

Вінницький національний технічний університет

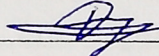
Факультет інформаційних електронних систем

Кафедра біомедичної інженерії та оптико-електронних систем

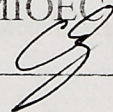
Бакалаврська кваліфікаційна робота на тему:

«Метод і засіб лазерної поляриметрії оптично активних рідин»

Виконав: студент 4 курсу, групи KOIC-216
спеціальності 152 – Метрологія та
інформаційно-вимірювальна техніка, ОП
«Комп'ютеризовані оптико-інформаційні
системи»

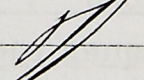
 Долінін О.В.

Керівник: к.т.н., доц., доцент кафедри
БМІОЕС

 Тужанський С.Є.

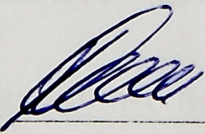
« 10 » червня 2025 р.

Рецензент: к.т.н., ст.викл. каф. ІРТС

 Притула М.О.
(прізвище та ініціали)

« 16 » червня 2025 р.

Допущено до захисту

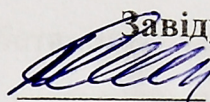
Зав. кафедри БМІОЕС  Л.Г. Коваль

« 17 » червня 2025 р.

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

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри БМІОЕС

 Л.Г. Коваль

«21» березня 2025 року

З А В Д А Н Н Я

НА БАКАЛАВРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Долінін Олег Олександрович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Метод і засіб лазерної поляриметрії оптично активних рідин
Керівник роботи Тужанський Станіслав Євгенович, к.т.н., доцент

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом ВНТУ від “20” березня 2025 року № 97

2. Термін подання студентом роботи 30 травня 2025 р.

3. Технічні вимоги і склад засобу – автоматизований оптичний поляриметр, вимірювані параметри – лінійна фазова анізотропія оптично активних рідин, лазер - робоча довжина хвилі 633 нм, потужність 20мВт; мікроконтролерний блок керування і автоматизованого контролю; оптичні елементи; фотоприймальний сенсор, похибка вимірювань – $\pm 2\%$, блок живлення – зовнішнє джерело постійної напруги.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): Вступ; технічне обґрунтування доцільності розробки; аналіз та класифікація методів та засобів оптичної поляриметрії, розробка методу вимірювання, структурної, оптичних і електричних схем пристрою, моделювання і аналіз параметрів лазерного випромінювача та фотоприймача, аналіз роботи системи, висновки; список використаних джерел; додатки.

5. Перелік ілюстративного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

5.1 Схема структурна лазерного поляриметра оптично активних рідин

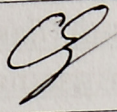
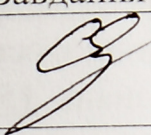
5.2 Схема мікропроцесорного блоку керування

5.3 Схема оптична пристрою

5.4 Схема блоку живлення лазера

5.5 Схема фотоприймального сенсора

6. Консультанти розділів роботи

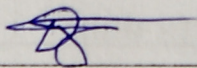
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Спеціальна частина	Тужанський С.Є. к.т.н., доцент кафедри БМІОЕС		

7. Дата видачі завдання «11» березня 2025 р

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

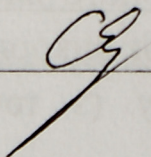
Назва та зміст етапу	Термін виконання		Примітка
	початок	закінчення	
Вибір, узгодження та затвердження теми БКР	11.03.2025	19.03.2025	Виконав
Аналіз літературних джерел. Попередня розробка основних розділів	20.03.2025	09.04.2025	Виконав
Пошук методів і засобів вирішення поставленої задачі	10.04.2025	01.05.2025	Виконав
Розробка методу і структури пристрою	02.05.2025	17.05.2025	Виконав
Розробка схем і програмних модулів керування та вимірювання пристрою	18.05.2025	24.05.2025	Виконав
Експериментальні або модельні дослідження пристрою	24.05.2025	31.05.2025	Виконав
Оформлення пояснювальної записки та графічної частини	01.06.2025	07.06.2025	Виконав
Нормоконтроль	05.06.2025	09.06.2025	Виконав
Попередній захист БКР, доопрацювання, рецензування БКР	11.06.2025	16.06.2025	Виконав
Захист БКР ЕК	19.06.2025	20.06.2025	

Студент



О.В. Долінін

Керівник роботи



С.Є. Тужанський

АНОТАЦІЯ

Бакалаврська кваліфікаційна робота складається з 96 сторінок формату А4, на яких є 3 таблиці, список використаних джерел містить 28 найменувань.

Бакалаврська кваліфікаційна робота присвячена розробці автоматизованого засобу поляриметричного контролю характеристик оптично активних рідин із підвищеною швидкістю, в якому відбувається вимірний контроль параметрів лінійної фазової анізотропії оптично активних на основі визначення параметрів Стокса лазерного випромінювання.

У роботі проведено аналіз методів і засобів оптичної поляриметрії, розроблено структуру лазерного поляриметричного засобу на основі відповідного методу контролю параметрів лінійної фазової анізотропії. Також наведено розрахунок і моделювання основних компонентів і вузлів пристрою, розроблено схеми модулятора, блоку живлення лазера і фотоприймального пристрою.

Ключові слова: лазер, поляриметр, анізотропія, оптична активність.

ABSTRACT

Bachelor's thesis: 96 pages, 28 figures, 3 tables, 28 bibliographies sources.

The bachelor's thesis is devoted to the development of an automated means of polarimetric control of characteristics with high speed, in which there is a measurement control of the parameters of linear phase anisotropy optically active on the basis of determining the Stokes parameters of laser radiation.

In the bachelor's thesis the structure of laser polarimetric means on the basis of the corresponding method of control of parameters of linear phase anisotropy is developed. The calculation and modeling of the main components and components of the device are also given, the schemes of the modulator, the laser power supply unit and the photodetector are developed.

Keywords: laser, polarimeter, anisotropy, optical activity

ЗМІСТ

ВСТУП	5
1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ОПТИЧНИХ МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ АНАЛІЗУ РЕЧОВИН.....	8
1.1 Методи оптичного аналізу та контролю хімічного складу речовин	8
1.2 Поляриметричні методи аналізу оптично активних речовин	10
1.3 Висновки до розділу 1	27
2 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТА ОГЛЯД МЕТОДІВ ОПТИЧНОГО АНАЛІЗУ	27
2.1 Методика вимірювального контролю параметрів оптично активних речовин.....	27
2.2 Принципи дії поляриметричних систем	35
2.3 Фізико-хімічні основи поляриметричного аналізу.....	40
2.4 Аналіз переваг та обмежень існуючих поляриметрів	44
2.5 Висновки до розділу 2	53
3 РОЗРОБКА МЕТОДУ ТА ТЕХНІЧНОГО ЗАСОБУ ПОЛЯРИМЕТРИЧНОГО АНАЛІЗУ	54
3.1 Вибір принципу дії та обґрунтування методики вимірювань	54
3.2 Структура та функціональні блоки технічного засобу	67
3.3 Математичне моделювання процесу аналізу	74
3.4 Аналіз похибок і вимог до метрологічних характеристик	79
3.5 Висновки до розділу 3	87
ВИСНОВКИ.....	88
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	89
Додатки	

ВСТУП

Актуальність теми. У сучасному світі оптичні методи аналізу відіграють ключову роль у багатьох галузях науки та промисловості, зокрема в хімії, фармацевтиці, біотехнологіях, харчовій промисловості та екологічному моніторингу. Серед них особливе місце посідає поляриметричний аналіз, який базується на явищі обертання площини поляризації світла оптично активними речовинами. Цей метод дозволяє не лише якісно ідентифікувати такі речовини, але й кількісно визначати їхню концентрацію, чистоту та навіть конфігурацію молекул. З огляду на зростаючі вимоги до точності, швидкості та автоматизації контролю якості та технологічних процесів, розробка та вдосконалення методів і засобів поляриметричного аналізу оптично активних рідин набуває особливої актуальності. Існуючі підходи часто стикаються з обмеженнями щодо чутливості, селективності та можливості інтеграції в автоматизовані системи. Таким чином, подальші дослідження у цьому напрямку є вкрай важливими для підвищення ефективності виробництва, покращення якості продукції та забезпечення екологічної безпеки.

Мета роботи. Розширення функціональних можливостей засобу лазерної поляриметрії оптично активних рідин шляхом автоматизації керування параметрами лазерного випромінювача, оптичного модулятора і блоку фотоприймача, а також підвищення швидкодії контролю параметрів анізотропії.

Завдання роботи. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Проаналізувати сучасний стан розвитку поляриметричних методів та існуючих засобів для аналізу оптично активних рідин, виявити їхні переваги та недоліки.
2. Дослідити методи роботи оптичних поляриметрів та їхніх компонентів як основи для побудови швидкодіючих поляриметричних систем.

3. Розробити та оптимізувати оптичні схеми та схеми фотодетекції та підсилення сигналів, мінімізуючи вплив шумів для підвищення чутливості та точності вимірювань.

4. Спроектувати та реалізувати архітектуру автоматизованої системи поляриметричного аналізу, що включає засоби керування оптичними елементами та обробки даних.

5. Провести дослідження розробленого методу та засобу поляриметричного аналізу для оцінки метрологічних характеристик та функціональних можливостей.

Об'єкт дослідження. Процеси взаємодії поляризованого світла з оптично активними рідинами та методики їхнього аналізу.

Предмет дослідження. Методи та апаратно-програмні засоби поляриметричного аналізу оптично активних рідин, а також принципи побудови та функціонування автоматизованих систем на їхній основі.

1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ОПТИЧНИХ МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ АНАЛІЗУ РЕЧОВИН

1.1 Методи оптичного аналізу та контролю хімічного складу речовин

Оптичні методи дослідження широко застосовуються для якісного та кількісного аналізу речовин, оскільки дозволяють здійснювати безконтактний та неруйнівний контроль зразків різного походження – від полікристалічних і напівпровідникових матеріалів до рідких середовищ і астрономічних об'єктів.

Сутність цих методів полягає у використанні зв'язку між фізико-хімічними властивостями речовини та оптичними явищами, що виникають при взаємодії світла з середовищем. До таких явищ належать: поглинання, розсіювання, заломлення, обертання площини поляризації, а також індукція люмінесценції, які чітко залежать від складу аналізованої речовини. Ці залежності формують наукову основу відповідних методів оптичного аналізу. До найбільш поширених методик відносять наступні:

- абсорбційний спектральний – базується на явищі селективного (вибіркового) поглинання електромагнітного випромінювання речовиною. Коли світло певної довжини хвилі проходить через зразок, частина його енергії поглинається атомами або молекулами, що зумовлює зменшення інтенсивності випромінювання;

- емісійний спектральний – ґрунтується на реєстрації власного випромінювання зразка, яке виникає внаслідок збудження атомів або молекул до вищого енергетичного стану, зазвичай за рахунок високих температур або дії рентгенівського випромінювання;

- люмінесцентний – базується на вивченні випромінювання, яке з'являється внаслідок збудження речовини зовнішнім джерелом світла та подальшого переходу збуджених молекул у основний стан;

– інфрачервона (ІЧ) спектроскопія – полягає у вивченні поглинання речовиною інфрачервоного випромінювання, що призводить до коливальних і обертальних змін у молекулах;

– ультрафіолетова та видима спектрофотометрія – охоплює дослідження поглинання випромінювання в УФ і видимому діапазоні спектру, що дозволяє ідентифікувати і кількісно визначати речовини;

– рамановська спектроскопія (спектроскопія комбінаційного розсіювання) – ґрунтується на аналізі зміни довжини хвилі світла, розсіяного речовиною, внаслідок взаємодії фотонів з молекулярними коливаннями;

– рентгенофлуоресцентний – базується на реєстрації вторинного рентгенівського випромінювання, що виникає при збудженні атомів речовини первинним рентгенівським променем;

– поляриметричний – використовує зміну площини поляризації світла при проходженні через оптично активну речовину, дозволяючи визначати її концентрацію та структурні властивості;

– нефелометричний та турбідиметричний – базуються на вивченні розсіювання світла в зразках, що містять зважені частинки або колоїдні системи;

рефрактометричний – використовує залежність показника заломлення речовини від її концентрації або складу[3].

Використання лазерів як джерел випромінювання в цих приладах значно покращило точність вимірювань та зменшило складність апаратної реалізації. Лазери забезпечують високу монохроматичність, стабільність потоку, вузьку діаграму направленості та контрольований поляризаційний стан, що є особливо важливим для методів, заснованих на поляризаційних ефектах. Завдяки цим властивостям лазерного випромінювання з'явилися нові можливості для точного виявлення та класифікації зразків, визначення їх внутрішньої структури та моніторингу динамічних процесів.

Контроль поляризаційних характеристик речовин з анізотропними властивостями базується на взаємодії поляризованого монохроматичного світла з об'єктами, оптично неоднорідними за своїми властивостями. Для математичного опису таких взаємодій застосовують формалізми Джонса та Мюллера. Метод Джонса ефективний для повністю поляризованого світла, тоді як матриця Мюллера дозволяє працювати також із частково поляризованим чи деполаризованим випромінюванням.

Попри свою універсальність, повна матриця Мюллера часто містить надлишкову інформацію, яка не має практичної цінності при конкретному аналізі. Тому розробка методик, які базуються на неповних або скорочених формах матриці Мюллера, вимагає попереднього дослідження зразка для визначення кількості незалежних параметрів[1].

1.2 Поляриметричні методи аналізу оптично активних речовин

Поляриметричні методи дослідження є одними з найважливіших у спектрі оптичних засобів аналізу складу речовин. Вони базуються на вивченні зміни поляризаційного стану світла після проходження через речовини, які володіють оптичною активністю – здатністю обертати площину поляризованого світла. Така оптична активність властива багатьом органічним сполукам, зокрема цукорам, амінокислотам, білкам, спиртам, а також деяким фармацевтичним препаратам і біомолекулам. Завдяки цій особливості, поляриметрія знайшла широке застосування у біохімії, харчовій промисловості, фармації та аналітичній хімії[2].

Суть методу полягає у вимірюванні кута, на який обертається площина поляризації світла при проходженні крізь шар оптично активної речовини. Цей кут обертання залежить від кількох чинників:

- концентрації оптично активної речовини у розчині;
- довжини шляху, який проходить світло в середовищі;

- довжини хвилі випромінювання;
- температури середовища;
- індивідуальних оптичних характеристик конкретної речовини (так званого питомого обертання).

У класичних поляриметрах використовуються джерела світла (часто монохроматичні), система поляризаторів, аналізер і фотоелектронні перетворювачі, що дозволяють точно вимірювати кут повороту площини поляризації. Із впровадженням лазерних технологій з'явилися високоточні автоматизовані поляриметричні системи, здатні працювати в режимі реального часу та здійснювати вимірювання з підвищеною чутливістю навіть у складних або багатокомпонентних середовищах. Поляриметричні методи мають кілька суттєвих переваг:

- безконтактність та ненаскрізна дія, що дозволяє застосовувати метод у біомедичних дослідженнях, не порушуючи структуру зразка;
- висока точність при визначенні концентрації активних речовин;
- простота у калібруванні та повторюваність результатів;
- можливість автоматизації процесу вимірювання і подальшої інтеграції з цифровими аналітичними платформами[4].

У поляриметрії також активно використовуються матричні методи Мюллера та Джонса, які дозволяють описати взаємодію поляризованого світла з анізотропними середовищами математично. Це особливо важливо у разі, коли дослідження ведуться не тільки у розчинах, а й у твердих зразках або біотканинах. Метод Мюллера дає змогу враховувати як поляризаційні, так і деполаризаційні властивості зразків, що дозволяє проводити розширений аналіз структури, а також виявляти дефекти, напруження чи неоднорідності в матеріалах. Сучасні дослідження у галузі поляриметрії спрямовані на:

- підвищення точності вимірювань за рахунок вдосконалення оптичних схем та цифрової обробки сигналів;

- розробку компактних волоконно-оптичних сенсорів для вимірювання концентрацій біологічно важливих речовин;
- застосування лазерних поляриметричних систем у мікроскопії, медицині (наприклад, діагностика захворювань ока, контроль якості тканин), фармацевтиці (контроль чистоти субстанцій) тощо;
- інтеграцію з методами машинного навчання для автоматизованого аналізу зразків.

Оптична активність – це властивість речовини повертати площину поляризації навколо оптичної осі лінійно поляризованого світла. Вона виникає лише у матеріалах, які мають хіральну будову, тобто молекула з її дзеркальним відображенням не накладаються одна на одну. Також оптична активність може спостерігатись у рідинах, тобто розчинах хіральних молекул, таких як цукри. До оптично активних речовин належать такі, що здатні обертати площину поляризації лінійно поляризованого світла при проходженні через них. Ця властивість обумовлена хіральністю молекул – тобто їхньою нездатністю співпасти зі своїм дзеркальним відображенням (відсутність площини або центру симетрії в структурі). Саме молекулярна асиметрія є основною причиною оптичної активності[5].

Оптичну активність проявляють речовини у кристалічному стані (наприклад, кварц, танталат літію та інші анізотропні кристали з хіральною кристалічною решіткою), і рідини (багато органічних сполук у рідкому стані, зокрема скипидар, нікотин тощо).

Розчини органічних сполук – до них відносяться водні розчини цукру, глюкози, фруктози, виннокам'яної, яблучної, мигдальної, аскорбінової кислот. У спиртовому середовищі оптичну активність проявляють розчини камфори, стрихнину, бруцину та подібних сполук.

Усі ці речовини мають молекули, які містять асиметричні атоми вуглецю (хіральні центри), що й забезпечує їх здатність до оптичного обертання. У разі існування таких центрів як у самій молекулі, так і в її просторовій конфігурації,

оптичну активність проявляють як чисті речовини в кристалічному вигляді, так і їх розчини або розплави[6].

Особливе місце серед оптично активних природних матеріалів займають нафти та їх фракції. Практично всі природні нафти мають здатність слабо обертати площину поляризації світла, причому у більшості випадків це обертання праве (за годинниковою стрілкою). Варто відзначити:

- оптична активність фракцій зростає зі збільшенням температури кипіння – отже, у важчих компонентах нафти концентрація хіральных молекул вища;
- штучні (синтетичні) нафти подібного ефекту не виявляють, що свідчить про відсутність у них оптично активних органічних структур.

Вважається, що оптичну активність природних нафт обумовлює присутність продуктів розкладу стероїдних сполук – таких як холестерин та фітостерин. Ці речовини є типовими компонентами рослинних і тваринних тканин, а їх залишки в нафті вказують на її органічне походження[10].

Таблиця 1.1 – Значення питомого обертання площини поляризації лінійно поляризованого світла для водних розчинів органічних сполук при температурі 20 °С, використовуючи світло з довжиною хвилі лінії D спектра натрію (589,3 нм)

Речовина	Питоме обертання
а-молочна кислота	+1,7
D-винна кислота	+12,0
L-винна кислота	-12,0
L-скорбінова кислота	+21,0
D-глюкоза	112,2 → +52,5
Фруктоза	-135,5 → 92,4
Рафіноза	+121,3

Сахароза	+66,5
D-ксилоза	-93,6 → +18,8
L-ксилоза	-79,3 → -18,6

Питоме обертання для розчинів речовин визначають за формулою:

$$[\alpha]_0^{20} = \frac{\alpha \cdot 100}{l \cdot C}, \quad (1.1)$$

де α – кут обертання в градусах, l – товщина шару розчину в дециметрах, C – концентрація речовини в г/100 мл розчину.

Для індивідуальних рідких речовин питоме обертання визначають за формулою:

$$[\alpha]_\rho^{20} = \frac{\alpha \cdot 100}{l \cdot C}, \quad (1.2)$$

де ρ – густина речовини.

Залежність питомого обертання від довжини хвилі для деяких речовин наведена в таблиці 1.2

Таблиця 1.2 – Залежність питомого обертання площини поляризації від довжини хвилі

Сахароза		Фруктоза		Нікотин	
λ , нм	$[\alpha]_\lambda^{20}$, град/дм*г/см ³	λ , нм	$[\alpha]_\lambda^{20}$, град/дм*г/см ³	λ , нм	$[\alpha]_\lambda^{20}$, град/дм*г/см ³
400	+149,9	447	-166	486	-253,5

450	+122,2	535	-107	535	-207,5
500	+99,8	589	-90	589	-162
589	+66,8	656	-76	656	-126

Кількісний поляриметричний аналіз базується на чіткій залежності між кутом обертання площини поляризації світла та концентрацією оптично активної речовини в розчині. Це означає, що чим більше молекул такої речовини міститься в розчині, тим сильніше буде змінюватися напрямок площини поляризації проходячого через нього світла[12].

Ця залежність може бути встановлена графічним способом – за допомогою обудови калібрувальної (градуовальної) кривої, що відображає зміну кута обертання в залежності від відомих концентрацій, і аналітичним – за допомогою закону Біо, який описує математичну залежність між кутом обертання (β), концентрацією (C), товщиною шару розчину (l) і питомим обертанням (α) за формулою:

$$\alpha = \beta \cdot \frac{C}{l}, \quad (1.3)$$

Такий підхід дозволяє швидко й досить просто визначати концентрацію досліджуваної речовини, якщо відомі інші параметри. Поляриметрія, як аналітичний метод, має ряд переваг і певні обмеження. До переваг можемо віднести:

- простота у використанні та доступність обладнання;
- відсутність необхідності у складних підготовчих операціях;
- висока швидкість аналізу (експресність);
- економічність – не потребує великої кількості реагентів або витратних матеріалів;
- можливість використання в польових або виробничих умовах.

І маємо такі недоліки:

- невисока чутливість – метод ефективний лише при достатньо високих концентраціях (понад 1%);
- обмежена точність – залежить від умов вимірювання, чистоти зразка та точності налаштування приладу;
- низька селективність – оптична активність різних речовин може бути дуже подібною, що ускладнює аналіз багатокомпонентних сумішей[8].

Через ці обмеження поляриметричний аналіз доцільно використовувати переважно для дослідження чистих індивідуальних речовин або простих сумішей, де вплив домішок мінімальний. Сучасні прилади з автоматичним керуванням і цифровою обробкою сигналу значно розширюють можливості методу, покращуючи точність і надійність результатів.

При температурі 20 °С значення питомого обертання α для водних розчинів оптично активних речовин при освітленні монохроматичним світлом з довжиною хвилі, що відповідає жовтій лінії спектру натрію, мають такі характерні значення: для сахарози – +66,3°, глюкози – +52,5°, фруктози – –93°, а для деяких ефірних олій – близько +24°. Знак обертання (позитивний або негативний) свідчить про напрям зміщення площини поляризації: за або проти годинникової стрілки.

Для точного визначення концентрації речовин у розчинах використовуються поляриметри, обладнані спеціальними фільтрами (для отримання світла необхідної довжини хвилі) та термостатами (для стабілізації температури, що впливає на точність вимірювання). Концентрацію визначають за відомим питомим обертанням речовини при постійній товщині шару розчину.

Принцип дії поляриметра ґрунтується на вимірюванні зміни інтенсивності плоскополяризованого світла, яке проходить через оптично активний зразок. Зразок поміщається в кювету, встановлену між двома поляроїдами, поляризатором, який формує лінію поляризованого світла, і аналізатором (друга призма), який дозволяє змінювати кут між площинами поляризації та визначати величину обертання.

Зміна інтенсивності світла після проходження через аналізатор описується формулою:

$$F = F_0 \cos^2 \beta, \quad (1.4)$$

де F – інтенсивність світла, що пройшло через зразок, F_0 – інтенсивність світла без впливу зразка, β – кут між площинами поляризації поляризатора та аналізатора[7].

Уведення оптично активної речовини між поляризатором і аналізатором змінює цей кут, що дозволяє розрахувати її концентрацію. Поляриметричний аналіз широко використовується у харчовій промисловості, особливо для визначення вмісту вуглеводів (сахароза, глюкоза, мальтоза, лактоза), а також у контролі якості ефірних олій та інших органічних сполук, здатних до обертання площини поляризації світла. Принцип дії поляриметричного методу базується на залежності кута обертання площини поляризації плоскополяризованого світла від концентрації в розчині оптично активних речовин. Такі речовини мають здатність змінювати (обертати) площину поляризації світла завдяки своїй молекулярній або кристалічній анізотропії. Прикладами таких речовин є розчини цукру, ефірних олій, жирів, а також рідкі органічні сполуки.

Оптична активність речовини визначається кількома фізичними параметрами:

- питомим обертанням площини поляризації – величина, яка є сталою для даної речовини при фіксованих умовах (температурі, довжині хвилі світла), і характеризує здатність речовини змінювати напрям площини поляризованого світла;
- кутом обертання площини поляризації (β) – безпосередньо вимірюване значення, що залежить від концентрації розчину;
- товщиною шару та питомого обертання;
- товщиною шару розчину (l), через який проходить світло;
- концентрацією оптично активної речовини (C).

Ці величини зв'язані між собою наступною формулою Біо:

$$\alpha = \frac{\beta}{l \cdot C}, \quad (1.5)$$

де α – питоме обертання, β – вимірний кут обертання (в градусах), l – довжина шару розчину (в дециметрах), C – концентрація (в г/мл).

Природне (неполяризоване) світло складається з електромагнітних коливань (коливань електричного поля), які відбуваються одночасно у всіх напрямках, перпендикулярних до напрямку поширення світла. Проте при проходженні такого світла через певні кристали (наприклад, кварц, кальцит або ісландський шпат), відбувається явище подвійного променезаломлення. У результаті світло розщеплюється на дві складові з взаємно перпендикулярними площинами поляризації. Для створення плоскополяризованого світла використовуються спеціальні призми з ісландського шпату або поляроїди, які поглинають одну з поляризаційних складових і пропускають лише світло, поляризоване в одній площині[11].

Чим більше кут повороту площини поляризації при проходженні через розчин оптично активної речовини – тим більшу освітленість можна зафіксувати на фотоприймачі при використанні аналізатора. Це явище лежить в основі визначення концентрації речовини – зміна кута β прямо впливає на інтенсивність світлового сигналу.

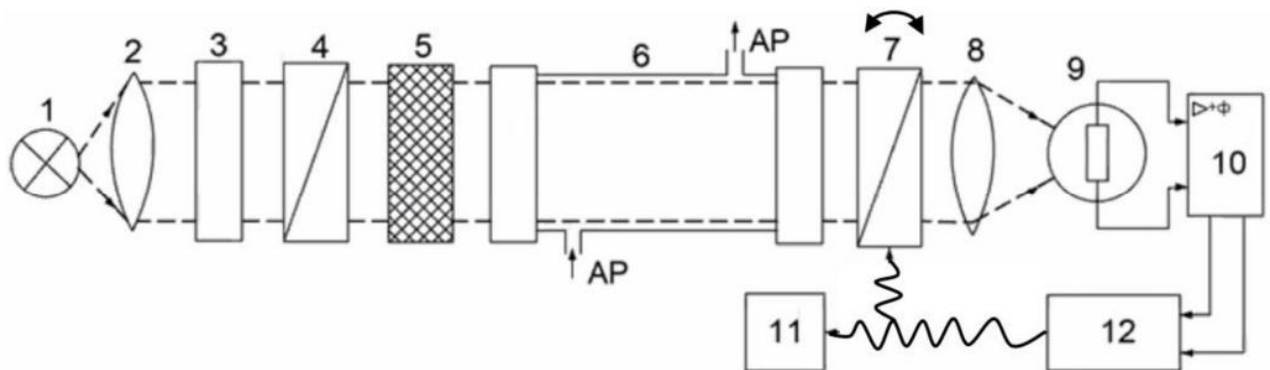


Рисунок 1.1 – Оптична схема поляриметричного приладу для аналізу складу речовин

Оптичне випромінювання від джерела світла (позначене як елемент 1) за допомогою фокусуєчого об'єктива 2 спрямовується на інтерференційний фільтр 3. Цей фільтр виконує функцію дзеркала резонатора і налаштований на певну довжину хвилі – робочу для приладу. Далі світло проходить через поляризатор 4 та модулятор 5, який забезпечує гармонічне відхилення азимуту поляризації з певною частотою f навколо середнього положення.

У прикладі, зображеному на рисунку 1.1, як досліджуваний зразок використовується цукровий розчин концентрації 6 АР. Позначення АР (від англ. Angle of Polarization) вказує на значення кута обертання площини поляризації, яке становить 6° на 1 дм довжини кювети при стандартній температурі 20°C та довжині хвилі 589 нм (жовта лінія натрію). Цукровий розчин є класичним прикладом оптично активної речовини, оскільки молекули глюкози мають хіральну структуру, яка здатна обертати площину поляризації світла. У водному середовищі глюкоза зберігає цю здатність і викликає правобічне обертання, характерне для D-глюкози. Фізико-хімічні властивості такого розчину: концентрація 6 г/100 мл, питоме обертання $[\alpha] = +52.7^\circ$, розчинник дистильована вода, температура досліду 20°C . Таким чином, застосування розчину глюкози з відомими оптичними параметрами дозволяє використовувати його як еталон у калібруванні та перевірці точності роботи поляриметрів.

Поляризоване світло проходить через проточну кювету 6, що містить досліджуваний зразок, і потрапляє на аналізатор 7. Аналізатор розміщений під кутом 90° до напрямку поляризації, забезпечуючи фільтрацію змін у поляризаційному стані. Після проходження аналізатора світло фокусується об'єктивом 8 і надходить на фотоприймач (ФП) 9. Електричний сигнал, сформований фотоприймачем, підсилюється та фільтрується в електронному блоці 10.

Отриманий сигнал розузгодження подається на електромеханічний перетворювач 12, який пов'язаний з аналізатором 7. Цей механізм обертає аналізатор навколо оптичної осі залежно від фази сигналу розузгодження. Рух триває до того

моменту, поки на фотоприймач не почне надходити сигнал із частотою, що дорівнює подвоєному значенню модуляційної частоти f . За допомогою відлікового пристрою 11 фіксується кут повороту аналізатора, що дозволяє розрахувати концентрацію досліджуваної речовини.

Поляриметричні пристрої зазвичай функціонують на основі експериментального вимірювання параметрів вектора Стокса S , який описує стан поляризації випромінювання. Вимірювання проводяться у локальній зоні зразка за допомогою одного фотодетектора. Такі прилади широко застосовуються для аналізу однорідних анізотропних середовищ, зокрема в хімії, біофізиці та харчовій промисловості[9].

На рисунку 1.2 представлено узагальнену класифікацію приладів, що використовуються в поляриметрії для вивчення властивостей анізотропних матеріалів.

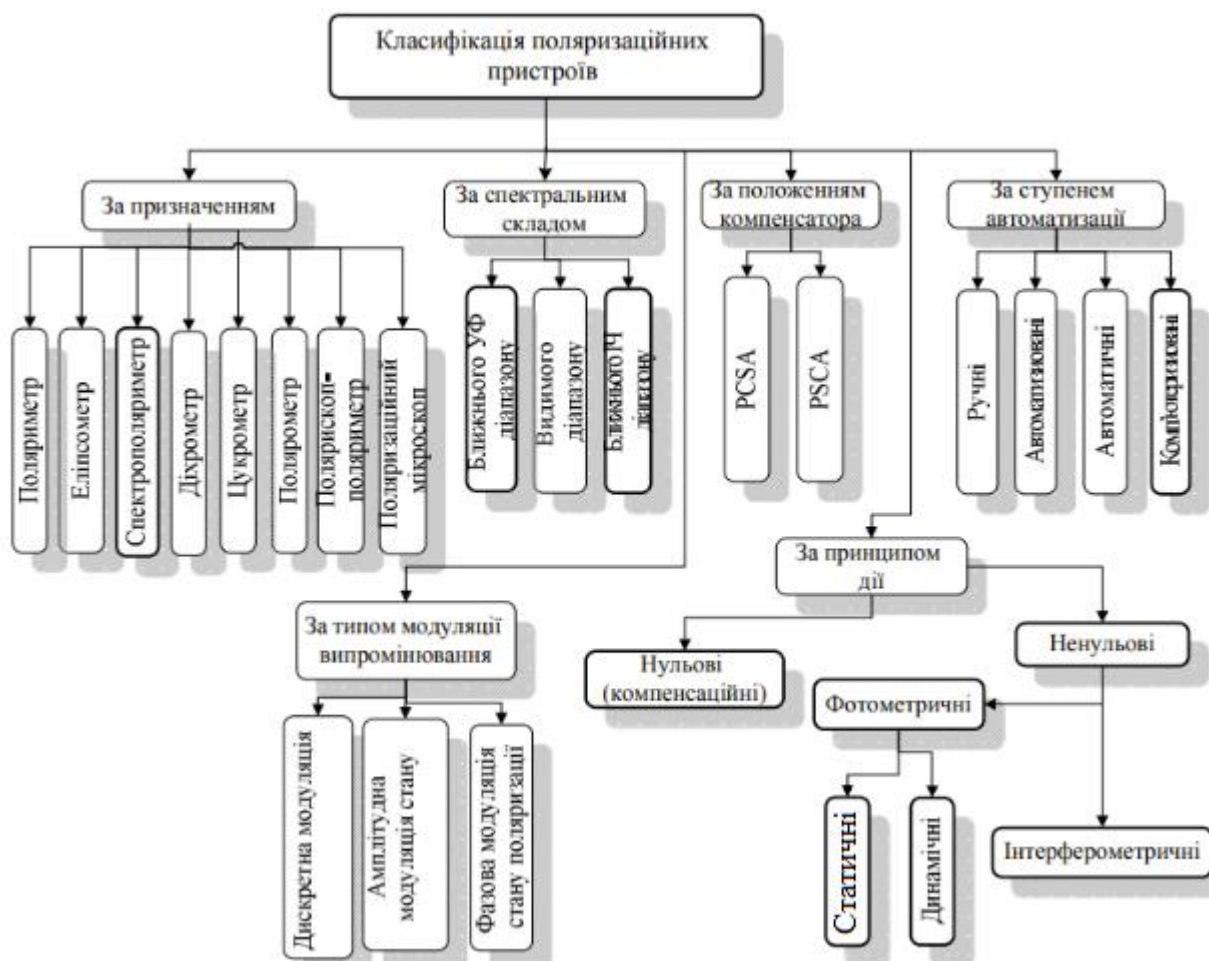


Рисунок 1.2 – Узагальнена класифікація поляризаційних приладів

1.3 Сучасні оптичні методи контролю складу речовин

Сучасні оптичні методи контролю складу речовин є одними з найбільш універсальних, точних та швидких інструментів аналітичної хімії, фізики та біології. Їхня широка розповсюдженість зумовлена можливістю безконтактного та неруйнівного аналізу широкого спектра зразків – від газоподібних і рідких до твердих і навіть біологічних об'єктів. В основі цих методів лежить взаємодія електромагнітного випромінювання з речовиною, що призводить до характерних змін оптичних властивостей, які можна виміряти та інтерпретувати. Завдяки розвитку лазерних технологій, оптоелектроніки та цифрової обробки сигналів,

сучасні оптичні методи значно розширили свої можливості, підвищивши чутливість, селективність та швидкість аналізу. Основними категоріями оптичних методів, що використовуються для контролю складу речовин, є:

1. Спектральні методи – це найширша група, яка базується на вивченні спектрів поглинання, випромінювання або розсіювання світла речовиною (рис. 1.3). Абсорбційна спектроскопія (УФ-Вид, ІЧ, атомно-абсорбційна) ґрунтується на вибіркового поглинанні світла на певних довжинах хвиль атомами або молекулами. Кожен елемент або сполука має унікальний "відбиток" поглинання, що дозволяє проводити якісний та кількісний аналіз. Особливо ефективна для визначення концентрації компонентів у розчинах (УФ-Вид), ідентифікації функціональних груп у органічних молекулах (ІЧ-спектроскопія) та визначення слідів металів (атомно-абсорбційна спектроскопія). Емісійна спектроскопія (атомно-емісійна, ІСР-ОЕС) заснована на реєстрації світла, що випромінюється збудженими атомами або іонами речовини, які повертаються до основного енергетичного стану. Високотемпературні джерела збудження (плазма, дуга, іскра) дозволяють аналізувати широкий спектр елементів, що робить цей метод незамінним для металургії, геології та екологічного моніторингу. Люмінесцентна спектроскопія (флуоресцентна, фосфоресцентна): Досліджує випромінювання світла речовиною після її збудження зовнішнім джерелом. Цей метод відзначається надзвичайно високою чутливістю, що дозволяє виявляти речовини на ультраслідових рівнях, особливо у біохімічних та медичних дослідженнях. Раманівська спектроскопія (спектроскопія комбінаційного розсіювання) вивчає непружне розсіювання світла молекулами, що супроводжується зміною його довжини хвилі. Раманівський спектр надає унікальну інформацію про коливальні та обертальні стани молекул, що дозволяє ідентифікувати речовини, аналізувати їхню структуру та взаємодію з оточенням. Метод є неруйнівним і може використовуватися для аналізу через

прозорі упаковки. Рентгенофлуоресцентний аналіз (РФА) базується на реєстрації характеристичного рентгенівського випромінювання, що виникає при збудженні атомів речовини первинним рентгенівським променем. Цей метод є потужним для елементного аналізу твердих, рідких та порошкоподібних зразків, дозволяючи визначати широкий діапазон елементів від натрію до урану[15].

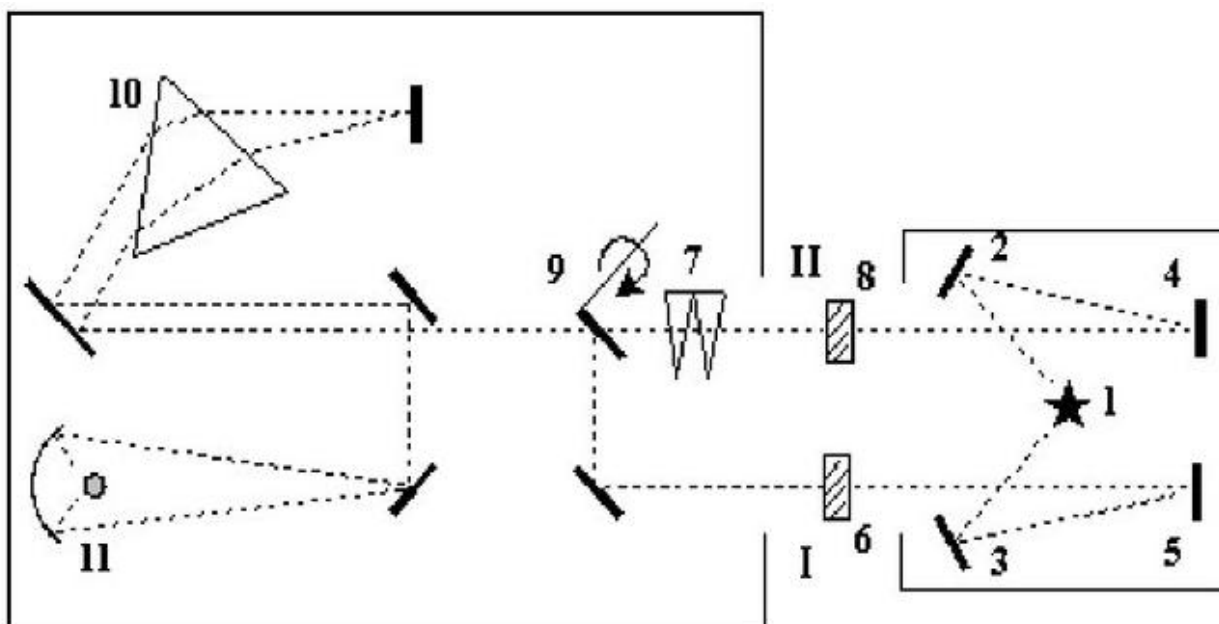


Рисунок 1.3 – Схема класичного спектрометра

2. Рефрактометрія та інтерферометрія – ці методи використовують залежність показника заломлення світла від складу та концентрації речовини (рис. 1.4). Рефрактометрія вимірює показник заломлення світла, який є унікальною фізичною характеристикою речовини. Широко застосовується для визначення концентрації цукрів, спиртів, жирів у харчовій промисловості, контролю складу розчинів та чистоти хімічних речовин. Інтерферометрія базується на явищі інтерференції світлових хвиль. Зміна показника заломлення зразка призводить до зсуву інтерференційної картини, що дозволяє з високою

точністю визначати зміни концентрації або складу газових та рідких сумішей[13].

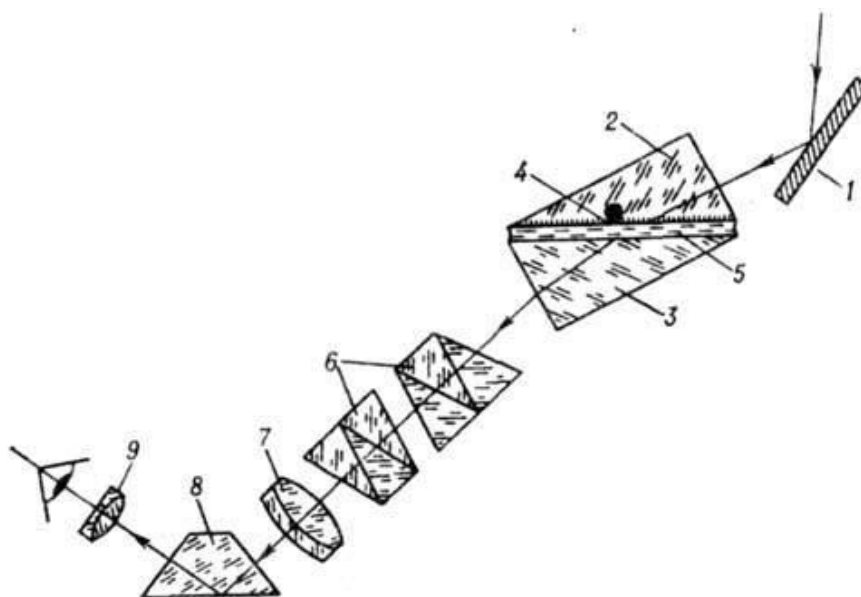


Рисунок 1.4 – Схема рефрактометра Аббе

3. Турбідиметрія та нефелометрія – ці методи використовуються для аналізу суспензій та колоїдних систем, вимірюючи розсіювання світла зваженими частинками. Турбідиметрія вимірює зменшення інтенсивності світла, що пройшло через зразок, внаслідок його розсіювання частинками. Нефелометрія вимірює інтенсивність світла, розсіяного під певним кутом до напрямку падаючого променя (рис. 1.5). Обидва методи застосовуються для визначення концентрації зважених речовин, мутності розчинів та контролю процесів коагуляції/флокуляції[17].

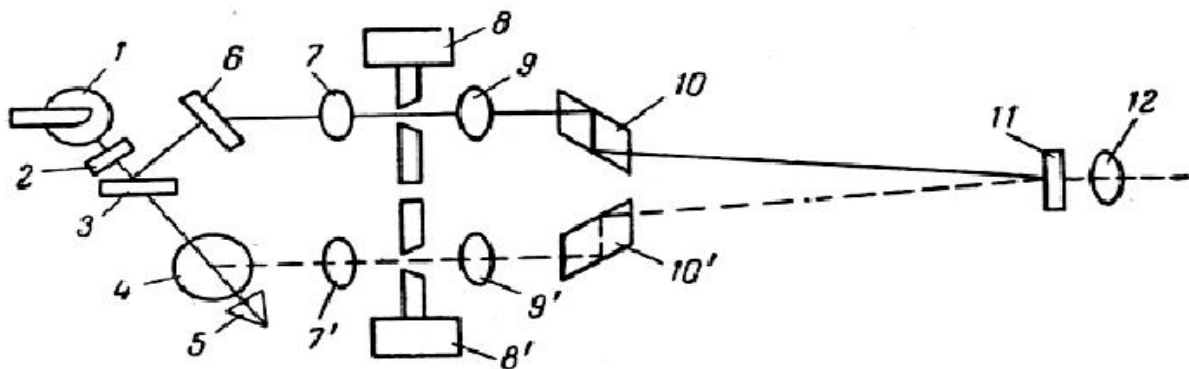


Рисунок 1.5 – Оптична схема нефелометра

4. Поляриметричні методи – ці методи використовують зміну поляризаційного стану світла при проходженні через оптично активні середовища. Вони дозволяють не тільки якісно ідентифікувати хіральні сполуки, а й кількісно визначати їхню концентрацію та чистоту, що є критично важливим у фармацевтиці, харчовій промисловості та біохімії. Сучасні поляриметри інтегрують лазерні джерела, прецизійну оптику та цифрову обробку сигналу для досягнення високої точності та автоматизації.

Розвиток оптоелектроніки, лазерних технологій, високочутливих фотодетекторів та мікропроцесорних систем значно розширив можливості оптичних методів контролю. Сучасні прилади стають більш компактними, швидкими, чутливими та здатними до автоматизованого аналізу великої кількості зразків. Тенденції розвитку включають мініатюризацію, мультипараметричний аналіз, інтеграцію з методами машинного навчання для складних матриць та дистанційний моніторинг. Ці досягнення роблять оптичні методи незамінним інструментом для наукових досліджень, промислового контролю та вирішення екологічних завдань[14].

1.3 Висновки до розділу 1

Розділ аналізує оптичні методи та засоби аналізу речовин, особливо зосереджуючись на поляриметрії. Оптичні методи, завдяки безконтактному та

неруйнівному контролю, є ключовими для якісного та кількісного аналізу. Застосування лазерів суттєво підвищило їхню точність.

Детально розглянуто поляриметричні методи, що ґрунтуються на обертанні площини поляризованого світла оптично активними речовинами, які є хіральними. Цей кут обертання залежить від концентрації речовини, довжини оптичного шляху, довжини хвилі та температури. Сучасні автоматизовані поляриметри стали високоточними завдяки лазерним технологіям. Методи Джонса та Мюллера використовуються для опису взаємодії поляризованого світла з анізотропними середовищами.

Кількісний поляриметричний аналіз базується на прямій залежності кута обертання від концентрації. Хоча метод простий, швидкий та економічний, він має обмеження щодо чутливості та селективності. Принцип дії поляриметра полягає у вимірюванні зміни інтенсивності плоскополяризованого світла після проходження через зразок, що дозволяє розрахувати концентрацію.

Отже, поляриметричні методи є потужним інструментом для аналізу оптично активних речовин. Їхнє постійне вдосконалення через інтеграцію лазерних технологій та автоматизацію відкриває нові можливості для точного та ефективного контролю якості у різних галузях.

2 МЕТОД І ЗАСІБ АВТОМАТИЗОВАНОГО КОНТРОЛЮ ПАРАМЕТРІВ АНІЗОТРОПІЇ РІДИН

2.1 Методика вимірювального контролю параметрів оптично активних речовин

В якості вимірювальної схеми для дослідження анізотропних властивостей оптично активних розчинів пропонується схема Стокс-поляриметра, модулятор стану поляризації якого побудований на елементі з лінійною фазовою анізотропією. Оптичну схему поляриметра представлено на рисунку 2.1

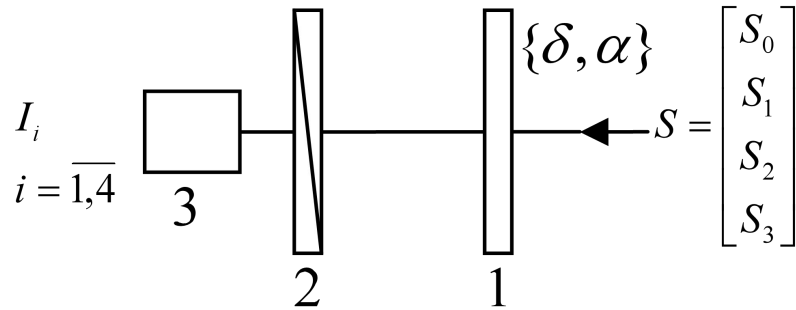


Рисунок 2.1 - Схема Стокс-поляриметра, побудованого на елементі з лінійною фазовою анізотропією: 1 – елемент з лінійною фазовою анізотропією; 2 – фіксований поляризатор (аналізатор); 3 – фотоприймач

Тоді матриця Мюллера елемента з лінійною фазовою анізотропією має наступний вид [9]:

$$M_{PhLn} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos^2(2\alpha) + \sin^2(2\alpha)\cos(\delta) & \cos(2\alpha)\sin(2\alpha)(1 - \cos(\delta)) & -\sin(2\alpha)\sin(\delta) \\ 0 & \cos(2\alpha)\sin(2\alpha)(1 - \cos(\delta)) & \sin^2(2\alpha) + \cos^2(2\alpha)\cos(\delta) & \cos(2\alpha)\sin(\delta) \\ 0 & \sin(2\alpha)\sin(\delta) & -\cos(2\alpha)\sin(\delta) & \cos(\delta) \end{bmatrix}, \quad (2.1)$$

де δ – величина лінійної фазової анізотропії (фазовий зсув, що вноситься між власними, для даного виду анізотропії, лінійно поляризованими коливаннями); α – орієнтація швидкої вісі лінійної фазової анізотропії. Так при $\delta = \pi/2$ – маємо справу із звичайною чвертьхвильовою фазовою платівкою, орієнтованою під довільним кутом α ; при $\delta = 0$ – маємо справу з відсутністю даного виду анізотропії в елементі.

Матричне рівняння для знаходження елементів вектора Стокса на виході з поляризатора 2 [5]:

$$S' = M_{LP} \cdot M_{PhLn} \cdot S. \quad (2.2)$$

Як і в попередньому випадку, беремо до розгляду лише елемент S_0 вектора Стокса S' , що несе інформацію про інтенсивність хвилі ЕМВ яка падає на фотодетектор. Поляризатор вважатимемо ідеальним. Тоді інтенсивність ЕМВ, яка пройшла крізь систему, та виражена через параметри Стокса і параметри лінійної фазової анізотропії, матиме наступний вид [9]:

$$I(\delta, \alpha, S_0, S_1, S_2, S_3) = S_0 + S_1 (\cos^2(2\alpha) + \sin^2(2\alpha) \cos(\delta)) + S_2 \cos(2\alpha) \sin(2\alpha) (1 - \cos(\delta)) - S_3 \sin(2\alpha) \sin(\delta). \quad (2.3)$$

З (2.3) можна бачити, що на відміну від попередньої схеми (рис. 2.1), всі параметри Стокса можна визначити з промодульованої інтенсивності. Данний вид анізотропії має два незалежних параметри: величину лінійної фазової анізотропії та кут її орієнтації. Тобто є можливість реалізувати модуляцію стану поляризації ЕМВ через зовнішній вплив на ці параметри або окремо тільки одним, або двома одночасно.

Для розроблюваного пристрою пропонується схема Стокс-поляриметра на елементі із подвійним електрооптичним ефектом.

Розглянемо у якості електрооптичного модулятора кристал, в якому реалізований подвійний поперечний ефект Поккельса [8] (рис. 2.2).

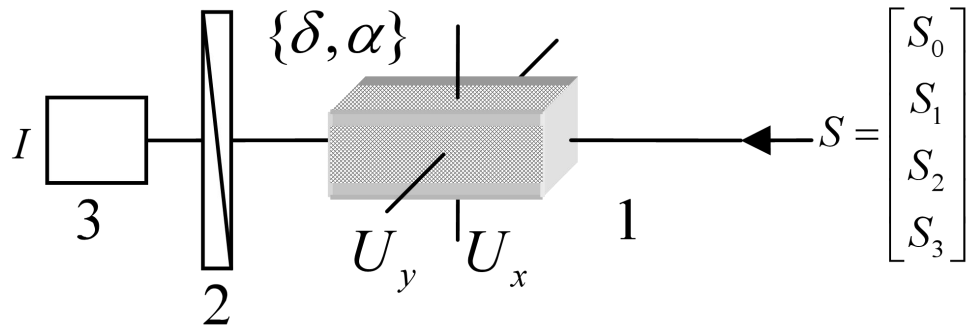


Рисунок 2.2 - Схема Стокс-поляриметра на двох електрооптичних комірках:

- 1 – електрооптична комірка на поперечному подвійному ефекті Поккельса;
2 – фіксований поляризатор (аналізатор); 3 – фотоприймач

В комірці 1 за допомогою двох пар електродів на які прикладені відповідні напруги керування, створюється електричне поле з заданою напруженістю та заданим напрямком. Тобто є можливість керувати не тільки величиною фазового зсуву δ , а й азимутом орієнтації наведеної вісі α . Залежність параметрів лінійної фазової анізотропії модулятора від прикладених керуючих напруг виглядає наступним чином [8]:

$$\alpha = 0.5 \arctg \left(\frac{U_x}{U_y} \right); \quad (2.4)$$

$$\delta = \frac{2\pi n_0^3 r \sqrt{U_x^2 + U_y^2}}{\lambda d} l, \quad (2.5)$$

де n_0 – коефіцієнт заломлення для звичайної хвилі; r – електрооптичний коефіцієнт; λ – довжина хвилі у вакуумі; l – довжина кристалу; d – товщина кристалу.

Такий перетворювач реалізує повністю керовану фазову платівку, а Стокс-поляриметр на його основі є універсальним. Можна показати [13, 14], що такий модулятор може перетворити будь який стан поляризації ЕМВ на вході у будь який на виході, тобто отримуємо всю сферу Пуанкаре поляризацій.

2.2 Функціональна схема і алгоритм роботи лазерного поляриметра

Для виконання поставленої у МКР задачі точної експрес-поляриметрії оптично активних речовин у розчинах пропонується схема поляриметра, зображена на рисунку 2.3. Дана схема побудована на двох поперечно напрямлених електрооптичних модуляторах світла, що дало змогу формувати стан поляризації у повному діапазоні значень кутів та значно спростити схему.

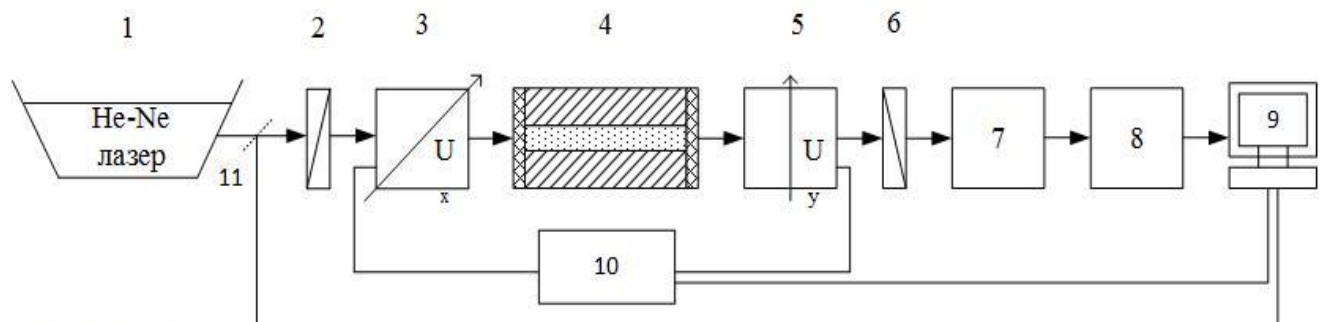


Рисунок 2.3 – Узагальнена структурна схема швидкодіючого поляриметра

Далі опишемо кожен з блоків, зображених на схемі.

1. He-Ne лазер, джерело випромінювання лазера, яке задовольняє усім вимогам по інтенсивності, довжині хвилі та товщині пучка.

2. Поляризатор – поляризує світловий пучок

3. Електрооптичний модулятор світла, який повертає площину поляризації по осі Ox .

4. Вимірювальна кювета, яка виконана у вигляді капіляру, що дозволяє значно мінімізувати об'єм досліджуваної речовини. Вхід і вихід капіляра виконані у вигляді тонких плоских поверхонь, виготовлених із скла.

5. Електрооптичний модулятор світла, по координатам Oy .

6. Аналізатор.

7. Блок фотодетектування, який є діодним фотометричним сенсором.

8. Блок реєстрації та обробки сигналів.

9. Персональний комп'ютер.

10. Мікроконтролерний блок керування електрооптичним модулятором, який забезпечує керування напругою, яка подається на електрооптичний модулятор.

11. Електронний затвор (шторка), який виконує функцію перекриття світлового потоку лазера за необхідності.

Розглянемо алгоритм роботи приладу та розрахунку параметрів лінійної фазової анізотропії на основі розглянутого методу. Даний алгоритм представлений на рис. 2.4.

На першому етапі роботи потрібно помістити зразок досліджуваної речовини у кювету-капіляр та встановити параметри і метод вимірювання. Після закінчення першого кроку починається робота самого приладу. Спочатку відбувається ініціалізація контролера керування напругою на електрооптичному поляриметрі та перевірка справності його роботи. Якщо ініціалізація пройшла успішно, то прилад переходить до другого пункту. На другому етапі відбувається ініціалізація фотометричного сенсора та перевірка справності його роботи. Якщо ключові пристрої системи налагоджені вірно – вмикається лазер, і після розігріву

виконується просвітлення нашого зразка, прийом та реєстрація сигналу на фотометричному сенсорі. Наступною операцією йде обробка отриманої інформації та визначення параметрів Стокса, отриманих для даного зразка біологічно активної рідини з лінійною фазовою анізотропією. Після розрахунку параметри Стокса записуються у відповідний файл, щоб далі піти на обробку та детальний аналіз. Слідом за цим відбувається обчислення параметрів лінійної фазової анізотропії для зразка, на підставі отриманих у попередньому пункті значень вектора Стокса. Обрахунки виводяться на екран та записуються у відповідний файл з результатами дослідження. Після цього можна проводити наступне дослідження.

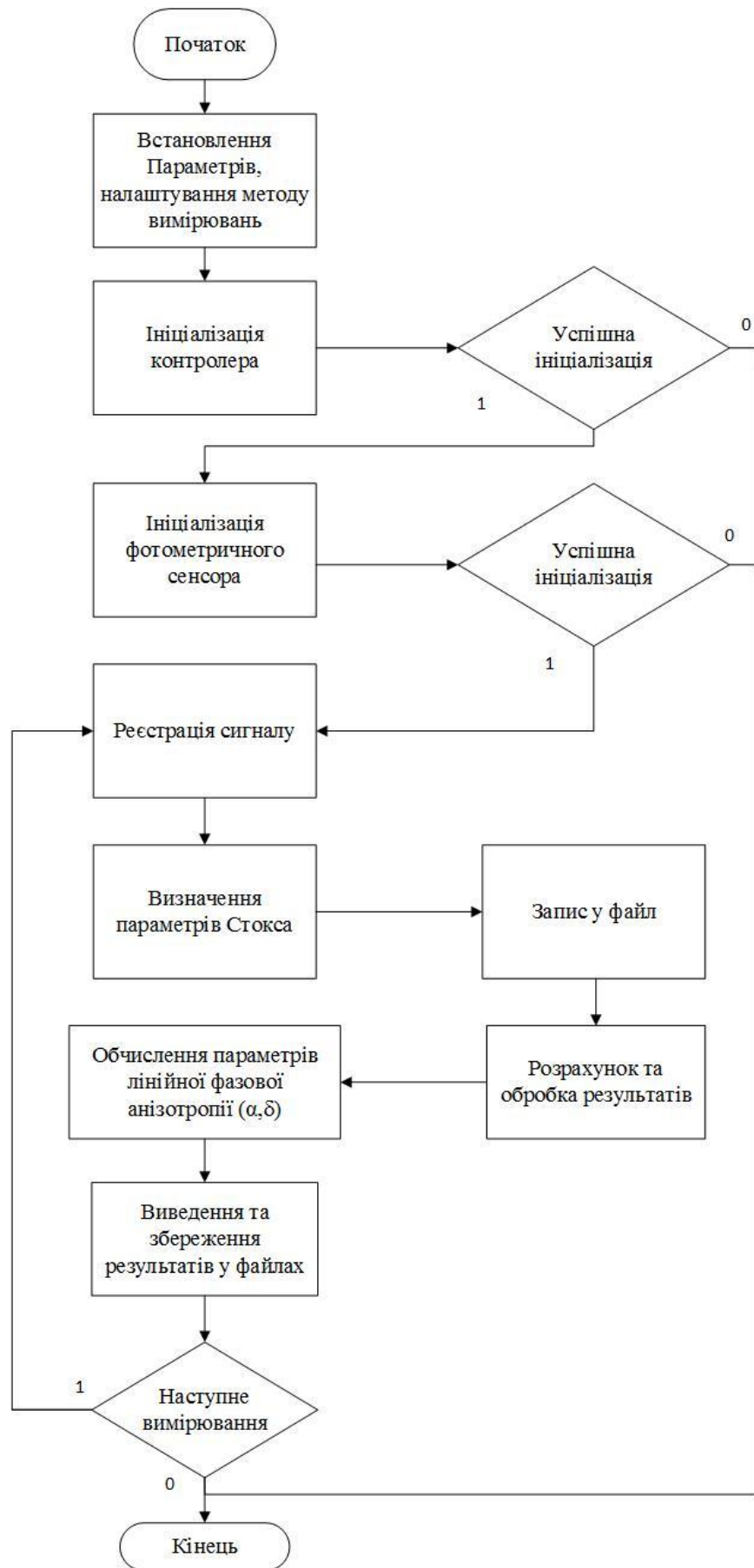


Рисунок 2.4 – Узагальнений алгоритм роботи автоматизованого лазерного поляриметра на електрооптичному перетворювачі

Головними особливостями запропонованої схеми лазерного поляриметра є висока швидкодія, яке досягається за рахунок використання двох електрооптичних модуляторів світла та мінімізація об'єму досліджуваної речовини завдяки використанню спеціальної проточної кювети – капіляра.

2.2 Принципи дії поляриметричних систем

Поляриметричні системи призначені для вимірювання обертання площини поляризації лінійно поляризованого світла, яке проходить через оптично активні речовини. Ця властивість, відома як оптична активність, є наслідком хіральної будови молекул або кристалічної решітки речовини, що призводить до різної швидкості поширення світла з правою та лівою круговою поляризацією. Вимірювання кута обертання дозволяє отримати важливу інформацію про концентрацію, чистоту та навіть просторову конфігурацію аналізованої речовини.

Будь-яка поляриметрична система, незалежно від її конструктивного виконання, включає такі основні елементи (рис. 2.1):

1. Джерело світла забезпечує стабільний потік монохроматичного або квазімонохроматичного світла. Традиційно використовувалися натрієві лампи, але сучасні поляриметри все частіше оснащуються лазерними діодами або світлодіодами з вузькою спектральною смугою випромінювання. Використання лазерів значно підвищує інтенсивність, монохроматичність та когерентність світла, що покращує точність і чутливість вимірювань.

2. Поляризатор – оптичний елемент, який перетворює природне (неполяризоване) світло в лінійно поляризоване. Як поляризатори можуть використовуватися призми Ніколя, Глана-Томпсона або поляроїдні плівки.

Поляризатор пропускає лише ту складову світла, вектор електричного поля якої коливається в певній площині.

3. Кювета для зразка – прозора ємність (зазвичай скляна або кварцова), в яку поміщається досліджувана оптично активна рідина. Довжина кювети є одним із ключових параметрів, що впливають на кут обертання. Важливо забезпечити стабільну температуру зразка, оскільки оптична активність багатьох речовин чутлива до температурних змін.

4. Аналізатор – другий поляризатор, розташований після кювети зі зразком. Його призначення – виміряти кут, на який обернулася площина поляризації світла після проходження через оптично активну речовину. Аналізатор може бути обертовим (для візуальних або механічних систем) або фіксованим (для автоматизованих систем з модуляцією).

5. Детектор (фотоприймач) перетворює оптичний сигнал у електричний. Це може бути фотоелектронний помножувач (ФЕП), фотодіод, ПЗЗ-матриця або інший світлочутливий елемент, що фіксує інтенсивність світла, яке пройшло через аналізатор.

6. Система обробки сигналу та відображення включає електронні блоки для підсилення, фільтрації та аналого-цифрового перетворення сигналу з детектора. Сучасні системи оснащені мікропроцесорами, які виконують обчислення кута обертання, перетворення його в концентрацію та відображення результатів[18].

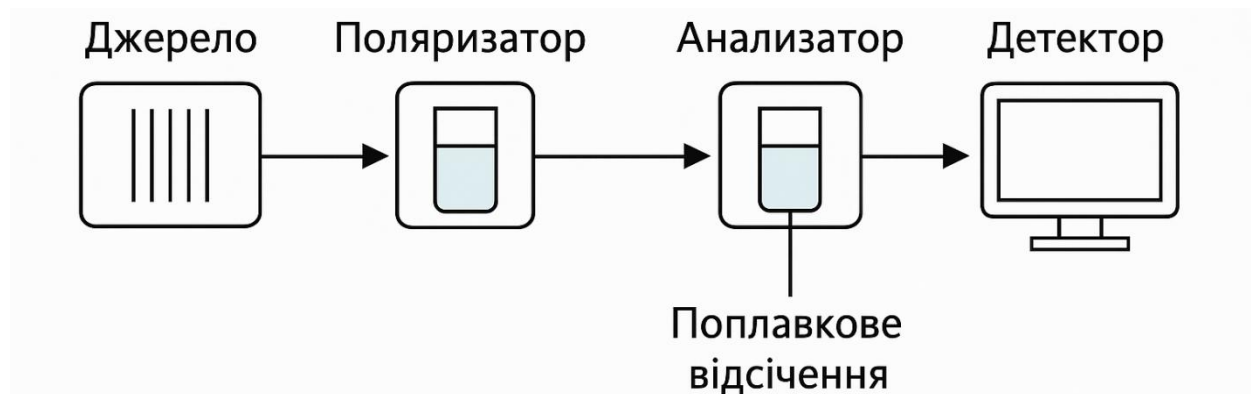


Рисунок 2.5 – Схема основних компонентів поляриметричної системи

Основний принцип дії поляриметра базується на законі Малюса (рис. 2.6), який описує залежність інтенсивності світла, що пройшло через два поляризатори, від кута між їхніми площинами поляризації. Якщо початкова площина поляризації встановлена поляризатором, то при проходженні через оптично активну речовину вона повертається на певний кут α . Для того, щоб світло досягло мінімальної інтенсивності (або згасло, якщо початково аналізатор був встановлений перпендикулярно поляризатору), аналізатор також повинен бути повернутий на той самий кут α . Існують різні підходи до вимірювання цього кута, що визначають тип поляриметричної системи[16].

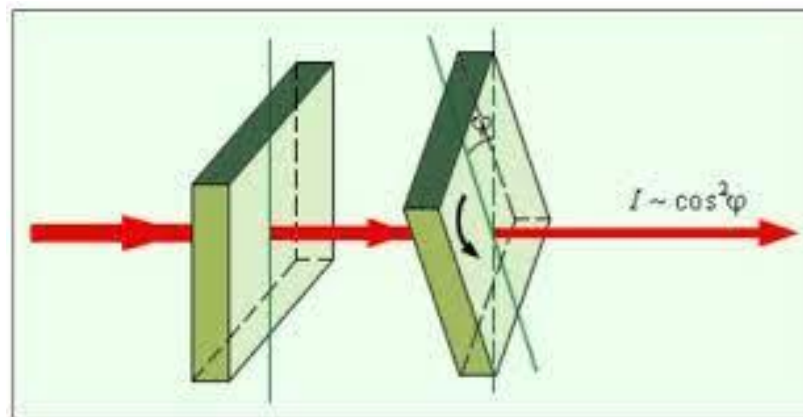


Рисунок 2.6 – Ілюстрація закону Малюса: залежність інтенсивності світла від кута між поляризатором і аналізатором

Візуальні поляриметри (ручні). У цих приладах оператор вручну обертає аналізатор, спостерігаючи через окуляр за полем зору. Кут обертання визначається моментом, коли поле зору стає максимально темним або однорідно освітленим (залежно від конструкції, наприклад, з використанням півтіньових пластин). Точність таких приладів залежить від гостроти зору оператора.

Фотоелектричні поляриметри (автоматизовані). Ці системи використовують фотоприймачі для об'єктивного та точного вимірювання інтенсивності світла. Метод нульового індикатора працює таким чином, аналізатор автоматично обертається до положення, де інтенсивність світла на детекторі досягає мінімуму (нуля або заданого мінімального значення). Кут повороту аналізатора безпосередньо відповідає куту обертання площини поляризації. У системах модуляційних поляриметрів (рис. 2.7) площина поляризації світла модулюється (наприклад, за допомогою Фарадея-комірки або фотопружного модулятора) з певною частотою. Якщо аналізатор не співпадає з площиною поляризації світла, що пройшло через зразок, на фотодетекторі виникає змінний сигнал, фаза або амплітуда якого залежить від кута розбалансу. Система зворотного зв'язку (наприклад, електромеханічний перетворювач або управління модулятором) автоматично доводить систему до нульового або балансного стану, фіксуючи відповідний кут. Цей підхід дозволяє досягти високої чутливості та швидкості вимірювань, мінімізуючи вплив сторонніх факторів та шуму.

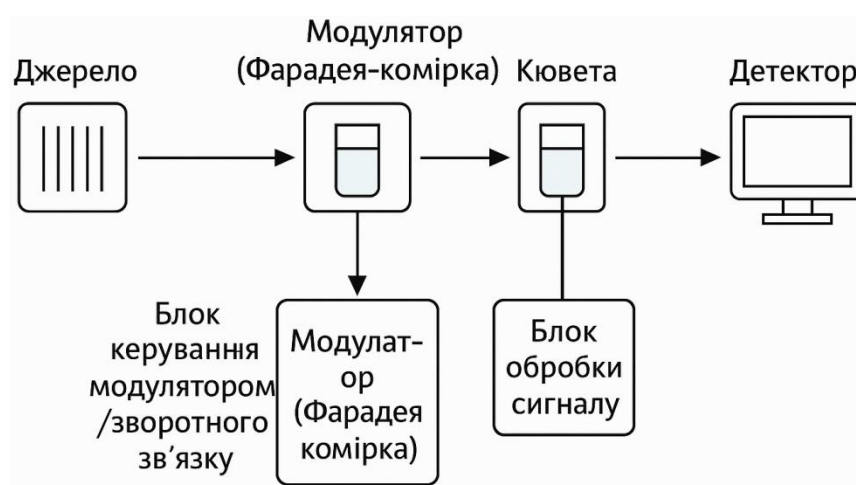


Рисунок 2.7 – Принцип дії модуляційного поляриметра

Кут обертання площини поляризації (α) для розчинів оптично активних речовин описується законом Біо (рис. 2.8):

$$\alpha = [\alpha]_{\lambda}^T \cdot l \cdot C, \quad (2.6)$$

де α – вимірний кут обертання (у градусах), $[\alpha]_{\lambda}^T$ – питоме обертання речовини, константа для даної речовини при певній довжині хвилі λ та температурі T , l – довжина оптичного шляху, який світло проходить у зразку (зазвичай в дециметрах), C – концентрація оптично активної речовини в розчині (зазвичай в г/100 мл або г/мл).

Для чистих рідких оптично активних речовин закон Біо модифікується, враховуючи їхню густину (ρ):

$$\alpha = [\alpha]_{\lambda}^T \cdot l \cdot \rho, \quad (2.7)$$

Вимірюючи кут α та знаючи питоме обертання, довжину кювети та температуру, можна точно визначити концентрацію оптично активної речовини.

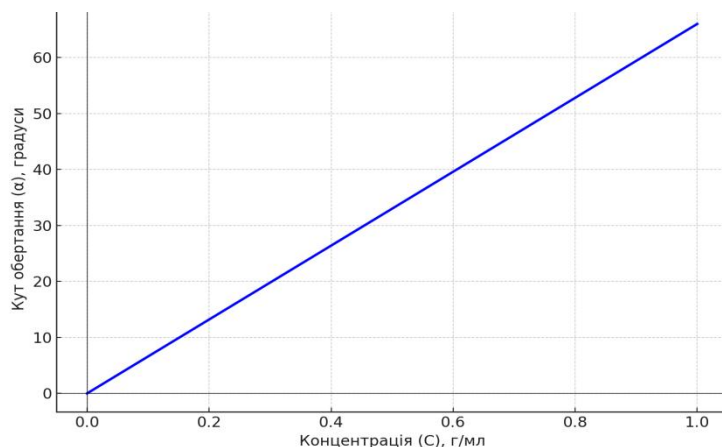


Рисунок 2.8 – Залежність кута обертання площини поляризації від концентрації оптично активної речовини

Сучасні поляриметричні системи, особливо ті, що використовують лазерні джерела та цифрову обробку сигналів відрізняються високою точністю і чутливістю. Лазерне світло та прецизійні детектори дозволяють вимірювати дуже малі кути обертання. Також, автоматизовані системи здатні проводити аналіз за секунди, що важливо для потокового контролю. Усунення людського фактора з процесу

вимірювання забезпечує високу повторюваність результатів. Інтеграція з комп'ютерними системами дозволяє автоматизувати збір даних, їх обробку та формування звітів. Системи часто оснащуються термостатами для контролю температури зразка, що є критичним для точних вимірювань[19].

Таким чином, принцип дії поляриметричних систем ґрунтується на точному вимірюванні кута обертання площини поляризації світла оптично активними речовинами, використовуючи для цього комплекс оптичних та електронних компонентів.

2.3 Фізико-хімічні основи поляриметричного аналізу

Поляриметричний аналіз базується на унікальній властивості деяких речовин обертати площину поляризації лінійно поляризованого світла, яке проходить через них. Це явище називається оптичною активністю. Розуміння фізико-хімічних основ цього явища є ключовим для правильного застосування та інтерпретації результатів поляриметричних вимірювань.

Оптична активність виникає у речовин, які володіють хіральністю. Хіральність (від грец. "χείρ" – рука) означає відсутність у молекули або кристала елементів симетрії, таких як центр симетрії, площина симетрії або дзеркально-поворотна вісь. Хіральна молекула не є сумісною зі своїм дзеркальним відображенням, подібно до лівої та правої рук. Такі дзеркальні ізомери називаються енантіомерами.

Кожен енантіомер обертає площину поляризації світла на однаковий кут, але в протилежних напрямках. Енантіомер, що обертає площину поляризації за годинниковою стрілкою (вправо), називається правообертаючим (позначається знаком "+", або d-), а той, що обертає проти годинникової стрілки (вліво), – лівообертаючим (позначається знаком "-", або l-) (рис. 2.9).

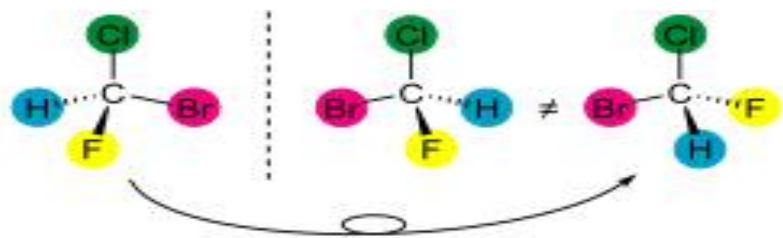


Рисунок 2.9 – Схематичне зображення хіральної молекули та її енантіомера

Суміш рівних кількостей обох енантіомерів називається рацемічною сумішшю і не проявляє оптичної активності, оскільки обертання одного енантіомера компенсується обертанням іншого.

Найбільш поширеною причиною хіральності в органічних сполуках є наявність асиметричного атома вуглецю (хірального центру), тобто атома вуглецю, зв'язаного з чотирма різними атомами або групами атомів. Прикладами таких оптично активних речовин є цукри (глюкоза, сахароза, фруктоза), амінокислоти, багато фармацевтичних препаратів, терпеноїди тощо. Оптичну активність також можуть проявляти кристали, такі як кварц, завдяки хіральній будові їхньої кристалічної решітки[23].

Лінійно поляризоване світло можна представити як суперпозицію (накладання) двох циркулярно поляризованих променів – з правою та лівою круговою поляризацією, які мають однакову амплітуду та поширюються з однаковою швидкістю в ізотропному середовищі. В оптично активному середовищі ці два циркулярно поляризовані промені взаємодіють з хіральними молекулами по-різному: один з них (наприклад, правокруговий) може поширюватися швидше, ніж інший (лівокруговий), або матиме інший коефіцієнт поглинання.

Якщо швидкості поширення цих двох циркулярно поляризованих променів різні ($v_R \neq v_L$), то при виході з оптично активного середовища між ними виникне різниця фаз. Ця різниця фаз призводить до того, що результуюча лінійно поляризована хвиля буде мати площину поляризації, обернену на певний кут відносно початкової. Величина цього кута залежить від різниці в показниках заломлення для правої та лівої кругової поляризації (так званий круговий дихроїзм).

Кут обертання площини поляризації залежить від кількох ключових фізико-хімічних параметрів:

1. Концентрація оптично активної речовини. Чим вища концентрація хіральних молекул у розчині, тим більше взаємодій відбудеться зі світлом, і тим більшим буде кут обертання. Ця залежність є лінійною і становить основу кількісного поляриметричного аналізу (Закон Біо).

2. Довжина оптичного шляху. Чим довший шлях світла через оптично активне середовище, тим більшим буде кут обертання. Довжина кювети, в якій знаходиться зразок, є прямим відображенням цього параметра.

3. Природа оптично активної речовини. Кожна оптично активна речовина має свою унікальну здатність до обертання площини поляризації, яка характеризується питомим обертанням. Це фундаментальна константа, що визначається структурою молекули.

4. Довжина хвилі світла. Кут обертання залежить від довжини хвилі використовуваного світла. Це явище називається дисперсією оптичного обертання (ДОВ). Зазвичай вимірювання проводять при стандартній довжині хвилі (наприклад, D-лінія натрію, 589,3 нм), щоб забезпечити порівнянність результатів.

5. Температура. Оптична активність багатьох речовин є чутливою до температури. Зміна температури може впливати на конформацію молекул, а також на густину розчинів, що в свою чергу впливає на кут обертання. Тому точний поляриметричний аналіз вимагає строгого контролю температури.

6. Розчинник. У випадку розчинів, природа розчинника може впливати на оптичну активність, оскільки він може змінювати конформацію оптично активних молекул або їхню взаємодію[21].

Ця лінійна залежність дозволяє використовувати поляриметричні вимірювання для точного визначення концентрації оптично активних речовин у розчинах, що робить поляриметрію цінним кількісним аналітичним методом. Фізико-хімічні основи поляриметричного аналізу, що ґрунтуються на хіральності молекул та їхній

взаємодії з поляризованим світлом, забезпечують його унікальні можливості для дослідження широкого спектру органічних та неорганічних сполук (рис. 2.10).

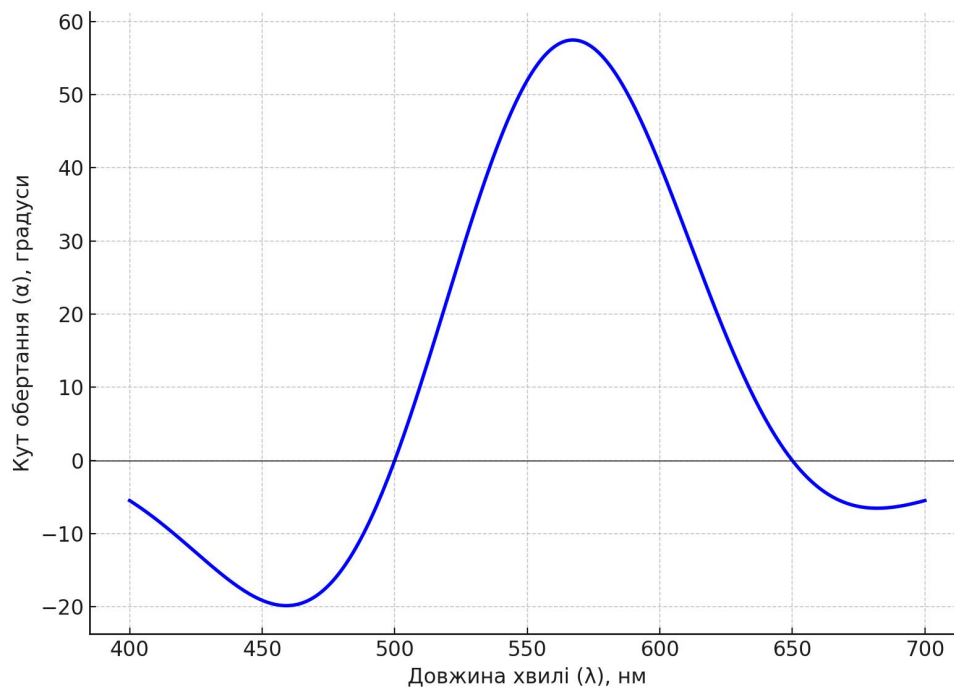


Рисунок 2.10 – Графік дисперсії оптичного обертання

Залежність питомого обертання $[\alpha]_{\lambda}$ від довжини хвилі описується емпіричною формулою Біо:

$$[\alpha]_{\lambda} = \frac{A}{\lambda^2 - \lambda_0^2}, \quad (2.8)$$

де $[\alpha]_{\lambda}$ – питоме обертання при довжині хвилі λ , A , λ_0 – експериментальні константи, що залежать від речовини.

Ця залежність демонструє, що зменшення довжини хвилі призводить до зростання питомого обертання, що важливо для вибору джерела випромінювання в поляриметрії.

Для математичного опису зміни поляризаційного стану лазерного випромінювання при проходженні через оптично активне середовище використовуються формалізми Джонса (для повністю поляризованого світла) та Мюллера (для частково або неполяризованого). Світло з початковим поляризаційним станом описується вектором Джонса:

$$\vec{E}_{in} = \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

Проходження через оптично активне середовище, що обертає площину поляризації на кут θ , описується матрицею обертання:

$$J(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

Вихідний вектор:

$$\vec{E}_{out} = J(\theta) \cdot \vec{E}_{in} \quad (2.11)$$

Це дозволяє відстежити зміну напрямку вектора електричного поля лазерного світла в системі координат поляризатора.

Для опису зміни частково поляризованого випромінювання застосовується матриця Мюллера:

$$\vec{S}_{in} = \begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{bmatrix} \Rightarrow \vec{S}_{out} = M(\theta) \cdot \vec{S}_{in} \quad (2.12)$$

де S – вектор Стокса, що описує інтенсивність та поляризаційний стан.

Матриця Мюллера для обертання поляризації на кут θ :

$$M(\theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos 2\theta & \sin 2\theta & 0 \\ 0 & -\sin 2\theta & \cos 2\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

Цей підхід дозволяє враховувати неідеальні умови експерименту, втрати, деполаризацію та складну поведінку реальних оптичних середовищ.

2.3 Аналіз переваг та обмежень існуючих поляриметрів

Поляриметричні методи аналізу, що ґрунтуються на унікальній взаємодії поляризованого світла з оптично активними речовинами, є фундаментом для контролю якості та досліджень у незліченній кількості галузей, від фармацевтики до харчової промисловості. Еволюція цих вимірювальних систем від простих візуальних інструментів до високотехнологічних автоматизованих комплексів свідчить про їхню незмінну актуальність. Розуміння докорінних переваг, що роблять їх незамінними, а також усвідомлення властивих їм обмежень, є вирішальним для обґрунтованого вибору та ефективного застосування поляриметричних систем[20].

Сучасні поляриметри вирізняються цілою низкою характеристик, що роблять їх вкрай привабливими для аналітичного контролю. Однією з найважливіших є їхня висока точність та надзвичайна чутливість (рис. 2.11). Перехід від ручного візуального спостереження до автоматизованих фотоелектричних та модуляційних систем, оснащених лазерними джерелами світла та надчутливими фотодетекторами (такими як фотоелектронні помножувачі або ПЗЗ-матриці), дозволив досягти точності вимірювання кута обертання до 0.0001 градуса. Це забезпечує можливість

надійного визначення концентрації речовин навіть на низьких рівнях, що критично важливо у багатьох високотехнологічних виробництвах. Лазерні джерела світла, на відміну від традиційних натрієвих ламп, надають світлу високу монохроматичність та інтенсивність, мінімізуючи вплив хроматичної дисперсії світла та значно покращуючи співвідношення сигнал/шум.

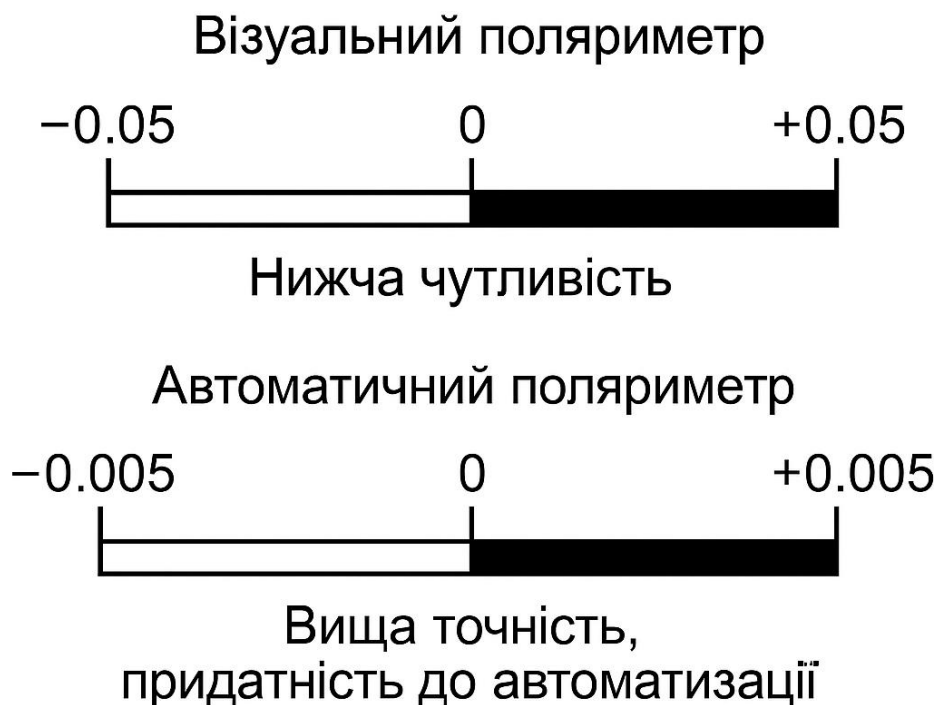


Рисунок 2.11 – Порівняння точності та чутливості візуальних та автоматичних поляриметрів

Іншою значною перевагою є неперевершена швидкість та високий ступінь автоматизації сучасних поляриметричних вимірювань. Автоматичні поляриметри здатні завершити аналіз за лічені секунди, що є життєво необхідним для виробничих процесів з високою пропускнуою здатністю, де час вимірювання безпосередньо впливає на ефективність виробництва. Більше того, інтеграція цих систем з комп'ютерними технологіями дозволяє повністю автоматизувати калібрування, збір та обробку даних, а також генерацію звітів. Це не тільки значно скорочує час,

необхідний для аналізу, але й мінімізує вплив людського фактора, забезпечуючи високу об'єктивність та повторюваність результатів[24].

Важливою характеристикою поляриметричного аналізу є його безконтактний та неруйнівний характер. Вимірювання не вимагають хімічної модифікації чи руйнування зразка, що дозволяє зберегти його цілісність. Ця особливість є безцінною при роботі з дорогими, рідкісними або біологічно цінними речовинами. Крім того, аналіз може проводитись без прямого фізичного контакту з оптично активною речовиною, що знижує ризик перехресного забруднення та мінімізує будь-який вплив на властивості зразка.

Сучасні поляриметри вирізняються простотою експлуатації та легкістю калібрування. Цифрові інтерфейси та вбудоване програмне забезпечення часто забезпечують інтуїтивно зрозуміле керування та автоматизовані процедури калібрування, наприклад, за допомогою стандартних розчинів сахарози або кварцових пластин. Це робить їх доступними навіть для операторів без глибоких аналітичних знань. Відсутність потреби у складній попередній підготовці зразка (за винятком випадків, коли він мутний або містить значні домішки) також спрощує робочий процес.

З економічної точки зору, поляриметричні системи характеризуються відносно низькими експлуатаційними витратами. Вони не вимагають значної кількості дорогих реагентів або витратних матеріалів, що робить їх економічно вигідним вибором для рутинного аналізу. Деякі компактні моделі також забезпечують можливість використання в польових умовах або безпосередньо на виробничій лінії. Нарешті, поляриметрія має надзвичайно широкий спектр застосування. Вона є незамінним інструментом у фармацевтичній промисловості для контролю чистоти та концентрації лікарських субстанцій, таких як антибіотики та вітаміни. У харчовій промисловості поляриметри використовуються для визначення вмісту цукрів у соках, меді, напоях та сиропях, а також для контролю якості ефірних олій. Хімічна промисловість застосовує поляриметрію для визначення концентрації оптично

активних ізомерів та моніторингу перебігу хімічних реакцій. У біохімії та медицині метод дозволяє визначати концентрацію білків, вуглеводів у біологічних рідинах та досліджувати кінетику ферментативних процесів. Навіть у нафтовій промисловості поляриметрія знаходить застосування для аналізу хіральних компонентів нафти[25].

Незважаючи на значні переваги, поляриметричні системи мають певні обмеження, які необхідно враховувати при їх виборі та застосуванні. Найбільш критичним обмеженням є низька селективність до багатоконпонентних сумішей (рис. 2.12). Метод є специфічним виключно для оптично активних речовин. Однак, якщо у зразку присутні кілька таких компонентів, виміряний кут обертання буде лінійною сумою їхніх індивідуальних внесків. Це унеможливорює пряме визначення концентрації кожного окремого компонента у складній суміші без попереднього розділення (наприклад, за допомогою хроматографії) або застосування додаткових аналітичних методів. Крім того, поляриметр не розрізняє енантіомери, якщо вони присутні у рівних кількостях (рацемічні суміші не проявляють оптичної активності).

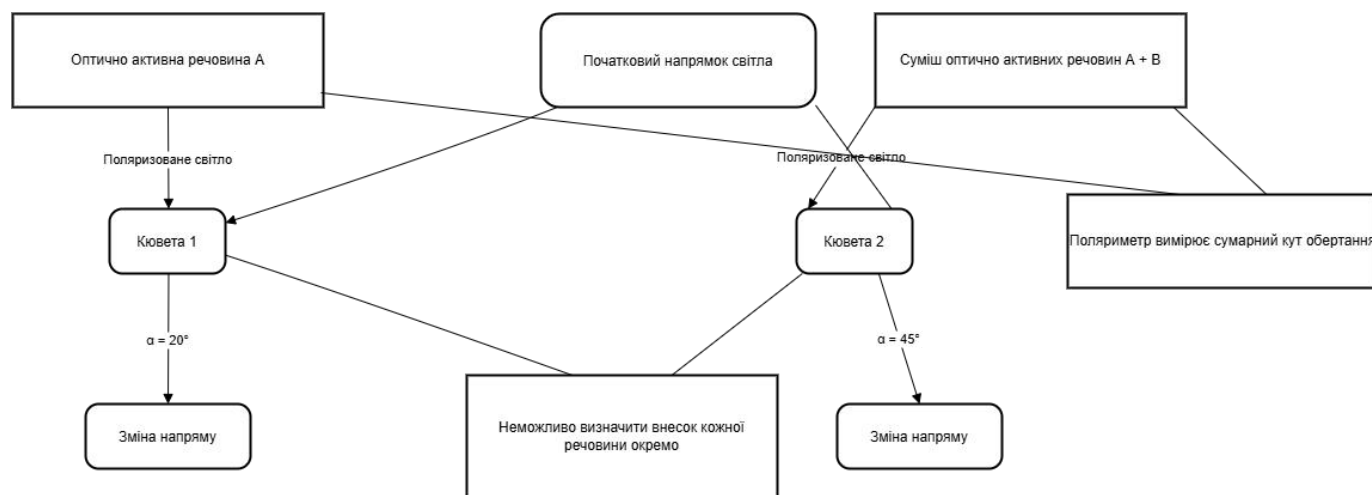


Рисунок 2.12 – Ілюстрація обмеженої селективності поляриметрії

Поляриметричні вимірювання також дуже чутливі до наявності домішок. Присутність навіть невеликих кількостей інших оптично активних домішок у зразку може суттєво спотворити результати, що вимагає високої чистоти аналізованої

речовини. Більше того, мутні або сильно забарвлені зразки становлять значну проблему, оскільки вони можуть поглинати або розсіювати світло, що призводить до неточних вимірювань або унеможлиблює їх взагалі.

Іншим важливим аспектом є сильна залежність кута обертання від умов вимірювання. Температура, довжина хвилі використовуваного світла та природа розчинника є критичними параметрами. Будь-які неконтрольовані коливання цих факторів під час вимірювання можуть призвести до значних похибок. Це вимагає використання високоточних термостатів для підтримання стабільної температури зразка та стабільних, монохроматичних джерел світла[22].

Щодо чутливості, поляриметричні системи мають обмежену ефективність при аналізі дуже низьких концентрацій. Хоча точність вимірювання самого кута є високою, для отримання значущого кута обертання потрібна достатня кількість оптично активних молекул (рис. 2.13). Таким чином, метод є менш чутливим для аналізу речовин у слідових концентраціях (зазвичай ефективний при концентраціях понад 0.1-1%) порівняно з деякими високочутливими спектроскопічними методами, як, наприклад, флуоресцентна спектроскопія[3].

Існують також обмеження щодо фазового стану зразка. Поляриметрія переважно застосовується для аналізу прозорих рідин (розчинів або чистих рідин) та деяких прозорих твердих тіл (наприклад, кристалів). Аналіз непрозорих, колоїдних або сильно розсіюючих середовищ є надзвичайно складним або взагалі неможливим через значне послаблення та спотворення сигналу. Крім того, якість самого зразка має велике значення: наявність пухирців повітря, завислих частинок або неоднорідностей може призвести до розсіювання світла та суттєво спотворити результати вимірювань.

Узагальнюючи, сучасні поляриметри є потужним, швидким та точним інструментом для кількісного аналізу оптично активних речовин, особливо в умовах контрольованих матриць, де вплив домішок мінімізований або добре відомий. Їхні переваги в автоматизації, неруйнівності та економічності роблять їх незамінними у

багатьох промислових та дослідницьких застосуваннях. Проте, їхні обмеження, зокрема низька селективність до багатокомпонентних сумішей та чутливість до умов вимірювання, вимагають ретельного планування аналізу та, в деяких складних випадках, інтеграції поляриметрії з іншими комплементарними аналітичними методами для отримання повної та достовірної інформації про склад речовини[16].



Рисунок 2.13 – Вплив мутності та забарвлення зразка на поляриметричні вимірювання

2.5 Висновки до розділу 2

Було детально розглянуто сутність поляризації світла та його взаємодію з речовиною, що дозволило зрозуміти фундаментальні принципи оптичної активності. З'ясовано, що здатність певних речовин обертати площину поляризації світла є не лише унікальною фізичною властивістю, але й потужним аналітичним маркером, що дозволяє проводити як якісне, так і кількісне визначення хіральних сполук.

Огляд існуючих поляриметричних методів вимірювання продемонстрував їхню еволюцію від простих візуальних приладів до складних, високоточних автоматизованих систем. Це дозволило виявити значні переваги сучасних поляриметрів, які проявляються у їхній здатності забезпечувати виняткову точність та чутливість вимірювань, що досягається завдяки використанню лазерних джерел світла та вдосконалених фотодетекторів. Особливо цінною є швидкість та високий ступінь автоматизації процесу, що робить поляриметрію незамінним інструментом для швидкого контролю якості у виробничих умовах. Більше того, неруйнівний та безконтактний характер поляриметричного аналізу дозволяє зберігати цілісність цінного зразка, а простота експлуатації та відносно низькі експлуатаційні витрати підвищують економічну ефективність цього методу. Ці характеристики забезпечують широкий спектр застосування поляриметрії у таких критично важливих галузях, як фармацевтика, харчова промисловість, хімія та біохімія.

Однак, проведене дослідження також виявило певні обмеження, які можуть суттєво вплинути на застосування поляриметричних методів. Найбільш значущим з них є низька селективність поляриметрів у випадку багатокomпонентних сумішей, оскільки прилад вимірює лише сумарний кут обертання, не розрізняючи внесків окремих оптично активних компонентів. Це вимагає або попереднього розділення сумішей, або використання інших аналітичних методів для отримання повної інформації. Крім того, поляриметрія є чутливою до наявності домішок, особливо тих,

що викликають мутність або сильне забарвлення зразка, оскільки вони можуть розсіювати або поглинати світло, спотворюючи результати.

Загалом, незважаючи на деякі обмеження, поляриметрія залишається фундаментальним і надзвичайно ефективним методом оптичного аналізу. Її переваги у точності, швидкості та універсальності застосування роблять її невід'ємною частиною сучасних аналітичних лабораторій та виробничих процесів, де вона доповнюється іншими методами для комплексного аналізу.

3 РОЗРОБКА МЕТОДУ ТА ТЕХНІЧНОГО ЗАСОБУ ПОЛЯРИМЕТРИЧНОГО АНАЛІЗУ

3.1 Вибір принципу дії та обґрунтування методики вимірювань

Розробка нового методу та технічного засобу поляриметричного аналізу оптично активних рідин вимагає обґрунтованого вибору принципу дії, який би забезпечував високу точність, чутливість, швидкість та стабільність вимірювань, мінімізуючи при цьому вплив відомих обмежень існуючих поляриметрів. З огляду на завдання розробки сучасного приладу, орієнтованого на підвищення ефективності аналізу, необхідно віддати перевагу автоматизованим підходам, які усувають суб'єктивність візуальних методів та підвищують об'єктивність результатів (рис. 3.1).

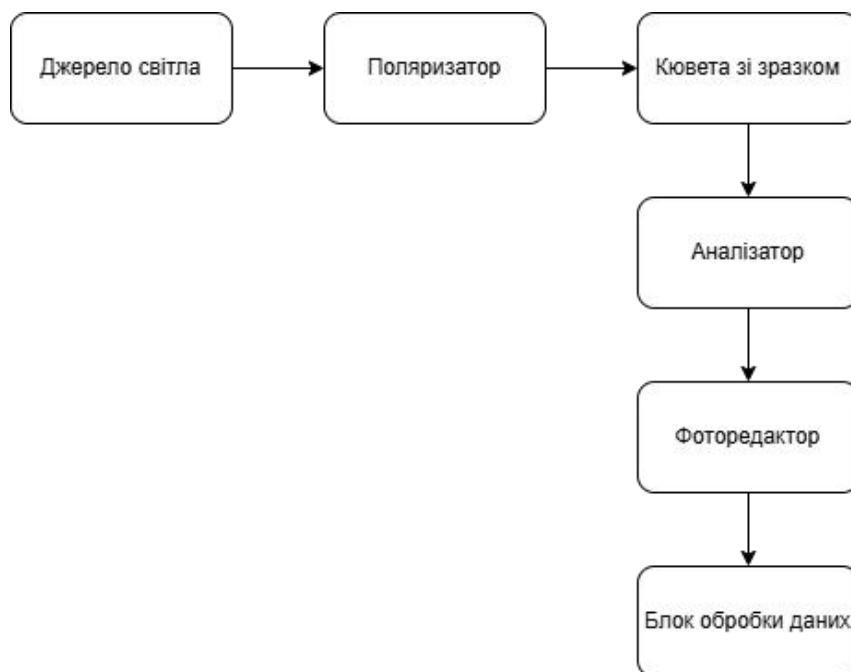


Рисунок 3.1 – Принципова оптична схема автоматизованого поляриметра

Одним із ключових параметрів, що визначають концентрацію оптично активної речовини, є кут обертання площини поляризації. Визначення цього кута

базується на законі Біо, який описує лінійну залежність між кутом обертання α , питомим обертанням $[\alpha]$, довжиною кювети l (в дециметрах) та концентрацією розчину C (г/см³):

$$\alpha = [\alpha] \cdot l \cdot C \quad (3.1)$$

де α – кут обертання, $[\alpha]$ – питоме обертання (значення береться з довідників для конкретної речовини), l – довжина шляху світла в речовині, C – концентрація розчину.

Для глюкози відомо, що $[\alpha]=52.7$ град/дм · г/см³ при довжині хвилі 589 нм і температурі 20° С. При довжині кювети $l=1$ дм та концентрації $C=0.01$ г/см³ отримаємо:

$$\alpha = 52,7 \cdot 1 \cdot 0,01 = 0,527^\circ$$

Таблиця 3.1 – Приклади розрахунку кута обертання для різних концентрацій глюкози

Концентрація C (г/см ³)	Довжина кювети l (дм)	Кут α (°)
0.01	1	0.527
0.03	1	1.581
0.05	1	2.635
0.07	1	3.689
0.10	1	5.270

Аналіз існуючих методів (візуальних, фотоелектричних та модуляційних) дозволив виділити фотоелектричні та модуляційні підходи як найбільш перспективні для автоматизації. Для розроблюваного поляриметра обирається фотоелектричний принцип дії з використанням метода нульової компенсації (або балансного методу). Цей вибір обґрунтовується такими перевагами:

- висока точність та чутливість – метод нульової компенсації передбачає обертання аналізатора до моменту мінімальної (або нульової) інтенсивності світла, що забезпечується чутливими фотодетекторами, дозволяючи досягти точності до 0.001° і навіть 0.0001° ;

- усунення суб'єктивного фактора – визначення мінімуму інтенсивності відбувається автоматично, за допомогою електронної системи, що забезпечує високу об'єктивність та відтворюваність результатів;

- можливість автоматизації – принцип нульової компенсації легко піддається автоматизації за допомогою крокового двигуна/сервоприводу та системи зворотного зв'язку від фотодетектора;

- стійкість до коливань інтенсивності джерела світла – метод вимірює положення аналізатора, а не абсолютну інтенсивність світла, що робить його стійким до незначних коливань джерела або прозорості зразка.

Методика вимірювань базується на принципі нульової компенсації та реалізується через чітко визначену послідовність операцій:

1. Формування поляризованого світла. Цей етап є критично важливим для забезпечення точних і відтворюваних вимірювань, оскільки він створює контрольовані початкові умови для взаємодії світла зі зразком. Процес починається з випромінювання від стабільного джерела світла, такого як високоякісний світлодіод (LED) або лазерний діод. Стабільність джерела є ключовою, оскільки коливання інтенсивності можуть впливати на чутливість системи. За необхідності, випромінювання від джерела може бути доповнене інтерференційним або монохроматичним світлофільтром. Це забезпечує монохроматичність світла, тобто

наявність однієї домінуючої довжини хвилі (наприклад, 589 нм для натрієвої лампи, що є стандартом поляриметрії), що є важливим для застосування закону Біо, оскільки питоме обертання оптично активних речовин залежить від довжини хвилі. Отриманий пучок світла далі проходить крізь поляризатор – оптичний елемент, який пропускає коливання світлової хвилі лише в одній, суворо визначеній площині. Таким чином, формується лінійно поляризоване світло з чітко фіксованою початковою площиною поляризації, наприклад, вертикальною, що слугує референсною точкою для всіх подальших вимірювань кута обертання.

2. Розміщення зразка. На цьому етапі відбувається безпосереднє введення оптично активної речовини в оптичний тракт поляриметра. Оптично активна рідина (досліджуваний розчин) встановлюється у спеціальній кюветі стандартної довжини, яка має оптично прозорі стінки та точно калібровану довжину (наприклад, 1 дм). Ця кювета розміщується безпосередньо в оптичний тракт поляриметра, одразу після поляризатора. Точне розташування кювети є важливим для того, щоб поляризоване світло повністю проходило крізь зразок і не зазнавало додаткових спотворень. Стандартна довжина кювети є необхідною умовою для коректного застосування закону Біо та подальшого розрахунку концентрації, оскільки цей параметр входить у формулу розрахунку кута обертання. (рис. 3.2).

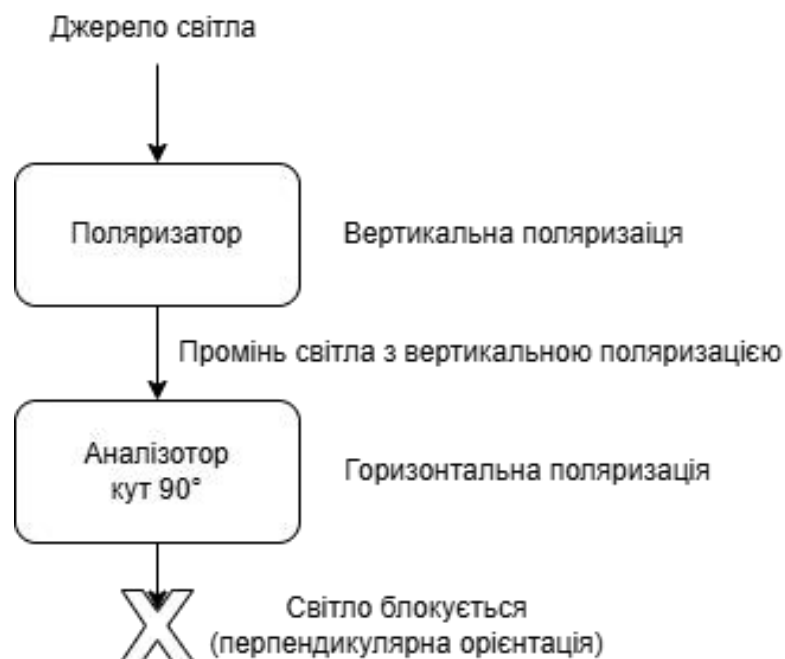


Рисунок 3.2 – Оптична схема поляриметра у стані нульової компенсації

3. Вимірювання "нульової" точки (α_0). За відсутності зразка аналізатор встановлюється перпендикулярно до площини поляризації поляризатора. Це положення відповідає мінімальному проходженню світла і фіксується як початкова нульова точка (α_0), що слугує базовим референсом.

4. Вимірювання зразка та автоматична компенсація. Після введення оптично активної рідини в кювету, система автоматично активує кроковий двигун (або сервопривід) для обертання аналізатора. Процес триває доти, доки фотодетектор знову не зафіксує стан мінімальної інтенсивності світла (нульової компенсації). Точне положення аналізатора в цьому стані фіксується як кінцева точка (α_1) (Рис. 3.3).

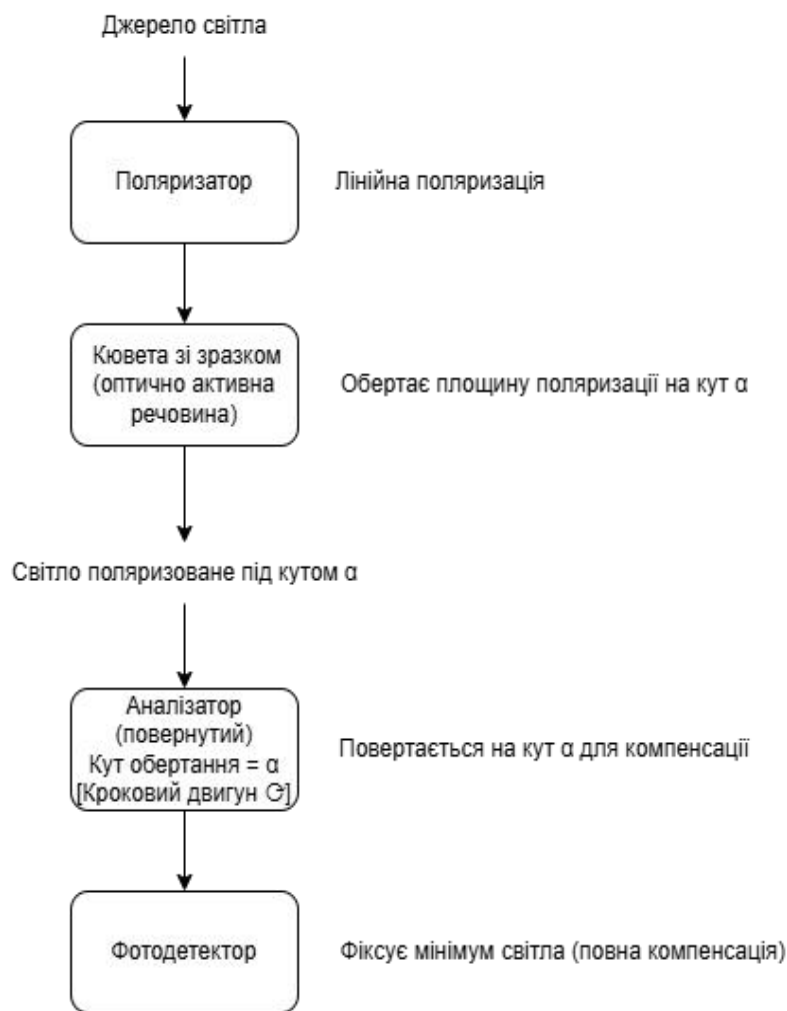


Рисунок 3.3 – Оптична схема поляриметра під час вимірювання зразка та автоматичної компенсації

5. Розрахунок кута обертання та визначення концентрації: Кут обертання α розраховується як різниця між кінцевим (α_1) та початковим (α_0) положеннями аналізатора: $\alpha = \alpha_1 - \alpha_0$.

Вибір фотоелектричного принципу з нульовою компенсацією у поєднанні з детально обґрунтованою методикою вимірювань створює надійну та об'єктивну основу для розробки автоматизованого поляриметра, забезпечуючи високоточний та ефективний аналіз оптично активних рідин.

3.2 Блок живлення лазерного випромінювача

Багато інверторів, перетворювачів і джерел живлення використовувалися для живлення лазерів. У першу чергу це відноситься до популярного гелієво-неонового лазера, який працює з номінальною напругою 2 кВ, споживаючи струм від 3,5 мА до 7 мА. Виявляється, що ці лазери є досить незручним навантаженням для джерела живлення. Точно як і його примітивний родич - звичайна неоновіа лампа - газовий лазер вимагає для запуску напругу вищу, від робочої напруги. Вона може доходити до 6 - 10 кВ. Багато що залежить від внутрішнього тиску газу, температури і терміну служби. Є й інші важко вловимі фактори, що впливають на процес іонізації, з якого починається нормальна робота, такі як: радіоактивність, вологість, зовнішня освітленість і т.д. Бажано, щоб запуск був надійним і автоматичним.

Інша особливість провідності газу в трубці лазера полягає в тому, що вона є негативною. Це призводить до нестійкості, часто випадкового характеру. Кращим способом боротьби з цим явищем є використання джерела живлення з фіксованим струмом, при цьому компенсується негативний опір. Практично, дуже вдалий підхід до стабілізації роботи лазера полягає в тому, щоб використовувати комбінацію звичайного резистора (з позитивним опором) і джерела живлення зі стабілізацією струму. Слід підкреслити також, що у разі роботи від батарей, джерело живлення лазера повинно мати високий К.К.Д.

Зображена на рисунку 3.2 схема джерела живлення гелій-неонового лазера задовольняє запропонованим вимогам. Крім того, якщо помістити його в металевий кожух, можна значно послабити радіоперешкоди. Принцип дії можна зрозуміти, розібравшись в декількох основних електричних схемах, які разом дають бажаний результат.

У цій схемі здійснено оптимальне використання різноманітних схем для забезпечення стабілізації струму, а також автоматичного запуску.

- LT1074 понижуючий імпульсний стабілізатор. Ця керуюча широтно-імпульсної модуляції використовується як стабілізатор струму. По суті цей режим досягнутий завдяки подачі на вихід FB невеликої напруги з резистора зворотного зв'язку, що має опір 340 Ом, який включений послідовно з лазером.

- Генератор з насиченим осердям, що складається з трансформатора L2, транзисторів Q1, Q2 і пов'язаних з ними компонент. Цей генератор прямокутних коливань отримує постійну напругу живлення з виходу керуючої. Вихідна напруга згладжується фільтром. Тепер слід зауважити, що робочий струм лазера можна стабілізувати, змінюючи амплітуду прямокутного коливання, яке формується генератором з сердечником насичення.

- Двохнапівперіодичний подвоювач напруги, що використовує діоди D1, D2 і два конденсатори ємністю 0,1 мкФ. Ця схема, разом з підвищуючим трансформатором генератора (L2) забезпечує високу постійну напругу для лазера.

- Лазер як навантаження. Тут з належною увагою слід поставитися до правильного вмикання з точки зору полярності. Важливо, щоб резистор 50 кОм був розташований безпосередньо у трубки; кілька сантиметрів дротів можуть викликати паразитні коливання і нестійкість іонізації.

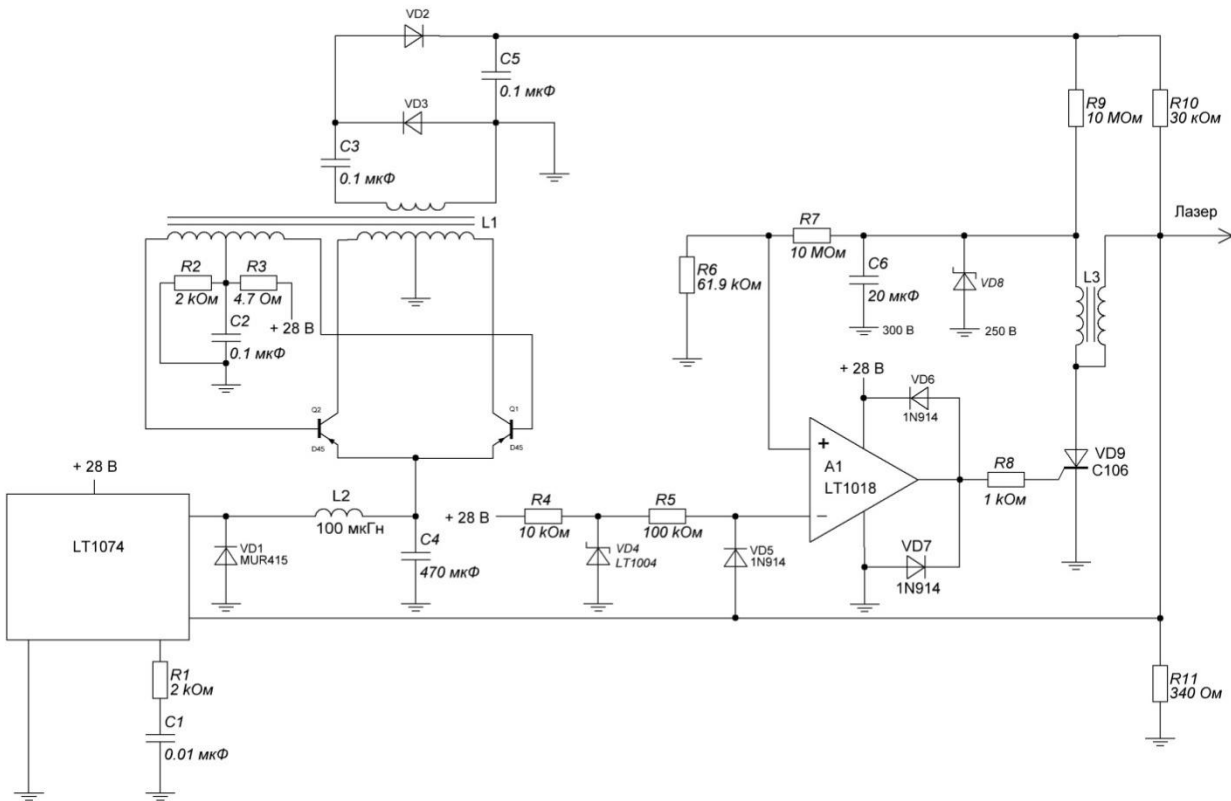


Рисунок 3.3 - Блок живлення гелій-неонового лазера

Об'єднання перерахованих вище схем забезпечує отримання і стабілізацію відповідного струму для лазера. Залишилася частина схеми, призначена для отримання високовольтного імпульсу, який подається на пуск; він повинен викликати іонізацію, щоб в газі з'явилася провідність, необхідна для роботи лазера.

Для наочності роботи, припустимо, що постійна напруга 28 В щойно подана на наше джерело живлення. На лазері з'являється напруга близько 3,5 кВ. Як вже говорилося, цього недостатньо, щоб іонізувати газ усередині трубки, і ніякої генерації в лазері не відбувається. Зауважимо, що резистор з опором 10 МОм дозволяє конденсатору C2 заряджатися від джерела напруги 3,5 кВ, але напруга на ньому обмежена величиною 250 В за допомогою підключеного паралельно стабілітрона. Мета полягає в тому, щоб перенести енергію, накопичену в

конденсаторі C2, в первинну обмотку трансформатора Z3, індуючи при цьому високовольтний сигнал у вторинній обмотці. Цей сигнал запускає лазер.

Виконується це таким чином: коли напруга 28 В подається на джерело живлення лазера, вихід компаратора A1 практично має потенціал землі і нічого не відбувається. Але, у міру заряду конденсатора C2 до покладених 250 В, деяка частина цієї напруги з'являється на неінвертуючому вході компаратора, викликаючи в кінцевому рахунку підвищення напруги на його виході. Це запускає тиристор і конденсатор C2 розряджається. Поки лазер працює в нормальному режимі, компаратор повертається до свого початкового стану. Це відбувається через наявність позитивної напруги на його інвертуючому вході, отриманому на резисторі 340 Ом при протіканні струму лазера. Слід помітити, що якщо з якоїсь причини лазер припинить роботу, то знову він запуститься автоматично.

3.3 Розробка схеми і розрахунок фотоприймального пристрою

Для того щоб прийняти і перетворити оптичний сигнал у схемі лазерного поляриметра потрібен фотоприймальний пристрій (ФПП). Він включає в себе лінзу, оптичний фільтр, корпус, фотодіод, схему підсилення сигналу (рисунок 3.4), і компаратор. Максимальна чутливість поляриметричного контролю залежить від характеристик ФПП, потужності лазера, втрат сигналу у модуляторі та оптичних компонентах схеми [10].

У схемі використовуюється фотодіод КОФ137В, який має такі характеристики чутливості 0,75 А/Вт і темнового струму 10 нА.

Підсилювач являє собою три каскади, виконаних на операційних підсилювачах ADA4817-1, технічні характеристики яких наведені виробником Analog Devices [15]. Перший каскад є перетворювачем струм-напруга з коефіцієнтом підсилення 2400.

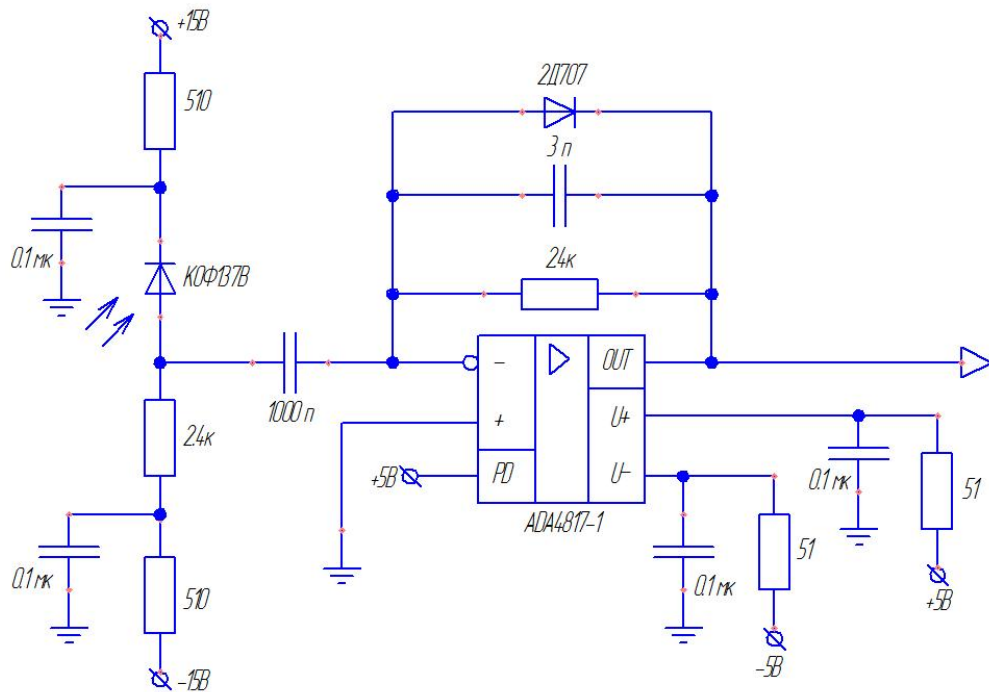


Рисунок 3.4 – Перший каскад підсилення ФПП

Другий і третій каскади – це однакові за схемою підсилювачі з коефіцієнтом підсилення 10 (рисунок 2.16).

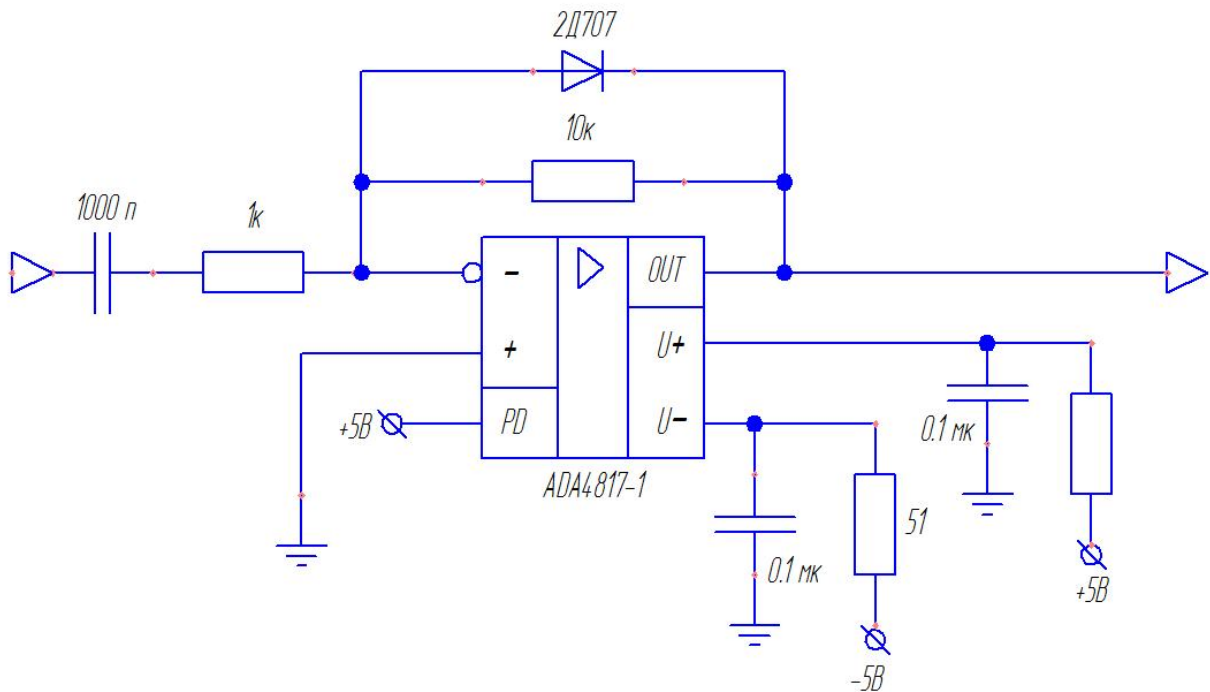


Рисунок 3.5 – Другий і третій каскади підсилення сенсора

Одним з найважливіших розрахунків фотоприймача є розрахунок енергії.

Будь-який фотоприймач, крім темного струму фотодіода, має шумовий струм, який в залежності від пропускної здатності розраховується за формулою:

$$i_{\text{шум}} = 0,1 \frac{nA}{\sqrt{\Gamma_{\text{ц}}}} \cdot \sqrt{f_{\text{np}}} \quad (3.1)$$

Щоб знайти шумовий струм, розраховуємо пропускну здатність фотоприймача. Резистор і конденсатор зворотного зв'язку є фільтром верхніх частот, а в поєднанні з конденсатором цей резистор утворює фільтр верхніх частот. Для розрахунку частоти обрізання RC-фільтрів використовується формула:

$$f_{\text{cp}} = \frac{1}{2\pi RC} \quad (3.2)$$

Використовуючи формулу (3.2), знайдемо верхню і нижню межу пропускної здатності фотоприймача:

$$f_{\text{в}} = \frac{1}{2\pi R_7 C_2} = \frac{1}{2\pi \cdot 2,4 \cdot 10^3 \cdot 3 \cdot 10^{-12}} \approx 22,1 \text{ МГц}$$

$$f_{\text{н}} = \frac{1}{2\pi R_7 C_1} = \frac{1}{2\pi \cdot 2,4 \cdot 10^3 \cdot 10^{-9}} \approx 66,4 \text{ кГц}$$

Смуга пропускання:

$$f_{\text{np}} = f_{\text{в}} - f_{\text{н}} = 22,1 \cdot 10^6 - 66,4 \cdot 10^3 = 22,0336 \text{ МГц}$$

Підставляємо отримане значення у формулу (3.1) та розраховуємо величину шумового струму:

$$i_{\text{шум}} = 0,1 \sqrt{f_{\text{np}}} = 0,1 \sqrt{22,0336 \cdot 10^6} \approx 470 \text{ нА}$$

Для того щоб визначити корисний сигнал на фоні шумів, він повинен бути в 5-10 разів більше кількості темного струму фотодіода і шумового струму приймача.

Встановимо значення корисного сигналу 3 мкА. Виходячи з чутливості фотодіода, ми визначимо потужність оптичного випромінювання, яка повинна потрапляти на нього для генерації струму, рівного 3 мікрона:

$$P = \frac{3 \mu A}{0,75 A / Wt} = 4 \mu Wt$$

Фотоприймальний пристрій крім фотодіода і схеми посилення містить оптичну систему, яка включає об'єктив діаметром 30 мм і фокусну відстань 51 мм, а також оптичний фільтр, через який проходить тільки випромінювання з довжиною хвилею лазера 633 нм. Оптичний фільтр потрібен для зменшення впливу світла на фотодіод. Він розташовується між об'єктивом і фотодіодом, при його установці необхідно враховувати, що фокусна відстань збільшиться на розмір, рівний товщині фільтра.

ФПП включає в себе компаратор ADCMP600, технічні характеристики якого наведені у [14]. Схему компаратора наведено на рисунку 3.5.

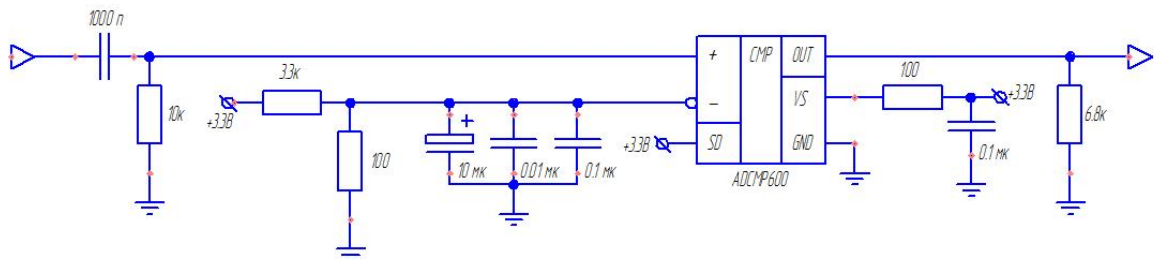


Рисунок 3.6 – Компаратор

3.4 Кінцевий датчик поляризатора

На платформі поляризатора і аналізатора розташована оптопара (рисунок 3.7), яка потрібна для визначення початкового положення стану поляризатора/аналізатора прив формуванні відповідних векторів Стокса.

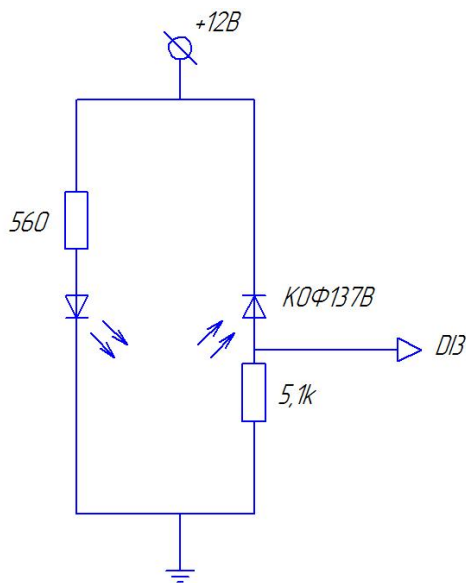


Рисунок 3.7 – Схема оптопари

Оптопара складається з інфрачервоного світлодіода і фотодіода COF137B з опором 5,1 кОм. Для того щоб світлодіод запрацював, необхідно прикласти струм приблизно 20 мА. Для цього потрібен резистор з номіналом:

$$R = \frac{U}{I} = \frac{12}{0.02} = 600 \approx 560 \text{ Ом}.$$

Коли між світлодіодом і фотодіодом немає границі, напруга на опорі фотодіода становить 3,4 В, що відповідає логічному рівню 1 для плати Arduino UNO. Як тільки оптичний переривач на верхній платформі піднімається між світлом і фотодіодом, напруга падає до 0,1 В, що відповідає логічному 0. Це викликає переривання, і програма управління визначає початкову позицію.

3.2 Структура та функціональні блоки технічного засобу

Побудова калібрувальної кривої є важливим етапом у поляриметричному аналізі, що дозволяє візуалізувати та використовувати лінійну залежність між кутом обертання α і концентрацією C оптично активної речовини. Ця крива будується за експериментальними або теоретично розрахованими значеннями кута обертання для

відомих концентрацій. Для більшості розбавлених розчинів оптично активних речовин ця залежність є лінійною. Графік калібрувальної кривої будується в системі координат: вісь X – концентрація C (г/см³), вісь Y – кут обертання α (градуси).

На основі даних з таблиці 3.1 (див. підрозділ 3.1) будується пряма (рис. 3.8), що проходить через початок координат. Кут нахилу цієї прямої визначає величину добутку питомого обертання на довжину кювети ($[\alpha] \cdot l$), що відображає чутливість вимірювальної системи. Таку калібрувальну криву доцільно використовувати в експериментальній практиці для швидкого визначення невідомої концентрації зразка за виміряним кутом обертання. Наприклад, якщо при вимірюванні отримано $\alpha=3.16^\circ$, за графіком або рівнянням прямої ($C = \frac{\alpha}{[\alpha] \cdot l}$) можна знайти відповідну концентрацію. Калібрувальна крива також дозволяє виявити відхилення від лінійності, що можуть бути наслідком впливу температури, присутності домішок або ефектів, які виникають при високих концентраціях розчинів.

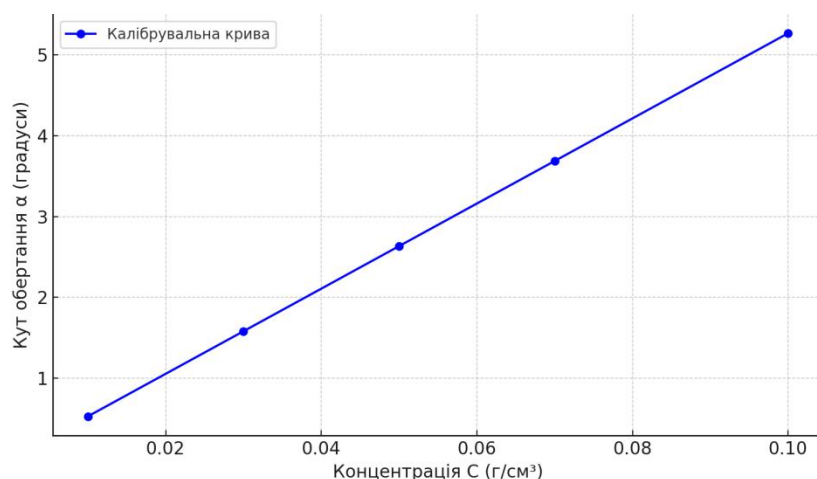


Рисунок 3.8 – Залежність кута обертання від концентрації

Розроблений технічний засіб поляриметричного аналізу оптично активних рідин являє собою складну оптико-електронну систему. Її архітектура ґрунтується на реалізації обраного принципу нульової компенсації. Ефективність та функціональність приладу визначаються продуманою взаємодією окремих

структурних та функціональних блоків, кожен з яких виконує специфічні завдання, забезпечуючи точність, автоматизацію та зручність експлуатації.

Загальна структура поляриметра може бути представлена як послідовний ланцюг взаємодіючих оптичних, механічних та електронних компонентів, що функціонують під централізованим керуванням. Ця структура є типовою для автоматизованих фотоелектричних поляриметрів і передбачає оптичний тракт для проходження світла, блок для розміщення зразка, систему для вимірювання кута обертання та електронний блок для керування та обробки даних.

Блок джерела світла є фундаментальним компонентом поляриметра, що ініціює оптичний процес, забезпечуючи необхідний світловий потік для вимірювань. Його ключовим завданням є генерація стабільного, монохроматичного або квазі-монохроматичного світлового потоку з необхідною інтенсивністю. Це життєво важливо для забезпечення високої точності та повторюваності вимірювань, адже будь-які значні коливання інтенсивності або спектрального складу світла можуть призвести до спотворення результатів. Структурно, цей блок включає стабілізоване джерело постійного струму, яке подає живлення на сам випромінювач, та випромінювальний елемент. Перевага віддається використанню високоякісних світлодіодів (LED) або лазерних діодів (LD). Вибір конкретного типу випромінювача та його довжини хвилі (наприклад, 589 нм для відповідності лінії D натрію) визначається необхідною спектральною чистотою та чутливістю до аналізованих речовин. Для досягнення справжньої монохроматичності, особливо при використанні LED, обов'язковим є використання інтерференційного фільтра, який пропускає світло лише у дуже вузькому спектральному діапазоні, що є критичним для коректного застосування закону Біо та уникнення ефектів хроматичної дисперсії. Таким чином, основна функція цього блоку полягає у забезпеченні постійного, високоінтенсивного та стабільного освітлення оптичного тракту, що є невід'ємною умовою для мінімізації фонового шуму та гарантування високої повторюваності та достовірності всіх подальших вимірювань у системі [27].

Блок поляризатора відіграє ключову роль у підготовці світлового потоку для точного поляриметричного аналізу. Його основне завдання – сформувати лінійно поляризоване світло з початкового не поляризованого або частково поляризованого світлового потоку, що надходить від джерела. Ця функція є абсолютно необхідною, адже лише лінійно поляризоване світло може бути використане для вимірювання оптичного обертання. У своєму складі блок поляризатора містить високоякісний поляризаційний елемент. Це може бути як ефективний поляроїдний фільтр, так і оптична призма Глана-Тейлора, яка пропонує вищий ступінь поляризації. Після встановлення поляризатор фіксується у стаціонарному положенні, його площа поляризації залишається незмінною протягом усього процесу вимірювання. Це забезпечує орієнтування вектора електричного поля світла в одній заданій площині, створюючи стабільну точку відліку для подальшої взаємодії світла з оптично активною речовиною.

Блок кюветного відділення є ключовим для забезпечення високоточних та відтворюваних вимірювань, адже він відповідає за надійне та стабільне розміщення кювети з досліджуваною оптично активною рідиною безпосередньо в оптичному тракті приладу. Цей блок не просто утримує кювету; він є центром, де відбувається безпосередня взаємодія поляризованого світла зі зразком. Конструктивно він включає прецизійний механізм для точного позиціонування стандартних поляриметричних кювет (зазвичай 100 мм або 200 мм), що критично важливо для забезпечення відомого та стабільного оптичного шляху, який є невід'ємною частиною розрахунку концентрації за законом Біо. Крім того, цей блок оснащений системою термостатування. Оптичне обертання оптично активних речовин сильно залежить від температури, тому система термостатування (реалізована елементами Пельтьє або циркуляційною водяною сорочкою) підтримує стабільну температуру зразка, наприклад, з точністю до $20.0 \pm 0.1^\circ \text{C}$, протягом усього вимірювання. Це дозволяє ефективно усунути температуру як одну з основних змінних, що

безпосередньо впливають на точність вимірювання кута обертання, роблячи отримані результати достовірними та порівнянними.

Блок аналізатора з механізмом обертання є центральним елементом вимірювальної системи поляриметра. Його основне завдання полягає у вимірюванні кута обертання площини поляризації світла після того, як воно пройшло крізь оптично активний зразок, шляхом точного встановлення нового положення нульової компенсації. За своєю суттю, цей блок містить другий поляризаційний елемент – аналізатор, ідентичний поляризатору. Аналізатор інтегрований у прецизійний механізм обертання, що складається з крокового двигуна або сервоприводу з високою роздільною здатністю (від 200 до 400 кроків на оберт, часто з мікрокроковим режимом). Для додаткової точності може бути використаний редуктор. Критично важливим компонентом є також точний кутовий енкодер (оптичний або магнітний датчик), що дозволяє з надзвичайною точністю визначати абсолютну кутову позицію аналізатора [29]. Об'єднана функція цього блоку полягає в автоматичному обертанні аналізатора до того положення, де реєструється мінімальне проходження світла за рахунок керуючого сигналу від фотодетектора. Коли аналізатор досягає цієї точки "темряви", його точний кут фіксується енкодером, забезпечуючи цифрову реєстрацію кінцевого кута з високою достовірністю.

Блок фотодетектора є критично важливим ланцюгом в оптичній системі поляриметра. Він відповідає за перетворення інтенсивності світла, що пройшло через аналізатор, в електричний сигнал, який є єдиним джерелом інформації для електронної системи керування про поточний стан оптичного тракту, зокрема, наскільки близько система перебуває до бажаної точки нульової компенсації. У своєму складі цей блок містить високочутливий фотодетектор. Залежно від очікуваних рівнів інтенсивності світла, це може бути кремнієвий фотодіод або фотоелектронний помножувач (ФЕП) для дуже низьких інтенсивностей. Окрім самого фотодетектора, блок обов'язково включає додаткові схеми підсилення та фільтрації сигналу. Ці схеми призначені для підвищення амплітуди слабкого

електричного сигналу від детектора до рівня, придатного для подальшої обробки мікроконтролером, а також для мінімізації шуму.

Блок керування та обробки даних є беззаперечним інтелектуальним центром і мозком всього поляриметра, що виконує функції, які виходять далеко за межі простого збору інформації. Він забезпечує всебічне та централізоване управління усіма функціональними блоками приладу, координуючи їхню взаємодію в єдиному вимірювальному циклі. Це охоплює точне позиціонування оптичних елементів, синхронізацію роботи джерел світла та детекторів, а також моніторинг станів усіх компонентів. Окрім цього, на нього покладається відповідальність за ефективний та швидкісний збір необроблених вимірювальних даних, що надходять від сенсорів, їхню первинну фільтрацію, складну цифрову обробку відповідно до визначених математичних алгоритмів аналізу, і, зрештою, чітке та зрозуміле виведення кінцевих результатів у форматі, зручному для користувача та подальшого аналізу (рис. 3.9).

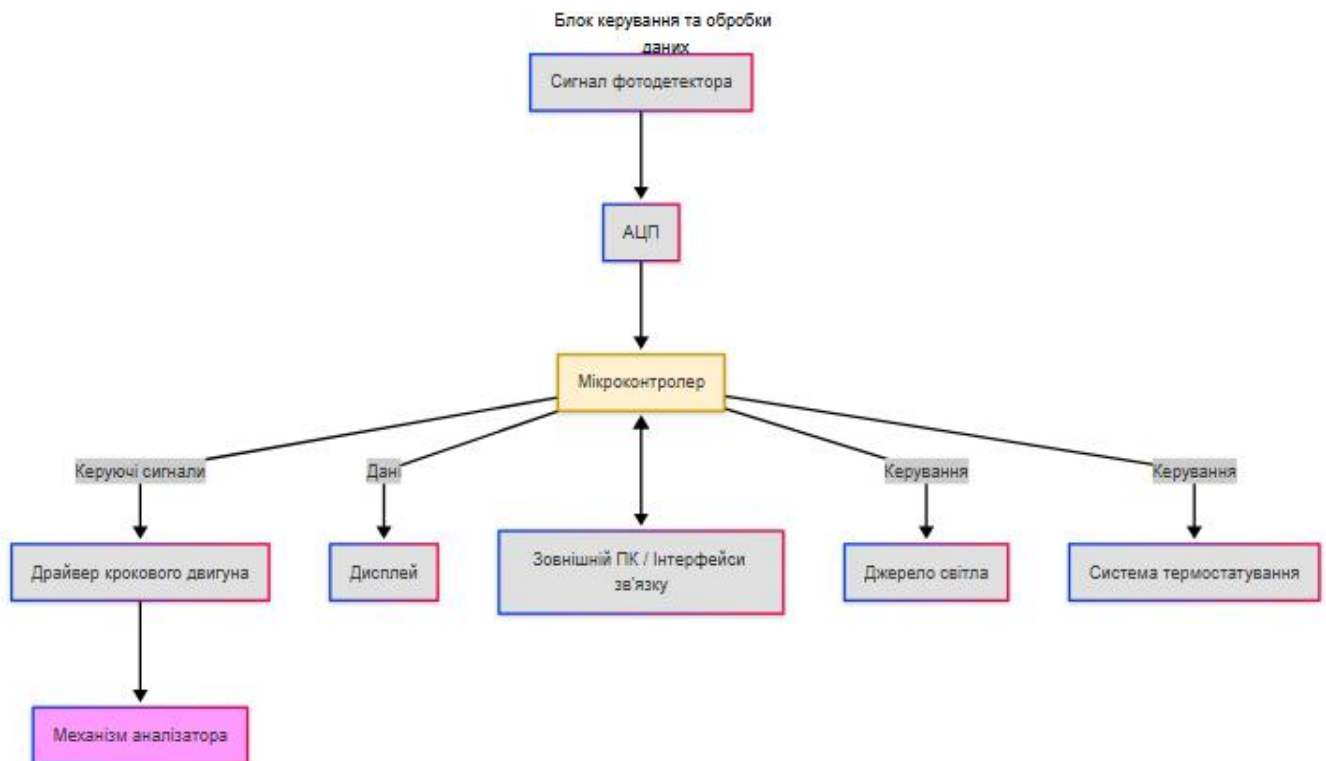


Рисунок 3.9 – Принципова електрична схема блоку керування та обробки даних

Функціонал цього блоку широкий: він відповідає за керування джерелом світла, системою термостатування, зчитує та обробляє сигнал з фотодетектора, керує кроковим двигуном аналізатора для точного позиціонування. Після стабілізації, контролер зчитує точне кутове положення аналізатора з енкодера. На цьому етапі відбувається розрахунок кута обертання α та, за необхідності, концентрації зразка C за допомогою закону Біо. Блок забезпечує зберігання всіх калібрувальних даних та параметрів вимірювань, а також виведення результатів на дисплей та передачу зовнішнім системам через інтерфейси зв'язку (RS-232, USB, Ethernet) (рис. 3.6) [30]

Блок користувацького інтерфейсу є своєрідним "обличчям" приладу, адже його основне призначення – забезпечити ефективну та інтуїтивно зрозумілу взаємодію оператора з поляриметром. Це критично важливо для зручності роботи, швидкого доступу до функцій та мінімізації ймовірності помилок, спричинених неправильним введенням даних або некоректною інтерпретацією результатів (рис. 3.10).

Оптичний тракт (деталізація)



Рисунок 3.10 – Деталізована оптична схема поляриметра

У своїй основі цей блок включає рідкокристалічний дисплей (LCD) або OLED-дисплей для відображення текстової та графічної інформації (поточні результати вимірювань, меню налаштувань, системні повідомлення). Для введення команд та налаштувань передбачаються фізичні кнопки або сенсорна панель. Сенсорний інтерфейс спрощує взаємодію, тоді як кнопки забезпечують тактильний зворотний зв'язок та надійність. Цей блок забезпечує відображення інформації, можливість ініціювати вимірювання, змінювати робочі налаштування (наприклад, довжину хвилі світла, температуру термостатування) та зручно переглядати отримані результати, забезпечуючи повний контроль над процесом аналізу [28].

Кожен з цих блоків є інтегральною частиною системи, і їхня узгоджена робота під управлінням мікроконтролера забезпечує реалізацію обраного принципу нульової компенсації, дозволяючи досягти високої точності та автоматизації поляриметричного аналізу оптично активних рідин.

Керування поляризатором, як одним з ключових елементів системи поляриметричного аналізу, вимагає високої точності та швидкості для забезпечення достовірності вимірювань оптично активних рідин. Для реалізації прецизійного позиціонування та інтеграції з керуючим блоком, використовується драйвер, який взаємодіє з 16-бітною шиною даних. Ця шина дозволяє передавати керуючі сигнали з високою деталізацією, забезпечуючи точне позиціонування поляризатора та оперативний відгук системи. Принципова схема керування поляризатором через драйвер і 16-бітну шину представлена на рисунку 3.11

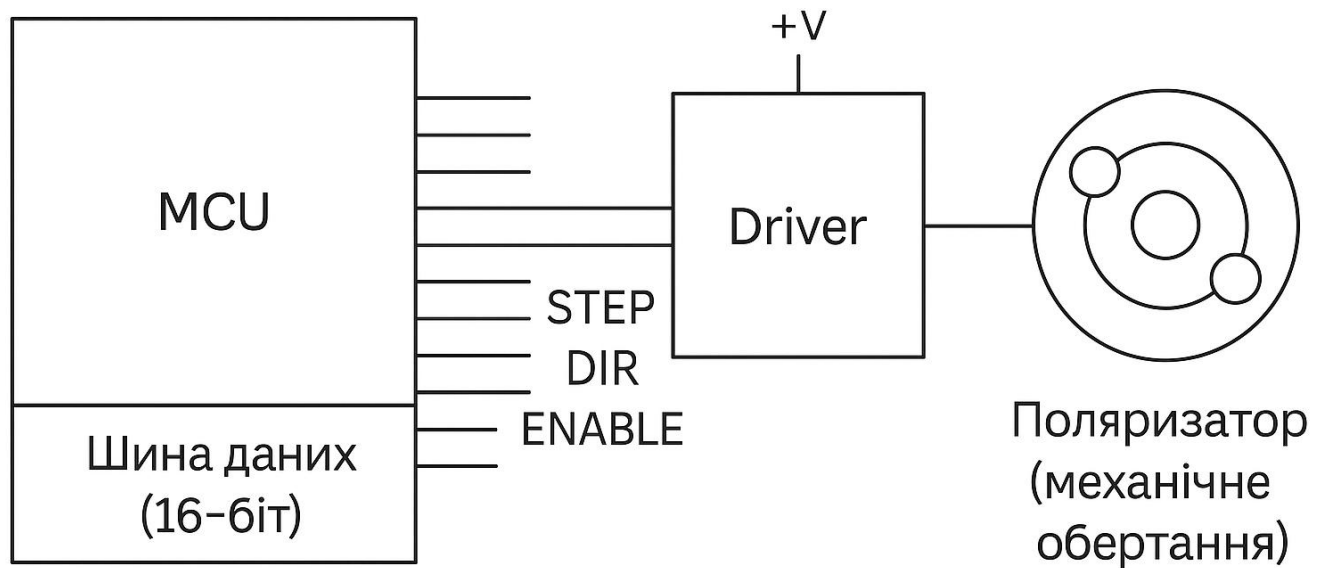


Рисунок 3.11 – Керування поляризатором через драйвер і 16-бітну шину

На представленій схемі видно, що 16-бітна шина забезпечує передачу даних від центрального процесорного блоку (або мікроконтролера) до спеціалізованого драйвера. Драйвер, у свою чергу, відповідає за перетворення цифрових сигналів у відповідні електричні імпульси, що керують механізмом поляризатора. Використання 16-бітної шини дозволяє реалізувати дискретність керування з високою роздільною здатністю, що є критично важливим для точного встановлення кута поляризації. Такий підхід мінімізує похибки, пов'язані з позиціонуванням, та забезпечує стабільність вимірювального процесу.

3.3 Математичне моделювання процесу аналізу

Принципова оптична схема поляриметра є послідовністю оптичних елементів, що забезпечують генерацію, модуляцію, проходження та аналіз поляризованого світла, а також фіксацію результату вимірювання. Схема включає наступні основні компоненти:

- джерело світла – забезпечує стабільний світловий потік певної довжини хвилі;
- поляризатор – створює лінійно поляризоване світло;

- кювета зі зразком – прозора посудина, в якій знаходиться оптично активна рідина;
- аналізатор – обертається відносно поляризатора для визначення кута повороту площини поляризації;
- фотодетектор – реєструє інтенсивність світла, що проходить через аналізатор;
- блок обробки даних — фіксує мінімум/максимум світлового потоку та обчислює кут обертання.

Оптична вісь проходить послідовно через усі елементи: від джерела до фотодетектора. Обертання аналізатора здійснюється або вручну, або автоматизовано – за допомогою крокового двигуна, що підключений до системи зворотного зв'язку. Даний підхід дозволяє забезпечити високу точність вимірювання навіть при малих кутах обертання та підвищує об'єктивність результату завдяки виключенню суб'єктивного зорового фактора.

Математичне моделювання процесу поляриметричного аналізу є невід'ємною складовою розробки та оптимізації технічного засобу. Воно дозволяє не тільки глибше зрозуміти фізичні явища, що відбуваються під час вимірювання, але й прогнозувати поведінку системи за різних умов, визначати ключові параметри, що впливають на точність, і обґрунтовувати алгоритми обробки даних. Метою моделювання є створення математичного апарату, що адекватно описує залежність вихідного сигналу фотодетектора від кута обертання площини поляризації та дозволяє розробити ефективні алгоритми визначення точки нульової компенсації.

Основою математичної моделі є закон Малюса, який описує інтенсивність світла, що проходить через два поляризатори, розташовані під певним кутом один до одного. Для нашого випадку, коли поляризоване світло проходить через оптично активне середовище, що обертає площину поляризації на кут α , а потім через аналізатор, інтенсивність світла I , що реєструється фотодетектором, може бути виражена як:

$$I = I_0 \cdot \cos^2(\theta - \alpha), \quad (3.2)$$

де I – інтенсивність світла, що досягає фотодетектора, I_0 – максимальна інтенсивність світла, що проходить через паралельно розташовані поляризатор та аналізатор (без зразка, або при нульовому обертанні), θ – кут між площиною поляризації поляризатора та площиною пропускання аналізатора, α – кут обертання площини поляризації оптично активною рідиною.

У контексті методу нульової компенсації, метою є знаходження такого положення аналізатора ($\theta_{\min}$), при якому інтенсивність I стає мінімальною (теоретично – нульовою). Це відбувається тоді, коли площина пропускання аналізатора стає перпендикулярною до фактичної площини поляризації світла після проходження зразка. Тобто:

$$\theta_{\min} - \alpha = \pm \frac{\pi}{2}. \quad (3.3)$$

Звідси, кут обертання α дорівнює:

$$\alpha = \theta_{\min} \mp \frac{\pi}{2}. \quad (3.4)$$

Кут обертання $\alpha = 15^\circ$, ми можемо знайти положення аналізатора ($\theta_{\min}$), при якому спостерігається мінімальна інтенсивність світла. Перетворимо $\frac{\pi}{2}$ в градуси: $\text{радіан} = 90^\circ$.

$$\theta_{\min} = \alpha + 90^\circ = 15 + 90 = 105^\circ \quad (3.5)$$

Отже, в ідеальному випадку, для кута обертання 15° , мінімальна інтенсивність буде зафіксована, коли аналізатор буде встановлений на 105° .

відносно поляризатора. Продемонструємо, що при $\theta = \theta_{\min} = 105^\circ$, інтенсивність I буде мінімальною (нульовою в ідеальному випадку):

$$I = I_0 \cdot \cos^2(\theta - \alpha) = 100 \cdot \cos^2(105 - 15) = 100 \cdot \cos^2(90) = 100 \cdot (0)^2 = 0$$

Модель також повинна враховувати реальні умови вимірювань, що відхиляються від ідеальних.

1. Ненульова мінімальна інтенсивність. В реальних умовах абсолютного нуля інтенсивності світла на фотодетекторі досягти практично неможливо через розсіювання світла, недосконалість поляризаторів, шуми детектора тощо. Використаємо реальні значення: $I_{\min} = 5$, $I_{\max} = 90$, $\alpha = 15^\circ$. Тому функція інтенсивності буде мати вигляд:

$$I = I_{\min} + (I_{\max} - I_{\min}) \cdot \cos^2(\theta - \alpha) = 5 + (90 - 5) \cdot \cos^2(105 - 15) = 5 \quad (3.6)$$

де $I_{\min}$ – мінімальна інтенсивність, $I_{\max}$ – максимальна інтенсивність.

Розрахуємо інтенсивність, коли $\theta - \alpha = 0^\circ$ (тобто аналізатор паралельний площині поляризації після зразка, що відповідає максимальній інтенсивності):

$$I = 5 + (90 - 5) \cdot \cos^2(0) = 90$$

Це підтверджує, що максимальна інтенсивність дорівнює $I_{\max}$.

Розрахуємо інтенсивність при $\theta = 100^\circ$:

$$I = 5 + (90 - 5) \cdot \cos^2(100 - 15) = 5,65$$

Це дозволяє розробити алгоритми пошуку мінімуму, які не очікують ідеального нуля.

2. Шуми фотодетектора та електронної системи. Електричний сигнал від фотодетектора завжди містить випадкові шуми. Для моделювання цього впливу до ідеального сигналу I додається випадкова складова $\varepsilon(t)$, що моделює шум:

$$I_{\text{вихідний}} = I_0 \cdot \cos^2(\theta - \alpha) + \varepsilon(t), \quad (3.7)$$

де $\varepsilon(t) = 1.5$, може бути змодельовано як гауссівський білий шум.

Вимірювання близько до точки нульової компенсації (теоретичний мінімум). Візьмемо кут $\theta = 105^\circ$. У цьому випадку $\theta - \alpha = 105^\circ - 15^\circ = 90^\circ$, що відповідає теоретичному мінімуму сигналу (де $\cos^2(90^\circ) = 0$):

$$I_{\text{вихідний}} = 100 \cdot \cos^2(105 - 15) + 1,5 = 1,5$$

У точці теоретичного мінімуму, через наявність шуму, вихідний сигнал фотодетектора не є нульовим, а становить 1.5 умовних одиниць. Це ілюструє, чому в реальних системах мінімальна інтенсивність ніколи не дорівнює абсолютному нулю.

Вимірювання у точці значної інтенсивності (половина максимальної). Візьмемо кут $\theta = 60^\circ$. У цьому випадку $\theta - \alpha = 60^\circ - 15^\circ = 45^\circ$, де $\cos^2(45^\circ) = (\frac{\sqrt{2}}{2})^2 = 0.5$:

$$I_{\text{вихідний}} = 100 \cdot \cos^2(60 - 15) + 1,5 = 51,5$$

У точці, де ідеальний сигнал становить 50 умовних одиниць, вихідний сигнал з урахуванням шуму дорівнює 51.5 умовних одиниць. Тут вплив шуму менш помітний відносно загального рівня сигналу, порівняно з точкою мінімуму. Це підкреслює

необхідність використання схем підсилення та фільтрації, а також застосування статистичних методів обробки даних (наприклад, усереднення багатьох вимірювань) для підвищення співвідношення сигнал/шум (рис. 3.12).

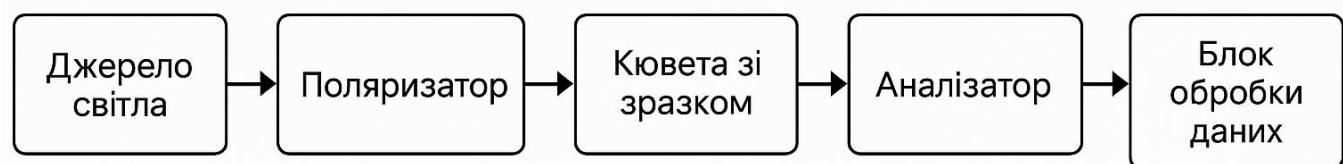


Рисунок 3.12 – Принципова оптична схема поляриметра

3. Нелінійність компонентів. Хоча фотодіоди є досить лінійними у своєму робочому діапазоні, модель може враховувати незначні відхилення від лінійності для підвищення точності, особливо при широкому діапазоні інтенсивностей. На основі цієї математичної моделі розробляються алгоритми пошуку мінімуму інтенсивності:

- метод градієнтного спуску – система послідовно обертає аналізатор, фіксуючи інтенсивність. Якщо інтенсивність зменшується, обертання продовжується у тому ж напрямку; якщо починає зростати – напрямок змінюється, і крок зменшується, наближаючись до мінімуму;

- метод трьох точок – вимірюються інтенсивності в трьох близько розташованих точках навколо передбачуваного мінімуму, а потім за допомогою параболічної апроксимації визначається точне положення мінімуму. Цей метод є більш стійким до шуму;

- метод модуляції – застосування невеликих осциляцій аналізатора навколо ймовірної точки мінімуму та аналіз фази гармоніки, що виникає, для визначення напрямку до справжнього мінімуму.

Для забезпечення високої точності вимірювання кута обертання площини поляризації застосовується оптична схема з використанням розширення лазерного

пучка. Завдяки цьому зменшується вплив неоднорідності середовища, а також підвищується стабільність детекції.

У даній конфігурації використовується джерело лазерного випромінювання, розширене у 10–15 разів за допомогою колімуючої оптики, з подальшим проходженням через кювету з оптично активним розчином (наприклад, цукровий розчин). Після взаємодії з речовиною світло потрапляє на аналізатор, орієнтація якого змінюється відповідно до кута обертання, що зумовлено активністю речовини. Світло, яке пройшло через аналізатор, фіксується фотоприймачем, з'єднаним із блоком вимірювання (рис. 3.13).

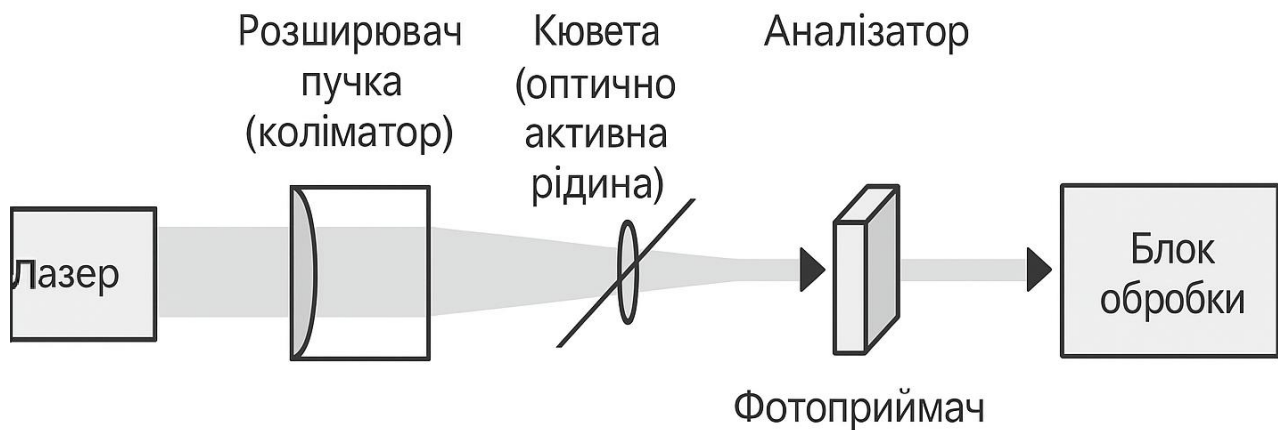


Рисунок 3.13 – Оптична схема з розширенням лазерного пучка для вимірювання кута обертання площини поляризації в сахарозному розчині

3.4 Аналіз похибок і вимог до метрологічних характеристик

Для підвищення точності та об'єктивності вимірювання кута обертання в сучасних поляриметрах застосовується принцип автоматичної компенсації. Його суть полягає в тому, що після проходження світла через оптично активну речовину площина поляризації обертається, і аналізатор автоматично повертається до положення, в якому світловий потік на фотодетекторі досягає мінімуму або максимуму. Цей принцип реалізується за допомогою:

- крокового двигуна, з'єднаного з аналізатором;

- системи зворотного зв'язку, яка контролює інтенсивність світла;
- мікропроцесорного контролера, який аналізує сигнал з фотодетектора і керує положенням аналізатора.

Алгоритм роботи системи автоматичної компенсації:

1. Джерело світла посилає лінійно поляризоване світло через зразок.
2. Після проходження крізь оптично активну речовину відбувається обертання площини поляризації.
3. Аналізатор, пов'язаний з кроковим двигуном, обертається до тих пір, поки фотодетектор не зафіксує екстремум інтенсивності (мінімум або максимум).
4. Кут, на який повернувся аналізатор, фіксується як кут оптичного обертання.

Така система є основою сучасних цифрових поляриметрів, що широко використовуються в фармацевтичній, хімічній та харчовій промисловості.

У процесі розробки та подальшої експлуатації будь-якого вимірювального приладу, зокрема поляриметра, критично важливим є глибокий аналіз потенційних джерел похибок та чітке визначення метрологічних характеристик. Це дозволяє не тільки оцінити точність і надійність розробленого засобу поляриметричного аналізу, але й обґрунтувати вимоги до його компонентів та алгоритмів обробки даних. Похибки поляриметричних вимірювань можна класифікувати за джерелом виникнення (рис. 3.14) [21].

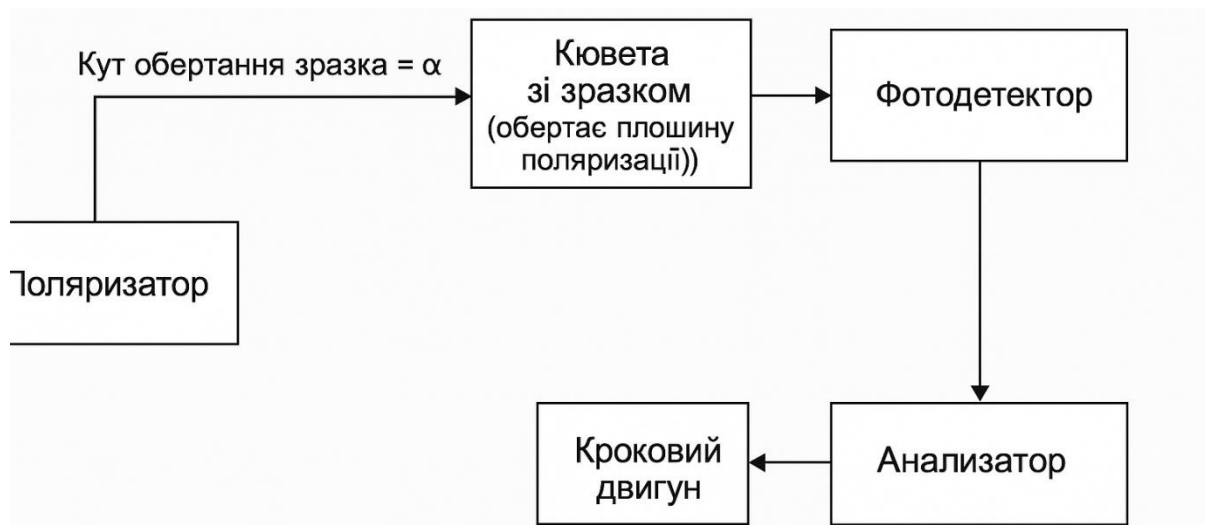


Рисунок 3.14 – Система автоматичної компенсації кута обертання

Якість світлового потоку є критично важливою. Нестабільність інтенсивності випромінювання джерела може призвести до дрейфу сигналу, що ускладнює точне визначення моменту нульової компенсації. Недостатня монохроматичність світла викликає хроматичну дисперсію оптичного обертання ($\alpha=f(\lambda)$), що призводить до розмитого "дна" сигналу замість чіткого мінімуму. Нестабільність довжини хвилі (наприклад, у лазерних діодів через коливання температури) також може вносити систематичні похибки. Усі ці фактори вимагають ретельного підходу до вибору, стабілізації та контролю джерела світла.

Недосконалість поляризації. Реальні поляризатори не створюють абсолютно лінійно поляризованого світла, пропускаючи невелику частку світла перпендикулярної орієнтації, а аналізатор не може повністю заблокувати весь світловий потік. Це призводить до ненульової мінімальної інтенсивності на фотодетекторі в точці компенсації [19]. Неточне встановлення кута: механічні похибки, такі як люфти у вузлах обертання аналізатора або неточне оптичне центрування елементів, спричиняють невідповідність між фактичним і програмно заданим кутовим положенням, що впливає на значення α_0 та α_1 .

Нестабільність температури. Оптичне обертання сильно залежить від температури, тому коливання температури зразка призводять до неточних результатів. Системи термостатування є необхідними. Неточна довжина кювети: довжина оптичного шляху (L) є критичним параметром у законі Біо, і будь-яке відхилення фактичної довжини кювети від номінальної призводить до систематичної похибки в розрахунку концентрації. Мутність та забарвлення зразка: розсіювання або поглинання світла значно ослаблює світловий потік, знижуючи співвідношення сигнал/шум та спотворюючи форму сигналу, що ускладнює визначення мінімуму інтенсивності. Неоднорідність зразка: наявність завислих частинок, бульбашок повітря або градієнтів концентрації може викликати нерівномірне обертання площини поляризації [16].

Власний шум детектора. Випадкові флуктуації, що генеруються фоточутливим елементом та підсилювальною електронікою, накладаються на корисний сигнал, ускладнюючи точне визначення мінімуму. Дрейф підсилювача: зміна коефіцієнта підсилення електронних компонентів з часом або температурою призводить до зсуву вимірювань. Нелінійність характеристики: відхилення від ідеальної пропорційної залежності між інтенсивністю світла та вихідним електричним сигналом, особливо при дуже низьких або високих інтенсивностях [20]. Похибки аналогово-цифрового перетворювача (АЦП): квантування сигналу та власна нелінійність АЦП обмежують роздільну здатність вимірювання та вносять похибки.

Неточність крокового двигуна. Пропуск кроків через недостатній крутний момент або швидкість призводить до неточного позиціонування аналізатора. Похибки енкодера: роздільна здатність енкодера обмежує найменший кут, який може бути розрізнений системою, а похибки зчитування можуть виникати через дрейф датчика або шуми. Люфти у механічній передачі: "мертвий хід" при зміні напрямку обертання двигуна унеможливорює точне позиціонування аналізатора, особливо при пошуку мінімуму [25].

Неоптимальний алгоритм пошуку мінімуму. Якщо алгоритм пошуку занадто грубий, неефективний або чутливий до шуму, він може "проскочити" істинний мінімум або зафіксувати його зі зсувом. Похибки округлення: при виконанні обчислень у мікроконтролері неминучі похибки округлення, що можуть накопичуватися. Неправильна калібровка: неточне визначення початкової нульової точки (α_0) або помилкові коефіцієнти перерахунку призводять до систематичних похибок у всіх вимірюваннях.

Для забезпечення достовірності вимірювань у поляриметричних системах необхідно враховувати метрологічні характеристики, зокрема похибки, стабільність, чутливість і межу виявлення.

Визначення абсолютної похибки вимірювання кута. Абсолютна похибка ($\Delta\alpha$) може бути визначена як сума інструментальної похибки (зазвичай $0.01^\circ - 0.001^\circ$ для сучасних приладів) та додаткових факторів середовища. Наприклад:

$$\Delta\alpha = \sqrt{\delta_{\text{приладу}}^2 + \delta_{\text{темпл}}^2 + \delta_{\text{люфту}}^2} \quad (3.8)$$

де $\delta_{\text{приладу}} = 0,005^\circ$ – похибка від роздільної здатності детектора, $\delta_{\text{темпл}} = 0,003^\circ$ – вплив температури, $\delta_{\text{люфту}} = 0,002^\circ$ – вплив механіки:

$$\Delta\alpha = \sqrt{0,005^2 + 0,003^2 + 0,002^2} = 0,00616$$

Отже, при значеннях складових похибок, абсолютна похибка вимірювання кута $\Delta\alpha$ складає приблизно 0.00616°

LOD системи – це мінімальна концентрація речовини ($C_{\min}$), при якій кут обертання перевищує похибку приладу. Наприклад:

$$C_{\min} = [\alpha] \cdot l\Delta\alpha \quad (3.9)$$

Для глюкози з $[\alpha]=52.7$ град/дм · г/см³, $l=1$ дм, і $\Delta\alpha=0.01^\circ$, отримаємо:

$$C_{min} = 52,7 \cdot 10,01 = 0,00019 \text{ (г/см}^3\text{)}$$

Виходячи з аналізу потенційних похибок та типових вимог до поляриметричного аналізу в промисловості та науці, формулюються такі ключові метрологічні характеристики для розробленого приладу:

- діапазон вимірювань кута обертання – типово від $\pm 180^\circ$ до $\pm 360^\circ$ (або більше для можливості врахування повних обертів). Це забезпечить аналіз широкого спектра оптично активних речовин;

- абсолютна похибка вимірювання кута обертання – для сучасних поляриметрів бажаним є значення не гірше $\pm 0.01^\circ$, а для високоточних приладів – до $\pm 0.001^\circ$. Це є однією з найважливіших характеристик, що визначає чутливість приладу;

- відтворюваність (стандартне відхилення) вимірювань – показник, що відображає розкид результатів повторних вимірювань одного і того ж зразка. Вимога: не більше $\pm 0.005^\circ$ для стандартних вимірювань, а для високоточних – до $\pm 0.0005^\circ$;

- час вимірювання – здатність швидко отримувати результат. Для автоматизованих приладів бажано не більше 10-30 секунд на одне вимірювання (без урахування часу термостатування);

- температурна стабільність кюветного відділення – відхилення температури зразка не повинно перевищувати $\pm 0.1^\circ \text{ C}$ від заданого значення;

- спектральна чистота світла – для LED/LD джерел, ширина смуги пропускання фільтра (якщо використовується) не більше 1-5 нм;

- роздільна здатність вимірювання кута (дискретність) – мінімальний приріст кута, який може бути зареєстрований системою, залежить від роздільної здатності енкодера та кроку двигуна. Бажано 0.001° або менше;

– діапазон робочих температур та вологості – умови, за яких прилад зберігає свої метрологічні характеристики.

Ретельний аналіз джерел похибок та визначення вимог до метрологічних характеристик є основою для подальшої детальної розробки апаратних компонентів та програмного забезпечення, вибору відповідних матеріалів та компонентів, а також для проведення ефективної калібровки та валідації розробленого поляриметра. Це дозволяє гарантувати, що створений технічний засіб відповідатиме сучасним стандартам якості та точності аналітичних вимірювань [29].

Запропонована система забезпечує високу чутливість, точність до 0.001° , а її метрологічні параметри дозволяють застосовувати пристрій для контролю концентрацій на рівні менше 0.001 г/см^3 . Такі характеристики повністю задовольняють вимоги до аналітичних приладів у промисловості та лабораторній практиці.

3.5 Висновки до розділу

У розділі розраховано параметри і проаналізовано роботу основних функціональних вузлів пристрою та розроблено відповідні електричні схеми, які підтверджують працездатність розробки.

Запропонований автоматизований засіб лазерної поляриметрії дозволяє вивчати і контролювати властивості оптично активних середовищ (зокрема, рідин) із лінійною фазовою анізотропією. Наведений підхід може бути ефективним також при дослідженні поляризаційних параметрів світлорозсіювальних середовищ біологічного походження, у оптичній астрополяриметрії, для виявлення напружень і температурних градієнтів у кристалооптиці та ін. [4, 22].

ВИСНОВКИ

Робота є глибоким і системним дослідженням, присвяченим аналізу, розробці та оцінці методів і засобів поляриметричного аналізу. Вона ґрунтується на сучасних досягненнях в оптоелектроніці, фізичній оптиці та метрології. В першій частині детально проаналізовано спектр оптичних методів дослідження речовин, з акцентом на поляриметрію як точний і економічно ефективний метод контролю складу оптично активних сполук. Висвітлено як теоретичні засади, так і ключові принципи роботи поляриметричних приладів, включаючи явища хіральності, оптичної активності, закони Біо та Малюса.

Особливу увагу приділено застосуванню автоматизованих поляриметрів із лазерними джерелами, які забезпечують високу точність, чутливість і швидкість вимірювань, що дозволяє інтегрувати ці пристрої у виробничі та лабораторні системи. В роботі обґрунтовано необхідність розвитку модуляційних технологій, що дозволяють компенсувати вплив шумів, підвищити метрологічні характеристики та забезпечити автоматичну інтерпретацію результатів. Окрема частина присвячена аналізу конструктивних рішень, схем драйверів, фотодетекторів та систем обробки сигналів.

Таким чином, робота не лише узагальнює сучасний стан знань, а й демонструє авторський підхід до розробки поляриметричної системи з покращеними характеристиками. Її результати можуть мати прикладне значення у фармацевтичній, харчовій, біомедичній галузях, а також у системах екологічного моніторингу та контролю якості.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Тужанський С. Є., Маліновський В. І. Технології лазерної розгортки для систем відтворення візуальної інформації // *Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології*. № 23, 1. С. 80–87.
2. Модуляційна поляриметрия. [Електронний ресурс]: / І.В. Лінчевський, Л.П. Пономаренко, М.В. Чурсанова; КПІ ім. Ігоря Сікорського. Київ, 2023. URL: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/722b6aa3-e278-4f56-a201-b1736f5caf89/content>
3. Ушенко О.Г. Основи лазерної поляриметрії. Біологічні рідини / О.Г.Ушенко, Т.М. Бойчук та ін. Чернівці: Чернівецький нац. ун-т, 2011. 656 с.
4. Тужанський С. Є., Лисенко Г. Л. Системи лазерної відеополяриметрії для автоматизованого контролю параметрів неоднорідних біотканин : монографія. Вінниця : ВНТУ, 2011. 156 с.
5. Дуболазов О. В., Сахновський М. Ю., Олар О. В., Григоришин П. М., Ушенко Ю. О. Лазерна поляриметрия оптично анізотропних шарів із просторово-частотною фільтрацією об'єктних полів. *Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології*. 2019. № 1. С. 11-16.
6. В. П. Кожемя'яко, Н. І. Заболотна, Б. П. Олійниченко. *Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології*, Вінниця: ВНТУ, 2009.
7. Інструментальні методи аналізу [Текст] : навч. посіб. / М. М. Ларук, П. Й. Шаповал, Р. Р. Гумінілович. Львів : Вид-во Львівської політехніки, 2019. 216 с.
8. Оптоелектроніка: від макро до нано. Генерація оптичного випромінювання: навч. посіб. У 2 кн. / В. О. Чадюк. К.: НТУУ «КПІ», 2012. Кн. 1. 380 с.
9. Малиновський А.І. Сучасні методи вимірювання у фізиці. Тернопіль: ТНТУ, 2017.
10. Осінський, В. І.; Павлов, С. В.; Тужанський, С. Є. : Аналіз та перспективи застосування лазерних та світлодіодних джерел світла // *Фотобіологія та фотомедицина*. № 10, 2010. С.104-109

11. Novikova, T., Ramella-Roman, J.C. (2023). Polarized Light. In: Ramella-Roman, J.C., Novikova, T. (eds) Polarized Light in Biomedical Imaging and Sensing. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-04741-1_1
12. Atago Polarimeter Guide. URL: <https://ventalab.ua/content/files/poljarimetri-atago-25689551.pdf>
13. Сергієнко І. В. Інформаційно-вимірювальні системи. Теорія та практика / К. : Наук. думка, 2021. 372 с.
14. Бондаренко Л. К. Основи електроніки : навч. посіб. К. : Либідь, 2018. 296 с.
15. Романов В. Г. Основи метрології та вимірювань / В. Г. Романов. К. : Каравела, 2019. 224 с.
16. Ісаєнко М. Г. Електроживлення цифрових пристроїв / М. Г. Ісаєнко. Д. : Наука і освіта, 2020. 252 с.
17. Войцеховський С. О. Лазерні технології в електроніці / С. О. Войцеховський. Л. : ЛНУ ім. І. Франка, 2023. 248 с.
18. Слободянюк А. Ю. Основи схемотехніки / А. Ю. Слободянюк. Х. : Ранок, 2020. 208 с.
19. Платформа з аналітичної хімії URL: <https://analytchem.org>
20. Кожем'яко В.П., Павлов С.В., Готра З.Ю., Микитюк З.М., Готра З.О. Схемотехніка сучасного приладобудування, Ч2. Оптичні сенсори. Навчальний посібник. Вінниця: ВДТУ, 2002. 213 с.
21. Atkins P., de Paula J. Physical Chemistry. Oxford University Press, 2014.
22. Hecht E. Optics. Addison Wesley, 2002.
23. Lide D. R. CRC Handbook of Chemistry and Physics. CRC Press, 2013.
24. Cotton A. Chemical Applications of Group Theory. Wiley, 2008.
25. Harwood L.M., Moody C.J. Experimental Organic Chemistry. Blackwell Science, 1989.
26. Shrader B., Strevens M. Modern Methods of Chemical Analysis. Springer, 2006.
27. Lakowicz J. Principles of Fluorescence Spectroscopy. Springer, 2006.
28. Glaz B. Optical Rotation and Polarimetry for Chemists. Academic Press, 1995.

ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Назва роботи: Метод і засіб лазерної поляриметрії оптично активних рідин

Тип роботи: Бакалаврська кваліфікаційна робота

Підрозділ Кафедра БМІОЕС, ФІЕС, гр. КОІС-216

Коефіцієнт подібності текстових запозичень, виявлених у роботі
системою StrikePlagiarism 2%

Висновок щодо перевірки кваліфікаційної роботи (відмітити потрібне)

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

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

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

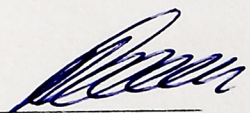
Експертна комісія:

Коваль Л.Г, зав. кафедри БМІОЕС

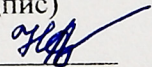
(прізвище, ініціали, посада)

Заболотна Н.І., проф. каф. БМІОЕС

(прізвище, ініціали, посада)

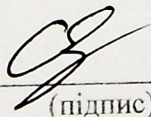


(підпис)



(підпис)

Особа, відповідальна за перевірку



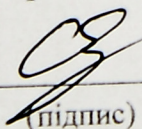
(підпис)

Тужанський С.Є.

(прізвище, ініціали)

З висновком експертної комісії ознайомлений(-на)

Керівник

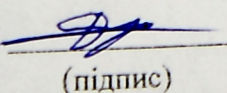


(підпис)

Тужанський С.Є., доцент каф. БМІОЕС

(прізвище, ініціали, посада)

Здобувач



(підпис)

Долінін О.О.

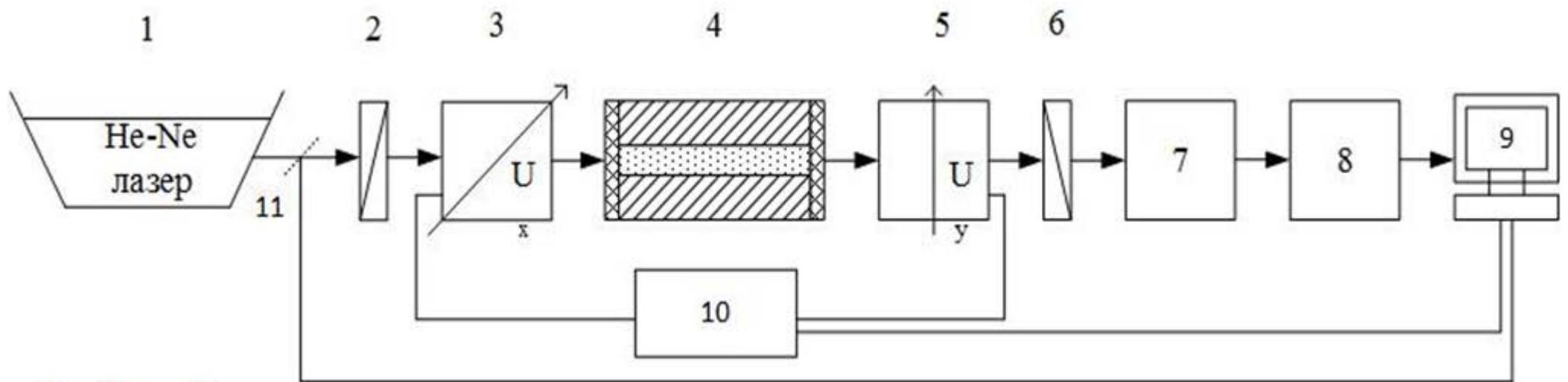
(прізвище, ініціали)

Додаток Б (обов'язковий)
ГРАФІЧНА ЧАСТИНА

Додаток Б.1

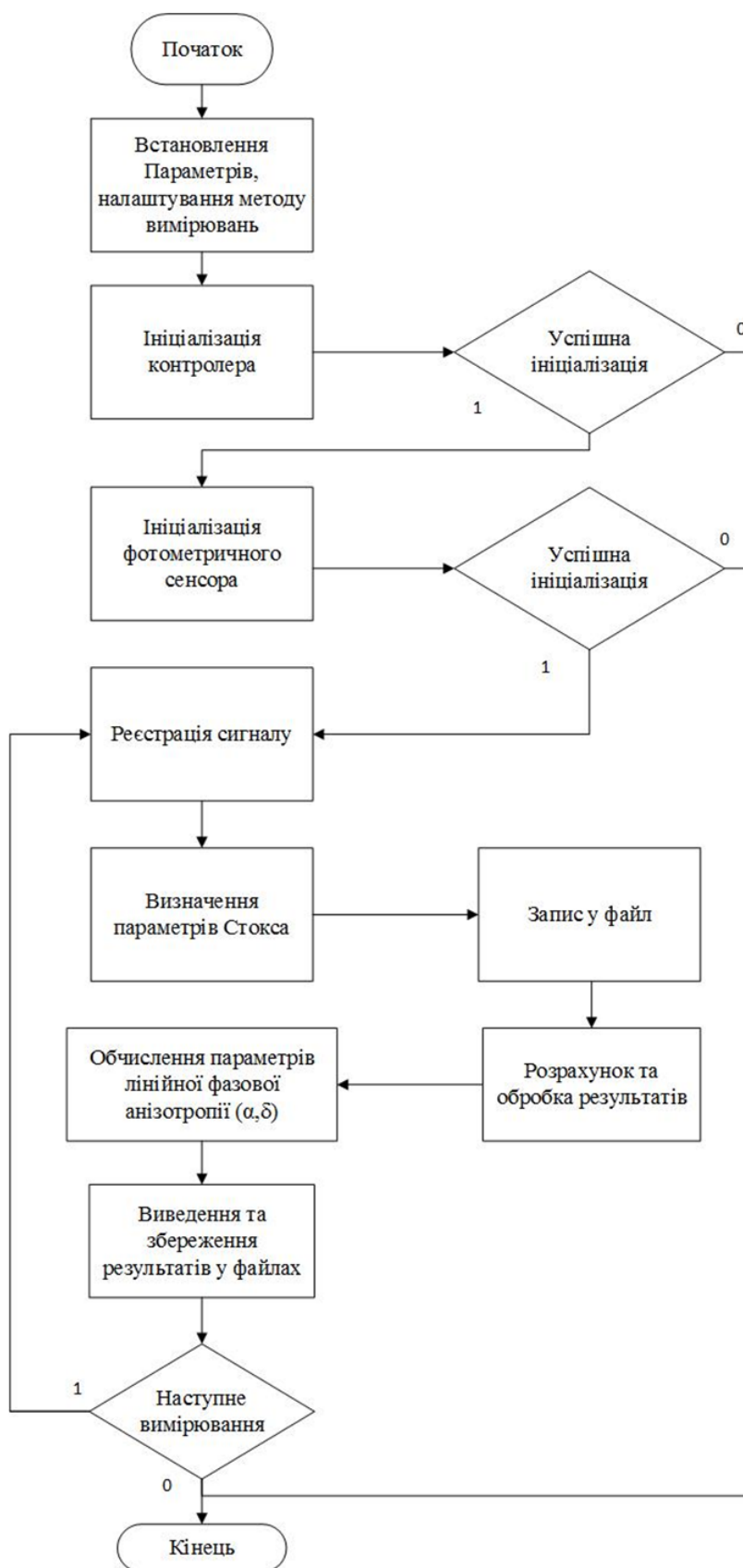
(обов'язковий)

Узагальнена структурна схема швидкодіючого поляриметра



Додаток Б.2

Алгоритм роботи автоматизованого лазерного поляриметра на електрооптичному перетворювачі



Додаток Б.3

Схема електрична фотоприймального пристрою

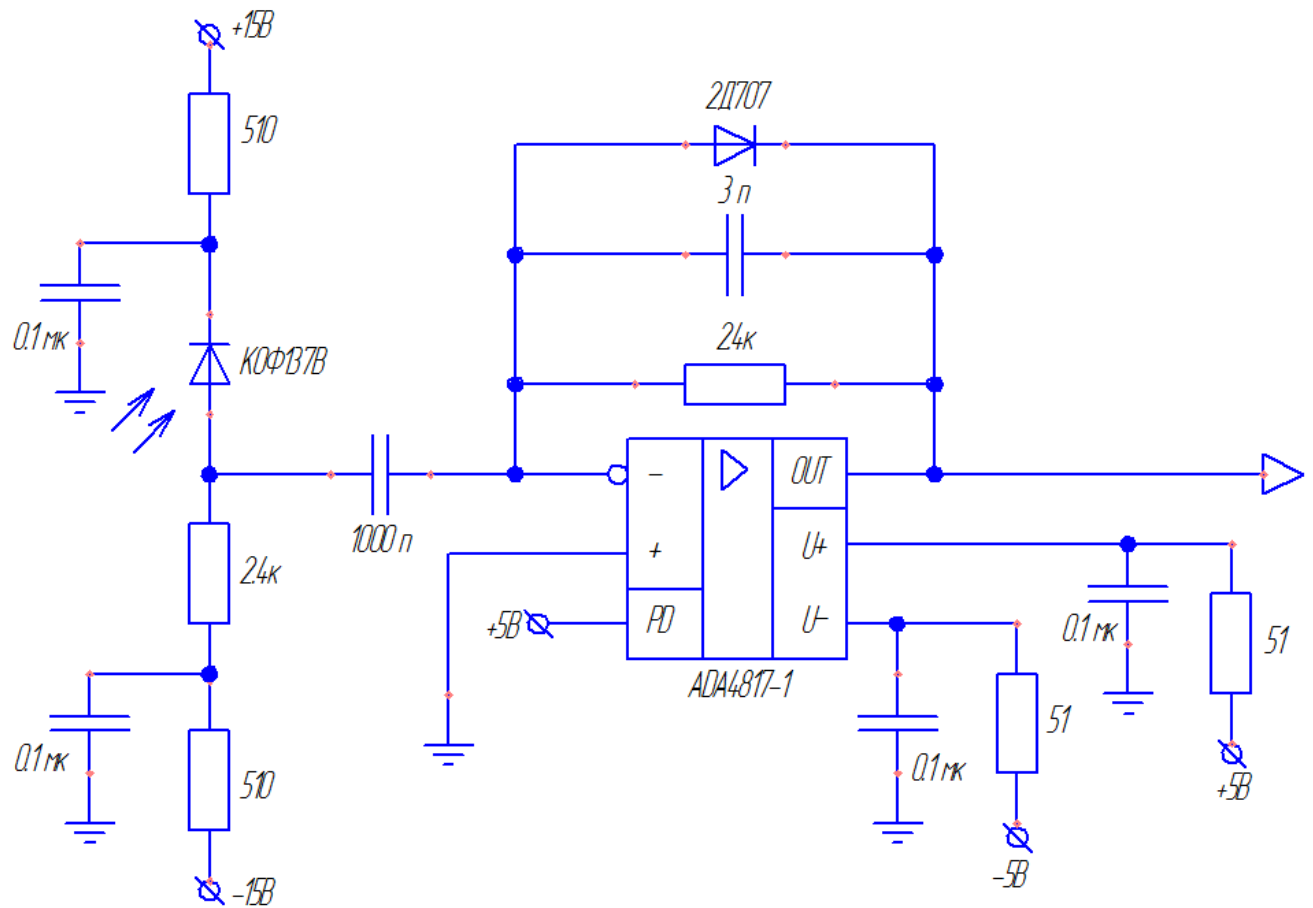


Схема електрична блоку живлення гелій-неонового лазера

