

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

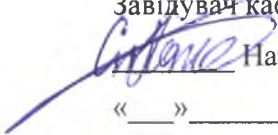
Факультет робототехніки та приладобудування

Кафедра комп'ютерно-інтегрованих технологій виробництва приладів

«На правах рукопису»
УДК 681.51:535.51

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

 Наталія СТЕЛЬМАХ

«__» _____ 2026 р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

за освітньо-науковою програмою «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

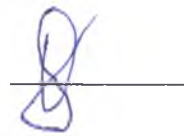
зі спеціальності 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка»

на тему: «Автоматизована система керування зміною параметрів поляризації штучного джерела випромінювання»

Виконав:

студент II курсу, групи ПБ-41мн

Анісімов Денис Дмитрович



Науковий керівник:

доцент, с. н.с., к.т.н.

Синявський Іван Іванович



Рецензент:

професор, зав. каф., д.т.н.

Бурау Надія Іванівна



Засвідчую, що у цій магістерській дисертації
немає запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань.

Студент



Київ – 2026 року

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

**Факультет робототехніки та приладобудування
Кафедра комп'ютерно-інтегрованих технологій виробництва приладів**

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність – 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка»

Освітньо-наукова програма «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

 **Наталія СТЕЛЬМАХ**

«___» _____ 2026 р.

**ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту
Анісімову Денису Дмитровичу**

1.Тема дисертації «Автоматизована система керування зміною параметрів поляризації штучного джерела випромінювання», науковий керівник дисертації Синявський Іван Іванович, кандидат технічних наук, доцент, затверджені наказом по університету від «30» 03 2026 р. № 1312-с

2.Термін подання студентом дисертації: 17 травня 2026 року.

3.Об'єкт дослідження: процес формування та контролю зміни параметрів поляризації штучного джерела випромінювання у лабораторних умовах.

4.Предмет дослідження: автоматизована система керування положенням оптичних елементів для формування і стабілізації заданого стану поляризації випромінювання штучного джерела.

5.Перелік завдань, які потрібно розробити: Провести аналіз сучасних методів формування та калібрування поляризаційних станів оптичного випромінювання. Визначити керовану величину, керуючий вплив та основні параметри процесу формування ступеня лінійної поляризації. Розробити математичну та комп'ютерну модель оптичного блока для дослідження залежності DOLP від параметрів системи. Сформуванати калібрувальну залежність для визначення положення оптичного блока за заданим значенням DOLP. Розробити структуру, математичне, алгоритмічне та програмне забезпечення автоматизованої системи керування і виконати комп'ютерну апробацію її роботи.

6.Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу: типи поляризаційних станів випромінювання; схема формування частково поляризованого випромінювання; комп'ютерна модель оптичного блока в ANSYS Zemax OpticStudio; залежності DOLP від кута нахилу пластин, довжини хвилі та конфігурації оптичного блока; функціональна схема АСК параметрами поляризації; схеми інформаційного, математичного та програмного забезпечення АСК; алгоритм роботи системи керування; інтерфейс програмного забезпечення; результати моделювання роботи автоматизованої системи.

7. Орієнтовний перелік публікацій: участь у трьох наукових конференціях з публікаціями матеріалів (тез) доповідей та стаття у фаховому журналі категорії Б «Вісник Київського політехнічного інституту. Серія Приладобудування».

8. Дата видачі завдання: 02 лютого 2026 року.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Аналітичний огляд сучасних методів формування та калібрування поляризаційних станів оптичного випромінювання	20.02.26	
2	Розроблення математичної моделі формування ступеня лінійної поляризації DOLP	06.03.26	
3	Побудова комп'ютерної моделі оптичного блока в ANSYS Zemax OpticStudio та дослідження залежності DOLP від параметрів системи	20.03.26	
4	Формування калібрувальної залежності та вибір робочої конфігурації оптичного блока для автоматизованої системи керування	03.04.26	
5	Розроблення структури, алгоритмічного та програмного забезпечення автоматизованої системи керування	17.04.26	
6	Комп'ютерна апробація роботи автоматизованої системи керування	01.05.26	
7	Оформлення МД	17.05.26	

Студент



Денис АНІСІМОВ

Науковий керівник



Іван СИНЯВСЬКИЙ

РЕФЕРАТ

Обсяг роботи: 108 сторінок

Кількість ілюстрацій: 32

Кількість таблиць: 15

Кількість джерел: 49

Кількість додатків: 2

У першому розділі проаналізовано сучасні методи формування та калібрування поляризаційних станів оптичного випромінювання, типи поляриметрів, ручні та автоматизовані підходи до їх тестування. Обґрунтовано необхідність автоматизації процесу формування заданих значень ступеня лінійної поляризації.

У другому розділі досліджено оптичний блок як об'єкт автоматизованого керування. Визначено керовану величину, керуючий вплив і критерій якості, розроблено математичну та комп'ютерну модель, а також сформовано калібрувальну залежність DOLP від параметрів системи.

У третьому розділі розроблено структуру автоматизованої системи керування, виконано вибір апаратної бази та розроблено математичне, алгоритмічне і програмне забезпечення. За результатами комп'ютерної апробації підтверджено можливість формування DOLP у діапазоні від 0,45 % до 44,82 % з максимальною похибкою до 0,96 %.

Ключові слова: автоматизована система керування, поляризація, поляриметрія, калібрування, DOLP, оптичний блок, зворотний зв'язок.

ABSTRACT

Scope of work: 108 pages

Number of illustrations: 32

Number of tables: 15

Number of sources: 49

Number of applications: 2

In the first section, modern methods for forming and calibrating polarization states of optical radiation, types of polarimeters, and manual and automated approaches to their testing are analyzed. The need to automate the process of forming specified values of the degree of linear polarization is substantiated.

In the second section, the optical unit is investigated as an object of automated control. The controlled variable, control action, and quality criterion are defined. A mathematical and computer model is developed, and a calibration dependence of DOLP on the system parameters is formed.

In the third section, the structure of the automated control system is developed, the hardware base is selected, and the mathematical, algorithmic, and software support is designed. Based on computer testing, the possibility of forming DOLP in the range from 0.45% to 44.82% with a maximum error of up to 0.96% is confirmed.

Key words: automated control system, polarization, polarimetry, calibration, DOLP, optical unit, feedback.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	9
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ МЕТОДІВ ФОРМУВАННЯ ПОЛЯРИЗОВАНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	12
1.1. Роль поляриметричних вимірювань у сучасних наукових та інженерних застосуваннях.....	12
1.2. Параметри поляризації, що використовуються при калібруванні поляриметрів.....	13
1.3. Методи формування заданих станів поляризації.....	15
1.3.1. Поляризатори на основі відбиття (кут Брюстера)	16
1.3.2. Хвильові пластини	17
1.3.3. Метод стопи похилих діелектричних пластин.....	18
1.4. Типи поляриметрів та сфери їх застосування	20
1.4.1. Точкові (одноканальні) поляриметри	20
1.4.2. Зображуючі поляриметри.....	21
1.4.3. Повнополяриметричні (мюллерівські) системи.....	22
1.5. Методи тестування та калібрування поляриметрів	25
1.5.1. Ручні лабораторні методи.....	25
1.5.2. Використання еталонних джерел поляризованого випромінювання	26
1.5.3. Порівняльний аналіз методів тестування	27
1.6. Огляд існуючих систем тестування та калібрування поляриметрів	28
1.6.1. Комерційні системи	29
1.6.2. Огляд та аналіз об'єктів інтелектуальної власності методів та засобів формування та калібрування поляризації.....	32
1.7. Аналіз недоліків ручного тестування та необхідність автоматизації.....	35

Висновки до розділу та постановка задач досліджень	36
РОЗДІЛ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ ТА РОЗРОБЛЕННЯ	
МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ФОРМУВАННЯ СТУПЕНЯ ЛІНІЙНОЇ	
ПОЛЯРИЗАЦІЇ	
2.1. Вибір критерію якості та параметрів керування процесом формування DOLP	39
2.2. Системний аналіз оптичного блока як об'єкта автоматизованого керування	42
2.3. Побудова калібрувальної залежності об'єкта керування.....	44
2.4. Комп'ютерна реалізація калібрувальної моделі в ANSYS Zemax OpticStudio	46
2.5. Порівняльний аналіз конфігурацій оптичного блока	48
2.6. Аналіз та вибір матеріалу діелектричних пластин	50
2.7. Аналіз спектральної стабільності калібрувальної залежності	51
2.8. Аналіз малих значень DOLP у діапазоні малих кутів	55
2.9. Узагальнення результатів моделювання та формування калібрувальної залежності для АСК	57
Висновки до розділу 2	58
РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ	
ЗМІНОЮ ПАРАМЕТРІВ ПОЛЯРИЗАЦІЇ ШТУЧНОГО ДЖЕРЕЛА	
ВИПРОМІНЮВАННЯ	
3.1. Функціональна схема автоматизованої системи керування параметрами поляризації	60
3.2. Вибір та обґрунтування апаратної елементної бази	62
3.3. Інформаційне забезпечення автоматизованої системи	66
3.4. Математичне забезпечення автоматизованої системи	70

3.5. Алгоритмічне забезпечення автоматизованої системи	74
3.6. Програмне забезпечення автоматизованої системи	81
3.7. Результати моделювання та дослідження роботи автоматизованої системи керування	85
Висновки до розділу 3	91
ВИСНОВКИ.....	92
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	94
ДОДАТКИ.....	100
ДОДАТОК А. ПРОГРАМНИЙ КОД ПРОГРАМИ «POLARIZATION CALIBRATION SYSTEM»	100
ДОДАТОК Б.	107

ВСТУП

Актуальність теми

Поляриметричні вимірювання широко застосовуються в оптичному приладобудуванні, атмосферній оптиці, дистанційному зондуванні, біомедичних дослідженнях та метрологічному контролі оптичних систем. Достовірність таких вимірювань значною мірою залежить від якості тестування та калібрування поляриметрів, для чого необхідно формувати випромінювання з наперед заданими параметрами поляризації, зокрема ступенем лінійної поляризації DOLP.

Існуючі засоби формування поляризаційних станів, зокрема генератори поляризаційних станів, хвильові пластини, рідкокристалічні та фотоеластичні елементи, забезпечують високу функціональність, однак часто характеризуються складністю реалізації, високою вартістю або спектральними обмеженнями. Ручні методи налаштування оптичних елементів є простішими, проте мають недостатню повторюваність, залежать від людського фактору та потребують значних витрат часу.

Перспективним підходом є використання стопи похилих діелектричних пластин, кут нахилу яких дозволяє керувати ступенем лінійної поляризації вихідного випромінювання. Водночас для ефективного застосування такого підходу необхідні математична модель, калібрувальна залежність та автоматизоване позиціонування оптичних елементів.

Тому в магістерській дисертації розглядається актуальна науково-прикладна задача розроблення автоматизованої системи керування зміною параметрів поляризації штучного джерела випромінювання для підвищення точності та повторюваності лабораторного тестування поляриметрів.

Мета і завдання дослідження

Метою роботи є підвищення ефективності процесу лабораторного тестування та калібрування точкових і зображуючих поляриметрів шляхом розроблення автоматизованої системи керування зміною параметрів поляризації штучного джерела випромінювання.

Для досягнення поставленої мети було сформульовано такі завдання:

1. Провести аналіз сучасних методів формування та калібрування поляризаційних станів оптичного випромінювання.
2. Визначити керовану величину, керуючий вплив, критерій якості та основні параметри процесу формування ступеня лінійної поляризації.
3. Розробити математичну та комп'ютерну модель оптичного блока формування частково лінійно поляризованого випромінювання для дослідження залежності DOLP від параметрів системи.
4. Сформувати калібрувальну та обернену калібрувальну залежності для визначення положення оптичного блока за заданим значенням DOLP.
5. Розробити структуру, математичне, алгоритмічне та програмне забезпечення автоматизованої системи керування і виконати комп'ютерну апробацію її роботи.

Об'єкт дослідження – процес формування та контролю зміни параметрів поляризації штучного джерела випромінювання у лабораторних умовах.

Предмет дослідження – автоматизована система керування положенням оптичних елементів для формування і стабілізації заданого стану поляризації випромінювання штучного джерела.

Методи дослідження – методи аналізу та синтезу, теорії поляризації світла, математичного та комп'ютерного моделювання, формалізації, теорії автоматичного керування, алгоритмізації, програмної реалізації та обчислювального експерименту.

Наукова новизна одержаних результатів

Удосконалено математичну модель формування частково лінійно поляризованого випромінювання у стопі похилих діелектричних пластин шляхом її подання як моделі об'єкта автоматизованого керування, де DOLP є керованою величиною, а кут нахилу пластин θ – керуючим впливом.

Сформовано пряму та обернену калібрувальні залежності $DOLP = f(\theta, \lambda, N)$ і $\theta = f^{-1}(DOLP_{set})$, які забезпечують перехід від заданого значення ступеня лінійної поляризації до кута встановлення оптичного блока з урахуванням параметрів конфігурації та дискретності виконавчого механізму.

Практичне значення одержаних результатів

Розроблено структуру автоматизованої системи керування зміною параметрів поляризації штучного джерела випромінювання, а також математичне, алгоритмічне та програмне забезпечення для визначення кута нахилу оптичного блока, формування керуючого сигналу та корекції положення оптичних елементів.

За результатами моделювання обґрунтовано конфігурацію з двома парами похилих діелектричних пластин, що забезпечує формування DOLP до приблизно 45,4 % при $\theta = 50^\circ$, а комп'ютерна апробація показала можливість досягнення заданих значень DOLP з максимальною похибкою до 0,96 %.

Результати розрахунків і структурно-алгоритмічні рішення використані в ГАО НАН України при розробленні лабораторного стенда для автоматизованого керування параметрами поляризації.

Апробація результатів дослідження:

1. XX Науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Ефективність та Автоматизація інженерних рішень у приладобудуванні» 04-05 грудня 2024 року, м. Київ, Україна.

2. XVIII Науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Погляд у майбутнє приладобудування» 13 – 14 травня 2025 року, м. Київ, Україна.

3. XIX Науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Погляд у майбутнє приладобудування» 12 – 13 травня 2026 року, м. Київ, Україна.

Публікації:

Публікації 3 тез у збірниках науково-практичних конференцій, 1 наукової статті у фаховому виданні категорії Б.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ МЕТОДІВ ФОРМУВАННЯ ПОЛЯРИЗОВАНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1. Роль поляриметричних вимірювань у сучасних наукових та інженерних застосуваннях

Поляриметрія є важливим розділом оптики, що дозволяє отримувати додаткову інформацію про властивості середовищ і об'єктів на основі аналізу поляризаційного стану електромагнітного випромінювання [1]. На відміну від класичних фотометричних і спектральних методів, поляриметричні вимірювання забезпечують чутливість до анізотропії, структури та мікрофізичних параметрів досліджуваних об'єктів.

Однією з ключових сфер застосування поляриметрії є дистанційне зондування Землі та космічні дослідження [2]. Поляриметричні системи використовуються для визначення параметрів атмосферних аерозолів, характеристик хмарності та властивостей земної поверхні [3]. Висока інформативність поляризаційних параметрів, особливо при малих значеннях ступеня поляризації, зумовлює необхідність високоточного калібрування поляриметричних приладів.

У біомедичних застосуваннях поляриметрія використовується для дослідження структури біологічних тканин та виявлення патологічних змін, пов'язаних із порушенням їх оптичної анізотропії [4]. Методи на основі аналізу матриці Мюллера дозволяють отримувати додаткову діагностичну інформацію, однак їх точність безпосередньо залежить від коректності калібрування вимірювальної системи [5].

У волоконно-оптичних системах зв'язку поляризаційні ефекти, зокрема поляризаційна модова дисперсія, впливають на якість передачі сигналу. Для контролю та компенсації цих ефектів застосовуються поляриметричні методи, що потребують стабільних і відтворюваних вимірювань.

У метрології та оптичному приладобудуванні поляриметрія використовується для контролю параметрів оптичних елементів, покриттів і матеріалів [6]. У цих задачах особливо важливо забезпечити відтворюваність

результатів вимірювань і їх простежуваність, що досягається лише за умови якісного калібрування поляриметричних систем.

Отже, можна зробити висновок, що у всіх розглянутих галузях застосування поляриметрії ключовим фактором є точність і надійність вимірювань, що визначається якістю калібрування поляриметричних приладів. Це обумовлює необхідність формування еталонних поляризаційних станів із заданими параметрами, зокрема ступенем лінійної поляризації.

1.2. Параметри поляризації, що використовуються при калібруванні поляриметрів

Поляризаційний стан оптичного випромінювання визначається характером зміни вектора електричного поля [7]. У загальному випадку розрізняють неполяризоване, частково поляризоване та лінійно поляризоване світло (рис. 1.1) [1]. Неполіаризоване випромінювання характеризується випадковою орієнтацією вектора електричного поля, тоді як для лінійно поляризованого світла його напрямок є фіксованим. Частково поляризоване світло є комбінацією впорядкованої та випадкової складових.



Рисунок 1.1 – Типи поляризаційних станів випромінювання [8].

Кількісний опис поляризаційного стану оптичного випромінювання може бути виконаний за допомогою вектора Стокса [6]:

$$S = [S_1, S_2, S_3, S_4]^T \quad (1.1)$$

компоненти якого визначаються як: $S_1 = I_x + I_y = I_{45} + I_{-45} = I_r + I_l$, $S_2 = I_x - I_y$, $S_3 = I_{45} - I_{-45}$, $S_4 = I_r - I_l$ де I_x , I_y , I_{45} , I_{-45} , I_r , I_l – інтенсивності світла, що пройшло через лінійний поляризатор з орієнтацією вздовж осей x , y , під кутами

$+45^\circ$ та -45° до осі OX лабораторної системи координат, а також через право- та лівоциркулярний поляризатори відповідно.

Загальний ступінь поляризації випромінювання визначається як:

$$DoP = \frac{\sqrt{S_2^2 + S_3^2 + S_4^2}}{S_1} \quad (1.2)$$

У випадку частково лінійно поляризованого випромінювання основним параметром є ступінь лінійної поляризації $DoLP$ [7]:

$$DoLP = \frac{\sqrt{S_2^2 + S_3^2}}{S_1} \quad (1.3)$$

У задачах тестування та калібрування поляриметрів ключове значення мають кількісні параметри поляризації. Основним із них є ступінь лінійної поляризації (Degree of Linear Polarization, DOLP), який характеризує відносну частку лінійно поляризованої складової у загальному випромінюванні.

Ступінь лінійної поляризації змінюється від 0% (неполяризоване світло) до 100% (повністю поляризоване світло). У практичних задачах калібрування важливо забезпечити формування та відтворення заданих значень DOLP у всьому робочому діапазоні, особливо в області малих значень, де вимірювання є найбільш чутливими до похибок.

Інші параметри, такі як азимут поляризації (AoLP) та параметри вектора Стокса, також використовуються для опису поляризаційного стану [9]. Проте саме DOLP виступає основною керованою величиною у задачах калібрування поляриметрів, оскільки безпосередньо визначає точність вимірювання ступеня поляризації.

Як наслідок можна зробити висновок, що формування стабільних та відтворюваних значень DOLP у широкому діапазоні є ключовою вимогою до джерел поляризованого випромінювання, що використовуються при тестуванні поляриметричних приладів.

1.3. Методи формування заданих станів поляризації

Формування заданих станів поляризації є ключовою задачею при тестуванні та калібруванні поляриметрів, оскільки точність відтворення параметрів поляризації безпосередньо визначає достовірність результатів вимірювань.

Поляризатор – це оптичний елемент, призначений для формування випромінювання із заданим станом поляризації шляхом пропускання однієї компоненти електричного поля та пригнічення ортогональної [10]. За фізичним принципом дії поляризатори поділяються на дихроїчні (абсорбційні), двопроменезаломлюючі (призмові) та інтерференційні (тонкоплівкові) [10]. У практичних системах формування поляризованого випромінювання поляризатори виступають базовими елементами.

Дихроїчні поляризатори працюють на основі вибіркового поглинання однієї з ортогональних компонент поляризації та дозволяють формувати лінійно поляризоване випромінювання з високим ступенем поляризації [10]. Вони характеризуються простотою використання та низькою вартістю, однак не забезпечують плавного регулювання ступеня поляризації і формують переважно стани з високим значенням DOLP, що обмежує їх застосування у задачах калібрування.



Рисунок 1.2 – Дихроїчні кругові поляризатори «Meadowlark Optics» [11]

Поляризатори на основі двопроменезаломлення (призми Глана–Томпсона, Волластона) забезпечують високий ступінь поляризації та широкий спектральний діапазон роботи [12]. Разом з тим вони характеризуються обмеженою апертурою та високою вартістю, що ускладнює їх використання у системах тестування зображуючих поляриметрів, де необхідне формування широкого пучка.

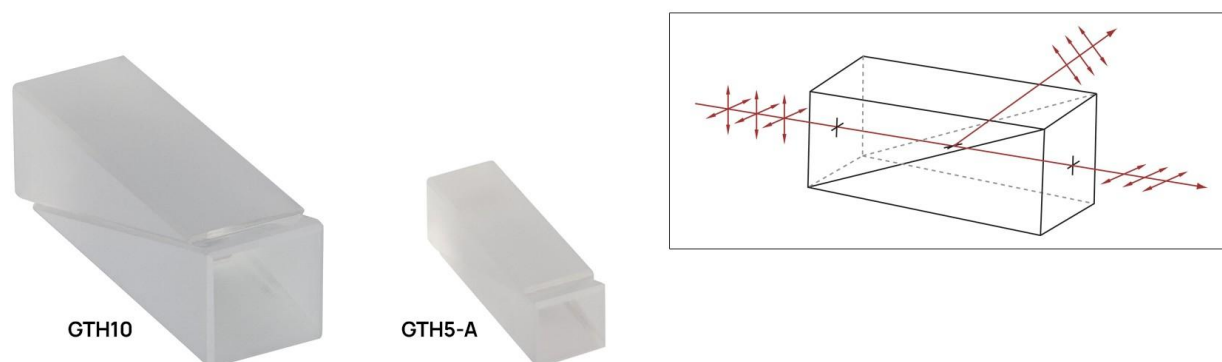


Рисунок 1.3 - Поляризатори Глана-Томпсона [12]

1.3.1. Поляризатори на основі відбиття (кут Брюстера)

Поляризатори на основі відбиття від діелектричних поверхонь використовують явище поляризації світла при відбитті на межі розділу двох середовищ [13]. При падінні світла під кутом Брюстера відбитий промінь стає лінійно поляризованим у площині, перпендикулярній до площини падіння, що зумовлено різною поведінкою ортогональних складових електричного поля при взаємодії з поверхнею.

Типовим прикладом реалізації такого підходу є вікна Брюстера, що використовуються для формування поляризованого випромінювання (рис. 1.4).

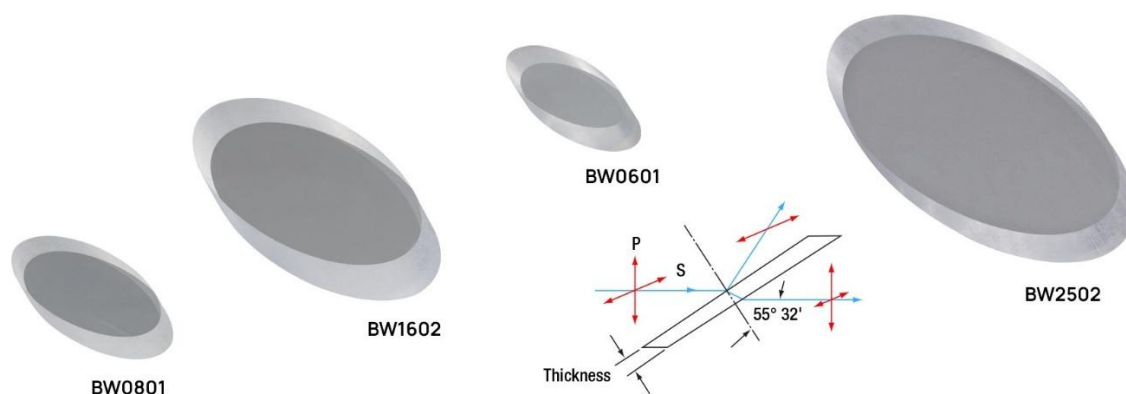


Рисунок 1.4 – Вікна Брюстера компанія «Thorlabs»[13]

Такі поляризатори відрізняються простотою реалізації та не потребують використання спеціальних поляризаційних матеріалів, що є їх перевагою. Водночас інтенсивність відбитого випромінювання при куті Брюстера є відносно малою, що обмежує ефективність формування поляризованого пучка. Крім того, поляризаційні характеристики суттєво залежать від кута падіння та показників заломлення середовищ, що ускладнює їх використання у задачах тестування та формування керованих значень DOLP.

1.3.2. Хвильові пластини

Комбінація лінійного поляризатора та хвильової пластини ($\lambda/2$ або $\lambda/4$) дозволяє формувати різні стани поляризації, включаючи еліптичні [14]. Півхвильова пласина забезпечує обертання площини поляризації, тоді як чвертьхвильова – перетворення лінійної поляризації у кругову або еліптичну залежно від орієнтації оптичної осі.

Принцип дії хвильових пластин показано на рис. 1.5: при проходженні через двоприменезаломлюючий кристал виникає фазовий зсув між ортогональними компонентами електричного поля, що призводить до зміни поляризаційного стану випромінювання.

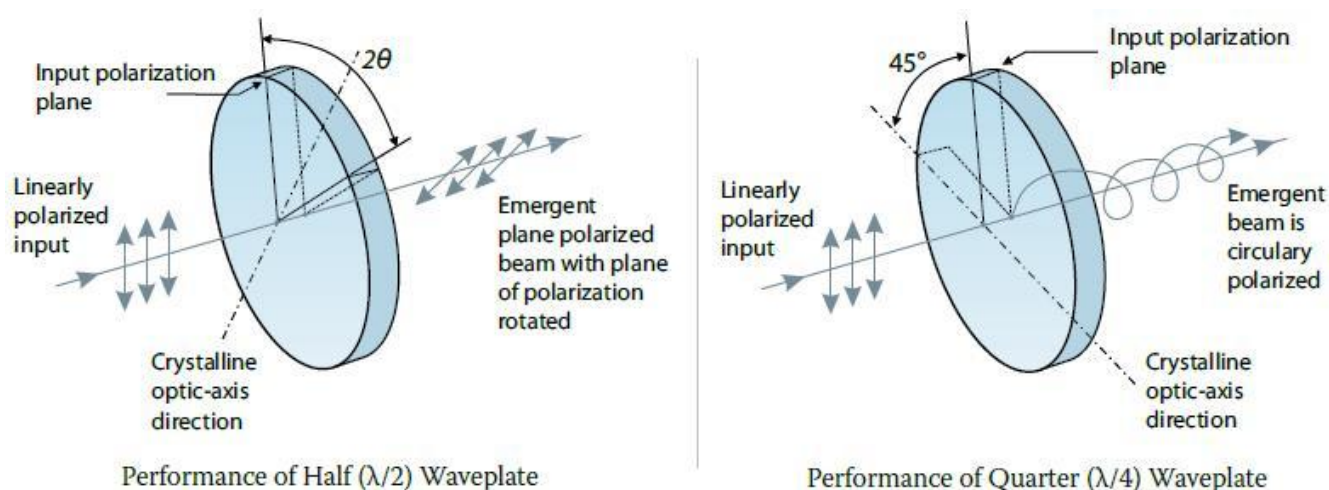


Рисунок 1.5 – Ефективність півхвильової та чвертьхвильової пластин [14]

Однак суттєвим недоліком таких елементів є залежність фазової затримки від довжини хвилі, що обмежує їх використання у широкопasmових системах формування поляризації [14].

1.3.3. Метод стопи похилих діелектричних пластин

Одним із ефективних методів формування частково поляризованого випромінювання є використання стопи похилих діелектричних пластин [15].

Метод базується на різниці коефіцієнтів відбиття та пропускання для ортогональних складових електричного поля при проходженні світла через межу розділу двох середовищ, що описується законами Френеля [7]. У результаті змінюється співвідношення інтенсивностей s- та p-компонент, що призводить до формування частково поляризованого випромінювання.

При проходженні випромінювання через декілька послідовно розташованих нахилених пластин цей ефект накопичується, що дозволяє отримувати задані значення ступеня лінійної поляризації. Принцип роботи методу наведено на рис. 1.6 [16].

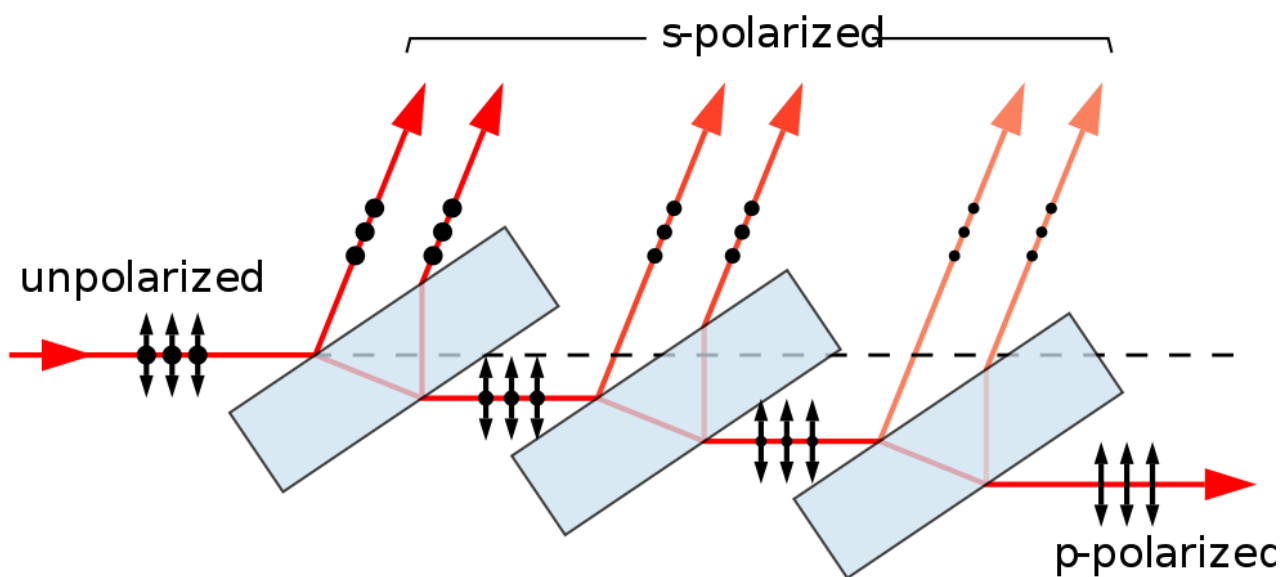


Рисунок 1.6 – Схема формування частково поляризованого випромінювання у стопі похилих діелектричних пластин [16]

Зміна кута нахилу пластин забезпечує плавне керування ступенем поляризації у широкому діапазоні, що є важливим для задач тестування та калібрування поляриметрів, особливо в області малих значень DOLP [15].

До переваг методу належать відносна широкосмуговість, можливість формування пучка великої апертури та простота реалізації, що робить його

придатним для автоматизації. Основними недоліками є обмежений максимальний ступінь поляризації та зменшення інтенсивності випромінювання внаслідок відбиттів на межах пластин.

Отже, за сукупністю характеристик метод стопи похилих діелектричних пластин є найбільш доцільним для побудови системи формування заданих значень ступеня лінійної поляризації у задачах тестування поляриметрів.

Порівняльний аналіз методів формування поляризованого випромінювання, наведений у табл. 1.1, показує, що існуючі підходи відрізняються як за діапазоном керування ступенем поляризації, так і за точністю та складністю реалізації.

Таблиця 1.1 – Порівняння методів формування поляризованого випромінювання

Метод	Керування DOLP	Спектральний діапазон	Типова точність DOLP	Вартість	Придатність до тестування
Полярійдна плівка	фіксоване ($\approx 100\%$)	400–700 нм	$< 1\%$	$< \$100$	обмежена
Призмкові поляризатори	фіксоване ($\approx 100\%$)	200–2300 нм	$< 0,5\%$	$> \$1000$	обмежена
PSG	0–100%	± 50 нм	0,3–1%	$> \$3000$	висока
Стопа пластин	0–45%	400–1000 нм	0,5–2%	$< \$500$	висока

Полярійдні та призмкові поляризатори забезпечують формування випромінювання з високим ступенем поляризації, однак не дозволяють здійснювати його плавне регулювання. Генератори поляризаційних станів забезпечують повний діапазон керування DOLP та високу точність, проте характеризуються вузьким спектральним діапазоном та високою вартістю.

Метод стопи похилих діелектричних пластин забезпечує формування випромінювання у діапазоні малих та середніх значень DOLP із можливістю

плавного регулювання. Крім того, він характеризується широкосмуговістю, низькою вартістю та придатністю до формування пучка великої апертури.

Отже, за сукупністю характеристик метод стопи похилих діелектричних пластин є найбільш доцільним для застосування у системах тестування та калібрування поляриметрів.

1.4. Типи поляриметрів та сфери їх застосування

Поляриметр – це оптико-електронний прилад, призначений для вимірювання параметрів поляризації оптичного випромінювання, зокрема вектора Стокса, ступеня поляризації, азимуту та еліптичності [6]. Конструкція поляриметра визначається конкретним застосуванням і вимогами до просторової роздільної здатності, спектрального діапазону та швидкості вимірювання.

З урахуванням різноманіття конструкцій поляриметрів, їх тестування та калібрування потребує формування еталонних поляризаційних станів із заданими параметрами. Основні типи поляриметрів та відповідні вимоги до умов їх тестування розглянуто далі.

1.4.1. Точкові (одноканальні) поляриметри

Точкові (одноканальні) поляриметри призначені для вимірювання параметрів поляризації оптичного випромінювання в одній просторовій точці або для інтегрального пучка. Визначення параметрів поляризації, як правило, здійснюється шляхом послідовних вимірювань інтенсивності при різних орієнтаціях поляризаційних елементів (поляризатора та хвильової пластини), що дозволяє відновити вектор Стокса [6].

Такі прилади характеризуються високою точністю вимірювання та широким динамічним діапазоном. Водночас їх недоліком є послідовний характер вимірювання, що обмежує швидкодію та робить результати чутливими до змін параметрів випромінювання у часі.

У задачах тестування та калібрування точкових поляриметрів основною вимогою є забезпечення високої точності відтворення ступеня лінійної поляризації

(DOLP). Оскільки вимірювання виконуються для інтегрального пучка, вимоги до просторової однорідності випромінювання є відносно невисокими.

Таким чином, для тестування точкових поляриметрів необхідне джерело, що забезпечує стабільне та відтворюване формування заданих значень DOLP із високою точністю.

1.4.2. Зображуючі поляриметри

Зображуючі поляриметри призначені для отримання двовимірного розподілу параметрів поляризації, при якому кожному пікселю зображення відповідає власний поляризаційний стан [2]. Такі системи дозволяють одночасно аналізувати просторову структуру об'єкта та його поляризаційні характеристики, що є важливим для задач дистанційного зондування, технічного зору та біомедичних досліджень.

Залежно від принципу побудови, зображуючі поляриметри можуть реалізовуватися за схемами одночасного або послідовного вимірювання. У системах типу Division of Focal Plane (DoFP) мікрополяризатори з різними орієнтаціями інтегруються безпосередньо на матриці сенсора, що дозволяє отримувати поляризаційну інформацію без механічного перемикавання елементів [17]. Послідовні зображуючі системи, навпаки, використовують змінний поляризаційний елемент перед камерою, що дає змогу підвищити точність, але обмежує швидкодію.

Основною перевагою зображуючих поляриметрів є можливість дослідження динамічних сцен та просторово неоднорідних об'єктів. Водночас такі системи є чутливими до нерівномірності освітлення, просторової неоднорідності поляризаційного стану та відмінностей чутливості окремих пікселів, що потребує спеціальних процедур калібрування [18]. Прикладом сучасної мультиспектральної зображуючої поляриметричної апаратури є imager-polarimeter космічного проєкту Aerosol-UA, призначений для поляриметричного дослідження аерозолів в атмосфері. Такі прилади висувають підвищені вимоги до точності формування та відтворюваності еталонних поляризаційних станів, оскільки похибки

калібрувального випромінювання безпосередньо впливають на достовірність визначення параметрів поляризації [19].

У задачах тестування та калібрування зображуючих поляриметрів ключовою вимогою є формування просторово однорідного поляризованого випромінювання з керованим значенням ступеня лінійної поляризації (DOLP) по всій апертурі. Недостатня однорідність призводить до появи систематичних похибок у різних ділянках зображення.

Отже, для тестування зображуючих поляриметрів необхідне джерело, що забезпечує формування широкого однорідного пучка з можливістю плавного керування параметрами поляризації.

1.4.3. Повнополяриметричні (мюллерівські) системи

Повнополяриметричні, або мюллерівські, системи призначені для визначення матриці Мюллера досліджуваного об'єкта. На відміну від стоксових поляриметрів, такі системи характеризують не лише стан випромінювання, а й зміну цього стану після взаємодії зі зразком. Це дозволяє аналізувати деполаризацію та фазові властивості оптичних середовищ [5]. У матричній формі зміну поляризаційного стану випромінювання при проходженні через оптичний елемент можна подати як:

$$S_{out} = MS_{in}, \quad (1.4)$$

де S_{in} та S_{out} – вектори Стокса вхідного та вихідного випромінювання відповідно, а M – матриця Мюллера, що описує зміну поляризаційного стану після взаємодії випромінювання з оптичним елементом або зразком.

Типова структура мюллерівської системи включає генератор поляризаційних станів (PSG), досліджуваний зразок та аналізатор поляризаційних станів (PSA). Приклад такої структури наведено на рис. 1.7. Для визначення елементів матриці Мюллера необхідно виконати серію вимірювань при різних комбінаціях станів PSG та PSA, тому точність результату значною мірою залежить від стабільності й відтворюваності сформованих поляризаційних станів.

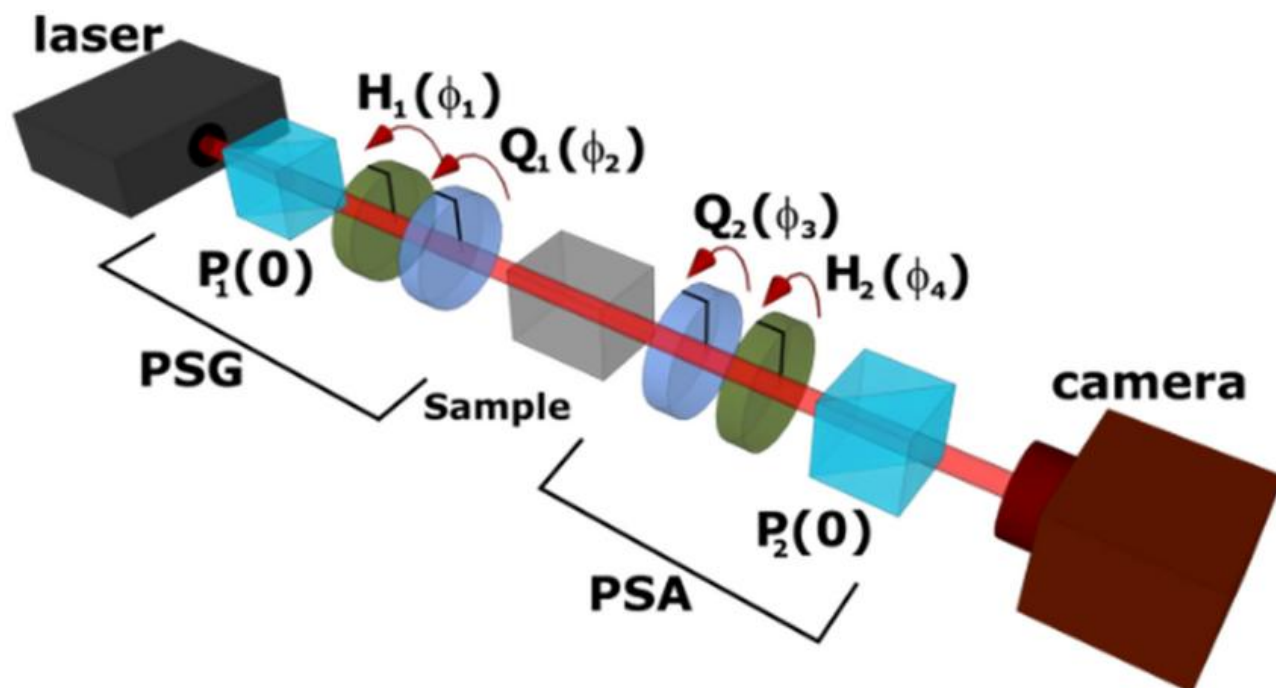


Рисунок 1.7 – Структурна схема повнополяриметричної системи з генератором (PSG) та аналізатором (PSA) поляризаційних станів [20]

Мюллерівські системи застосовуються в еліпсометрії тонких плівок, поляриметрії біологічних тканин та контролі оптичних покриттів. У задачах їх тестування ключовою вимогою є можливість формування набору контрольних поляризаційних станів із заданими параметрами та високою повторюваністю. Це підвищує вимоги до калібрувального джерела і підтверджує необхідність використання керованих систем формування поляризованого випромінювання.

Порівняльний аналіз основних типів поляриметрів, наведений у табл. 1.2, показує, що їх відмінності визначають не лише принцип вимірювання, а й вимоги до джерела еталонного поляризованого випромінювання. Для точкових приладів визначальною є точність відтворення заданого значення DOLP, тоді як для зображуючих систем додатково важливими є просторова однорідність і достатній діаметр робочого пучка.

Таблиця 1.2 – Вимоги різних типів поляриметрів до тестового джерела випромінювання

Тип поляриметра	Режим вимірювання	Точність вимірювання	Застосування
Точковий	послідовний	точне відтворення DOLP	лабораторні дослідження, волоконно-оптичні системи
DoFP зображуючий	одночасний	однорідне поле та керований DOLP	дистанційне зондування, технічний зір
DoAm зображуючий	одночасний	стабільність стану поляризації по каналах	наукові дослідження
Послідовний зображуючий	послідовний	однорідний пучок і повторюваність станів	мікроскопія, біомедичні системи
Мюллерівський	послідовний	набір відтворюваних контрольних станів	еліпсометрія, контроль покриттів

Точкові та послідовні поляриметри зазвичай забезпечують вищу точність за рахунок поетапного формування вимірювальної інформації, однак мають обмежену швидкодію. Зображуючі поляриметри, зокрема DoFP-системи, дозволяють отримувати поляризаційну інформацію одночасно для всього кадру, проте є чутливими до неоднорідності освітлення, нерівномірності чутливості пікселів та просторової неоднорідності поляризаційного стану.

Отже, для тестування різних типів поляриметрів необхідне джерело, яке забезпечує стабільне формування заданих значень DOLP, повторюваність

поляризаційних станів та, у випадку зображуючих систем, просторову однорідність випромінювання на достатньо великій апертурі. Саме ці вимоги надалі визначають доцільність використання методів, придатних до плавного керування DOLP та автоматизації процесу тестування.

1.5. Методи тестування та калібрування поляриметрів

Тестування та калібрування поляриметрів є необхідним етапом, що визначає достовірність подальших вимірювань поляризаційних параметрів [18]. Процедура калібрування полягає у встановленні зв'язку між вихідними сигналами приладу та реальними параметрами Стокса вхідного випромінювання. Для цього на вхід поляриметра подається серія еталонних поляризаційних станів із відомими параметрами, зокрема ступенем лінійної поляризації (DOLP) та азимутom поляризації (AoLP) [15].

У задачах тестування важливо не лише визначити інструментальну матрицю приладу, а й оцінити точність, повторюваність та стабільність вимірювання заданих поляризаційних станів. Тому ключовою вимогою до калібрувального джерела є здатність формувати відтворювані значення DOLP у заданому діапазоні.

1.5.1. Ручні лабораторні методи

Класичний лабораторний метод калібрування поляриметра передбачає використання набору еталонних поляризаційних елементів, зокрема лінійного поляризатора, хвильової пластини та обертових оправ. Оператор послідовно встановлює задані положення оптичних елементів і реєструє показання поляриметра. Для визначення інструментальної матриці необхідно виконати щонайменше чотири вимірювання з лінійно незалежними станами поляризації, однак на практиці часто використовують більшу кількість вимірювань із подальшою обробкою результатів методом найменших квадратів.

Ручне позиціонування оптичних елементів здійснюється за допомогою обертових оправ із типовою кутовою роздільною здатністю близько $1\text{--}2^\circ$. При цьому похибка встановлення кута може становити приблизно $\pm 0,5^\circ$, що безпосередньо впливає на точність формування еталонного поляризаційного стану.

Повна процедура калібрування точкового поляриметра зазвичай займає від 30 до 60 хвилин. Для зображуючих поляриметрів процес є складнішим, оскільки додатково необхідно забезпечити просторову однорідність еталонного поля по всій апертурі, тому тривалість калібрування може становити від 2 до 4 годин.

Основними перевагами ручних методів є простота реалізації та низька вартість обладнання. Водночас вони характеризуються значною трудомісткістю, залежністю від дій оператора, обмеженою повторюваністю та підвищеною чутливістю до похибок встановлення кутів. Ці недоліки особливо критичні при формуванні малих значень DOLP, де навіть незначна кутова похибка може призвести до помітного відхилення поляризаційного стану.

1.5.2. Використання еталонних джерел поляризованого випромінювання

Для підвищення достовірності тестування та калібрування поляриметрів застосовуються еталонні генератори поляризаційних станів (Polarization State Generators, PSG), які формують випромінювання з наперед заданими параметрами поляризації [15]. Використання таких джерел дозволяє підвищити точність визначення інструментальної матриці приладу, зменшити вплив оператора та забезпечити кращу відтворюваність результатів.

Одним із поширених підходів є використання фіксованого лінійного поляризатора у поєднанні з обертовим фазовим ретардером. Така схема дозволяє формувати широкий набір поляризаційних станів і застосовується у точних лабораторних системах. Основним обмеженням цього підходу є спектральна залежність параметрів ретардера, що ускладнює його використання у ширококутових системах.

Іншим варіантом є застосування рідкокристалічних ретардерів, які забезпечують зміну стану поляризації без механічного переміщення елементів [21].

Такі системи мають високу швидкодію та можуть керуватися програмно, однак характеризуються обмеженим спектральним діапазоном, температурною залежністю характеристик і потребою в періодичному калібруванні. У сучасних поляриметричних системах для підвищення достовірності калібрування також

застосовують мюллер-матричний підхід, який дозволяє враховувати зміну поляризаційного стану випромінювання оптичними компонентами та оцінювати вплив цих компонентів на результати вимірювання [22].

Перспективним для лабораторних систем тестування є підхід на основі стопи похилих діелектричних пластин із керованим кутом нахилу. Він забезпечує плавне регулювання ступеня лінійної поляризації, широкосмугову роботу та відносну простоту реалізації [15].

1.5.3. Порівняльний аналіз методів тестування

Для оцінки придатності розглянутих методів тестування та калібрування поляриметрів виконано їх порівняльний аналіз за основними критеріями: точність формування або відтворення DOLP, повторюваність, трудомісткість, тривалість процедури, вартість та спектральний діапазон роботи. Результати порівняння наведено в табл. 1.3. Для компактності подання у таблиці використано такі скорочення: PSG (Polarization State Generator) – генератор поляризаційних станів; RR-PSG (Rotating Retarder Polarization State Generator) – генератор поляризаційних станів на основі обертового ретардера; LC-PSG (Liquid Crystal Polarization State Generator) – генератор поляризаційних станів на основі рідкокристалічних ретардерів.

Таблиця 1.3 – Порівняльний аналіз методів тестування поляриметрів

Критерій	Ручний метод	RR-PSG	LC-PSG	Стопа пластин (ручна)	Стопа пластин (автомат.)
Точність DOLP	1–3%	0,3–0,5%	0,5–1%	1–2%	0,5–1%
Повторюваність	низька	висока	висока	середня	висока
Трудомісткість	висока	низька	низька	висока	низька
Час калібрування	30–60 хв	5–10 хв	3–5 хв	30–40 хв	5–10 хв
Вартість системи	низька	висока	середня / висока	низька	низька

Продовження таблиці 1.3

Спектральний діапазон	широкий	обмежений	обмежений	широкий	широкий
--------------------------	---------	-----------	-----------	---------	---------

Як видно з табл. 1.3, ручні методи мають перевагу у простоті реалізації та низькій вартості, однак характеризуються високою трудомісткістю, значною тривалістю процедури та недостатньою повторюваністю результатів. Це особливо суттєво при формуванні малих значень DOLP, де похибка встановлення кута оптичного елемента безпосередньо впливає на точність тестування.

Системи на основі генераторів поляризаційних станів із керованими елементами, зокрема RR-PSG та LC-PSG, забезпечують вищу точність і кращу повторюваність, проте їх застосування обмежується складністю реалізації, вартістю та, у випадку рідкокристалічних ретардерів, спектральною залежністю характеристик.

Метод стопи похилих діелектричних пластин забезпечує широкосмугову роботу та можливість плавного керування ступенем лінійної поляризації. У ручному виконанні цей підхід зберігає недоліки, пов'язані з людським фактором, однак автоматизація позиціювання пластин дозволяє підвищити повторюваність, скоротити час тестування та забезпечити відтворюване формування заданих значень DOLP.

Отже, автоматизована система на основі стопи похилих діелектричних пластин є доцільним компромісом між точністю, широкосмуговістю, вартістю та придатністю до лабораторного тестування поляриметрів. Саме цей підхід доцільно розглядати як основу для подальшого математичного моделювання та розробки автоматизованої системи керування.

1.6. Огляд існуючих систем тестування та калібрування поляриметрів

Для визначення актуального технічного рівня та обґрунтування необхідності нових розробок проведено огляд існуючих комерційних і лабораторних систем, що використовуються для тестування та калібрування поляриметричної апаратури.

1.6.1. Комерційні системи

Thorlabs PAX1000 Series – серія стоксових поляриметрів, що працюють за принципом обертового хвильового елемента [23]. Прилади призначені для вимірювання параметрів стану поляризації та можуть використовуватись для порівняльної верифікації інших поляриметричних систем. Залежно від модифікації, серія охоплює спектральний діапазон від 400 до 1700 нм, зокрема модель PAX1000VIS працює у діапазоні 400–700 нм. Точність визначення азимуту та еліптичності становить близько $\pm 0,25^\circ$. Вартість системи становить близько 5 000–6 000 USD. Основним обмеженням є те, що прилад є точковим аналізатором і не забезпечує формування еталонного поляризованого поля для калібрування зображуючих поляриметрів у всьому полі зору [23].



Рисунок 1.8 – Thorlabs PAX1000 Series [23]

Meadowlark Optics LPR-100 – рідкокристалічний поляризаційний ротатор, який може використовуватись як елемент системи формування поляризаційних станів [24]. Пристрій забезпечує керовану зміну орієнтації лінійної поляризації монохроматичного вхідного випромінювання. Його перевагами є електронне керування та відсутність механічного обертання оптичних елементів. Водночас робота таких елементів є спектрально залежною, а характеристики рідкокристалічного ретардера можуть змінюватися під впливом температури. Вартість систем такого класу становить близько 3 000 USD [24].



Рисунок 1.9 – Meadowlark Optics LPR-100 [24]

Hinds Instruments PEM-100 – фотоеластичний модулятор, що забезпечує високочастотну модуляцію поляризації за допомогою п'єзокерамічного елемента. Частота модуляції становить десятки кілогерц, типово близько 50 кГц, що дозволяє реалізувати високочутливі поляриметричні вимірювання [25]. Спектральний діапазон роботи таких систем охоплює приблизно 200–2500 нм. До основних обмежень належать складність інтеграції, необхідність використання синхронного детектування та висока вартість, яка зазвичай перевищує 10 000 USD [25].



Рисунок 1.10 – Hinds Instruments PEM-100 [25]

Аналіз схемних побудов пристроїв для калібрування поляриметричних приладів показує, що такі системи відрізняються принципом формування контрольних поляризаційних станів, способом керування оптичними елементами, рівнем автоматизації та придатністю до застосування для точкових або зображуючих поляриметрів [26]. Тому для порівняння існуючих рішень та обґрунтування вибору підходу до розробки системи тестування поляриметрів доцільно провести їх аналіз за основними технічними характеристиками. Результати порівняння наведено в табл. 1.4.

Таблиця 1.4 – Порівняння комерційних систем та запропонованого підходу

Система	Принцип	Функція	Спектр, нм	Діаметр пучка	Вартість
Thorlabs PAX1000	обертовий ретардер	аналізатор	400–1100	~3–5 мм	~5 000 USD
Meadowlark LPR	рідкі кристали	генератор	вузький (десятки нм)	~5 мм	~3 000 USD
Hinds PEM-100	фотоеластичний	модулятор	200–2500	~10 мм	>10 000 USD
Запропонований підхід	стопа пластин	генератор	широкий	до ~25 мм	низька

Як видно з табл. 1.4, комерційні системи забезпечують високу точність вимірювання або керування поляризаційними станами, однак характеризуються значною вартістю, функціональною спеціалізацією та обмеженим діаметром робочого пучка. Це ускладнює їх застосування для тестування зображуючих поляриметрів, де необхідне формування однорідного поляризаційного поля великої апертури.

Крім того, розглянуті системи відрізняються за функціональним призначенням: PAX1000 є аналізатором, LPR – рідкокристалічним елементом

керування поляризацією, а PEM-100 – модулятором. Тому для побудови повноцінної системи формування еталонних поляризаційних станів часто потрібні додаткові оптичні та електронні компоненти.

Запропонований підхід на основі стопи похилих діелектричних пластин дозволяє забезпечити формування частково поляризованого випромінювання з керуванням DOLP, більшим діаметром пучка та широким спектральним діапазоном при відносно простій реалізації. Отже, існує незаповнена ніша доступної автоматизованої системи формування частково поляризованого випромінювання на основі стопи пластин для задач тестування поляриметрів.

1.6.2. Огляд та аналіз об'єктів інтелектуальної власності методів та засобів формування та калібрування поляризації

Для оцінки актуального технічного рівня та виявлення близьких аналогів було проведено патентний пошук у базах даних Google Patents та Espacenet. Аналіз охоплював технічні рішення, пов'язані з калібруванням поляриметрів, формуванням еталонних поляризаційних станів та побудовою генераторів поляризованого випромінювання. Основну увагу приділено рішенням у класах Міжнародної патентної класифікації G01J, що охоплює вимірювання характеристик оптичного випромінювання, та G02B, що стосується оптичних елементів і систем.

У напрямку калібрування поляриметрів важливим технічним рішенням є патент US 7034939 B2 «Calibration system and method for calibration of various types of polarimeters» [27]. У ньому описано систему калібрування, інтегровану з поляриметром, яка використовує зразки випромінювання для визначення відносної чутливості каналів приладу. Перевагою такого підходу є комплексність калібрування та орієнтація на різні типи поляриметрів. Водночас рішення є апаратно складним і не спрямоване на створення простого джерела керованого частково поляризованого випромінювання для лабораторного тестування.

Інший підхід представлено у патенті US 6917427 B2 «Highly accurate calibration of polarimeters» [28]. Це рішення орієнтоване на підвищення метрологічної точності калібрування поляриметрів і зменшення похибок

вимірювання параметрів поляризації. Його перевагою є висока точність калібрувальної процедури, однак воно не вирішує задачу побудови доступної автоматизованої системи формування контрольованих значень DOLP для тестування поляриметрів.

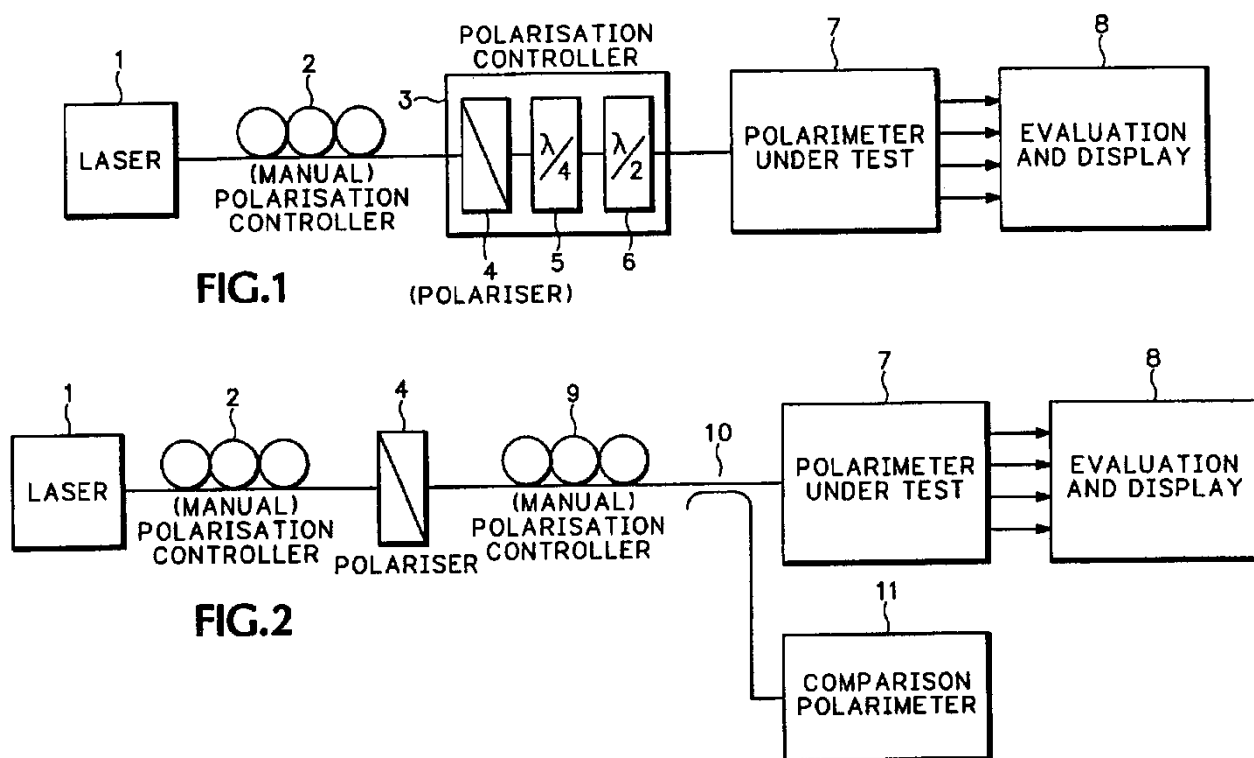


Рисунок 1.11 – Схеми калібрування поляриметрів згідно з патентом US 6917427 B2 «Highly accurate calibration of polarimeters» [28]

Найбільш близьким за функціональним призначенням є патент US 9625369 B2 «Polychromatic polarization state generator and its application for real-time birefringence imaging» [29]. У ньому запропоновано поліхроматичний генератор поляризаційних станів, що забезпечує формування поляризованого випромінювання з параметрами, залежними від довжини хвилі, і може застосовуватись у системах візуалізації двопроменезаломлення в реальному часі. Перевагою такого рішення є широкосмуговість та можливість генерації поляризаційних станів, однак його реалізація потребує використання

спеціалізованих оптичних компонентів, що ускладнює конструкцію та підвищує вартість.

Результати порівняльного аналізу розглянутих об'єктів інтелектуальної власності представлено в таблиці 1.5.

Таблиця 1.5 – Характеристика патентних аналогів

№ патенту	Суть технічного рішення	Переваги	Обмеження щодо задачі дослідження
US 7034939	Система калібрування різних типів поляриметрів	Комплексний підхід, калібрування каналів приладу	Апаратна складність, відсутність акценту на простому джерелі керованого DOLP
US 6917427	Високоточне калібрування поляриметрів	Висока метрологічна точність	Не вирішує задачу доступного формування контрольованих значень DOLP
US 9625369	Поліхроматичний генератор станів (PSG)	Широкоугловість, формування поляризаційних станів	Складність реалізації, використання спеціалізованих оптичних елементів

Проведений патентний аналіз показує, що існуючі технічні рішення переважно орієнтовані або на високоточне калібрування поляриметрів із використанням складних апаратних схем, або на спеціалізовану генерацію поляризаційних станів. Водночас недостатньо представленими залишаються доступні автоматизовані системи формування частково поляризованого випромінювання з керованим значенням DOLP, придатні для лабораторного тестування поляриметрів. Це підтверджує доцільність подальшого розгляду підходу на основі стопи похилих діелектричних пластин.

1.7. Аналіз недоліків ручного тестування та необхідність автоматизації

Проведений аналіз методів тестування та калібрування поляриметрів показує, що ручні підходи залишаються простими у реалізації, однак мають низку обмежень, які суттєво впливають на точність, повторюваність і продуктивність вимірювань. Це особливо важливо для задач формування заданих значень ступеня лінійної поляризації (DOLP), де похибка встановлення положення оптичних елементів безпосередньо впливає на результат тестування.

Вплив людського фактору. Ручне встановлення кута повороту оптичних елементів, зокрема поляризаторів, хвильових пластин або похилих діелектричних пластин, супроводжується похибками зчитування шкали та фіксації положення. Для типових ручних обертових оправ ці похибки можуть знаходитись у межах приблизно $\pm 0,5^\circ$ – 2° залежно від конструкції та ціни поділки шкали [30]. Додатково на результат впливають мікрозміщення, люфти та вібрації, що виникають під час взаємодії оператора з механічними елементами.

Низька повторюваність. При повторному проведенні тестування результати можуть відрізнятися через різницю у способі встановлення та фіксації оптичних елементів, різний тиск фіксуючих механізмів і суб'єктивність зчитування шкали. Для зображуючих поляриметрів ця проблема є особливо суттєвою, оскільки додатково необхідно забезпечити однакові умови освітлення та просторову однорідність поляризаційного поля по всій апертурі.

Відсутність цифрової інтеграції. У ручному режимі результати вимірювань часто фіксуються оператором із подальшим перенесенням у програмне середовище для обробки. Такий підхід збільшує ризик помилок введення даних, ускладнює автоматичне протоколювання та знижує відтворюваність процедури тестування. Для сучасних поляриметричних систем, де важливо контролювати не лише окреме значення DOLP, а й послідовність тестових станів, це є суттєвим обмеженням.

Складність формування малих значень DOLP. Для тестування поляриметрів у діапазоні малих значень ступеня поляризації необхідне точне керування параметрами оптичної системи. У випадку методу стопи похилих діелектричних пластин керованою величиною є кут нахилу пластин, від якого залежить

сформоване значення DOLP. Для малих значень DOLP потрібна кутова точність на рівні приблизно $0,1^{\circ}$ – $0,5^{\circ}$, тоді як ручне налаштування забезпечує таку точність недостатньо стабільно.

Висока трудомісткість. Повний цикл ручного тестування або калібрування може тривати від десятків хвилин до кількох годин залежно від типу поляриметра та кількості контрольних станів. Для зображуючих поляриметрів процедура є складнішою, оскільки потрібно контролювати не лише параметри поляризації, а й однорідність поля в межах робочої апертури.

Отже, ручні методи тестування мають обмеження, пов'язані з людським фактором, недостатньою повторюваністю, складністю формування малих значень DOLP та високою трудомісткістю. Це обґрунтовує необхідність переходу до автоматизованої системи формування частково поляризованого випромінювання, у якій значення DOLP задається шляхом керованого позиціювання оптичних елементів.

Висновки до розділу та постановка задач досліджень

У першому розділі розглянуто роль поляриметричних вимірювань у сучасних наукових та інженерних застосуваннях і показано, що достовірність результатів таких вимірювань безпосередньо залежить від якості тестування та калібрування поляриметричних приладів. Для цього необхідно формувати еталонні поляризаційні стани з наперед заданими параметрами, серед яких одним із ключових є ступінь лінійної поляризації DOLP.

Проаналізовано основні параметри поляризації, що використовуються при тестуванні поляриметрів, та встановлено, що саме DOLP є важливою керованою величиною для оцінювання точності поляриметричних систем. Забезпечення стабільного, повторюваного та плавно керованого значення DOLP є необхідною умовою для якісного тестування як точкових, так і зображуючих поляриметрів.

Розглянуто основні методи формування поляризованого випромінювання. Встановлено, що поляроїдні та призмові поляризатори ефективно формують випромінювання з високим ступенем поляризації, однак не забезпечують зручного плавного регулювання DOLP. Генератори поляризаційних станів на основі

хвильових пластин, рідкокристалічних або фотоеластичних елементів мають ширші функціональні можливості, проте характеризуються складністю реалізації, спектральними обмеженнями та високою вартістю.

Показано, що метод стопи похилих діелектричних пластин є перспективним для формування частково поляризованого випромінювання, оскільки забезпечує плавне керування ступенем лінійної поляризації, широкосмугову роботу, можливість формування пучка великої апертури та відносну простоту реалізації. За сукупністю цих характеристик даний метод є найбільш доцільним для подальшого математичного моделювання та автоматизації.

Аналіз типів поляриметрів показав, що різні прилади висувають різні вимоги до тестового джерела випромінювання. Для точкових поляриметрів визначальною є точність відтворення заданого значення DOLP, для зображуючих – додатково необхідна просторова однорідність поляризованого випромінювання в межах робочої апертури, а для мюллерівських систем важливо забезпечити відтворюваний набір контрольних поляризаційних станів.

Огляд існуючих комерційних і патентних рішень показав, що сучасні системи тестування та калібрування поляриметрів або мають високу вартість і складну конструкцію, або не забезпечують формування широкого однорідного пучка з керованим значенням DOLP. Це свідчить про наявність незаповненої ніші доступної автоматизованої системи формування частково поляризованого випромінювання на основі стопи похилих діелектричних пластин.

Окремо встановлено, що ручні методи тестування мають суттєві недоліки: вплив людського фактору, похибки встановлення кутового положення оптичних елементів, низьку повторюваність, відсутність цифрової інтеграції та високу трудомісткість. Особливо критичним це є при формуванні малих значень DOLP, де необхідна висока точність керування кутом нахилу пластин. Отже, виникає необхідність розробки автоматизованої системи керування, здатної забезпечити точне та відтворюване формування заданого ступеня лінійної поляризації.

На основі проведеного аналізу в роботі поставлено такі задачі дослідження:

1. Визначити керовану величину, керуючий вплив, критерій якості та основні параметри процесу формування ступеня лінійної поляризації.
2. Виконати системний аналіз оптичного блока як об'єкта автоматизованого керування та визначити його входні, вихідні й збурювальні параметри.
3. Розробити математичну та комп'ютерну модель оптичного блока для дослідження залежності DOLP від кута нахилу пластин, довжини хвилі випромінювання та конфігурації системи.
4. Сформувати калібрувальну та обернену калібрувальну залежності для визначення положення оптичного блока за заданим значенням DOLP.
5. Розробити структуру, математичне, інформаційне, алгоритмічне та програмне забезпечення автоматизованої системи керування параметрами поляризації штучного джерела випромінювання.
6. Провести комп'ютерну апробацію роботи автоматизованої системи керування та оцінити точність досягнення заданих значень DOLP.

Отже, подальші розділи роботи спрямовані на дослідження оптичного блока як об'єкта автоматизованого керування, формування калібрувальних залежностей для переходу від заданого значення DOLP до кута встановлення пластин, а також розроблення структури, алгоритмів і програмного забезпечення АСК для формування заданих параметрів поляризації.

РОЗДІЛ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ ТА РОЗРОБЛЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ФОРМУВАННЯ СТУПЕНЯ ЛІНІЙНОЇ ПОЛЯРИЗАЦІЇ

2.1. Вибір критерію якості та параметрів керування процесом формування DOLP

Для розроблення автоматизованої системи керування параметрами поляризації необхідно попередньо визначити об'єкт керування, керовану величину, керуючий параметр, основні параметри об'єкта та критерій якості процесу формування поляризаційного стану [31]. Такий підхід дозволяє розглядати оптичний блок не лише як сукупність оптичних елементів, а як об'єкт автоматизованого керування, для якого необхідно встановити залежність між керуючим впливом та вихідною величиною.

У даній роботі об'єктом керування є стопа похилих діелектричних пластин, призначена для формування частково лінійно поляризованого випромінювання. Керованою величиною є ступінь лінійної поляризації випромінювання *DOLP*, який характеризує частку лінійно поляризованої складової у сформованому випромінюванні та використовується при тестуванні й калібруванні поляриметричних приладів.

При проходженні випромінювання через похилі діелектричні поверхні коефіцієнти пропускання для двох взаємно ортогональних складових поляризації відрізняються. Така відмінність пов'язана з різними умовами відбиття та пропускання *p*- і *s*-компонент на межі поділу середовищ, що описується рівняннями Френеля [32]. У результаті змінюється співвідношення ортогональних компонент випромінювання, що приводить до формування частково лінійно поляризованого світла.

Для розглянутого випадку ступінь лінійної поляризації можна визначити через коефіцієнти пропускання *p*- та *s*-компонент у відсотках [32]:

$$DOLP = \frac{|T_p - T_s|}{T_p + T_s} \cdot 100\%, \quad (2.1)$$

де T_p – коефіцієнт пропускання для p -компоненти; T_s – коефіцієнт пропускання для s -компоненти. Використання модуля у чисельнику забезпечує невід’ємність значення $DOLP$, оскільки ступінь поляризації є додатною величиною.

Коефіцієнти T_p та T_s залежать від кута падіння випромінювання на пластини, показника заломлення матеріалу, довжини хвилі та кількості оптичних поверхонь. Тому процес формування ступеня лінійної поляризації у загальному вигляді можна подати функціональною залежністю:

$$DOLP = f(\theta, \lambda, N), \quad (2.2)$$

де θ – кут нахилу діелектричних пластин; λ – довжина хвилі випромінювання; N – кількість пар діелектричних пластин.

Керуючим параметром у даній системі є кут нахилу пластин θ . Саме зміна цього кута дозволяє змінювати співвідношення коефіцієнтів пропускання T_p та T_s , а отже – керувати значенням $DOLP$ на виході оптичного блока. Таким чином, кут θ виступає керуючим впливом, а $DOLP_{out}$ – вихідною керованою величиною.

Узагальнене подання процесу формування $DOLP$ як об’єкта керування наведено на рис. 2.1.

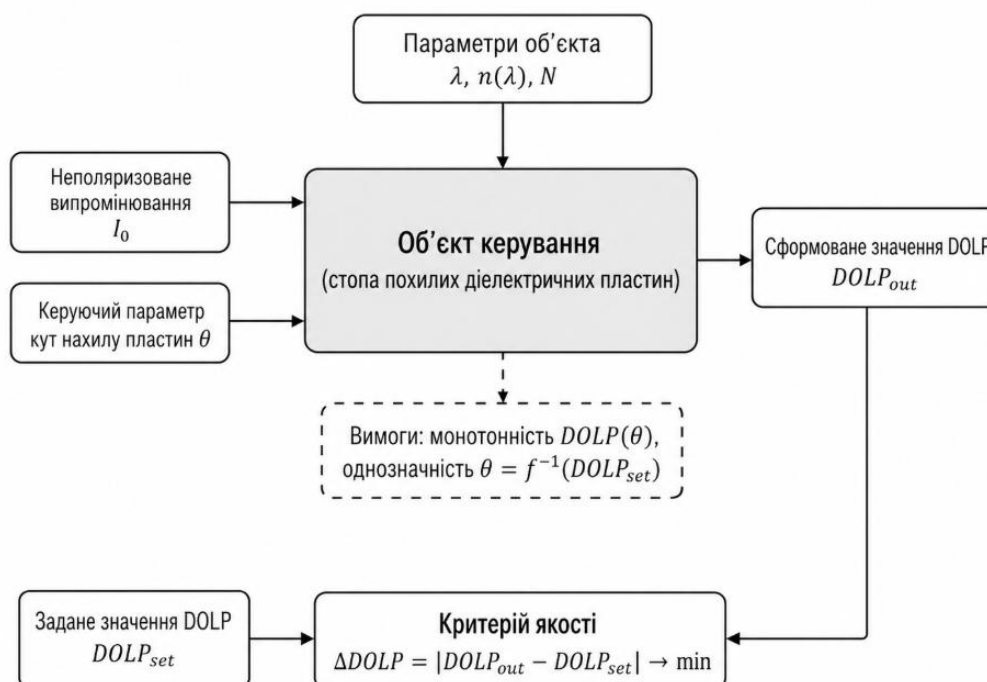


Рисунок 2.1 – Узагальнене подання процесу формування $DOLP$ як об’єкта керування

Критерієм якості формування поляризаційного стану є мінімізація абсолютної похибки між заданим і сформованим значенням ступеня лінійної поляризації:

$$\Delta DOLP = |DOLP_{out} - DOLP_{set}| \rightarrow \min, \quad (2.3)$$

де $DOLP_{set}$ – задане значення ступеня лінійної поляризації; $DOLP_{out}$ – сформоване значення ступеня лінійної поляризації на виході оптичного блока.

Для реалізації автоматизованого керування важливо, щоб залежність $DOLP(\theta)$ у робочому діапазоні була монотонною. Це забезпечує можливість однозначного визначення необхідного кута нахилу пластин за заданим значенням $DOLP_{set}$:

$$\theta = f^{-1}(DOLP_{set}) \quad (2.4)$$

Обернена залежність використовується для формування керуючого впливу в автоматизованій системі. Надалі отримане значення кута може бути перетворене у відповідну кількість кроків виконавчого механізму, що забезпечує автоматизоване встановлення заданого поляризаційного стану.

Основні параметри процесу формування $DOLP$ як об'єкта керування наведено в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Параметри процесу формування $DOLP$ як об'єкта керування

Група параметрів	Позначення	Зміст	Роль у системі керування
Керуючий параметр	θ	кут нахилу пластин	керуючий вплив
Вихідна величина	$DOLP_{out}$	сформоване значення ступеня лінійної поляризації	керована величина
Задане значення	$DOLP_{set}$	необхідне значення ступеня лінійної поляризації	вхід для оцінки якості

Продовження таблиці 2.1

Конструктивний параметр	N	кількість пар діелектричних пластин	параметр конфігурації
Спектральний параметр	λ	довжина хвилі випромінювання	режимний параметр
Параметр матеріалу	$n(\lambda)$	показник заломлення пластин	параметр оптичної моделі
Коефіцієнти пропускання	T_p, T_s	пропускання для ортогональних компонент поляризації	визначають значення $DOLP$
Критерій якості	$\Delta DOLP$	похибка між заданим і сформованим значеннями	показник точності формування

Таким чином, подальше математичне та комп'ютерне моделювання має бути спрямоване на отримання кількісної залежності $DOLP = f(\theta, \lambda, N)$, визначення її робочого діапазону, монотонності, чутливості до зміни кута та придатності для формування керуючого впливу в автоматизованій системі керування.

2.2. Системний аналіз оптичного блока як об'єкта автоматизованого керування

Оптичний блок автоматизованої системи призначений для формування частково лінійно поляризованого випромінювання із заданим значенням ступеня лінійної поляризації. У межах даної роботи він розглядається як об'єкт автоматизованого керування, у якому зміна кута нахилу діелектричних пластин приводить до зміни сформованого значення $DOLP_{out}$.

Структурно оптичний блок містить джерело деполаризованого випромінювання, оптичну систему формування пучка, стопу похилих плоскопаралельних діелектричних пластин та поляризаційний прилад, який

використовується для оцінювання сформованого стану поляризації. Узагальнену структуру оптичного блока розглянуто в роботі [33] та наведено на рис. 2.2.

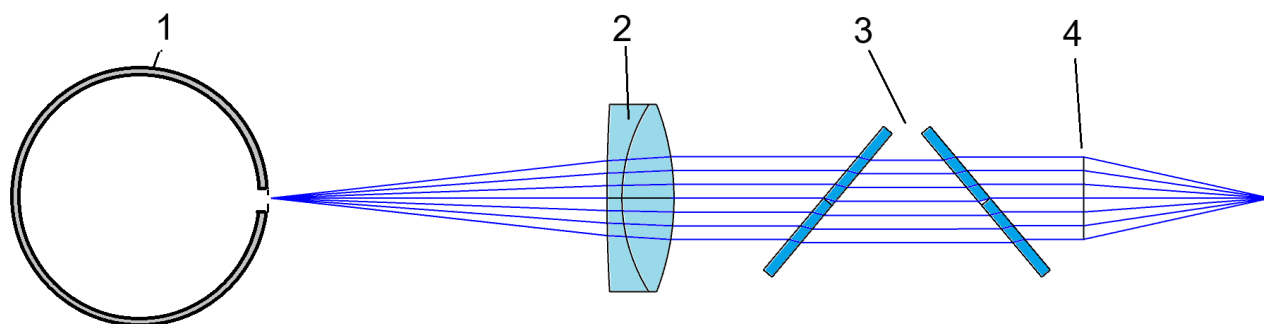


Рисунок 2.2 – Структура оптичного блока формування частково поляризованого випромінювання [33]

де: 1 – джерело деполаризованого випромінювання; 2 – оптична система формування пучка; 3 – стопа похилих плоскопаралельних діелектричних пластин; 4 – поляризаційний прилад.

Джерело деполаризованого випромінювання формує світловий потік, що надходить на оптичну систему. Оптична система забезпечує необхідну геометрію пучка та його спрямування на стопу пластин. Основну роль у формуванні частково поляризованого випромінювання виконує саме стопа похилих пластин, оскільки при проходженні світла через діелектричні поверхні під кутом виникає різниця у пропусканні ортогональних компонент поляризації.

З позиції автоматизованого керування основним керуючим параметром є кут нахилу пластин θ , а вихідною керованою величиною – $DOLP_{out}$. На роботу об'єкта також впливають кількість пар пластин N , довжина хвилі випромінювання λ , показник заломлення матеріалу $n(\lambda)$, а також монтажні та позиційні похибки.

Особливістю такого об'єкта керування є його нелінійність: однакова зміна кута нахилу пластин у різних ділянках робочого діапазону може спричиняти різну зміну $DOLP$. Крім того, збільшення кута нахилу супроводжується не лише зміною ступеня поляризації, а й зміною сумарного пропускання оптичної системи. Тому для подальшої розробки АСК необхідно визначити робочий діапазон кутів, оцінити

чутливість $DOLP$ до зміни θ та встановити вимоги до точності позиціювання пластин.

Отже, системний аналіз показує, що оптичний блок є нелінійним багатопараметричним об'єктом керування. Для його використання в автоматизованій системі необхідно побудувати математичну модель, яка дозволить кількісно пов'язати кут нахилу пластин із сформованим значенням ступеня лінійної поляризації.

2.3. Побудова калібрувальної залежності об'єкта керування

Для використання оптичного блока в автоматизованій системі керування необхідно встановити кількісний зв'язок між керуючим параметром і вихідною керованою величиною. У даній роботі керуючим параметром є кут нахилу діелектричних пластин θ , а вихідною величиною – сформоване значення ступеня лінійної поляризації $DOLP_{out}$.

Фізично зміна $DOLP$ зумовлена різною поведінкою p - та s -компонент випромінювання при проходженні через похилі діелектричні поверхні. Такий ефект описується законами відбиття та пропускання на межі поділу середовищ і є основою роботи поляризаційних елементів на базі похилих пластин [32].

Для однієї похилої плоскопаралельної діелектричної пластини ступінь лінійної поляризації визначається різницею проходження та відбиття s - і p -компонент випромінювання. При врахуванні багаторазових внутрішніх відбиттів $DOLP$ суперпозиції променів на виході зі скла можна подати у вигляді [32]:

$$DOLP = \frac{T_s^2 \left(\frac{1}{1 - R_s^2} \right) - T_p^2 \left(\frac{1}{1 - R_p^2} \right)}{T_s^2 \left(\frac{1}{1 - R_s^2} \right) + T_p^2 \left(\frac{1}{1 - R_p^2} \right)}, \quad (2.5)$$

де T_s та T_p – коефіцієнти проходження Френеля для s - та p -поляризованого світла, а R_s та R_p – коефіцієнти відбиття Френеля для s - та p -поляризованого світла.

З виразу (2.1) видно, що $DOLP$ залежить від співвідношення проходження й відбиття ортогональних компонент, кута падіння та оптичних властивостей матеріалу пластини.

У межах даної роботи оптичний блок розглядається не як окремий оптичний елемент, а як об'єкт автоматизованого керування. Тому основною задачею є не лише опис фізичного процесу, а отримання калібрувальної залежності, придатної для формування керуючого впливу. У загальному вигляді цю залежність можна подати як:

$$DOLP_{out} = DOLP(\theta, \lambda, N), \quad (2.6)$$

де θ – кут нахилу пластин; λ – довжина хвилі випромінювання; N – кількість пар діелектричних пластин.

Для задач автоматизованого керування важливою є також обернена залежність:

$$\theta_{set} = \theta(DOLP_{set}), \quad (2.7)$$

яка дозволяє за заданим значенням $DOLP_{set}$ визначити необхідний кут нахилу пластин. Саме ця залежність надалі використовується для формування команди виконавчому механізму системи керування.

Залежність $DOLP(\theta)$ має нелінійний характер, оскільки зміна кута нахилу пластин по-різному впливає на співвідношення ортогональних компонент поляризації в різних ділянках робочого діапазону. Тому для практичного використання в АСК доцільно сформувати калібрувальну характеристику на основі комп'ютерного моделювання оптичного блока. Така характеристика повинна забезпечувати однозначне визначення кута θ_{set} для заданого значення $DOLP_{set}$ у межах робочого діапазону.

Отже, у межах даного підрозділу математичне подання об'єкта керування зводиться до встановлення прямої залежності $DOLP_{out} = DOLP(\theta, \lambda, N)$ та оберненої калібрувальної залежності $\theta_{set} = \theta(DOLP_{set})$. Подальше числове визначення цих залежностей виконується шляхом комп'ютерного моделювання в ANSYS Zemax OpticStudio.

2.4. Комп'ютерна реалізація калібрувальної моделі в ANSYS Zemax OpticStudio

Комп'ютерне моделювання використовується як інструмент дослідження поведінки складних технічних систем і дозволяє проводити обчислювальний експеримент без безпосередньої зміни фізичного об'єкта [34]. Для отримання числової калібрувальної залежності між кутом нахилу діелектричних пластин та сформованим значенням $DOLP$ було виконано комп'ютерне моделювання оптичного блока в середовищі ANSYS Zemax OpticStudio [35]. Використання такого програмного середовища дозволяє враховувати геометрію оптичної системи, параметри матеріалу, проходження променів через похилі діелектричні поверхні та зміну поляризаційного стану випромінювання [36].

Під час моделювання оптичний блок розглядався як послідовність елементів: джерело деполаризованого випромінювання, оптична система формування пучка та стопа похилих плоскопаралельних діелектричних пластин. Основним змінним параметром був кут нахилу пластин θ , зміна якого приводить до зміни співвідношення пропускання ортогональних складових поляризації та, відповідно, до зміни $DOLP_{out}$.

Для аналізу впливу кількості оптичних елементів було побудовано три конфігурації оптичного блока: з однією, двома та трьома парами похилих пластин. Такий підхід дає змогу порівняти робочий діапазон формування $DOLP$, оцінити вплив кількості пар пластин на чутливість системи до кута нахилу та обрати конфігурацію, найбільш придатну для подальшої автоматизації.

Конфігурації оптичного блока, використані для комп'ютерного моделювання, наведено на рис. 2.3.

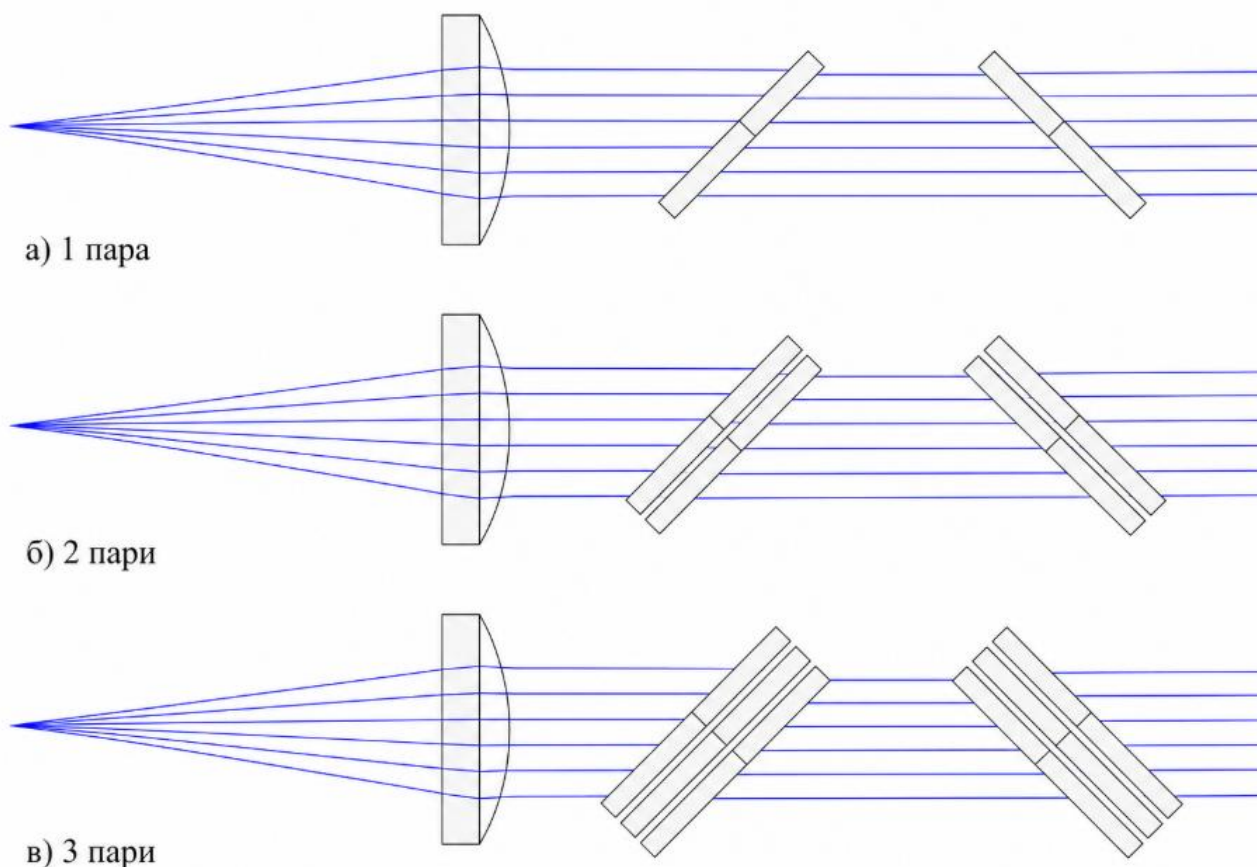


Рисунок 2.3 – Конфігурації оптичного блока з різною кількістю пар пластин: а) 1 пара; б) 2 пари; в) 3 пари

У першій конфігурації використано одну пару похилих пластин, що забезпечує мінімальну складність оптичної системи, але має обмежений діапазон зміни $DOLP$. Друга конфігурація містить дві пари пластин і розглядається як проміжний варіант між діапазоном формування поляризації та складністю системи. Третя конфігурація з трьома парами пластин забезпечує більший діапазон зміни $DOLP$, однак може супроводжуватися збільшенням втрат випромінювання та вищою чутливістю до похибок позиціювання.

Побудовані комп'ютерні моделі є основою для подальшого порівняльного аналізу конфігурацій оптичного блока. Результати моделювання залежності $DOLP_{out}(\theta)$ для різної кількості пар пластин наведено в наступному підрозділі.

2.5. Порівняльний аналіз конфігурацій оптичного блока

На основі побудованих у ANSYS Zemax OpticStudio комп'ютерних моделей оптичного блока проведено моделювання залежності ступеня лінійної поляризації $DOLP_{out}$ від кута нахилу пластин θ . Моделювання виконувалося для трьох конфігурацій: з однією, двома та трьома парами похилих плоскопаралельних діелектричних пластин. Як робочу довжину хвилі для порівняльного аналізу використано $\lambda = 450\text{нм}$.

Вибір різної кількості пар пластин дозволяє оцінити вплив конструктивної конфігурації оптичного блока на діапазон формування $DOLP_{out}$, чутливість системи до зміни кута нахилу та придатність отриманої залежності для подальшого автоматизованого керування. Результати моделювання наведено в табл. 2.2.

Таблиця 2.2 – Залежність DOLP від кута нахилу для різних конфігурацій ($\lambda = 450\text{ нм}$)

$\theta, ^\circ$	$DOLP_{out}$ (1 пара), %	$DOLP_{out}$ (2 пари), %	$DOLP_{out}$ (3 пари), %
50	24.03	45.44	62.63
45	18.48	35.74	50.86
40	13.92	27.31	39.72
35	10.21	20.21	29.80
30	7.22	14.37	21.37
25	4.86	9.69	14.48
20	3.03	6.05	9.06
15	1.67	3.34	5.00
10	0.73	1.46	2.19
5	0.18	0.36	0.54
0	0.00	0.00	0.00

Для наочного представлення отриманих результатів побудовано графік залежності $DOLP_{out}$ від кута нахилу пластин для трьох досліджуваних конфігурацій оптичного блока, який наведено на рис. 2.4.

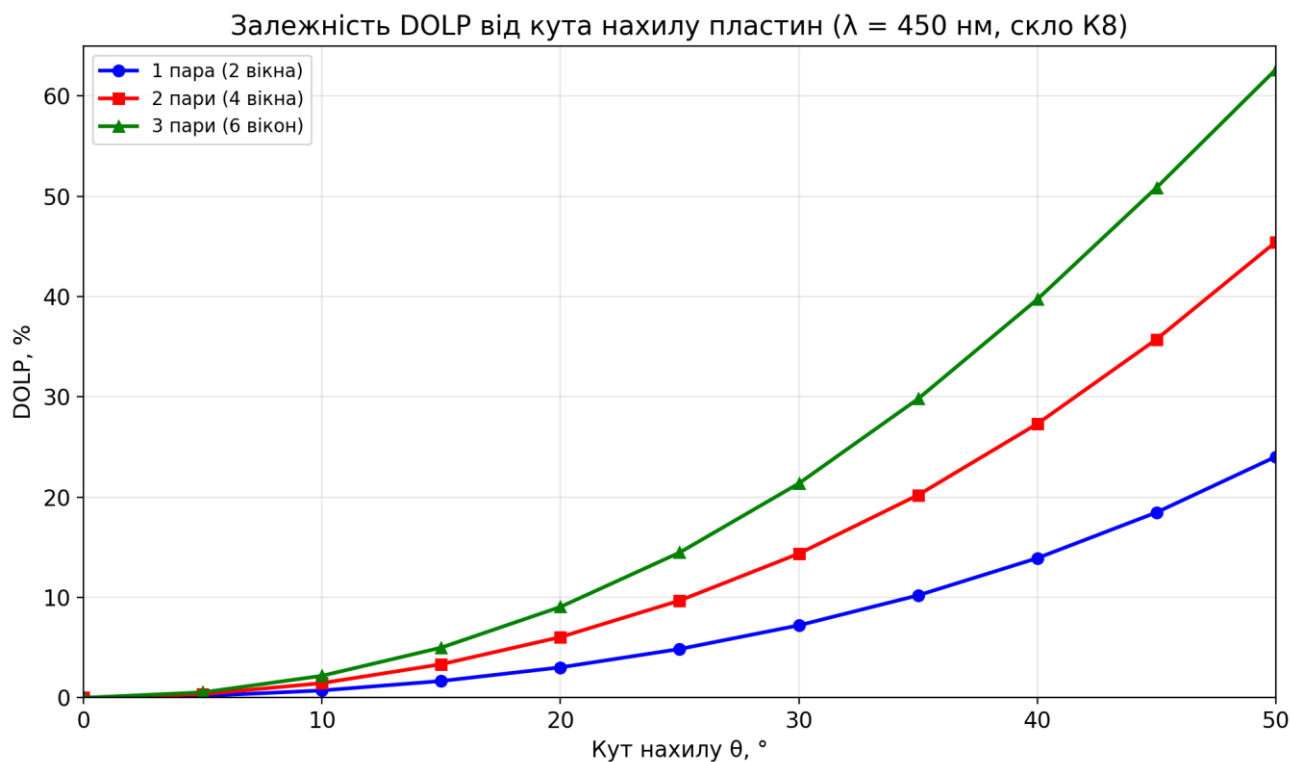


Рисунок 2.4 – Залежність $DOLP_{out}$ від кута нахилу пластин для 1, 2 та 3 пар ($\lambda = 450$ нм)

Аналіз даних табл. 2.2 та рис. 2.4 показує, що для всіх досліджуваних конфігурацій залежність $DOLP_{out}(\theta)$ є монотонно зростаючою. Це є важливою умовою для автоматизованого керування, оскільки монотонність забезпечує можливість однозначного визначення необхідного кута нахилу пластин за заданим значенням $DOLP_{set}$.

Для конфігурації з однією парою пластин значення $DOLP_{out}$ при $\theta = 50^\circ$ становить 24,03%, а при $\theta = 35^\circ$ – 10,21%. Така конфігурація є найпростішою з конструктивної точки зору, однак має обмежений діапазон формування ступеня лінійної поляризації. Це може бути недостатнім у випадках, коли необхідно забезпечити ширший діапазон тестових значень $DOLP$.

Конфігурація з трьома парами пластин забезпечує найбільший діапазон формування $DOLP_{out}$: при $\theta = 50^\circ$ значення досягає 62,63%, а при $\theta = 35^\circ$ –

29,80%. Проте збільшення кількості пластин супроводжується зростанням кількості оптичних поверхонь, що може призводити до більших втрат випромінювання, підвищення вимог до точності монтажу та більшої чутливості до похибок позиціювання. Крім того, у діапазоні великих кутів залежність стає більш крутою, що ускладнює точне встановлення малих приростів $DOLP_{out}$.

Найбільш збалансованою є конфігурація з двома парами пластин. Для неї при $\theta = 35^\circ$ формується $DOLP_{out} = 20,21\%$, що дозволяє перекрити робочий діапазон тестування приблизно 0–20%. При збільшенні кута до $\theta = 50^\circ$ значення $DOLP_{out}$ становить 45,44%, що створює додатковий запас діапазону формування поляризаційних станів.

Отже, для подальшої розробки автоматизованої системи керування доцільно обрати конфігурацію з двома парами похилих діелектричних пластин. Вона забезпечує раціональний компроміс між діапазоном формування $DOLP_{out}$, конструктивною складністю, потенційними оптичними втратами та вимогами до точності позиціювання. Отримана залежність $DOLP_{out}(\theta)$ для цієї конфігурації надалі використовується як основа для формування калібрувальної характеристики автоматизованої системи.

2.6. Аналіз та вибір матеріалу діелектричних пластин

Матеріал діелектричних пластин впливає на формування $DOLP_{out}$, оскільки його показник заломлення $n(\lambda)$ визначає співвідношення пропускання p - та s -компонент при проходженні випромінювання через похилі поверхні. Тому для пластин необхідно обрати матеріал із достатньою прозорістю у робочому спектральному діапазоні, стабільним показником заломлення, оптичною однорідністю та технологічністю виготовлення [37].

Таблиця 2.3 – Порівняння матеріалів для діелектричних пластин

Матеріал	Переваги	Обмеження
K8 / N-BK7	Висока прозорість у видимому діапазоні, оптична однорідність, доступність, технологічність	Нижча термостійкість порівняно з кварцом
Плавлений кварц	Широкий спектральний діапазон, висока термостабільність, низькі втрати	Вища вартість, складніша обробка
Сапфір	Висока міцність і термостійкість	Анізотропія, висока вартість, складність обробки

Аналіз показує, що плавлений кварц має кращі властивості для спеціалізованих широкосмугових систем, однак для лабораторної установки його використання є менш доцільним через вартість і складність оброблення [38]. Сапфір має високу механічну міцність і термостійкість, однак є анізотропним матеріалом, що може ускладнювати формування контрольованого поляризаційного стану [39].

З урахуванням зазначених критеріїв у роботі обрано скло K8, яке за характеристиками є близьким аналогом N-BK7 [40]. Воно забезпечує достатню прозорість у видимому діапазоні, оптичну однорідність, технологічність виготовлення плоскопаралельних пластин і стабільність характеристик. Отже, K8 / N-BK7 є раціональним вибором для побудови оптичного блока та формування відтворюваної калібрувальної залежності $DOLP_{out}(\theta)$.

2.7. Аналіз спектральної стабільності калібрувальної залежності

Після вибору конфігурації з двома парами похилих діелектричних пластин було проведено аналіз впливу довжини хвилі на формування ступеня лінійної поляризації. Такий аналіз є необхідним, оскільки показник заломлення скла

залежить від довжини хвилі, а отже, зміна спектрального складу випромінювання може впливати на значення $DOLP_{out}$ при однаковому куті нахилу пластин [41].

Моделювання виконувалося для дев'яти довжин хвиль у діапазоні від 450 до 900 нм. Як об'єкт дослідження використано обрану конфігурацію з двома парами пластин зі скла К8. Результати моделювання наведено в табл. 2.4.

Таблиця 2.4 – Значення $DOLP_{out}$ при різних кутах нахилу пластин і довжинах хвиль для конфігурації з двома парами пластин

$\theta, ^\circ$	$\lambda=450$	$\lambda=500$	$\lambda=555$	$\lambda=600$	$\lambda=650$	$\lambda=700$	$\lambda=800$	$\lambda=850$	$\lambda=900$
50	45.44	45.09	44.80	44.64	44.49	44.36	44.15	44.07	44.00
45	35.74	35.45	35.22	35.06	34.93	34.82	34.64	34.57	34.51
40	27.31	27.07	26.89	26.76	26.65	26.56	26.42	26.36	26.31
35	20.21	20.02	19.88	19.78	19.70	19.63	19.52	19.48	19.44
30	14.37	14.24	14.14	14.06	14.00	13.95	13.87	13.84	13.81
25	9.69	9.60	9.53	9.48	9.44	9.40	9.35	9.33	9.31
20	6.05	5.99	5.95	5.92	5.89	5.87	5.83	5.82	5.81
15	3.34	3.30	3.28	3.26	3.25	3.24	3.22	3.21	3.20
10	1.46	1.45	1.44	1.43	1.42	1.42	1.41	1.41	1.40
5	0.36	0.36	0.36	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Для наочного представлення результатів побудовано графічні залежності $DOLP_{out}$ від кута нахилу пластин. Для зручності аналізу довжини хвиль поділено на три групи: короткохвильову, середню та довгохвильову області.

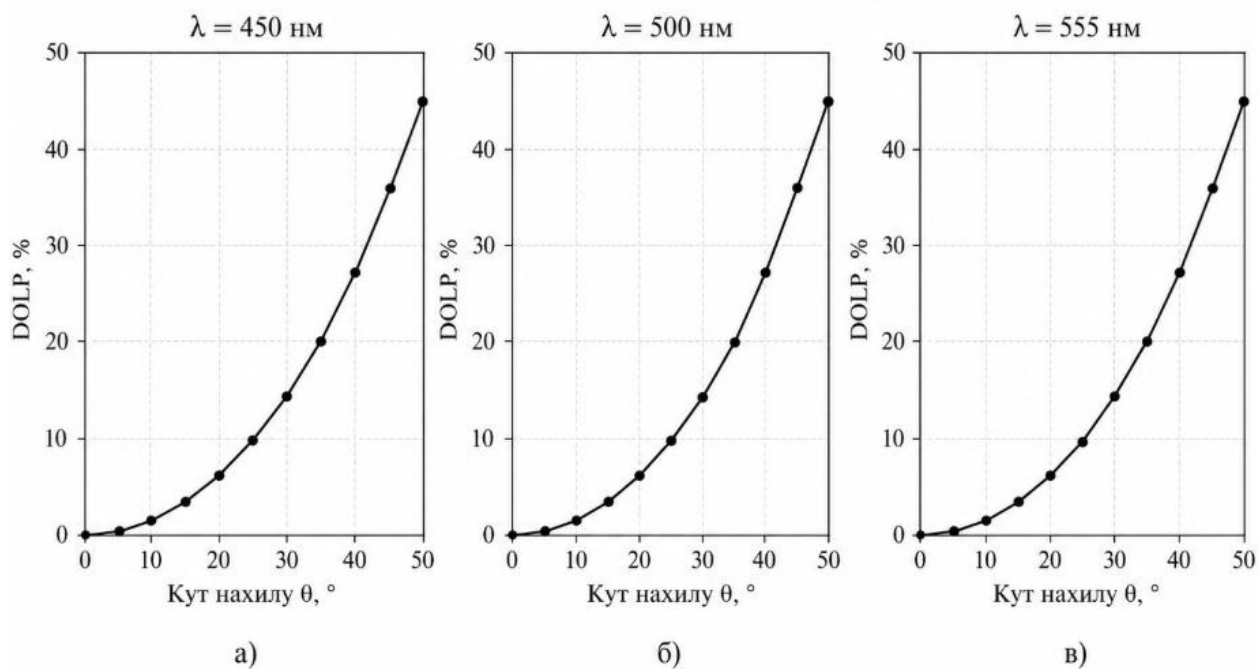


Рисунок 2.5 – Залежності $DOLP_{out}$ від кута нахилу пластин при довжинах хвиль: а) $\lambda = 450\text{нм}$; б) $\lambda = 500\text{нм}$; в) $\lambda = 555\text{нм}$

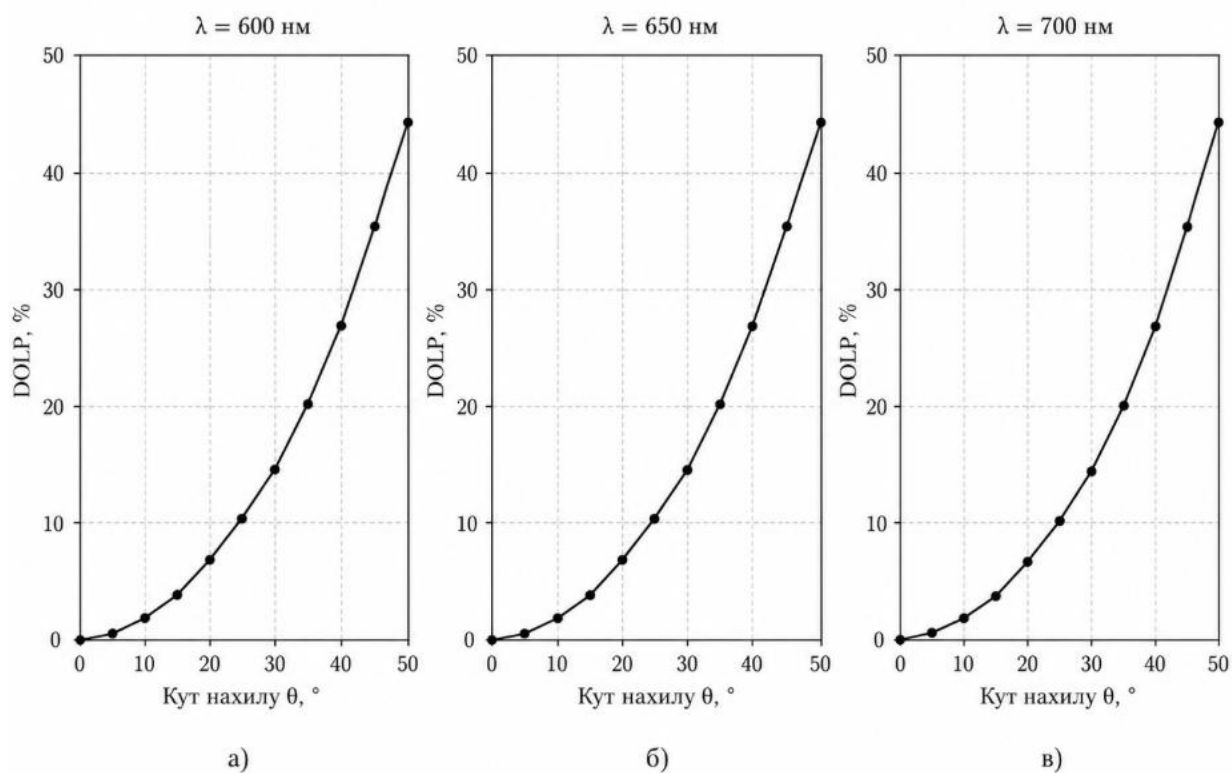


Рисунок 2.6 – Залежності $DOLP_{out}$ від кута нахилу пластин при довжинах хвиль: а) $\lambda = 600\text{нм}$; б) $\lambda = 650\text{нм}$; в) $\lambda = 700\text{нм}$

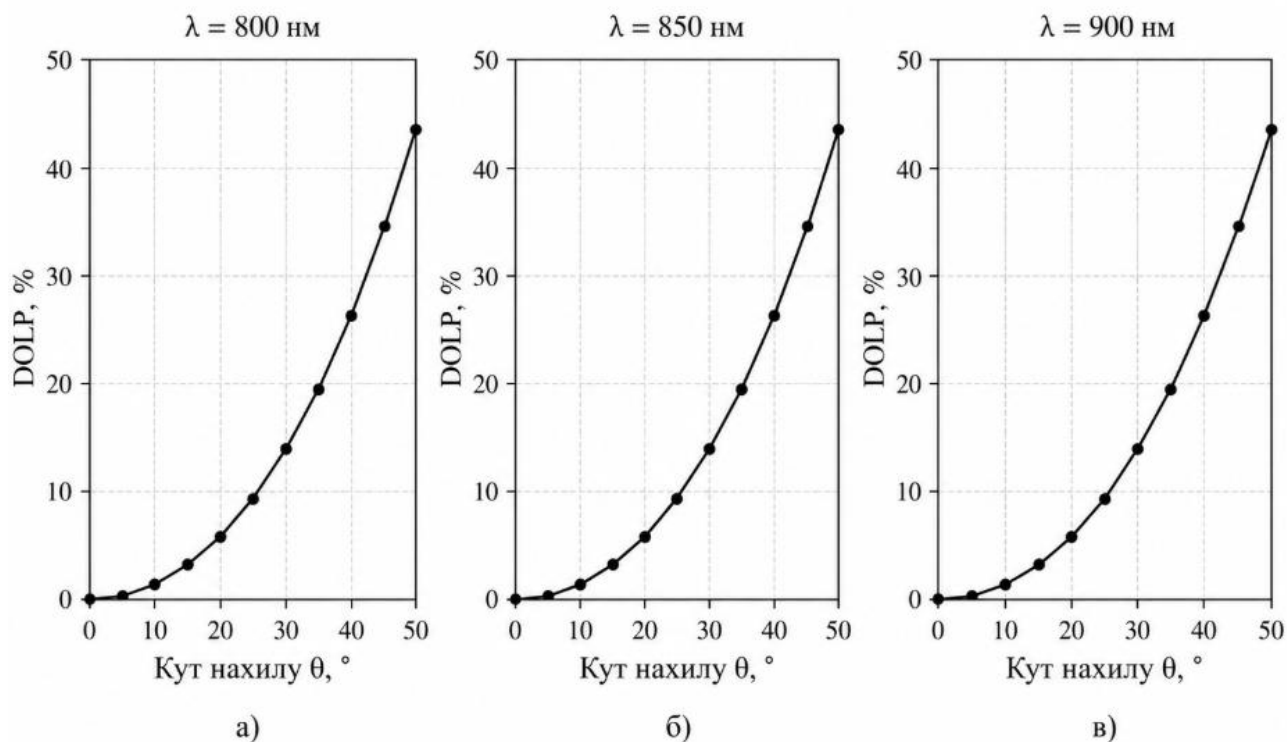


Рисунок 2.7 – Залежності $DOLP_{out}$ від кута нахилу пластин при довжинах хвиль: а) $\lambda = 800$ нм; б) $\lambda = 850$ нм; в) $\lambda = 900$ нм

Аналіз табл. 2.4 та рис. 2.5–2.7 показує, що для всіх розглянутих довжин хвиль залежність $DOLP_{out}(\theta)$ залишається монотонно зростаючою. Це є важливою умовою для автоматизованого керування, оскільки забезпечує можливість однозначного визначення кута нахилу пластин за заданим значенням $DOLP_{set}$.

Водночас спостерігається незначне зменшення $DOLP_{out}$ зі збільшенням довжини хвилі. Наприклад, при $\theta = 35^\circ$ значення $DOLP_{out}$ змінюється від 20,21% при $\lambda = 450$ нм до 19,44% при $\lambda = 900$ нм. Різниця становить 0,77%, що свідчить про відносно малий вплив спектрального фактора в робочому діапазоні кутів до 35° .

У повному діапазоні кутів до 50° спектральна різниця є більшою: при $\theta = 50^\circ$ значення $DOLP_{out}$ змінюється від 45,44% до 44,00%, тобто на 1,44%. Це пояснюється тим, що при великих кутах нахилу вплив дисперсії показника заломлення на співвідношення пропускання ортогональних компонент стає помітнішим.

Таким чином, спектральний аналіз показав, що обрана конфігурація з двома парами пластин зі скла K8 забезпечує стабільну та монотонну калібрувальну залежність у діапазоні довжин хвиль 450–900 нм. У робочому діапазоні кутів 0–35°, який відповідає формуванню $DOLP_{out}$ приблизно до 20%, спектральна розбіжність не перевищує 0,77%. Це дозволяє використовувати отриману залежність у складі автоматизованої системи керування, а для підвищення точності – враховувати довжину хвилі як додатковий параметр калібрувальної моделі.

2.8. Аналіз малих значень DOLP у діапазоні малих кутів

Для автоматизованої системи формування заданого ступеня лінійної поляризації важливо окремо проаналізувати область малих значень $DOLP_{out}$. Саме в цьому діапазоні необхідно забезпечити плавну зміну вихідної величини та достатню повторюваність формування поляризаційного стану. Окремі результати аналізу малих значень DOLP наведено у публікації автора [42].

Для обраної конфігурації з двома парами пластин зі скла K8 було проведено деталізоване моделювання в діапазоні кутів 0–10° при довжині хвилі $\lambda = 550$ нм. На основі отриманих значень ортогональних компонент випромінювання E_y та E_x було визначено відповідні значення $DOLP_{out}$ і побудовано графічну залежність $DOLP_{out}$ від кута нахилу пластин.

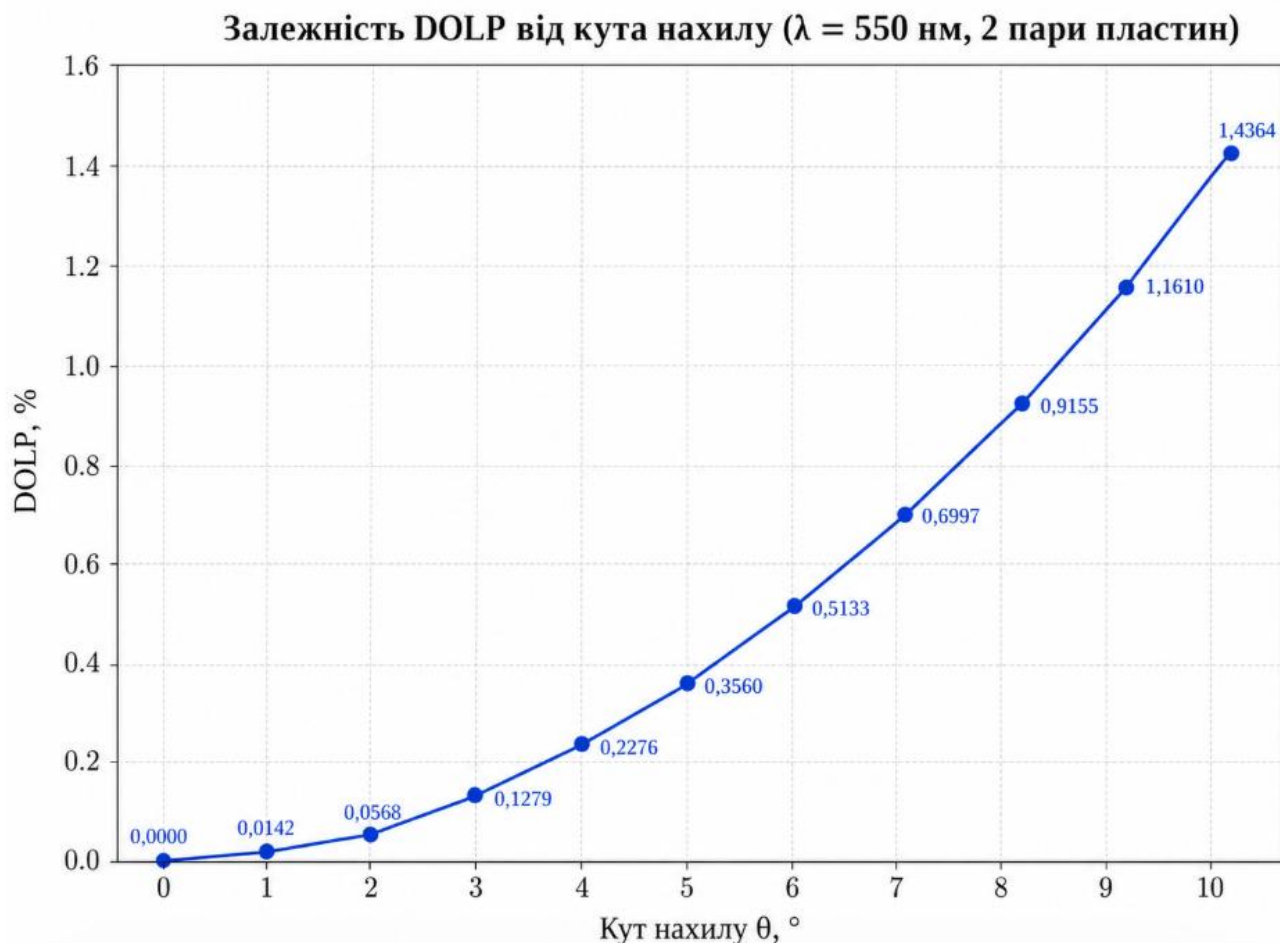


Рисунок 2.8 – Залежність $DOLP_{out}$ від кута нахилу пластин у діапазоні малих кутів ($\lambda = 550$ нм, 2 пари пластин)

Аналіз рис. 2.8 показує, що в діапазоні $0\text{--}10^\circ$ залежність $DOLP_{out}(\theta)$ є монотонно зростаючою. При нульовому куті нахилу значення $DOLP_{out}$ дорівнює нулю, а зі збільшенням кута воно плавно зростає і при $\theta = 10^\circ$ досягає 1,4364%. Це підтверджує можливість формування малих значень ступеня лінійної поляризації шляхом точного регулювання кута нахилу пластин.

Із графіка видно, що в області малих кутів зміна $DOLP_{out}$ відбувається плавно, без стрибків, що є важливою умовою для автоматизованого керування. Водночас саме ця ділянка є найбільш чутливою з точки зору позиціонування, оскільки навіть незначна зміна кута призводить до зміни сформованого значення $DOLP$.

Отже, обрана конфігурація з двома парами пластин забезпечує кероване формування малих значень $DOLP_{out}$ у діапазоні малих кутів. Це підтверджує

придатність системи для точного задання низьких рівнів ступеня лінійної поляризації та є основою для подальшої оцінки похибок формування *DOLP*.

2.9. Узагальнення результатів моделювання та формування калібрувальної залежності для АСК

Проведене комп'ютерне моделювання дозволило визначити основні властивості оптичного блока як об'єкта автоматизованого керування. За результатами порівняння конфігурацій встановлено, що найбільш раціональним варіантом для подальшої розробки АСК є система з двома парами похилих діелектричних пластин. Така конфігурація забезпечує робочий діапазон формування $DOLP_{out}$ приблизно до 20% при кутах нахилу до 35° та має запас діапазону до 45,44% при $\theta = 50^\circ$.

Спектральний аналіз показав, що для обраної конфігурації залежність $DOLP_{out}(\theta)$ зберігає монотонний характер у діапазоні довжин хвиль 450–900 нм. У робочому діапазоні кутів до 35° спектральна розбіжність не перевищує 0,77%, що свідчить про достатню стабільність калібрувальної залежності для лабораторної системи формування ступеня лінійної поляризації.

Окремий аналіз діапазону малих кутів показав, що при $\lambda = 550$ нм і двох парах пластин залежність $DOLP_{out}(\theta)$ у межах 0–10° є плавною та монотонною. При $\theta = 10^\circ$ значення $DOLP_{out}$ становить 1,4364%, що підтверджує можливість формування малих контрольних значень ступеня лінійної поляризації.

Отримані результати є основою для формування калібрувальної залежності автоматизованої системи керування. У загальному вигляді така залежність встановлює відповідність між заданим значенням ступеня лінійної поляризації та необхідним кутом нахилу пластин:

$$DOLP_{set} \rightarrow \theta_{set} \quad (2.8)$$

У подальшій реалізації АСК значення θ_{set} використовується для формування керуючого впливу на виконавчий механізм. Таким чином, результати другого

розділу забезпечують математичну та числову основу для переходу від заданого значення $DOLP_{set}$ до керованого положення оптичних елементів.

Для практичного використання в системі керування калібрувальна залежність може бути подана у вигляді таблиці відповідності або апроксимаційної функції. Табличне подання є зручним для програмної реалізації, оскільки дозволяє швидко визначати потрібний кут нахилу пластин для заданого значення $DOLP_{set}$, а за потреби виконувати інтерполяцію між сусідніми точками.

Таким чином, у результаті моделювання було обрано конфігурацію оптичного блока, визначено робочий діапазон кутів, оцінено спектральну стабільність та досліджено область малих значень $DOLP$. Отримані залежності використовуються як калібрувальна основа для розробки функціональної схеми, алгоритмічного та програмного забезпечення автоматизованої системи керування в наступному розділі.

Висновки до розділу 2

У другому розділі оптичний блок на основі стопи похилих діелектричних пластин було розглянуто як об'єкт автоматизованого керування. Визначено керовану величину $DOLP_{out}$, керуючий параметр θ , критерій якості формування поляризаційного стану та основні параметри, що впливають на калібрувальну залежність.

На основі комп'ютерного моделювання в ANSYS Zemax OpticStudio досліджено конфігурації оптичного блока з однією, двома та трьома парами пластин. Встановлено, що найбільш раціональною для подальшої розробки АСК є конфігурація з двома парами пластин, яка забезпечує $DOLP_{out} = 20,21\%$ при $\theta = 35^\circ$ та $DOLP_{out} = 45,44\%$ при $\theta = 50^\circ$.

Для обраної конфігурації виконано аналіз спектральної стабільності в діапазоні довжин хвиль 450–900 нм. Показано, що в робочому діапазоні кутів до 35° спектральна розбіжність $DOLP_{out}$ не перевищує 0,77%, що підтверджує

придатність отриманої залежності для лабораторної системи формування заданого ступеня лінійної поляризації.

Окремо проаналізовано область малих кутів $0-10^\circ$ для $\lambda = 550\text{nm}$. Встановлено, що залежність $DOLP_{out}(\theta)$ у цьому діапазоні є монотонною та плавною, а при $\theta = 10^\circ$ значення $DOLP_{out}$ становить 1,4364%. Це підтверджує можливість формування малих контрольних значень DOLP.

Отже, у розділі отримано числову основу для побудови калібрувальної залежності $DOLP_{set} \rightarrow \theta_{set}$, яка надалі використовується для формування керуючого впливу в автоматизованій системі керування.

РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЗМІНОЮ ПАРАМЕТРІВ ПОЛЯРИЗАЦІЇ ШТУЧНОГО ДЖЕРЕЛА ВИПРОМІНЮВАННЯ

3.1. Функціональна схема автоматизованої системи керування параметрами поляризації

Автоматизовані системи керування (АСК) застосовуються для забезпечення стабільності, точності та відтворюваності параметрів складних технічних процесів. Основою побудови таких систем є використання замкненого контуру керування, у якому керуючий вплив формується на основі відхилення між заданим та фактичним значеннями керованого параметра [43].

Важливим елементом замкнених систем є зворотний зв'язок, що дозволяє враховувати вплив зовнішніх збурень, нелінійностей об'єкта керування та похибок вимірювання. Завдяки цьому забезпечується підвищення точності та стійкості системи, а також можливість адаптації до зміни умов функціонування [43].

У задачах керування параметрами поляризації оптичного випромінювання застосування замкнених систем є особливо актуальним. Це обумовлено тим, що ступінь лінійної поляризації (Degree of Linear Polarization, DOLP) визначається складними фізичними процесами взаємодії випромінювання з оптичними елементами та має нелінійну залежність від керуючих параметрів системи [32]. Крім того, на значення поляризації можуть впливати нестабільність джерела випромінювання, зміна оптичних характеристик матеріалів та інші фактори.

З урахуванням зазначених особливостей у даній роботі запропоновано автоматизовану систему керування параметрами поляризації, що реалізує принцип замкненого керування зі зворотним зв'язком. Структурна схема системи наведена на рис. 3.1.

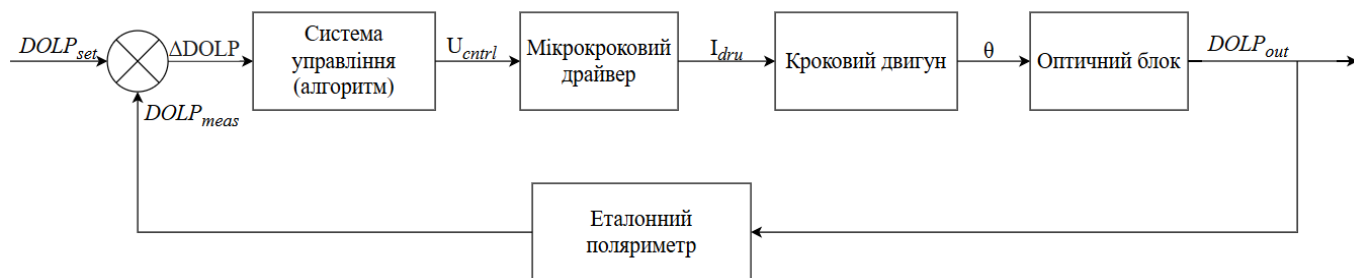


Рисунок 3.1 – Структурна схема АСК процесу формування параметрів поляризації

На вхід системи подається задане значення ступеня лінійної поляризації $DOLP_{set}$. У суматорі формується сигнал похибки $\Delta DOLP$, що визначається як різниця між заданим значенням та виміряним значенням $DOLP_{meas}$, отриманим з еталонного поляриметра.

Сигнал похибки надходить до системи керування, в якій реалізовано алгоритм формування керуючого впливу. У результаті обробки сигналу формується керуючий сигнал U_{ctrl} , який подається на мікрокроковий драйвер. Мікрокроковий драйвер забезпечує перетворення керуючого сигналу у струм керування I_{drv} , необхідний для роботи крокового двигуна. Кроковий двигун виконує функцію виконавчого механізму та формує кут повороту θ , що визначає параметри оптичної системи.

Зміна кута повороту призводить до зміни параметрів оптичного блоку, внаслідок чого формується випромінювання із заданим ступенем поляризації $DOLP_{out}$. Отримане значення надходить до еталонного поляриметра, де виконується його вимірювання та формування сигналу $DOLP_{meas}$, який повертається у суматор, замикаючи контур керування.

Отже, запропонована система забезпечує автоматичне формування заданого ступеня лінійної поляризації з урахуванням зворотного зв'язку, що дозволяє компенсувати вплив нелінійностей оптичної системи та підвищити точність і стабільність керування.

Практична реалізація запропонованої функціональної структури АСК може бути розглянута на прикладі лабораторного стенда ГАО НАН України для формування та дослідження параметрів поляризації штучного джерела

випромінювання. Загальний вигляд оптичного блока формування випромінювання та лабораторного стенда наведено на рис. 3.2.

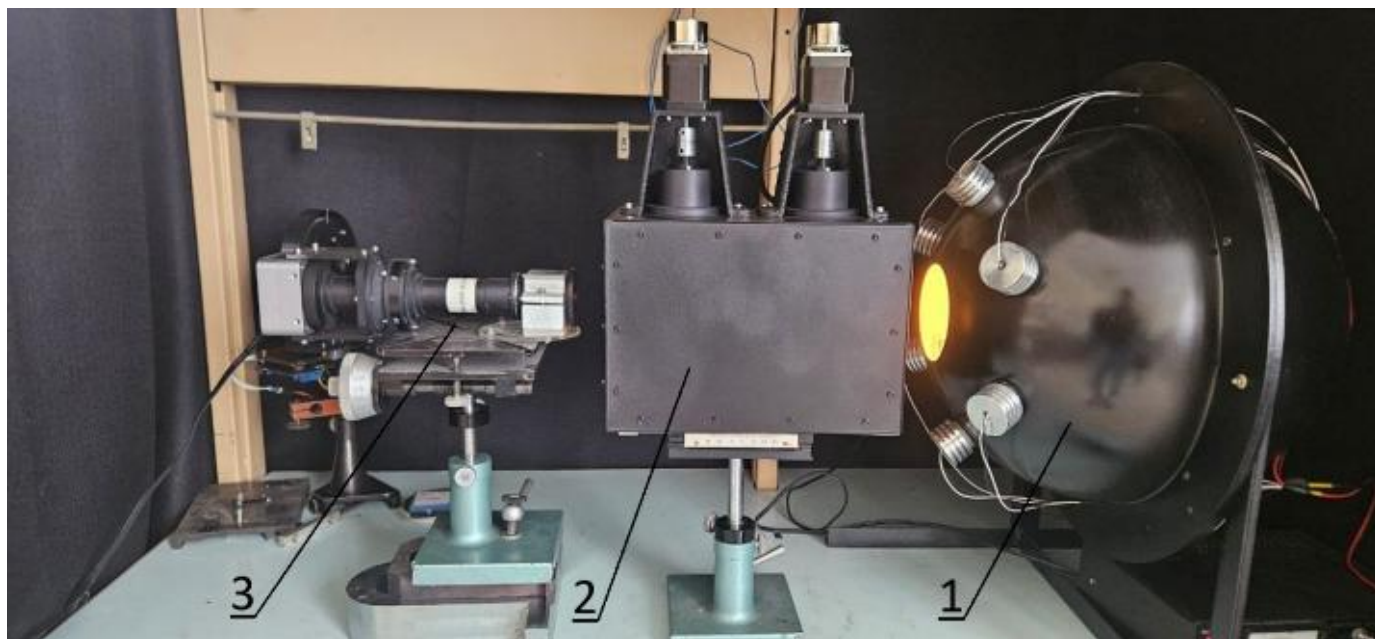


Рисунок 3.2 – Загальний вигляд лабораторного стенда ГАО НАН України для формування та дослідження параметрів поляризації штучного джерела випромінювання [44]

На рис. 3.2 позначено основні елементи лабораторного стенда: 1 – джерело неполяризованого випромінювання на базі інтегруючої сфери; 2 – оптичний блок формування випромінювання; 3 – мультиспектральний зображуючий поляриметр. У межах даної магістерської дисертації основна увага зосереджена на автоматизації керування саме оптичним блоком, зокрема визначенні необхідного кута нахилу діелектричних пластин, формуванні керуючого сигналу для виконавчого механізму та корекції положення за сигналом зворотного зв'язку.

3.2. Вибір та обґрунтування апаратної елементної бази

У даному підрозділі обґрунтовано вибір апаратної елементної бази автоматизованої системи керування параметрами поляризації. Основною задачею апаратної частини є забезпечення точного позиціювання стопи похилих діелектричних пластин відповідно до керуючого сигналу, що формується на основі заданого значення ступеня лінійної поляризації DOLP.

До апаратної частини системи висуваються такі основні вимоги: можливість програмного керування виконавчим механізмом, достатня кутова дискретність позиціонування, стабільне утримання положення пластин, обмін даними з персональним комп'ютером та простота реалізації у лабораторних умовах.

Основними апаратними компонентами системи є мікроконтролерний модуль Arduino Nano V3.0, драйвер крокового двигуна LERDGE TMC2209 та кроковий двигун NEMA 17 з електромагнітним гальмом. Їх зовнішній вигляд наведено на рис. 3.3.

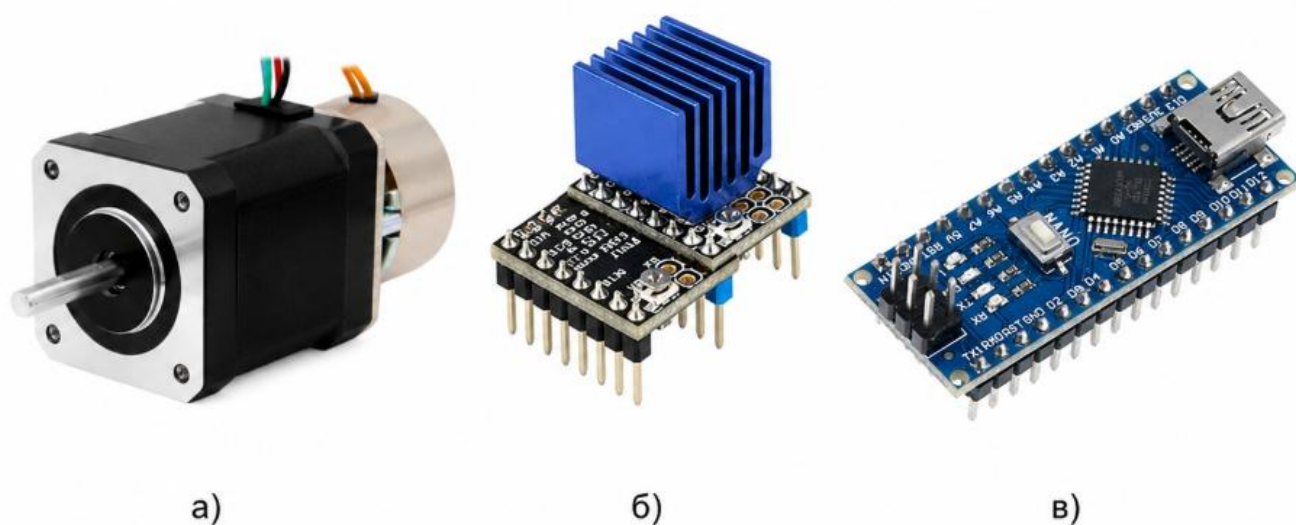


Рисунок 3.3 – Основні апаратні компоненти автоматизованої системи керування:

а) кроковий двигун NEMA 17 з гальмом; б) драйвер LERDGE TMC2209; в) мікроконтролерний модуль Arduino Nano V3.0

Вибір основних апаратних компонентів виконано на основі порівняння можливих технічних рішень, наведеного в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Порівняльний аналіз апаратної елементної бази системи

Функціональний вузол	Розглянуті варіанти	Обраний варіант	Обґрунтування вибору
Мікроконтролерний модуль	Arduino Nano, Arduino Uno, ESP32, STM32 Blue Pill	Arduino Nano V3.0	Достатня кількість входів/виходів, USB-UART, компактність, простота програмування

Продовження таблиці 3.1

Виконавчий механізм	Сервопривід, DC-двигун з енкодером, кроковий двигун	Кроковий двигун NEMA 17 з гальмом	Забезпечує дискретне кутове позиціонування та стабільне утримання положення
Драйвер двигуна	A4988, DRV8825, TMC2209, TB6600	LERDGE TMC2209	Підтримує мікрокроковий режим, має компактні розміри та забезпечує плавне керування двигуном
Інтерфейс зв'язку	USB-UART, Bluetooth, Wi-Fi	USB-UART	Достатній для лабораторної системи та простий у реалізації
Живлення	Єдине джерело, розділене живлення логіки й силової частини	5 В + окреме живлення двигуна	Зменшує вплив силової частини на роботу мікроконтролера

Як мікроконтролерний модуль обрано Arduino Nano V3.0 на базі AVR ATmega328P. Його продуктивності достатньо для формування сигналів керування кроковим двигуном, обробки команд від персонального комп'ютера та реалізації базових алгоритмів позиціонування. Порівняно з ESP32 та STM32, Arduino Nano має менші обчислювальні можливості, однак для задачі керування одним виконавчим механізмом вони є достатніми. Перевагами обраного модуля є компактність, наявність USB-UART інтерфейсу та простота програмування [45].

Для зміни кута нахилу стопи діелектричних пластин обрано кроковий двигун NEMA 17 з електромагнітним гальмом. Його використання є доцільним, оскільки кут нахилу пластин є основним керуючим параметром системи. Кроковий двигун

дозволяє задавати переміщення кількістю імпульсів, що спрощує реалізацію дискретного позиціонування. Наявність гальма додатково підвищує стабільність утримання положення оптичного блока після встановлення заданого кута [46].

Основні параметри обраного двигуна: утримуючий момент 0,52 Н·м, струм фази 1,7 А, кут повного кроку 1,8°. При використанні мікрокрокового режиму 1/16 кількість мікрокроків на один оберт становить:

$$N = N_k \cdot m, \quad (3.1)$$

де N – кількість мікрокроків на один оберт;

N_k – кількість повних кроків на один оберт;

m – коефіцієнт мікрокрокового поділу.

$$N = 200 \cdot 16 = 3200$$

Кутова дискретність позиціонування дорівнює:

$$\Delta\theta = \frac{360^\circ}{N} \quad (3.2)$$

$$\Delta\theta = \frac{360^\circ}{3200} = 0,1125^\circ$$

Отримане значення близьке до 0,1°, що є достатнім для точного встановлення кута нахилу пластин під час формування заданих значень DOLP.

Для керування кроковим двигуном обрано драйвер LERDGE TMC2209. Він підтримує мікрокроковий режим, забезпечує плавну роботу двигуна та має компактні розміри, що є зручним для лабораторної установки [47]. Порівняно з простішими драйверами A4988 і DRV8825, TMC2209 забезпечує більш плавне та стабільне керування. Використання потужнішого драйвера типу TB6600 у даній системі не є обов'язковим, оскільки навантаження на виконавчий механізм є відносно невеликим.

Живлення апаратної частини доцільно розділити на логічну та силову частини. Мікроконтролер Arduino Nano живиться від USB-порту персонального комп'ютера або стабілізованого джерела 5 В. Драйвер і кроковий двигун живляться від окремого джерела постійної напруги відповідно до вимог двигуна та драйвера.

Таке розділення дозволяє зменшити вплив імпульсних струмів виконавчого механізму на роботу мікроконтролера.

Обрана апаратна елементна база забезпечує виконання основних функцій автоматизованої системи: приймання заданого значення DOLP, формування керуючих сигналів, точне позиціювання стопи діелектричних пластин та стабільне утримання заданого положення. Запропонована структура є достатньою для лабораторної системи формування заданого ступеня лінійної поляризації та відповідає вимогам точності, простоти реалізації й доступності компонентів.

3.3. Інформаційне забезпечення автоматизованої системи

Інформаційне забезпечення (ІЗ) автоматизованої системи керування (АСК) параметрами поляризації являє собою сукупність відомостей, що використовуються в процесі автоматизованого керування, а також засобів їх організації, зберігання та обробки. Воно включає вхідні та вихідні дані, довідкову інформацію, результати моделювання та функціонування системи, що забезпечують реалізацію алгоритмів керування та аналіз отриманих результатів [48].

Інформаційне забезпечення розробленої автоматизованої системи керування включає вхідну та вихідну інформацію, а також інформаційні бази даних, які забезпечують збереження та використання необхідних відомостей у процесі роботи системи.

Вхідна інформація включає оперативні дані, що змінюються в процесі функціонування системи та визначають її роботу. До такого типу інформації відносяться задане значення ступеня поляризації (DOLP), вибір режиму роботи програми (ручний, автоматичний, калібрування), а також команди керування системою (запуск, зупинка, калібрування), що задають порядок функціонування АСК.

Важливою складовою інформаційного забезпечення є інформаційні бази даних, які містять структуровані відомості про параметри системи, результати моделювання та її функціонування. Дані бази використовуються алгоритмами

керування для формування керуючих впливів та врахування фізичних характеристик системи.

До складу інформаційних баз даних входять:

- база даних конфігурації обладнання, що містить інформацію про склад і параметри технічних засобів системи, зокрема типи виконавчого механізму, драйвера, мікроконтролера та вимірювальних засобів, їх позначення, основні параметри та обмеження;
- база даних калібрувальних характеристик, яка включає таблиці відповідності між значенням ступеня поляризації та керуючими параметрами (кутами повороту оптичних елементів), результати моделювання, отримані з використанням спеціалізованого програмного забезпечення, коефіцієнти апроксимації та калібрувальні поправки;
- база даних результатів функціонування, що використовується для збереження інформації про роботу системи, зокрема часу запису, режиму роботи, точності формування параметрів поляризації та стану системи.

Для організації роботи з даними використовується програмне забезпечення, яке забезпечує їх збереження, обробку, аналіз та візуалізацію результатів роботи системи.

Вихідна інформація формується в процесі функціонування автоматизованої системи керування та використовується як для реалізації замкненого контуру керування, так і для оцінки ефективності роботи системи. До вихідної інформації відносяться вихідне значення ступеня поляризації, виміряне значення DOLP, результати моніторингу роботи системи, оцінка точності формування параметрів поляризації, статус системи, керуючий сигнал на виконавчий механізм та сигнал похибки між заданим і фактичним значенням.

Схему інформаційного забезпечення автоматизованої системи керування параметрами поляризації наведено на рис. 3.4.

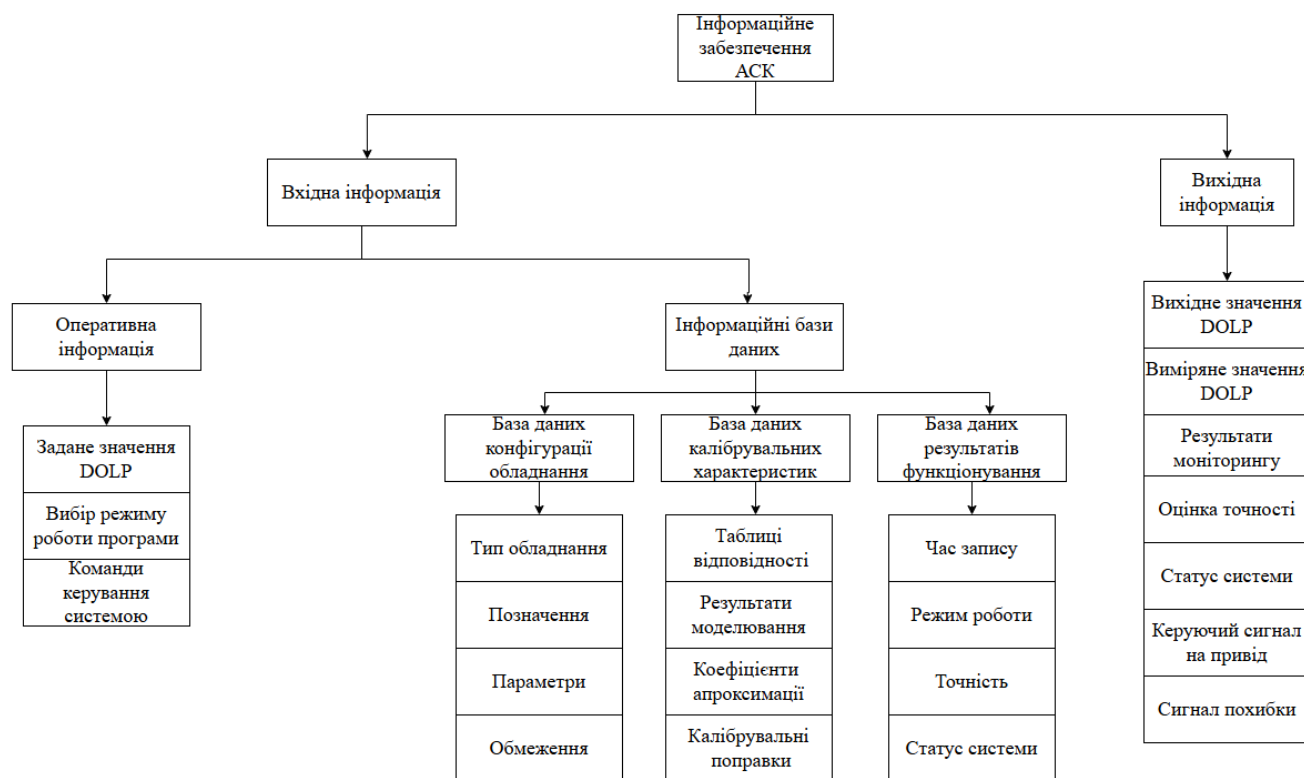


Рисунок 3.4 – Схема інформаційного забезпечення АСК

Структури інформаційних баз даних автоматизованої системи керування параметрами поляризації наведено у вигляді таблиць. Дані таблиці описують склад, типи та призначення інформації, що використовується в процесі функціонування системи.

Структуру бази даних конфігурації обладнання, що містить параметри використовуваних технічних засобів системи, наведено у табл. 3.2.

Таблиця 3.2. – Структура бази даних конфігурації обладнання

Поле	Тип	Значення
component_type	символьний	Тип елемента (двигун, драйвер, поляриметр)
designation	символьний	Позначення елемента
step_resolution	числовий	Крок виконавчого механізму, град/крок
angle_range	числовий	Діапазон повороту, град
control_signal	символьний	Тип керуючого сигналу (STEP/DIR)

Продовження таблиці 3.2

max_speed	числовий	Максимальна швидкість переміщення
constraints	символьний	Обмеження роботи обладнання

Структуру бази даних калібрувальних характеристик, що використовується для встановлення залежності між значенням ступеня поляризації та керуючими параметрами, наведено у табл. 3.3.

Таблиця 3.3. – Структура бази даних калібрувальних характеристик

Поле	Тип	Значення
step_index	числовий	Номер мікрокроку
angle	числовий	Кут повороту, град
dolp_value	числовий	Відповідне значення ступеня поляризації
model_source	символьний	Джерело даних (моделювання, експеримент)
approx_coeff	символьний	Коефіцієнти апроксимації (у вигляді масиву значень)
correction	числовий	Калібрувальна поправка

Структуру бази даних результатів функціонування автоматизованої системи керування наведено у табл. 3.4.

Таблиця 3.4 – Структура бази даних результатів функціонування

Поле	Тип	Значення
timestamp	дата/час	Час запису
target_dolp	числовий	Задане значення ступеня поляризації
measured_dolp	числовий	Виміряне значення ступеня поляризації

Продовження таблиці 3.4

error_value	числовий	Похибка між заданим і вимірним значенням
angle	числовий	Кут повороту виконавчого механізму
step	числовий	Номер кроку виконавчого механізму
mode	символьний	Режим роботи системи
status	символьний	Стан системи

3.4. Математичне забезпечення автоматизованої системи

Математичне забезпечення автоматизованої системи керування (АСК) являє собою сукупність математичних моделей, методів та алгоритмів, що використовуються для опису процесів керування, формування керуючих впливів та оцінки результатів функціонування системи [49].

У розробленій автоматизованій системі керування параметрами поляризації математичне забезпечення базується на використанні фізичних залежностей теорії поляризації світла, методів математичного моделювання та дискретних моделей виконавчих механізмів. Основною керованою величиною є ступінь лінійної поляризації випромінювання (DOLP), формування якого здійснюється шляхом зміни кута повороту оптичних елементів.

На відміну від класичних систем керування, де використовуються аналітичні моделі об'єкта, у даній роботі застосовано комбінований підхід, що поєднує результати чисельного моделювання та їх апроксимацію [49]. Це дозволяє врахувати нелінійний характер залежності між кутом повороту та значенням DOLP та забезпечити необхідну точність керування.

У складі математичного забезпечення використовуються математична модель об'єкта керування, калібрувальна та апроксимаційна модель, математична модель виконавчого механізму, математичні методи керування, а також методи обробки та оцінки вимірювальної інформації.

Схему математичного забезпечення автоматизованої системи керування представлено на рис. 3.5.



Рисунок 3.5 – Схема математичного забезпечення АСК

Розглянемо основні математичні залежності, що використовуються в автоматизованій системі керування параметрами поляризації.

1. Функціональна залежність *DOLP* від кута нахилу пластин

У розробленій системі значення ступеня лінійної поляризації визначається положенням оптичного блока, тобто кутом нахилу діелектричних пластин. У загальному вигляді ця залежність має нелінійний характер і може бути подана як:

$$DOLP_{out} = f(\theta), \quad (3.3)$$

де θ – кут нахилу діелектричних пластин.

Ця залежність описує поведінку оптичного блока як об'єкта керування та є основою для формування керуючого впливу.

2. Калібрувальна залежність

Оскільки аналітичний вигляд функції $f(\theta)$ для багатопластинчастого оптичного блока є складним, у системі використовується калібрувальна модель, сформована на основі результатів комп'ютерного моделювання. Вона задається у вигляді дискретного набору значень:

$$K = \{(\theta_i, DOLP_i)\}, \quad (3.4)$$

де θ_i значення кута нахилу пластин; $DOLP_i$ – відповідне значення ступеня лінійної поляризації.

Така форма подання дозволяє врахувати реальні характеристики оптичної системи, зокрема нелінійність залежності $DOLP_{out}(\theta)$, вплив кількості пластин та результати комп'ютерного моделювання.

3. Апроксимаційна модель залежності

Для забезпечення можливості обчислення значення $DOLP$ при довільному значенні кута використовується апроксимація табличних даних. У даній роботі застосовується поліноміальна апроксимація:

$$DOLP_{out}(\theta) = a_0 + a_1\theta + a_2\theta^2 + \dots + a_n\theta^n, \quad (3.5)$$

де $a_0, a_1, \dots, a_n$ – коефіцієнти апроксимації; θ – кут нахилу діелектричних пластин.

Апроксимаційна модель забезпечує плавне подання калібрувальної залежності та може використовуватися в алгоритмі керування для визначення проміжних значень між точками табличної моделі.

4. Обернена калібрувальна залежність

Для формування керуючого впливу необхідно визначити кут нахилу пластин, який відповідає заданому значенню ступеня лінійної поляризації. Для цього використовується обернена калібрувальна залежність:

$$\theta_{set} = f^{-1}(DOLP_{set}), \quad (3.6)$$

де $DOLP_{set}$ – задане значення ступеня лінійної поляризації; θ_{set} – розрахований кут нахилу пластин, який необхідно встановити виконавчим механізмом.

Саме ця залежність використовується програмним забезпеченням АСК для перетворення заданого значення $DOLP$ у команду позиціонування оптичного блока.

5. Перерахунок кута у кількість кроків двигуна

Оскільки керування положенням оптичного блока здійснюється за допомогою крокового двигуна, розрахований кут необхідно перетворити у кількість кроків виконавчого механізму:

$$N_{\text{крок}} = \frac{\theta_{\text{set}} - \theta_0}{\Delta\theta_{\text{крок}}} \quad (3.7)$$

де $N_{\text{крок}}$ – кількість кроків виконавчого механізму; θ_0 – початкове положення оптичного блока; $\Delta\theta_{\text{крок}}$ – кутове переміщення, що відповідає одному кроку або мікрокроку двигуна;

6. Похибка формування ступеня лінійної поляризації

Для оцінювання відхилення сформованого значення ступеня лінійної поляризації від заданого використовується похибка керування:

$$e_k = DOLP_{\text{set}} - DOLP_{\text{meas},k}, \quad (3.8)$$

де e_k – похибка на k -ій ітерації; $DOLP_{\text{set}}$ – задане значення ступеня лінійної поляризації; $DOLP_{\text{meas},k}$ – виміряне або змодельоване значення $DOLP$ на k -ій ітерації.

7. Закон корекції керуючого впливу

У замкненому контурі керування похибка e_k може бути використана для уточнення положення оптичного блока. У найпростішому випадку корекція кута може бути подана пропорційним законом:

$$\theta_{k+1} = \theta_k + K_p e_k, \quad (3.9)$$

де θ_k – поточне значення кута нахилу пластин; θ_{k+1} – скориговане значення кута; K_p – коефіцієнт пропорційної корекції; e_k – похибка формування ступеня лінійної поляризації.

Такий підхід забезпечує поступове зменшення похибки та дозволяє уточнювати положення виконавчого механізму за результатами зворотного зв'язку.

8. Оцінювання точності роботи системи

Для інтегральної оцінки точності роботи автоматизованої системи використовується середньоквадратична похибка:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (DOLP_{\text{set},i} - DOLP_{\text{meas},i})^2}, \quad (3.10)$$

де σ – середньоквадратична похибка; $DOLP_{set,i}$ – задане значення ступеня лінійної поляризації для i -го режиму; $DOLP_{meas,i}$ – отримане виміряне або змодельоване значення; m – кількість контрольних точок.

Таким чином, математичне забезпечення АСК поєднує калібрувальну модель оптичного блока, апроксимаційну залежність $DOLP_{out}(\theta)$, модель дискретного позиціювання виконавчого механізму, закон корекції керуючого впливу та критерій оцінювання точності. Це забезпечує можливість розрахунку необхідного кута нахилу діелектричних пластин і формування заданого значення ступеня лінійної поляризації.

3.5. Алгоритмічне забезпечення автоматизованої системи

Алгоритмічне забезпечення автоматизованої системи керування параметрами поляризації являє собою сукупність алгоритмів, що визначають послідовність виконання операцій у процесі формування, підтримання та калібрування заданого значення ступеня лінійної поляризації випромінювання [43]. Алгоритми функціонування системи базуються на математичних моделях і залежностях, розглянутих у підрозділі 3.4, та забезпечують реалізацію замкненого контуру керування із використанням зворотного зв'язку.

Відповідно до загальних принципів побудови автоматизованих систем керування, алгоритмічне забезпечення визначає логіку взаємодії між підсистемами вимірювання, обробки даних та виконавчим механізмом, а також забезпечує перетворення вхідних параметрів у керуючі впливи на об'єкт керування [43]. Реалізація алгоритмів ґрунтується на циклі «вимірювання – обчислення – керування – корекція», що дозволяє забезпечити необхідну точність та стабільність вихідного параметра.

У розробленій системі передбачено три основні режими роботи: автоматичний режим, режим стабілізації та калібрувальний режим. Крім того, реалізовано ручний режим керування, який використовується для налагодження та уточнення положення виконавчого механізму оператором. Кожен із основних

режимів функціонування реалізується окремим алгоритмом, що визначає послідовність дій системи залежно від поставленої задачі.

Алгоритм автоматичного режиму

Автоматичний режим призначений для встановлення положення виконавчого механізму, яке відповідає заданому значенню ступеня поляризації. У цьому режимі використовується калібрувальна залежність між кутом повороту оптичного елемента та значенням DOLP.

На початковому етапі здійснюється введення заданого значення $DOLP_{set}$, після чого на основі калібрувальної моделі визначається відповідне значення кута повороту θ . Отримане значення кута перераховується у кількість кроків виконавчого механізму, після чого формується керуючий сигнал на кроковий двигун.

Після завершення переміщення здійснюється вимірювання фактичного значення $DOLP_{meas}$ та обчислення похибки як різниці між заданим і вимірним значеннями. У разі перевищення допустимого значення похибки виконується корекція положення виконавчого механізму шляхом додаткового переміщення на величину ΔN кроків. Процес повторюється до досягнення заданої точності.

Таким чином, автоматичний режим реалізує ітераційний процес підведення системи до заданого значення ступеня поляризації.

Схему алгоритму автоматичного режиму наведено на рис. 3.6.

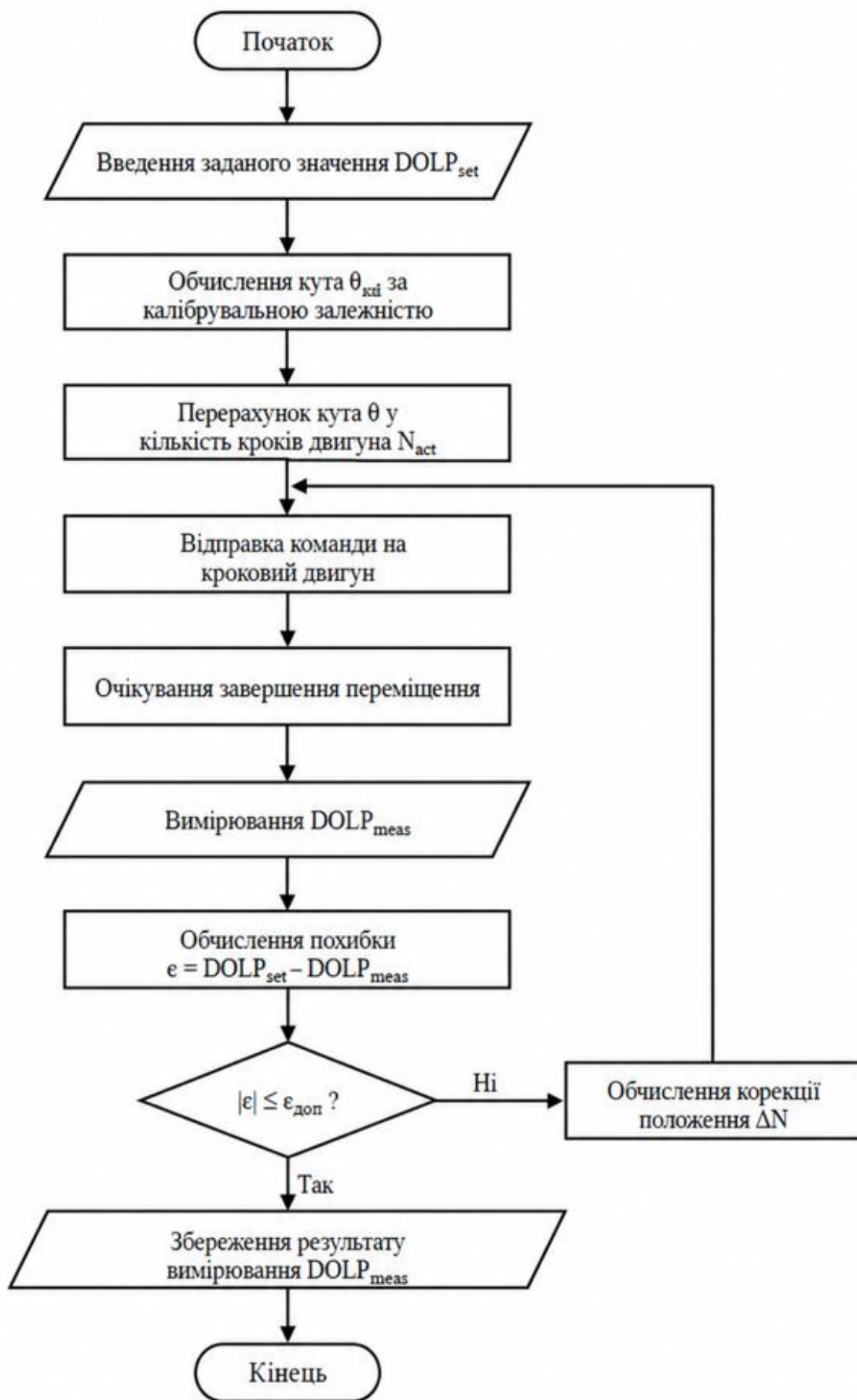


Рисунок 3.6 – Схема алгоритму автоматичного режиму

Алгоритм режиму стабілізації

Режим стабілізації призначений для підтримання заданого значення ступеня поляризації в умовах можливих зовнішніх впливів та нестабільності параметрів системи.

Після встановлення початкового положення виконавчого механізму здійснюється періодичне вимірювання значення $DOLP_{meas}$. На основі отриманих даних визначається похибка керування, яка використовується для формування коригувального сигналу.

У випадку, якщо значення похибки перевищує допустимий поріг, виконується обчислення корекції положення виконавчого механізму ΔN , після чого формується керуючий сигнал на двигун. Після завершення переміщення процес вимірювання повторюється.

Якщо похибка знаходиться в межах допустимого значення, система переходить у режим утримання положення з періодичним контролем параметра DOLP за допомогою таймера. Таким чином забезпечується стабілізація параметра у заданому діапазоні.

Режим стабілізації реалізує замкнений контур керування з постійним зворотним зв'язком, що дозволяє компенсувати вплив зовнішніх збурень.

Схему алгоритму режиму стабілізації наведено на рис. 3.7.

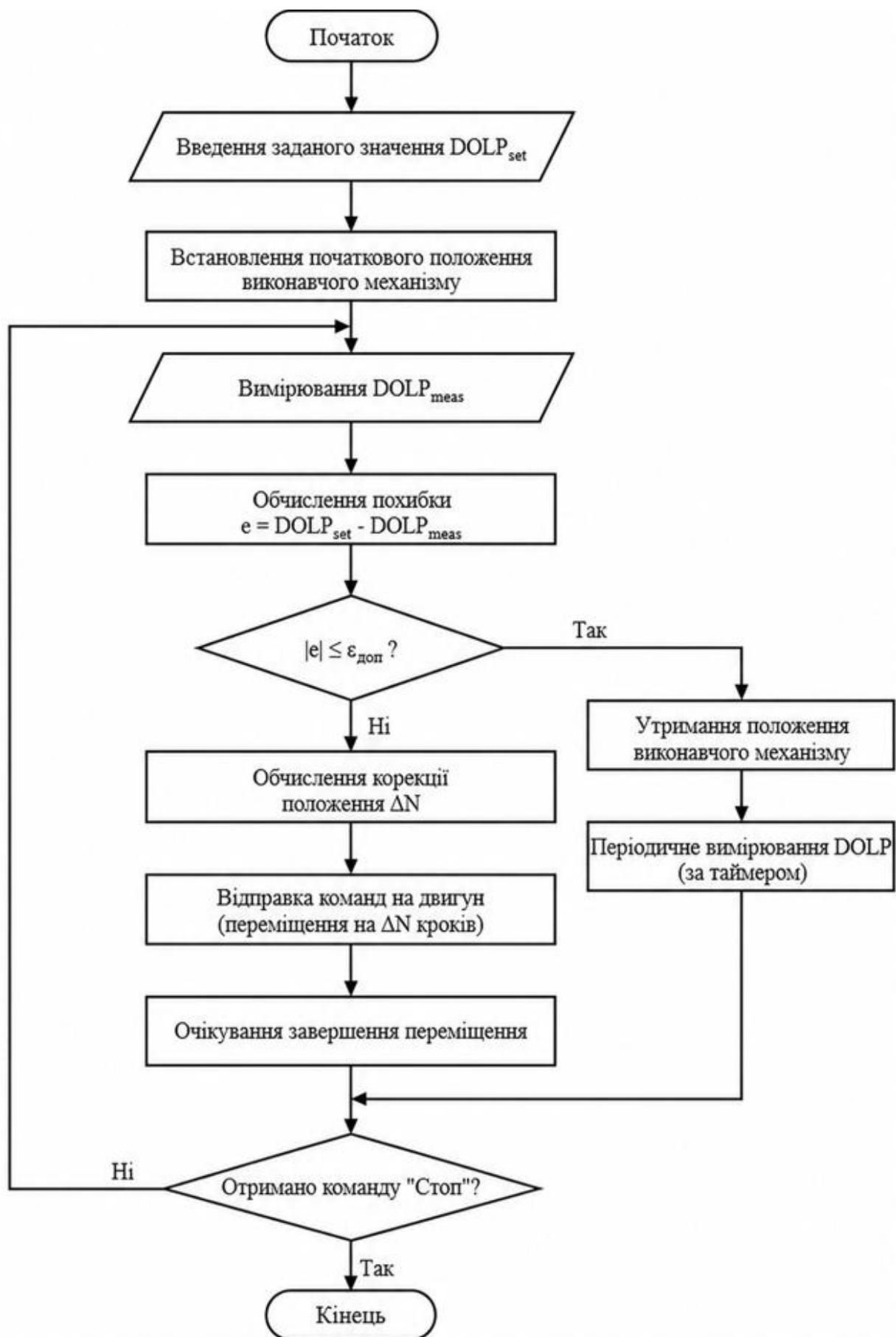


Рисунок 3.7 – Схема алгоритму режиму стабілізації

Алгоритм калібрувального режиму

Калібрувальний режим використовується для формування залежності між кутом повороту виконавчого механізму та значенням ступеня поляризації, яка надалі застосовується в автоматичному режимі.

На початковому етапі задаються параметри калібрування: мінімальне та максимальне значення кута θ_{min} і θ_{max} , а також крок зміни $\Delta\theta$. Далі виконується послідовне переміщення виконавчого механізму в заданому діапазоні кутів.

Для кожного значення кута здійснюється вимірювання ступеня поляризації, після чого відповідна пара значень $(\theta, DOLP_{meas})$ записується у таблицю. Після проходження всього діапазону кутів виконується обробка отриманих даних, яка включає фільтрацію, усереднення та формування калібрувальної таблиці або апроксимаційної моделі (LUT).

Сформована залежність зберігається у пам'яті системи або у файлі та використовується при подальшому функціонуванні автоматичного режиму.

Схему алгоритму калібрувального режиму наведено на рис. 3.8.

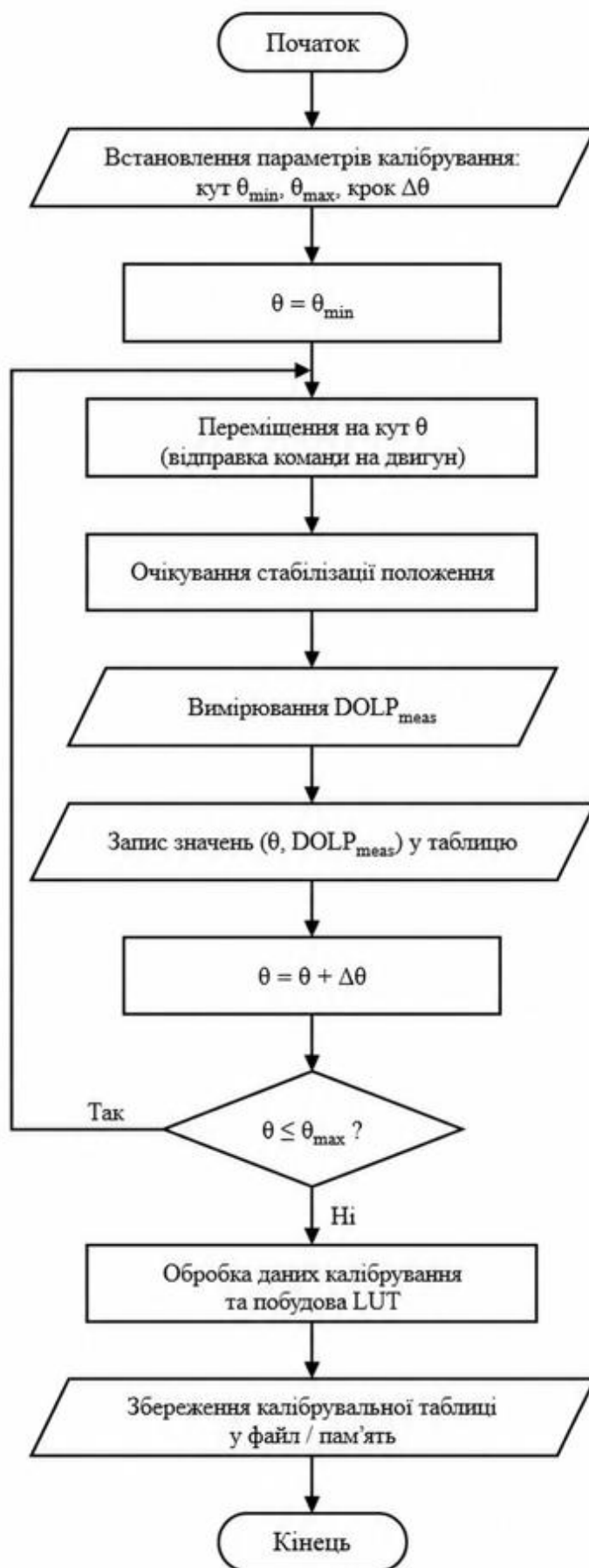


Рисунок 3.8 – Схема алгоритму режиму калібрування

Таким чином, алгоритмічне забезпечення автоматизованої системи керування забезпечує реалізацію процесів встановлення, підтримання та калібрування ступеня поляризації випромінювання. Використання різних режимів роботи дозволяє забезпечити як точне досягнення заданого значення параметра, так і його стабілізацію в умовах зовнішніх впливів, що підвищує ефективність та надійність функціонування системи в цілому.

3.6. Програмне забезпечення автоматизованої системи

Програмне забезпечення автоматизованої системи керування (АСК) являє собою сукупність програмних засобів, що забезпечують реалізацію алгоритмів керування, обробку інформації та взаємодію між складовими системи [48]. Основним призначенням програмного забезпечення є перетворення вхідних даних у керуючі впливи на об'єкт керування, а також забезпечення зворотного зв'язку та контролю параметрів процесу. Схему програмного забезпечення АСК наведено на рис. 3.9.

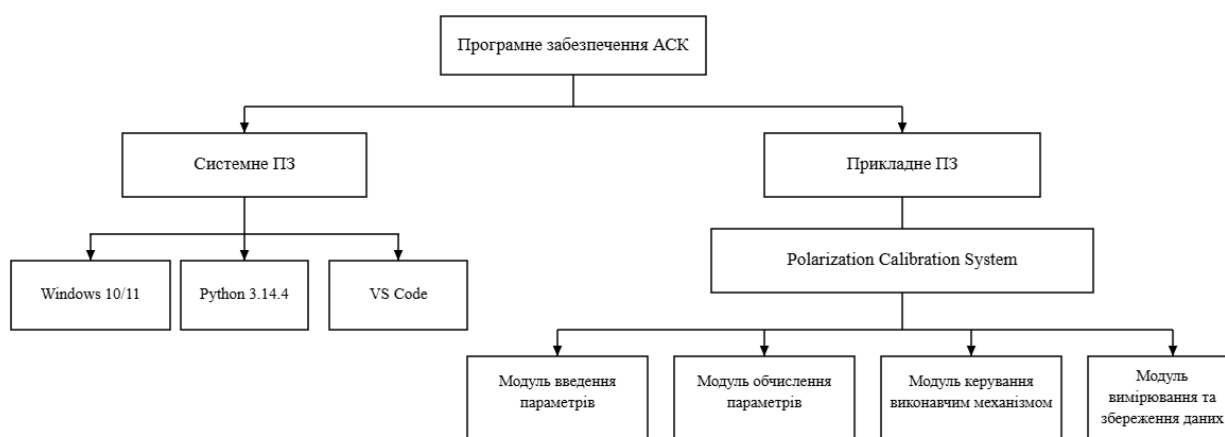


Рисунок 3.9 - Схема програмного забезпечення АСК керування параметрами поляризації

Системне програмне забезпечення включає операційну систему Windows 10/11, мову програмування Python версії 3.14.4 та середовище розробки Visual Studio Code, що забезпечують створення, виконання та налагодження прикладної програми.

Прикладне програмне забезпечення реалізовано у вигляді програмного комплексу «Polarization Calibration System», який забезпечує автоматизоване керування ступенем лінійної поляризації випромінювання. Програма побудована за модульним принципом, що дозволяє розділити функціональність системи на окремі логічні компоненти.

До складу прикладного програмного забезпечення входять такі основні модулі:

- модуль введення параметрів, який забезпечує введення заданого значення ступеня поляризації, вибір режиму роботи та встановлення параметрів керування;
- модуль обчислення параметрів, який реалізує математичні залежності, наведені у підрозділі 3.4, та виконує розрахунок кута повороту оптичного елемента і величини похибки;
- модуль керування виконавчим механізмом, який формує керуючі сигнали та забезпечує переміщення приводу відповідно до розрахованих значень;
- модуль вимірювання та збереження даних, який забезпечує отримання поточних значень ступеня поляризації, їх обробку та збереження результатів у вигляді електронного журналу.

Функціонування програмного забезпечення базується на реалізації замкненого контуру керування, у якому результати вимірювання використовуються для корекції керуючого впливу. Це дозволяє забезпечити високу точність встановлення заданого значення ступеня поляризації та стійкість системи до впливу зовнішніх факторів.

Взаємодія програмного забезпечення з апаратною частиною системи здійснюється за допомогою інтерфейсу послідовного зв'язку. У якості керуючого пристрою використовується мікроконтролер Arduino Nano, який виконує функції прийому команд керування від персонального комп'ютера та формування сигналів для виконавчого механізму.

Передача даних між програмним забезпеченням та мікроконтролером здійснюється через СОМ-порт із використанням послідовного протоколу обміну. Програма формує керуючі команди у вигляді значень кута повороту або кількості кроків, які передаються до мікроконтролера. У свою чергу, мікроконтролер забезпечує виконання цих команд та передає назад інформацію про стан системи.

Керування виконавчим механізмом реалізується за допомогою драйвера крокового двигуна, який забезпечує формування імпульсів керування та регулювання режимів роботи двигуна. Драйвер виконує функцію підсилення сигналів керування та забезпечує узгодження між мікроконтролером і силовою частиною приводу.

Використання мікроконтролера Arduino Nano у поєднанні з драйвером крокового двигуна дозволяє реалізувати точне позиціонування виконавчого механізму, що є необхідною умовою для забезпечення заданих параметрів поляризації випромінювання.

Після запуску програмного забезпечення відкривається головне вікно програми, яке наведено на рис. 3.10.

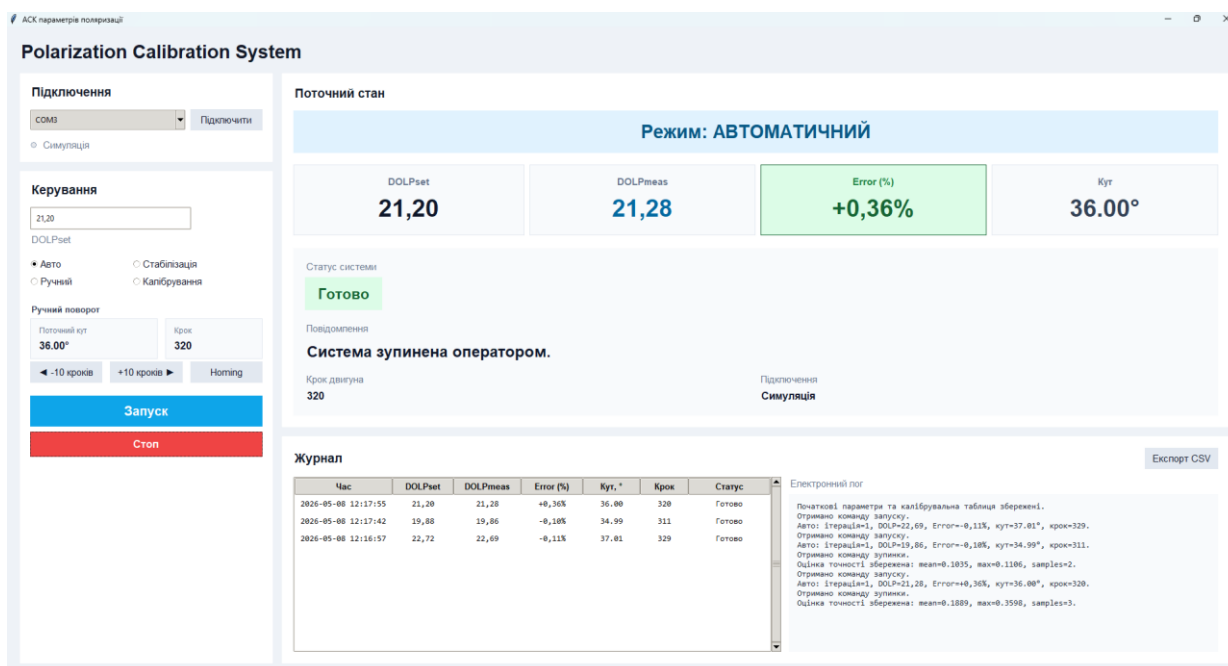


Рисунок 3.10 – Головне вікно програми «Polarization Calibration System»

У головному вікні користувач здійснює підключення до апаратної частини системи через COM-порт, а також вводить задане значення ступеня поляризації ($DOLP_{set}$). Крім того, передбачено можливість вибору режиму роботи системи, зокрема автоматичного, ручного та режиму калібрування.

У блоці керування користувач має можливість виконувати ручне переміщення виконавчого механізму за допомогою кнопок зміни положення на задану кількість кроків, а також здійснювати повернення системи у початкове положення (Homing).

Головне вікно також містить кнопки керування процесом, що забезпечують запуск роботи системи, її зупинку та перехід до режиму калібрування.

У процесі роботи програми у центральній частині вікна відображаються основні параметри системи, а саме задане значення ступеня поляризації, виміряне значення, відносна похибка та поточний кут повороту оптичних пластин.

У нижній частині вікна розташовано журнал роботи системи, у якому відображаються результати вимірювань, включаючи значення DOLP, похибку, кут повороту та положення виконавчого механізму. Поряд із журналом відображається електронний лог, який містить інформацію про виконання команд та зміну станів системи.

У процесі виконання програми використовується набір змінних, що представлені в табл. 3.5, де наведено їх функціональне призначення.

Таблиця 3.5 – Основні змінні програмного забезпечення

Назва змінної	Тип	Призначення
target_dolp	double	Задане значення DOLP
measured_dolp	double	Поточне виміряне значення DOLP
error	double	Похибка між заданим і виміряним DOLP
current_angle_deg	double	Поточний кут повороту пластин, °

Продовження таблиці 3.5

current_step	int	Поточне положення двигуна у мікрокроках
step_angle_deg	double	Кут одного повного кроку двигуна, °
microstep_factor	int	Коефіцієнт мікрокроку драйвера
max_angle_deg	double	Максимальний кут повороту пластин, °
tolerance	double	Допустима похибка DOLP
mode	string	Режим роботи системи
status	string	Поточний стан системи
calibration_lut	list	Таблиця відповідності DOLP та кута
target_angle	double	Розрахований кут для заданого DOLP
correction_angle	double	Корекція кута при перевищенні похибки
history	list	Журнал результатів роботи системи

Таким чином, розроблене програмне забезпечення забезпечує реалізацію алгоритмів автоматизованого керування параметрами поляризації, дозволяє досягати заданого значення ступеня лінійної поляризації та здійснювати контроль і аналіз результатів роботи системи.

3.7. Результати моделювання та дослідження роботи автоматизованої системи керування

Для перевірки працездатності розробленої автоматизованої системи керування проведено моделювання її функціонування. Основною метою моделювання є оцінка точності встановлення заданого значення ступеня лінійної поляризації та перевірка коректності роботи алгоритму керування виконавчим механізмом.

Під час моделювання користувач задавав необхідне ступінь поляризації (DOLP), після чого програма визначала відповідний кут повороту оптичних пластин, перераховувала його у кількість кроків двигуна та формувала отримане

значення ступеня поляризації. Для кожного заданого значення визначалась відносна похибка між заданим та отриманим значеннями DOLP. Результати моделювання роботи автоматизованої системи наведено в табл. 3.6.

Таблиця 3.6 – Результати моделювання роботи АСК

$DOLP_{set}$	$DOLP_{meas}$	Відносна похибка, %	Кут, °
0,45	0,46	0,96	5,62
1,44	1,43	0,62	10,01
3,28	3,27	0,45	14,96
5,95	5,96	0,24	20,03
9,52	9,51	0,12	24,98
14,13	14,17	0,30	30,04
19,88	19,86	0,10	34,99
26,88	26,96	0,31	40,05
35,21	35,25	0,11	45,00
44,82	44,72	0,21	49,95

На основі отриманих результатів побудовано графік залежності відносної похибки від заданого значення ступеня поляризації (рис. 3.11).

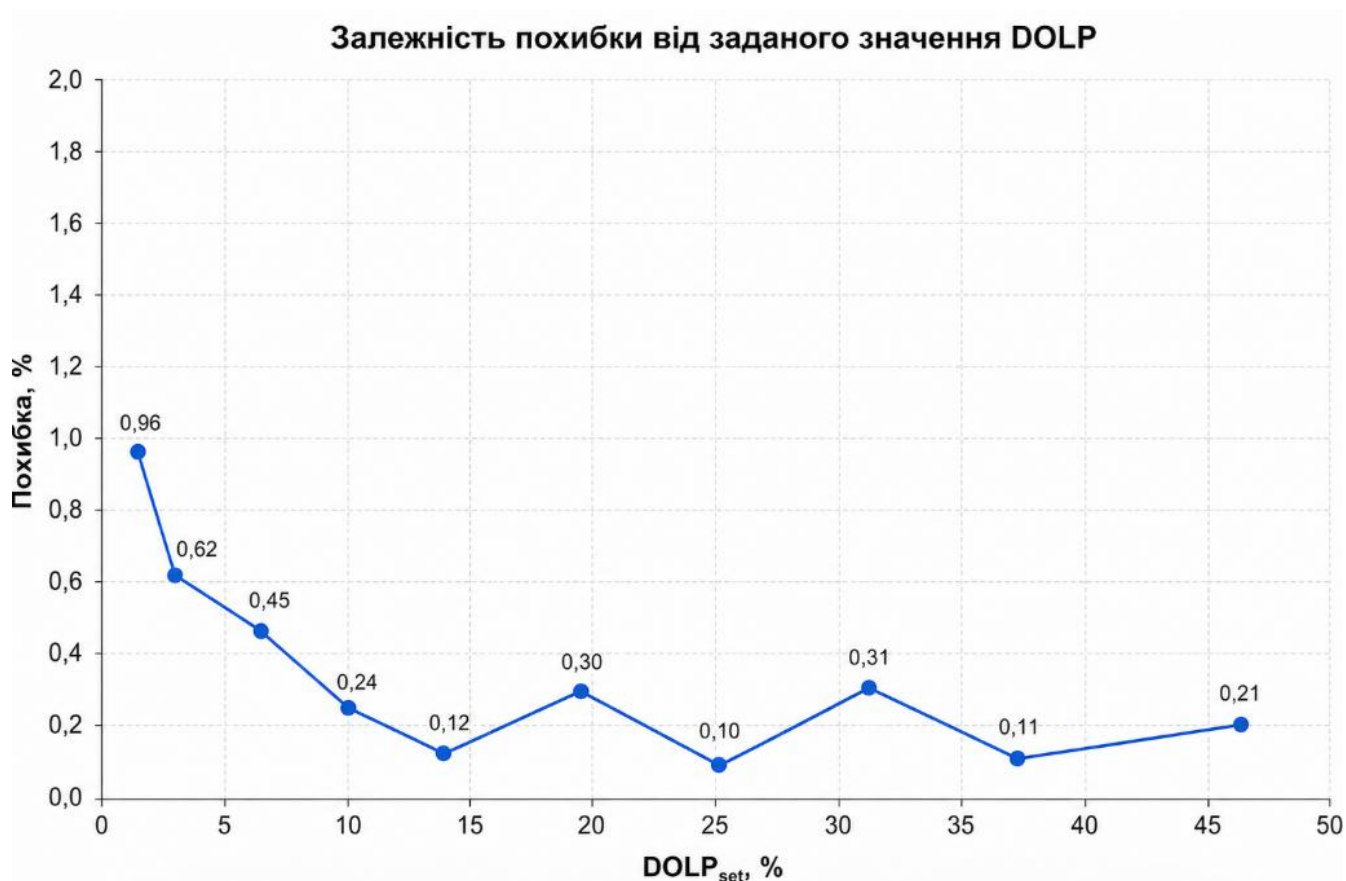


Рисунок 3.11 - Графік залежності відносної похибки від заданого значення ступеня поляризації

Як видно з графіка, найбільше значення похибки спостерігається при мінімальному значенні DOLP і становить 0,96 %. Це пояснюється підвищеною чутливістю системи до зміни кута повороту виконавчого механізму в області малих значень ступеня поляризації.

При збільшенні значення DOLP похибка суттєво зменшується і в більшості випадків знаходиться в межах 0,1–0,5 %. У середньому та високому діапазонах значень спостерігається стабілізація похибки без різких коливань, що свідчить про коректну роботу алгоритму керування.

Невеликі локальні відхилення значень похибки пов'язані з дискретністю крокового двигуна та особливостями перетворення кута повороту у значення ступеня поляризації.

Для оцінки підвищення точності розробленої автоматизованої системи виконано порівняльне моделювання впливу похибки позиціювання оптичного блока на похибку формування заданого значення *DOLP*. Таке моделювання є

доцільним, оскільки у розробленій АСК керуючим впливом є кут нахилу оптичного блока, а вихідною керованою величиною є ступінь лінійної поляризації. Отже, неточність встановлення кута безпосередньо впливає на сформоване значення *DOLP*.

Розрахунок виконано на основі отриманої калібрувальної залежності *DOLP* від кута нахилу оптичного блока для обраної конфігурації з двома парами похилих діелектричних пластин. Для кожного номінального кута, що відповідає заданому значенню *DOLP*, було змодельовано відхилення кута на величину $\pm 0,1^\circ$, $\pm 0,5^\circ$ та $\pm 2^\circ$. Значення $\pm 0,1^\circ$ відповідає режиму автоматизованого позиціювання оптичного блока, $\pm 0,5^\circ$ - підвищеній точності ручного або напівавтоматичного встановлення, а $\pm 2^\circ$ - ручному налаштуванню з впливом людського фактору.

Точність позиціювання в розробленій системі забезпечується використанням крокового двигуна з мікрокроковим керуванням, програмним перерахунком необхідного кута нахилу у кількість керуючих імпульсів та подальшою корекцією положення за відхиленням сформованого значення *DOLP*. При цьому основним критерієм точності роботи системи є не лише зміна заданого кута, а також досягнення заданого значення ступеня лінійної поляризації.

Результати порівняльного моделювання наведено на рис. 3.12.

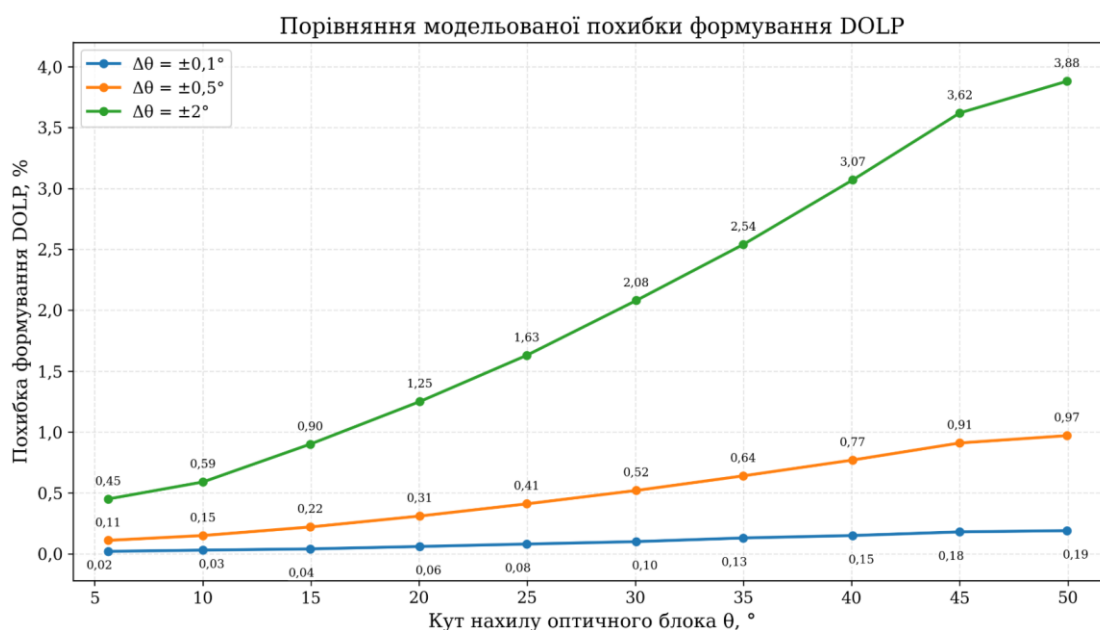


Рисунок 3.12 – Порівняння модельованої похибки формування *DOLP* для різних значень похибки позиціювання оптичного блока

З рис. 3.12 видно, що при похибці позиціювання $\pm 0,1^\circ$ модельована похибка формування DOLP залишається незначною в усьому дослідженому діапазоні кутів і при куті близько 50° становить приблизно 0,19 %. Це підтверджує, що автоматизоване позиціювання оптичного блока забезпечує достатню точність встановлення кута для формування заданих значень DOLP.

При збільшенні похибки позиціювання до $\pm 0,5^\circ$ похибка формування DOLP зростає до приблизно 0,97 % у зоні великих кутів. Це значення є близьким до максимальної похибки, отриманої під час моделювання роботи розробленої АСК, яка становила 0,96 %. Найбільше відхилення спостерігається для випадку $\pm 2^\circ$, що відповідає менш точному ручному налаштуванню: при куті близько 50° модельована похибка формування DOLP досягає приблизно 3,88 %.

Таким чином, результати моделювання показують, що основне підвищення точності розробленої системи забезпечується за рахунок зменшення похибки позиціювання оптичного блока. Якщо при ручному налаштуванні кутова похибка може призводити до відхилення DOLP на рівні кількох відсотків, то автоматизоване позиціювання дозволяє зменшити цю складову похибки до часток відсотка. Це узгоджується з результатами моделювання роботи АСК, для якої максимальна відносна похибка формування DOLP становила 0,96 %, а середня – близько 0,34 %.

Для оцінки роботи алгоритму керування побудовано графік збіжності, який відображає зміну значення ступеня поляризації в процесі ітераційного коригування (рис. 3.13).

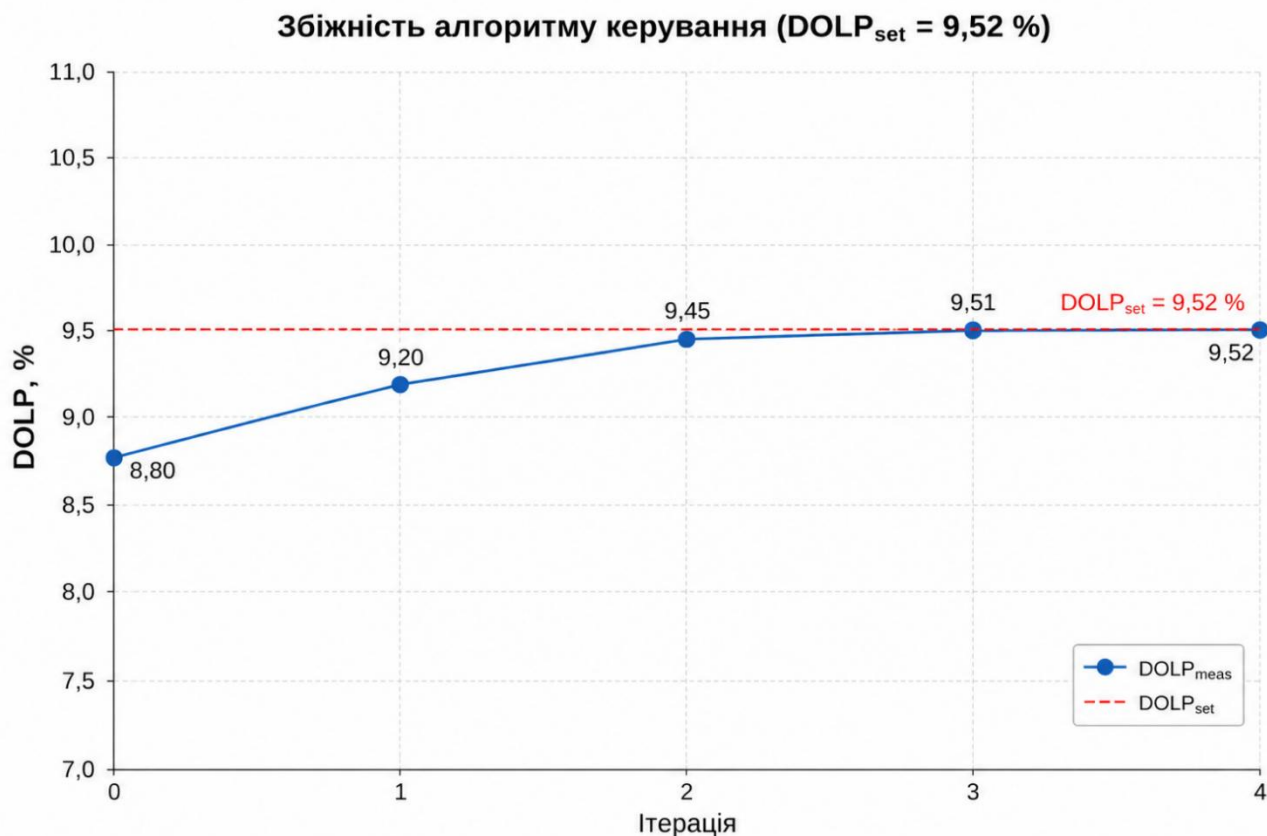


Рисунок 3.13 – Збіжність алгоритму керування

Як видно з графіка, на початковому етапі значення $DOLP$ має суттєве відхилення від заданого і становить 8,80 % при необхідному значенні 9,52 %. У подальшому в результаті роботи алгоритму керування відбувається поступове наближення до заданого значення.

Вже на другій ітерації значення $DOLP$ становить 9,45 %, а на третій – 9,51 %, що практично відповідає заданому значенню. Остаточне встановлення параметра відбувається без значного перерегулювання. Алгоритм керування забезпечує швидку збіжність і дозволяє досягти заданого значення ступеня поляризації за 3–4 ітерації, що свідчить про ефективність та стійкість роботи системи.

Таким чином, результати моделювання підтверджують працездатність розробленої автоматизованої системи керування параметрами поляризації. Отримані значення похибки знаходяться у допустимих межах у всьому робочому діапазоні, а алгоритм керування забезпечує швидке досягнення заданого значення без значного перерегулювання.

Це свідчить про ефективність реалізованого підходу та можливість використання системи для задач калібрування і дослідження параметрів поляризації оптичного випромінювання.

Висновки до розділу 3

У третьому розділі розроблено структуру автоматизованої системи керування зміною параметрів поляризації штучного джерела випромінювання. Запропонована система включає оптичний блок, виконавчий механізм, блок керування, програмне забезпечення та вимірювальний канал зворотного зв'язку.

Виконано вибір апаратної елементної бази та розроблено інформаційне, математичне, алгоритмічне і програмне забезпечення АСК. Розроблені рішення забезпечують введення заданого значення DOLP, визначення відповідного кута нахилу оптичного блока, формування керуючого сигналу для виконавчого механізму, корекцію положення оптичних елементів та оцінювання похибки досягнення заданого поляризаційного стану.

Проведено комп'ютерну апробацію роботи автоматизованої системи керування. За результатами моделювання встановлено, що система забезпечує формування заданих значень DOLP у діапазоні від 0,45 % до 44,82 % з максимальною відносною похибкою 0,96 %, а середня похибка становить близько 0,34 %. Також показано, що автоматизоване позиціонування дозволяє зменшити вплив кутової похибки порівняно з ручним налаштуванням: при похибці позиціонування $\pm 0,1^\circ$ відхилення DOLP становить близько 0,19 %, тоді як для грубого ручного налаштування $\pm 2^\circ$ може досягати приблизно 3,88 %.

Отримані результати підтверджують працездатність запропонованої структури АСК, коректність роботи алгоритму керування та можливість її використання для автоматизованого формування заданих значень ступеня лінійної поляризації під час лабораторного тестування та калібрування поляриметричних приладів.

ВИСНОВКИ

У магістерській дисертації вирішено актуальну науково-прикладну задачу підвищення ефективності тестування та калібрування поляриметричних приладів шляхом створення автоматизованої системи керування параметрами поляризації штучного джерела випромінювання. Проведений аналіз показав, що ручне налаштування оптичних елементів обмежує точність і повторюваність формування заданих поляризаційних станів, тому доцільним є застосування автоматизованої системи зі зворотним зв'язком.

У ході роботи було обґрунтовано структуру системи, у якій керованою величиною є ступінь лінійної поляризації DOLP, а керуючим впливом – кутове положення оптичного блока. На основі моделювання процесу формування поляризації встановлено робочий діапазон зміни DOLP від малих значень менше 1 % до приблизно 45 %. Для обраної конфігурації при куті нахилу 50° отримано значення DOLP близько 45,44 %, що є достатнім для задач лабораторного тестування поляриметрів.

Основним результатом роботи є розроблена автоматизована система керування, до складу якої входять штучне джерело випромінювання, оптичний блок формування поляризації, виконавчий механізм кутового позиціювання, блок керування, програмне забезпечення та вимірювальний канал зворотного зв'язку. Система забезпечує введення заданого значення DOLP, визначення відповідного кута нахилу оптичного блока, формування керуючого сигналу та корекцію положення оптичних елементів за результатами вимірювання.

Розроблено алгоритм і програмне забезпечення для автоматизованого керування процесом формування заданого ступеня лінійної поляризації. Програмна частина забезпечує роботу з калібрувальною залежністю, розрахунок кута повороту, формування команд для виконавчого механізму та відображення результатів роботи системи. Це дозволяє зменшити участь оператора у процесі налаштування та підвищити повторюваність формування поляризаційних станів.

Проведене моделювання роботи АСК підтвердило працездатність запропонованого алгоритму керування та можливість автоматизованого досягнення заданих значень ступеня лінійної поляризації. Для заданих значень DOLP у діапазоні від 0,45 % до 44,82 % отримано узгодження між заданими та змодельованими значеннями. Максимальна похибка становила 0,96 % у зоні малих значень DOLP, а для більшості досліджених режимів знаходилась у межах 0,10–0,62 %.

Отримані результати мають практичне значення для створення та вдосконалення лабораторних стендів автоматизованого формування заданих значень DOLP при тестуванні та калібруванні поляриметричних приладів. Використання розробленої структури АСК, калібрувальних залежностей і програмно-алгоритмічного забезпечення дозволяє зменшити вплив людського фактора, підвищити повторюваність налаштування та скоротити час підготовки калібрувальних процедур.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Колобродов В. Г. Хвильова оптика. Частина 2. Дифракція і поляризація світла : підручник. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. 230 с.
2. Tyo J. S., Goldstein D. L., Chenault D. B., Shaw J. A. Review of passive imaging polarimetry for remote sensing applications. *Applied Optics*. 2006. Vol. 45, No. 22. P. 5453–5469. DOI: <https://doi.org/10.1364/AO.45.005453>.
3. Dubovik O. et al. Polarimetric remote sensing of atmospheric aerosols: instruments, methodologies, results, and perspectives. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. 2019. Vol. 224. P. 474–511. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2018.11.024>.
4. He C., He H., Chang J., Chen B., Ma H., Booth M. J. Polarisation optics for biomedical and clinical applications: a review. *Light: Science & Applications*. 2021. Vol. 10. Article 194. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41377-021-00639-x>.
5. Gil J. J., Ossikovski R. *Polarized Light and the Mueller Matrix Approach*. Boca Raton : CRC Press, 2016. 405 p. DOI: <https://doi.org/10.1201/b19711>.
6. Chipman R. A., Lam W. S. T., Young G. *Polarized Light and Optical Systems*. Boca Raton : CRC Press, 2018. 982 p. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781351129121>.
7. Goldstein D. H. *Polarized Light*. 3rd ed. Boca Raton : CRC Press, 2011. 808 p. DOI: <https://doi.org/10.1201/b10436>.
8. Лабораторна робота з хвильової оптики: Поляризація світла. URL: https://bog5.in.ua/lection/labrab/wave_optics/labrab84ukrnew1.html (дата звернення: 06.03.2026).
9. Collett E. *Field Guide to Polarization*. Bellingham : SPIE Press, 2005. 148 p.
10. Paschotta R. Polarizers. *RP Photonics Encyclopedia*. URL: <https://www.rp-photonics.com/polarizers.html> (дата звернення: 06.03.2026).
11. Soliton Laser- und Messtechnik GmbH. Dichroic Circular Polarizers. URL: <https://soliton-gmbh.de/produkt/dichroic-circular-polarizer/> (дата звернення: 06.03.2026).

12. Thorlabs Inc. Glan-Thompson Polarizers. URL: <https://www.thorlabs.com/glan-thompson-polarizers?tabName=Overview> (дата звернення: 06.03.2026).
13. Thorlabs Inc. Brewster Windows. URL: <https://www.thorlabs.com/brewster-windows?tabName=Overview> (дата звернення: 07.03.2026).
14. Thorlabs Inc. Choosing a Wave Plate. URL: <https://www.thorlabs.com/choosing-a-wave-plate> (дата звернення: 07.03.2026).
15. Mahler A.-B., Diner D. J., Chipman R. A. Polarization state generator: a polarimeter calibration standard. *Applied Optics*. 2011. Vol. 50, No. 12. P. 1726–1734. DOI: <https://doi.org/10.1364/AO.50.001726>.
16. Paschotta R. Brewster Plates. *RP Photonics Encyclopedia*. URL: https://www.rp-photonics.com/brewster_plates.html (дата звернення: 07.03.2026).
17. Gao S., Gruev V. Bilinear and bicubic interpolation methods for division of focal plane polarimeters. *Optics Express*. 2011. Vol. 19, No. 27. P. 26161–26173. DOI: <https://doi.org/10.1364/OE.19.026161>.
18. Powell S. B., Gruev V. Calibration methods for division-of-focal-plane polarimeters. *Optics Express*. 2013. Vol. 21, No. 18. P. 21039–21055. DOI: <https://doi.org/10.1364/OE.21.021039>.
19. Syniavskyi I. I., Ivanov Y. S., Sosonkin M. H., Milinevsky G. P., Koshman H. V. Multispectral imager-polarimeter of the Aerosol-UA space project. *Space Science and Technology*. 2018. Vol. 24, No. 3. P. 23–32. DOI: <https://doi.org/10.15407/knit2018.03.023>.
20. Slezák O., Sawicka-Chyla M., Divoký M., Pilař J., Smrž M., Mocek T. Thermal-stress-induced birefringence management of complex laser systems by means of polarimetry. *Scientific Reports*. 2022. Vol. 12. Article 18334. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-22698-9>.
21. De Martino A., Kim Y.-K., Garcia-Caurel E., Laude B., Dré villon B. Optimized Mueller polarimeter with liquid crystals. *Optics Letters*. 2003. Vol. 28, No. 8. P. 616–618. DOI: <https://doi.org/10.1364/OL.28.000616>.
22. Заболотна Н. І., Швидюк О. С. Система та метод поляриметричного калібрування оптичних компонентів на основі мюллер-матричного підходу.

Опτικο-електронні інформаційно-енергетичні технології. 2025. № 50(2). С. 293–299. DOI: <https://doi.org/10.31649/1681-7893-2025-50-2-293-299>.

23. Thorlabs Inc. Polarimeter Systems with High Dynamic Range. URL: <https://www.thorlabs.com/polarimeter-systems-with-high-dynamic-range> (дата

звернення: 07.03.2026).

24. Meadowlark Optics. Liquid Crystal Polarization Rotators : DS0225-LPR. URL: [https://www.meadowlark.com/wp-content/uploads/2025/03/Liquid-Crystal-](https://www.meadowlark.com/wp-content/uploads/2025/03/Liquid-Crystal-Polarization-Rotators-DS0225-LPR.pdf)

[Polarization-Rotators-DS0225-LPR.pdf](https://www.meadowlark.com/wp-content/uploads/2025/03/Liquid-Crystal-Polarization-Rotators-DS0225-LPR.pdf) (дата звернення: 11.03.2026).

25. Hinds Instruments. PEM-100 Controller Product Bulletin. URL: [https://www.hindsinstruments.com/wp-content/uploads/PEM-100-Controller-Product-](https://www.hindsinstruments.com/wp-content/uploads/PEM-100-Controller-Product-Bulletin.pdf)

[Bulletin.pdf](https://www.hindsinstruments.com/wp-content/uploads/PEM-100-Controller-Product-Bulletin.pdf) (дата звернення: 11.03.2026).

26. Анісімов Д. Д., Синявський І. І. Аналіз схемних побудов пристроїв для калібрування поляризаційних приладів. *Погляд у майбутнє приладобудування* : збірник праць XVIII Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених, м. Київ, 13–14 травня 2025 р. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2025. С. 32–35.

27. Calibration system and method for calibration of various types of polarimeters : patent US7034939B2. Publication date 25.04.2006. URL:

<https://patents.google.com/patent/US7034939B2> (дата звернення: 11.03.2026).

28. Highly accurate calibration of polarimeters : patent US6917427B2. Publication date 12.07.2005. URL: <https://patents.google.com/patent/US6917427B2> (дата

звернення: 11.03.2026).

29. Polychromatic polarization state generator and its application for real-time birefringence imaging : patent US9625369B2. URL:

<https://patents.google.com/patent/US9625369B2/en> (дата звернення: 11.03.2026).

30. Newport Corporation. RS Low-Profile Rotation Stages. URL: <https://www.newport.com/f/rs-low-profile-rotation-stages> (дата

звернення: 15.05.2026).

31. Приймак Б. І. Теорія автоматичного керування. Лінійні системи : навч. посіб. для студентів спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. 310 с.
32. Paschotta R. Fresnel Equations. RP Photonics Encyclopedia. URL: https://www.rp-photonics.com/fresnel_equations.html (дата звернення: 01.05.2026).
33. Анісімов Д. Д., Синявський І. І., Оберемок Є. А. Генератор частково поляризованого оптичного випромінювання для тестування та калібрування поляриметрів. Ефективність та автоматизація інженерних рішень у приладобудуванні : матеріали XX Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених, Київ, 04–05 грудня 2024 р. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. С. 38–41.
34. Кравченко І. В., Микитенко В. І., Тимчик Г. С. Комп'ютерне моделювання: системи і процеси : підручник. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 215 с.
35. Ansys Inc. Ansys Zemax OpticStudio. URL: <https://www.ansys.com/products/optics/ansys-zemax-opticstudio> (дата звернення: 03.05.2026).
36. Hawkins K., Herringer N. Investigating OpticStudio's polarization features. Ansys Zemax Knowledgebase. URL: <https://optics.ansys.com/hc/en-us/articles/42661755401747-Investigating-OpticStudio-s-polarization-features> (дата звернення: 05.05.2026).
37. Муравйов О. В. Автоматизація проєктування елементів оптичних приладів : практикум : навч. посіб. для студентів спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології». Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 68 с.
38. Corning Incorporated. HPFS Fused Silica Standard Grade Materials. URL: <https://www.corning.com/worldwide/en/products/advanced-optics/product-materials/hpfs-fused-silica-standard-grade-materials.html> (дата звернення: 10.05.2026).
39. Edmund Optics. Sapphire Windows. URL: <https://www.edmundoptics.com/f/sapphire-windows/12234/> (дата звернення: 10.05.2026).

40. SCHOTT AG. Optical Glass Datasheet SCHOTT N-BK7. Mainz : SCHOTT AG, 2023. URL: <https://media.schott.com/api/public/content/41e799d0bf874807a0bb8e702fbb75b5?v=54856406> (дата звернення: 12.05.2026).
41. SCHOTT AG. TIE-29: Refractive Index and Dispersion. Mainz : SCHOTT AG. URL: <https://media.schott.com/api/public/content/aaa572afd854434fb7b3faa4bc46103f?v=c0f4fa52> (дата звернення: 12.05.2026).
42. Анісімов Д. Д., Синявський І. І. Автоматизована система керування зміною параметрів поляризації штучного джерела випромінювання. Погляд у майбутнє приладобудування : матеріали XIX Науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених, м. Київ, 12–13 травня 2026 р. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2026.
43. Баган Т. Г., Бунь В. П. Сучасна теорія автоматичного керування : навч. посіб. для здобувачів ступеня магістра за освітньою програмою «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» спеціальності 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка». Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. 77 с.
44. Анісімов Д. Д., Синявський І. І. Адаптивна система формування еталонних станів часткової поляризації з контуром зворотного зв'язку. Вісник Київського політехнічного інституту. Серія Приладобудування. 2026. Вип. 71(1).
45. Arduino. Arduino Nano. Documentation. URL: <https://docs.arduino.cc/hardware/nano> (дата звернення: 12.05.2026).
46. StepperOnline. Nema 17 Stepper Motor 0.52Nm with 24V 3.7W Electromagnetic Brake. URL: <https://www.omc-stepperonline.com/nema-17-stepper-motor-0-52nm-73-64oz-in-with-24v-3-7w-electromagnetic-brake-17hs19-2004d-b070> (дата звернення: 15.05.2026).
47. Analog Devices. TMC2209 Datasheet. URL: https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/tmc2209_datasheet_rev1.09.pdf (дата звернення: 12.05.2026).

48. Бобух А. О. Автоматизовані системи керування технологічними процесами : навч. посіб. Харків : ХНАМГ, 2006. 185 с.
49. Сачок Р. В. Числові методи аналізу: теорія та завдання до комп'ютерного практикуму : навч. посіб. для студентів спеціальності 133 «Галузеве машинобудування». Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 134 с.

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А. ПРОГРАМНИЙ КОД ПРОГРАМИ «POLARIZATION CALIBRATION SYSTEM»

```

from dataclasses import asdict, dataclass, field
from datetime import datetime
from pathlib import Path
from bisect import bisect_left
from collections import deque
import csv, json, random, tkinter as tk
from tkinter import ttk

class SystemConfig:
    mode: str = "Автоматичний"
    step_angle_deg: float = 1.80
    microstep_factor: int = 16
    max_angle_deg: float = 50.0
    averaging_count: int = 8
    noise_level: float = 0.006
    correction_gain: float = 0.70
    auto_interval_ms: int = 700

class MeasurementRecord:
    timestamp: str
    target_dolp: float
    measured_dolp: float
    error: float
    angle_deg: float
    motor_step: int
    mode: str
    status: str

def now(cls, target_dolp, measured_dolp, error, angle_deg, motor_step, mode, status):
    return cls(datetime.now().strftime("%Y-%m-%d %H:%M:%S"), target_dolp,
               measured_dolp, error, angle_deg, motor_step, mode, status)

```

```

class SessionState:
    current_angle_deg: float = 0.0
    current_step: int = 0
    measured_dolp: float = 0.0
    error: float = 0.0
    status: str = "Готово до запуска"
    is_running: bool = False
    history: list[MeasurementRecord] = field(default_factory=list)

```

```

class PolarizationCalculator:
    max_dolp = 44.8184
    max_angle_deg = 50.0

    def estimate_angle(self, target_dolp):
        target = max(0.0, min(self.max_dolp, target_dolp))
        points = [item[0] for item in self.lut]
        idx = bisect_left(points, target)
        if idx <= 0:
            return self.lut[0][1]
        if idx >= len(self.lut):
            return self.lut[-1][1]
        d0, a0 = self.lut[idx - 1]
        d1, a1 = self.lut[idx]
        return self._interpolate(target, d0, a0, d1, a1)

    def predict_dolp(self, angle_deg):
        angle = max(0.0, min(self.max_angle_deg, angle_deg))
        points = [item[1] for item in self.lut]
        idx = bisect_left(points, angle)
        if idx <= 0:
            return self.lut[0][0]
        if idx >= len(self.lut):
            return self.lut[-1][0]
        d0, a0 = self.lut[idx - 1]
        d1, a1 = self.lut[idx]
        return self._interpolate(angle, a0, d0, a1, d1)

    def compute_error(self, target_dolp, measured_dolp):

```

```

if abs(target_dolp) < 1e-9:
    return 0.0 if abs(measured_dolp) < 1e-9 else 100.0
return (measured_dolp - target_dolp) / target_dolp * 100.0

```

```

def correction_angle(self, error_percent, target_dolp, gain=0.70):
    absolute_error = error_percent / 100.0 * max(target_dolp, 1e-9)
    correction = -absolute_error * (self.max_angle_deg / self.max_dolp) * gain
    return max(-5.0, min(5.0, correction))

```

```

def _interpolate(x, x0, y0, x1, y1):
    return y0 if x1 == x0 else y0 + (x - x0) / (x1 - x0) * (y1 - y0)

```

```

class StepperActuator:

```

```

    def __init__(self, step_angle_deg=1.80, microstep_factor=16):
        self.step_angle_deg = step_angle_deg
        self.microstep_factor = microstep_factor
        self.current_step = 0
        self.current_angle_deg = 0.0
        self.direction = "Стоїть"

```

```

    def angle_per_step(self):
        return self.step_angle_deg / max(1, self.microstep_factor)

```

```

    def angle_to_steps(self, angle_deg):
        return int(round(angle_deg / self.angle_per_step))

```

```

    def move_to_angle(self, target_angle_deg):
        target_steps = self.angle_to_steps(target_angle_deg)
        delta = target_steps - self.current_step
        self.direction = "Вперед" if delta > 0 else "Назад" if delta < 0 else "Стоїть"
        self.current_step = target_steps
        self.current_angle_deg = self.current_step * self.angle_per_step
        return self.current_step, self.current_angle_deg, self.direction

```

```

    def return_to_zero(self):
        self.current_step = 0
        self.current_angle_deg = 0.0

```

```

self.direction = "До нуля"
return self.current_step, self.current_angle_deg, self.direction

```

```

class MeasurementModule:

```

```

    def __init__(self, averaging_count=8, noise_level=0.006):
        self.averaging_count = averaging_count
        self.noise_level = noise_level
        self.buffer = deque(maxlen=averaging_count)

    def acquire(self, reference_dolp):
        raw = max(0.0, min(44.8184, reference_dolp + random.gauss(0.0, self.noise_level)))
        self.buffer.append(raw)
        return raw, sum(self.buffer) / len(self.buffer)

```

```

class StorageManager:

```

```

    def __init__(self, base_dir):
        self.data_dir = Path(base_dir) / "data"
        self.data_dir.mkdir(parents=True, exist_ok=True)
        self.measurements_path = self.data_dir / "measurements.csv"
        self.settings_path = self.data_dir / "equipment_settings.json"

    def save_settings(self, config):
        self.settings_path.write_text(json.dumps(asdict(config), ensure_ascii=False, indent=2),
                                       encoding="utf-8")

    def append_measurement(self, record):
        exists = self.measurements_path.exists()
        with self.measurements_path.open("a", encoding="utf-8", newline="") as handle:
            writer = csv.DictWriter(handle, fieldnames=list(asdict(record).keys()))
            if not exists:
                writer.writeheader()
            writer.writerow(asdict(record))

```

```

class MacStyleApp(tk.Tk):

```

```

    def __init__(self, base_dir):
        super().__init__()
        self.config_data = SystemConfig()
        self.session = SessionState()

```

```

self.calculator = PolarizationCalculator()
self.actuator = StepperActuator(self.config_data.step_angle_deg,
                                self.config_data.microstep_factor)
self.measurement = MeasurementModule(self.config_data.averaging_count,
                                     self.config_data.noise_level)
self.storage = StorageManager(base_dir)
self.after_id = None

def _parse_decimal(value):
    return float(str(value).strip().replace(",", "."))

def _allowed_error_percent(self, target_dolp=None):
    target = self.config_data.target_dolp if target_dolp is None else target_dolp
    return 5.0 if target < 1.0 else 3.0 if target < 10.0 else 1.5

def start_system(self):
    self.session.is_running = True
    self.session.status = "Виконується розрахунок кута та поворот пластин"
    positioned = self._run_automatic_positioning()
    if positioned and self.config_data.mode == "Стабілізація":
        self.after_id = self.after(self.config_data.auto_interval_ms,
                                   self._stabilization_cycle)

def stop_system(self):
    self.session.is_running = False
    if self.after_id:
        self.after_cancel(self.after_id)
        self.after_id = None
    self.session.status = "Система зупинена оператором"

def _run_automatic_positioning(self):
    target_angle = self.calculator.estimate_angle(self.config_data.target_dolp)
    for iteration in range(1, 7):
        step, angle, direction = self.actuator.move_to_angle(target_angle)
        measured = self.calculator.predict_dolp(angle)
        error = self.calculator.compute_error(self.config_data.target_dolp, measured)
        self._save_state(measured, error, angle, step, "Виконується")
        if abs(error) <= self._allowed_error_percent():

```

```

        break
    correction = self.calculator.correction_angle(error, self.config_data.target_dolp,
                                                    self.config_data.correction_gain)
    target_angle = max(0.0, min(self.config_data.max_angle_deg, angle + correction))
    self.session.is_running = False
    self.session.status = "Задане значення DOLP досягнуто"
    return abs(self.session.error) <= self._allowed_error_percent()

def _stabilization_cycle(self):
    measured = self.calculator.predict_dolp(self.session.current_angle_deg)
    error = self.calculator.compute_error(self.config_data.target_dolp, measured)
    if abs(error) > self._allowed_error_percent():
        angle = self.session.current_angle_deg + self.calculator.correction_angle(
            error, self.config_data.target_dolp, self.config_data.correction_gain)
        step, angle, direction = self.actuator.move_to_angle(angle)
        measured = self.calculator.predict_dolp(angle)
        error = self.calculator.compute_error(self.config_data.target_dolp, measured)
        self._save_state(measured, error, angle, step, "Виконується")
    if self.session.is_running:
        self.after_id = self.after(self.config_data.auto_interval_ms,
                                    self._stabilization_cycle)

def manual_step(self, delta):
    next_step = max(0, self.session.current_step + delta)
    step, angle, direction = self.actuator.move_to_angle(next_step * self.actuator.angle_per_step)
    measured = self.calculator.predict_dolp(angle)
    error = self.calculator.compute_error(self.config_data.target_dolp, measured)
    self._save_state(measured, error, angle, step, "Готово")

def return_to_zero(self):
    step, angle, direction = self.actuator.return_to_zero()
    error = self.calculator.compute_error(self.config_data.target_dolp, 0.0)
    self._save_state(0.0, error, angle, step, "Готово")

def _save_state(self, measured, error, angle, step, status):
    self.session.current_angle_deg = angle
    self.session.current_step = step
    self.session.measured_dolp = measured

```

```
self.session.error = error
record = MeasurementRecord.now(self.config_data.target_dolp, measured, error, angle,
                               step, self.config_data.mode, status)
self.session.history.append(record)
self.storage.append_measurement(record)

def main():
    app = MacStyleApp(Path(__file__).resolve().parent)
    app.mainloop()

if __name__ == "__main__":
    main()
```

ДОДАТОК Б.

Список наукових праць

Анісімов Денис Дмитрович

№ п/п	Назва	Назва видавництва та його вихідні відомості, що дозволяють ідентифікувати та відрізнити це видання від усіх інших	Кількість друкованих сторінок	Прізвища співавторів
1	Генератор частково поляризованого оптичного випромінювання для тестування та калібрування поляриметрів	Ефективність та автоматизація інженерних рішень у приладобудуванні : збірник праць XX Всеукраїнської науково- практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених, 04–05 грудня 2024 р. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. С. 38–41.	4	Синявський І. І., Оберемок Є. А.
2	Аналіз схемних побудов пристроїв для калібрування поляризаційних приладів	Погляд у майбутнє приладобудування : збірник праць XVIII Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених, м. Київ, 13–14 травня 2025 р. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2025. С. 32-35	4	Синявський І. І.

3	Автоматизована система керування зміною параметрів поляризації штучного джерела випромінювання	Погляд у майбутнє приладобудування : збірник праць XIX Науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених, м. Київ, 12–13 травня 2026 р. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2026. С.	4	Синявський І. І.
4	Адаптивна система формування еталонних станів часткової поляризації з контуром зворотного зв'язку	Вісник Київського політехнічного інституту. Серія Приладобудування. 2026. Вип. 71(1). С.	7	Синявський І. І.

Студент _____ Денис Анісімов

Науковий керівник дисертації _____ Іван Синявський