

Вінницький національний технічний університет
Факультет інформаційних електронних систем
Кафедра біомедичної інженерії та оптико-електронних систем

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему:

«Система лазерної відеополяриметрії оптично анізотропних зразків»

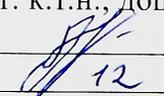
Виконав: студент групи ЛТО-24м
спеціальності 175 – Інформаційно-вимірювальні
технології
освітня програма «Лазерна техніка та
оптоінформатика»


_____ Поуданс В.Є

Керівник: к.т.н., доц. каф. БМІОЕС
_____ Тужанський С.Є.

«01»  12 _____ 2025 р.

Опонент: к.т.н., доц. каф. ІРТС
_____ Притула М.О.

«01»  12 _____ 2025 р.

Допущено до захисту

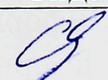
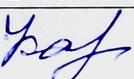
 Завідувач кафедри БМІОЕС

к.т.н., доц. Коваль Л.Г.

(прізвище та ініціали)

«01»  12 _____ 2025 р.

6. Консультанти розділів роботи

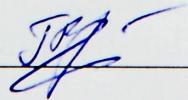
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
1-3	Тужанський С.Є., к.т.н., доцент каф. БМІОЕС	 24.09.2025	 05.12.2025
4	Кавецький В.В, к.е.н., доц. каф. ЕПВМ	 01.11.2025	 01.12.2025

7. Дата видачі завдання «24» вересня 2025 р.

8. КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

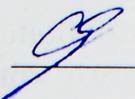
№ з/п	Назва етапів магістерської кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Розробка ТЗ. Аналіз сучасних методів і засобів поляриметричного контролю оптичних зразків, класифікація методів оптичної поляриметрії	25.09.2025- 05.10.2025	
2	Моделювання оптичних схем та удосконалення методу лазерного поляриметричного контролю оптичних зразків	06.10.2025- 01.11.2025	
3	Обґрунтування елементної бази, розрахунок та проектування електричних та оптичних схем. Розробка комп'ютерної програми обробки поляриметричних зображень.	02.11.2025- 05.12.2025	
4	Економічна частина	01.11.2025- 01.12.2025	

Студент



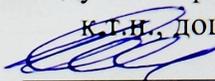
В.Є. Поуданен

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи



С.Є. Тужанський

Вінницький національний технічний університет
Факультет інформаційних електронних систем
Кафедра біомедичної інженерії та оптико-електронних систем
Рівень вищої освіти II-й (магістерський)
Галузь знань 17 Автоматизація та приладобудування
Спеціальність 175 «Інформаційно-вимірювальні технології»
Освітня програма «Лазерна техніка та оптоінформатика»

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри БМІОЕС
к.т.н., доц. Коваль Л.Г.

« 24 » 09 2025 р.

ЗАВДАННЯ НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Поуданену Владиславу Євгеновичу

1. Тема роботи: Система лазерної відеополяриметрії оптично анізотропних зразків

Керівник роботи Тужанський Станіслав Євгенович, к.т.н., доцент каф. БМІОЕС, затверджені наказом ВНТУ від 24.09.2025 р., №313

2. Строк подання студентом магістерської дипломної роботи: 05.12.2025 р.

3. Вихідні дані до роботи:

Функціональне призначення системи – відеополяриметричний контроль координатних розподілів структурних недосконалостей оптично анізотропних зразків; склад системи: випромінювальний блок – лазерний діодний модуль (довжина хвилі 650 нм, оптична потужність 50 мВт), модулятор поляризації; оптична система – поляризатор, коліматор, фазова пластина; блок вимірювання і контролю – CCD-камера, мікроконтролер, комп'ютер.

4. Зміст текстової частини: вступ, аналіз сучасних методів і класифікація засобів контролю оптичних зразків, удосконалення методу методу візуального контролю структурних недосконалостей оптично анізотропних зразків, розробка структурної схеми системи, розробка комп'ютерної програми оброблення поляризаційних зображень; економічні розрахунки; висновки.

5. Перелік ілюстративного матеріалу: узагальнена структурна схема лазерної відеополяриметричної системи (Е1); структурна оптична схема системи (Л1); електрична функціональна схема драйвера лазера (Е1); блок-схема методу відеополяриметричного контролю зразків (Е1); структурна електрична схема блоку керування (Е1); функціональна електрична схема фотоприймального блоку (Е1)

АНОТАЦІЯ

УДК 681.7

Поуданєн В.Є: Система лазерної відеополяриметрії оптично анізотропних зразків

Магістерська кваліфікаційна робота зі спеціальності 175 Інформаційно-вимірювальні технології, освітня програма – Лазерна техніка та оптоінформатика. Вінниця: ВНТУ, 2025. 118 с.

На укр. мові. Бібліогр.: 31 назв; рис.: 17; табл. 13.

В магістерській кваліфікаційній роботі проведено проєктування лазерної відеополяриметричної системи для контролю структурних неоднорідностей оптично анізотропних зразків і матеріалів. Здійснено аналіз та класифікацію методів лазерної поляриметрії оптично активних зразків. Удосконалено метод візуального поляриметричного контролю структурних недосконалостей оптичних зразків. Розроблено структурні, електричні та оптичні схеми системи та її складових. Здійснено розрахунок випромінювача, фотоприймача та розроблено комп'ютерну програму для обробки поляриметричних зображень.

Ключові слова: лазер, відеополяриметрія, оптична анізотропія, обробка зображень.

ABSTRACT

Poudanen V.E. Laser imaging polarimetric system for optically anisotropic samples. Master's thesis in specialty 175 Information and measurement technology. Educational program - Laser technology and optoinformatics. Vinnitsya: VNTU, 2025. 118p.

In Ukrainian language. Bibliographer: 31 titles; fig.: 17; tabl. 13.

In the master's qualification work, a laser video polarimetric system was designed to control structural inhomogeneities of optically anisotropic samples and materials. An analysis and classification of laser polarimetry methods for optically active samples was carried out. The method of visual polarimetric control of structural imperfections of optical samples was improved. Structural, electrical and optical diagram of the system and its components were developed. The calculation of the emitter, photodetector was carried out and a computer program for processing polarimetric images was developed.

Keywords: laser, imaging polarimetry, optical anisotropy, image processing.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
1 СИСТЕМИ ЛАЗЕРНОЇ ВІДЕОПОЛЯРИМЕТРІЇ: АНАЛІЗ МЕТОДІВ ТА АРХІТЕКТУРИ	12
1.1 Принципи лазерної відеополяриметрії та опис оптично-анізотропних зразків	12
1.2 Архітектура сучасних систем лазерної відеополяриметрії	13
1.3 Алгоритми обробки поляризаційних зображень та аналізу даних.....	16
1.4 Аналіз методів та апаратних засобів для систем лазерної відеополяриметрії.....	18
1.5 Висновки до розділу 1	24
2 МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ФОРМУВАННЯ ПОЛЯРИМЕТРИЧНИХ ЗОБРАЖЕНЬ АНІЗОТРОПНИХ ЗРАЗКІВ У ЛАЗЕРНОМУ ВІДЕОПОЛЯРИМЕТРІ.....	25
2.1 Принцип формування поляриметричних зображень у лазерному відеополяриметрії.....	26
2.2 Отримання вхідних зображень компонент вектора Стокса.....	29
2.3 Обчислення вектора Стокса та поляризаційних параметрів.....	30
2.4 Структурно-статистичний аналіз поляризаційних карт.....	35
2.5 Блок контролю браку оптично активних кристалів у системі відео-Стокс поляриметрії.....	39
2.6 Висновки до розділу 2.....	42
3 СИНТЕЗ АПАРАТНОЇ ЧАСТИНИ ТА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ.....	44
3.1 Елементна база системи відео-Стокс поляриметрії для неруйнівного контролю оптично активних кристалів.....	44
3.2 Формування поляризаційних карт.....	54
3.3 Критерії виявлення браку та дефектів кристалів.....	56
3.4 Принцип роботи програмного забезпечення для неруйнівного контролю анізотропних зразків.....	57

3.4.1 Відновлення вектора Стокса та поляризаційних параметрів	57
3.4.2 Структурно-статистичний аналіз поляризаційних карт.....	61
3.4.3 Автоматизований блок контролю якості (норма / брак).....	62
3.5 Розробка блока керування відеополяриметра	66
3.6 Висновки до розділу 3.....	67
4 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА	69
4.1 Проведення комерційного та технологічного аудиту науково-технічної розробки.....	69
4.2 Розрахунок узагальненого коефіцієнта якості розробки.....	70
4.3 Розрахунок витрат на проведення науково-дослідної роботи	72
4.3.1 Витрати на оплату праці.....	72
4.3.2 Відрахування на соціальні заходи.....	75
4.3.3 Сировина та матеріали.....	75
4.3.4 Розрахунок витрат на комплектуючі.....	76
4.3.5 Спецустаткування для наукових (експериментальних) робіт.....	78
4.3.6 Програмне забезпечення для наукових (експериментальних) робіт.....	78
4.3.7 Амортизація обладнання, програмних засобів та приміщень.....	79
4.3.8 Паливо та енергія для науково-виробничих цілей.....	80
4.3.9 Службові відрядження.....	82
4.3.10 Витрати на роботи, які виконують сторонні підприємства.....	82
4.3.11 Інші витрати.....	82
4.3.12 Накладні (загальновиробничі) витрати.....	82
4.4 Розрахунок економічної ефективності науково-технічної розробки при її можливій комерціалізації потенційним інвестором.....	83
4.5 Висновки до розділу 4.....	88
ВИСНОВКИ.....	89
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	91
ДОДАТКИ.....	95
Додаток А Протокол перевірки кваліфікаційної роботи на наявність текстових запозичень (обов'язковий).....	95

Додаток Б Система лазерної відеополариметрії оптично анізотропних матеріалів. Графічна частина (обов'язковий)	100
Додаток В Ілюстративна частина.....	101
Додаток В1 Структурна схема поляриметра.....	102
Додаток В2 Блок схема автоматизованого контролю якості оптичних кристалів.....	103
Додаток В3 Оптична схема поляриметра.....	104
Додаток В4 Блок-схема мікроконтролерного блока керування кроковими двигунами поляриметра.....	105
Додаток Г Лістинг програми.....	106

ВСТУП

Актуальність теми. Сучасне матеріалознавство та оптична інженерія все частіше звертаються до оптичних методів неруйнівного контролю та візуального аналізу структури різноманітних об'єктів і зразків. Серед таких методів провідне місце посідає оптична поляриметрия, зокрема напрям лазерної відеополяриметрії (зображувальної поляриметрії). Даний метод ґрунтується на реєстрації змін стану поляризації когерентного світлового випромінювання після його взаємодії з досліджуваним зразком, що дозволяє візуалізувати та кількісно оцінювати двовимірні координатні розподіли параметрів оптично-анізотропних середовищ, таких як двоприменезаломлення, дихроїзм, деполаризація та оптична активність [1, 6, 9].

Лазерна відеополяриметрия відкриває широкі можливості для об'єктивної неруйвної діагностики оптично анізотропних матеріалів, а також для візуального контролю об'єктів і поверхонь у біомедичних, матеріалознавчих та технологічних застосуваннях. Просторово-розподілений характер поляризаційної інформації дозволяє виявляти структурні неоднорідності, внутрішні напруження, доменні межі та дефекти, які є малочутливими або недоступними для класичних інтенсивнісних методів контролю [7, 11, 13].

Відповідно до досліджень, представлених у роботах науковців Вінницького національного технічного університету, зокрема Тужанського С. С. [1, 16], Заболотної Н. І. [3–5, 8, 14], Павлова С. В. [4, 10], а також у працях представників Чернівецької наукової школи лазерної поляриметрії — Ушенка О. Г., Дуболазова О. В., Сахновського М. Ю. [6, 7, 9, 13], показано, що створення ефективних систем лазерної відеополяриметрії потребує комплексного підходу, який поєднує сучасну оптико-електронну елементну базу, математичні моделі опису оптичної анізотропії та алгоритми цифрової обробки поляриметричних зображень.

У роботі [1] системно викладено теоретичні основи та практичні аспекти побудови систем лазерної відеополяриметрії для автоматизованого контролю

параметрів неоднорідних біологічних середовищ. Дослідження [3–5, 10] присвячені вдосконаленню архітектури та алгоритмів аналізу поляризаційних зображень і розробці спеціалізованих поляриметричних систем для медичної діагностики. Роботи [6, 7, 17] розширюють методичні можливості лазерної поляриметрії за рахунок застосування просторово-частотної фільтрації, кореляційного та фрактального аналізу поляриметричних карт.

Останнім часом значний розвиток отримали цифрові системи повного Стокса та мюллер-матричні камери, які забезпечують відновлення повного вектора Стокса або матриці Мюллера у реальному часі [20, 21]. Поєднання таких сенсорів із методами цифрової обробки зображень суттєво розширює функціональні можливості відеополяриметричних систем, однак потребує адаптації класичних алгоритмів аналізу до умов багатоканальної реєстрації та автоматизованого контролю [21, 24, 29].

Незважаючи на значні наукові напрацювання, актуальними залишаються задачі підвищення точності відновлення поляризаційних параметрів оптично анізотропних зразків, формування їх координатних розподілів та розробки універсальних алгоритмів автоматизованого контролю якості на основі аналізу поляриметричних зображень. Багато сучасних засобів лазерної відеополяриметрії потребують складних програмних алгоритмів обробки та калібрування, а можливості інтеграції таких систем у єдині автоматизовані комплекси використовуються не в повній мірі [4, 8].

Таким чином, розробка та удосконалення методів і засобів лазерної відеополяриметрії з автоматизованим контролем координатних розподілів поляризаційних характеристик оптично анізотропних зразків є актуальною задачею сучасної інформаційно-вимірювальної техніки та оптичної інженерії.

Метою магістерської кваліфікаційної роботи є розширення функціональних можливостей комп'ютеризованої системи лазерної відеополяриметрії для контролю координатних розподілів поляризаційних характеристик оптично анізотропних матеріалів і зразків за рахунок його доповнення універсальними методами обробки зображень.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі **завдання**:
проаналізувати методи і засоби лазерної поляриметрії та математичні моделі, що використовуються для опису оптично-анізотропних зразків.

досконалити метод поляриметричного контролю недосконалостей оптичних зразків, який базується на аналізі координатних розподілів параметрів анізотропії оптичних матеріалів і зразків з використанням статистичного аналізу відповідних зображень.

обґрунтувати вибір елементної бази випромінювального і приймального блоків відеополяриметричної системи.

систематизувати та реалізувати алгоритми обробки поляризаційних зображень та аналізу даних,.

дійснити синтез функціональних модулів системи лазерної відеополяриметрії оптично анізотропних зразків.

розробити комп'ютерну програму для відновлення та формування координатних розподілів параметрів анізотропії оптичних зразків.

виконати економічне обґрунтування та розрахувати техніко-економічні показники розробки.

Об'єкт дослідження: процеси візуалізації та поляриметричного аналізу оптично анізотропних зразків.

Предмет дослідження: методи, елементи та алгоритми обробки зображень для системи лазерної відеополяриметрії оптичних зразків

Методи дослідження. У процесі виконання роботи застосовано теорії:

п

р **Наукова новизна:** Подальшого розвитку отримав метод лазерного поляриметричного контролю плоских оптичних зразків, в якому на відміну від існуючих використовується відеоконтроль координатних розподілів параметрів анізотропії усієї робочої поверхні зразка, що дозволило розширити функціональні можливості методу.

д **Практична значимість** одержаних результатів полягає в тому, що на основі отриманих теоретичних результатів:

о

ї

Обґрунтовано вибір елементної бази та синтезовано функціональну схему системи лазерного відеополяриметричного контролю структурних недосконалостей плоских оптично анізотропних зразків, схеми функціональних блоків, що враховують особливості контролю;

Розроблено комп'ютерну програму для відновлення та формування координатних розподілів параметрів анізотропії оптичних зразків відеополяриметра.

Апробація. Результати досліджень обговорювались Науково-технічній конференції X Сучасні проблеми інфокомунікацій, радіоелектроніки та наносистем (СПРН-2025) (ВНТУ, м.Вінниця, 05.11.2025 – 07.11.2025).

СИСТЕМИ ЛАЗЕРНОЇ ВІДЕОПОЛЯРИМЕТРІЇ: АНАЛІЗ МЕТОДІВ ТА АРХІТЕКТУРИ

1.1 Принципи лазерної відеополяриметрії та опис оптично-анізотропних зразків

Лазерна відеополяриметрія базується на фундаментальних явищах взаємодії поляризованого світла з речовиною. Унікальність методу полягає в поєднанні трьох ключових компонентів: когерентності лазерного випромінювання, аналізу стану поляризації та просторової візуалізації параметрів анізотропії [1, 2].

Когерентне випромінювання лазера, що має певний стан поляризації, опромінює зразок. Елементи внутрішньої структури зразка (фібрили, кристали, мембрани клітин) можуть мати різну оптичну щільність та різну швидкість поширення світла в різних напрямках, що обумовлює оптичну анізотропію. Це призводить до зміни стану поляризації вихідного випромінювання – його азимуту, еліптичності та ступеня поляризації [7, 9, 19].

Для кількісного опису змін поляризації використовується формалізм Стокса–Мюллера. Як підкреслюється в роботах Заболотної Н. І. [3, 5], цей апарат є найбільш універсальним для опису як повністю, так і частково поляризованого світла, а також для аналізу оптично-анізотропних середовищ [9, 13].

Стан поляризації світла описується вектором Стокса S , який складається з чотирьох дійсних параметрів [7, 9]:

$$S = \begin{pmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{pmatrix}, \quad (1.1)$$

Де:

- I – загальна інтенсивність світла;
- Q – різниця інтенсивностей лінійно поляризованих складових з азимутами 0° та 90° ;

- U – різниця інтенсивностей лінійно поляризованих складових з азимутами 45° та 135° ;
- V – різниця інтенсивностей право- та лівоциркулярно поляризованих складових.

Типи оптичної анізотропії. Згідно з класифікацією, поданою в роботах [1, 13, 19], розрізняють такі основні види оптичної анізотропії:

1. Подвійне променезаломлення — різниця показників заломлення для світлових хвиль, поляризованих у взаємно перпендикулярних напрямках. Характеризується фазовим зсувом δ та азимутом швидкої осі θ [7, 13].
2. Дихроїзм — різниця коефіцієнтів поглинання для різних напрямків поляризації [9, 22].
3. Деполяризація — перетворення поляризованого світла в частково або повністю неполяризоване внаслідок багаторазового розсіювання [17, 23].
4. Оптична активність — обертання площини поляризації світла при проходженні через середовище [7, 19].

Для опису оптично тонких анізотропних зразків широко використовується спрощена модель лінійного променезаломлення, яка дозволяє кількісно оцінювати фазовий зсув та орієнтацію оптичних осей [3, 14].

Для більш точного визначення параметрів анізотропії необхідно враховувати спектральні характеристики джерела випромінювання, кут падіння світла, товщину зразка та його просторово-неоднорідну структуру, що детально розглянуто в роботах [6, 7, 15].

1.2. Архітектура сучасних систем лазерної відеополяриметрії

Загальна структура та принцип роботи сучасних систем лазерної відеополяриметрії являють собою складні оптико-електронні комплекси, архітектура

яких оптимізована для точного та швидкого вимірювання матриць Мюллера. Типова система включає наступні основні модулі [1, 2, 3]:

1. Джерело випромінювання — напівпровідниковий лазер зі стабілізованою потужністю та довжиною хвилі (наприклад, 532 нм або 635 нм). Важливими параметрами лазера є монохроматичність та просторова когерентність випромінювання, що забезпечує високу просторову роздільну здатність системи [1, 7, 16].

2. Поляризаційно-формуєчий блок (модулятор) є одним із ключових елементів системи лазерної зображувальної поляриметрії. Його основне завдання полягає у формуванні та керуванні станом поляризації випромінювання, яке подається на досліджуваний зразок. Саме завдяки цьому блоку забезпечується можливість отримання повної інформації про поляризаційні властивості біологічних тканин [3, 5, 8]. Одним із найпоширеніших рішень є електрооптичні модулятори, що працюють на основі ефекту Покельса [5, 10]. Такі модулятори забезпечують високу швидкість перемикання (до 100 кГц), що є критично важливим для дослідження динамічних процесів [7, 12].

3. Система транспортування випромінювання забезпечує стабільну передачу лазерного променя від джерела до зразка без втрати якості та поляризаційних властивостей. До її складу входять оптичні ізолятори, колімаційні системи та просторові фільтри, які покращують якість хвильового фронту та усувають паразитні моди. Сукупність цих елементів забезпечує однорідність, стабільність і високу якість оптичного поля, необхідну для точних поляриметричних вимірювань [6, 7, 15].

4. Предметний столик та система позиціонування забезпечують дослідження локальних ділянок зразка з точністю позиціонування до 1 мкм, що є необхідним для аналізу просторово-неоднорідних біологічних структур [4, 10].

5. Блок аналізу поляризації складається з обертового аналізатора, фазової пластинки типу $\lambda/4$ та поляризаційного роздільника променя, що дозволяє здійснювати повний аналіз стану поляризації вихідного випромінювання [3, 5, 9].

6. Система реєстрації зображень зазвичай реалізується на основі ПЗЗ-камер високої роздільної здатності (до 20 Мпкс) з низьким рівнем шуму, що забезпечує високу чутливість і динамічний діапазон вимірювань [1, 7].

7. Блок управління та обробки даних використовує спеціалізоване програмне забезпечення для синхронізації роботи апаратних модулів та обробки поляриметричних зображень [3, 5, 8].

Класифікація архітектур систем лазерної поляриметрії базується на принципі реєстрації даних та способах керування станами поляризації.

За методом збору інформації системи поділяються на три основні типи [1, 3].

Перший тип — системи з послідовною зміною станів поляризації [1, 3]. Вони забезпечують високу точність вимірювань завдяки стабільному контролю параметрів поляризаційного модулятора, однак характеризуються відносно невисокою швидкістю, оскільки для кожного стану поляризації необхідне окреме зчитування зображення.

Другий тип — системи з одночасною реєстрацією поляризаційних компонент [7, 12]. Вони дозволяють отримувати повну інформацію про стан поляризації світла за один цикл зйомки, що забезпечує високу швидкістю. Основним недоліком таких систем є складність калібрування та синхронізації каналів прийому сигналу.

Третій тип — гібридні системи, які поєднують переваги двох попередніх підходів [5, 10]. Вони забезпечують оптимальний баланс між швидкістю та точністю вимірювань і широко застосовуються у наукових дослідженнях.

Особливе місце серед сучасних архітектур займають поляризаційно-інтерференційні комплекси, що поєднують можливості поляриметрії та інтерферометрії [6, 7, 15]. Такий підхід дозволяє одночасно вимірювати параметри оптичної анізотропії, оптичну товщину зразка та показник заломлення, значно розширюючи діагностичні можливості систем.

Запропоновані архітектури автоматизованих систем моніторингу, призначених для тривалого безперервного спостереження, включають блоки автоматичного фокусування, температурної стабілізації та самокалібрування, що забезпечує стабільність результатів під час довготривалих експериментів [1, 2].

Сучасною тенденцією розвитку є мініатюризація систем із використанням волоконно-оптичних технологій, що дозволяє зменшити габарити комплексів, підвищити їх стійкість до вібрацій та спростити процес юстування [7, 12].

Перспективним напрямом є також застосування адаптивної оптики з використанням мембранних дзеркал для компенсації спотворень хвильового фронту, що виникають унаслідок неоднорідностей біологічних тканин, і підвищення точності фазових вимірювань [12].

Важливим елементом будь-якої поляриметричної системи є метрологічне забезпечення, яке включає блоки калібрування з еталонними поляризаторами та фазовими пластинками типу $\lambda/4$ і $\lambda/2$, а також зразки з відомими параметрами анізотропії [1, 3, 8].

У сучасних дослідженнях все більшого поширення набуває інтеграція лазерної поляриметрії з мікроскопічною технікою. Поєднання відеополяриметричних систем з інвертованими мікроскопами забезпечує можливість дослідження клітинних структур на мікрорівні, що є надзвичайно важливим для біомедичної діагностики та морфологічних досліджень [4, 5].

1.3 Алгоритми обробки поляризаційних зображень та аналізу даних

Сучасні системи лазерної відеополяриметрії використовують багаторівневі алгоритми обробки даних, спрямовані на відновлення та аналіз просторово-розподілених поляризаційних характеристик анізотропних зразків [1, 3, 8]. У випадку оптично активних кристалів ключову роль відіграє Стокс-поляриметричний підхід, який забезпечує кількісний опис стану поляризації лазерного випромінювання після взаємодії із зразком [7, 9, 13].

Загальна структура алгоритмів обробки включає етапи попередньої обробки зображень, відновлення параметрів вектора Стокса та аналіз похідних поляризаційних характеристик [3, 8]. На початковому етапі здійснюється корекція неоднорідності освітлення, зменшення впливу шумів та нормування інтенсивності, що дозволяє підготувати експериментальні дані до подальшого аналізу [1, 24].

Основним інформаційним елементом у таких системах є вектор Стокса, компоненти якого описують повний стан поляризації світла [7, 9]. Для кожного пікселя зображення обчислюються параметри S_0 , S_1 , S_2 , S_3 , що дозволяє сформувати двовимірні карти інтенсивності, лінійної та циркулярної поляризації [9, 13]. Просторові розподіли цих параметрів є чутливими до оптичної анізотропії кристалів, зокрема до подвійного променезаломлення та оптичної активності [7, 19].

На основі параметрів вектора Стокса здійснюється розрахунок похідних поляризаційних характеристик, таких як ступінь лінійної та циркулярної поляризації, азимут і еліптичність поляризації [3, 5, 9]. Для оптично активних кристалів особливий інтерес становлять карти азимуту та еліптичності, оскільки вони відображають просторові зміни орієнтації оптичних осей та фазових зсувів, пов'язаних із внутрішньою структурою матеріалу [13, 14].

Подальший аналіз поляризаційних карт базується на статистичних методах, зокрема обчисленні середніх значень, дисперсій та просторових градієнтів параметрів [17, 22, 23]. Такі характеристики дозволяють кількісно оцінити однорідність кристалічної структури та виявити локальні дефекти або внутрішні напруження [11, 17]. На відміну від візуального контролю, цей підхід забезпечує об'єктивну та відтворювану оцінку якості зразків [1, 29].

Візуалізація результатів здійснюється у вигляді двовимірних поляризаційних карт у градаціях сірого або з кольоровим кодуванням, що полегшує інтерпретацію просторових змін поляризаційних параметрів [3, 14, 24]. Такий під-

хід є особливо ефективним для діагностики оптично активних кристалів, оскільки дозволяє безпосередньо пов'язати особливості поляризаційних карт із фізичними властивостями матеріалу [7, 19].

Таким чином, використання алгоритмів відео-Стокс поляриметрії забезпечує ефективний інструмент неруйнівної діагностики оптично активних анізотропних кристалів, дозволяючи виявляти структурні неоднорідності, оцінювати ступінь анізотропії та здійснювати автоматизований контроль якості зразків [1, 8, 17].

1.4 Аналіз методів та апаратних засобів для систем лазерної відеополяриметрії

Сучасні методи лазерної поляриметрії біологічних об'єктів спираються на комплексне застосування поляриметричного підходу (картографування азимутів, еліптичностей, фазових зсувів поляризаційних зображень біологічних об'єктів, визначення ступеня поляризації поля розсіяного випромінювання) та матричного підходу (вимірювання та аналіз мап векторів Стокса, повного набору та часткового набору елементів матриць Мюллера, елементів матриць Джонса біологічних об'єктів, відтворення параметрів анізотропії біологічних структур із вказаних матриць) [5, 9, 13].



Рис. 1.1. Класифікація методів лазерної поляриметрії[8, 9]

За типом реєстрації об'єктного поля системи лазерної відеополяриметрії поділяються на локальні та зображальні [1, 2]. У локальних поляриметрах вимірювання здійснюються в одній або декількох точках площини зразка. Для цього використовують фотодіоди або фотопомножувачі, які забезпечують високу чутливість до інтенсивності поляризованого світла [7, 22]. Їх застосовують у випадках, коли потрібно дослідити локальні властивості зразка або визначити зміну стану поляризації в певній області без формування зображення всього поля [1].

На відміну від цього, зображальні поляриметри дають змогу здійснювати вимірювання поляризаційних характеристик у всій площині зразка одночасно [2, 3]. Такі системи використовують матричні фотодетектори — переважно цифрові камери на основі CCD або CMOS сенсорів, які реєструють інтенсивність світла при різних станах зондуючої поляризації [1, 7]. Зображальні поляриметри поєднують оптичну частину з електронними модулями реєстрації, оброблення та зберігання зображень, що дозволяє

реалізувати відеополяриметрію [3, 8].

Основна перевага зображальних систем полягає у можливості одночасного вимірювання великої кількості точок, що дає повне просторове уявлення про оптичну анізотропію зразка [9, 13]. Крім того, такі системи забезпечують високу швидкість реєстрації, що дозволяє спостерігати динамічні процеси — наприклад, зміни поляризаційних властивостей біологічних тканин під дією зовнішніх факторів [7, 12]. Локальні поляриметри, натомість, відзначаються вищою точністю і стабільністю вимірювань у кожній конкретній точці, тому вони застосовуються для калібрування або тестування зображальних систем [1,

Сучасні розробки в галузі лазерної відеополяриметрії прагнуть об'єднати переваги обох підходів [5, 10]. Використання високочутливих цифрових камер, швидких модуляторів поляризації та програмного забезпечення для обробки великих масивів даних дозволяє створювати гібридні системи, що забезпечують одночасно високу просторову роздільну здатність і точність поляризаційних вимірювань [3, 8]. Такі системи особливо ефективні для дослідження оптично анізотропних біологічних тканин, полімерів і кристалічних структур [9, 13].

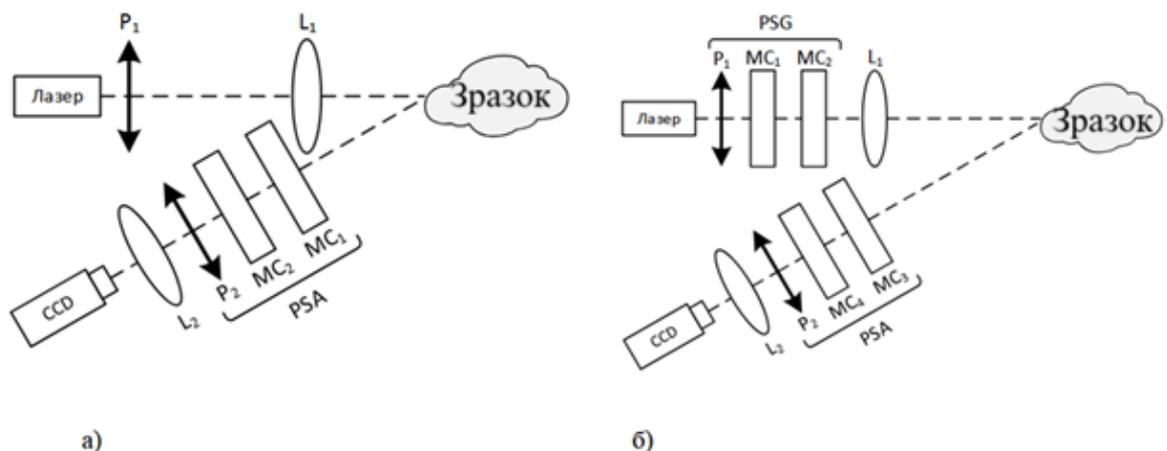


Рис. 1.2 - Система зображальної стокс–поляриметрії(а) та мюллер–поляриметрії (б) зразка БШ зворотно розсіяному світлі: P1, P2-поляризатори; L1, L2-лінзи; MC1, MC2, MC3, MC4 – модулятори [9, 13].

Функціонування систем зображальної поляриметрії залежить від генератора поляризаційних станів (PSG), аналізатора поляризаційних станів (PSA) та параметрів фоточутливої матриці (CCD) [3, 5, 9]. Модульовані компоненти (МС) можуть бути реалізовані за допомогою електрично керованих перетворювачів поляризації у вигляді модуляторів на рідких кристалах або на основі фотопружного ефекту, а також механічно керованих фазових пластинок і поляризаційних елементів [5, 8].

Сучасні методи лазерної поляриметрії біологічних об'єктів спираються на комплексне застосування поляриметричного підходу (картографування азимутів, еліптичностей, фазових зсувів поляризаційних зображень біологічних об'єктів, визначення ступеня поляризації поля розсіяного випромінювання) та матричного підходу (вимірювання і аналіз мап векторів Стокса, повного або часткового набору елементів матриць Мюллера, елементів матриць Джонса біологічних об'єктів, відтворення параметрів анізотропії біологічних структур із зазначених матриць) [1, 9, 13].

За типом реєстрації об'єктного поля системи лазерної відеополяриметрії поділяються на локальні та зображальні.

У локальних поляриметрах вимірювання здійснюються в одній або декількох точках площини зразка. Для цього застосовують фотодіоди або фотопомножувачі, які забезпечують високу чутливість до інтенсивності поляризованого світла. Такі системи використовують для дослідження локальних властивостей або калібрування зображальних систем.

Зображальні поляриметри дозволяють отримувати повну просторову інформацію про поляризаційні характеристики у всій площині зразка. Вони поєднують оптичну систему, блоки поляризаційного аналізу та цифрові камери (CCD або CMOS), що реєструють інтенсивність світла при різних станах зондуючої поляризації. Це забезпечує формування двовимірних мап параметрів поляризації — азимуту, еліптичності, ступеня поляризації тощо — у реальному часі, тобто реалізує відеополяриметрію [2].

Типова схема поляриметра для дослідження наведених біологічних об'єктів представлена на рис. 1.3. Оптична схема експериментальної установки: 1 - He-Ne лазер; 2 - коліматор; 3 - нерухома чвертьхвильова пластинка; 5, 8 - механічно рухомі чвертьхвильові пластинки; 4, 9 – поляризатор і аналізатор відповідно; 6 - об'єкт дослідження; 7 - оптична система; 10 - ПЗЗ- камера; 11 - ПК.

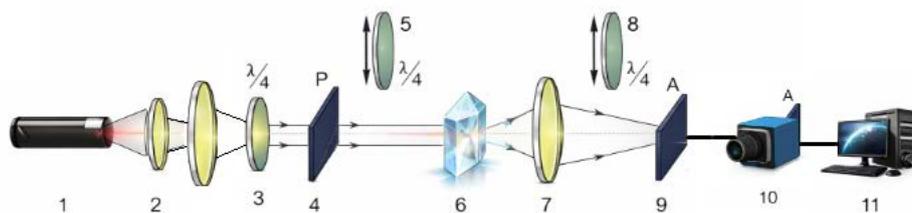


Рис.1.3 - Оптична схема установки відеополяриметра [1, 7]

Сучасні камери повного Стокса, зокрема Full-Stokes Polarization Camera [20], здатні вимірювати всі чотири параметри вектора Стокса для кожного пікселя зображення в реальному часі. Це досягається за допомогою інтегрованих мікрополяризаторних решіток або мікрофазових фільтрів, розташованих безпосередньо на матриці сенсора. Такі рішення дозволяють зменшити похибки, пов'язані з рухом зразка чи джерела світла, що є критично важливим для біомедичних застосувань.

З іншого боку, мюллер-поляриметричні камери (Mueller matrix cameras), описані Gottlieb D. та Arteaga O. [21], використовують алгоритми реконструкції повної матриці Мюллера на основі вимірювань у різних станах поляризації. Цей підхід дає змогу отримати інформацію не лише про ступінь поляризації, але й про оптичну активність, дихроїзм, бірефрингентність та деполіризаційні властивості зразка [9, 13].

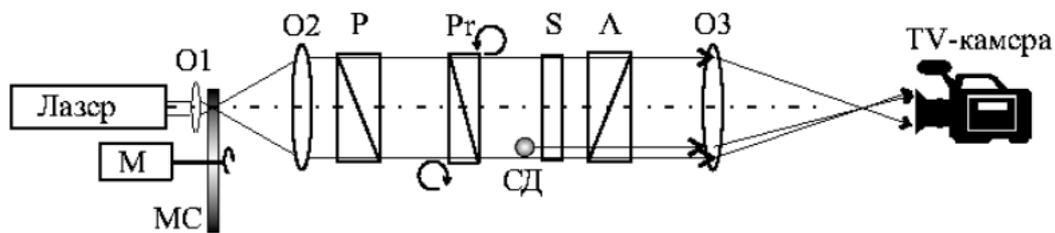


Рис. 1.4. Відеополяриметр Стокса [20]

До апаратних засобів модулювання поляризації належать [5, 7, 12]:

- рідкокристалічні модулятори (LCVR) — забезпечують електронне керування фазовим зсувом;
- електрооптичні модулятори — швидкодіючі елементи, які дозволяють проводити поляризаційне сканування з високою частотою;
- фазові пластини $\lambda/2$, $\lambda/4$ — механічно або моторизовано обертаються для створення необхідних поляризаційних станів;
- поляризаційні решітки та мікропризматичні фільтри, що використовуються у портативних відеополяриметрах.

Обробка відеополяриметричних даних включає реконструкцію векторів Стокса, побудову матриць Мюллера, відновлення фазових зсувів та еліптичності, а також візуалізацію карт поляризаційних параметрів. Для цього застосовують програмні комплекси на базі MATLAB, Python (NumPy, OpenCV, похибок вирівнювання [3, 8, 24].

Поєднання високошвидкісних камер, інтелектуальних алгоритмів та сучасних оптичних модулів дозволяє створювати системи реального часу для медичної діагностики, контролю матеріалів, мікроскопії та віддаленого моніторингу біологічних об'єктів [9, 21, 29].

Аналіз показує, що поєднання матричних методів (Стокса–Мюллера) з сучасними відеополяриметричними апаратними засобами дозволяє відтво-

рювати повну інформацію про поляризаційні властивості об'єктів. Використання камер повного Стокса та систем мюллер-поляриметрії забезпечує високу точність вимірювань, просторову деталізацію та можливість моніторингу змін у реальному часі, що є перспективним для біомедичних і промислових застосувань [1, 9, 21].

1.5 Висновки до розділу 1

У першому розділі проведено аналіз теоретичних засад та архітектурних рішень у галузі лазерної відеополяриметрії. Встановлено, що взаємодія когерентного випромінювання з анізотропними структурами зумовлює зміну стану поляризації світла, для кількісного опису якої найбільш ефективним є формалізм Стокса-Мюллера. Цей апарат дозволяє через параметри вектора Стокса враховувати вплив подвійного променезаломлення, дихроїзму, деполіризації та оптичної активності зразків.

Дослідження сучасних апаратних засобів показало, що сучасні поляриметричні комплекси базуються на використанні стабілізованих лазерів, швидкісних модуляторів та ПЗЗ-камер високої роздільної здатності. Обґрунтовано перевагу зображальних систем над локальними завдяки їхній здатності формувати двовимірні карти розподілу поляризаційних параметрів у реальному часі. Визначено, що інтеграція камер повного Стокса з алгоритмами відновлення азимуту та еліптичності забезпечує високу точність неруйнівної діагностики структурних неоднорідностей матеріалів. Отримані результати аналізу підтверджують доцільність подальшої розробки засобів формування та аналізу поляриметричних зображень.

2 МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ФОРМУВАННЯ ПОЛЯРИМЕТРИЧНИХ ЗОБРАЖЕНЬ АНІЗОТРОПНИХ ЗРАЗКІВ У ЛАЗЕРНОМУ ВІДЕОПОЛЯРИМЕТРІ

Відеополяриметрия є сучасним інструментом просторово-розподіленого дослідження стану поляризації оптичного випромінювання, яке відбивається, проходить або розсіюється досліджуваними зразками [1, 3, 7, 9]. Для оптично-анізотропних матеріалів, до яких належать біологічні тканини, тонкі плівки, біологічні рідини та оптично активні кристали, поляризаційна інформація містить кількісні характеристики фазової та просторової структури середовища [7, 13, 19, 29]. До таких характеристик відносяться фазовий зсув між ортогональними компонентами електромагнітного поля, одноосьова та двовісна анізотропія, ступінь деполіризації, оптична активність та низка інших параметрів [9, 13]. Комплексне відтворення зазначених величин у реальному або квазіреальному часі забезпечується системами типу full-field polarimeters, які об'єднують у єдиний комплекс апаратну частину та програмну обробку [8,

Загальний процес відеополяриметричного дослідження має чітко визначену послідовну структуру і включає етапи калібрування, реєстрації інтенсивностей, реконструкції матриці Мюллера та аналізу параметрів анізотропії [1, 3, 9]. Без коректного калібрування відновлення матриці Мюллера є неможливим через систематичні похибки апаратних елементів [3, 8].

2.1 Принцип формування поляриметричних зображень у лазерному відеополяриметрі.

2.1 Принцип формування поляриметричних зображень у лазерному відеополяриметр

На рисунку 2.1 представлена структурна схема апаратно-програмного комплексу для формування зображень азимутів та еліптичностей об'єктного поля з використанням поляриметричного методу. Система реалізує повний цикл: від генерації поляризованого світла до цифрової реєстрації зображення та обробки результатів. Така конфігурація є основою для побудови зображувальних поляриметричних систем, які використовуються у біомедичних дослідженнях, неруйнівному контролі та дослідженні анізотропних середовищ [3, 8].

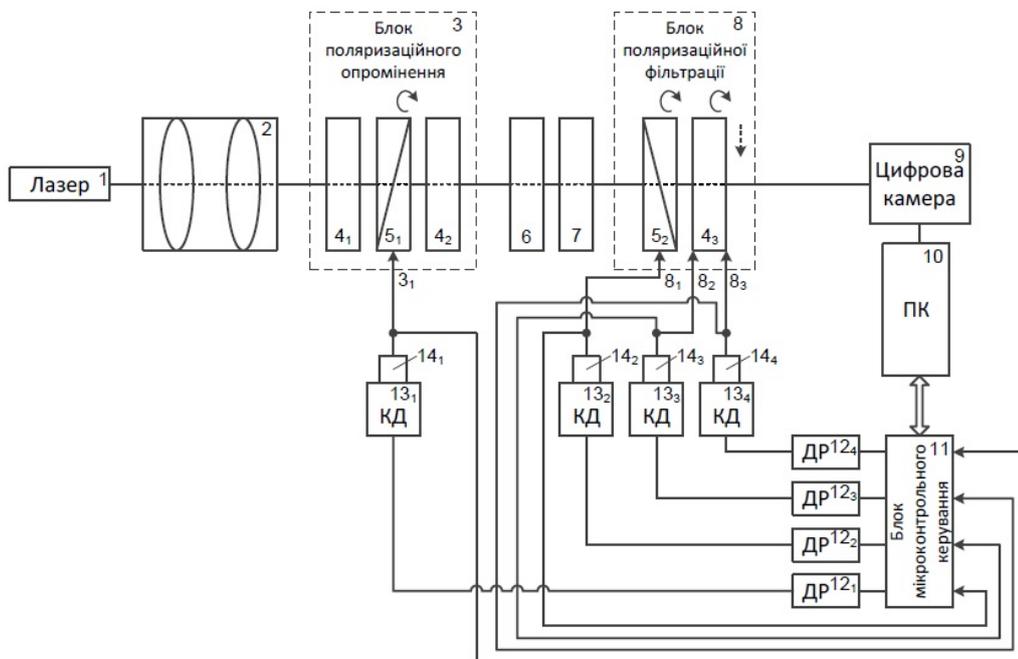


Рисунок 2.1. Архітектура 2-D оптико-електронної автоматизованої системи Стокс-поляриметричного картографування та аналізу лазерних зображень [3]

Основні складові та принцип дії [1, 3, 8] :

1. Лазер — джерело когерентного випромінювання, що генерує світло з відомими параметрами. Лазер забезпечує вузький спектральний діапазон і високу інтенсивність, необхідні для точного вимірювання змін поляризації.

2. Оптична система колімації — включає лінзи, які формують паралельний світловий пучок. Це необхідно для забезпечення рівномірного освітлення зразка та коректного аналізу поляризаційного стану.

3. Блок поляризаційного опромінення — формує необхідний вхідний поляризаційний стан.

Складається з:

- поляризаторів ($4_1, 4_2, 4_3, 4_4$);
- чвертьхвильових пластинок (5_1);
- сервоприводу (3_1), що керує положенням оптичних елементів для зміни поляризаційного стану світла.

4. Об'єкт дослідження — оптично активний кристал або інша анізотропна структура, яка змінює стан поляризації світла відповідно до своєї внутрішньої структури.

5. Система зображення — оптичні елементи для фокусування або збільшення зображення перед його реєстрацією.

6. Блок поляризаційної фільтрації — дозволяє аналізувати вихідний стан поляризованого світла після взаємодії з об'єктом. Складається з:

- аналізаторів ($4_5, 4_6, 4_7, 4_8$);
- чвертьхвильової пластинки (5_2);
- сервоприводу ($8_1, 8_2, 8_3$), що дозволяє змінювати конфігурацію аналізатора для реєстрації різних станів поляризації.

7. Цифрова камера — реєструє інтенсивнісне зображення поляризованого світла. На її виході формується набір кадрів, які відповідають різним поляризаційним конфігураціям.

8. Перетворювачі кодування (КД, 13_1-13_4) — слугують для перетворення аналогових сигналів від сервоприводів у цифрову форму.

9. Драйвери обертання (ДР, 12_1-12_4) — керують положенням оптичних елементів блоків поляризації (обертання пластинок, поляризаторів тощо) через мікроконтролер.

10. ПК — персональний комп'ютер, у якому реалізовано програмний модуль для:

- управління пристроями;
- реєстрації відео- та фотоданих;
- обчислення Стокс-параметрів та параметрів еліптичності;
- побудови мап і кількісного аналізу зображень.

11. Блок мікроконтрольного керування — узгоджує взаємодію між програмним модулем, електромеханічними частинами та цифровими виконавчими механізмами [1, 2, 9, 10].

Опромінювання анізотропного зразка в поляриметрі проводиться паралельним пучками He-Ne лазера на довжині хвилі 0,650 мкм [7, 9]. Фазові пластинки та лінійні поляризатор утворюють поляризаційний опромінювач, за допомогою якого формується лінійна поляризація з азимутами 0° , 90° , $+45^\circ$ і право циркулярна поляризація. БШ послідовно опромінюють зазначеними типами поляризації. Утворюється зображення БШ за допомогою мікрооб'єктиву та CCD камери. Поляризаційний аналіз мікроскопічних зображень БШ здійснюється за допомогою поляризаційного фільтру, що складається з фазової пластинки та поляризатора-аналізатора.

Поляриметр характеризується високим рівнем інформаційної повноти вимірювань оскільки дозволяє з достатнім рівнем точності реалізовувати для оптично тонких БШ – вимірювання двовимірних розподілів параметрів поля, розсіяного досліджуваним біологічним об'єктом, зокрема, інтенсивностей зображень (мапа інтенсивностей) БШ; азимутів поляризації у площині зображення (мапа азимутів); еліптичностей поляризації у площині зображення (мапа еліптичностей); параметрів вектора Стокса у площині зображення (чотирьох мап параметрів вектора Стокса) – вимірювання двовимірних розподілів елементів матриці Мюллера оптично тонких зразків в площині зображення (мюллер-матричні зображення) із можливістю відтворення на їх основ параметрів анізотропії оптично тонких зразків [6, 9, 13].

2.2 Отримання вхідних зображень компонента вектора Стокса

Для забезпечення коректної роботи системи лазерної поляриметрії та автоматизації процесу формування зображень еліптичностей біологічних шарів необхідно розробити блок-схему алгоритму обчислення й візуалізації [1, 3, 9]. Блок-схема визначає послідовність операцій для вимірювання та обробки поляриметричних даних в даному випадку параметрів еліптичностей.

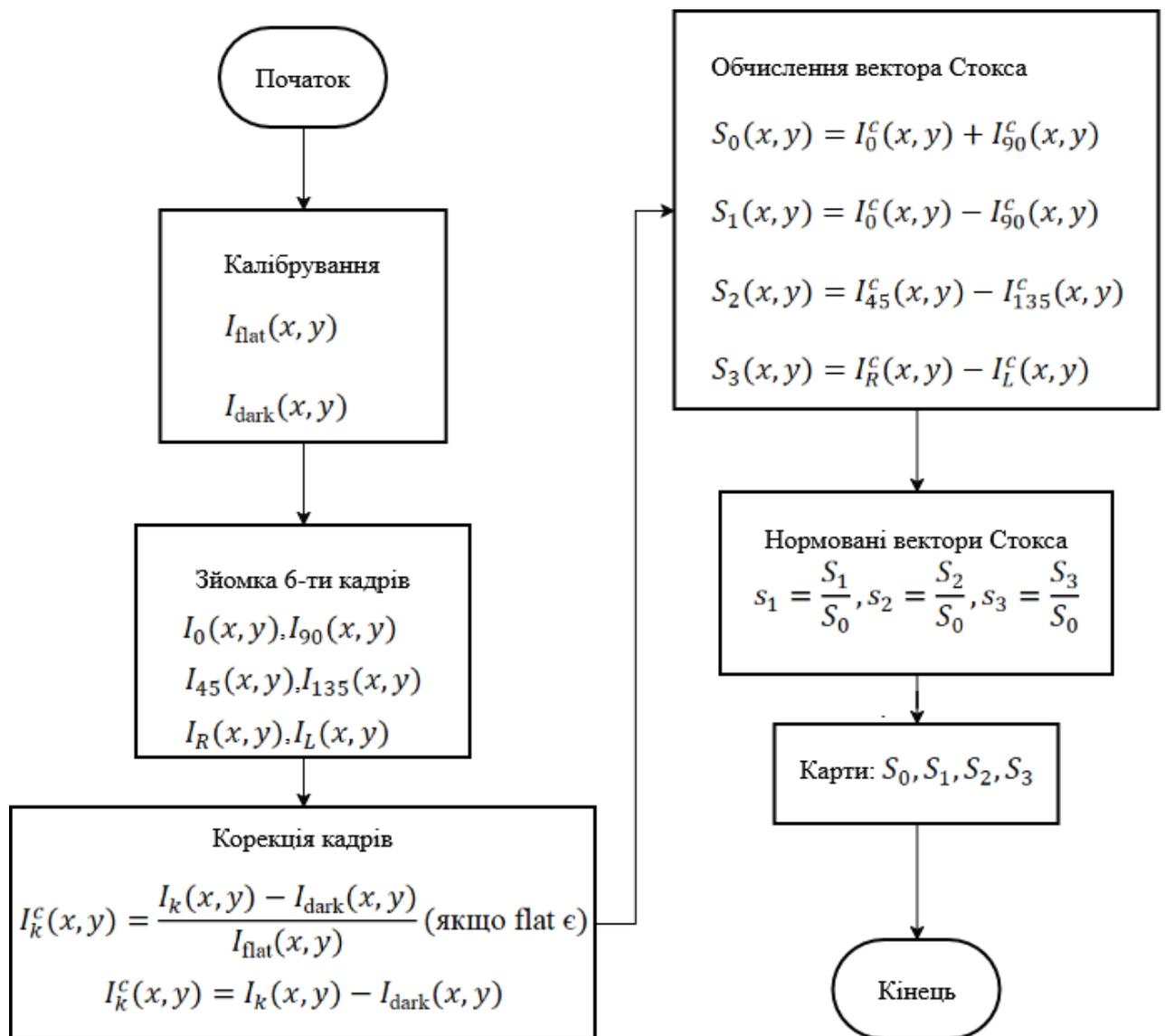


Рисунок 2.2 – Блок алгоритму формування зображень

Наведено співвідношення для обчислення координатних ($m \times n$) розподілів (поляризаційних мап) величин азимутів α та еліптичності β поляризації лазерного зонduючого випромінювання оптично активного зразка:

Для кількісної оцінки просторових розподілів азимуту поляризації $\alpha(x, y)$ та кута еліптичності $\beta(x, y)$ використовувався набір статистичних моментів 1–4 порядків [17, 22, 23]. Вказані параметри розглядалися як двовимірні статистичні вибірки, що містять $N = m \times n$ реалізацій. Перший момент характеризує середній рівень орієнтації або оптичної активності, другий — ступінь неоднорідності структури, третій — асиметрію розподілу, а четвертий — наявність локальних аномалій. Отримані статистичні інваріанти дозволяють кількісно порівнювати різні зразки та забезпечують основу для автоматизованого контролю якості оптично анізотропних матеріалів [1, 11].

2.3 Обчислення вектора Стокса та поляризаційних параметрів

Для калібрування і підготовки необхідно зняти темновий кадр, знятий без

с

в

і

т За допомогою опційної функції flat-field (зображення однорідного поля без

з

р

а Розглянемо етапи визначення 4 елементів вектора Стокса на основі проведення 6 вимірювань інтенсивності зображень анізотропного зразка за допомогою поляриметра орієнтують площину пропускання поляризатора — аналізатора під кутом $\Theta = 0^\circ$ і вимірюють розподіл інтенсивності $I_0 (m \times n)$ ЛЗ. Інверти) компариментерівна ступо світлони, вмірчуванню об'єднаний розподіл інтенсивності I_0 ді (коєлів) [1, 3, 24].

На основі визначення вектора Стокса S знаходять його перший S_1 та другий S_2 параметри:

и

м

к

$$S_1 = I_0 + I_{90} \quad (2.1)$$

$$S_2 = I_0 - I_{90} \quad (2.2)$$

де I_0 та I_{90} – інтенсивності випромінювання, виміряні при орієнтації площини поляризатора під кутами 0° та 90° відповідно. Далі:– орієнтують площину поляризатора під кутом $\Theta = 45^\circ$ і вимірюють координатний розподіл інтенсивності $I_{45} (m \times n)$; – повертають поляризатор на кут $\Theta = 135^\circ$ і вимірюють координатний розподіл інтенсивності $I_{135} (m \times n)$.

$$S_3 = I_{45} - I_{135} \quad (2.3)$$

Для вимірювання четвертого параметра вектора Стокса S_4 на шляху лазерного пучка встановлюють чвертьхвильову пластинку так, щоб її вісь найбільшої швидкості була зорієнтована під кутом 0° . Площину пропускання аналізатора орієнтують під кутом $\Theta = 45^\circ$ і вимірюють координатний розподіл інтенсивності правоциркулярно поляризованого випромінювання $I_R(m \times n)$.

Далі площину пропускання поляризатора орієнтують відносно осі найбільшої швидкості чвертьхвильової пластинки під кутом $\Theta = 135^\circ$ і вимірюють відповідні розподіли інтенсивності лівоциркулярно поляризованого випромінювання $I_L(m \times n)$.

$$S_4 = I_R - I_L \quad (2.4)$$

Отже вектори Стокса . отримують при послідовному опроміненні зразка, розміщеного в об'єктному блоці, лазерними пучками з чотирма типами поляризації (0° , 90° , 45° , 135°), які формуються багатоканальним поляризаційним опромінювачем, та поляризаційній фільтрації 24 зображень за

допомогою шести каналів (0° , 90° , 45° , 135° , $+45^\circ$, -45°) фільтрації багатоканального поляризаційного аналізатора [7, 9, 13]

Після знімків інтенсивності для різних станів аналізатора (PSA):

- $I_0(x, y)$ — аналізатор 0°
- $I_{90}(x, y)$ — аналізатор 90°
- $I_{45}(x, y)$ — аналізатор 45°
- $I_{135}(x, y)$ — аналізатор 135°
- $I_R(x, y)$ — аналіз кругової правої ($\lambda/4$ + аналізатор)
- $I_L(x, y)$ — аналіз кругової лівої ($\lambda/4$ + аналізатор)

Проводиться корекція кожного кадру залишаючи тільки сигнал від зразка, нормований по просторовій чутливості системи. Підходить для кількісних вимірювань параметрів.

$$I_{kc}(x,y) = I_k(x,y) - I_{\text{dark}}(x,y) / \text{flat}(x,y) \text{ (якщо flat } \neq 0) \quad (2.5)$$

Мінімально потрібна корекція, яка прибирає шум матриці, достатньо інформації для відносних карт та структурного аналізу.

$$I_k^c(x, y) = I_k(x, y) - I_{\text{dark}}(x, y) \quad (2.6)$$

Обчислення компонентів вектора Стокса:

$$\begin{aligned} S_0(x, y) &= I_0^c(x, y) + I_{90}^c(x, y) \\ S_1(x, y) &= I_0^c(x, y) - I_{90}^c(x, y) \\ S_2(x, y) &= I_{45}^c(x, y) - I_{135}^c(x, y) \\ S_3(x, y) &= I_R^c(x, y) - I_L^c(x, y) \end{aligned} \quad (2.7)$$

Після обчислення векторів Стокса обчислимо нормовані Стокс-параметри для розрахунку лінійної, циркулярної, загальної поляризації [3, 5, 9].

$$s_1 = \frac{S_1}{S_0}, s_2 = \frac{S_2}{S_0}, s_3 = \frac{S_3}{S_0} \quad (2.8)$$

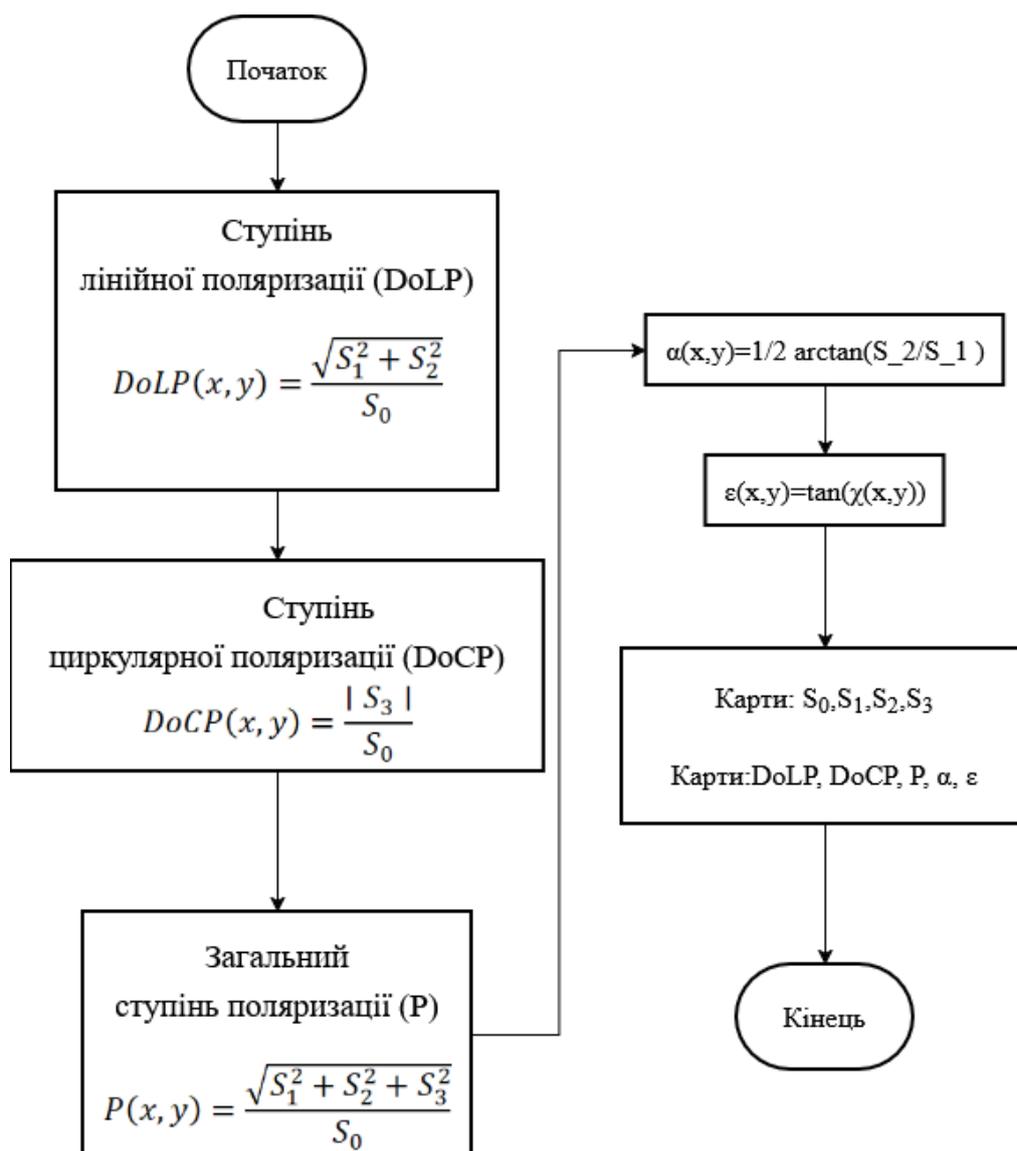


Рис. 2.3 – Блок-схема обчислення похідних базових карт поляризації

Ступінь лінійної поляризації (DoLP):

$$DoLP(x, y) = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2}}{S_0} \quad (2.9)$$

Ступінь циркулярної поляризації (DoCP):

$$DoCP(x, y) = \frac{|S_3|}{S_0} \quad (2.10)$$

Загальний ступінь поляризації (P):

$$P(x, y) = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2}}{S_0} \quad (2.11)$$

Також необхідно розрахувати зображення азимутів та еліптичностей.

Азимут лінійної поляризації (α):

$$\alpha(x, y) = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{S_2}{S_1}\right) \quad (2.12)$$

Кут еліптичності (χ) та еліптичність (ϵ):

$$\chi(x, y) = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{S_3}{\sqrt{S_1^2 + S_2^2}}\right) \quad (2.13)$$

або еквівалентно:

$$\chi(x, y) = \frac{1}{2} \arcsin\left(\frac{S_3}{\sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2}}\right) \quad (2.14)$$

Еліптичність (як безрозмірну величину) часто задають:

$$\varepsilon(x, y) = \tan(\chi(x, y)) \quad (2.15)$$

В результаті обчислень з першої частини блок схем отримано карти: чотирьох векторів Стокса (S_0, S_1, S_2, S_3), а також карти станів поляризації $DoLP, DoCP, P, \alpha, \chi$ (або ε).

2.4 Структурно-статистичний аналіз поляризаційних карт

Статистичні, кореляційні, фрактальні параметри (інваріанти структури) Вхідні карти $P(x, y), \alpha(x, y), \varepsilon(x, y), DoLP(x, y)$ будуть проаналізовані за допомогою статистичних моментів, автокореляції, кореляційної довжини/розміу доменів, фрактальної розмірності [17, 22, 23, 25].

Для початку потрібно обрати області аналізу і інформативної карти (ROI) [14, 17].

Обираємо карту $F(x, y)$, наприклад:

- $F = P(x, y)$ (для деполяризації)
- $F = \alpha(x, y)$ (для орієнтації)
- $F = DoLP(x, y)$ (для втрат поляризації)

Задаємо ROI:

$$\Omega = \{(x, y)\} \quad (2.16)$$

Визначаємо статистичні моменти (1–4 порядок) для обраної інформативної області (цільові параметри за якими буде проводитися контроль зарзків).

Середнє значення:

$$M_1 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N A_j \quad (2.17)$$

Дисперсія:

$$M_2 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (A_j - M_1)^2 \quad (2.18)$$

Асиметрія (skewness):

$$M_3 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \left(\frac{A_j - M_1}{\sqrt{M_2}} \right)^3 \quad (2.19)$$

Ексцес (kurtosis):

$$M_4 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \left(\frac{A_j - M_1}{\sqrt{M_2}} \right)^4 \quad (2.20)$$

Автокореляційна функція (АКФ) використовується для аналізу внутрішньої структури сигналів та зображень. Вона дозволяє оцінити ступінь подібності значень сигналу при різних зсувах Δx . У випадку зображень АКФ визначає, наскільки яскравість або поляриметричний параметр у вибраній точці корелює з відповідними значеннями у сусідніх точках уздовж певної координати.

Для кількісної характеристики автокореляційних залежностей $K_{\alpha, \beta}(\Delta x)$ введена наступна група параметрів кореляційний моменти, які характеризують півширину і ступінь “гостроти” функції автокореляції. Це необхідно для подальшого аналізу просторових властивостей зображень, а також для виділення структурних особливостей у біологічних тканинах, технічних поверхнях або випадкових середовищах [4, 17, 22].

Першим параметром є кореляційна площа, яка визначається інтегралом від автокореляційної функції:

де $K_{\alpha,\beta}(\Delta x)$ — автокореляційна функція для пари параметрів α, β ;

x_0 — верхня межа інтегрування, яка визначається довжиною сигналу (або розміром зображення).

Чим більша кореляційна площа, тим сильніше виражені регулярні компоненти у структурі сигналу або зображення. Вона фактично характеризує «ступінь упорядкованості» даних.

Для більш детального аналізу пропонується використовувати кореляційні моменти, які описують не тільки площу під графіком АКФ, але й форму та характер її спаду.

де N — кількість дискретних значень зсуву Δx_j ;

$K_{\alpha,\beta}(\Delta x_j)$ — значення автокореляційної функції при зсуві Δx_j .

Ця величина фактично є середньоквадратичним значенням АКФ. Чим більше значення, тим ширша функція автокореляції, а отже — тим повільніше затухає зв'язок між віддаленими точками сигналу чи зображення.

Цей параметр визначає ступінь гостроти піку АКФ. Він залежить від відношення четвертого моменту до квадрата другого моменту.

- Якщо Q_4 має велике значення, це означає, що автокореляційна функція має різкий пік і швидко спадає, що свідчить про локалізовані структури у зображенні (наприклад, дрібні неоднорідності). Δ
- Якщо ж Q_4 мале, то автокореляційна функція розмита і має “пологий”

характер, що відповідає більш однорідним і протяжним структурам.

В кінці після розрахунків виводиться результат обчислення.

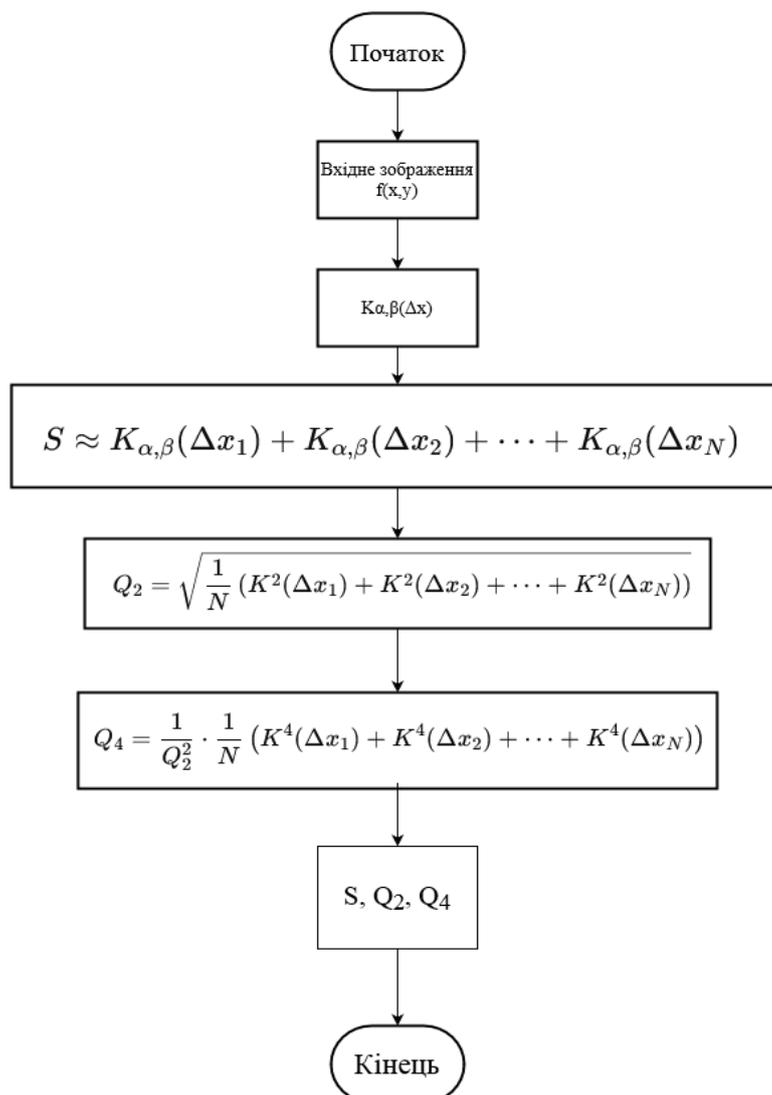


Рисунок 2.4 – Блок схема алгоритму автокореляції

Фрактальна розмірність (1 простий варіант — box-counting)

Обчислюємо карту за порогом у бінарному вигляді:

$$B(x, y) = \begin{cases} 1, & F(x, y) \geq T \\ 0, & F(x, y) < T \end{cases} \quad (2.25)$$

Покриваємо зображення кубом-сіткою які по розміру відповідають значенню [17, 23, 25]. Нехай — кількість кубічних сіток, які містять хоча б один “1”. Тоді фрактальна розмірність розраховуватиметься за формулою:

$$D_f = -\lim_{\epsilon \rightarrow 0} \frac{\log N(\epsilon)}{\log \epsilon} \quad (2.26)$$

Практично будують графік:

$$\log N(\epsilon) \text{ vs } \log(1/\epsilon) \quad (2.27)$$

D_f - кутовий коефіцієнт лінійної апроксимації.

Інтерпретація використаних методів:

- D_f вище \rightarrow структура складніша (більше дрібних неоднорідностей);
- D_f нижче \rightarrow структура більш “спрощена/однорідна” або деградована (залежить від об’єкта)

Вихідні “інваріанти” для діагностики. Для кожної карти F формується набір: $\{M_1, M_2, M_3, M_4, L_{\text{сог}}, D_f\}$

Отримані карти та значення забезпечують кількісну структурну діагностику поляризаційних карт з використанням статистичних, кореляційних та фрактальних інваріантів.

2.5 Блок контролю браку оптично активних кристалів у системі відео-Стокс поляриметрії

Одним із ключових функціональних елементів системи лазерної відео-Стокс поляриметрії є блок автоматизованого контролю якості та відбраковування оптично активних кристалів. Його призначення полягає у виявленні просторових неоднорідностей поляризаційних параметрів, які зумовлені внутрішніми дефектами кристалічної ґратки, механічними напруженнями, мікротріщинами або порушенням доменної структури. На відміну від візуального огляду або класичних інтерферометричних методів, даний блок забезпечує кількісну, інваріантну до інтенсивності освітлення оцінку стану зразка [1, 8, 17].

Вхідними даними для блоку контролю браку є просторові карти ступеня поляризації, ступеня лінійної поляризації та азимуту лінійної поляризації, отримані на попередніх етапах обробки Стокс-параметрів. Саме ці величини є найбільш чутливими до змін внутрішньої структури анізотропного середовища та широко застосовуються в рамках Київської школи відеополяриметрії [1, 3, 9].

Першим етапом кількісної оцінки є аналіз статистичної мінливості азимуту поляризації та ступеня поляризації [17, 22]. Для цього обчислюються стандартні відхилення відповідних карт, які визначаються як

$$\sigma(\alpha) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{(x,y) \in \Omega} (\alpha(x,y) - \langle \alpha \rangle)^2}, \quad (2.28)$$

$$\sigma(P) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{(x,y) \in \Omega} (P(x,y) - \langle P \rangle)^2}, \quad (2.29)$$

де N — кількість пікселів у вибраній області аналізу, а $\langle \alpha \rangle$ позначає середнє значення. Фізично величина характеризує ступінь дезорієнтації оптичних осей у межах зразка, тоді як відображає неоднорідність деполаризаційних процесів. Для якісних монокристалів ці величини мають низькі значення, що відповідає впорядкованій доменній структурі. Їх зростання є ознакою дефектності та внутрішніх напружень.

Наступним важливим етапом є аналіз просторових градієнтів поляризаційних параметрів. Для цього обчислюються модулі градієнтів азимуту та ступеня поляризації:

$$|\nabla \alpha(x,y)| = \sqrt{\left(\frac{\partial \alpha}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial \alpha}{\partial y}\right)^2}, \quad |\nabla P(x,y)| = \sqrt{\left(\frac{\partial P}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial P}{\partial y}\right)^2} \quad (2.30)$$

Градiєнтнi карти дозволяють виявляти локальнi рiзкi змiни поляризацiйного стану, якi зазвичай пов'язанi з межами доменiв, трiщинами або зонами локального напруження. У дефектних зразках цi градиєнти мають значно бiльшi значення та формують характернi лiнiйнi або плямистi структури.

На основi вищезазначених параметрiв формується бiнарна порогова маска дефектiв

$$M(x, y) = [DolP(x, y) < T_1] \vee [|\nabla\alpha(x, y)| > T_2] \vee [P(x, y) < T_3], \quad (2.31)$$

де — емпiрично або експериментально визначенi пороговi значення. Ця маска видiляє областi зниженого ступеня поляризацiї, рiзкої змiни азимуту або загальної деполаризацiї, якi iнтерпретуються як дефектнi зони кристала. Важливою особливiстю даного пiдходу є комбiнування кiлькох незалежних критерiїв, що суттєво пiдвищує достовiрнiсть виявлення браку.

Подальший етап полягає у формуванні iнтегральних метрик якостi. До них належать вiдносна площа дефектних зон

$$A_{\text{def}} = \frac{1}{N} \sum_{(x,y) \in \Omega} M(x, y) \times 100\%, \quad (2.32)$$

кiлькiсть просторово зв'язаних дефектних областей , а також середня iнтенсивнiсть дефектiв, яка може визначатися як середнє значення або у межах маски . Цi метрики дозволяють перейти вiд локального аналізу до узагальненої оцiнки якостi зразка.

Фiнальне рiшення про придатнiсть або брак кристала приймається на основi порiвняння отриманих метрик з гранично допустимими значеннями [1, 8, 11]. Якщо виконується умова

$$A_{\text{def}} > A_{\text{max}} \text{ або } N_{\text{def}} > N_{\text{max}}, \quad (2.33)$$

то зразок класифікується як бракований. В іншому випадку він вважається придатним для подальшого використання. Таким чином, даний блок забезпечує автоматизований, кількісний та неруйнівний контроль оптично активних кристалів, що є особливо важливим для технологічних та прецизійних оптичних застосувань [1, 9, 29].

2.6 Висновки до розділу 2

У другому розділі розроблено та обґрунтовано методи й алгоритмічні засоби формування поляриметричних зображень в автоматизованій лазерній системі. Встановлено, що процес дослідження анізотропних зразків базується на послідовному опроміненні об'єкта лазерним пучком з різними станами поляризації (лінійними 0° , 90° , 45° , 135° та циркулярними) з наступною реєстрацією інтенсивностей за допомогою ПЗЗ-камери. Архітектура системи забезпечує повний цикл обробки даних — від керування сервоприводами оптичних елементів до цифрової реконструкції векторів Стокса для кожного пікселя зображення.

Описано математичний апарат обчислення базових поляризаційних мап, таких як азимут, еліптичність та загальний ступінь поляризації, що є фундаментальними характеристиками фазової структури середовища. Запропоновано комплексний підхід до аналізу отриманих карт, який поєднує обчислення статистичних моментів перших чотирьох порядків, автокореляційних функцій та фрактальної розмірності. Це дозволяє кількісно оцінити ступінь упорядкованості та складність структури анізотропних зразків. Особливу увагу приділено розробці алгоритму автоматизованого контролю якості оптично активних кристалів, який на основі аналізу просторових градієнтів та порогової фільтрації параметрів азимуту й деполяризації забезпечує об'єктивне виявлення дефектів. Таким чином, створено теоретичне та програмне підґрунтя для переходу до експериментальної апробації системи та верифікації розроблених методів контролю.

СИНТЕЗ АПАРАТНОЇ ЧАСТИНИ ТА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

3.1 Елементна база системи відео-Стокс поляриметрії для неруйнівного контролю оптично активних кристалів

Вимоги до сучасних систем лазерної відеополяриметрії

Сучасні лазерні відеополяриметричні системи для дослідження поляризаційних параметрів неоднорідних оптичних зразків повинні відповідати таким вимогам:

- точність і повторюваність результатів вимірювань параметрів Стокса (вихідних інтенсивностей) та визначення діагностично інформативних поляризаційних параметрів зразка;
- універсальність методу вимірювання та розрахунків поляризаційних характеристик зразка;
- достовірність результатів контролю параметрів, що характеризують структурні неоднорідності зразка;
- багатоканальність та оперативність (можливість одночасного вимірювання та паралельного оброблення результатів на декількох інформативних довжинах хвиль лазерів);
- можливість візуалізації результатів визначених поляризаційних параметрів у площині перерізу зразка (аналізу їх двовимірних координатних розподілів);
- автоматизація процесу вимірювань (застосування комп'ютерних та/або мікропроцесорних засобів);
- відповідність санітарним нормам лазерного випромінювання та електробезпека;
- ергономічність;
- надійність.

При оптичному перетворенні інформації необхідно враховувати наявність чинників, які здатні спотворити результати поляриметричних вимірювань.

Чинники, пов'язані з технічною реалізацією систем лазерної відеополяриметрії :

- нерівномірність хвильового фронту джерела у різних ділянках досліджуваної площини зображення зразка ;
- неоднакові показники чутливості комірок для матричних фотодетекторів випромінювання (до 20 % для ПЗЗ-приладів);
- вплив сторонніх джерел світла і рухових артефактів на вірогідність результатів автоматизованого контролю;
- вплив інструментальної поляризації оптичної системи відеополяриметра, спектральної стабільності частоти випромінювання та наявних шумів інтенсивності лазерних джерел на точність результатів вимірювань.

Для мінімізації впливу вказаних чинників на точність результатів вимірювань і контролю пропонується:

- застосування методів вимірювання елементів поляризаційних характеристик на основі растрової Стокс-поляриметрії;
- застосування новітніх оптоелектронних засобів оперативної багатоканальної реєстрації інформації на декількох довжинах хвиль;
- калібрування та оперативне оброблення результатів вимірювань із застосуванням сучасних алгоритмів видалення поляризаційних шумів на ПЕОМ [1, 3, 7, 9].

Відеополяриметрія (ВЛП) є сучасним оптичним методом просторово-розподіленого дослідження стану поляризації випромінювання, що проходить, відбивається або розсіюється досліджуваними зразками. Для оптично-анізотропних матеріалів, зокрема біологічних тканин, тонких плівок, біологічних рідин та оптично активних кристалів, поляризаційна інформація

містить важливі кількісні характеристики внутрішньої структури середовища, а саме фазовий зсув між ортогональними компонентами електромагнітного поля, одноосьову та двовісну анізотропію, ступінь деполаризації, оптичну активність та дихроїзм [1, 3, 7, 13].

Комплексне відтворення зазначених параметрів у режимі реального або квазіреального часу забезпечується системами типу full-field polarimeters [8, 20, поляризації — PSG, аналізатор поляризації — PSA, швидкісну відеокамеру) та програмний комплекс для цифрової обробки, калібрування та реконструкції карт(1.4).

Апаратна частина системи лазерної відео-Стокс поляриметрії призначена для формування, модуляції, аналізу та реєстрації поляризаційного стану оптичного випромінювання, що взаємодіє з оптично активними кристалами, з метою їх неруйнівного контролю та виявлення дефектів внутрішньої структури. Структурно система складається з джерела випромінювання, блоку формування поляризаційного стану, модуля розміщення зразка, блоку аналізу поляризації, системи реєстрації зображень та обчислювально-керувального комплексу[1, 3, 9].

Джерелом випромінювання у системі є напівпровідниковий лазер з довжиною хвилі 650 нм та вихідною потужністю близько 50 мВт. Вибір монохроматичного лазерного випромінювання зумовлений необхідністю забезпечення стабільного та добре визначеного поляризаційного стану, а також високої когерентності, що є важливим для реєстрації тонких поляризаційних ефектів, характерних для анізотропних середовищ. У реальних умовах експлуатації лазер встановлюється на жорсткому оптичному тримачі з можливістю тонкого юстування та живиться від стабілізованого драйвера струму. Для виключення впливу температурних флуктуацій на параметри випромінювання доцільним є застосування елементів термостабілізації. За відсутності гарантованої лінійної поляризації на виході лазера у схему

вводиться лінійний поляризатор, який формує початковий еталонний поляризаційний стан [7, 9].

Формування вхідних поляризаційних станів здійснюється блоком PSG (Polarization State Generator), до складу якого входить колімуюча оптика, лінійний поляризатор, а також додаткові оптичні елементи для регулювання інтенсивності та просторових характеристик пучка. Коліматор забезпечує формування паралельного світлового пучка заданого діаметра, що відповідає розмірам досліджуваної області зразка та полю зору системи реєстрації. Лінійний поляризатор визначає початкову орієнтацію вектора електричного поля та слугує базою для подальшої модуляції поляризаційного стану. Для узгодження рівня сигналу з динамічним діапазоном камери можуть застосовуватися нейтральні світлофільтри або апертурні діафрагми. Перемикання поляризаційних станів у PSG реалізується шляхом механічного повороту оптичних елементів за допомогою моторизованих вузлів або, у більш складних системах, за допомогою електрооптичних або рідкокристалічних модуляторів [3, 5, 10].

Досліджуваний зразок — оптично активний кристал (кварц, кальцит тощо) — розміщується на предметному столику, який забезпечує його стабільну фіксацію, центрування відносно оптичної осі та можливість вирівнювання у просторі. Особливу увагу приділяють мінімізації механічних напружень, оскільки вони можуть індукувати додаткове двопротенезаломлення і, таким чином, спотворювати результати вимірювань. Конструкція столика повинна дозволити точне позиціонування зразка у площині, перпендикулярній до напрямку поширення лазерного пучка, що є критичним для коректної інтерпретації поляризаційних карт.

Аналіз поляризаційного стану випромінювання після взаємодії зі зразком здійснюється блоком PSA (Polarization State Analyzer). До складу PSA входить фазова пластина, зазвичай чвертьхвильова, та лінійний аналізатор, розміщений перед матрицею камери. Комбінація цих елементів дозволяє реалізувати вимірювання лінійних та циркулярних компонент поляризації, необхідних для

відновлення повного вектора Стокса. Для отримання набору інтенсивнісних зображень при орієнтаціях аналізатора 0° , 90° , 45° та 135° , а також для правої та лівої циркулярної поляризації, фазова пластина і аналізатор встановлюються на поворотні вузли з високою кутовою точністю. Коректність роботи PSA потребує попереднього калібрування, зокрема перевірки відповідності фазового зсуву чвертьхвильової пластини заданій довжині хвилі лазерного випромінювання [3, 5, 9].

Реєстрація поляризаційно-модульованих зображень здійснюється цифровою камерою з роздільною здатністю близько 20 Мпікс, оснащеною відповідним об'єктивом. Камера повинна забезпечувати ручне керування експозицією та коефіцієнтом підсилення, що дозволяє підтримувати однакові умови зйомки для всієї серії кадрів, необхідних для обчислення Стокс-параметрів. Важливою є можливість синхронізації роботи камери з перемиканням станів PSG та PSA, що мінімізує похибки, пов'язані з механічними коливаннями або нестабільністю положення оптичних елементів. Для підвищення точності вимірювань у систему можуть бути введені процедури темної та flat-field корекції [1, 3, 24].

Обчислення, керування та візуалізація результатів виконуються на персональному комп'ютері (наприклад, на базі процесора AMD Ryzen 5) з використанням спеціалізованого програмного забезпечення. Програмний комплекс забезпечує керування апаратними компонентами системи, збереження експериментальних даних, обчислення компонент вектора Стокса та похідних поляризаційних параметрів, а також реалізацію алгоритмів автоматизованого контролю якості кристалів. Для цього можуть використовуватися середовища Visual Studio та MATLAB або їхні програмні аналоги, що забезпечують гнучкість реалізації алгоритмів та зручність аналізу результатів [3, 9, 11].

Координація роботи моторизованих вузлів, синхронізація з камерою та реалізація низькорівневого керування здійснюються за допомогою окремого блока керування на базі мікроконтролера. До його складу входять драйвери

крокових двигунів, інтерфейси обміну даними та засоби контролю положення оптичних елементів. Така архітектура забезпечує відтворюваність вимірювань, автоматизацію процесу зйомки та можливість подальшої інтеграції системи у виробничі або лабораторні лінії неруйнівного контролю.

Таким чином, апаратна частина системи відео-Стокс поляриметрії являє собою комплекс взаємопов'язаних оптичних, механічних та електронних компонентів, що забезпечують просторово-розподілене вимірювання поляризаційних характеристик оптично активних кристалів і створюють основу для кількісної оцінки їх структурної якості та виявлення дефектів у рамках неруйнівного контролю [1, 2, 9].



Рис 3.1 – Блок схема алгоритму формування зображень

Таблиця 3.1. Режими вимірювання [3]

№ кадру	Конфігурація PSA	Орієнтація аналізатора	Орієнтація ($\lambda/4$) пластини	Результат
1	Лінійний аналіз	0	—	$I_0(x,y)$
2	Лінійний аналіз	90	—	$I_{90}(x,y)$
3	Лінійний аналіз	45	—	$I_{45}(x,y)$
4	Лінійний аналіз	135	—	$I_{135}(x,y)$
5	Циркулярний аналіз	0	+45	$I_R(x,y)$
6	Циркулярний аналіз	0	-45	$I_L(x,y)$

Вимірювальний протокол передбачає дискретні кути θ , ϕ , та ψ , що висуває вимоги до повторюваності позиціювання та низького люфту механічної системи [9, 13]. Для цієї задачі найбільш доцільними є крокові двигуни (наприклад, NEMA 11 або NEMA 17), що працюють у режимі мікрокроку (типово $1/20$). Такий привід забезпечує високу повторюваність, можливість утримання положення без додаткового зворотного зв'язку та просту реалізацію профілів прискорення/гальмування, що мінімізує вібрації оптичних вузлів. Для підвищення метрологічної обґрунтованості та компенсації можливих пропусків кроків у разі зовнішніх навантажень доцільно застосовувати кутовий енкодер (оптичний або магнітний) розрядністю 12–14 bit на валу поворотного вузла; це дозволяє реалізувати контроль фактичного кута та підвищити точність позиціювання до рівня порядку 10^{-4} і краще.

Застосування сервоприводів RC-класу в подібних вимірювальних системах, хоча й можливе, є менш бажаним через наявність люфтів редуктора, обмежену повторюваність позиціювання та потенційну нестабільність під навантаженням. У задачах поляриметрії ці фактори можуть перетворюватися на

систематичні похибки, оскільки відхилення кутів аналізу напряму впливає на точність відновлення компонент вектора Стокса.

Для керування кроковими двигунами можуть застосовуватися драйвери класу DRV8825 або A4988 (економічні рішення), однак з точки зору зниження шуму, підвищення плавності ходу та зменшення мікрівібрацій більш доцільними є драйвери серії TMC2209/TMC2226. Плавність руху є практично значущою, оскільки мікрівібрації в оптичному вузлі можуть погіршувати різницеві оцінки інтенсивностей і підвищувати шум у картах S_1, S_2, S_3 , а отже, і в похідних параметрах $\alpha, DoLP, P$.

Таблиця 3.2 Порівняння приводів для поворотних вузлів PSA/PSG

Критерій	Кроковий двигун (NEMA 11/17)	RC-серво	Кроковий + енкодер
Повторюваність кута	Висока (за правильної механіки)	Середня/низька	Дуже висока
Люфт	Низький (з якісним вузлом)	Відчутний	Мінімізується контролем
Реалізація	Проста	Проста	Середня/складніша
Стабільність у часі	Висока	Схильна до дрейфу	Висока
Придатність для поляриметрії	Висока	Обмежена	Найкраща

У системі лазерної відео-Стокс поляриметрії мікроконтролер виконує ключову функцію апаратної синхронізації між поляризаційною модуляцією та реєстрацією зображень. На відміну від програмної синхронізації на рівні операційної системи, використання окремого контролера дозволяє забезпечити відтворені часові інтервали, мінімізувати джиттер та зменшити вплив затримок, пов'язаних з роботою ПК.

Основними задачами мікроконтролера у даній системі є керування моторизованими поворотними вузлами аналізатора та фазової пластини, фор-

мування апаратного тригерного сигналу для камери, реалізація стабільних часових затримок для механічного “устанення” оптичних елементів, а також організація зв’язку з персональним комп’ютером для отримання команд та передачі службової інформації.

Для системи, у якій необхідно керувати одним або двома кроковими двигунами, оптимальним є застосування мікроконтролерів сімейства STM32. Контролери цього класу мають апаратні таймери з високою роздільною здатністю, що дозволяє точно формувати імпульси керування кроковими двигунами та стабільні сигнали запуску камери. Наявність декількох незалежних таймерів дає змогу паралельно реалізувати генерацію кроків для двигунів, затримки стабілізації та тригерні імпульси без взаємного впливу процесів.

З практичної точки зору, моделі STM32F103 або STM32F401 є найбільш збалансованими для лабораторної та дослідницької реалізації. Вони мають достатню кількість ліній вводу-виводу для керування драйверами двигунів, кінцевими вимикачами та тригером камери, підтримують апаратний UART або USB для зв’язку з ПК, а також забезпечують стабільну роботу в режимах реального часу. Застосування відладочних плат типу Nucleo або “Blue Pill” суттєво спрощує розробку, налагодження та подальшу модифікацію системи.

Синхронізація камери у системі відео-Стокс поляриметрії зазвичай реалізується за допомогою апаратного тригера. У цьому випадку камера працює в режимі зовнішнього запуску, а мікроконтролер формує логічний імпульс заданої тривалості, який ініціює експозицію. Такий підхід дозволяє жорстко прив’язати момент зйомки до положення аналізатора або фазової пластини. Типовий алгоритм роботи виглядає наступним чином: мікроконтролер повертає оптичний елемент у задане положення, витримує паузу стабілізації, після чого формує тригерний імпульс для камери та очікує підтвердження завершення експозиції або заданий часовий інтервал. Лише після цього система переходить до наступного поляризаційного стану.

Використання мікроконтролерів STM32 дозволяє реалізувати такі алгоритми на апаратному рівні з мінімальними часовими похибками. Це особливо

важливо для поляриметричних вимірювань, де навіть невеликі зсуви у часі між положенням аналізатора та моментом зйомки можуть призводити до систематичних похибок у відновленні компонент вектора Стокса.

Як більш просту альтернативу можна розглядати платформи Arduino. Контролер Arduino Mega забезпечує достатню кількість ліній вводу-виводу та простоту програмування, проте його часові характеристики є менш стабільними через відсутність розвинених апаратних таймерів та залежність від програмних затримок. Arduino Due, побудований на ARM-архітектурі, має кращі таймінгові можливості, однак за гнучкістю та точністю все ж поступається STM32, особливо у задачах жорсткої синхронізації [11, 24].

Ще одним варіантом є використання ESP32, який поєднує мікроконтролер з бездротовими інтерфейсами зв'язку. Такий підхід може бути доцільним у разі потреби реалізації віддаленого керування або веб-інтерфейсу. Проте наявність операційної системи реального часу та фонових процесів бездротового зв'язку може ускладнювати досягнення максимально стабільних таймінгів, що робить ESP32 менш бажаним для задач прецизійної поляриметрії.

Отже, з урахуванням вимог до точності, стабільності та відтворюваності часових параметрів, найбільш доцільним вибором для системи відео-Стокс поляриметрії є застосування мікроконтролерів сімейства STM32.

Коректна синхронізація між перемиканням поляризаційних станів та моментом реєстрації зображення є критичною умовою відновлення компонент вектора Стокса з мінімальною похибкою [9, 11]. Найбільш надійною з метрологічної точки зору є апаратна синхронізація, за якої мікроконтролер керування формує TTL-тригерний імпульс, що безпосередньо ініціює експозицію камери. У цьому випадку камера працює в режимі зовнішнього тригера, а момент зйомки жорстко прив'язаний до положення аналізатора та фазової пластини. Така схема дозволяє мінімізувати часовий джиттер та виключити вплив нестабільності програмного середовища персонального комп'ютера.

Якщо камера не підтримує режим зовнішнього тригера, синхронізація може бути реалізована на рівні програмного забезпечення через SDK або інтерфейс USB. У цьому випадку мікроконтролер повідомляє ПК про досягнення заданого кутового положення, після чого програмне забезпечення ініціює захоплення кадру. Такий підхід є функціонально працездатним, проте поступається апаратному варіанту за стабільністю часових параметрів і може вносити додаткові систематичні похибки, особливо при швидкій зміні станів аналізатора [9, 11, 24].

3.2 Формування поляризаційних карт

Принцип дії відео-Стокс поляриметра полягає у відновленні просторово-розподіленого вектора Стокса на основі серії інтенсивнісних зображень,

о

т

р

и

м Компонента повної інтенсивності визначається як сума інтенсивностей, виміряних при ортогональних орієнтаціях аналізатора,

н

и

$$S_0(x, y) = I_0(x, y) + I_{90}(x, y) \quad (3.1)$$

х

Лінійні компоненти вектора Стокса обчислюються за різницею відповідних інтенсивностей,

р

$$S_1(x, y) = I_0(x, y) - I_{90}(x, y), S_2(x, y) = I_{45}(x, y) - I_{135}(x, y) \quad (3.2)$$

р

і Циркулярна компонента визначається як різниця між правою та лівою циркулярними проєкціями,

н

и

х

$$S_3(x, y) = I_R(x, y) - I_L(x, y). \quad (3.3)$$

На основі компонент вектора Стокса обчислюються похідні поляризаційні параметри, які мають безпосередній фізичний зміст для аналізу анізотропних кристалів [1, 9, 13]. Ступінь лінійної поляризації характеризує відносний внесок лінійно поляризованої складової у загальну інтенсивність,

$$DoLP(x, y) = \frac{\sqrt{S_1^2(x, y) + S_2^2(x, y)}}{S_0(x, y)}. \quad (3.4)$$

Ступінь циркулярної поляризації визначається як

$$DoCP(x, y) = \frac{|S_3(x, y)|}{S_0(x, y)} \quad (3.5)$$

Азимут лінійної поляризації, який відображає орієнтацію площини коливань електричного вектора, обчислюється за співвідношенням

$$\psi(x, y) = \frac{1}{2} \arctan \left(\frac{S_2(x, y)}{S_1(x, y)} \right) \quad (3.6)$$

Еліптичність поляризації описується через кут еліптичності

$$\chi(x, y) = \frac{1}{2} \arcsin \left(\frac{S_3(x, y)}{\sqrt{S_1^2(x, y) + S_2^2(x, y) + S_3^2(x, y)}} \right) \quad (3.7)$$

Отримані карти $\alpha(x, y)$, $\beta(x, y)$, $P(x, y)$ та $DoLP(x, y)$ формують основу для подальшого структурного та статистичного аналізу оптично активних кристалів [6, 17].

Оптично активні кристали, зокрема кварц, характеризуються здатністю повертати площину поляризації світла в процесі його поширення [7, 19]. У термінах вектора Стокса це проявляється у систематичному зсуві азимуту поляризації, що фіксується на картах $\alpha(x, y)$, а також у зміні співвідношення компонент S_1 та S_2 [9, 13]. У випадках, коли оптична активність поєднується з двопронезаломленням або внутрішніми напруженнями, можливе виникнення еліптичної поляризації, що відображається у ненульових значеннях S_3 та $DoCP$ [6, 14].

Для ідеально однорідного кристала карти азимуту та ступеня поляризації мають плавний характер з незначними статистичними флуктуаціями [17]. Поява локальних аномалій, різких переходів або зон зниженого $P(x, y)$ є індикатором структурних порушень, таких як мікротріщини, доменні межі, включення або залишкові механічні напруження [6, 9, 13].

3.3 Критерії виявлення браку та дефектів кристалів

Для неруйнівного контролю цілісності та якості оптично активних кристалів доцільно використовувати сукупність поляризаційних індикаторів [6, 9, 13]. Зростання дисперсії азимуту поляризації вказує на $\sigma(\psi)$ підвищену неоднорідність орієнтації оптичних осей, що часто пов'язано з внутрішніми напруженнями або доменною структурою [7, 14, 19]. Локальні провали ступеня лінійної поляризації $DoLP$ свідчать про деполаризацію, зумовлену розсіянням на дефектах, мікротріщинах або шорстких поверхнях [6, 11]. Аномальні значення S_3 , $DoCP$ або χ можуть вказувати на наявність паразитної еліптичності, що не є характерною для однорідного зразка [9, 13].

Особливо інформативними є градієнтні карти $|\nabla\alpha(x, y)|$ та $|\nabla P(x, y)|$, які дозволяють візуалізувати межі доменів та тріщини у вигляді контрастних лінійних структур навіть у випадках, коли середні значення параметрів змінюються незначно [6, 17].

Алгоритм автоматизованого контролю якості реалізується на рівні програмного забезпечення та включає послідовні етапи попередньої обробки, поляриметричного аналізу та прийняття рішення [1, 3, 8]. Після зчитування шести інтенсивнісних знімків виконується віднімання темного кадру, нормалізація інтенсивності та, за потреби, легка просторово-частотна фільтрація для зниження шуму [6, 9]. Далі обчислюються компоненти вектора Стокса та похідні параметри $\alpha(x, y)$, $\chi(x, y)$, $P(x, y)$ і $DoLP(x, y)$ [9, 13].

На основі цих карт формується бінарна маска дефектів, наприклад, за умовами зниженого $P(x, y)$ нижче заданого порогу, перевищення модуля градієнта азимуту або виходу локальних значень за допустимий інтервал [6, 17]. Після цього обчислюються інтегральні метрики, такі як відносна площа дефектних зон, кількість просторово зв'язаних дефектних областей, максимальні та середні значення градієнтів, а також стандартні відхилення поляризаційних параметрів [11, 17]. Порівняння отриманих величин з еталонними або граничними значеннями дозволяє сформулювати підсумкове рішення типу «придатний зразок» або «брак» [1, 6, 8].

3.4 Принцип роботи програмного забезпечення для неруйнівного контролю анізотропних зразків

3.4.1 Відновлення вектора Стокса та поляризаційних параметрів

Перше програмне забезпечення призначене для обчислення повного просторово-розподільного вектора Стокса на основі серії поляризаційних вимірювань інтенсивності. Воно є базовим модулем усього комплексу, оскільки всі подальші етапи аналізу спираються саме на результати цього ПЗ.

Принцип роботи модуля полягає у тому, що стан поляризації світла, яке пройшло через оптично активний зразок, відновлюється за допомогою шести незалежних вимірювань інтенсивності при різних станах аналізатора. Кожне вимірювання несе інформацію про певну складову поляризаційного стану, а їх

комбінація дозволяє повністю реконструювати вектор Стокса у кожній точці зображення.

Після відновлення компонент вектора Стокса здійснюється перехід до нормованих та інваріантних поляризаційних параметрів, які не залежать від абсолютної інтенсивності освітлення і тому є зручними для кількісного аналізу.

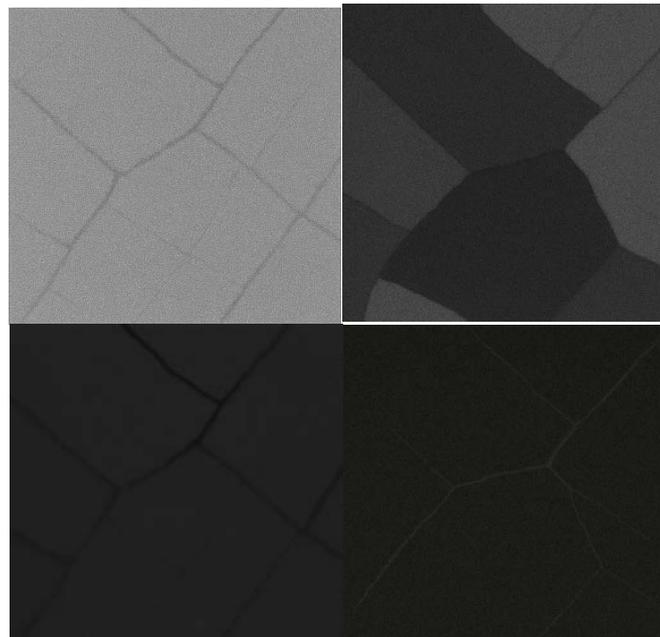


Рис.3.2 - Двовимірні зображення інтенсивності $I_0(x,y)$, $I_{45}(x,y)$, $I_{90}(x,y)$, $I_{135}(x,y)$



Рис.3.3 - Зображення інтенсивності при аналізі правокугової поляризації(зправа) та аналізі лівокугової поляризації(зліва)

На вхід програми подається набір із шести двовимірних зображень інтенсивності, які лежать у папці $C:\Users\Admin\Desktop\stokes_project$:

- $I_0(x, y)$ — інтенсивність при аналізі лінійної поляризації 0° ;
- $I_{90}(x, y)$ — інтенсивність при аналізі 90° ;
- $I_{45}(x, y)$ — інтенсивність при аналізі 45° ;
- $I_{135}(x, y)$ — інтенсивність при аналізі 135° ;
- $I_R(x, y)$ — інтенсивність при аналізі правокугової поляризації;
- $I_L(x, y)$ — інтенсивність при аналізі лівокугової поляризації.

Ці зображення можуть бути отримані як експериментально, так і в результаті моделювання. На основі отриманих знімків обчислюються компоненти вектора Стокса: $S_0(x, y)$ — повна інтенсивність, $S_1(x, y)$, $S_2(x, y)$ — лінійні складові, $S_3(x, y)$ — кругова складова.

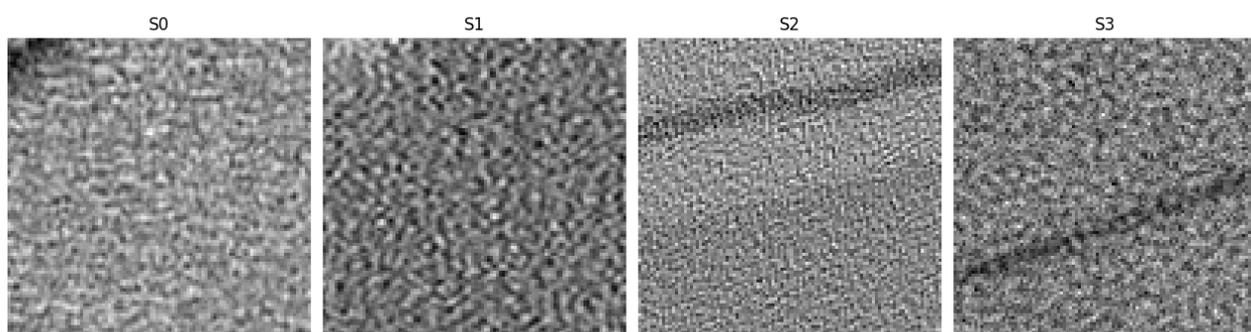


Рис.3.4 – Обчислені вектори Стокса

Для похідних поляризаційних карт потрібно розрахувати нормовані Стокс-параметри $s_1(x, y)$, $s_2(x, y)$, $s_3(x, y)$. Після цього маємо змогу визначити карти загальної поляризації, а саме:

- ступінь поляризації $P(x, y)$;
- ступінь лінійної поляризації $DoLP(x, y)$;
- ступінь кругової поляризації $DoCP(x, y)$;
- азимут лінійної поляризації $\alpha(x, y)$;
- еліптичність $\varepsilon(x, y)$.

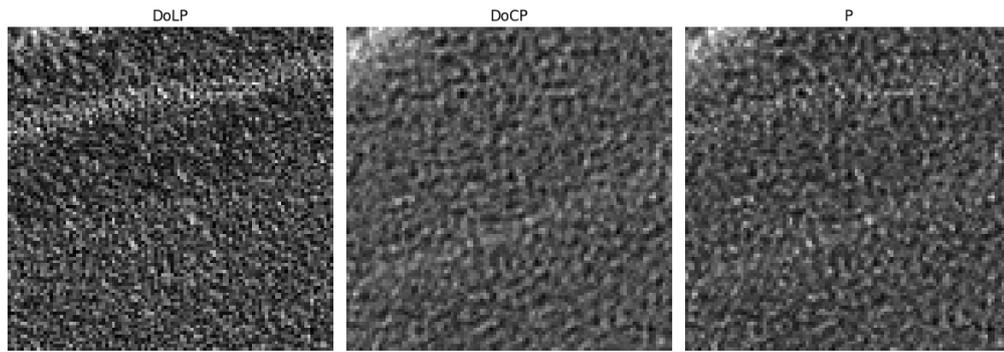


Рис.3.5 – Поляризаційні карти

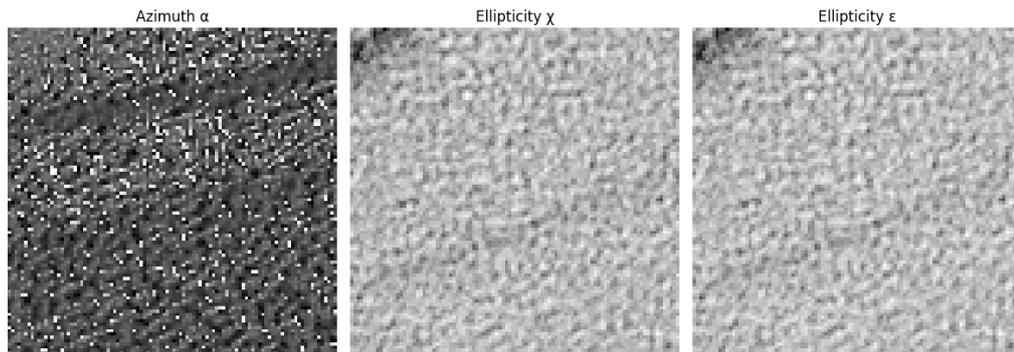


Рис.3.6 – Карти азимутів та еліптичностей

Програмні блоки, що використовуються:

- блок завантаження та нормування зображень;
- блок обчислення компонент вектора Стокса;
- блок обчислення нормованих параметрів;
- блок формування поляризаційних карт;
- блок візуалізації та збереження результатів.

3.4.2 Структурно-статистичний аналіз поляризаційних карт

Друге програмне забезпечення призначене для глибокого кількісного аналізу просторової структури поляризаційних карт, отриманих на попередньому етапі. Його основна мета — перехід від візуальної інтерпретації зображень до числових інваріантів, які характеризують стан доменної та мікроструктури зразка.

Принцип роботи ґрунтується на припущенні, що дефекти, напруження та неоднорідності в оптично активних матеріалах проявляються у вигляді:

- зростання статистичної мінливості параметрів;
- зменшення кореляційних довжин;
- появи фрактальних або хаотичних структур.

Саме тому у програмі реалізовано комбінацію статистичного, кореляційного та фрактального аналізу.

За допомогою інтерфейса програми обираємо карти у вигляді колажів по 3 знімки. Завантажується одна або кілька карт поляризаційних параметрів, які були отримані в ході роботи першої мікропрограми:

- $P(x, y)$,
- $DoLP(x, y)$,
- $\alpha(x, y)$,
- $\varepsilon(x, y)$.

Також задається область аналізу (ROI), в межах якої проводяться обчислення.

Результатом роботи ПЗ №2 є набір числових інваріантів:

- статистичні моменти 1–4 порядку (середнє, дисперсія, асиметрія, ексцес);
- параметри автокореляційної функції:
- кореляційна площа;
- кореляційні моменти;

- кореляційна довжина;
- фрактальна розмірність структури.

Ці параметри дозволяють кількісно оцінити ступінь впорядкованості або деградації структури зразка.

Програмні блоки

- блок вибору інформативної карти та ROI;
- блок статистичного аналізу;
- блок автокореляційного аналізу;
- блок фрактального аналізу (box-counting);
- блок формування числових характеристик.

3.4.3 Автоматизований блок контролю якості (норма / брак)

Третє програмне забезпечення є завершальним етапом комплексу та реалізує автоматизований контроль якості оптично активних кристалів. Воно виконує роль інтелектуального блоку прийняття рішень, який на основі набору поляризаційних критеріїв класифікує зразок як придатний або бракований.

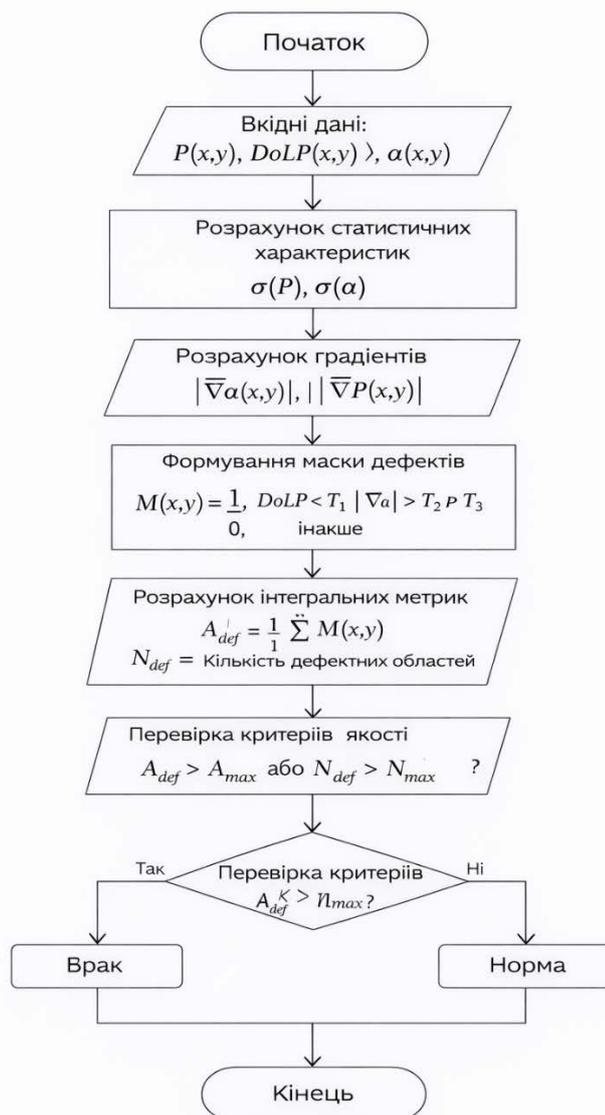


Рис.3.7 – Блок схема автоматизованого контролю якості оптичних кристалів

Принцип роботи полягає у виявленні просторових порушень поляризаційної структури, що є характерними ознаками дефектів кристалічної ґратки, тріщин або механічних напружень. Для цього використовується одночасний аналіз декількох незалежних критеріїв, що підвищує достовірність класифікації.

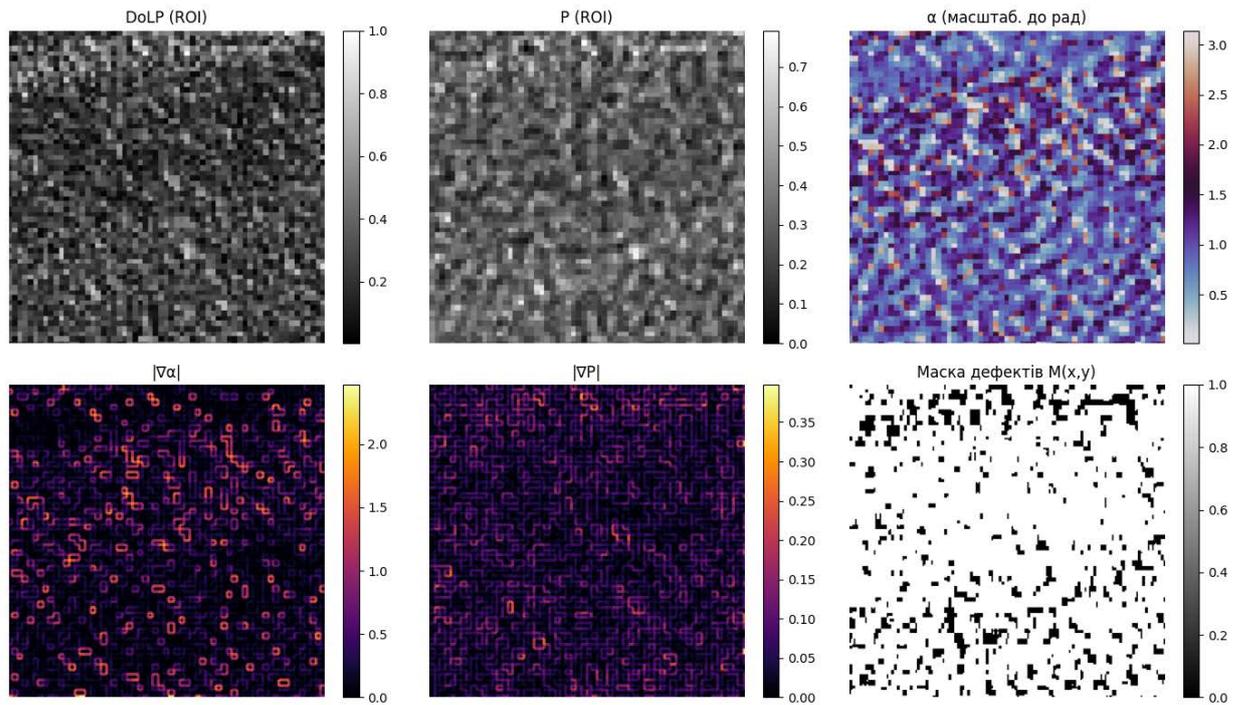


Рис.3.8 – Знімки кристалу кварцу, який було визначено як БРАК за допомогою ПЗ

Даний зразок класифікується як бракований у зв'язку з наявністю вираженої просторової неоднорідності поляризаційних параметрів, що проявляється у підвищеній флуктуаційності азимуту поляризації та локальних зонах зниженого ступеня поляризації. Карти DoLP та загального ступеня поляризації характеризуються нерівномірним розподілом значень із наявністю ділянок деполаризації, що свідчить про розсіяння випромінювання на дефектах внутрішньої структури зразка. Градієнтні карти азимуту та ступеня поляризації демонструють численні локальні максимуми, які вказують на різкі зміни орієнтації оптичних осей і наявність доменних меж, мікротріщин або залишкових механічних напружень. Сформована бінарна маска дефектів підтверджує значну площу просторово зв'язаних аномальних зон, що перевищує допустимий рівень для однорідного оптично активного кристала, унаслідок чого зразок не відповідає вимогам якості та підлягає відбраковуванню.

Через вікно програми вказуємо шлях до папки і до знімків. Для аналізу завантажуються карти поляризації (загальна право та лівоциркулярна) і карту розподілу азимутів $\alpha(x,y)$:

- $P(x, y)$;
- $DoLP(x, y)$;
- $\alpha(x, y)$.

У результаті роботи формується:

- стандартні відхилення $\sigma(P)$, $\sigma(\alpha)$;
- градієнтні карти $|\nabla P(x,y)|$, $|\nabla \alpha(x,y)|$;
- бінарна маска дефектів $M(x,y)$;
- інтегральні показники:
- відносна площа дефектів A_{def} ;
- кількість дефектних областей N_{def} ;
- фінальне рішення:
- «НОРМА» або «БРАК».

Програмні блоки

- блок аналізу статистичної мінливості;
- блок градієнтного аналізу;
- блок формування маски дефектів;
- блок інтегральної оцінки якості;
- блок прийняття рішення.

Для реалізації базових функцій ПЗ в середовищі розробки Visual Studio Code були встановлені бібліотеки. Призначення кожної з них зображено на таблиці 1.

Таб.3.3 – Використані бібліотеки

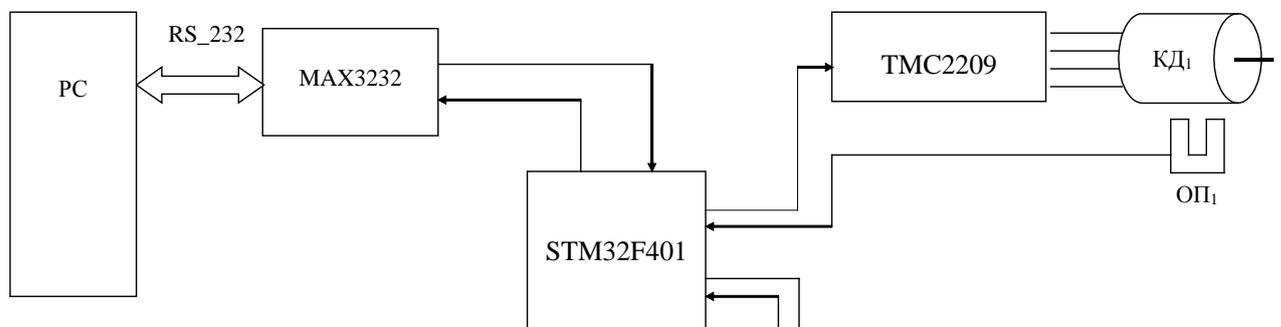
Бібліотека	Призначення
	чисельна обробка та матричні операції
	візуалізація поляризаційних карт
	робота з растровими зображеннями
	кореляційний аналіз, градієнти, морфологічні операції
	завантаження експериментальних знімків
	інтерактивний вибір вхідних даних

Розробка блока керування відеополяриметра

Для забезпечення універсальності роботи лазерного поляриметра пропонується використовувати оптомеханічний перетворювач поляризації, в якому фазові пластинки поляризатора і аналізатора (рис. 3.7) обертаються навколо своєї оптичної вісі. Фазові пластинки механічно з'єднані із обмотками крокових двигунів, які керуються і синхронізуються з персонального комп'ютера через систему спряження. У якості мікроконтролера для схеми керування кроковими двигунами обрано мікросхему STM32F401 фірми — 96 КБ. Завдяки 32-бітній архітектурі та високій тактовій частоті, контролер забезпечує прецизійне керування фазами двигуна. Контролер живиться постійним або змінним струмом напругою 9 В, споживання контролера у базовій конфігурації не більше 20мА.

Для узгодження рівнів інформаційних сигналів інтерфейса RS232 персонального комп'ютера і мікроконтролера пропонується застосувати перетворювач рівня MAX3232 фірми MAXIM. В якості драйверів і підсилювачів крокових двигунів використовуються мікросхеми TMC2209, для забезпечення зворотного зв'язку, контролю і синхронізації стану крокових двигунів (і відповідно фазових пластинок) використано оптопари АОТ128.

Представлена схема забезпечує можливість формування необхідного кута повороту фазових пластинок поляризатора і аналізатора, таким чином дозволяючи формувати необхідні значення параметрів вектора Стокса випромінювання на вході проводити повний комплекс досліджень елементів вектора Стокса і, відповідно, матриці Мюллера, з яких надалі розраховують діагностично важливі параметри лінійної та фазової анізотропії і ступінь поляризації. Швидкість обертання фазових пластинок поляризатора і аналізатора співвідносяться як 1:5, у цьому разі можна однозначно визначити всі 16 елементів матриці Мюллера [15].



3.6 Висновки до розділу 3

У розділі реалізовано синтез апаратно-програмного комплексу лазерної відеополяриметрії. Апаратна частина побудована на базі напівпровідникового лазера (650 нм), моторизованих блоків PSG/PSA з кроковими двигунами NEMA 17 та мікроконтролера STM32, що забезпечує жорстку синхронізацію фаз

аналізу з експозицією 20 мкс та камери. Розроблені програмні забезпечення інтегрує модуль обчислення повного вектора Стокса, формування поляризаційних карт (азимуту, еліптичності, ступеня поляризації) та алгоритми структурно-статистичного аналізу. Впроваджені критерії автоматизованого відбраковування на основі аналізу градієнтів та порогової фільтрації дозволяють ефективно виявляти мікродфекти, внутрішні напруження та неоднорідності в оптично активних кристалах, забезпечуючи об'єктивність неруйнівного контролю в реальному часі.

4 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

Науково-технічна розробка має право на існування та впровадження, якщо вона відповідає вимогам часу, як в напрямку науково-технічного прогресу та і в плані економіки. Тому для науково-дослідної роботи необхідно оцінювати економічну ефективність результатів виконаної роботи.

Проведення комерційного та технологічного аудиту науково-технічної розробки

Метою проведення комерційного і технологічного аудиту дослідження за темою «Система лазерної відеополяриметрії оптично анізотропних зразків» є оцінювання науково-технічного рівня та рівня комерційного потенціалу розробки, створеної в результаті науково-технічної діяльності.

Оцінювання науково-технічного рівня розробки та її комерційного потенціалу рекомендується здійснювати із застосуванням 5-ти бальної системи оцінювання за 12-ма критеріями [30].

Таблиця 4.1 – Результати оцінювання науково-технічного рівня і комерційного потенціалу розробки експертами

Критерії	Експерт (ПІБ, посада)		
	Бали:		
1. Технічна здійсненність концепції			
2. Ринкові переваги (наявність аналогів)			
3. Ринкові переваги (ціна продукту)			
4. Ринкові переваги (технічні властивості)			
5. Ринкові переваги (експлуатаційні витрати)			
6. Ринкові перспективи (розмір ринку)			
7. Ринкові перспективи (конкуренція)			
8. Практична здійсненність (наявність фахівців)			
9. Практична здійсненність (наявність фінансів)			
10. Практична здійсненність (необхідність нових матеріалів)			
11. Практична здійсненність (термін реалізації)			
12. Практична здійсненність (розробка документів)			
Сума балів			
Середньоарифметична сума балів $СБ_c$			

За результатами розрахунків, наведених в таблиці 4.1, зробимо висновок щодо науково-технічного рівня і рівня комерційного потенціалу розробки. При цьому використаємо рекомендації, наведені в [30].

Згідно проведених досліджень рівень комерційного потенціалу розробки за темою «Система лазерної відеополяриметрії оптично анізотропних зразків» становить 40,3 бала, що, відповідно до [30], свідчить про комерційну важливість проведення даних досліджень (рівень комерційного потенціалу розробки високий).

4.2 Розрахунок узагальненого коефіцієнта якості розробки

Узагальнений коефіцієнт якості (B_n) для нового технічного рішення розраховуємо за формулою [31]:

де k – кількість найбільш важливих технічних показників, які впливають на якість нового технічного рішення;

α_i – коефіцієнт, який враховує питому вагу i -го технічного показника в загальній якості розробки. Коефіцієнт α_i визначається експертним шляхом і при

ц

ь β_i – відносне значення i -го технічного показника якості нової розробки.

о Результати порівняння зведемо до таблиці 4.2.

м

у

м

а

є

в

и

к

о

Таблиця 4.2 – Порівняння основних параметрів розробки та аналога.

Показники (параметри)	Одиниця вимірювання	Аналог	Проектований продукт	Відношення параметрів нової розробки до аналога	Питома вага показника
Спектральний діапазон	нм				
Роздільна здатність зображень	пікс	640x480	640x481		
Діаметр оптичного поля зображення	мм				
Усереднена похибка визначення параметрів анізотропії					
Час формування і обробки зображень	мс				

Узагальнений коефіцієнт якості (B_n) для нового технічного рішення складе:

Отже за технічними параметрами, згідно узагальненого коефіцієнту якості розробки, науково-технічна розробка переважає існуючі аналоги приблизно в 1,55 рази.

4.3 Розрахунок витрат на проведення науково-дослідної роботи

Витрати, пов'язані з проведенням науково-дослідної роботи на тему планування, обліку і калькулювання собівартості науково-дослідної роботи групуємо за відповідними статтями.

3.1 Витрати на оплату праці

Основна заробітна плата дослідників

Витрати на основну заробітну плату дослідників (Z_o) розраховуємо у відповідності до посадових окладів працівників, за формулою [30]:

де k – кількість посад дослідників залучених до процесу досліджень;

M_{ni} – місячний посадовий оклад конкретного дослідника, грн;

– число днів роботи конкретного дослідника, дн.;

T_p – середнє число робочих днів в місяці, $T_p=21$ дні.

$$Z_o = 23600,00 \cdot 21 / 21 = 23600,00 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 4.3 – Витрати на заробітну плату дослідників

Найменування посади	Місячний посадовий оклад, грн	Оплата за робочий день, грн	Число днів роботи	Витрати на заробітну плату, грн
Керівник проекту (проектний менеджер)				
Інженер-оптик (розробник систем лазерної поляриметрії)				
Консультант (провідний фахівець лазерної фізики)				
Лаборант				
Всього				

Основна заробітна плата робітників

Витрати на основну заробітну плату робітників (Z_p) за відповідними найменуваннями робіт НДР на тему «Система лазерної відеополяриметрії оптично анізотропних зразків» розраховуємо за формулою:

де C_i – погодинна тарифна ставка робітника відповідного розряду, за виконану відповідну роботу, грн/год;

– час роботи робітника при виконанні визначеної роботи, год.

Погодинну тарифну ставку робітника відповідного розряду C_i можна визначити за формулою:

де M_M – розмір мінімальної місячної заробітної плати, прийmemo $M_M=8000,00$ грн;

K_i – коефіцієнт міжкваліфікаційного співвідношення (табл. Б.2, додаток Б) [30];

K_c – мінімальний коефіцієнт співвідношень місячних тарифних ставок;

T_p – середнє число робочих днів в місяці, приблизно $T_p = 21$ дн;

z_m – тривалість зміни, год.

$$C_l = 8000,00 \cdot 1,10 \cdot 1,25 / (21 \cdot 8) = 65,48 \text{ грн.}$$

$$Z_{pl} = 65,48 \cdot 11,00 = 720,24 \text{ грн.}$$

Таблиця 4.4 – Величина витрат на основну заробітну плату робітників

Найменування робіт	Тривалість роботи, год	Розряд роботи	Тарифний коефіцієнт	Погодинна тарифна ставка, грн	Величина оплати на робітника грн
Монтаж обладнання					
Підготовка робочого місця інженера-оптика					
Встановлення програмного забезпечення розробки систем лазерної відеополяризації					
Вхідний контроль компонентів та дослідних вузлів					
Монтаж компонентів досліджуваної системи					
Випробування дослідних блоків					
Налагодження блоків та вузлів					
Контроль роботи базових блоків системи в експерименті					
Технічна підтримка експерименту					
Всього					

Додаткова заробітна плата дослідників та робітників

Додаткову заробітну плату розраховуємо як 10 ... 12% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою:

де $H_{\text{доп}}$ – норма нарахування додаткової заробітної плати. Прийmemo 11%.

$$Z_{\text{доп}} = (86271,43 + 7757,29) \cdot 11 / 100\% = 10343,16 \text{ грн.}$$

4.3.2 Відрахування на соціальні заходи

Нарахування на заробітну плату дослідників та робітників розраховуємо як 22% від суми основної та додаткової заробітної плати дослідників і робітників за формулою:

де H_{zn} – норма нарахування на заробітну плату. Приймаємо 22%.

$$Z_n = (86271,43 + 7757,29 + 10343,16) \cdot 22 / 100\% = 22961,81 \text{ грн.}$$

4.3.3 Сировина та матеріали

Витрати на матеріали (M), у вартісному вираженні розраховуються окремо по кожному виду матеріалів за формулою:

де H_j – норма витрат матеріалу j -го найменування, кг;

– кількість видів матеріалів;

C_j – вартість матеріалу j -го найменування, грн/кг;

K_j – коефіцієнт транспортних витрат, ($K_j = 1,1 \dots 1,15$);

B_j – маса відходів j -го найменування, кг;

C_{vj} – вартість відходів j -го найменування, грн/кг.

$$M_1 = 2,000 \cdot 202,00 \cdot 1,07 - 0 \cdot 0 = 432,28 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 4.5 – Витрати на матеріали

Найменування матеріалу, марка, тип, сорт	Ціна за 1 од, грн	Норма витрат, од	Величина відходів, од	Ціна відходів, грн/од	Вартість витраченого матеріалу, грн
Папір канцелярський офісний SENIOR Max 500/80 (A4)					
Папір для заміток SENIOR 500/60(A5)					
Папір креслярський (A1)					
Папір креслярський (A3)					
Начиння канцелярське					
Органайзер офісний					
Картридж для принтера графічного (HP-					
Картридж для принтера (HP-					
Диск оптичний					
Диск оптичний					
FLASH-пам'ять (64 ГБ)					
Тека для паперів					
Провід живлення					
Провід монтажний					
Інші матеріали					
Всього					

4.3.4 Розрахунок витрат на комплектуючі

Витрати на комплектуючі (K_6), які використовують при проведенні НДР на тему «Система лазерної відеополяриметрії оптично анізотропних зразків», розраховуємо, згідно з їхньою номенклатурою, за формулою:

де H_j – кількість комплектуючих j -го виду, шт.;

C_j – покупна ціна комплектуючих j -го виду, грн;

K_j – коефіцієнт транспортних витрат, ($K_j = 1,1 \dots 1,15$).

$K_e = 1 \cdot 6699,00 \cdot 1,07 = 7167,93$ грн.

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 4.6– Витрати на комплектуючі

Найменування комплектуючих	Кількість, шт.	Ціна за штуку, грн	Сума, грн
Лазер напівпровідниковий 50 мВт, 635 нм			
Блок формування і модуляції поляризації світла			
Оптичний модуль модулятора (коліматор, поляризатор, фільтр)			
Предметний столик			
Оптичний модуль аналізатора поляризації (аналізатор, фазова пластина)			
Система реєстрації зображень (відеокамера 20 Мпікс, об'єктив) Reolink Argus Series			
Блок управління та обробки даних			
Система інтерфейсів			
Стабілізатор напруги LM7805			
Випромінювач			
Приймач			
Оптичний датчик			
З'єднувальні елементи (комплект)			
Всього			

4.3.5 Спецустаткування для наукових (експериментальних) робіт

Балансову вартість спецустаткування розраховуємо за формулою:

де C_i – ціна придбання одиниці спецустаткування даного виду, марки, грн;

$C_{пр.і}$ – кількість одиниць устаткування відповідного найменування, які придбані для проведення досліджень, шт.;

K_i – коефіцієнт, що враховує доставку, монтаж, налагодження устаткування тощо, ($K_i = 1,10...1,12$);

– кількість найменувань устаткування.

$$B_{спец} = 9620,00 \cdot 1 \cdot 1,07 = 10293,40 \text{ грн.}$$

Отримані результати зведемо до таблиці:

Таблиця 4.7 – Витрати на придбання спецустаткування по кожному виду

Найменування устаткування	Кількість, шт	Ціна за одиницю, грн	Вартість, грн
Осцилограф			
Оптичний мікроскоп			
Монітор 27" Samsung Curved LS27C366 (LS27C366EAIXCI)			
Управляючий комп'ютер оптико-електронної експертної системи ARTLINE X48 v36 (X48v36) AMD Ryzen 5 3600 / RAM 16ГБ / HDD 1ТБ + SSD 480ГБ / AMD Radeon RX 6600 8ГБ			
Всього			

4.3.6 Програмне забезпечення для наукових (експериментальних) робіт

Балансову вартість програмного забезпечення розраховуємо за формулою:

де $C_{прог}$ – ціна придбання одиниці програмного засобу даного виду, грн;

$C_{прог.і}$ – кількість одиниць програмного забезпечення відповідного найменування, які придбані для проведення досліджень, шт.;

K_i – коефіцієнт, що враховує інсталяцію, налагодження програмного засобу тощо, ($K_i = 1,10 \dots 1,12$);

– кількість найменувань програмних засобів.

$$V_{прз} = 405,00 \cdot 2 \cdot 1,1 = 891,00 \text{ грн.}$$

Отримані результати зведемо до таблиці:

Таблиця 4.8 – Витрати на придбання програмних засобів по кожному виду

Найменування програмного засобу	Кількість, шт	Ціна за одиницю, грн	Вартість, грн
Доступ до мережі Internet (високошвидкісний) грн/місяць			
Пакет MATLAB SIMULINK			
Пакет Visual System Simulator			
Пакет Visual Studio			
Всього			

4.3.7 Амортизація обладнання, програмних засобів та приміщень

В спрощеному вигляді амортизаційні відрахування по кожному виду обладнання, приміщень та програмному забезпеченню тощо, розраховуємо з використанням прямолінійного методу амортизації за формулою:

де C_0 – балансова вартість обладнання, програмних засобів, приміщень тощо, які використовувались для проведення досліджень, грн;

$t_{вик}$ – термін використання обладнання, програмних засобів, приміщень під час досліджень, місяців;

T_e – строк корисного використання обладнання, програмних засобів, приміщень тощо, років.

$$A_{обл} = (24699,00 \cdot 2) / (3 \cdot 12) = 1372,17 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 4.9 – Амортизаційні відрахування по кожному виду обладнання

Найменування обладнання	Балансова вартість, грн	Строк корисного використання, років	Термін використання обладнання, місяців	Амортизаційні відрахування, грн

Персональний комп'ютер розробника оптичних систем				
Електронно-графічна система проектування				
Робоче місце інженера-оптика				
Робоче місце фахівця				
Монтажне обладнання				
Приміщення лабораторії розробки та дослідження				
ОС Windows				
Прикладний пакет Microsoft Office 2021 Professional Plus				
Мережеве обладнання передачі цифрових даних				
Оргтехніка				
Всього				

4.3.8 Паливо та енергія для науково-виробничих цілей

Витрати на силову електроенергію (B_e) розраховуємо за формулою:

де W_{yi} – встановлена потужність обладнання на визначеному етапі розробки, кВт;

– тривалість роботи обладнання на етапі дослідження, год;

C_e – вартість 1 кВт-години електроенергії, грн; прийmemo $C_e = 12,56$ грн;

K_{eni} – коефіцієнт, що враховує використання потужності, $K_{eni} < 1$;

η

$$B_e = 0,25 \cdot 240,0 \cdot 12,56 \cdot 0,95 / 0,97 = 753,60 \text{ грн.}$$

– Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

к

о

Таблиця 4.10 – Витрати на електроенергію

Найменування обладнання	Встановлена потужність, кВт	Тривалість роботи, год	Сума, грн
Персональний комп'ютер розробника оптичних систем Ascer AMD			
Електронно-графічна система проектування			
Робоче місце інженера-оптика			
Робоче місце фахівця			
Монтажне обладнання			
Мережеве обладнання передачі цифрових даних			
Оргтехніка			
Осцилограф			
Лазер напівпровідниковий 50 мВт, 635 нм			
Управляючий комп'ютер оптико-електронної експертної системи ARTLINE X48 v36 (X48v36) AMD Ryzen 5 3600 / RAM 16ГБ / HDD 1ТБ + SSD 480ГБ / AMD Radeon RX 6600 8ГБ			
Всього			

4.3.9 Службові відрядження

Витрати за статтею «Службові відрядження» розраховуємо як 20...25% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою:

де H_{cb} – норма нарахування за статтею «Службові відрядження», приймемо $H_{cb} = 20\%$.

$$B_{cb} = (86271,43 + 7757,29) \cdot 20 / 100\% = 18805,74 \text{ грн.}$$

Витрати на роботи, які виконують сторонні підприємства, установи і організації

Витрати розраховуємо як 30...45% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою:

де H_{cn} – норма нарахування за статтею «Витрати на роботи, які виконують сторонні підприємства, установи і організації», приймемо $H_{cn} = 33\%$.

$$B_{cn} = (86271,43 + 7757,29) \cdot 33 / 100\% = 31029,48 \text{ грн.}$$

4.3.11 Інші витрати

Витрати за статтею «Інші витрати» розраховуємо як 50...100% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою:

де H_{ib} – норма нарахування за статтею «Інші витрати», приймемо $H_{ib} =$

$$I_b = (86271,43 + 7757,29) \cdot 65 / 100\% = 61118,67 \text{ грн.}$$

4.3.12 Накладні (загальновиробничі) витрати

Витрати за статтею «Накладні (загальновиробничі) витрати» розраховуємо як 100...150% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою:

де $H_{нзв}$ – норма нарахування за статтею «Накладні (загальновиробничі) витрати», приймемо $H_{нзв} = 105\%$.

$$B_{нзв} = (86271,43 + 7757,29) \cdot 105 / 100\% = 98730,16 \text{ грн.}$$

Витрати на проведення науково-дослідної роботи на тему «Система лазерної відеополяриметрії оптично анізотропних зразків» розраховуємо як суму всіх попередніх статей витрат за формулою:

$$B_{заг} = 86271,43 + 7757,29 + 10343,16 + 22961,81 + 9462,01 + 46359,89$$

Загальні витрати ZB на завершення науково-дослідної (науково-технічної) роботи та оформлення її результатів розраховується за формулою:

$$ZB = 496928,86 / 0,95 = 523083,01 \text{ грн.}$$

4.4 Розрахунок економічної ефективності науково-технічної розробки при її можливій комерціалізації потенційним інвестором

Результати дослідження проведені за темою «Система лазерної відеополяриметрії оптично анізотропних зразків» передбачають комерціалізацію протягом 4-х років реалізації на ринку.

В цьому випадку майбутній економічний ефект буде формуватися на основі таких даних:

ΔN – збільшення кількості споживачів пристрою, у періоди часу, що аналізуються, від покращення його певних характеристик;

Показник	1-й рік	2-й рік	3-й рік	4-й рік
Збільшення кількості споживачів, осіб				

N – кількість споживачів які використовували аналогічний пристрій у році

$\pm \Delta C_o$ – зміна вартості пристрою від впровадження результатів науково-

т

е

х

н

і

ч

н

о

ї

Можливе збільшення чистого прибутку у потенційного інвестора $\Delta \Pi_i$ для кожного із 4-х років, протягом яких очікується отримання позитивних результатів від можливого впровадження та комерціалізації науково-технічної розробки, розраховуємо за формулою [30]:

$$\Delta \Pi_i = (\pm \Delta C_o \cdot N + C_o \cdot \Delta N)_i \cdot \lambda \cdot \rho \cdot \left(1 - \frac{\rho}{100}\right), \quad (4.19)$$

де λ – коефіцієнт, який враховує сплату потенційним інвестором податку на додану вартість. У 2025 році ставка податку на додану вартість складає 20%,

о

з

р

о

б

к

и

м

е

м

п

р

и

и

е

м

о

1

Грн.

А

А

а коефіцієнт $\lambda = 0,8333$;

ρ – коефіцієнт, який враховує рентабельність інноваційного продукту).

ρ – ставка податку на прибуток, який має сплачувати потенційний інвестор, у 2025 році $\rho = 18\%$;

Збільшення чистого прибутку 1-го року:

Збільшення чистого прибутку 2-го року:

Збільшення чистого прибутку 3-го року:

Збільшення чистого прибутку 4-го року:

Приведена вартість збільшення всіх чистих прибутків Π_{PP} , що їх може отримати потенційний інвестор від можливого впровадження та комерціалізації науково-технічної розробки:

де $\Delta\Pi_i$ – збільшення чистого прибутку у кожному з років, протягом яких виявляються результати впровадження науково-технічної розробки, грн;

T – період часу, протягом якого очікується отримання позитивних результатів від впровадження та комерціалізації науково-технічної розробки, роки;

τ – ставка дисконтування, за яку можна взяти щорічний прогнозований р

t – період часу (в роках) від моменту початку впровадження науково-технічної розробки до моменту отримання потенційним інвестором додаткових чистих прибутків у цьому році.

н

в грн. Величина початкових інвестицій PV , які потенційний інвестор має вкласти для впровадження і комерціалізації науково-технічної розробки:

і

$$PV = k_{inv} \cdot ZB, \quad (4.21)$$

ф

л

де k_{inv} – коефіцієнт, що враховує витрати інвестора на впровадження

я

н

ц

а

і

ф

ф

о

в

в

можливого впровадження та комерціалізації науково-технічної розробки

о

становитиме:

л

р

е

а

а

і

н

н

і

грн

$$E_{abs} = \Pi\Pi - PV \quad (4.22)$$

де PII – приведена вартість зростання всіх чистих прибутків від

м

о

ж

є Внутрішня економічна дохідність інвестицій E_e , які можуть бути
и вкладені потенційним інвестором у впровадження та комерціалізацію науково-
в технічної розробки:

о

п

о

р

в

де E_{abs} – абсолютний економічний ефект вкладених інвестицій,

рн.

PV – теперішня вартість початкових інвестицій, 784624,51 грн;

р

я $T_{жс}$ – життєвий цикл науково-технічної розробки, тобто час від початку її
розробки до закінчення отримання позитивних результатів від її
впровадження, 4 роки.

д

ж М

т

н

т

ж

де d – середньозважена ставка за депозитними операціями в комерційних

б

я

f – показник, що характеризує ризикованість вкладення інвестицій,

прийmemo 0,25.

н

E_e

я

свідчить про те, що внутрішня економічна дохідність інвестицій , вища
мінімальної внутрішньої дохідності. Тобто інвестувати в науково-дослідну

н

н

б

роботу за темою «Система лазерної відеополяриметрії оптично анізотропних зразків» доцільно.

Період окупності інвестицій $T_{ок}$ які можуть бути вкладені потенційним інвестором у впровадження та комерціалізацію науково-технічної розробки:

де E_6 – внутрішня економічна дохідність вкладених інвестицій.

р. $T_{ок} < 3$ -х років, що свідчить про комерційну привабливість науково-технічної розробки і може спонукати потенційного інвестора профінансувати впровадження даної розробки та виведення її на ринок.

Висновки до розділу 4

Згідно проведених досліджень рівень комерційного потенціалу розробки за темою «Система лазерної відеополяриметрії оптично анізотропних зразків» становить 40,3 бала, що, свідчить про комерційну важливість проведення даних досліджень (рівень комерційного потенціалу розробки високий).

При оцінюванні за технічними параметрами, згідно узагальненого коефіцієнту якості розробки, науково-технічна розробка переважає існуючі аналоги приблизно в 1,55 рази.

Також термін окупності становить 2,08 р., що менше 3-х років, що свідчить про комерційну привабливість науково-технічної розробки і може спонукати потенційного інвестора профінансувати впровадження даної розробки та виведення її на ринок.

Отже можна зробити висновок про доцільність проведення науково-дослідної роботи за темою «Система лазерної відеополяриметрії оптично анізотропних зразків».

ВИСНОВКИ

У магістерській кваліфікаційній роботі розв'язано актуальну науково-прикладну задачу розробки та дослідження системи лазерної відеополяриметрії для неруйнівного контролю оптично анізотропних зразків. Запропонований підхід базується на використанні методу Стокс-поляриметрії з просторово-розподіленою реєстрацією параметрів поляризації та їх подальшим автоматизованим аналізом.

У першому розділі виконано аналіз сучасних методів лазерної поляриметрії та відеополяриметрії, а також засобів контролю оптично анізотропних матеріалів. Показано, що методи, засновані на формалізмі Стокса–Мюллера, є найбільш інформативними для опису реальних анізотропних та частково деполаризуючих середовищ. Обґрунтовано доцільність застосування зображувальної Стокс-поляриметрії для контролю структурних неоднорідностей оптично активних кристалів, оскільки вона забезпечує повну просторову інформацію про параметри анізотропії та не потребує суб'єктивної інтерпретації результатів.

У другому розділі розроблено методи формування поляриметричних зображень у лазерному відеополяриметрі та наведено математичний апарат для відновлення координатних розподілів параметрів вектора Стокса. Запропоновано алгоритм отримання інтенсивнісних зображень при різних станах поляризаційного аналізу та виконано формування похідних поляризаційних карт, зокрема ступеня лінійної, циркулярної та загальної поляризації, азимуту та еліптичності поляризації. Показано, що просторові розподіли зазначених параметрів є чутливими до дефектів кристалічної структури та можуть бути використані як інформативні ознаки при контролі якості оптично анізотропних зразків.

У третьому розділі реалізовано програмне забезпечення системи лазерної відеополяриметрії, яке забезпечує повний цикл обробки поляризаційних зображень — від реєстрації інтенсивнісних кадрів до автоматизованого прийняття рішення щодо якості зразка. Програмне забезпечення побудоване за модульним

принципом і включає три основні програмні блоки: модуль обчислення параметрів вектора Стокса, модуль формування та аналізу поляризаційних карт і модуль автоматизованого контролю браку оптично активних кристалів. Для прийняття рішення використано статистичні інваріанти, просторові градієнти та порогові критерії, що забезпечує кількісну та інваріантну до інтенсивності освітлення оцінку якості зразків.

Отримані результати підтверджують, що розроблена система лазерної відеополяриметрії та відповідне програмне забезпечення дозволяють ефективно виявляти структурні неоднорідності та дефекти оптично активних кристалів. Запропонований підхід є неруйнівним, автоматизованим і придатним для використання як у наукових дослідженнях, так і в технологічному контролі. Практична значущість роботи полягає у можливості впровадження розробленої системи для контролю якості оптичних матеріалів та подальшого розвитку систем відеополяриметрії реального часу.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Тужанський С. Є., Лисенко Г. Л. Системи лазерної відеополяриметрії для автоматизованого контролю параметрів неоднорідних біотканин : монографія. – Вінниця : ВНТУ, 2011. – 156 с.

2. Тужанський С. Є., Маліновський В. І Технології лазерної розгортки для систем відтворення візуальної інформації // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – 2012. – № 23(1). – С. 80–87.

3. Заболотна Н. І Архітектура і алгоритми функціонування та аналізу даних двовимірних систем лазерної поляриметрії біологічних тканин // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – Вінниця : ВНТУ.

URL: <https://oeipt.vntu.edu.ua/index.php/oeipt/article/view/294/292>

4. Заболотна Н. І., Павлов С. В., Шолота В. В. Моделі, методи та системи лазерної поляриметрії плазми крові для діагностики молочних залоз : монографія. – Вінниця : ВНТУ, 2024. – 185 с.

5. Заболотна Н. І., Шолота В. В., Колівошко А. І. Аналіз методів та систем лазерної поляриметрії для відтворення розподілів оптико-анізотропних параметрів біологічних шарів // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – Вінниця : ВНТУ.

URL: <https://oeipt.vntu.edu.ua/index.php/oeipt/article/view/523/501>

6. Дуболазов О. В., Сахновський М. Ю., та ін. Лазерна поляриметрія оптично-анізотропних шарів із просторово-частотною фільтрацією об'єктних полів // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – Вінниця : ВНТУ.

URL: <https://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/31559>

7. Ушенко О. Г., Бойчук Т. М., та ін. Основи лазерної поляриметрії. Біологічні рідини. – Чернівці : ЧНУ, 2011. – 656 с.

8. Методи і системи лазерної поляриметрії : монографія / за ред. Н. І. Заболотної. – Вінниця : ВНТУ, 2023. – 210 с.

9. Ушенко О. Г., Савенков С. Н., Петрук Н. В., Олар О. В. Сучасні методи мюллер-матричної та відеополяриметричної діагностики біологічних тканин : монографія. – Чернівці : БДМУ, 2020. – 245 с.
10. Заболотна Н. І., Павлов С. В., Ровіра Р. Х. Лазерна поляриметрія двошарових біологічних тканин // Матеріали Міжнародної конференції ВОТТП-2012. – Вінниця : ВНТУ, 2012. – С. 45–48.
11. Бачинський В. Т. Огляд принципів оцінки морфологічного стану біологічних об'єктів методом лазерної поляриметрії // Наукові праці ВНТУ. – Вінниця : ВНТУ, 2022. – С. 112–120.
12. Заболотна Н. І., Павлов С. В., Шолота В. В. Моделі, методи та системи лазерної поляриметрії плазми крові для діагностики молочних залоз : монографія. – Вінниця : ВНТУ, 2024. – 145 с.
13. Ушенко О. Г., Олар О. В., Мотрич А. В., та ін. Мюллер-матрична поляриметрія оптично-анізотропних біологічних тканин : монографія. – Чернівці : БДМУ, 2021. – 268 с.
14. Заболотна Н. І. Аналітичні основи поляризаційного картографування багатошарових двопротенезаломлюючих полікристалічних мереж // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – 2011. – № 2. – С. 110–117.
15. Дуболазов О. В., Сахновський М. Ю., Олар О. В., Григоришин П. М., Ушенко Ю. О. Лазерна поляриметрія оптично анізотропних шарів із просторово-частотною фільтрацією об'єктних полів. URL: <https://oeipt.vntu.edu.ua/index.php/oeipt/article/view/529/507>
16. Тужанський С. Є. Методи лазерної поляриметрії : монографія. – Вінниця : VNTU Press, 2020. – 198 с.
17. Заболотна Н. І., Радченко К. О., Костюк С. В. Статистична, кореляційна і фрактальна структура мюллер-матричних зображень багатошарових біологічних тканин // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – 2013. – № 2(26). – С. 58–66.

18. Марчук Д. В. Аналіз оптичних методів та систем вимірювання поляризаційних параметрів зображень біологічних тканин // Світ наукових досліджень. – 2024. – Вип. 36. URL: <https://www.economy-confer.com.ua/full-article/5865/>
19. Ушенко О. Г., Ушенко Ю. О., Томка Ю. Я., та ін. Основи лазерної поляриметрії. Біологічні тканини людини. – Чернівці : ЧНУ, 2010.
20. Full-Stokes Polarization Camera : електронний ресурс / Mueller Matrix Polarimetry. URL: <https://www.mmpolarimetry.com/full-stokes-polarization-camera/>
21. Gottlieb D., Arteaga O. Mueller matrix imaging with a polarization camera: application to microscopy // Optics Express. – 2021. – Vol. 29, No. 21. – P. 34723–34734. – DOI: 10.1364/OE.29.034723
22. Ушенко О. Г., Пішак В. П., Ангельський О. В., Ушенко Ю. О. Лазерна поляризаційна морфологія біологічних тканин : монографія. – Чернівці : Колір-Друк, 2007. – 314 с.
23. Ушенко О. Г., Пішак В. П., Пересунько О. П., Ушенко Ю. О. Поляризаційна корелометрія біологічних тканин людини : монографія. – Чернівці : Рута, 2007. – 606 с.
24. Zabolotna N. I., Pavlov S. V., Karas O. V., Sholota V. V. Processing and analysis of images in the multifunctional classification laser polarimetry system of biological objects // Proceedings of SPIE. – 2018. – Vol. 10750.
25. Методи і засоби поляризаційної поляриметрії біологічних тканин. Том 1 : монографія / О. Г. Ушенко, С. В. Павлов, В. Вуйцік та ін. – Вінниця, 2019. – 269 с.
26. Ушенко Ю. О. Лазерне поляризаційне картографування біологічних тканин : автореф. дис. ... канд. фіз.-мат. наук. – Львів, 2006. – 20 с.
27. Давиденко І. Можливості застосування лазерних поляризаційних методів для виявлення патологічних процесів у тканині печінки з часовим моніторингом динаміки змін. – 2022.

28. ДСТУ 8302:2015 Інформація та документація. Бібліографічне посилання. Загальні положення та правила складання. – Київ : УкрНДНЦ, 2016. – 16 с.

29. Ghosh N., Vitkin I. A. Tissue polarimetry: concepts, challenges, applications, and outlook // Journal of Biomedical Optics. – 2011. – Vol. 16(11).

Методичні вказівки до виконання економічної частини магістерських кваліфікаційних робіт / Уклад. : В. О. Козловський, О. Й. Лесько, В. В. Кавецький. – Вінниця : ВНТУ, 2021. – 42 с.

Кавецький В. В. Економічне обґрунтування інноваційних рішень: практикум / В. В. Кавецький, В. О. Козловський, І. В. Причепа – Вінниця : ВНТУ, 2016. – 113 с.

Додаток А
(Обов'язковий)
ВНТУ

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. каф. БМІОЕС,

к.т.н., доц.

 Л.Г. Коваль

«30» 09 2025 р.

ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ
на магістерську кваліфікаційну роботу
«Система лазерної відеополяриметрії оптично анізотропних зразків»
08-41. МКР.002.00.000 ТЗ

Керівник роботи

к.т.н., доцент,

доцент кафедри БМІОЕС

 Тужанський С.Є.

Виконавець: ст. гр. ЛТО-24м

 Поуданен В.Є.

1 ПІДСТАВА ДЛЯ ВИКОНАННЯ РОБОТИ

Робота проводиться на підставі наказу ректора по Вінницькому національному технічному університету від 24.09.2025 р., №313 та індивідуального завдання на магістерську кваліфікаційну роботу.

Дата початку роботи: 24.09.2025 р.

Дата закінчення: 05.12.2025 р.

2 МЕТА І ПРИЗНАЧЕННЯ МКР

Мета роботи – розширення функціональних можливостей комп'ютеризованої системи лазерної відеополяриметрії для контролю координатних розподілів поляризаційних характеристик оптично анізотропних плоских матеріалів і зразків.

Для досягнення мети в магістерській кваліфікаційній роботі було поставлено такі завдання:

- проаналізувати методи і засоби лазерної поляриметрії та математичні моделі, що використовуються для опису оптично-анізотропних зразків,
- обґрунтувати вибір елементної бази випромінювального і приймального блоків відеополяриметричної системи,
- систематизувати та реалізувати алгоритми обробки поляризаційних зображень та аналізу даних,
- здійснити синтез функціональних модулів системи лазерної відеополяриметрії оптично анізо-тропних зразків.
- розробити алгоритми та комп'ютерну програму для формування координатних розподілів параметрів анізотропії оптичних зразків.

Об'єкт дослідження – процеси візуалізації та 2D поляриметричного аналізу оптично анізотропних зразків.

Предмет дослідження – методи, елементи та алгоритми обробки зображень для системи лазерної відеополяриметрії оптичних зразків.

ДЖЕРЕЛА РОЗРОБКИ МКР

1. Тужанський С. Є. Методи лазерної поляриметрії : монографія / С. Є. Тужанський. Вінниця : ВНТУ Press, 2020. 198 с.
2. Ушенко О.Г. Основи лазерної поляриметрії. Біологічні рідини / О.Г.Ушенко, Т.М. Бойчук та ін. Чернівці: Чернівецький нац. ун-т, 2011. 656 с.
3. Методи і системи лазерної поляриметрії : монографія / за ред. Н. І. Заболотної. – Вінниця : ВНТУ, 2023. 210 с.
4. Full-Stokes Polarization Camera : [Електронний ресурс] / Mueller Matrix Polarimetry. Режим доступу: <https://www.mmpolarimetry.com/full-stokes-polarization-camera/>
5. Gottlieb D., Arteaga O. Mueller matrix imaging with a polarization camera: application to microscopy // Optics Express. 2021. Vol. 29, No. 21. P. 34723–34734. DOI: 10.1364/OE.29.034723 [Електронний ресурс] — Режим доступу: <https://opg.optica.org/oe/fulltext.cfm?uri=oe-29-21-34723>

4 ВИМОГИ ДО ВИКОНАННЯ МКР

Основними вимогами є:

1. Функціональне призначення системи: контроль координатних розподілів структур-них недосконалостей пласких анізотропних оптичних зразків;
2. Випромінювальний блок – лазерний діодний модуль (довжина хвилі 650 нм, оптич-на потужність 50 мВт), модулятор поляризації;
3. Оптичний блок – поляризатор, коліматор, фазова пластина;
4. Блок вимірювання і контролю – CCD-камера, мікроконтролер, комп'ютер .

5 ЕТАПИ МКР І ТЕРМІНИ ЇХ ВИКОНАННЯ

№	Назва та зміст етапу	Термін виконання		Очікувані результати
		початок	закінчення	
	Розробка, погодження та затвердження технічного завдання (ТЗ)	14.09.2025	20.09.2025	Розроблене ТЗ
	Аналіз методів і систем лазерної поляриметрії.	20.09.2025	09.10.2025	Розділ 1 пояснювальної записки
	Методи і моделі відеополяриметрії. Синтез схем системи лазерної відеополяриметрії	09.10.2025	09.11.2025	Розділ 2 пояснювальної записки
	Розробка алгоритму і комп'ютерної програми візуалізації 2D розподілів поляризаційних характеристик оптичних зразків	09.11.2025	19.11.2025	Розділ 3 пояснювальної записки
	Економічна частина	09.11.2025	01.12.2025	Розділ 4 пояснювальної записки
	Оформлення технічної документації. Підготовка МКР до публічного захисту	01.12.2025	10.12.2025	МКР

6 ПОРЯДОК КОНТРОЛЮ І ПРИЙМАННЯ

Контроль за виконанням МКР та її етапів покладається на керівника. Приймання МКР здійснюється шляхом публічного захисту перед Державною екзаменаційною комісією, призначеною за наказом ректора ВНТУ.

7 ВИМОГИ ЩОДО ТЕХНІЧНОГО ЗАХИСТУ ІНФОРМАЦІЇ З ОБМЕЖЕНИМ ДОСТУПОМ

У зв'язку з тим, що інформація не є конфіденційною, заходи з її технічного захисту не передбачаються.

Додаток Б
(обов'язковий)

ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Назва роботи: «Система лазерної відеополяриметрії оптично анізотропних зразків»

Тип роботи: магістерська кваліфікаційна робота

Підрозділ кафедра БМІОЕС, факультет ІЕС, ЛТО- 24м

Коефіцієнт подібності текстових запозичень, виявлених у роботі системою StrikePlagiarism (КП1) 3 %

Висновок щодо перевірки кваліфікаційної роботи (відмітити потрібне)

Запозичення, виявлені у роботі, є законними і не містять ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації. Роботу прийняти до захисту

У роботі не виявлено ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації, але надмірна кількість текстових запозичень та/або наявність типових розрахунків не дозволяють прийняти рішення про оригінальність та самостійність її виконання. Роботу направити на доопрацювання.

У роботі виявлено ознаки академічного плагіату та/або в ній містяться навмисні спотворення тексту, що вказують на спроби приховування недобросовісних запозичень. Робота до захисту не приймається.

Експертна комісія:

Коваль Л.Г., зав. каф. БМІОЕС

Заболотна Н.І., проф. каф. БМІОЕС



Особа, відповідальна за перевірку 

Тужанський С.Є.

З висновком експертної комісії ознайомлений:

Керівник _____

Тужанський С.Є., доц. каф. БМІОЕС

Здобувач 

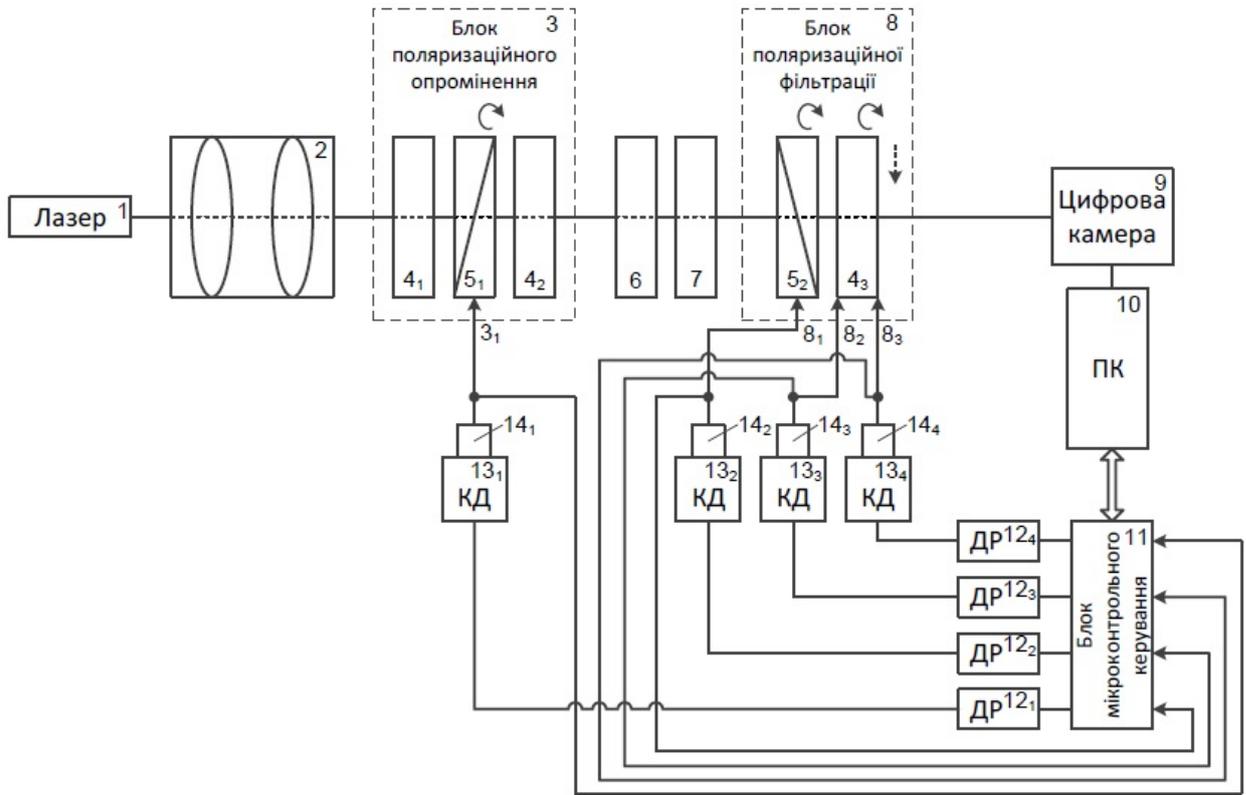
Поуданен В.Є.

Додаток В
(обов'язковий)

ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА

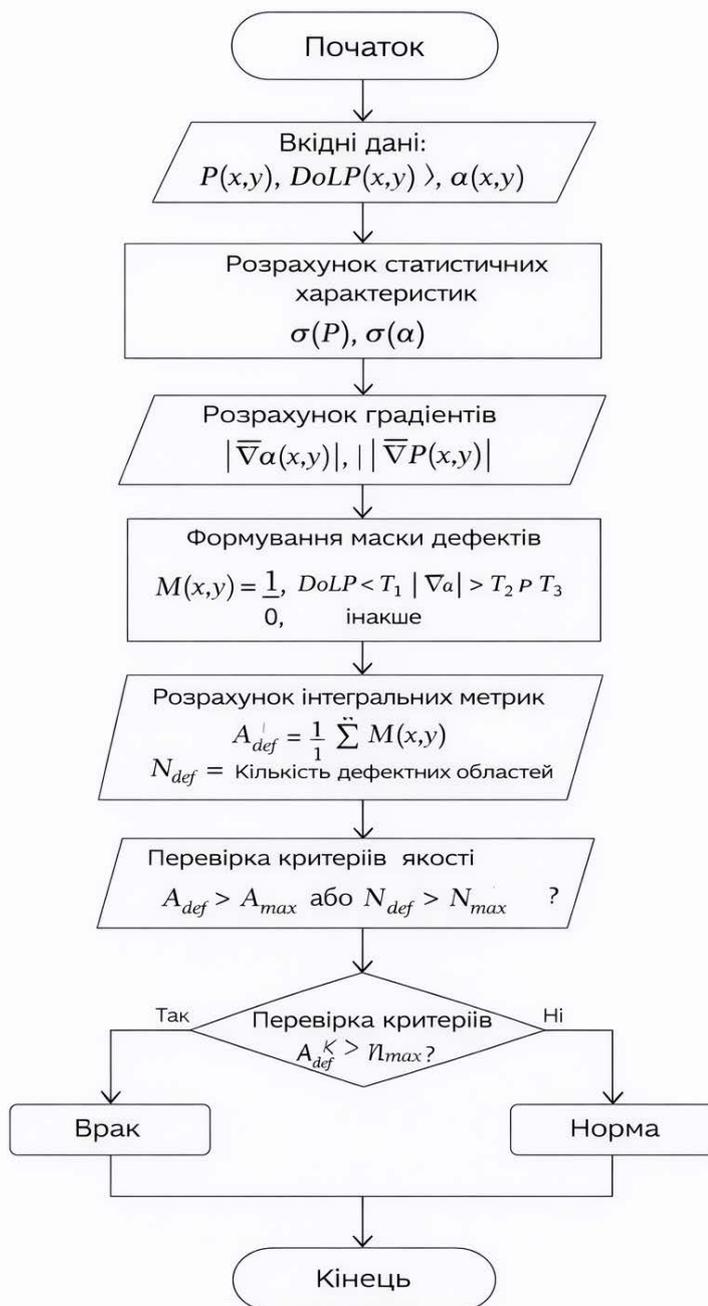
Додаток В1

Структурна схема поляриметра



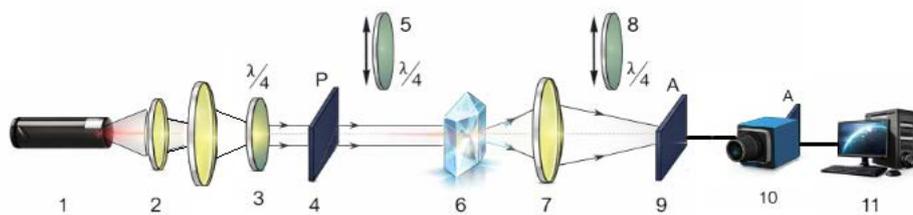
Додаток В2

Блок схема автоматизованого контролю якості оптичних кристалів



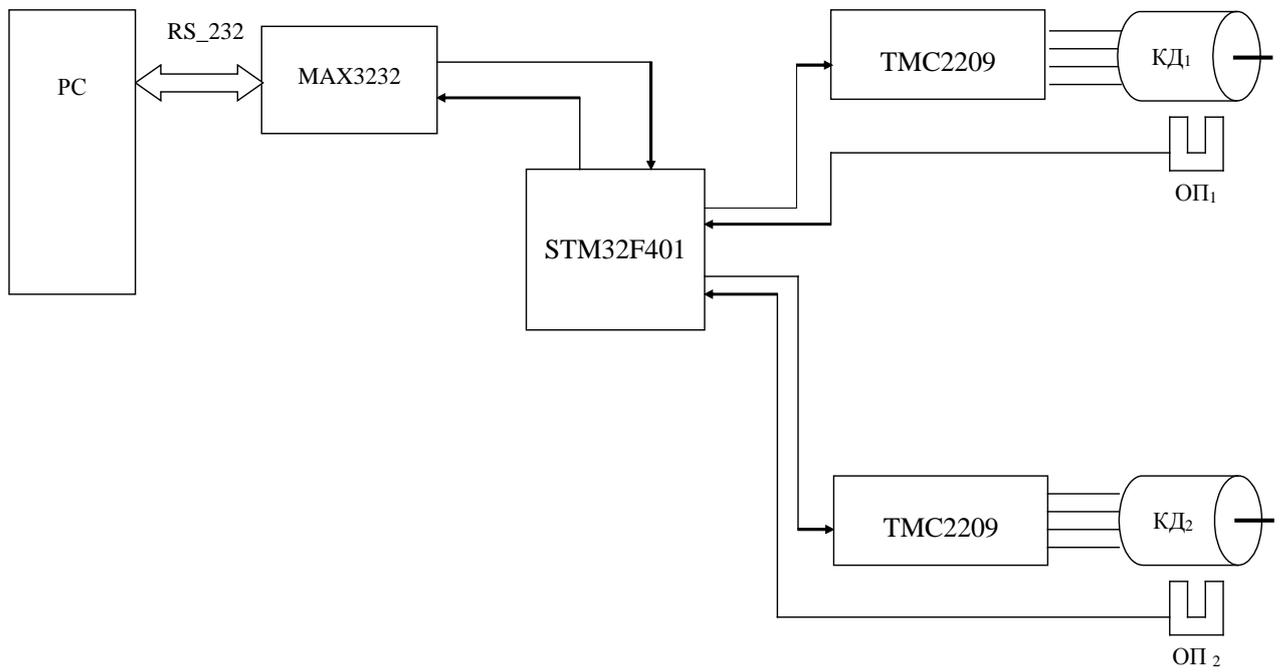
Додаток ВЗ

Оптична схема поляриметра



Додаток В4

Блок-схема мікроконтролерного блока керування кроковими двигунами поляриметра



Додаток Г
(обов'язковий)

Лістинг ПЗ №1

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import imageio.v2 as imageio
import os

# =====
# 1. ЗАВАНТАЖЕННЯ GRAYSCALE
# =====

def load_gray(path):
    img = imageio.imread(path)
    if img.ndim == 3:
        img = img.mean(axis=2)
    img = img.astype(np.float64)
    img = (img - img.min()) / (img.max() - img.min() + 1e-9)
    return img

# =====
# 2. ROI (ЄДИНИЙ ДЛЯ ВСІХ КАДРІВ)
# =====

def crop_center(img, size):
    h, w = img.shape
    cy, cx = h // 2, w // 2
    s = size // 2
    return img[cy-s:cy+s, cx-s:cx+s]

# =====
# 3. МАСКА ЗРАЗКА
# =====

def make_sample_mask(S0, threshold=0.05):
    return S0 > threshold

# =====
# 4. ВЕКТОР СТОКСА
# =====

def compute_stokes(I0, I90, I45, I135, IR, IL):
    S0 = I0 + I90
    S1 = I0 - I90
    S2 = I45 - I135
    S3 = IR - IL
    return S0, S1, S2, S3

# =====
# 5. ПОЛЯРИЗАЦІЙНІ ПАРАМЕТРИ
# =====

def compute_polarization_maps(S0, S1, S2, S3):
```

```

eps = 1e-9

S1n = S1 / (S0 + eps)
S2n = S2 / (S0 + eps)
S3n = S3 / (S0 + eps)

DoLP = np.sqrt(S1n**2 + S2n**2)
DoCP = np.abs(S3n)
P     = np.sqrt(S1n**2 + S2n**2 + S3n**2)

alpha = 0.5 * np.arctan2(S2n, S1n)           # азимут
chi   = 0.5 * np.arcsin(np.clip(S3n, -1, 1)) # кут еліптичності
eps1  = np.tan(chi)                         # еліптичність

return DoLP, DoCP, P, alpha, chi, eps1

# =====
# 6. ВІЗУАЛІЗАЦІЯ
# =====

def show_maps(maps, titles, cmap='gray'):
    n = len(maps)
    plt.figure(figsize=(4*n, 4))
    for i in range(n):
        plt.subplot(1, n, i+1)
        plt.imshow(maps[i], cmap=cmap)
        plt.title(titles[i])
        plt.axis('off')
    plt.tight_layout()
    plt.show()

# =====
# 7. ГОЛОВНА ПРОГРАМА
# =====

if __name__ == "__main__":

    base_path = r"C:\Users\Admin\Desktop\stokes_project"

    # --- завантаження 6 кадрів ---
    I0  = load_gray(os.path.join(base_path, "I_0.png"))
    I90 = load_gray(os.path.join(base_path, "I_90.png"))
    I45 = load_gray(os.path.join(base_path, "I_45.png"))
    I135 = load_gray(os.path.join(base_path, "I_135.png"))
    IR  = load_gray(os.path.join(base_path, "I_R.png"))
    IL  = load_gray(os.path.join(base_path, "I_L.png"))

    # --- ROI (за потреби) ---
    roi_size = 100 # або None якщо не хочеш
    if roi_size is not None:
        I0  = crop_center(I0, roi_size)
        I90 = crop_center(I90, roi_size)
        I45 = crop_center(I45, roi_size)
        I135 = crop_center(I135, roi_size)
        IR  = crop_center(IR, roi_size)
        IL  = crop_center(IL, roi_size)

```

```
# --- Стокк ---
S0, S1, S2, S3 = compute_stokes(I0, I90, I45, I135, IR, IL)

# --- маска ---
mask = make_sample_mask(S0)
for arr in [S0, S1, S2, S3]:
    arr[~mask] = np.nan

# --- похідні ---
DoLP, DoCP, P, alpha, chi, eps1 = compute_polarization_maps(S0, S1, S2, S3)

# --- ВИВІД ---
show_maps([S0, S1, S2, S3],
           ["S0", "S1", "S2", "S3"])

show_maps([DoLP, DoCP, P],
           ["DoLP", "DoCP", "P"])

show_maps([alpha, chi, eps1],
           ["Azimuth  $\alpha$ ", "Ellipticity  $\chi$ ", "Ellipticity  $\epsilon$ "])
```

Лістинг ПЗ №2

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import imageio.v2 as imageio
from scipy.signal import correlate
from tkinter import Tk, filedialog

# =====
# 1. ЗАВАНТАЖЕННЯ ТА НОРМУВАННЯ
# =====

def load_gray(path):
    img = imageio.imread(path)
    if img.ndim == 3:
        img = img.mean(axis=2)
    img = img.astype(np.float64)
    img = (img - img.min()) / (img.max() - img.min() + 1e-9)
    return img

# =====
# 2. РОЗБИТТЯ КОЛАЖІВ 1x3
# =====

def split_1x3(img):
    h, w = img.shape
    w3 = w // 3
    return img[:, 0:w3], img[:, w3:2*w3], img[:, 2*w3:3*w3]

# =====
# 3. ROI
# =====

def crop_center(img, size=128):
    h, w = img.shape
    cy, cx = h // 2, w // 2
    s = size // 2
    return img[cy-s:cy+s, cx-s:cx+s]

# =====
# 4. СТАТИСТИЧНІ МОМЕНТИ
# =====

def statistical_moments(F):
    A = F[~np.isnan(F)].ravel()
    M1 = np.mean(A)
    M2 = np.var(A)
    sigma = np.sqrt(M2) + 1e-12
    M3 = np.mean(((A - M1) / sigma)**3)
    M4 = np.mean(((A - M1) / sigma)**4)
    return M1, M2, M3, M4

# =====
# 5. АВТОКОРЕЛЯЦІЯ
# =====
```

```

def autocorrelation_1d(F):
    prof = np.nanmean(F, axis=0)
    prof -= np.mean(prof)
    acf = correlate(prof, prof, mode='full')
    acf = acf[acf.size // 2:]
    acf /= acf[0] + 1e-12
    return acf

def correlation_metrics(acf):
    x = np.arange(len(acf))
    S = np.trapz(acf, x)
    Q2 = np.sqrt(np.mean(acf**2))
    Q4 = np.mean(acf**4) / (Q2**2 + 1e-12)
    idx = np.where(acf < 1/np.e)[0]
    Lcorr = idx[0] if len(idx) > 0 else len(acf)
    return S, Q2, Q4, Lcorr

# =====
# 6. ФРАКТАЛЬНА РОЗМІРНІСТЬ
# =====

def fractal_dimension(F, threshold=0.5):
    B = F > threshold
    sizes = np.array([2, 4, 8, 16, 32])
    counts = []

    for s in sizes:
        cnt = 0
        for i in range(0, B.shape[0], s):
            for j in range(0, B.shape[1], s):
                if np.any(B[i:i+s, j:j+s]):
                    cnt += 1
            counts.append(cnt)

    sizes = sizes[sizes < min(B.shape)]
    counts = np.array(counts[:len(sizes)])

    coeffs = np.polyfit(np.log(1/sizes), np.log(counts + 1e-9), 1)
    return coeffs[0]

# =====
# 7. ГОЛОВНА ПРОГРАМА
# =====

if __name__ == "__main__":
    Tk().withdraw()

    print("Оберіть знімок поляризаційних карт (DoLP | DoCP | P)")
    path_pol = filedialog.askopenfilename()

    print("Оберіть знімок орієнтаційних карт ( $\alpha$  |  $\chi$  |  $\epsilon$ )")
    path_ori = filedialog.askopenfilename()

```

```

# --- завантаження ---
pol_img = load_gray(path_pol)
ori_img = load_gray(path_ori)

# --- розбиття ---
DoLP, DoCP, P = split_1x3(pol_img)
alpha, chi, epsl = split_1x3(ori_img)

maps = {
    "DoLP": DoLP,
    "DoCP": DoCP,
    "P": P,
    "alpha": alpha,
    "chi": chi,
    "ellipticity": epsl
}

print("\nОберіть карту для аналізу:")
for k in maps.keys():
    print(" -", k)

key = input("Введіть назву карти: ").strip()

if key not in maps:
    print("☐ Невірна назва")
    exit()

F = crop_center(maps[key], 128)

# --- аналіз ---
M1, M2, M3, M4 = statistical_moments(F)
acf = autocorrelation_1d(F)
S, Q2, Q4, Lcorr = correlation_metrics(acf)
Df = fractal_dimension(F)

# --- візуалізація ---
plt.figure(figsize=(4,4))
plt.imshow(F, cmap='gray')
plt.title(f"F(x,y) = {key}")
plt.axis('off')
plt.colorbar()
plt.show()

plt.figure(figsize=(6,4))
plt.plot(acf)
plt.title("Автокореляційна функція")
plt.xlabel("Δx")
plt.ylabel("K(Δx)")
plt.grid()
plt.show()

# --- результати ---
print("\n☐ СТРУКТУРНІ ІНВАРІАНТИ:")
print(f"M1 = {M1:.4f}")
print(f"M2 = {M2:.4f}")
print(f"M3 = {M3:.4f}")
print(f"M4 = {M4:.4f}")

```

```
print(f"S = {S:.4f}")
print(f"Q2 = {Q2:.4f}")
print(f"Q4 = {Q4:.4f}")
print(f"Lcorr = {Lcorr}")
print(f"Df = {Df:.4f}")
```

Лістинг ПЗ №3

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from PIL import Image
from tkinter import Tk, filedialog

# Для підрахунку зв'язаних областей (N_def)
from scipy.ndimage import label

# =====
# 1) ЗАВАНТАЖЕННЯ + НОРМУВАННЯ
# =====
def load_gray(path):
    img = Image.open(path).convert("L")
    a = np.array(img, dtype=np.float64)
    a = (a - a.min()) / (a.max() - a.min() + 1e-9)
    return a

# =====
# 2) АВТО-ОБРИЗАННЯ БІЛИХ ПОЛІВ (щоб працювало з "фігурами")
# =====
def trim_white_margins(img, white_thr=0.95):
    """
    Вирізає зовнішні білі поля навколо контенту.
    Працює для зображень типу Figure з підписами/полями.
    """
    mask = img < white_thr
    ys = np.where(mask.any(axis=1))[0]
    xs = np.where(mask.any(axis=0))[0]
    if len(ys) == 0 or len(xs) == 0:
        return img
    y0, y1 = ys[0], ys[-1] + 1
    x0, x1 = xs[0], xs[-1] + 1
    return img[y0:y1, x0:x1]

def split_1x3(img):
    """
    Розбиває 1x3 колаж на три частини по ширині.
    """
    h, w = img.shape
    w3 = w // 3
    return img[:, 0:w3], img[:, w3:2*w3], img[:, 2*w3:3*w3]

def center_crop(img, size=200):
    h, w = img.shape
    size = min(size, h, w)
    y0 = h // 2 - size // 2
    x0 = w // 2 - size // 2
    return img[y0:y0 + size, x0:x0 + size]

# =====
# 3) СТАТИСТИКА:  $\sigma(\alpha)$ ,  $\sigma(P)$ 
# =====
```

```

def std_in_roi(arr, roi=None):
    if roi is None:
        data = arr.ravel()
    else:
        data = arr[roi].ravel()
    return float(np.std(data))

# =====
# 4) ГРАДІЄНТИ  $|\nabla\alpha|$ ,  $|\nabla P|$ 
# ВАЖЛИВО:  $\alpha$  - кут, тому робимо unwrap перед похідними
# =====
def grad_magnitude_alpha(alpha):
    # alpha очікується у радіанах; якщо у вас "сірий PNG", це буде лише відносна
    # шкала.
    # Тут ми робимо unwrap як для кутових величин.
    a = np.unwrap(alpha, axis=0)
    a = np.unwrap(a, axis=1)
    gy, gx = np.gradient(a)
    return np.sqrt(gx**2 + gy**2)

def grad_magnitude(arr):
    gy, gx = np.gradient(arr)
    return np.sqrt(gx**2 + gy**2)

# =====
# 5) МАСКА ДЕФЕКТІВ
#  $M(x,y) = [DoLP < T1] \text{ OR } [|\nabla\alpha| > T2] \text{ OR } [P < T3]$ 
# =====
def defect_mask(DoLP, P, alpha, T1=0.25, T2=0.35, T3=0.35):
    g_alpha = grad_magnitude_alpha(alpha)
    g_P = grad_magnitude(P)

    M = (DoLP < T1) | (g_alpha > T2) | (P < T3)
    return M, g_alpha, g_P

# =====
# 6) МЕТРИКИ ЯКОСТІ: A_def, N_def, середні в дефектах
# =====
def quality_metrics(M, DoLP, P, min_area_px=30):
    # A_def у %
    A_def = 100.0 * float(np.mean(M))

    # Зв'язані області -> N_def
    lab, n = label(M.astype(np.uint8))

    # Відсікаємо дуже дрібні компоненти (шум)
    N_def = 0
    for k in range(1, n + 1):
        area = np.sum(lab == k)
        if area >= min_area_px:
            N_def += 1

    # середні значення в дефектах
    if np.any(M):

```

```

        mean_DoLP_def = float(np.mean(DoLP[M]))
        mean_P_def = float(np.mean(P[M]))
    else:
        mean_DoLP_def = float("nan")
        mean_P_def = float("nan")

    return A_def, N_def, mean_DoLP_def, mean_P_def

# =====
# 7) РІШЕННЯ: НОРМА / БРАК
# =====
def decision(A_def, N_def, A_max=5.0, N_max=3):
    return ("БРАК", True) if (A_def > A_max or N_def > N_max) else ("НОРМА",
False)

# =====
# 8) ВІЗУАЛІЗАЦІЯ
# =====
def show_map(ax, img, title, cmap="gray"):
    im = ax.imshow(img, cmap=cmap)
    ax.set_title(title)
    ax.axis("off")
    plt.colorbar(im, ax=ax, fraction=0.046)

def show_overlay(base, mask, title):
    plt.figure(figsize=(5,5))
    plt.imshow(base, cmap="gray")
    plt.imshow(mask.astype(float), alpha=0.35) # маска поверх
    plt.title(title)
    plt.axis("off")
    plt.show()

# =====
# 9) ГОЛОВНА ПРОГРАМА
# =====
if __name__ == "__main__":
    Tk().withdraw()

    print("Оберіть 1-й знімок (DoLP | DoCP | P)")
    path_pol = filedialog.askopenfilename()

    print("Оберіть 2-й знімок (Azimuth  $\alpha$  | Ellipticity  $\chi$  | Ellipticity  $\epsilon$ )")
    path_ori = filedialog.askopenfilename()

    if not path_pol or not path_ori:
        print("☐ Файли не обрані")
        raise SystemExit

    # --- Завантаження колажів ---
    pol = load_gray(path_pol)
    ori = load_gray(path_ori)

    # --- Обрізання білих полів (для Figure) ---
    pol = trim_white_margins(pol)
    ori = trim_white_margins(ori)

```

```

# --- Розбиття 1x3 ---
DoLP_img, DoCP_img, P_img = split_1x3(pol)
alpha_img, chi_img, epsl_img = split_1x3(ori)

# --- Центральне обрізання кожної карти (щоб прибрати заголовки/підписи) ---
# Підберіть size, якщо у вас інші розміри фігур
crop_size = 220
DoLP = center_crop(DoLP_img, crop_size)
P = center_crop(P_img, crop_size)
alpha_raw = center_crop(alpha_img, crop_size)

# alpha у вашому колажі – це “сірий рівень”, не фізичні радіани.
# Для градієнтного критерію це все одно працює як карта змін (відносно).
# Якщо у вас є alpha у радіанах (з ПЗ-1 як масив) – підставляйте її напряду.
alpha = alpha_raw * np.pi # масштабуємо до [0..pi] для кутової інтерпретації

# =====
# ПАРАМЕТРИ ПОРЯДКУВАННЯ (Пороги і критерії)
# =====
# Пороги маски дефектів:
T1 = 0.25 # DoLP < T1
T2 = 0.35 # |∇α| > T2
T3 = 0.35 # P < T3

# Граничні критерії рішення:
A_max = 5.0 # % площі дефектів
N_max = 3 # кількість дефектних областей
min_area_px = 30 # мін. площа області (щоб відсікти шум)

# --- σ(α), σ(P) (додатково до вашого опису) ---
sigma_alpha = std_in_roi(alpha)
sigma_P = std_in_roi(P)

# --- Маска дефектів ---
M, g_alpha, g_P = defect_mask(DoLP, P, alpha, T1=T1, T2=T2, T3=T3)

# --- Метрики ---
A_def, N_def, mean_DoLP_def, mean_P_def = quality_metrics(M, DoLP, P,
min_area_px=min_area_px)

# --- Рішення ---
label_txt, is_defect = decision(A_def, N_def, A_max=A_max, N_max=N_max)

# =====
# ВИВІД РЕЗУЛЬТАТІВ
# =====
print("\n===== БЛОК КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ =====")
print(f"σ(α) = {sigma_alpha:.4f}")
print(f"σ(P) = {sigma_P:.4f}")
print(f"A_def = {A_def:.2f}%")
print(f"N_def = {N_def}")
print(f"mean(DoLP | дефекти) = {mean_DoLP_def:.4f}")
print(f"mean(P | дефекти) = {mean_P_def:.4f}")
print("-----")
print(f"РІШЕННЯ: {label_txt}")
print("=====\n")

```

```
# --- Показ карт і маски ---
fig, axs = plt.subplots(2, 3, figsize=(14, 8))
show_map(axs[0,0], DoLP, "DoLP (ROI)", cmap="gray")
show_map(axs[0,1], P, "P (ROI)", cmap="gray")
show_map(axs[0,2], alpha, "α (масштаб. до рад)", cmap="twilight")
show_map(axs[1,0], g_alpha, "|∇α|", cmap="inferno")
show_map(axs[1,1], g_P, "|∇P|", cmap="inferno")
show_map(axs[1,2], M.astype(float), "Маска дефектів M(x,y)", cmap="gray")
plt.tight_layout()
plt.show()

show_overlay(P, M, f"Дефекти поверх P(x,y) → {label_txt}")
```