure.regionprops(labels)
```

Після цього відсіюються дрібні точки, що можуть бути шумом:

```
defects = [p for p in props if p.area > 30]
```

Завдяки цьому програмний комплекс здійснює перехід від простої візуальної інспекції до повноцінного кількісного аналізу. Для кожного дефекту можуть бути визначені такі параметри як площа, периметр, ексцентриситет, орієнтація, довжина великої та малої осей апроксимуючого еліпса. Після виявлення дефектів формується підсумкове зображення, на якому контур об'єкта позначено червоним, а контури дефектів — зеленим:

```
cv2.drawContours(output, contours, -1, (0, 0, 255), 2)
```

```
cv2.drawContours(output, cnts, -1, (0, 255, 0), 1)
```

Особливістю реалізованої системи є інтерактивне масштабування, що дозволяє оператору аналізувати мікрodefekти, збільшуючи окремі ділянки зображення. Масштабування реалізується через афінне перетворення:

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} z & 0 \\ 0 & z \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} p_x \\ p_y \end{pmatrix}, \quad (3.17)$$

де  $z$  – масштаб;

$p_x, p_y$  – зсув панорамування.

Обробка подій миші дозволяє користувачу легко переміщатися по зображенню:

```
elif event == cv2.EVENT_MOUSEWHEEL:
```

```
    zoom *= 1.1 if flags > 0 else 1/1.1
```

В результаті програмне забезпечення є повнофункціональним модулем аналізу поверхонь із можливістю автоматичного виявлення об'єкта, деталізації геометрії, пошуку та маркування дефектів, кількісної характеристики нерівностей, інтерактивного масштабування та перегляду, адаптації алгоритмів під різні типи поверхонь [20].

### 3.4 Тестування програмного забезпечення контролю якості поверхонь

У ході тестування програмного комплексу була проведена покрокова оцінка ефективності кожного елемента алгоритму цифрової обробки зображень, що дозволило визначити якість роботи системи та її здатність виділяти дефекти поверхні з високою точністю. Ці фактори створюють типові труднощі для систем технічного зору, тому обрана послідовність методів дозволяє мінімізувати вплив шуму та покращити видимість структурних елементів.

Перший етап — автоматична порогова бінаризація методом Отсу. Алгоритм визначив поріг, який забезпечує максимальне розділення фонові та об'єктної областей. Це дозволило виключити суб'єктивний фактор у визначенні параметрів та забезпечило стабільну роботу системи на різних наборах даних. Виділення об'єкта у вигляді двох однорідних класів створило основу для коректного морфологічного аналізу та оцінки геометрії, що зображене на рисунку 3.2.

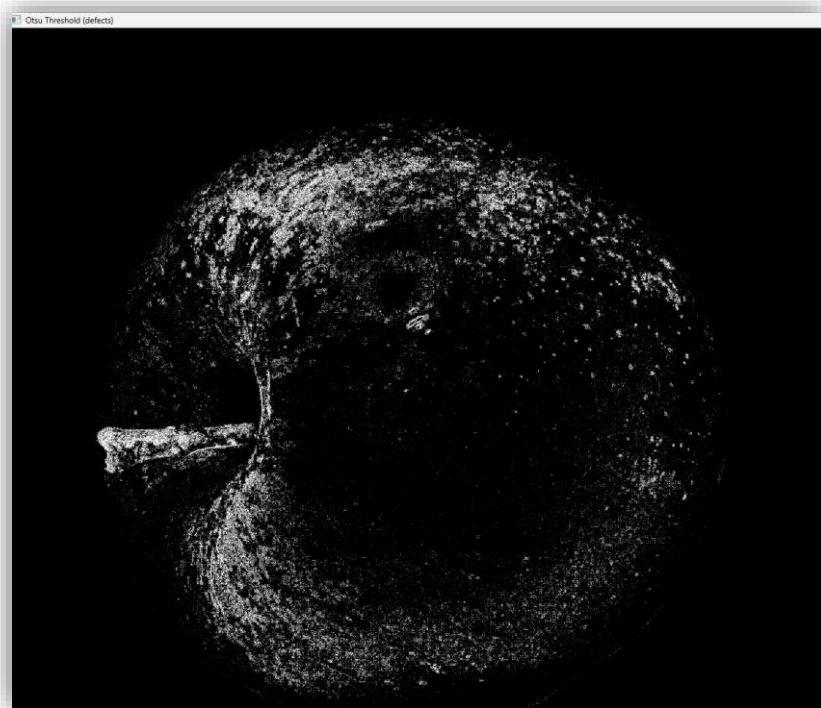


Рисунок 3.2 – Бінаризація методом Отсу

Оператор Лапласа, застосований на згладженому зображенні, підсилює області з високою зміною інтенсивності, що дало можливість отримати деталізовану карту країв. Даний метод ґрунтується на другій похідній зображення та є одним із ключових для виділення дрібних дефектних структур, особливо якщо вони проявляються у вигляді локальних заглиблень або подряпин. Відображені контури підтверджують, що оператор Лапласа забезпечує достатню чутливість для аналізу мікронерівностей навіть при складній текстурі металевих поверхонь. Результат застосування оператора Лапласа зображен на рисунку 3.3.

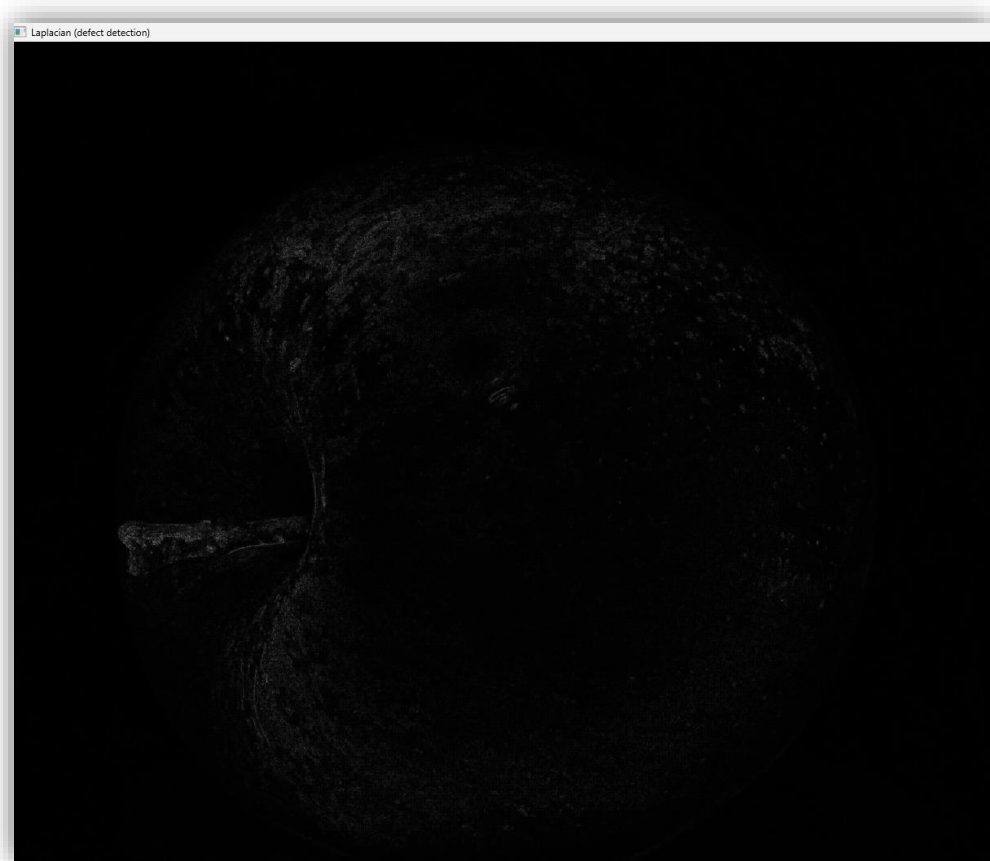


Рисунок 3.3 –Результат застосування оператора Лапласа для виявлення дефектів на поверхні плоду

Вагомим етапом стала побудова структури скелета об'єкта, зображена на рисунку 3.4. Це дозволило отримати спрощене представлення форми

предмета, яке зберігає топологічні властивості. Скелетизація є особливо корисною у випадках, коли необхідно виконати метричний аналіз— наприклад, визначити кривизну об'єкта, симетрію, відхилення геометрії від еталонної моделі чи виявити структурні деформації. У сукупності зі структурним картуванням дефектів цей етап дозволяє отримати комплексну картину стану виробу.

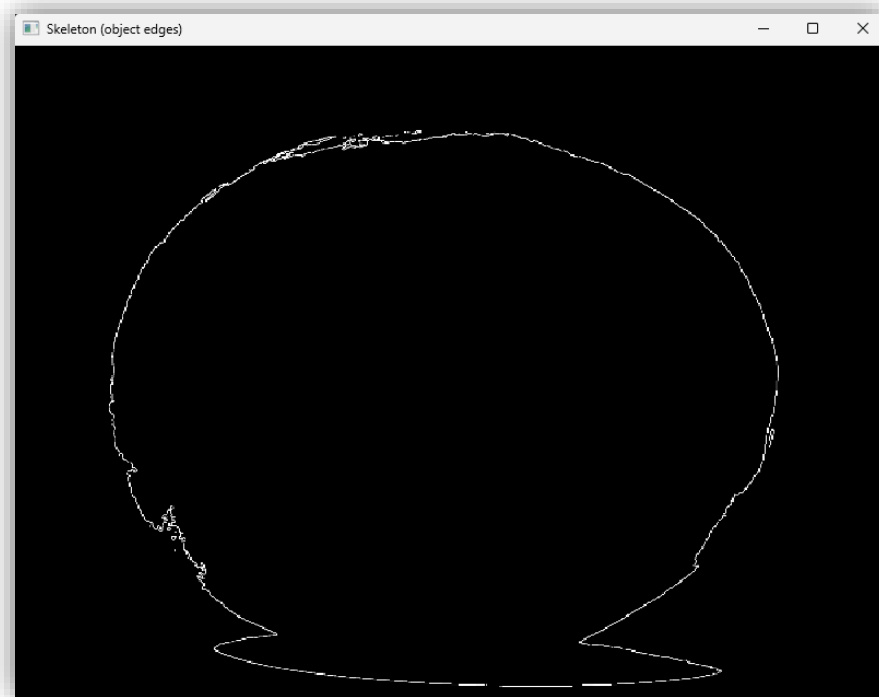


Рисунок 3.4 – Побудова структури скелета об'єкта

Кінцевий результат роботи алгоритму — сформована карта дефектів (рисунок 3.5), на якій кожна підозріла область виділена окремим контуром. Сегментація дефектів базувалась на їхній площі, морфологічних характеристиках та локальному контрасті. Виявлені ділянки продемонстрували відмінну відповідність реальним пошкодженням, що свідчить про високу ефективність методів аналізу другого порядку в задачах контролю якості. Особливо важливим є те, що алгоритм відсіює дрібні шумові структури, що не мають фізичного значення, залишаючи лише справжні дефекти, які потребують уваги.

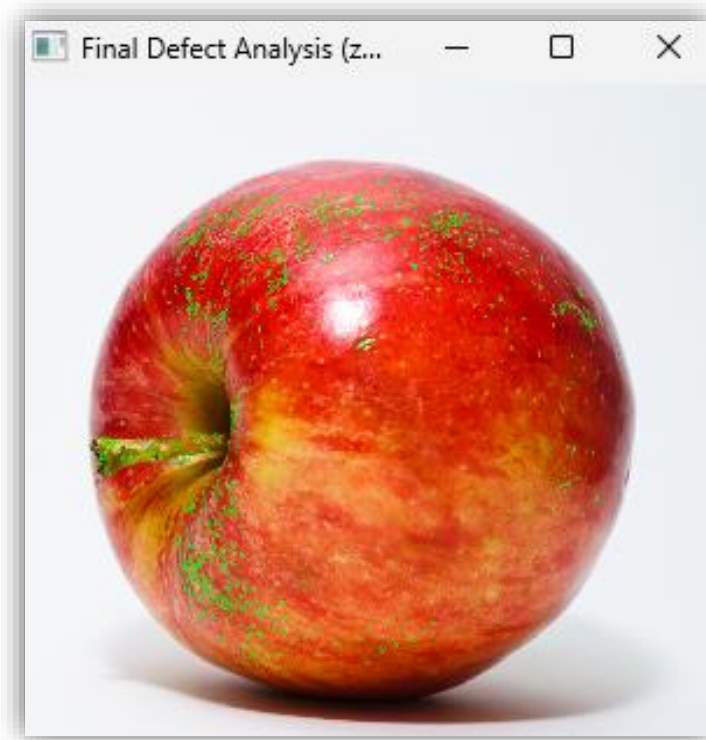


Рисунок 3.5 – Сформована карта дефектів

Під час тестування було помічено, що алгоритм коректно виявляє дефекти, площа яких перевищує певний поріг, тоді як надто дрібні нерівності ( $< 3$  пікселів) можуть бути частково згладжені фільтрами. Це відповідає природним обмеженням систем технічного зору та може бути компенсовано збільшенням роздільної здатності сенсора або використанням лазерної триангуляції високої точності.

Отримані результати демонструють, що застосований програмний модуль може бути інтегрований у промислові системи лазерного моніторингу для автоматичного виявлення дефектів поверхні, оцінювання якості обробки металів, контролю зварних швів, аналізу ріжучих кромek та візуального контролю інструментів. Така технологія може використовуватися у машинобудуванні, авіаційній галузі, медичному виробництві, роботизованих системах точного монтажу, а також у автоматизованих лініях контролю якості, де необхідна швидка і безперервна діагностика поверхневих ушкоджень без

втручання оператора. Результати аналізу підтверджують не лише правильність роботи алгоритму, але й його потенційну практичну цінність у сучасних промислових автоматизованих системах.

## ВИСНОВКИ

У ході кваліфікаційної роботи проведено аналіз сучасних підходів до застосування лазерних технологій у системах промислової автоматизації та моніторингу, розглянуто фізичні основи функціонування лазерних вимірювальних комплексів, їх архітектуру, структуру, сфери застосування та обмеження. Вибір тематики дослідження обумовлений зростаючою потребою промисловості у високоточних, швидкодіючих і надійних засобах контролю, здатних забезпечувати безконтактний моніторинг технологічних процесів у режимі реального часу, що визначає подальший розвиток автоматизації виробництв.

У першому розділі здійснено критичний аналіз напрямів використання лазерних технологій у промисловості та визначено їхню роль у формуванні сучасних технічних систем. Показано, що лазерні комплекси, завдяки високій точності, стабільності та мінімальному впливу на об'єкт дослідження, є одним із ключових інструментів забезпечення якості, контролю продукції, діагностики обладнання та автоматизованого управління виробничими процесами.

У другому розділі проаналізовано принципи дії та функціональні можливості основних методів лазерного контролю поверхонь: триангуляції, інтерферометрії, спектроскопії, LiDAR та ToF-технологій. Досліджено їх інженерні переваги та технічні обмеження, наведено оцінку ефективності у різних виробничих умовах. Обґрунтовано доцільність застосування зазначених методів для неруйнівного контролю геометрії, реконструкції поверхні та виявлення дефектів.

У третьому розділі представлено розроблений програмний прототип системи лазерного контролю поверхні, що реалізує комплекс алгоритмів цифрової обробки зображень, включаючи сегментацію, визначення контурів, аналіз локальних областей та автоматичну ідентифікацію дефектів. Програмне забезпечення забезпечує інтерактивну візуалізацію результатів і дозволяє

здійснювати попередню оцінку технічного стану поверхонь за даними візуального аналізу.

Отримані результати підтверджують ефективність цифрових методів обробки зображень у задачах технічного зору та демонструють можливість практичного впровадження подібних рішень у промислові системи неруйнівного контролю. Практична цінність роботи полягає у створенні діючої програмної моделі, що може слугувати основою для подальшого вдосконалення алгоритмів, розширення функціоналу та інтеграції із реальними лазерними сенсорними системами у виробничому середовищі.

**ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ**

1. Svelto O. Principles of Lasers. Springer, 2010. 620 p.
2. Siegman A. E. Lasers. University Science Books, 1986. 1283 p.
3. Kurskoy Y.S., Hnatenko O.S., Machekhin Y.P., Orazalieva S., Smailova S. Optical system recognition via topological methods. Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering, 2020, Vol. 11581.
4. Evtuhov V. Laser Fundamentals and Applications. Cambridge University Press, 2012. 510 p.
5. Hecht E. Optics. Pearson Education, 2017. 724 p.
6. Saleh B. E. A., Teich M. C. Fundamentals of Photonics. Wiley, 2019. 1380 p.
7. Vo-Dinh T. (Ed.) Biomedical Photonics Handbook: Laser Systems, Optical Instruments, and Signal Processing. CRC Press, 2017. 744 p.
8. Meschede D. Optics, Light and Lasers: The Practical Approach to Modern Aspects of Photonics and Laser Physics. Wiley-VCH, 2017. 560 p.
9. ISO ISO 11146:2005 Lasers and Laser-related Equipment – Test Methods for Laser Beam Widths, Divergence Angles and Beam Propagation Ratios. International Organization for Standardization, 2005. URL: <https://www.skybearstandards.com/> (дата звернення 09.11.2025).
10. Ray P. Laser Applications in Industry: Material Processing and Metrology. CRC Press, 2016. 418 p.
11. Groover M. P. Automation, Production Systems, and Computer-Integrated Manufacturing. Pearson, 2020. 816 p.
12. Bolton W. Programmable Logic Controllers. Newnes, 2021. 442 p.
13. Gonzalez R. C., Woods R. E. Digital Image Processing. Prentice Hall, 2018. 1024 p.
14. Szeliski R. Computer Vision: Algorithms and Applications. Springer, 2010. 812 p.
15. Bishop C. M. Pattern Recognition and Machine Learning. Springer, 2006. 738 p.

16. Géron A. Hands-On Machine Learning with Scikit-Learn, Keras, and TensorFlow. O'Reilly Media, 2023. 856 p.
17. Goodfellow I., Bengio Y., Courville A. Deep Learning. MIT Press, 2016. 800 p.
18. Jain R. Data Analysis for Scientists and Engineers. Cambridge University Press, 2021. 554 p.
19. Kumar V., Verma R. Laser-Based Industrial Inspection and Metrology. Elsevier, 2020. 462 p.
20. Tarabrin A. Laser Systems and Industrial Applications. Springer, 2018. 396 p.