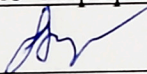


Вінницький національний технічний університет
Факультет інформаційних електронних систем
Кафедра біомедичної інженерії та оптико-електронних систем

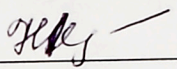
Бакалаврська кваліфікаційна робота на тему:

**СИСТЕМА ДЛЯ ПОЛЯРИМЕТРИЧНОГО КАЛІБРУВАННЯ ОПТИЧНИХ
ЕЛЕМЕНТІВ НА ОСНОВІ МАТРИЦЬ МЮЛЛЕРА**

Виконав: студент 4-го курсу, групи КОІС-216
спеціальності 152 – Метрологія та
інформаційно-вимірювальна техніка
за освітньою програмою «Комп'ютеризовані
оптико-інформаційні системи»

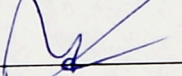
 Козачок Д. Р.

Керівник: д.т.н., проф. каф. БМІОЕС

 Заболотна Н. І.

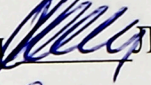
«10» червня 2025 р.

Рецензент: к.т.н., доц. каф. ОТ

 Тарновський М.Г..

«16» червня 2025 р.

Допущено до захисту

Зав. кафедри  І.Г. Коваль

«17» червня 2025 р.

Вінниця ВНТУ – 2025 рік

Вінницький національний технічний університет
Факультет інформаційних електронних систем
Кафедра біомедичної інженерії та оптико-електронних систем
Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)
Галузь знань – 15 – автоматизація та приладобудування
Спеціальність – 152 – метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка
Освітньо-професійна програма – комп'ютеризовані оптико-інформаційні системи

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри БМІОЕС

 **Л.Г. Коваль**

« 21 » березня 2025 року

ЗАВДАННЯ

НА БАКАЛАВРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Козачку Денису Руслановичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Система для поляриметричного калібрування оптичних елементів на основі матриць Мюллера

керівник роботи Заболотна Наталія Іванівна, д.т.н., доцент
затверджені наказом ВНЗ № 97 від « 20 » березня 2025 року.

2. Термін подання студентом роботи: 15.06.2025

3. Вихідні дані до роботи:

3.1 Функціональне призначення системи – калібрування оптичних елементів із аналізом матриці Мюллера на довжині хвилі лазера $\lambda=632$ нм

3.2 Вимоги до об'єкту тестування – напівхвильова фазова пластинка, швидка вісь якої має кут нахилу $\zeta = 0^\circ$ до горизонтальної осі,

3.3 Вид вимірювання: визначити двовимірні розподіли похибок вимірювань 16 мюллер-матричних зображень (ММЗ) напівхвильової фазової пластинки

3.4 Вид аналізу даних: визначення статистичних моментів розподілу похибок вимірювань ММЗ об'єкта тестування та автоматизоване прийняття рішення про результати технічної діагностики поляриметричної системи

4. Зміст текстової частини: : Вступ 1. Аналіз методів калібрування оптичних елементів в лазерних поляриметрах. 2. Математична модель, метод і структурна схема системи поляриметричного калібрування оптичних елементів 3. Експериментальна реалізація системи поляриметричного калібрування оптичних елементів. Висновки. Список використаних джерел.

Додатки.

5. Перелік ілюстративного матеріалу: 1. Схема структурна системи поляриметричного калібрування оптичних елементів на основі матриці Мюллера 2. Блок-схема вимірювання ММЗ зразка для калібрування об'єкта 3. Блок-схема алгоритму методу калібрування оптичних елементів на основі вимірювання матриць Мюллера. 4. Виміряні ММЗ фазової пластинки з гістограмами розподілу елементів їх похибок

6. Консультанти розділів роботи

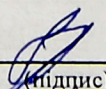
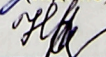
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Спеціальна частина	Заболотна Н.І., д.т.н., доц, професор каф. БМІОЕС	20.03.2025 	10.06.2025 

7. Дата видачі завдання «20» березня 2025 р

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Назва та зміст етапу	Термін виконання		Примітка
	початок	закінчення	
Вибір, узгодження та затвердження теми БДР	03.03.2025	20.03.2025	викон.
Аналіз літературних джерел. Попередня розробка основних розділів	20.03.2025	29.03.2025	викон.
Аналіз вирішення поставленої задачі на даному етапі	30.03.2025	05.05.2025	викон.
Розробка методу і структури системи	06.05.2025	17.05.2025	викон.
Розробка програмних модулів аналізу та класифікації системи	18.05.2025	23.05.2025	викон.
Експериментальні дослідження системи	24.05.2025	31.05.2025	викон.
Оформлення пояснювальної записки та графічної частини	01.06.2025	06.06.2025	викон.
Нормоконтроль	06.06.2025	09.06.2025	викон.
Попередній захист БДР, доопрацювання, рецензування БДР	10.06.2025	16.06.2025	викон.
Захист БДР ЕК	19.06.2025	20.06.2025	викон.

Студент


(підпис)


Д. Р. Козачок

Керівник роботи

Н.І. Заболотна

АНОТАЦІЯ

Бакалаврська кваліфікаційна робота складається з 85 сторінок формату А4, на яких є 30 рисунків, 2 таблиці, список використаних джерел містить 44 найменування.

У бакалаврській кваліфікаційній роботі розроблено систему для поляриметричного калібрування оптичних елементів на основі аналізу матриць Мюллера. Представлено математичну модель процесу калібрування, обґрунтовано використання статистичних моментів для оцінки точності вимірювання елементів матриць. Розроблено програмний модуль на мові Python, що реалізує обчислення векторів ознак та автоматичне прийняття рішень щодо якості калібрування. Експериментальна частина включає вибір реальних оптичних компонентів, побудову структурної та експериментальної схем, а також візуалізацію розподілів похибок. В роботі також проаналізовано чинники похибок оптичної системи. Отримані результати можуть бути застосовані у системах контролю якості та автоматичного калібрування в оптичній метрології.

Ключові слова: матриця Мюллера, поляриметрія, калібрування, статистичний аналіз, Python, вектор ознак, похибки, оптичні елементи.

ABSTRACT

The bachelor's thesis consists of 85 pages of A4 format, which includes 30 figures, 2 tables, and a list of references containing 44 items.

In the bachelor's qualification work, a system for polarimetric calibration of optical elements based on the analysis of Muller matrices has been developed. A mathematical model of the calibration process has been presented, and the use of statistical moments for assessing the accuracy of measurement of matrix elements has been justified. A software module in Python has been developed that implements the calculation of feature vectors and automatic decision-making regarding the quality of calibration. The experimental part includes the selection of real optical components, the construction of structural and experimental schemes, and the visualization of error distributions. The work also analyzes the error factors of the optical system. The results obtained can be applied in quality control and automatic calibration systems in optical metrology.

Keywords: Mueller matrix, polarimetry, calibration, statistical analysis, Python, feature vector, errors, optical elements.

ЗМІСТ

ВСТУП	6
1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ КАЛІБРУВАННЯ ОПТИЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ В ЛАЗЕРНИХ ПОЛЯРИМЕТРАХ	9
1.1 Сутність калібрування поляриметричної системи.....	9
1.2 Аналіз відомих поляриметричних методів калібрування характеристик оптичних елементів.....	9
1.2.1 Стокс-поляриметрія	10
1.2.2 Сфера Пуанкаре.....	13
1.2.3 Поляриметрія Мюллера–Стокса.....	14
1.3 Типові схеми Мюллер-поляриметрів	17
1.4 Порівняння типових схем Мюллер поляриметрів та вибір аналога системи мюллер-поляриметрії для калібрування оптичних елементів.....	22
1.5 Висновок до розділу 1	25
2 МЕТОД І СТРУКТУРНА СХЕМА СИСТЕМИ ПОЛЯРИМЕТРИЧНОГО КАЛІБРУВАННЯ ОПТИЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ НА ОСНОВІ МАТРИЦЬ МЮЛЛЕРА	26
2.1 Модельний підхід до калібрування схеми стокс-поляриметра на основі визначення його матриці Мюллера	26
2.2 Експериментальний метод визначення похибок вимірювання Мюллер-матричних розподілів досліджуваних оптичних елементів в схемі лазерного поляриметра.....	29
2.3 Алгоритм статистичного оброблення вимірювальних похибок розподілів елементів матриць Мюллера оптичних елементів.....	37
2.4 Алгоритми класифікації похибок вимірювання елементів матриць Мюллера при технічній діагностиці параметрів досліджуваних оптичних елементів	41
2.5 Висновок за розділом 2.....	46

3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ ПОЛЯРИМЕТРИЧНОГО КАЛІБРУВАННЯ ОПТИЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ.....	47
3.1 Експериментальна схема реалізації системи та визначення чинників недосконалості її елементів	47
3.2 Аспекти реалізації програмних блоків системи поляриметричного калібрування оптичних елементів	58
3.3 Результати експериментального обчислення похибки вимірювань ММЗ тестової фазової пластинки в системі	62
3.4 Програмна реалізація формування автоматизованого рішення щодо калібрування фазової пластинки	65
3.5 Висновок за розділом 3	67
ВИСНОВКИ.....	68
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	70
Додаток А Протокол перевірки кваліфікаційної роботи	76
Додаток Б Ілюстративна частина	77
Додаток В Лістинг програми	82

ВСТУП

Актуальність теми. Для точного використання оптичних елементів в інформаційно-вимірювальних поляриметричних системах, наприклад, технічної та медичної діагностики, необхідно ретельно калібрувати їх поляризаційні властивості. Сутність методу калібрування полягає у експериментальному визначенні та порівняльному аналізі параметрів поляризації досліджуваних оптичних елементів з еталонними значеннями, в результаті якого необхідно мінімізувати систематичні похибки, вводячи поправочні коефіцієнти в реальні поляризаційні характеристики досліджуваних оптичних елементів.

Основними чинниками виникнення систематичних похибок є неточність налаштування позиціонування оптичних елементів в інформаційно-вимірювальній системі, нестабільність джерела світла, неоднорідність оптичних властивостей досліджуваних об'єктів по апертурі та інші.

Поляриметричні методи калібрування дають змогу оцінити вплив об'єктів дослідження на стан поляризації світла без застосування складних інтерферометричних установок шляхом визначення елементів вектора Стокса поля, розсіяного об'єктом, та елементів матриці Мюллера об'єкту. Елементи матриці Мюллера відтворюють оптико-анізотропні властивості об'єкту, перш за все, його показник подвійного променезаломлення (фазового зсуву) та кут орієнтації оптичної осі. При калібруванні використовують апріорно відомі довідкові стани (наприклад, повне поляризоване світло під кутами 0° , 45° , 90° , $+$ – «циркуляція») та стандартні калібрувальні зразки, для яких відома матриця Мюллера, або ідеальні поляризатори і компенсатори.

Проте існуючі методи та системи для калібрування оптичних елементів на основі поляриметричних вимірювань в основному базуються на інтегральних методах вимірювання похибок. З використанням сучасних засобів цифрової реєстрації перетвореного об'єктами поляризаційного

випромінювання, наприклад, відеокамери за технологією просторового зарядового зв'язку, є потреба та можливість фіксації та аналізу поляризаційних характеристик в перерізі об'єкта в інформаційно-вимірювальних системах з певною точністю.

З іншого боку, практичний досвід показує, що окремі, а не інтегральні, елементи як вектора Стокса, так і матриці Мюллера в межах двовимірного перерізу досліджуваного об'єкта можуть визначатись з різними похибками. Така можлива нерівномірність розподілу їх похибок впливає на точність відтворення параметрів оптичної анізотропії досліджуваного об'єкта.

Отже, актуальною задачею є врахування індивідуальних особливостей параметрів оптичної анізотропії об'єкта дослідження в межах кожної точки його двовимірного перерізу в калібрувальних поляриметричних системах при визначенні похибок вимірювань, що сприятиме покращенню точності та достовірності результатів вимірювання та калібрування.

В той же час, високі вимоги до швидкодії систем калібрування обумовлюють застосування сучасних технологій інформаційного аналізу координатних розподілів похибок вимірювань в поляриметричних калібрувальних системах.

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є розширення функціональних можливостей розроблюваної системи для поляриметричного калібрування оптичних елементів за рахунок вимірювання та аналізу двовимірних розподілів похибок повного набору їх мюллер-матричних зображень для точнішого відновлення параметрів анізотропії досліджуваного об'єкта в межах двовимірного перерізу.

Для досягнення мети роботи необхідно вирішити комплекс завдань:

- проаналізувати методи калібрування оптичних елементів в лазерних поляриметрах;
- модифікувати поляриметричний метод калібрування оптичних елементів за рахунок вимірювання та аналізу двовимірних розподілів похибок повного набору їх мюллер-матричних зображень;

- розробити алгоритмічне та програмне забезпечення статистичного оцінювання двовимірних розподілів похибок повного набору їх мюллер-матричних зображень та їх класифікації на цій основі в системі поляриметричного калібрування;
- провести вимірювальний експеримент на лабораторній установці розробленої системи для тестового оптичного елемента (фазозсуваючої пластинки) з формуванням статистичних оцінок двовимірного розподілу похибок елементів матриці Мюллера та класифікаційних рішень на їх основі щодо необхідності подальшого калібрування.

Об'єкт дослідження – процес вимірювання та аналізу похибок розподілів елементів матриці Мюллера оптичних елементів при калібруванні.

Предмет дослідження – метод та система калібрування оптичних елементів на основі вимірювання та аналізу двовимірних похибок розподілів їх елементів матриці Мюллера.

1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ КАЛІБРУВАННЯ ОПТИЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ В ЛАЗЕРНИХ ПОЛЯРИМЕТРАХ

1.1 Сутність калібрування поляриметричної системи

Калібрування поляриметра — це процес встановлення відповідності між вимірюваними сигналами та дійсними поляризаційними характеристиками світла досліджуваних об'єктів чи систем. Основна мета калібрування полягає у зменшенні систематичних похибок, спричинених неточностями налаштування оптичних елементів або нестабільністю джерела світла [1].

Процес калібрування дозволяє врахувати відхилення оптичних елементів від ідеальної поведінки, компенсувати неточності у встановленні поляризаторів, компенсаторів, фазових пластинок та забезпечити правильне обчислення векторів Стокса або матриць Мюллера [2,3].

Коректне калібрування є необхідною умовою для точного визначення поляризаційних властивостей оптичних елементів та побудови достовірних моделей їхньої дії.

1.2 Аналіз відомих поляриметричних методів калібрування характеристик оптичних елементів

Для коректного використання оптичних елементів необхідне точне калібрування їхніх поляризаційних характеристик. Поляриметричні методи калібрування дозволяють визначити, як оптичні елементи впливають на стан поляризації випромінювання, без потреби у складних інтерферометричних схемах [4]. Поляриметрія ґрунтується на вимірюванні поляризаційного стану світла та його змін під час проходження через оптичні елементи [5].

Калібрування оптичного елемента означає визначення його ключових поляризаційних характеристик (наприклад, для компенсатора — це визначення кута обертання й ретардації, для поляризатора — діатенюації) [6]. Основний

підхід полягає у вимірюванні поляриметричних параметрів (вектора Стокса або матриці Мюллера) на виході елемента при відомих вхідних поляризаційних станах. Знаючи вхідні стани та вимірявши вихідний вектор Стокса, можна відновити 4×4 матрицю Мюллера елемента і за допомогою фізичної декомпозиції отримати його параметри. Наприклад, матриця Мюллера дає повну інформацію про діатенюацію і ретардацію об'єкта. [3,7,8].

При калібруванні використовують апріорно відомі довідкові стани (наприклад, повне поляризоване світло під кутами 0° , 45° , 90° , + – «циркуляція») та стандартні калібрувальні зразки, для яких відома матриця Мюллера, або ідеальні поляризатори і компенсатори [9].

Нижче розглянуто три підходи до такого калібрування: метод визначення параметрів Стокса (стокс-поляриметрія), геометричний метод на основі сфери Пуанкаре та метод повного вимірювання матриці Мюллера (Мюллер-матрична поляриметрія). Кожен з них має свою фізичну суть, особливості реалізації, а також переваги і обмеження при застосуванні до калібрування оптичних елементів.

1.2.1 Стокс-поляриметрія

У поляриметрії світло описується вектором Стокса [10]:

$$S = \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} \quad (1.1)$$

де: $S_0 = I$ — повна інтенсивність; $S_1 = pI * \cos(2\psi) * \cos(2\chi)$ — різниця між горизонтальною та вертикальною поляризацією; $S_2 = pI * \sin(2\psi) * \cos(2\chi)$ — різниця між $+45^\circ$ і -45° поляризацією; $S_3 = pI * \sin(2\chi)$ — різниця між правою та лівою «циркулярною» поляризацією.

Стокс-поляриметрія базується на повному описі поляризаційного стану світла за допомогою чотирьох параметрів Стокса: I (повна інтенсивність), Q, I, V (параметри, що визначають розподіл інтенсивності між різними

поляризаціями). Ці параметри утворюють вектор Стокса $S = [I, Q, U, V]^T$, який однозначно характеризує поляризацію: зокрема, Q і U відповідають переважанню лінійної поляризації під певними кутами, а V – круговій поляризації (знаком визначається права чи ліва).

Вектори Стокса дозволяють описувати як повністю, так і частково поляризовані оптичні пучки, що робить їх особливо придатними для аналізу взаємодії поляризованого світла з біологічними тканинами. Порівняння поляризаційних характеристик падаючого та розсіяного після взаємодії зразка світла дає змогу отримати певні метрики (наприклад, ступінь деполіризації світла), пов'язані з властивостями тканини. Зокрема, Бекман з колегами розробили теоретичну модель поширення поляризованого світла в клітинах і експериментально продемонстрували, що спектр зворотно розсіяного поляризованого світла від епітеліальних шарів має характерний «відбиток», який залежить від розмірів клітин і ядер, а також від їхніх показників заломлення [11].

Метод вимірювання параметрів Стокса полягає у проведенні кількох фотометричних вимірювань зі вставленими аналізаторами поляризації. Так, інтенсивність пучка вимірюється при послідовному встановленні лінійного аналізатора під кутами 0° , 45° , 90° , 135° та чвертьхвильової пластинки (для оцінки V). За набором таких інтенсивностей обчислюються значення I, Q, U, V . У сучасних поляриметрах процес часто автоматизовано, в системах використовуються обертові поляризатори та компенсатори або багатоканальні схеми, що дають змогу швидко отримати всі компоненти вектора Стокса [12].

При калібруванні оптичних елементів методом Стокса зазвичай фіксують один або кілька відомих станів поляризації на вході модулятора та вимірюють стан поляризації на виході для кожного з них. Найпростіший підхід – подати на оптичний елемент світло з відомою лінійною поляризацією (наприклад, під 45° до осі модулятора) і реєструвати вектор Стокса вихідного пучка при різних рівнях сигналу на оптичному елементі. Зміна параметрів

Q, U, V від керуючого сигналу дозволяє визначити внесок оптичного елементу у перетворення поляризації. Наприклад, періодичні коливання параметра Q чи U при збільшенні напруги можуть вказувати на фазову затримку, що циклічно змінюється (модуль 360°), дозволяючи визначити залежність «напруга–фазовий зсув». Подібним чином, аналіз компоненти V може показати, чи індукує оптичний елемент еліптичну (в т.ч. циркулярну) поляризацію з певним знаком. Важливо, що для такої поляриметричної оцінки не потрібна інтерференція з опорним пучком – усі потрібні дані отримуються з інтенсивностей після простих оптичних елементів [13].

Важливим аспектом стокс-поляриметрії є правильне калібрування самого поляриметра, що проводить вимірювання. Похибки в установці кутів аналізаторів або неточності фазової пластинки можуть призвести до систематичних помилок у визначенні параметрів Стокса. Традиційно поляриметр калібрують за допомогою еталонних зразків (наприклад, вимірюючи відому поляризацію лазера або відоме оптичне ставлення пластинки).

Однак відомі автоматизовані методики самокалібрування. Зокрема, існують так звані методи власних значень, які дозволяють калібрувати поляриметр без детального знання параметрів всіх його елементів і без ідеалізованих еталонів. Такі алгоритми визначають необхідні поправки, не вимагаючи апіорної інформації про точні кути встановлення поляризаторів чи пластин, і тим самим спрощують налаштування установки [13].

Деякі сучасні конструкції поляриметрів взагалі виконують самокалібрування під час вимірювань – наприклад, шляхом введення додаткового детектора для моніторингу коливань інтенсивності або обертання одразу двох оптичних елементів для усунення впливу нестабільності джерела. У результаті досягається висока точність визначення параметрів Стокса (похибки на рівні $\sim 0,1\text{--}0,5\%$ для відносних ступенів поляризації) навіть за наявності флуктуацій інтенсивності лазера [14].

1.2.2 Сфера Пуанкаре

Сфера Пуанкаре – це геометрична модель, яка відображає всі можливі стани повної поляризації світла у вигляді точок на поверхні сфери одиничного радіуса. Координатами на сфері служать так звані нормовані параметри поляризації q, u, v (відповідні відношення $\frac{Q}{I}, \frac{U}{I}, \frac{V}{I}$ компонента вектора Стокса), які для повністю поляризованого пучка задовольняють співвідношенню $q^2 + u^2 + v^2 = 1$.

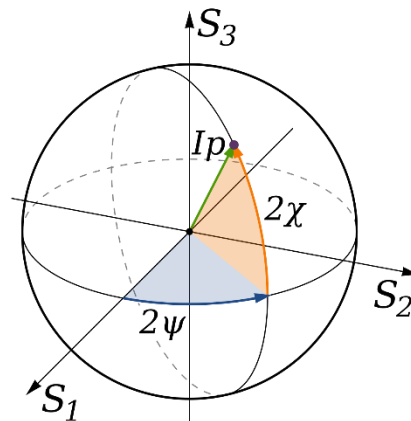


Рисунок 1.1 – Сфера Пуанкаре [16]

Кожна точка на поверхні сфери відповідає певному стану поляризації: наприклад, протилежні полюси сфери відповідають правій та лівій круговій поляризації, а точки на екваторі – лінійно поляризованому світлу під різними кутами. Таким чином, зміна стану поляризації світла можна інтерпретувати як переміщення точки по поверхні сфери Пуанкаре. Якщо ж світло частково поляризоване або деполаризоване, відповідна точка лежатиме всередині сфери або в центрі (для повністю неполяризованого випадку).

Для дослідження характеристик оптичних елементів за допомогою сфери Пуанкаре необхідно експериментально визначати положення точки, що відповідає вихідному стану поляризації випромінювання після проходження через модулятор. Практично це реалізується вимірюванням вектора Стокса вихідного пучка (тобто його параметрів I, Q, U, V) при різних керуючих напругах або сірого рівня оптичних елементів. Знаючи початковий стан

поляризації вхідного випромінювання (наприклад, лінійна поляризація під кутом 45° або кругова поляризація), можна відстежувати траєкторію точки на сфері Пуанкаре, яку описує вихідне випромінювання при зміні керуючих сигналів модулятора.

Аналіз розподілу вимірних точок на сфері (чи на відповідних проекціях $S_1 - S_2$ тощо) дозволяє якісно оцінити вплив параметрів оптичних елементів на результати поляризації та наблизити вимірювання ближче до реальних результатів. Зокрема, на основі такого аналізу можна приймати рішення щодо необхідності компенсації небажаних ефектів. Прикладом є робота, в якій метод сфери Пуанкаре був використаний для оптимізації режиму фазового модулятора: досліджуючи розподіл станів поляризації вихідного променя на площині $S_1 - S_2$, автори підібрали орієнтацію додаткової чвертьхвильової пластинки, щоб забезпечити максимальну фазову модуляцію рідкокристалічного дисплея при мінімальних змінах інтенсивності.

1.2.3 Поляриметрія Мюллера–Стокса

Для характеристики поляриметричних властивостей об'ємної тканини без впливу сторонніх експериментальних факторів та за відсутності будь-якої попередньої інформації про середовище, слід проводити повне вимірювання матриці Мюллера [16].

Матриця Мюллера зразка — це матриця перетворення розміром 4×4 , яка перетворює параметри Стокса падаючого світла (S_{in}) у параметри Стокса випромінюваного світла (S'_{out}) [4] в схемі, наприклад, на рисунку 1.2.

Ось так матриця Мюллера виглядає в теорії:

$$S'_{out} = \mathbf{M} S_{in} , \quad (1.2)$$

$$\begin{pmatrix} S'_0 \\ S'_1 \\ S'_2 \\ S'_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} & M_{14} \\ M_{21} & M_{22} & M_{23} & M_{24} \\ M_{31} & M_{32} & M_{33} & M_{34} \\ M_{41} & M_{42} & M_{43} & M_{44} \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix}. \quad (1.3)$$

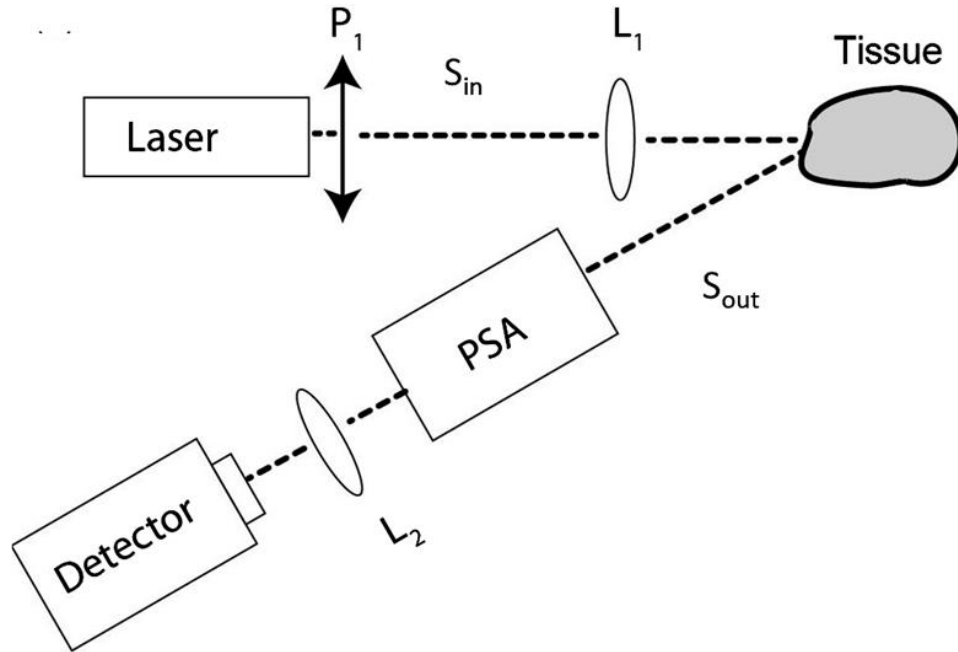


Рис. 1.2 – Система точкової поляриметрії Стокса [16]

За умов нормального падіння світлової хвилі на площину зразка характеристики анізотропії та деполаризації об'єкта описуються матричним виразом [17]:

$$S_{out} = M_A * M_{\Phi\Pi} * M_{OT} * M_{\Phi\Pi} * M_{\Pi} * S_{in}, \quad (1.4)$$

де $M_A, M_{\Phi\Pi}$ та M_{Π} – матриці Мюллера відповідно до елементів поляриметричної схеми (аналізатора, фазової пластинки та поляризатора), а M_{OT} – матриця Мюллера ділянки об'ємної тканини.

Матриця Мюллера для фазової пластинки має вигляд [17]:

$$M_{\Phi\Pi} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos^2(2\alpha) + \sin^2(2\alpha)(1 - \cos(\delta)) & \cos(2\alpha)\sin(2\alpha)(1 - \cos(\delta)) & -\sin(2\alpha)\sin(\delta) \\ 0 & \cos(2\alpha)\sin(2\alpha)(1 - \cos(\delta)) & \sin^2(2\alpha) + \cos^2(2\alpha)\cos(\delta) & \cos(2\alpha)\sin(\delta) \\ 0 & \sin(2\alpha)\sin(\delta) & -\cos(2\alpha)\sin(\delta) & \cos(\delta) \end{bmatrix} \quad (1.5)$$

Матриця Мюллера для поляризатора має вигляд [17]:

$$M_{\Pi} = M_A = \begin{bmatrix} 1 & \cos(2\alpha) & \sin(2\alpha) & 0 \\ \cos(2\alpha) & \cos^2(2\alpha) & \cos(2\alpha)\sin(2\alpha) & 0 \\ \sin(2\alpha) & \cos(2\alpha)\sin(2\alpha) & \sin^2(2\alpha) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (1.6)$$

Матриці Мюллера для оптичних елементів, таких як поляризатори чи компенсатори, можуть бути теоретично розраховані на основі їх впливу на поляризаційний стан світла. Натомість для розсіювальних неоднорідних середовищ, зокрема біологічних тканин, аналітичне передбачення матриці Мюллера є неможливим через невизначеність показників заломлення, розмірів, просторового розподілу та фізичної природи розсіювачів, які спричиняють випадкові траєкторії фотонів і призводять до деполіризації. У спеціальних випадках, коли розсіювальне середовище добре контрольоване (наприклад, модельна система з мікросферами однакового розміру у воді), елементи матриці M можуть бути розраховані або апроксимовані — наприклад, деякі елементи вважаються рівними нулю, інші — однаковими за значенням або однаковими за модулем і протилежними за знаком. Проте такі спрощення, як правило, не є обґрунтованими для біологічних тканин, і виміряні елементи їхніх матриць Мюллера зазвичай є незалежними між собою та можуть набувати будь-яких значень у межах від -1 до 1 (для нормованої матриці).

Поляриметрія Мюллера особливо корисна, коли потрібно калібрувати оптичні елементи для різних умов використання або перевірити його відповідність моделі при складній поведінці.

Слід підкреслити, що вибір методики калібрування оптичних елементів залежить від вимог до точності та повноти інформації. Геометричний аналіз на сфері Пуанкаре є зручним для якісного розуміння і початкового налаштування, стокс-поляриметрія забезпечує відносно простий шлях до ключових параметрів (особливо фазових характеристик) і піддається швидкій реалізації, тоді як мюллер-матрична поляриметрія дає найдетальнішу картину і незамінна при науковому дослідженні нових ефектів у рідкокристалічних модуляторах. Практично часто використовують комбінацію методів: наприклад, спочатку експрес-калібрування за інтенсивністю (в термінах Стокса) для отримання базової градуїровки фазового зсуву, а далі – вибіркове повне поляриметричне дослідження окремих пікселів чи режимів для перевірки однорідності та виявлення неврахованих ефектів. Такий підхід дозволяє максимально ефективно калібрувати оптичний елемент і забезпечити його надійну роботу у відповідних оптичних системах.

1.3 Типові схеми Мюллер-поляриметрів

Мюллер-поляриметр — це оптичний прилад, призначений для повного визначення поляризаційних властивостей світла після його взаємодії з матеріалом. Основна мета такого пристрою — вимірювання матриці Мюллера, яка описує, як зразок змінює стан поляризації падаючого світла [18].

Типова схема Мюллер-поляриметра включає наступні основні компоненти [18]:

1. Джерело світла (LS): Забезпечує необхідну інтенсивність та спектральний діапазон випромінювання.
2. Генератор станів поляризації (PSG): Формує відомі стани поляризації вхідного світла.
3. Зразок (S): Об'єкт дослідження, через який проходить або відбивається світло.

4. Аналізатор станів поляризації (PSA): Визначає стан поляризації світла після взаємодії із зразком.
5. Детектор (PD): Фіксує інтенсивність світла для кожної комбінації станів PSG та PSA.

Нижче описано чотири типові схеми Мюллер поляриметрів, що найбільш широко застосовуються у сучасних наукових і прикладних дослідженнях, кожна з яких має свої особливості побудови, принцип дії та область використання.

1.3.1 Схема з подвійними обертовими сповільнювачами

Одна з найпоширеніших конфігурацій Мюллер-поляриметрів базується на використанні двох обертових ретардерів (фазових пластинок)— одного в PSG і одного в PSA. Ця схема, як показано на рисунку 1.3, дозволяє отримати повну матрицю Мюллера шляхом обертання сповільнювачів та вимірювання інтенсивності світла для різних комбінацій кутів обертання. Перевагою такої схеми є висока точність вимірювань, однак вона потребує тривалого часу для збору даних через механічне обертання елементів.

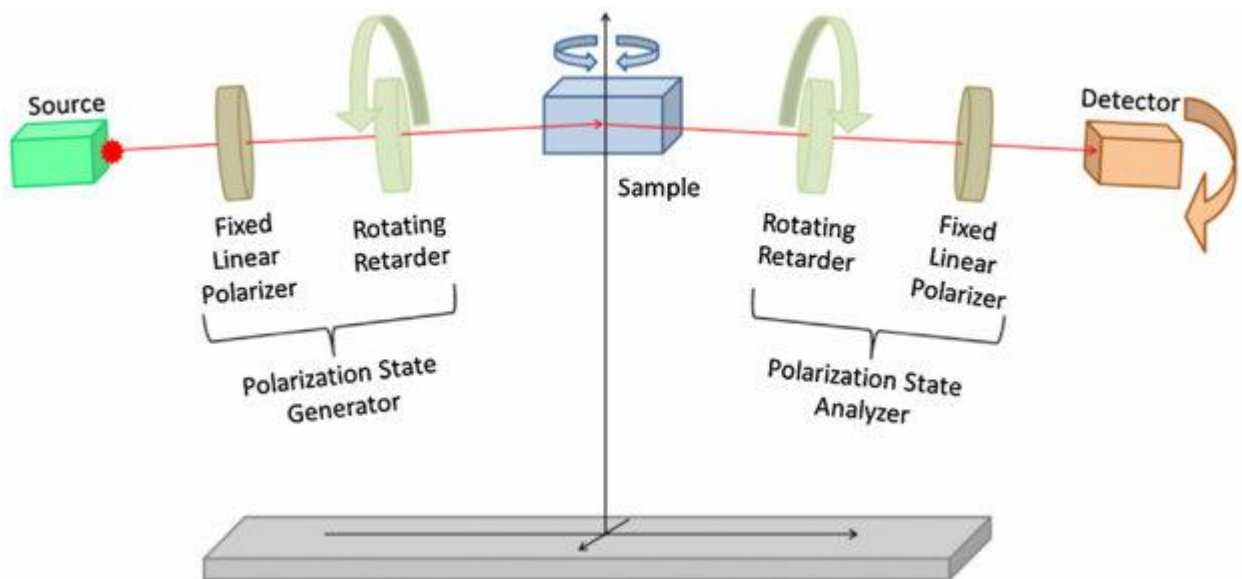


Рисунок 1.3 – Приклад схеми Мюллер поляриметра основаного на DRR [19]

Як показано на рисунку 1.3, система складається з генератора стану поляризації (PSG) та аналізатора стану поляризації (PSA), кожен з яких включає лінійний поляризатор і обертову чвертьхвильову пластину. Основна відмінність між цими компонентами полягає в швидкості обертання чвертьхвильових пластин: зокрема, компенсатор у PSA обертається в п'ять разів швидше, ніж у PSG [20] .

У процесі вимірювання інтенсивність світла, що потрапляє на детектор, може бути виражена у вигляді:

$$S_{out} = M_{sys} * S_{in} , \quad (1.7)$$

де матриця Мюллера M_{sys} обчислюється у вигляді

$$M_{sys} = M_{LP2} * M_{LR2} * M_{sample} * M_{LR1} * M_{LP1} , \quad (1.8)$$

де M_{LP1} та M_{LP2} є Мюллер матрицями ідеальних лінійних поляризаторів які налаштовані в горизонтальний моді пропускання, тобто

$$M_{LP1} = M_{LP2} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (1.9)$$

Крім того, M_{LR1} та M_{LR2} є Мюллер матрицями ідеальних чвертьхвильових пластинок, які мають вигляд [20]:

$$M_{LR1}(\theta_1 = \omega t) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos^2 2\omega t & \sin(2\omega t) \cos(2\omega t) & -\sin(2\omega t) \\ 0 & \sin(2\omega t) \cos(2\omega t) & \sin^2(2\omega t) & \cos(2\omega t) \\ 0 & \sin(2\omega t) & -\cos(2\omega t) & 0 \end{bmatrix} \quad (1.10)$$

i

$$M_{LR2}(\theta_2 = 5\omega t) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos^2 10\omega t & \sin(10\omega t) \cos(10\omega t) & -\sin(10\omega t) \\ 0 & \sin(10\omega t) \cos(10\omega t) & \sin^2(10\omega t) & \cos(10\omega t) \\ 0 & \sin(10\omega t) & -\cos(10\omega t) & 0 \end{bmatrix} \quad (1.11)$$

де ω – кутова швидкість обертання.

У розглянутому прикладі схеми швидкої осі чвертьхвильових пластин спочатку орієнтовані паралельно осі X. Іншими словами, на момент часу $t = 0$ кути нахилу становлять $\theta_1 = \theta_2 = 0$.

Матриця Мюллера зразка M_{sample} має загальний вигляд:

$$M_{sample} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & m_{24} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & m_{34} \\ m_{41} & m_{42} & m_{43} & m_{44} \end{bmatrix}, \quad (1.12)$$

де $m_{11} \dots m_{44}$ – елементи матриці Мюллера які характеризують властивості зразка.

1.3.2 Схема з рідкокристалічними змінними сповільнювачами

Інша поширена конфігурація використовує рідкокристалічні змінні ретардери (LCVR) в PSG та PSA. Ці елементи дозволяють змінювати стан поляризації без механічного руху, що забезпечує швидші вимірювання та зменшує знос компонентів. Замість цього, змінення стану поляризації відбувається за допомогою напруги, яка подається на сам ретардер.

LCVR складається з шару нематичного рідкого кристалу, розміщеного між двома прозорими електродами, зазвичай виготовленими з оксиду індію та олова. При відсутності напруги молекули рідкого кристалу орієнтовані в певному напрямку, що забезпечує певне двопронезаломлення [21].

Застосування електричного поля змінює орієнтацію молекул, що призводить до зміни фазового зсуву між ортогональними компонентами поляризованого світла. Цей зсув, або ретардація, є функцією прикладеної напруги і може бути точно контрольованим.

Типова конфігурація LCVR-поляриметра наведена на рисунку 1.4 та включає в себе такі основні елементи:

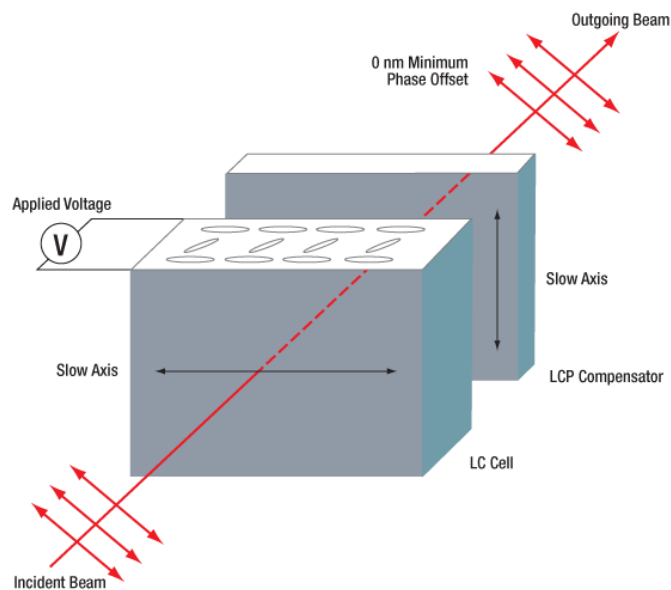


Рисунок 1.4 – Схема LCVR [22]

Типова конфігурація LCVR-поляриметра включає:

1. Джерело світла: забезпечує необхідну інтенсивність та спектральний діапазон.
2. Поляризатор: формує лінійно поляризоване світло.
3. LCVR-1: змінює стан поляризації вхідного світла.
4. Зразок: об'єкт дослідження.
5. LCVR-2: аналізує змінений стан поляризації після взаємодії зі зразком.
6. Аналізатор: вимірює інтенсивність світла після проходження через LCVR-2.
7. Детектор: реєструє інтенсивність світла для подальшого аналізу.

Ця конфігурація дозволяє отримати повну матрицю Мюллера зразка шляхом вимірювання інтенсивності світла для різних комбінацій фазових зсувів LCVR-1 та LCVR-2 [23].

Вимірювання матриці Мюллера базується на аналізі зміни стану поляризації світла після проходження через зразок.

Стан поляризації описується вектором Стокса [23]:

$$S = \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix}, \quad (1.13)$$

де S_0 – загальна інтенсивність світла;

S_1 – різниця між горизонтальною та вертикальною поляризацією;

S_2 – різниця між поляризацією під кутами $+45^\circ$ та -45° ;

S_3 – різниця між правою та лівою циркулярною поляризацією.

Матриця Мюллера M описує, як зразок змінює стан поляризації:

$$S_{\text{вих}} = M * S_{\text{вх}}, \quad (1.14)$$

де $S_{\text{вх}}$ та $S_{\text{вих}}$ — вектори Стокса вхідного та вихідного світла відповідно.

Змінюючи фазові зсуви LCVR-1 та LCVR-2, можна створити різні стани поляризації вхідного світла та аналізувати відповідні вихідні інтенсивності. Це дозволяє побудувати систему рівнянь для визначення елементів матриці Мюллера зразка.

1.4 Порівняння типових схем Мюллер поляриметрів та вибір аналога системи мюллер-поляриметрії для калібрування оптичних елементів

У сучасній поляриметрії існує кілька основних підходів до побудови систем вимірювання повної матриці Мюллера. Як було зазначено раніше, найпоширенішими серед них є: система з подвійними обертовими

ретардерами (DRR) та система з рідкокристалічними модуляторами (LCR). Нижче наведено порівняльну таблицю 1.1 з розширеним аналізом переваг та обмежень кожної схеми.

Таблиця 1.1 Порівняльні характеристики мюллер-поляриметрів

Тип схеми	Переваги	Недоліки	Рекомендації для застосування
Схеми з подвійними обертовими ретардерами	Висока точність та повторюваність вимірювань; добре вивчена математична модель; низький рівень шуму	Тривалий час вимірювання через механічне обертання; складність узгодження кутів обертання	Найкраще підходить для точних лабораторних вимірювань
Схеми з рідкокристалічними модуляторами	Висока швидкість, безмеханічна робота; компактність	Обмежена спектральна стабільність; залежність від температури; вища похибка	Корисна у випадках, де потрібна швидкість, а не точність

У рамках даної бакалаврської роботи було прийнято рішення реалізувати поляриметр саме на основі схеми з подвійними обертовими ретардерами. Основним критерієм для такого вибору є необхідність досягнення максимально можливої точності та стабільності вимірювань, яка є критичною для задач, що розглядаються в цій роботі.

Однією з ключових переваг DRR-систем є її висока метрологічна надійність. Обертання двох незалежних ретардерів дозволяє реалізувати 36 незалежних комбінацій станів поляризації, що формують повну матрицю вимірювань. Завдяки цьому вдається уникнути редукції даних та використовувати прямі аналітичні методи обчислення елементів матриці Мюллера, що значно зменшує похибку.

Окрім того, DRR-системи мають відносно просту й добре вивчену теоретичну базу, яка активно підтримується як в академічній літературі, так і

в програмному забезпеченні для моделювання. Це спрощує розробку математичних алгоритмів реконструкції та калібрування.

За аналог системи мюллер-поляриметрії, яка розробляється в даній роботі, візьмемо схему автоматизованого мюллер-поляриметра, наведену на рисунку 1.5 [24], яка містить в своїй структурі два сповільнювача і відноситься до групи мюллер-поляриметрів DRR.

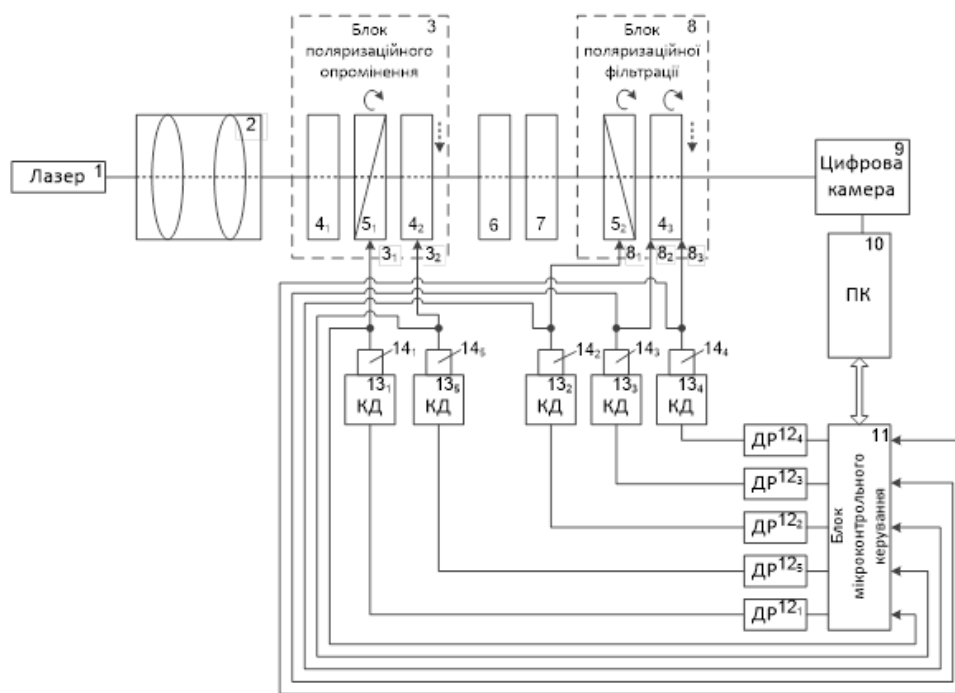


Рисунок 1.5 – Схема автоматизованого мюллер-поляриметра [24]

Структура мюллер-поляриметра на рисунку 1.5 може бути використана для калібрування оптичних елементів.

Проте основним її недоліком є обчислення інтегральної похибки вимірювань всіх елементів матриці Мюллера в межах перерізу об'єкта досліджень, відсутність аналізу вимірюваних калібрувальних характеристик оптичних елементів та відсутність підсистеми прийняття рішення про результати калібрування, що обмежує її функціональні можливості, і потребує удосконалення.

1.5 Висновок до розділу 1

Проведено детальний аналіз схем калібрування поляризаційних характеристик оптичних елементів на основі сфери Пуанкаре, параметрів вектора Стокса та елементів матриці Мюллера.

Встановлено найбільшу перспективність застосування схем мюллер-поляриметрів для калібрування оптичних елементів у порівнянні з іншими.

Аналіз основних типів Мюллер-поляриметрів дозволив визначити їх сильні та слабкі сторони у контексті різних прикладних задач. У результаті було прийнято обґрунтоване рішення про використання схеми з подвійними обертовими сповільнювачами у вигляді фазозсуваючих пластинок, яка забезпечує найвищу точність та стабільність результатів, проте потребує розширення функціональних вимог.

Таким чином, реалізація Мюллер-поляриметра на основі DRR є найбільш доцільною в умовах лабораторних високоточних досліджень, що й було обрано як базову технічну платформу для даної бакалаврської роботи, враховуючи необхідність подальшого розширення функціональних можливостей системи.

2 МЕТОД І СТРУКТУРНА СХЕМА СИСТЕМИ ПОЛЯРИМЕТРИЧНОГО КАЛІБРУВАННЯ ОПТИЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ НА ОСНОВІ МАТРИЦЬ МЮЛЛЕРА

2.1 Модельний підхід до калібрування схеми стокс-поляриметра на основі визначення його матриці Мюллера

Розглянемо математичну основу побудови системи калібрування оптичних елементів із використанням Мюллер-матриць. Основною перевагою такого підходу є здатність точно моделювати вплив елементів на поляризаційний стан світла, враховуючи як детерміновані, так і стохастичні (деполяризаційні) ефекти.

В роботі [25] розглядається апарат Мюллер-матричної алгебри та декомпозиції.

Поляризаційний стан світла описується вектором Стокса, який описаний у формулі (1.1).

Зв'язок між вхідним і вихідним станами поляризації задається матрицею Мюллера яка описана формулою (1.2).

Матриця Мюллера описує повний вплив оптичного елемента на поляризаційний стан, зокрема діатенюацію, ретардацію, та деполяризацію.

Фізична декомпозиція дозволяє подати Мюллер-матрицю як послідовне перетворення у вигляді [25, 26]:

$$M = M_{\Delta} * M_R * M_D, \quad (2.1)$$

де M_D – матриця ідеального діатенюатора (поляризатора); M_R – матриця чистого ретардера (фазової пластинки); M_{Δ} - матриця деполяризації.

Організацію обчислювальної розкладання матриці Мюллера за виразом (2.1) відобразимо на рисунку 2.1.

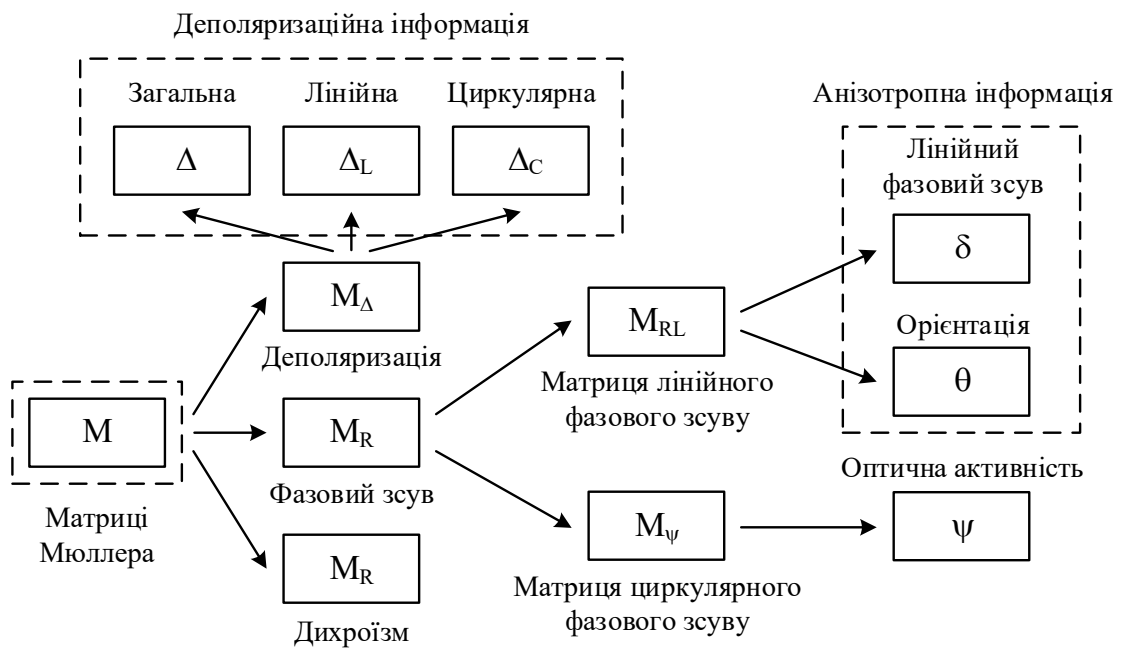


Рисунок 2.1 – Представлення матриці Мюллера за її складовими по Лу-Чіпмен [27]

Кожен з блоків можна описати окремими формулами.

Наприклад, матриця діатенюатора має такий вигляд [25, 26]:

$$M_D = \begin{bmatrix} 1 & d & 0 & 0 \\ d & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sqrt{1-d^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sqrt{1-d^2} \end{bmatrix}, |d| \leq 1 \quad (2.2)$$

Матриця ретардера у випадку лінійної фазової пластинки така [25, 26]:

$$M_R(\delta, \theta) = R^{-1}(\theta) * M_\delta * R(\theta), \quad (2.3)$$

де: δ – фазовий зсув; θ – орієнтація оптичної осі, $R(\theta)$ – матриця обертання.

Матриця обертання може бути подана у вигляді [25, 26]

$$R(\theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(2\theta) & \sin(2\theta) & 0 \\ 0 & -\sin(\theta) & \cos(2\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (2.4)$$

Матриця ідеального ретардера має такий вигляд [25, 26]:

$$M_\delta = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos(\delta) & \sin(\delta) \\ 0 & 0 & -\sin(\delta) & \cos(\delta) \end{bmatrix}. \quad (2.5)$$

Ці параметри разом дозволяють здійснювати повну характеристику оптичного елемента.

Для перевірки алгоритмів калібрування використовуються модельні Мюллер-матриці з відомими параметрами.

Наприклад, матриця ідеального поляризатора зі ступенем діатенюації $D = 1$ уздовж горизонтальної осі:

$$M_{pol} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (2.6)$$

Для фазової пластинки з фазовим зсувом $\delta = \frac{\pi}{2}$ та орієнтацією $\theta = 45^\circ$:

$$M_{ret} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (2.7)$$

Калібрування оптичних елементів можна сформулювати як задачу мінімізації різниці між експериментально отриманою матрицею M_{exp} та змодельованою $M_{model}(\vec{p})$, де $\vec{p}$ – вектор параметрів (кут, ретардація, діатенюація):

$$\min_{\vec{p}} \|M_{exp} - M_{model}(\vec{p})\|_F^2, \quad (2.8)$$

де $\|\cdot\|_F$ – норма Фробеніуса.

2.2 Експериментальний метод визначення похибок вимірювання Мюллер-матричних розподілів оптичних елементів в схемі

Для проведення калібрування встановленого положення, наприклад, фазової пластинки в схемі поляриметра важливо контролювати величину її фазового зсуву φ та орієнтацію швидкої осі θ .

Для цього виміряємо матрицю Мюллера реальної досліджуваної фазової пластинки як об'єкта дослідження в схемі лазерного поляриметра та порівнюємо їх із матрицею Мюллера ідеальної фазової пластинки.

Матриця Мюллера фазової пластинки $\lambda/4$ з фазовим зсувом φ та орієнтаційним кутом θ швидкої осі має вигляд

$$F(\varphi = 90^\circ, \theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & (\cos 2\theta)^2 & \cos 2\theta \sin 2\theta & -\sin 2\theta \\ 0 & \cos 2\theta \sin 2\theta & (\sin 2\theta)^2 & \cos 2\theta \\ 0 & \sin 2\theta & -\cos 2\theta & 0 \end{bmatrix}. \quad (2.9)$$

Дослідити розподіли значень мюллер-матричних елементів досліджуваного оптичного елемента можна за допомогою схеми автоматизованого мюллер-поляриметра, показаної, наприклад, на рисунку 2.1.

Схема на рисунку 2.2 (додаток Б.1) складається із властивих для мюллер-поляриметрів основних блоків. Це перш за все, лазер, як джерело світла, з якого за допомогою блоку багатоканального поляризаційного опромінювача (ББПО) будемо створювати необхідний тип поляризації для зондування

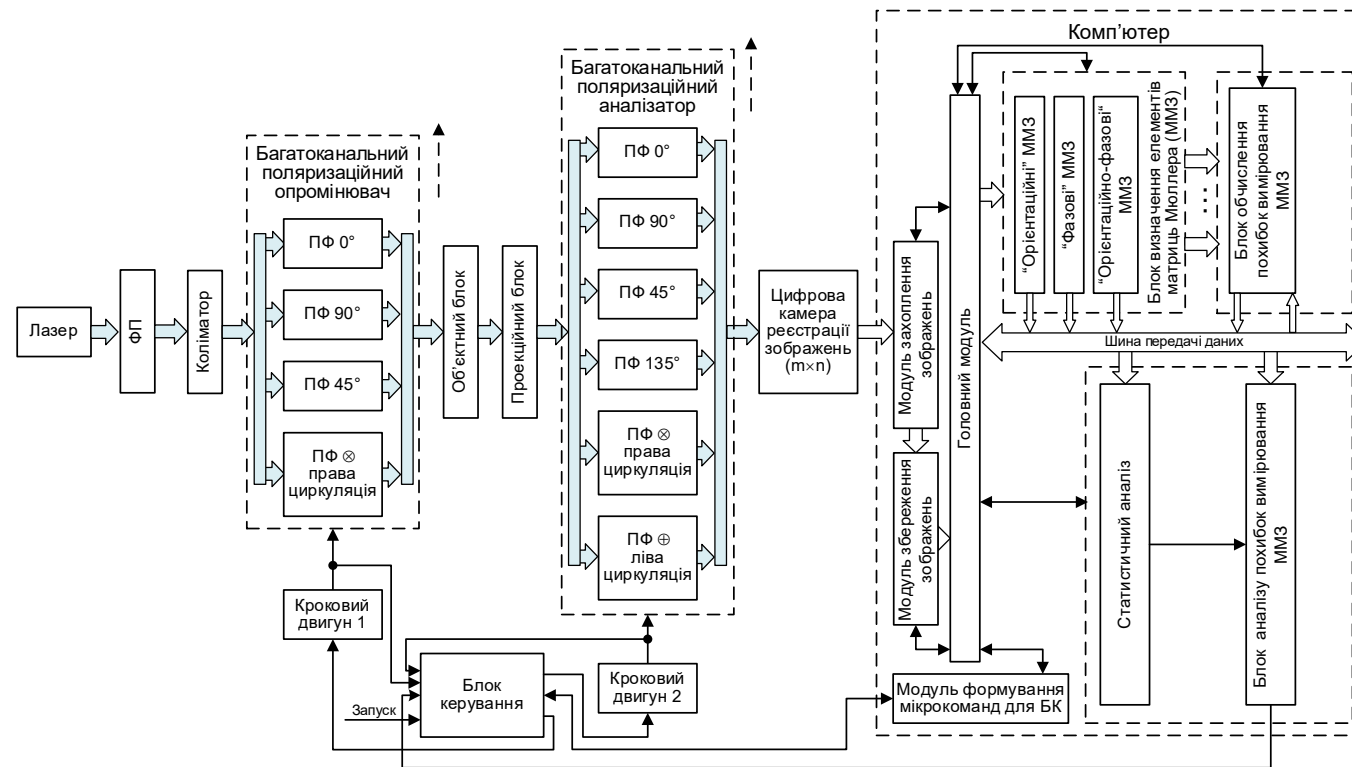


Рисунок 2.2 – Схема структурна лазерного поляриметра для калібрування оптичних елементів на основі вимірювання матриці Мюллера

зразка. Сам зразок, яким є досліджуваний оптичний елемент, розташований в об'єктному блоці.

Також в схемі є обов'язковий блок, названий багатоканальним поляризаційним аналізатором (ББПА). Через проекційний блок (об'єктив) до цього блоку подається пропущене через досліджуваний оптичний елемент лазерне випромінювання з конкретно сформованим типом поляризації.

В результаті маємо на виході ББПА випромінювання з певною інтенсивністю $I(x,y)$ в кожній точці матриці $M \times N$ з певною поляризацією, тип та значення якої отримано за результатами поляризаційної фільтрації.

Набір точок матриці $I(K \times N)$ збирається оптикою та реєструється засобом реєстрації з матричним фотоприймачем, яким є цифрова камера.

З виходу камери через відповідний інтерфейс матриця поляризаційно відфільтрованих інтенсивностей передається до комп'ютера, де зберігається в пам'яті. Необхідно, щоб ББПО та ББПА забезпечували можливість утворення та аналізу поляризації лінійної чи циркулярної з певними параметрами. Ці параметри потрібно взяти із методу обчислення матриці Мюллера об'єкта.

Для того, щоб фізично забезпечити вказані параметри в схемі використовують спеціальне конструктивне виконання ББПО та ББПА, які можуть обертатись навколо себе або переміщуватись у вертикальній площині. Цими функціями керує блок керування системи, який запускає роботу двох крокових двигунів в системі. Вони дозволяють автоматизованій платформі з ББПФ та ББПА обертатись або переміщуватись за заданими параметрами. Важливо відслідковувати ці маніпуляції за допомогою зворотніх зв'язків контролю позиціонування елементів ББПА та ББПА, що вказано на схемі.

Розглянемо метод визначення матриці Мюллера об'єкту нижче, застосовуючи поняття мюллер-матричних зображень (ММЗ) об'єкту. Якщо відповідні елементи матриці Мюллера (1.12) перегрупувати за однойменними елементами в межах розмірності камери $(K \times N)$, то буде 16 ММЗ.

Розглянемо експериментальний метод визначення елементів ММЗ об'єкту калібрування нижче .

1. Послідовно опромінюємо об'єкт калібрування в системі лазерними пучками світла різних типів поляризації A , серед яких три лінійні типи поляризації з азимутом α та четвертий тип – циркулярна поляризація з еліптичністю β $A = \{\alpha = 0^0, \alpha = 90^0, \alpha = +45^0, \beta = +45^0\}$. Це виконуємо за допомогою таких каналів ББПО відповідно: ПФ 0^0 , ПФ 90^0 , ПФ 45^0 (поляризаційні фільтри лінійні), ПФ $\otimes$ (поляризаційний циркулярний фільтр).

2. Реалізуємо поляризаційний аналіз перетвореного зразком поляризаційного випромінювання за 6 можливими типами поляризації B , серед яких 4 лінійні типи поляризації з азимутом α та п'ятий і шостий типи – це циркулярні поляризації «права» і «ліва» $B = \{\alpha_1 = 0^0, \alpha_1 = 90^0, \alpha_1 = +45^0, \alpha_1 = +135^0, \beta_1 = \otimes, \beta_2 = \oplus\}$.

3. Отримуємо 24 зображення інтенсивностей $I_B^A(KxN)$, які фіксує камера, та фіксуємо в модулі пам'яті комп'ютера.

4. Необхідно виміряти вектори Стокса на основі отриманих зображень інтенсивностей за формулами:

$$S_1^a(KxN) = I_0^a(KxN) + I_{90}^a(KxN), \quad (2.10)$$

$$S_2^a(KxN) = I_0^a(KxN) - I_{90}^a(KxN), \quad (2.11)$$

$$S_3^a(KxN) = I_{45}^a(KxN) + I_{135}^a(KxN), \quad (2.12)$$

$$S_4^a(KxN) = I_{\otimes}^a(KxN) - I_{\oplus}^a(KxN), \quad (2.13)$$

де $\otimes$ – права циркуляція; $\oplus$ – ліва циркуляція.

5. За векторами Стокса лазерного вихідного пучка можна обчислити розподіли повного набору із 16 ММЗ за формулами, що наведені нижче.

$$M_{i1}(KxN) = 0.5(S_i^0(KxN) + S_i^{90}(KxN)) \quad (2.14)$$

$$M(KxN)_{i2} = 0.5(S_i^0(KxN) - S_i^{90}(KxN)) \quad (2.15)$$

$$M(KxN)_{i3} = S_i^{45}(KxN) - M_{i1}(KxN) \quad (2.16)$$

$$M_{i4}(KxN) = S_i^{\otimes}(KxN) - M_{i1}(KxN) \quad (2.17)$$

Блок-схема вимірювань ММЗ зразка для калібрування наведена на рисунку 2.3 (Додаток Б.2). В ній показано, за допомогою яких апаратних вузлів в схемі структурній поляриметра, що наведений на рисунку 2.2, необхідно виконати послідовність дій, щоб виміряти всі розподіли ММЗ зразка.

Проте не завжди доцільно використовувати всі 16 виміряних ММЗ для подальшого аналізу, враховуючи, що за їхніми властивостями повний набір ММЗ поділять на 3 основні групи [24]: фазові ММЗ ($M_{44}(KxN)$); орієнтаційні ММЗ ($M_{22}(KxN)$ та $M_{33}(KxN)$); орієнтаційно-фазові ММЗ (решта).

$$M_{22}(KxN) = \begin{pmatrix} \left(\frac{S_2^*}{S_2^0}\right)_{11} & \dots & \left(\frac{S_2^*}{S_2^0}\right)_{X1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \left(\frac{S_2^*}{S_2^0}\right)_{1Y} & \dots & \left(\frac{S_2^*}{S_2^0}\right)_{XY} \end{pmatrix} \quad (2.18)$$

$$M_{44}(KxN) = \begin{pmatrix} \left(\frac{S_4^*}{S_4^0}\right)_{11} & \dots & \left(\frac{S_4^*}{S_4^0}\right)_{X1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \left(\frac{S_4^*}{S_4^0}\right)_{1Y} & \dots & \left(\frac{S_4^*}{S_4^0}\right)_{XY} \end{pmatrix} \quad (2.19)$$

$$M_{32}(KxN) = \begin{pmatrix} \left(\frac{S_3^*}{S_2^0}\right)_{11} & \dots & \left(\frac{S_3^*}{S_2^0}\right)_{X1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \left(\frac{S_3^*}{S_2^0}\right)_{1Y} & \dots & \left(\frac{S_3^*}{S_2^0}\right)_{XY} \end{pmatrix}. \quad (2.20)$$

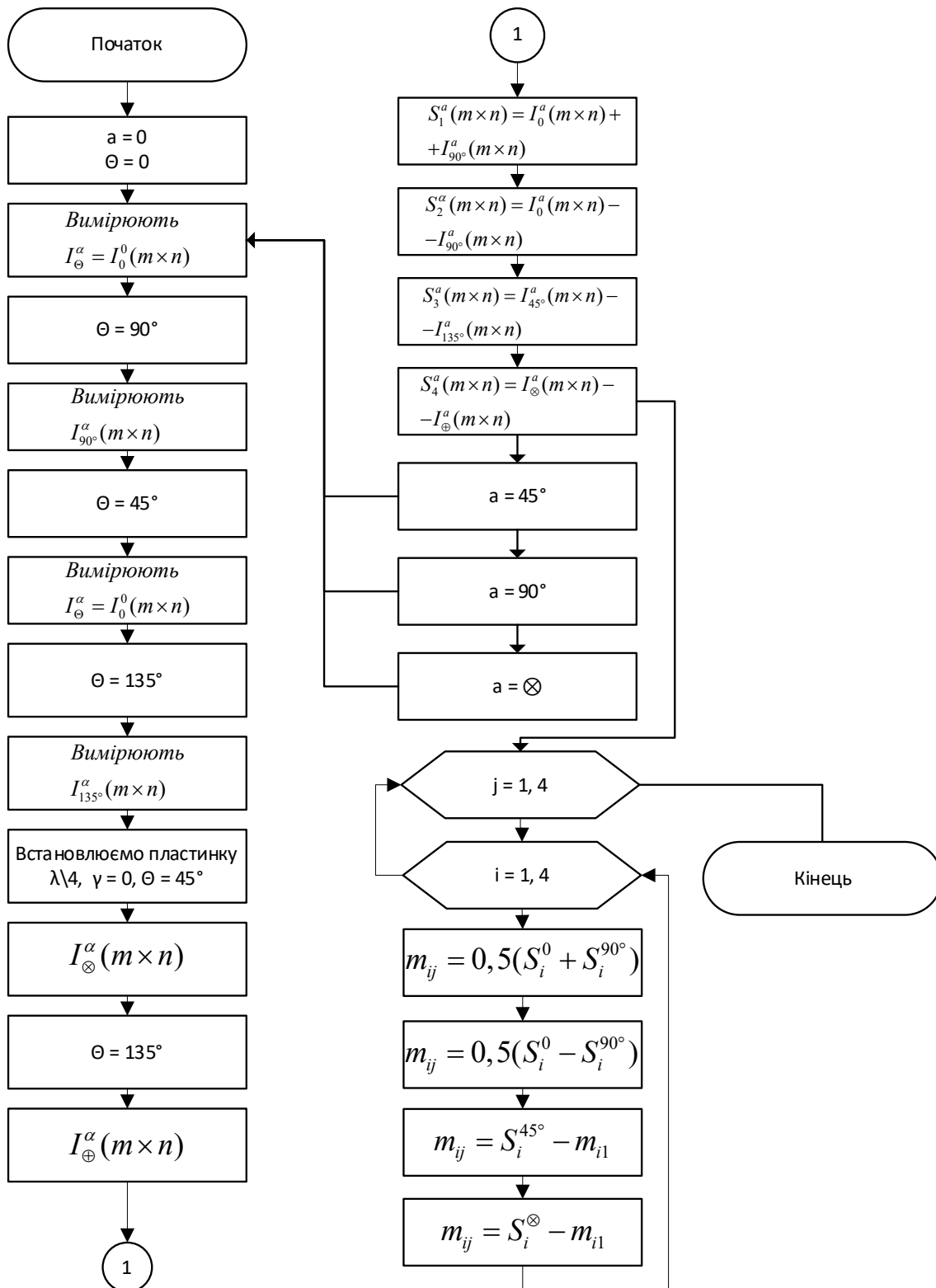


Рисунок 2.3 – Блок-схема вимірювання ММЗ зразка для калібрування об'єкта

Приклад виміряних 16 розподілів ММЗ для біологічного об'єкта наведено на рисунку 2.4.

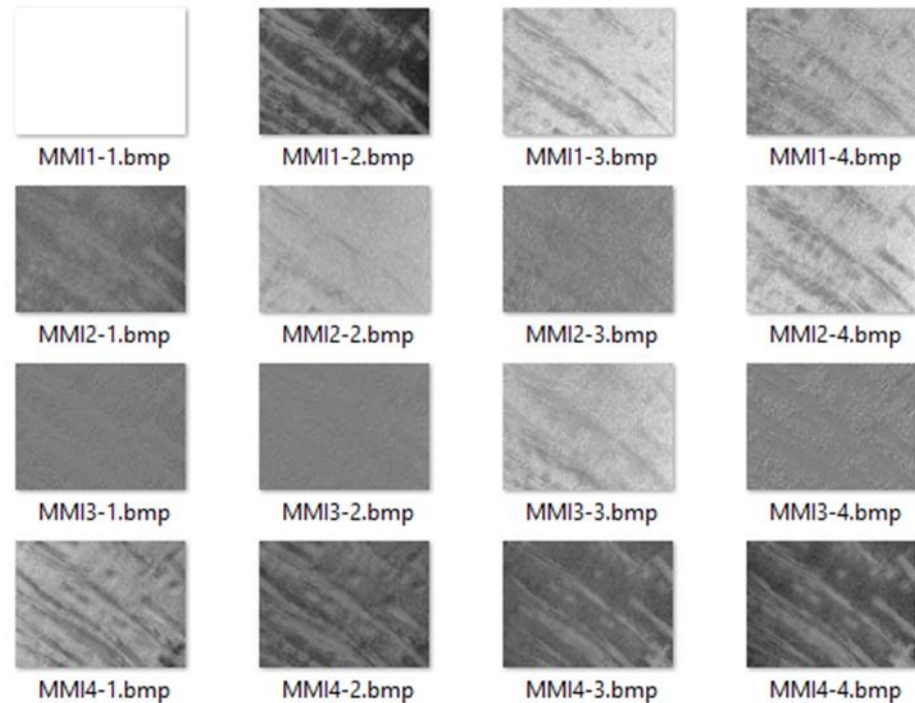


Рисунок 2.4 – Приклад виміряних ММЗ для біологічного об'єкта [28]

Отже, метод калібрування оптичних елементів на основі матриць Мюллера можна сформулювати так (блок-схема алгоритму методу наведена в додатку Б.3).

1. Об'єкт калібрування (фазову пластинку, наприклад) вставляємо в об'єктний блок системи на рисунку 2.2.
2. Проводимо комплекс вимірювань по обчисленню набору із 16 елементів ММЗ об'єкта калібрування (позначимо їх як $M_{ij}^{\text{exp}}(K \times N)$ для сукупності $i = 1:4; j = 1:4$)
3. Знаходимо еталонне значення матриці Мюллера досліджуваного об'єкта $M_{ij}^{\text{model}}(K \times N)$.
4. Знаходимо набори із 16 матриць похибок для кожного виміряного елемента $M_{ij}^{\text{exp}}(K \times N)$, враховуючи його еталонне значення :

$$\Delta M_{ij}(KxN) = |M_{ij}^{\text{exp}}(KxN) - M_{ij}^{\text{model}}(KxN)|. \quad (2.21)$$

5. Проводимо статистичний аналіз розподілів матриць похибок $\Delta M_{ij}(KxN)$, визначаємо їх статистичні моменти 1-го-4-го порядку у вигляді чисел A, B, C, D .

6. Формуємо автоматизоване рішення щодо відповідності досліджуваного оптичного елемента його каліброваним характеристикам.

Якщо виконується умова

$$\begin{aligned} A &\approx A_{\text{дон}} \pm \Delta A, \\ B &\approx B_{\text{дон.}} \pm \Delta B, \\ C &\approx C_{\text{дон.}} \pm \Delta C, \\ D &\approx D_{\text{дон.}} \pm \Delta D, \end{aligned} \quad (2.22)$$

то формуємо рішення «оптична система відповідає заявленим калібрувальним характеристикам», якщо не виконується умова (2.22) – то формуємо інше рішення «оптична система не відповідає заявленим калібрувальним характеристикам».

7. Здійснюємо пошук мінімального значення матриці похибок $\min(\Delta M_{ij}(KxN))$ за методами оптимізації двовимірних функцій, в результаті яких мають бути виконані налаштування в системі лазерної мюллер-поляриметрії, що призведуть до мінімізації похибки вимірювань.

В межах даної роботи методи оптимізації функції $\min(\Delta M_{ij}(KxN))$ застосовуватись не будуть, оскільки це не входить в поставлені задачі роботи. Замість цього будемо формувати рішення, описане в п. 6.

Далі будемо розглядати, як визначити чотири статистичних моменти A, B, C, D розподілів кожної із шістнадцяти матриць похибок $\Delta M_{ij}(KxN)$, а також здійснити їх бінарну класифікацію за результатами калібрування.

2.3 Алгоритм статистичного оброблення вимірювальних похибок розподілів елементів матриць Мюллера оптичних елементів

У контексті аналізу точності калібрування оптичних елементів, важливим етапом є кількісна оцінка похибок, які виникають при вимірюванні кожного елемента матриці Мюллера. Ці похибки можуть бути обумовлені як апаратними похибками (неточність кутів, нестабільність джерела світла, шум детектора), так і власними флуктуаціями оптичних властивостей зразка. Для оцінки якості вимірювання доцільно аналізувати розподіли похибок кожного елемента матриці Мюллера у вигляді двовимірних масивів (зображень), та використовувати статистичні характеристики (моменти) їх розподілу.

Для кожного елемента M_{ij} матриці похибок $\Delta M_{ij} = M_{ij}^{meas} - M_{ij}^{ref}$, який представлено у вигляді двовимірного масиву розміром $M \times N$ виконується обчислення наступних статистичних характеристик:

1. Математичне сподівання (середнє значення)

$$A_{ij} = \frac{1}{MN} \sum_{k=1}^{MN} (\varepsilon_{ij})_k. \quad (2.23)$$

Математичне сподівання характеризує зміщення досліджуваного розподілу відносно нуля.

2. Дисперсія

$$B_{ij} = \frac{1}{MN} \sum_{k=1}^{MN} ((\varepsilon_{ij})_k)^2. \quad (2.24)$$

Дисперсія показує ступінь розкиду значень похибки відносно середнього значення розподілу.

3. Асиметрія:

$$C_{ij} = \frac{1}{\sqrt{B_{ij}^3}} \frac{1}{MN} \sum_{k=1}^{MN} ((\varepsilon_{ij})_k)^3 \quad . \quad (2.25)$$

Асиметрія характеризує симетричність розподілу. Нульове значення вказує на симетрію.

4. Ексцес

$$D_{ij} = \frac{1}{B_{ij}^4} \frac{1}{MN} \sum_{k=1}^{MN} ((\varepsilon_{ij})_k)^4. \quad (2.26)$$

Ексцес дозволяє оцінити, чи розподіл має «гострі» або «плоскі» піки порівняно з нормальним розподілом.

Зазначені чотири моменти дозволяють повноцінно охарактеризувати розподіл похибок, виявити їх зміщення, ступінь варіативності та відхилення від нормального розподілу.

На рисунках нижче подано блок-схеми алгоритмів статистичного оброблення похибок, реалізованого у вигляді послідовного аналізу 16 матриць похибок.

Блок-схема, подана на рисунку 2.5 показує алгоритм обчислення математичного сподівання розподілу. Вводяться значення M та N , обчислюється загальна кількість елементів та встановлюється початкову значення суми до нуля. У циклі зчитуються елементи M_i і додаються до суми. Після завершення циклу обчислюється середнє значення. Результат – математичне сподівання розподілу.

Блок-схема алгоритму на рисунку 2.6 починається зі введення розмірів масиву. Далі визначається кількість елементів та знаходиться середнє значення вибірки. Після цього обчислюється сума квадратів відхилень кожного елемента від середнього. На завершення сума ділиться на кількість елементів мінус один, отримується дисперсія.

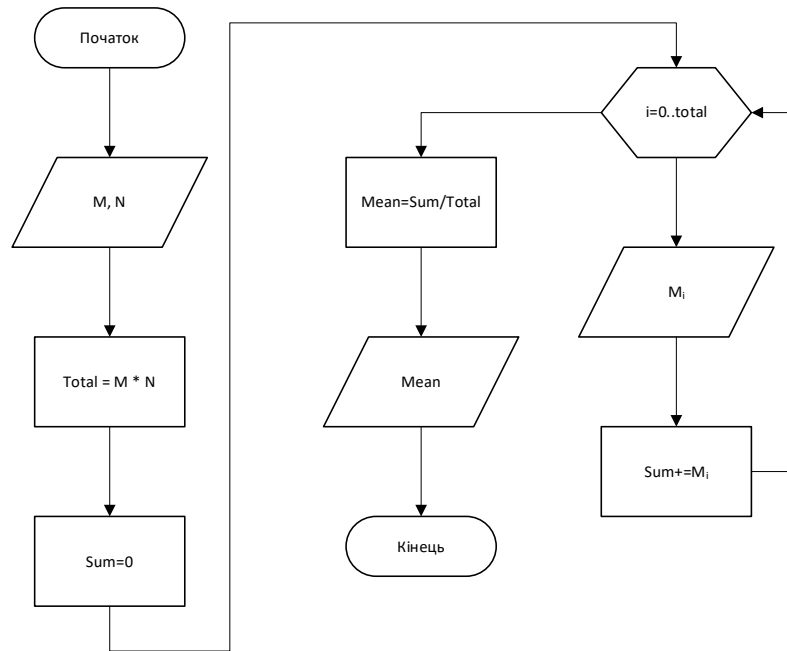


Рисунок 2.5 – Блок схема обчислення математичного сподівання окремої матриці Мюллера

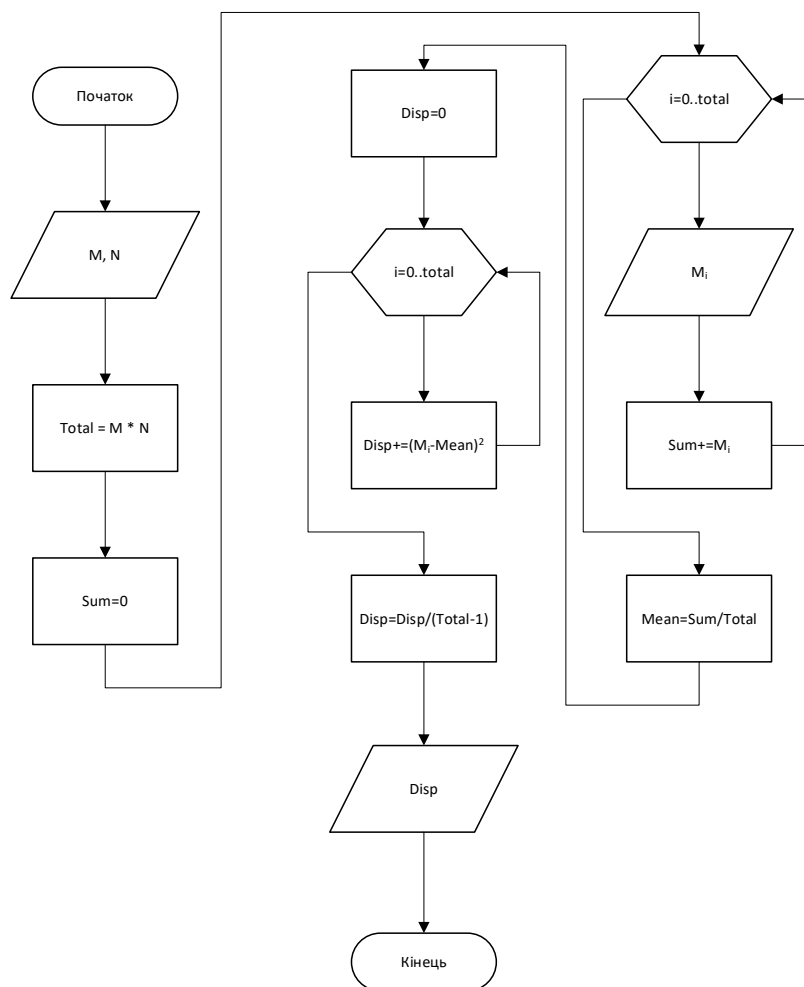


Рисунок 2.6 – Блок схема обчислення дисперсії конкретної матриці Мюллера

На рисунку 2.7 представлено послідовність дій при обчисленні асиметрії конкретного розподілу матриці Мюллера. Алгоритм починається з введення розмірів вибірки. Далі визначається кількість елементів та середнє значення. Потім обчислюється куб відхилення кожного елемента від середнього, результати підсумовуються. Після цього сума нормується на добуток кількості елементів та стандартного відхилення. Отримується коефіцієнт асиметрії.

На рисунку 2.8 показано, як обчислити ексцес конкретного розподілу елементів ММЗ.

Подальша задача полягає в здійсненні бінарної класифікації за результатами калібрування, застосовуючи сучасні інформаційні технології автоматичного прийняття рішення.

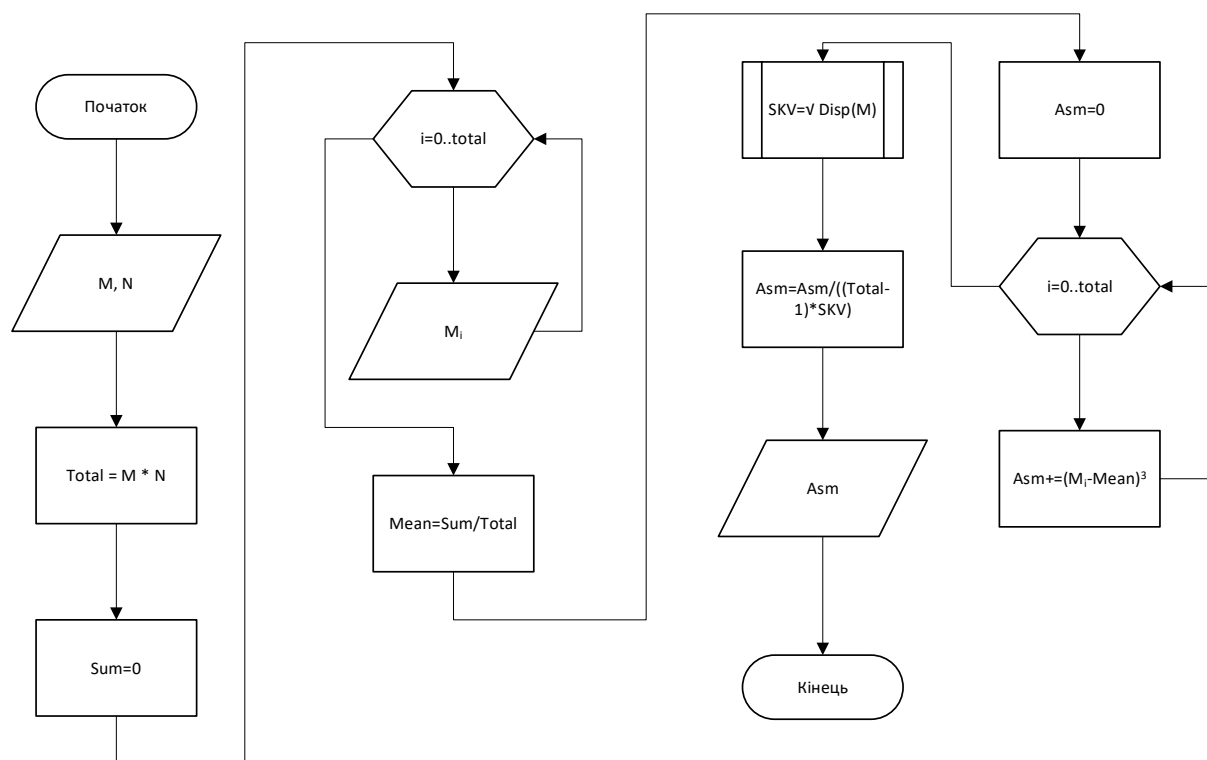


Рисунок 2.7 – Блок-схема обчислення асиметрії для конкретної матриці ММЗ

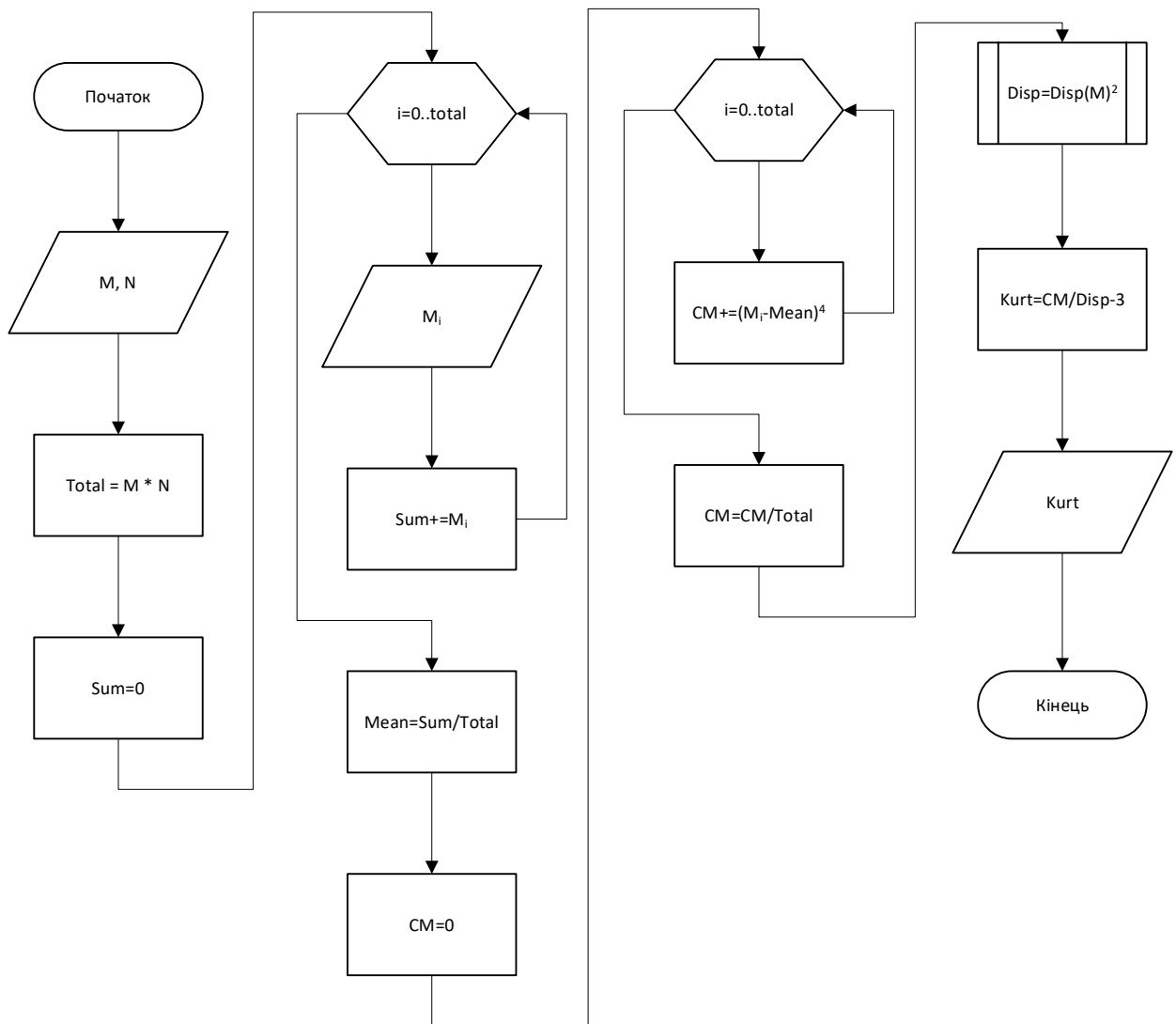


Рисунок 2.8 – Блок-схема обчислення екцесу для конкретної матриці MM3

2.4 Алгоритми класифікації похибок вимірювання елементів матриць Мюллера при технічній діагностиці параметрів досліджуваних оптичних елементів

Результати калібрування оптичних елементів за допомогою матриць Мюллера в розподіленій формі (у вигляді Мюллер-матричних зображень) дозволяють отримати для кожного пікселя (i,j) чотири статистичні характеристики похибок: середнє значення A_{ij} дисперсію B_{ij} , асиметрію C_{ij} та екцес D_{ij} . Загалом для одного пікселя маємо 16 елементів матриці, і кожен

з них характеризується цими чотирма параметрами — тобто, утворюється 64-елементний вектор ознак:

$$x_{ij} = [A_{11}, B_{11}, C_{11}, D_{11}, \dots, A_{44}, B_{44}, C_{44}, D_{44}]_{i,j}^T \in \mathbb{R}^{64} \quad (2.27)$$

Завдання полягає в тому, щоб за вектором ознак кожного пікселя класифікувати досліджуваний оптичний елемент в системі як такий, при якому «оптична система відповідає заявленим калібрувальним характеристикам» або відноситься до категорії «оптична система не відповідає заявленим калібрувальним характеристикам». Це завдання є бінарною класифікацією — однією з ключових проблем машинного навчання та статистичного аналізу.

Існує низка методів, що дозволяють реалізувати класифікацію багатовимірних ознак на дві категорії. Найбільш поширеними у технічній діагностиці є наступні.

Розглянемо спочатку метод порогового оброблення.

Метод порогового оброблення є найпростішим засобом сегментації зображень, що дозволяє перетворити чорно-біле зображення на бінарне.



Рисунок 2.9 – Приклад перетворення зображення на бінарне [29]

Найпростіший спосіб порогоування полягає в тому, що кожен піксель зображення замінюється на чорний, якщо його інтенсивність I_{ij} менша за

певне порогове значення T , або на білий — якщо інтенсивність перевищує це значення. Як видно з прикладу, темні ділянки дерева повністю стали чорними, а сніг — повністю білим [29].

Для нашої роботи суть методу полягає в тому що кожна ознака x_l має допустимий інтервал значень $[x_l^{min}, x_l^{max}]$, визначений за результатами калібрування на еталонних даних.

Тобто формула буде мати наступний вигляд:

$$label(i, j) = \begin{cases} \text{норма} & \text{якщо } x_l^{min} \leq x_l \leq x_l^{max} \quad \forall l \in \{1, \dots, 64\} \\ \text{брак} & \text{інакше} \end{cases} \quad (2.28)$$

Переваги цього методу у простоті його реалізації та можливості ручного налаштування. Недоліки цього методу у високій чутливості до вибору порогів (допустимих інтервалів значень) та слабкої гнучкості для складних розподілів.

Наступним розглянемо метод дерева рішень для прийняття рішення.

Метод дерева рішень часто пов'язують із штучним інтелектом та нейромережею. По своїй суті такий метод за основу приймає відповіді «так» чи «ні» на декілька питань, створюючи цим самим відгалуження. Звідси і пішла назва дерева.

Структура цього дерева зображена на рисунку 2.10 [30]. На рисунку 2.10 показано: E — вузол прийняття рішення, який позначає момент ухвалення вибору; e — гілка, що представляє одну з можливих альтернатив; Z — випадкова подія; z — гілка, яка відображає наслідки реалізації випадкової події; R — результат, що відповідає певному рішенню та стану зовнішнього середовища; R / E — вузол, який одночасно позначає результат і необхідність прийняття рішення [30].

Для нашої роботи суть методу полягає в тому що простір ознак поділяється рекурсивно на основі умов виду $x_l < \tau$. У кожному вузлі дерева вибирається ознака та поріг, які найбільше зменшують ентропію або інший критерій невизначеності [31].

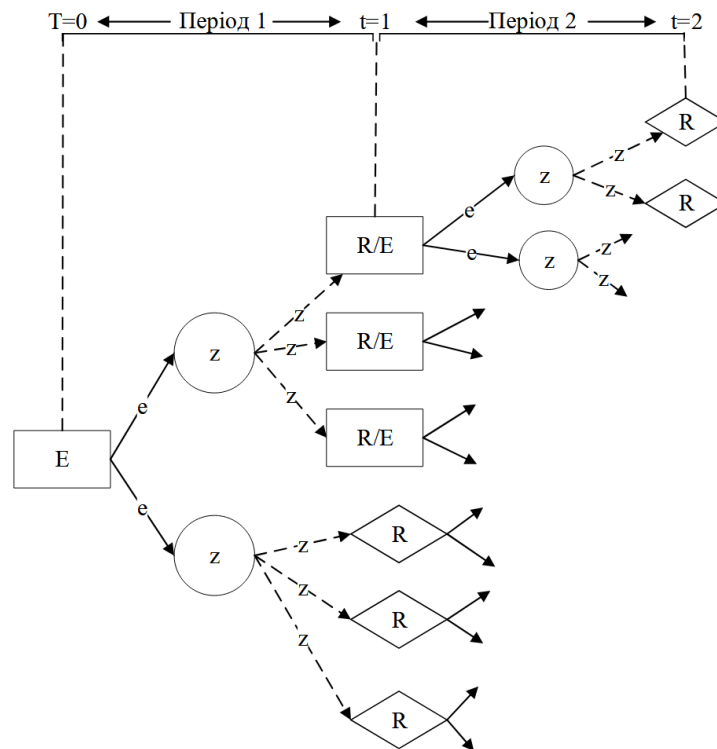


Рисунок 2.10 – Структура «дерева рішень» [30]

Функція ентропії:

$$H(S) = -p_1 \log_2 p_1 - p_2 \log_2 p_2, \quad (2.29)$$

де p_1, p_2 – частки об'єктів класів «норма» і «брак» у вузлі S .

Переваги такого методу у високій інтерпретації, адаптивному формуванні порогів та дуже добре працює з нерівномірно розподіленими даними.

Недоліки такого методу у можливості перенавчання, тобто коли модель надто точно підлаштовується під навчальні дані, включаючи випадкові шуми та винятки, через що втрачає здатність добре узагальнювати інформацію і показує гірші результати на нових, невідомих даних.

Популярним сьогодні є логістичної регресії для прийняття рішення.

Логістична регресія – це статистичний метод регресійного аналізу, який використовують тоді, коли залежна змінна має лише два можливі значення (наприклад, 0 або 1). Вона може використовуватися для задач класифікації за умови встановлення порогового значення [32].

Суть методу полягає у моделюванні приналежності до класу за допомогою логістичної функції:

$$P(y = 1|x) = \frac{1}{1+e^{-z}}, \quad (2.30)$$

де $z = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i x_i$.

Клас визначається як [33]:

$$label = \begin{cases} \text{норма} & \text{якщо } P \geq 0.5 \\ \text{брак} & \text{інакше} \end{cases}. \quad (2.31)$$

Переваги цього методу полягають у його математичній простоті та прозорості, що дозволяє легко інтерпретувати результати та оцінити внесок кожної ознаки у прогноз. До того ж, логістична регресія демонструє високу ефективність у задачах, де класи можна розділити лінійною межею, а сама модель є швидкою у навчанні та зручною у практичному застосуванні.

Недоліки цього методу проявляються в обмеженій здатності моделювати складні, нелінійні залежності між ознаками та класами, що знижує точність у задачах з ускладненою структурою даних. Крім того, логістична регресія є чутливою до мультиколінеарності, коли між ознаками існує сильна кореляція, що може призводити до нестабільності у визначенні вагових коефіцієнтів моделі.

Отже, користуючись вимогою простоти реалізації, для класифікації кожної ознаки x_l , що має допустимий інтервал значень $[x_l^{min}, x_l^{max}]$,

визначений за результатами калібрування на еталонних даних, обираємо метод порогового оброблення.

2.5 Висновок за розділом 2

Розглянуто модельний підхід до калібрування схеми стокс-поляриметра на основі визначення його матриці Мюллера, згідно з яким калібрування оптичних елементів системи можна сформулювати як задачу мінімізації різниці між експериментально отриманою матрицею та змодельованою матрицею Мюллера для кожного елемента системи.

Наведено експериментальний метод визначення похибок вимірювання Мюллер-матричних розподілів досліджуваних оптичних елементів та схема структурна лазерного поляриметра для його реалізації. Розроблено блок-схему вимірювань ММЗ зразка для калібрування.

Розроблено блок-схеми алгоритмів статистичного оброблення вимірювальних похибок розподілів елементів матриць Мюллера оптичних елементів, на основі яких визначено 64-елементний вектор ознак для класифікації.

Розглянуто відомі методи класифікації похибок вимірювання елементів матриць Мюллера при технічній діагностиці параметрів досліджуваних оптичних елементів. Алгоритм порогового оброблення обрано для реалізації вказаної класифікації похибок.

3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ ПОЛЯРИМЕТРИЧНОГО КАЛІБРУВАННЯ ОПТИЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ

3.1 Експериментальна схема реалізації системи та визначення чинників недосконалості її елементів

Варіант експериментальної схеми реалізації лазерного поляриметра для калібрування оптичних елементів на основі вимірювання матриці Мюллера наведено на рисунку 3.1.

Макет системи розроблено на кафедрі БМІОЕС співробітниками кафедри під керівництвом проф. кафедри д.т.н. Заболотної Н. І. і описано в роботах [34–36].

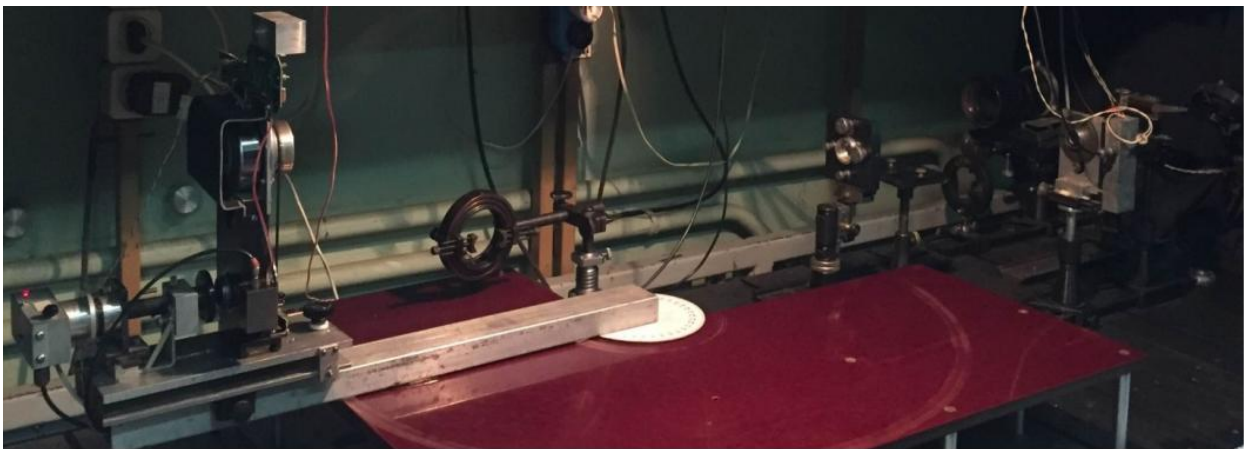


Рисунок 3.1 – Вимірювальний канал лазерного поляриметра для калібрування

Розглянемо реалізацію основних елементів, які були застосовані для збирання макету системи лазерного поляриметра.

Джерелом випромінювання в системі є напівпровідниковий лазер, або лазерний діод. Його робочим середовищем є напівпровідниковий матеріал. Він вирізняється компактними розмірами та тривалим строком експлуатації.

Принцип дії базується на збудженні електронів у напівпровіднику, які переходять між енергетичними рівнями, випромінюючи світло. Для створення резонансної порожнини використовуються природні грані кристалу, що функціонують як паралельні відбивачі, які забезпечують зворотний зв'язок і підсилення випромінювання. Внаслідок цього формується когерентне лазерне світло [37].

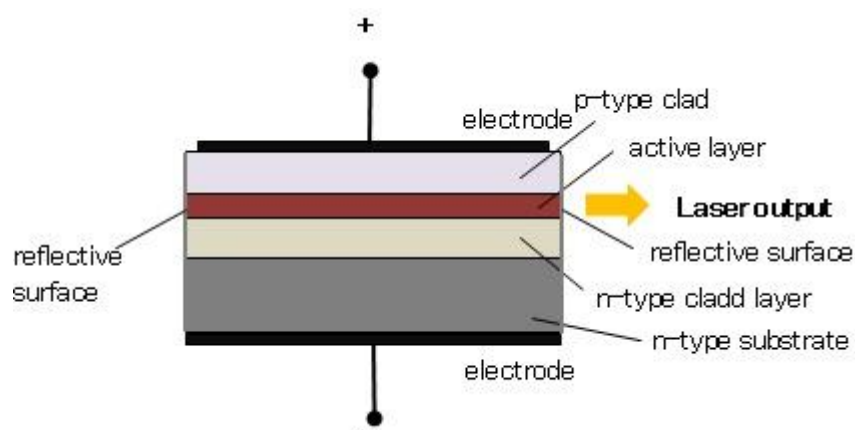


Рисунок 3.2 –Зображення напівпровідникового лазера [37]

Для цієї бакалаврської роботи було вибрано стабілізований напівпровідниковий лазер фірми Edmund Optics , що випромінює на довжині хвилі 632,8nm, типу Free Space Frequency Stabilized Laser Diode [38]. Даний лазер є високоточним джерелом когерентного випромінювання з довжиною хвилі 632,8 нм, стабілізованою за допомогою бреггівської ґратки Volume Bragg Grating (VBG). Такий підхід дозволяє досягти стабільності довжини хвилі на рівні $\pm 0,002$ нм, а також надзвичайно вузької спектральної лінії шириною приблизно 10 МГц.

Цей лазерний діод є ідеальним вибором для поляриметричних систем, оскільки:

- забезпечує високу стабільність випромінювання, критичну для точного аналізу мюллер-матриць;

- має лінійно поляризоване світло на виході, що усуває необхідність у додаткових поляризаційних елементах на вході;
- забезпечує вихідну потужність понад 60 мВт, що є достатнім для роботи з низькочутливими сенсорами.

Технічні характеристики [38]:

- Довжина хвилі: 632.8 нм
- Потужність: >55 мВт
- Тип стабілізації: Volume Bragg Grating
- Стабільність довжини хвилі: ± 0.002 нм
- Ширина спектральної лінії: ~ 10 МГц
- Поляризація: лінійна
- Габарити: 71 мм $\times$ 63.5 мм $\times$ 19.8 мм



Рис 3.3 – Вигляд лазера фірми Edmund Optics довжиною хвилі 632,8nm [38]

Для перетворення лінійно поляризованого світла на кругове або еліптично поляризоване в схемі системи використовують чвертьхвильові фазові пластини.

Фазова пластина — це оптичний елемент, що змінює поляризаційний стан електромагнітної хвилі. Фазові пластини виготовляють із кристалічних матеріалів із подвійним променезаломленням — таких як кварц чи слюда. У

цих матеріалах швидкість поширення електромагнітної хвилі залежить від її поляризації та напрямку відносно кристалографічних осей. Тип пластини (половинна чи чвертьхвильова) визначається її товщиною, довжиною хвилі світла та різницею показників заломлення. Змінюючи співвідношення цих параметрів, можна керувати фазовим зсувом між двома складовими поляризації, формуючи бажаний стан поляризації світлового пучка на виході [39] (рисунок 3.3).

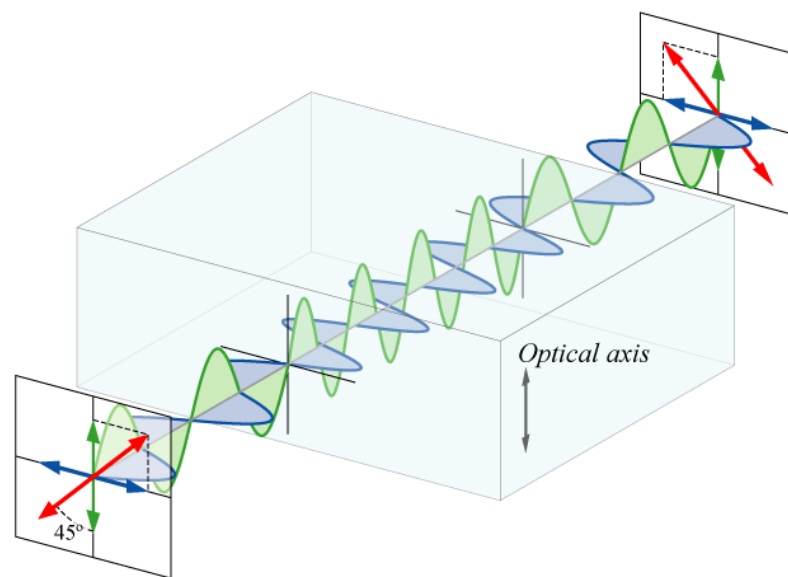


Рисунок 3.4 — Принцип дії фазової пластинки [39]

Для цієї бакалаврської роботи було обрано чвертьхвильову пластину Newport 05RP14-08. Цей оптичний елемент є пластинкою нульового порядку, що забезпечує стабільну фазову затримку незалежно від змін температури або кута падіння світла.

Хвильові пластини виготовляються з матеріалів із подвійним променезаломленням, таких як кварц. Для моделі 05RP14-08 (рисунок 3.4) [40], робоча довжина хвилі складає 632,8 нм, діаметр апертури — 12.7 мм, а монтаж виконаний у стандартному оправленні діаметром 25.4 мм (1 дюйм), що забезпечує зручну інтеграцію в лабораторні оптичні системи.

Основні характеристики 05RP14-08 [40]:

- Тип: Quarter-Wave Plate ($\lambda/4$)
- Довжина хвилі: 632.8 нм
- Діаметр апертури: 12.7 мм
- Матеріал: кварц (Zero-Order Quartz)
- Відхилення фазової затримки: $< \lambda/300$.



Рисунок 3.5 – Фазова пластинка 05RP14-08 [40]

В схемі системи застосовують лазерний коліматор – це оптичний пристрій, призначений для перетворення розбіжного лазерного променя на паралельний, що забезпечує стабільну геометрію променя та мінімальну дивергенцію. Це особливо важливо при використанні напівпровідникових лазерів, які зазвичай випромінюють світло з високою розбіжністю та еліптичним профілем променя.

Лазерний коліматор зазвичай складається з однієї або кількох лінз (часто асферичних), розташованих таким чином, щоб фокусувати розбіжний промінь лазера в паралельний. Ключовим параметром є розміщення джерела світла (лазерного діода) на фокусній відстані колімуючої системи. Це дозволяє зменшити кутову дивергенцію променя, що є критичним для точних оптичних вимірювань. Це можна описати наступною формулою:

$$Dv \approx \frac{d_{\text{дж.}}}{f}, \quad (3.1)$$

де $d_{\text{дж.}}$ – діаметри лазерного променя джерела випромінювання; f – фокусна відстань колімуючої системи.

Згідно з принципами геометричної оптики, для досягнення колімації необхідно, щоб джерело світла розташовувалося на фокусній відстані від колімуючої лінзи. Це забезпечує вихідний промінь з паралельними променями, мінімізуючи розбіжність (рисунок 3.5).

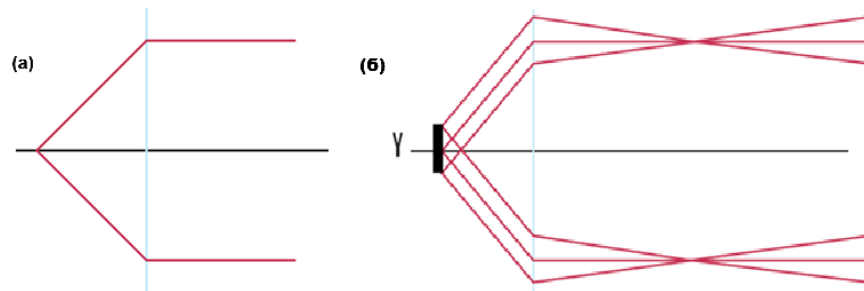


Рисунок 3.6 – Ідеальний лазерний пучок з коліматором (а), лазерний пучок з висотою u та коліматором (б)

У системі було застосовано лазерний коліматор Newport LC-075, спеціально оптимізований для довжини хвилі 632.8 нм (рисунок 3.6). Його завдання — формувати стабільний, паралельний промінь з розбіжного випромінювання напівпровідникового лазера, що є критично важливим для подальшого поляриметричного аналізу.



Рисунок 3.7 – Коліматор LC-075 [39]

Коліматор LC-075 — це високоякісний оптичний блок із вбудованою асферичною лінзою, яка зменшує сферичні аберації та забезпечує дифракційно обмежене колімоване світло. Вхід лазера (як-от Edmund Optics 632.8 nm Laser Diode) встановлюється так, щоб його випромінююча площа розташовувалася на фокусній відстані лінзи. Таким чином, розбіжний промінь фокусується в паралельний пучок.

Характеристики Newport LC-075:

- Збільшення: $10\times$
- Діапазон робочих довжин хвиль: 400–700 нм
- Вхідна апертура: 1.9 мм
- Вихідна апертура: 19.0 мм
- Діапазон фокусування: від <1 м до ∞
- Трансмісія: $T > 90\%$
- Хвильове викривлення: $\leq \lambda/10$ при фокусуванні на нескінченність.

Поріг пошкодження: 100 Вт/см^2 (неперервне випромінювання), 2 Дж/см^2 (імпульс 10 нс).

Один із основних модулів схеми системи – БПО, який забезпечує одночасне формування кількох світлових каналів з різними станами поляризації. Він використовується для дослідження поляризаційних властивостей матеріалів, багатоканальної передачі даних, а також в системах оптичної безпеки та зображення.

БПО складається з джерела світла, системи розділення променя та поляризаційних модулів. Кожен канал формує світловий промінь з певним станом поляризації (лінійна, кругова, еліптична) та напрямком. Це досягається за допомогою поляризаторів, фазових пластин, та поляризаційних фільтрів.

У складі багатоканального поляризаційного опромінювача застосовується високоякісний призматичний поляризатор типу Glan-Laser на основі кальциту. Для реалізації поставлених експериментальних задач обрано модель 10GL08AR.33 від компанії Newport, яка характеризується високим

ступенем поляризаційної селекції та стійкістю до інтенсивного лазерного випромінювання.

Даний поляризатор складається з двох оптично з'єднаних призм з природного кальциту, розташованих під певним кутом. Завдяки використанню матеріалу з анізотропними оптичними властивостями, поляризатор пропускає лише одну з ортогональних компонент вектора електричного поля, забезпечуючи ефективне гасіння небажаної компоненти з коефіцієнтом понад 100 000:1. Це дозволяє використовувати його навіть у задачах високоточної поляриметрії.

- Основні технічні характеристики [41]:
- Діапазон робочих довжин хвиль: 350–2300 нм
- Коефіцієнт згасання (extinction ratio): >100 000:1
- Антиблікове покриття: оптимізоване для видимого діапазону
- Стійкість до пошкодження: висока, дозволяє застосування з потужними лазерами
- Діаметр оправы: 25.4 мм

Обраний поляризатор зображено на рисунку 3.7 [41].



Рисунок 3.8 – Поляризатор 10GL08AR.33 від компанії Newport [41]

У БПО буде використовуватись фазова пластинка, зображена на рисунку 3.4.

При реалізації БПА можна використовувати матрицю мікрополяризаторів, в якій кожен мікрофільтр зорієнтований під певним кутом — 0° , 45° , 90° , 135° (рисунок 3.8) . Завдяки цьому досягається одночасний аналіз кількох станів поляризації без механічного перемикання [42].

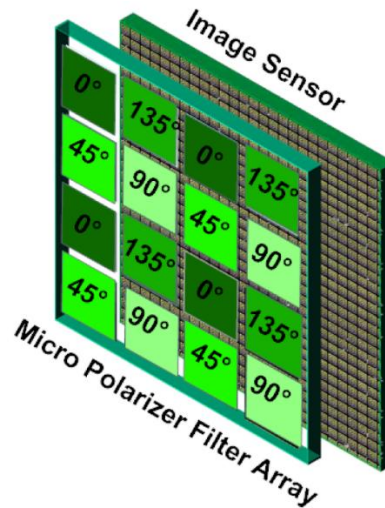


Рисунок 3.9 – Матриця мікрополяризаційних фільтрів [42]

Для формування високоякісного лінійно поляризованого світла в багатоканальному опромінювачі використано лінійний поляризаційний фільтр Edmund Optics 46-575 (рисунок 3.9). Цей компонент є компактним, прецизійно виготовленим оптичним елементом у стандартному оправленні, що дозволяє легко інтегрувати його у різні оптичні конфігурації, зокрема — в експериментальні багатоканальні системи поляриметрії.

Фільтр виготовлений на основі полімерного матеріалу, нанесеного на скляну підкладку. Така комбінація забезпечує високу ефективність поляризації (до 95%), а також зберігає стабільні характеристики у видимому діапазоні довжин хвиль. Монтаж у металеву оправу з різьбленням M25.5 x 0.5 дозволяє безпосередньо закріпити фільтр у стандартних оптичних тримачах без необхідності додаткових адаптерів.

Основні технічні характеристики [43] :

- Тип: лінійний поляризаційний фільтр на полімерній основі
- Робочий спектральний діапазон: 400–700 нм
- Ступінь поляризації: до 95%
- Оптична апертура: 22.5 мм
- Зовнішній діаметр оправы: 25.5 мм
- Різьба для монтажу: M25.5 x 0.5, товщина оправы: 8 мм



Рисунок 3.10 – Поляризаційний фільтр Edmund Optics 46-575 [43]

Проекційний блок у розробленій системі виконує функцію формування зображення досліджуваного об'єкта з необхідним збільшенням та якістю. Для забезпечення високої якості зображення та сумісності з іншими оптичними компонентами було обрано об'єктив Olympus UPLFLN 4X з каталогу Edmund Optics [44].

Об'єктив Olympus UPLFLN 4X є план-флуоритним об'єктивом з нескінченним оптичним інтервалом (infinity-corrected), що забезпечує високу якість зображення та широке поле зору. Основні технічні характеристики:

- Збільшення: 4×
- Числова апертура (NA): 0.13
- Робоча відстань: 17.0 мм
- Фокусна відстань: 45.00 мм
- Поле зору: 26.5 мм

- Різкість по всьому полю зору: забезпечується план-апохроматичним дизайном
- Діапазон довжин хвиль: 380–900 нм
- Різьба для кріплення: RMS / 20.32 мм × 36 TPI

Цей об'єктив ідеально підходить для застосувань у світлому полі, темному полі, диференціальній інтерференційній контрастності (DIC), флуоресцентній та поляризаційній мікроскопії. Завдяки широкому спектральному діапазону та високій числовій апертурі, об'єктив забезпечує високу роздільну здатність та контрастність зображення, що є критичним для точних оптичних вимірювань.

Вибір об'єктива Olympus UPLFLN 4X обумовлений його високими оптичними характеристиками та сумісністю з іншими компонентами системи. План-флуоритний дизайн забезпечує корекцію хроматичних аберацій у широкому спектральному діапазоні, що є важливим для роботи з різними джерелами світла. Крім того, велика робоча відстань (17.0 мм) дозволяє зручно розміщувати додаткові оптичні елементи між об'єктивом та об'єктом дослідження.

Для того, щоб дізнатись, як впливає на точність роботи системи недосконалість виготовлення окремих елементів лазерного поляриметра в роботі [36] проводилось імітаційне моделювання. Імітація процесу вимірювання елементів матриці Мюллера тестового об'єкта та порівняння результату з еталонними значенням дозволило вказати на такі можливі чинники недосконалості в лазерному поляриметрі як [34-36]:

- шуми в роботі джерела лазерного випромінювання;
- неточності позиціонування азимутів повороту лінійних поляризаторів в схемі багатоканального поляризаційного опромінювача ;
- неточності позиціонування азимутів повороту лінійних поляризаторів в схемі поляризаційного аналізатора;

- похибки в кутах повороту осей фазових чвертьхвильових пластинок в блоках БПО та БПА;
- неточності, обумовлені цифровою камерою, за допомогою якої вивчалась лінійність фотометрування.

Результати було проаналізовано та з них отримано, наприклад, що шуми в роботі лазера впливають десь в діапазоні 2% на похибку вимірювань матриць Мюллера [36].

Виявилось, що особливо потрібно дотримуватись вимог якості забезпечення відповідних характеристик коефіцієнта пропускання та ступеня поляризації до лінійного поляризатора в блоках БПО та БПА.

Найвагоміший вплив на точність роботи лазерного поляриметра має лінійність цифрової камери. Її похибка фотометрування в середньому склала від 3% до 10% [34, 35]. Проте вказані чинники, пов'язані із інструментальною недосконалістю елементів в схемі лазерного поляриметра, якраз і можуть бути зменшені при калібруванні системи.

Для поставлених в бакалаврській роботі задач як елемент для практичного тестування в системі на предмет недосконалості була взята напівхвильова фазова пластинка, швидка вісь якої має кут нахилу 0° . Отримані результати проаналізовано нижче.

3.2 Аспекти реалізації програмних блоків системи поляриметричного калібрування оптичних елементів

На основі блок-схем алгоритму статистичного аналізу отримуємо програмне обчислення вектора ознак за формулою (2.27) (рисунок 3.11) .

```
def compute_moments_and_plot(matrix: np.ndarray, title: str = "Розподіл похибок") -> Tuple[float, float, float, float]:
    # Розгортання у вектор
    data = matrix.flatten()
    # Статистичні характеристики
    mean = np.mean(data)
    var = np.var(data, ddof=1)
    skewness = skew(data)
    excess = kurtosis(data)
    # Візуалізація гістограми
    plt.figure(figsize=(8, 5))
    plt.hist(data, bins=30, density=True, alpha=0.6, color='skyblue', edgecolor='black', label='Гістограма')
    # Накладення нормального розподілу
    x = np.linspace(min(data), max(data), 1000)
    pdf = norm.pdf(x, mean, np.sqrt(var))
    plt.plot(x, pdf, 'r--', linewidth=2, label='Нормальний розподіл')
    # Підписи
    plt.title(title)
    plt.xlabel("Значення похибки")
    plt.ylabel("Щільність імовірності")
    plt.legend()
    plt.grid(True)
    plt.tight_layout()
    plt.show()
    return mean, var, skewness, excess
```

Рисунок 3.11 – Вікно програмного модуля розрахунку статистичних ознак похибок елементів матриці Мюллера

Ця функція приймає на вхід двовимірну матрицю похибок (розміром $K \times N$) та повертає кортеж з 4 числових характеристик, які формують вектор ознак:

- Середнє значення (mean): показує систематичне зміщення.
- Дисперсія (variance): відображає ступінь варіативності.
- Асиметрія (skewness): характеризує форму розподілу похибок.
- Екссес (excess kurtosis): визначає, наскільки розподіл відрізняється

від нормального за “гостротою”.

Результат побудови гістограми розподілу похибок та тестового прикладу наведено на рисунку 3.12 та рисунку 3.13.

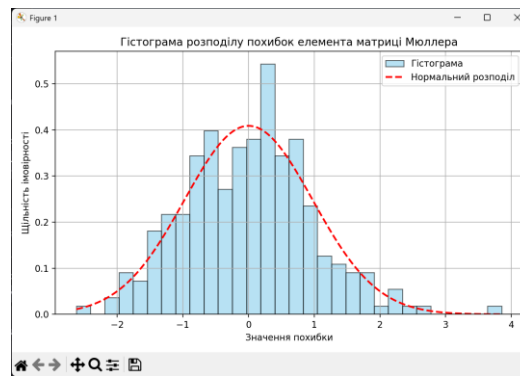


Рисунок 3.12 – Результат побудови гістограми розподілу похибок на випадкових згенерованих даних

```
Середнє значення = 0.0007901147698460217
Дисперсія = 0.9526579683717915
Асиметрія = 0.3036277911321942
Екцес = 0.5084160579971448
```

Рисунок 3.13 – Виведення вектора ознак розподілу похибок вимірювання ММЗ

Програма розроблена з урахуванням загальних принципів побудови модульного та масштабованого програмного забезпечення для інженерних застосувань. Реалізацію здійснено за допомогою мови програмування Python, яка має низку переваг: простий синтаксис, активну спільноту, багатий вибір наукових бібліотек та високу продуктивність при роботі з масивами даних.

Для реалізації функціональних блоків було використано бібліотеки:

- NumPy — основа для роботи з числовими даними у Python. Забезпечує ефективну обробку великих багатовимірних масивів та підтримує векторизовані операції, які значно пришвидшують обчислення у порівнянні зі звичайними циклічними конструкціями. NumPy також містить функції для обчислення базових статистичних характеристик, таких як середнє значення, дисперсія тощо.

- SciPy — доповнення до NumPy, що включає широкий набір алгоритмів для наукових обчислень. У контексті цієї роботи SciPy використовується для обчислення статистичних моментів вищих порядків — асиметрії та ексцесу, а також для більш точного керування чисельною стабільністю під час обробки вимірювальних похибок.
- Matplotlib — стандартна бібліотека для побудови графіків у Python. З її допомогою реалізовано генерацію гістограм розподілу похибок, візуалізацію функцій розподілу та порівняння результатів між елементами матриць. Matplotlib дозволяє створювати графіки публікаційного рівня як у векторному, так і у растровому форматах.
- Scikit-learn — високорівнева бібліотека машинного навчання, яка використовується в даній системі для реалізації класифікаційного блоку. Зокрема, вона забезпечує модулі для обробки ознак, оцінювання якості класифікації, крос-валідації та реалізації порогових правил для прийняття рішень. У нашому випадку використано простий пороговий класифікатор, що визначає статус калібрування кожного елемента ММЗ.

Дані вимірювальних похибок кожного з 16 елементів ММЗ подаються у вигляді двовимірних масивів. Кожна матриця обробляється окремо, при цьому реалізовано підтримку пакетного імпорту вхідних даних з таблиць. Перед обробкою здійснюється попередня перевірка на наявність пропущених значень, що можуть спотворити результати.

Для кожного елемента ММЗ автоматично обчислюється вектор ознак, який включає значення середнього, дисперсії, асиметрії та ексцесу. Обчислення реалізовані на основі векторизованих функцій з бібліотек numpy та scipy.stats. Результати статистичного аналізу збираються в єдину таблицю розміром 16×4 , де кожен рядок відповідає одному елементу ММЗ. Після завершення аналізу дані експортуються у файл формату CSV для подальшого використання (наприклад, в Excel, Pandas або LaTeX). Такий формат обрано завдяки його універсальності та зручності інтеграції з іншими програмами.

Для кожного елементу ММЗ будується гістограма, що ілюструє розподіл похибок. За необхідності, поверх гістограми може бути накладена функція щільності нормального розподілу, яка дозволяє оцінити відхилення від нормального закону. Це надає користувачеві інструмент візуальної діагностики стану калібрування.

На підставі отриманих векторів ознак реалізується простий алгоритм класифікації. Якщо всі елементи вектора ознак лежать у межах заданого інтервалу, система приймає рішення, що елемент ММЗ є відкаліброваним. В іншому випадку формується повідомлення про необхідність повторного калібрування. Така логіка реалізована за допомогою стандартних засобів мови Python, а також можливостей бібліотеки scikit-learn, що дозволяє у майбутньому легко замінити порогову логіку на більш складні алгоритми класифікації, такі як SVM або дерева рішень.

3.3 Результати експериментального обчислення похибки вимірювань ММЗ тестової фазової пластинки в системі

Вигляд матриці Мюллера F фазової пластинки $\lambda / 2$ з фазовим зсувом $\varphi = \pi$ та орієнтаційним кутом $\theta = 0$ швидкої осі є відомим [34, 35]:

$$M(\varphi = 90^\circ, \theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}. \quad (3.1)$$

За допомогою лабораторної установки системи, наведеної на рисунку 3.1, було проведено вимірювання розподілів 16 елементів Мюллер-матричних зображень (ММЗ) на основі алгоритму на рисунку 2.3 (додаток Б.4).

Визначено матриці похибок $\Delta M_{ij}(K \times N)$ для кожного із 16 елементів ММЗ з гістограмами їх розподілів (рисунок 3.14). та результати їх оброблення у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Середнє значення та дисперсія серії розподілів похибок вимірювань матриць Мюллера тестової фазової пластинки

Похибки вимірювання елементів матриці Мюллера $\Delta M_{ij}(K \times N)$	Середнє значення розподілу A_{ij} в межах серії вимірювань	Середнє квадратичне значення розподілу B_{ij} в межах серії вимірювань
$\Delta M_{11}(K \times N)$	0,044±0,003	0,015±0,07
$\Delta M_{12}(K \times N)$	0,051±0,004	0,017±0,001
$\Delta M_{13}(K \times N)$	0,061±0,004	0,020±0,001
$\Delta M_{14}(K \times N)$	0,079±0,005	0,021±0,002
$\Delta M_{21}(K \times N)$	0,060±0,004	0,019±0,001
$\Delta M_{22}(K \times N)$	0,041±0,003	0,013±0,001
$\Delta M_{23}(K \times N)$	0,059±0,004	0,020±0,002
$\Delta M_{24}(K \times N)$	0,088±0,006	0,024±0,002
$\Delta M_{31}(K \times N)$	0,041±0,003	0,013±0,001
$\Delta M_{32}(K \times N)$	0,045±0,003	0,014±0,001
$\Delta M_{33}(K \times N)$	0,052±0,004	0,015±0,001
$\Delta M_{34}(K \times N)$	0,089±0,006	0,025±0,002
$\Delta M_{41}(K \times N)$	0,078±0,005	0,024±0,002
$\Delta M_{42}(K \times N)$	0,081±0,006	0,023±0,002
$\Delta M_{43}(K \times N)$	0,090±0,006	0,024±0,002
$\Delta M_{44}(K \times N)$	0,093±0,006	0,026±0,003

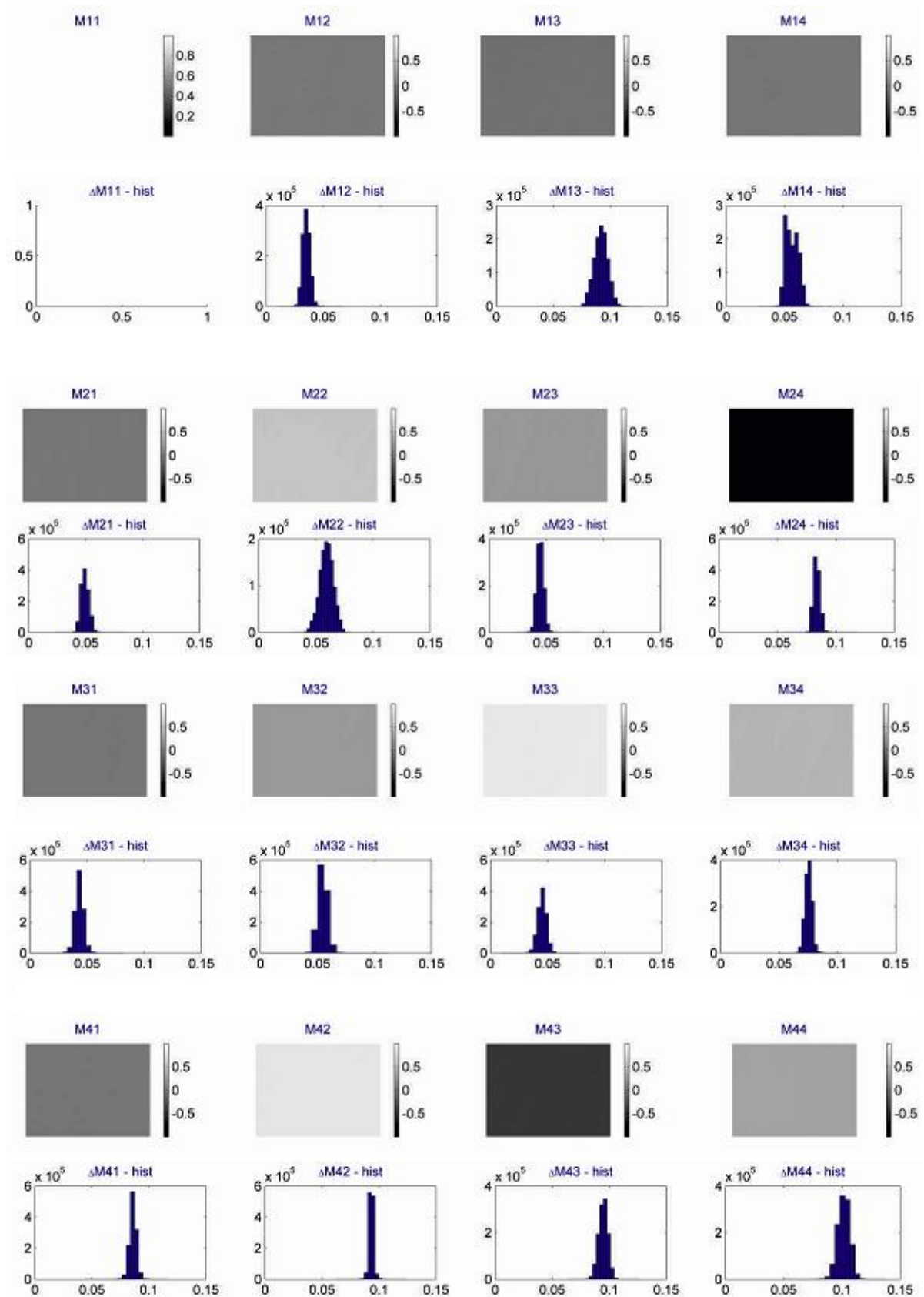


Рисунок 3.14 – Виміряні ММЗ з гістограмами розподілу елементів їх похибок

3.4 Програмна реалізація формування автоматизованого рішення щодо калібрування фазової пластинки

Формування автоматизованого рішення щодо відповідності досліджуваного оптичного елемента його каліброваним характеристикам організовано на основі перевірки умови, визначеної за формулою (2.22).

Для досліджуваної фазової пластинки потрібно проаналізувати попадання її статистичних оцінок A, B, C, D в інтервал (2.22). За результатами експерименту конкретні дані необхідно взяти із таблиці 3.1, де є дані лише для параметрів A та B , тому перевіряємо лише виконання умови для них.

Застосовуємо метод порогової класифікації (2.28). Формуємо рішення «фазова пластинка відповідає заявленим калібрувальним характеристикам» при виконанні умов перевірки, якщо не виконується умова (2.22) – то формуємо інше рішення «фазова пластинка не відповідає заявленим калібрувальним характеристикам».

Для реалізації перевірки використано мову програмування Python з бібліотекою `pandas`, що забезпечує зручну роботу з табличними структурами. Таблиця 3.1 була конвертована у формат CSV та оброблена автоматичною процедурою перевірки на відповідність.

За допомогою механізмів `pandas` реалізується по-елементна перевірка умов відповідності: чи входить кожне виміряне значення у допустимий інтервал, визначений еталоном і заданим допуском. Для кожного з 16 елементів матриці Мюллера перевіряються два ключові параметри – середнє значення похибки A та дисперсія B , і формується відповідний висновок: «відповідає» або «не відповідає». У разі виконання обох умов – вважається, що елемент скоректований належним чином. Якщо хоча б одна з умов порушується – фіксується невідповідність.

У запропонованій реалізації враховується не лише зручність структурування даних, а й прозорість логіки прийняття рішення. Всі перевірки

відбуваються незалежно по кожному елементу, що дозволяє точно локалізувати потенційні порушення калібрувальних допусків. Такий підхід є універсальним і може бути застосований не лише для фазових пластинок, а й для інших оптичних елементів, характеристики яких описуються матрицями Мюллера.

	M _{ij}	A	Delta_A	B	Delta_B	Висновок
1	M_11	0.044	0.003	0.015	0.007	фазова пластинка не відповідає заявленим калібрувальним характеристикам
2	M_12	0.051	0.004	0.017	0.001	фазова пластинка не відповідає заявленим калібрувальним характеристикам
3	M_13	0.061	0.004	0.02	0.001	фазова пластинка відповідає заявленим калібрувальним характеристикам
4	M_14	0.079	0.005	0.021	0.002	фазова пластинка відповідає заявленим калібрувальним характеристикам
5	M_21	0.06	0.004	0.019	0.001	фазова пластинка відповідає заявленим калібрувальним характеристикам
6	M_22	0.041	0.003	0.013	0.001	фазова пластинка не відповідає заявленим калібрувальним характеристикам
7	M_23	0.059	0.004	0.02	0.002	фазова пластинка не відповідає заявленим калібрувальним характеристикам
8	M_24	0.088	0.006	0.024	0.002	фазова пластинка не відповідає заявленим калібрувальним характеристикам
9	M_31	0.041	0.003	0.013	0.001	фазова пластинка не відповідає заявленим калібрувальним характеристикам
10	M_32	0.045	0.003	0.014	0.001	фазова пластинка не відповідає заявленим калібрувальним характеристикам
11	M_33	0.052	0.004	0.015	0.001	фазова пластинка не відповідає заявленим калібрувальним характеристикам
12	M_34	0.089	0.006	0.025	0.002	фазова пластинка не відповідає заявленим калібрувальним характеристикам
13	M_41	0.078	0.005	0.024	0.002	фазова пластинка не відповідає заявленим калібрувальним характеристикам
14	M_42	0.081	0.006	0.023	0.002	фазова пластинка відповідає заявленим калібрувальним характеристикам
15	M_43	0.09	0.006	0.024	0.002	фазова пластинка не відповідає заявленим калібрувальним характеристикам
16	M_44	0.093	0.006	0.026	0.003	фазова пластинка не відповідає заявленим калібрувальним характеристикам

Рисунок 3.15 – Результати програмної класифікації тестових зразків фазових пластинок

Таким чином, розроблена програмна логіка дозволяє ефективно і без втручання людини виконувати перевірку стану фазової пластинки за статистичними критеріями. Простота і наочність методу, разом із можливістю обробки серій вимірювань, робить його зручним інструментом для практичного використання в задачах поляриметричного контролю якості.

У порівнянні із схемою-аналогом в розроблюваній системі додано нову функцію, яка полягає в формуванні не інтегрального, а двовимірного розподілу похибок вимірювань кожного із 16 елементів ММЗ, на основі яких робиться калібрування досліджуваних оптичних елементів. Крім того, введений аналіз на основі статистичних характеристик та порогового

алгоритму класифікації дозволяє формувати рішення про результат калібрування оптичних елементів.

3.5 Висновок за розділом 3

Здійснено вибір оптичних елементів для експериментальної реалізації системи поляриметричного калібрування оптичних елементів.

Розроблено програмний модуль статистичного аналізу двовимірного розподілу похибок, який формує вектор його інформативних ознак.

Розроблено програмно за методом порогового оброблення класифікаційне рішення щодо калібрування оптичного елемента в розробленій системі калібрування.

Проведено серію експериментальних вимірювань, в ході яких отримано характеристики розподілів похибок вимірюваних елементів ММЗ для оптичного елемента «фазозсуваюча пластинка», калібрування якого здійснюють в системі. З їх використанням проведено тестування модифікованого методу калібрування в системі, на основі чого показано розширені функціональні можливості системи.

ВИСНОВКИ

В результаті проведеного аналізу методів калібрування оптичних елементів в системах поляриметрії показано перспективність поляриметричного підходу на основі вимірювання матриць Мюллера досліджуваних оптико анізотропних оптичних елементів. Схема автоматизованого мюллер-поляриметра з двома фазовими пластинками в вимірювальному та приймальному каналах обрана взята за базову для калібрування при необхідності розширення функціональних можливостей та точності вимірювань.

Модифіковано метод калібрування оптичних елементів системи, який передбачає визначення та пошук оптимального значення двовимірних розподілів похибок вимірювання елементів матриці Мюллера для досліджуваного об'єкта як відхилення його експериментального та ідеального значень ММЗ, а також подальший статистичний аналіз розподілу похибок кожної із 16 матриць Мюллера з пороговою класифікацією на основі вектора істотних ознак. Визначено основні фактори, що впливають на недосконалість оптичних елементів та фазозсуваючу пластинку обрано як тестовий об'єкт для експериментальних вимірювань.

Удосконалено схему структурну лазерного поляриметра для калібрування оптичних елементів на основі вимірювання матриці Мюллера. Розроблено блок-схеми вимірювання ММЗ зразка та їх похибок вимірювання при калібруванні в системі, а також їх статистичного та класифікаційного аналізу. 64-елементний вектор істотних ознак розподілів ММЗ отримано в результаті обчислення статистичних моментів 1-го, 2-го, 3-го, 4-го порядків, подальше рішення щодо процедури калібрування елемента формується за пороговою класифікацією.

Розроблено програмне забезпечення статистичного оцінювання двовимірних розподілів похибок повного набору ММЗ досліджуваного

об'єкта та їх класифікації на цій основі засобами Python в системі поляриметричного калібрування.

Проведено експериментальні дослідження щодо калібрування оптико анізотропних параметрів фазозсуваючої оптичної пластинки на лабораторній установці системи для калібрування оптичних елементів на основі ММЗ. Визначено діапазони значень оцінок середнього, дисперсії, асиметрії та ексцесу для матриці похибок $\Delta M_{ij}(K \times N)$ для кожного із 16 елементів ММЗ об'єкту «фазова пластинка», з гістограмами їх розподілів.

В процесі сліпого тестування в розробленій системі отримано результати класифікаційних рішень щодо відповідності чи невідповідності тестового об'єкту заявленим калібрувальним характеристикам, що розширило функціональні можливості системи калібрування.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Калібрування. URL :
<https://uk.wikipedia.org/w/index.php?title=%D0%9A%D0%B0%D0%BB%D1%96%D0%B1%D1%80%D1%83%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D0%BD%D1%8F&oldid=44444872> (дата звернення, 26.05. 2025).
2. Поляриметрія. URL :
<https://uk.wikipedia.org/w/index.php?title=%D0%9F%D0%BE%D0%BB%D1%8F%D1%80%D0%B8%D0%BC%D0%B5%D1%82%D1%80%D1%96%D1%8F&oldid=43732645> (дата звернення, 26.05. 2025).
3. Лінчевський І. В., Пономаренко Л. П., Чурсанова М. В. Модуляційна поляриметрія : навч. посібн. Київ : НТУУ КПІ. 2023 с. 116.
4. Vipin Tiwari, Yukti Pandey, Nandan S. Bisht Spatially Addressable Polarimetric Calibration of Reflective-Type Spatial Light Modulator Using Mueller–Stokes Polarimetry. *Frontiers in Physics*. 2021. Vol. 9. URL: <https://www.frontiersin.org/journals/physics/articles/10.3389/fphy.2021.709192>
5. Mueller Matrix Polarimetry – An Emerging New Tool for Characterizing the Microstructural Feature of Complex Biological Specimen / Honghui He et. al. *J. Lightwave Technol.* 2019. Vol. 37. P. 2534-2548.
6. Jesus del Hoyo, Luis Miguel Sanchez-Brea, Jose Antonio Gomez-Pedrero. High precision calibration method for a four-axis Mueller matrix polarimeter. *Optics and Lasers in Engineering*. 2020. Vol. 132. URL: <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2020.106112> (дата звернення: 22.05.2025).
7. Characterizing the microstructures of biological tissues using Mueller matrix and transformed polarization parameters / Minghao Sun et. al. *Biomed. Opt. Express*. 2014. Vol. 5. P. 4223-4234.

8. Applications of Mueller Matrix Polarimetry to Biological and Agricultural Diagnostics: A Review / Ignatenko D. N. et. al. *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12, no. 10: 5258.
9. Mueller Matrix Polarimetric Imaging Analysis of Optical Components for the Generation of Cylindrical Vector Beams / López-Morales et. al. *Crystals*. 2020. Vol. 10, no. 12: 1155.
10. URL:
https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%92%D0%B5%D0%BA%D1%82%D0%BE%D1%80_%D0%A1%D1%82%D0%BE%D0%BA%D1%81%D0%B0
 (дата звернення, 26.05. 2025).
11. Polarized light scattering spectroscopy for quantitative measurement of epithelial cellular structures in situ / V. Backman et. al. *IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron.*, 1999. Vol. 5(4). P.1019–1026.
12. Grainger J. F., Clarke D. Polarized Light and Optical Measurement / Pergamon Press. Oxford. 1971.
13. Ji Qi, Daniel S. Elson, Danail Stoyanov. Eigenvalue calibration method for 3×3 Mueller polarimeters. *Opt. Lett.* 2019. Vol. 44. P. 2362-2365.
14. Vitaly Wirthl, Cristian D. Panda, Paul W. Hess, Gerald Gabrielse. Simple self-calibrating polarimeter for measuring the Stokes parameters of light. *OSA Continuum*. 2021. Vol. 4. P. 2949-2969.
15. URL:
https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%92%D0%B5%D0%BA%D1%82%D0%BE%D1%80_%D0%A1%D1%82%D0%BE%D0%BA%D1%81%D0%B0
 (дата звернення 26.05. 2025).
16. Sanaz Alali, I. Alex Vitkin. Polarized light imaging in biomedicine: emerging Mueller matrix methodologies for bulk tissue assessment. *J. Biomed. Opt.* 2015. Vol. 20(6). 061104.
17. Заболотна Н.І., Радченко К.О. Аналіз похибок визначення матриці Мюллера біологічного шару в системі двовимірного мюллер-матричного

картографування. *Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології*. 2014. №2. С. 62–70.

18. Mueller calculus. URL:
https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Muller_calculus&oldid=1285634764 (дата звернення 26.05. 2025).
19. Vap, J & Nauyoks, S & Marciniak, Michael. Optimization of a dual-rotating-retarder polarimeter as applied to a tunable infrared Mueller-matrix scatterometer. *Measurement Science and Technology*. 2013. Vol. 24. 055901. 10.1088/0957-0233/24/5/055901.
20. Zhi-Yu Cai, Yu-Lung Lo, Ching-Min Chang. Dual-rotator mueller matrix polarimeter for high-accuracy and high-precision measurements of glucose concentration. *Optik*. 2021, Vol. 245. URL:
<https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2021.167662>.
21. Polarimetry Using Liquid Crystal Variable Retarders / Thomas F. Drouillard II et. al. *Meadowlark Optics Inc*. 2022. URL:
<https://www.meadowlark.com/wp-content/uploads/2022/04/Polarmetry-using-liquid-crystal-variable-retarders.pdf> (дата звернення 25, 2025).
22. URL: https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=6339
 (дата звернення 26.05. 2025).
23. Juan M Bueno, Polarimetry using liquid-crystal variable retarders: theory and calibration, Universidad de Murcia, Laboratorio de 'Optica, 2000.
24. Заболотна Н.І. Архітектура і алгоритми функціонування та аналізу даних двовимірних систем лазерної поляриметрії біологічних тканин . *Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології*. 2013.
25. Gil J. J. Review on Mueller matrix algebra for the analysis of polarimetric measurements. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2014. Vol.8(1), 081599.
<https://doi.org/10.1117/1.JRS.8.081599>.
26. González, M. A., et al. Mueller matrix imaging polarimeter with polarization camera self-calibration applied to structured light components. *Journal of the European Optical Society-Rapid Publications*, 2024. Vol. 20, 5.

https://jeos.edpsciences.org/articles/jeos/full_html/2024/01/jeos20230037/jeos20230037.html

27. Chipman R.A., Sornsin E.A. Mueller matrix imaging polarimetry: An overview. *Proceedings of SPIE*. 1996. Vol.2873. P. 5–12.
28. Заболотна Н.І., Шолота В.В., Павлов С.В. Моделі, методи та системи лазерної поляримерії плазми крові для діагностики молочних залоз : монографія. Вінниця : ВНТУ, 2024. 145 с.
29. . Порогування (обробка зображень). URL: [https://uk.wikipedia.org/w/index.php?title=%D0%9F%D0%BE%D1%80%D0%BE%D0%B3%D1%83%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D0%BD%D1%8F_\(%D0%BE%D0%B1%D1%80%D0%BE%D0%B1%D0%BA%D0%B0_%D0%B7%D0%BE%D0%B1%D1%80%D0%B0%D0%B6%D0%B5%D0%BD%D1%8C\)&oldid=36252759](https://uk.wikipedia.org/w/index.php?title=%D0%9F%D0%BE%D1%80%D0%BE%D0%B3%D1%83%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D0%BD%D1%8F_(%D0%BE%D0%B1%D1%80%D0%BE%D0%B1%D0%BA%D0%B0_%D0%B7%D0%BE%D0%B1%D1%80%D0%B0%D0%B6%D0%B5%D0%BD%D1%8C)&oldid=36252759) (дата звернення, 10.06. 2025).
30. Метод "дерева рішень". URL: https://stud.com.ua/34758/finansi/metod_dereva_rishen (дата звернення, 10.06. 2025).
31. Мітчелл Т. М. *Machine Learning* / Т. М. Мітчелл. New York: McGraw-Hill, 1997. 414 с.
32. Логістична регресія: URL: https://uk.wikipedia.org/w/index.php?title=%D0%9B%D0%BE%D0%B3%D1%96%D1%81%D1%82%D0%B8%D1%87%D0%BD%D0%B0_%D1%80%D0%B5%D0%B3%D1%80%D0%B5%D1%81%D1%96%D1%8F&oldid=35029125 (дата звернення, 10.06. 2025).
33. Bishop, C. M. *Pattern Recognition and Machine Learning*. 2006. [Journal of Electronic Imaging](#) 16(4):140-155
34. Заболотна Н.І. Похибки вимірювань референтних матриць Мюллера в системі мюллер-матричного картографування біологічних шарів . *Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології*. 2015. №1 (29) С. 109 –117.

35. Заболотна Н.І., Павлов С.В. Метрологічні характеристики розподілів похибок вимірювання в системі мюллер-матричного картографування шарів біологічних тканин. *Фотобіологія та фотомедицина*. 2015. №1,2. С. 89–95.
36. Тужанський С.Є., Лисенко Г.Л. Системи лазерної відеополяриметрії для автоматизованого контролю параметрів неоднорідних біотканин : монографія. Вінниця: ВНТУ, 2011. 156 с.
37. Основні принципи напівпровідникових лазерів. URL: <https://ua.guoshenglaser.com/info/basic-principles-of-semiconductor-lasers-91978885.html> (дата звернення 8.06.2025).
38. 632.8nm Free Space Frequency Stabilized Laser Diode – Edmund Optics. URL: <https://www.edmundoptics.com/p/6328nm-free-space-frequency-stabilized-laser-diode/2810/#> (дата звернення 9.06.2025).
39. Хвильова пластинка. URL: https://uk.wikipedia.org/w/index.php?title=%D0%A5%D0%B2%D0%B8%D0%BB%D1%8C%D0%BE%D0%B2%D0%B0_%D0%BF%D0%BB%D0%B0%D1%81%D1%82%D0%B8%D0%BD%D0%BA%D0%B0&oldid=37347732 (дата звернення 08.06.2025).
40. Quarter Wave Plate, Multiple-Order, Quartz, 12.7 mm Diameter, 354.7 nm. URL: <https://www.newport.com/p/05RP14-08> (дата звернення 08.06.2025).
41. Newport 10GL08AR.33. URL: <https://www.newport.com/p/10GL08AR.33> (дата звернення 02.06.2025).
42. Gimenez, Yilbert, Lapray, Pierre-Jean, Foulonneau, Alban, Bigué, Laurent. Calibration algorithms for polarization filter array camera: survey and evaluation. *Journal of Electronic Imaging*. 2020. Vol. 29. 1. 10.1117/1.JEI.29.4.041011.
43. Edmund Optics 46-575. URL: <https://www.edmundoptics.com/p/m255-x-05-mounted-linear-glass-polarizing-filter/6934/#> (дата звернення 02.06.2025).

44. Olympus UPLFLN 4X Objective – Edmund Optics
URL: <https://www.edmundoptics.com/p/olympus-uplfln-4x-objective/29226/>
(дата звернення 02.06.2025).

Додаток А

(обов'язковий)

ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Назва роботи: Система для поляриметричного калібрування оптичних елементів на основі матриць Мюллера

Тип роботи: бакалаврська кваліфікаційна робота
(бакалаврська кваліфікаційна робота / магістерська кваліфікаційна робота)

Підрозділ кафедра БМІОЕС, факультет ІЕС, КОІС- 216
(кафедра, факультет, навчальна група)

Коефіцієнт подібності текстових запозичень, виявлених у роботі системою StrikePlagiarism 0,09 %

Висновок щодо перевірки кваліфікаційної роботи (відмітити потрібне)
✓ Запозичення, виявлені у роботі, є законними і не містять ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації. Роботу прийняти до захисту

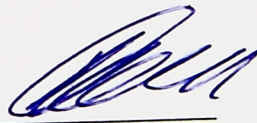
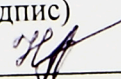
☒ У роботі не виявлено ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації, але надмірна кількість текстових запозичень та/або наявність типових розрахунків не дозволяють прийняти рішення про оригінальність та самостійність її виконання. Роботу направити на доопрацювання.

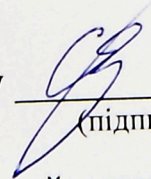
☐ У роботі виявлено ознаки плагіату та/або текстових маніпуляцій як спроб укриття плагіату, фабрикації, фальсифікації, що суперечить вимогам законодавства та нормам академічної доброчесності. Робота до захисту не приймається.

Експертна комісія:

Коваль Л.Г., зав. каф. БМІОЕС
(прізвище, ініціали, посада)

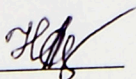
Заболотна Н.І., проф. каф. БМІОЕС
(прізвище, ініціали, посада)


(підпис)

(підпис)

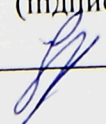
Особа, відповідальна за перевірку 
(підпис)

Тужанський С.Є.
(прізвище, ініціали)

З висновком експертної комісії ознайомлений(-на)

Керівник 
(підпис)

Заболотна Н.І., проф. каф. БМІОЕС
(прізвище, ініціали, посада)

Здобувач 
(підпис)

Козачок Д.Р.

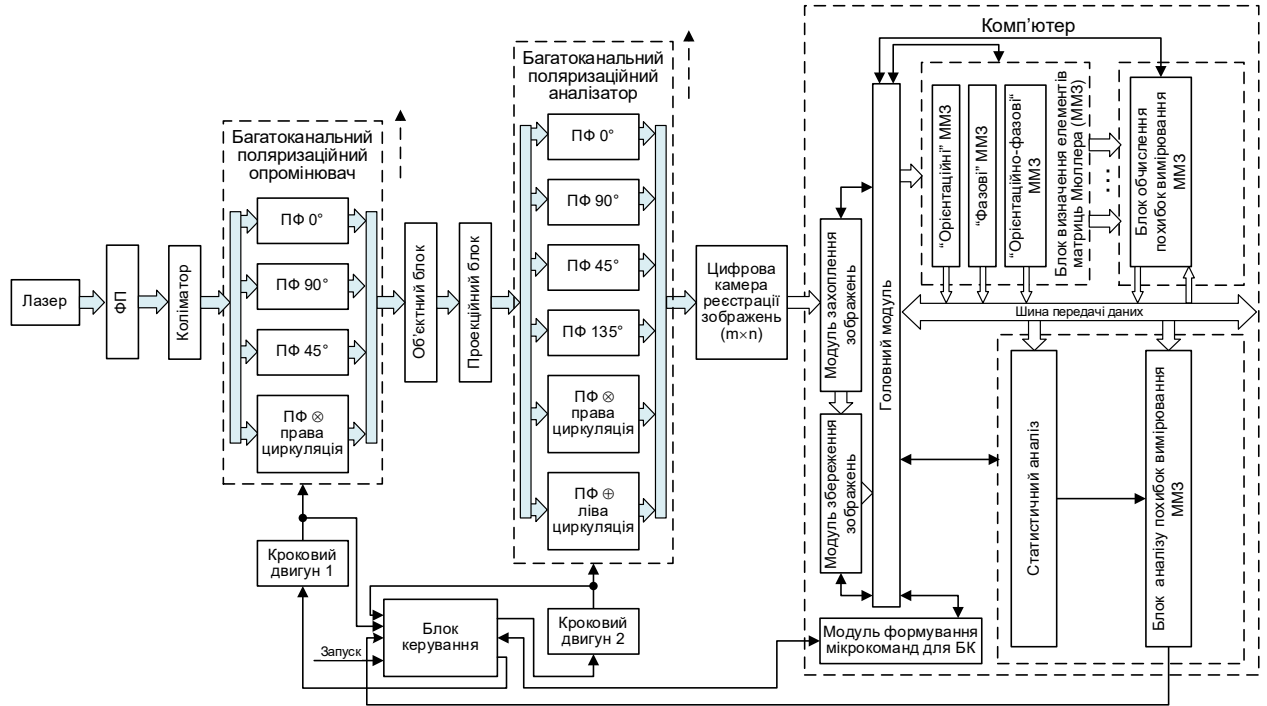
Додаток Б
(обов'язковий)

ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА

СИСТЕМА ДЛЯ ПОЛЯРИМЕТРИЧНОГО КАЛІБРУВАННЯ ОПТИЧНИХ
ЕЛЕМЕНТІВ НА ОСНОВІ МАТРИЦЬ МЮЛЛЕРА

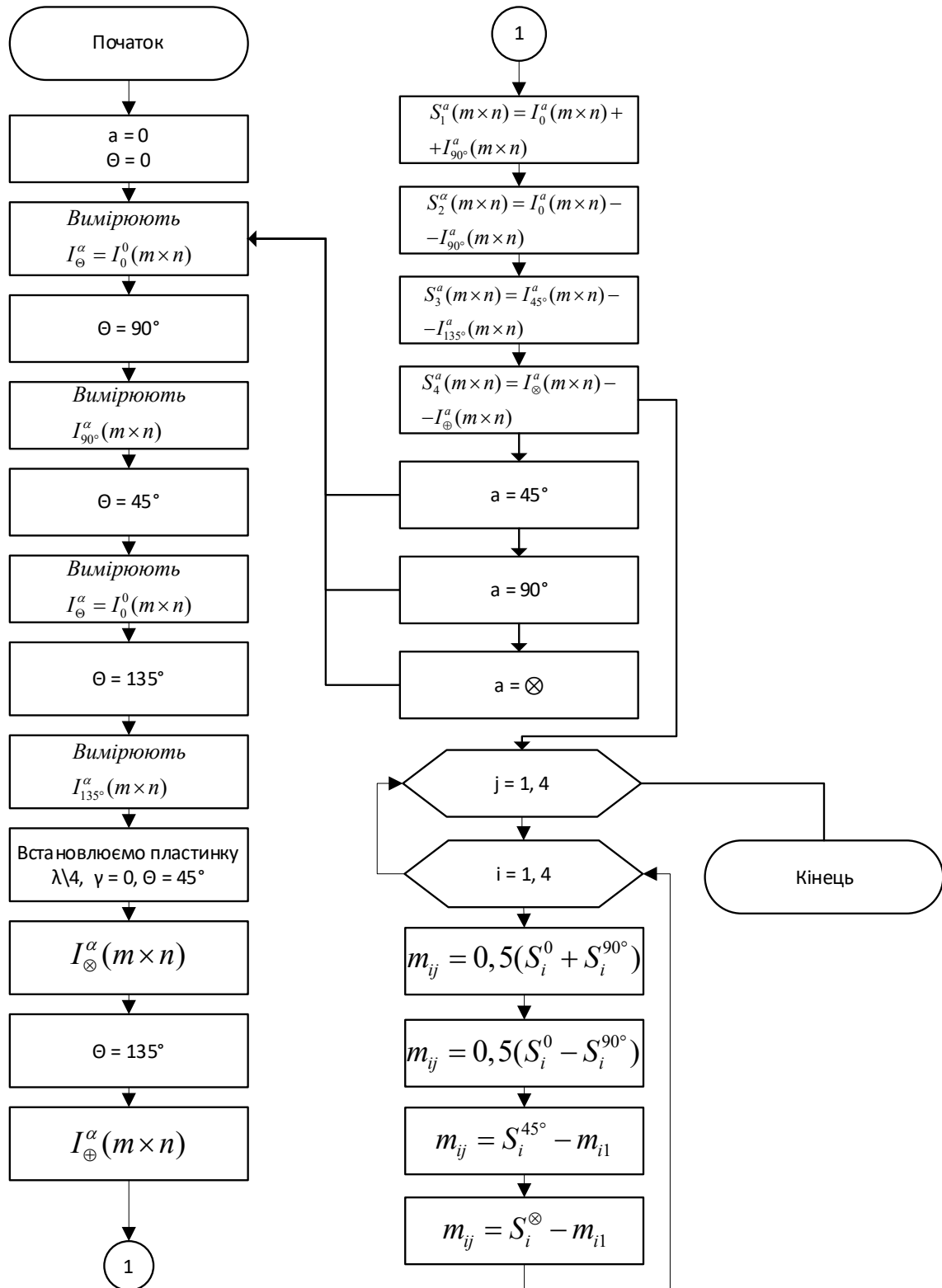
Додаток Б.1
(обов'язковий)

Схема структурна системи поляриметричного калібрування оптичних елементів на основі матриці Мюллера



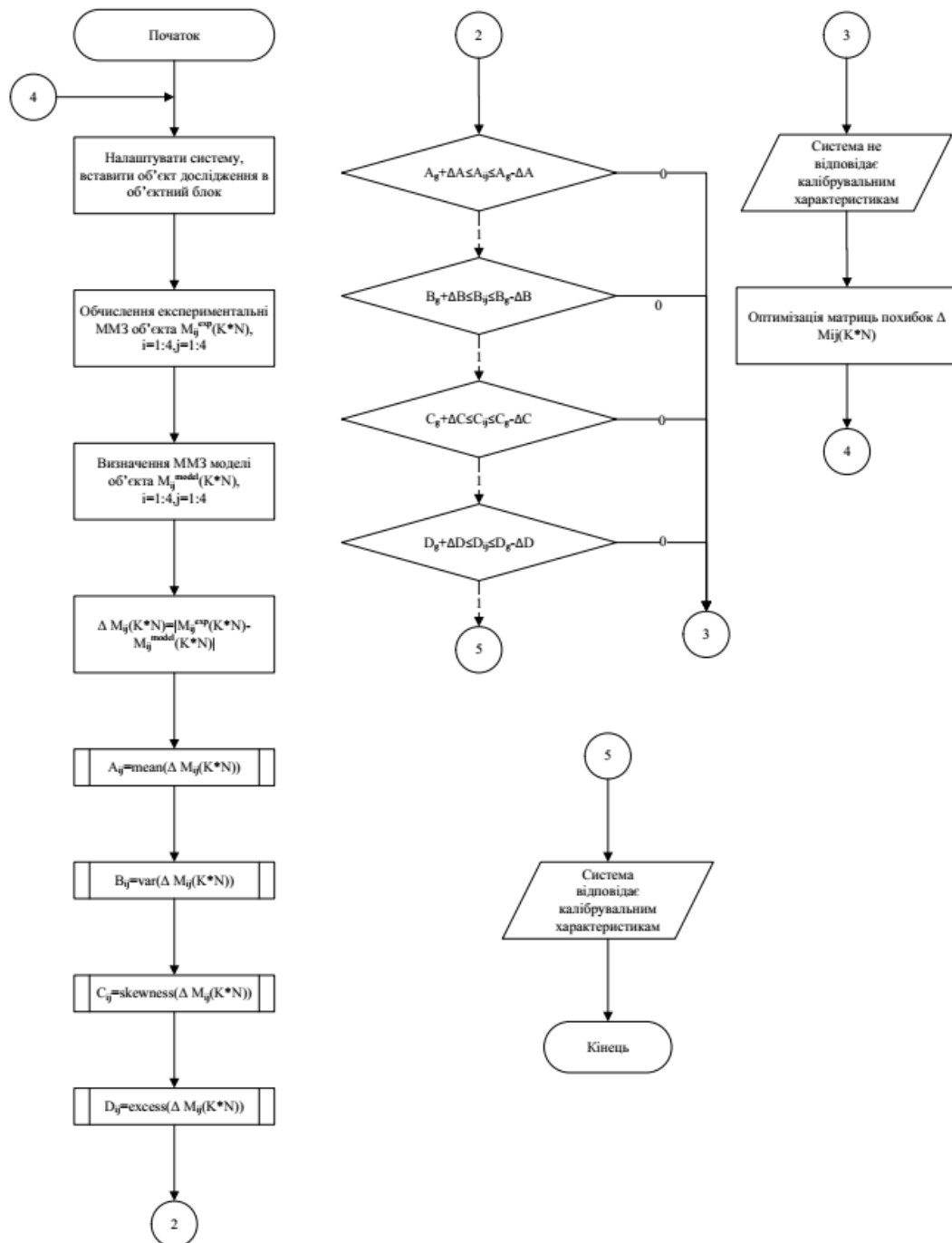
Додаток Б.2
(обов'язковий)

Блок-схема вимірювання ММЗ зразка для калібрування об'єкта



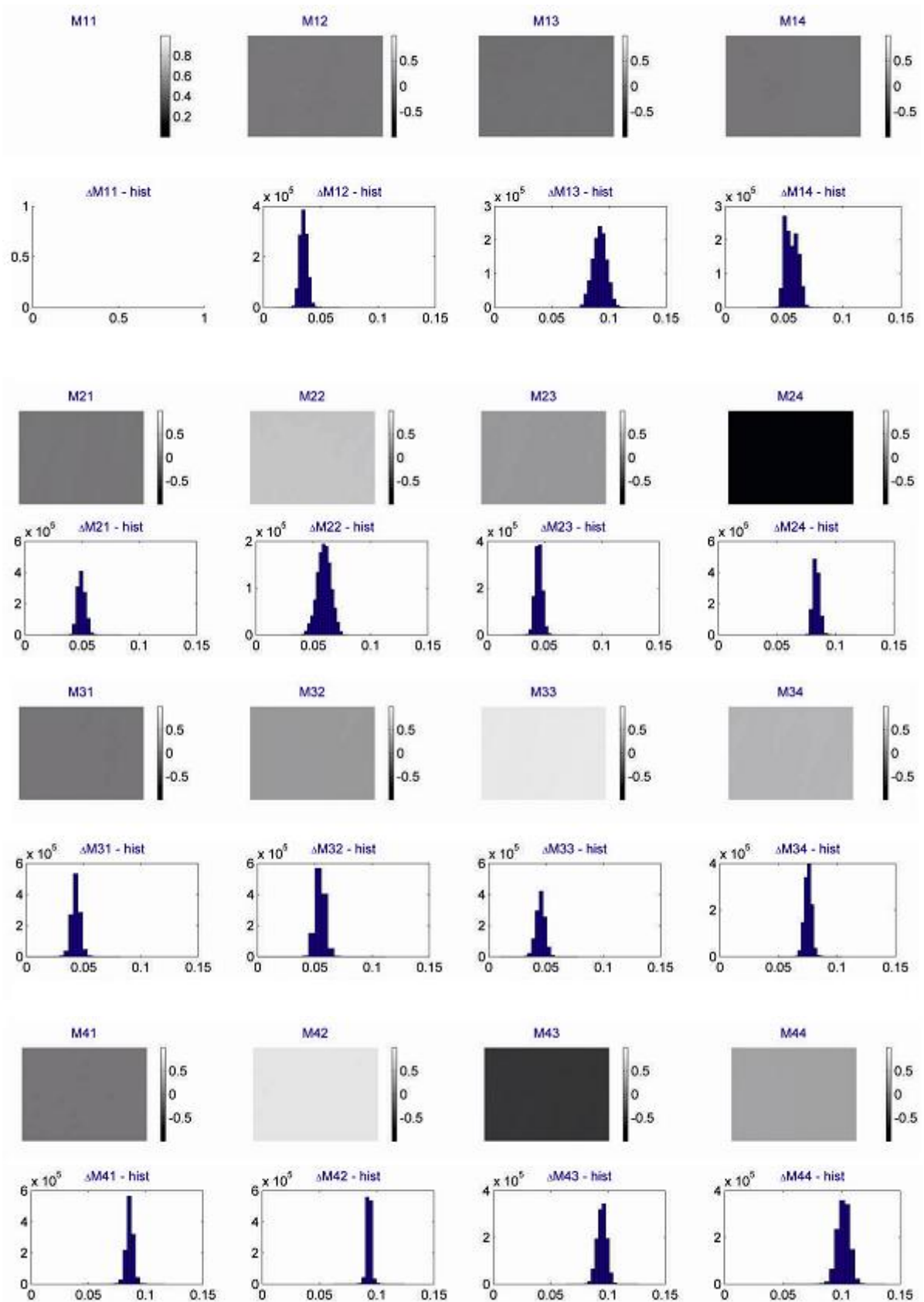
Додаток Б.3
(Обов'язковий)

Блок-схема алгоритму методу калібрування оптичних елементів на основі вимірювання матриць Мюллера



Додаток Б.4 (обов'язковий)

Виміряні ММЗ фазової пластинки з гістограмами розподілу елементів
їх похибок



Додаток В

(обов'язковий)

Лістинг програми

Програмна реалізація вимірювання статичного аналізу матриць
Мюллера та бінарної класифікації на основі порогового методу

```
import csv
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from scipy.stats import kurtosis, skew, norm
from typing import Tuple
import pandas as pd
import os

A_GLOBAL_MIN = 0.060
A_GLOBAL_MAX = 0.088
B_GLOBAL_MIN = 0.016
B_GLOBAL_MAX = 0.023

def compute_moments_and_plot(matrix: np.ndarray, title: str = "Розподіл
похибок") -> Tuple[float, float, float, float]:
    # Розгортання у вектор
    data = matrix.flatten()
    # Статистичні характеристики
    mean = np.mean(data)
    var = np.var(data, ddof=1)
    skewness = skew(data)
    excess = kurtosis(data)
    # Візуалізація гістограми
```

```

plt.figure(figsize=(8, 5))
plt.hist(data, bins=30, density=True, alpha=0.6, color='skyblue',
edgecolor='black', label='Гістограма')
# Накладення нормального розподілу
x = np.linspace(min(data), max(data), 1000)
pdf = norm.pdf(x, mean, np.sqrt(var))
plt.plot(x, pdf, 'r--', linewidth=2, label='Нормальний розподіл')
# Підписи
plt.title(title)
plt.xlabel("Значення похибки")
plt.ylabel("Щільність імовірності")
plt.legend()
plt.grid(True)
plt.tight_layout()
plt.show()
output_file='table.csv'
file_exists = os.path.exists(output_file)
with open(output_file, mode='a', newline="", encoding='utf-8') as f:
    writer = csv.writer(f)
    if not file_exists:
        writer.writerow(['A', 'B', 'C', 'D'])
    writer.writerow([mean, var, skewness, excess])

return mean, var, skewness, excess

def classify_table():
    # Завантаження даних
    df = pd.read_csv("table.csv")
    # Класифікація порогова
    df["Висновок"] = df.apply(classify, axis=1)

```

```

# Збереження оновленої таблиці
df.to_csv("output.csv", index=False, encoding="utf-8-sig")

def classify(row):
    a = row["A"]
    delta_a = row["Delta_A"]
    b = row["B"]
    delta_b = row["Delta_B"]

    a_min = max(A_GLOBAL_MIN, a - delta_a)
    a_max = min(A_GLOBAL_MAX, a + delta_a)
    b_min = max(B_GLOBAL_MIN, b - delta_b)
    b_max = min(B_GLOBAL_MAX, b + delta_b)

    a_check = a_min <= a <= a_max
    b_check = b_min <= b <= b_max
    if a_check and b_check:
        return "фазова пластинка відповідає заявленим калібрувальним  
характеристикам"
    else:
        return "фазова пластинка не відповідає заявленим калібрувальним  
характеристикам"

def main():
    matrix = np.loadtxt('input.csv', delimiter=',')
    features = compute_moments_and_plot(matrix, title="Гістограма розподілу  
похибок елемента матриці Мюллера")
    print("Середнє значення =", features[0])
    print("Дисперсія =", features[1])
    print("Асиметрія =", features[2])

```

```
print("Екцес =", features[3])  
classify_table()  
  
if __name__ == "__main__":  
    main()
```