


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

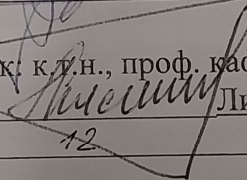
МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
на тему:

«Засіб поляриметричного аналізу оптично активних рідин»

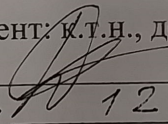
Виконав: студент 2 курсу групи ЛТО-21м
спеціальності 152 – Метрологія та
інформаційно-вимірювальна техніка
освітньої програми «Лазерна техніка та
оптоінформатика»

 Жарук О. М.

Керівник: к.т.н., проф. каф. БМІОЕС

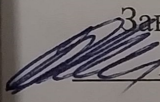
 Лисенко Г.Л.
« 10 » 12 2022 р.

Опонент: к.т.н., доц. каф. ІРТС

 Дудатьєв І.А.
« 11 » 12 2022 р.

Допущено до захисту

Завідувач кафедри БМІОЕС

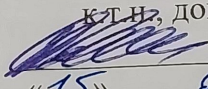
 Коваль Л.Г.

(прізвище та ініціали)

« 11 » грудня 2022 р.

Вінниця ВНТУ – 2022 рік

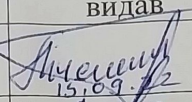
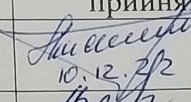
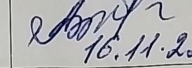
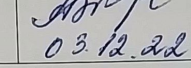
Вінницький національний технічний університет
Факультет інформаційних електронних систем
Кафедра біомедичної інженерії та оптико-електронних систем
Рівень вищої освіти II-й (магістерський)
Галузь знань 15 Автоматизація та приладобудування
Спеціальність 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка»
Освітня програма «Лазерна техніка та оптоінформатика»

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

«15» 09 2022 р.

ЗАВДАННЯ
НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ
Жаруку Олександрю Максимовичу

1. Тема роботи: Засіб поляриметричного аналізу оптично активних рідин
Керівник роботи Лисенко Геннадій Леонідович, к.т.н., професор каф. БМІОЕС, затверджені наказом ВНТУ від «14» вересня 2022 року № 203.
2. Строк подання студентом роботи: 06.12.2022 р.
3. Вихідні дані до роботи:
Метод вимірювань – лазерна поляриметрія оптично активних розчинів і рідин, об'єкт вимірювань і аналізу - лінійна фазова анізотропія середовища, склад автоматизованого засобу: випромінювач – He-Ne лазер 632,8 нм, вихідна потужність 30 мВт, блок формування стану поляризації, блок фотореєстрації, блок вимірювань і аналізу – мікропроцесорний, блок аналізу та відображення інформації – мікрокомп'ютер з LCD дисплеєм.
4. Зміст текстової частини: Аналіз сучасних методів вимірювання поляризаційних характеристик оптично активних речовин, аналіз і класифікація засобів лазерної поляриметрії та їх складових; аналіз і модельний розрахунок процесів поляриметричного аналізу рідин; удосконалення методу поляриметричного аналізу оптично активних рідин; обґрунтування елементної бази, розрахунок та проектування електричних та оптичних схем засобу; економічна частина; висновки; список використаних джерел; додатки
5. Перелік ілюстративного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): узагальнена структурна схема засобу поляриметричного аналізу оптично активних рідин (Л1); алгоритм засобу вимірювань параметрів лінійної фазової анізотропії (Е1); структурна схема модулятора поляризації (Е1); функціональна електрична схема блоку керування (Е1); схема фотоприймального блоку (Е1); блок живлення лазера (Е1)

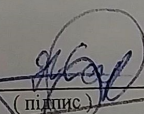
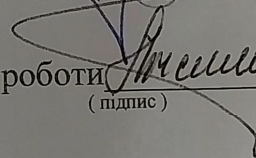
6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
1-3	Лисенко Г.Л., к.т.н., проф. каф. БМІОЕС	 15.09.22	 10.12.22
4	Адлер О. О. к.е.н., доц. каф. ЕПВМ	 16.11.22	 03.12.22

7. Дата видачі завдання «18» вересня 2022 р

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Аналіз сучасних методів поляриметрії оптично активних речовин та класифікація засобів лазерної поляриметрії	19.09.2022- 07.10.2022	ВИК
2	Аналіз і моделювання процесів лазерної поляриметрії оптично активних рідин. Удосконалення методу поляриметричного аналізу рідин і розчинів	08.10.2022- 25.10.2022	ВИК
3	Обґрунтування елементної бази, розрахунок та проектування електричних та оптичних схем. Розробка та аналіз роботи схем засобу	26.10.2022- 15.11.2022	ВИК
4	Економічна частина	16.11.2022- 03.12.2022	ВИК

Студент  (підпис) Жарук О. М. (прізвище та ініціали)Керівник роботи  (підпис) Лисенко Г. Л. (прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

УДК 53.08, 535.16

Жарук О.М. Засіб поляриметричного аналізу оптично активних рідин. Магістерська кваліфікаційна робота зі спеціальності 152 – метрологія та інформаційно-вимірвальна техніка, освітня програма – лазерна техніка та оптоінформатика. Вінниця: ВНТУ, 2022. 90 с.

На укр. мові. Бібліогр.: 28 назв; рис.: 24; табл. 11.

У магістерській кваліфікаційній роботі проведено проектування автоматизованого засобу лазерної поляриметрії для аналізу параметрів лінійної фазової анізотропії оптично активних рідин і розчинів. Здійснено аналіз та класифікацію сучасних методів і засобів лазерної поляриметрії. Удосконалено метод аналізу параметрів фазової анізотропії оптично активних рідин на лазерному поляриметрі. Здійснено моделювання і розрахунок характеристик основних оптико-електронних компонентів і вузлів засобу. Розроблено електричні та оптичні схеми засобу.

Графічна частина складається з 6 плакатів із результатами дослідження.

Ключові слова: оптична активність, поляризатор, лазерна поляриметрія, вектор Стокса, матриця Мюллера, модулятор, лінійна фазова анізотропія.

ABSTRACT

Zharuk O. M. A means of polarimetric analysis of optically active liquids. Master's thesis in specialty 152 – metrology and information measurement engineering. Educational program - laser technology and optoinformatics. Vinnitsya: VNTU, 2022. 90 p.

In Ukrainian language. Bibliographer: 28 titles; fig.: 24; tabl. 11.

In the master's qualification work, the design of an automated laser polarimetry tool for the analysis of linear phase anisotropy of optically active liquids and solutions was carried out. The analysis and classification of modern methods and means of laser polarimetry were carried out. The method of analyzing phase anisotropy parameters of optically active liquids using a laser polarimeter has been improved. Modeling and calculation of the characteristics of the main optical-electronic components and nodes of the device was carried out. Electrical and optical schemes of the tool have been developed.

The graphic part consists of 6 posters with the results of the study.

Keywords: optical activity, polarizer, laser polarimetry, Stokes vector, Mueller matrix, modulator, linear phase anisotropy.

ЗМІСТ

ВСТУП	8
1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ОПТИЧНИХ МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ АНАЛІЗУ РЕЧОВИН	11
1.1 Методи оптичного аналізу і контролю складу речовин.....	11
1.2 Методи і схеми поляриметричного аналізу складу речовин.....	12
1.3 Аналіз модулаторів поляризації для схем лазерної поляриметрії.....	22
1.4 Вимоги до засобу поляриметричного аналізу рідин.....	31
1.5 Висновки до розділу 1	32
2 МЕТОД І ЗАСІБ ПОЛЯРИМЕТРИЧНОГО АНАЛІЗУ ПАРАМЕТРІВ АНІЗОТРОПІЇ РІДИН	33
2.1 Методика поляриметричного аналізу параметрів лінійної фазової анізотропії	33
2.2 Функціональна схема і алгоритм роботи лазерного поляриметра.....	36
2.3 Розрахунок характеристик основних функціональних вузлів засобу.....	39
2.3.1 Розрахунок лазерного випромінювача.....	39
2.3.2 Розрахунок характеристик поляризаційного модулатора.....	43
2.4 Висновки до розділу 2.....	51
3 РОЗРОБКА І АНАЛІЗ СХЕМ ЗАСОБУ ПОЛЯРИМЕТРИЧНОГО АНАЛІЗУ ОПТИЧНО АКТИВНИХ РІДИН	52
3.1 Блок електрооптичного модулатора	52
3.2 Блок живлення лазерного випромінювача	53
3.3 Фотоприймальний пристрій і датчик позиціонування	56
3.4 Мікрокомп'ютер і блок індикації.....	60
3.5 Висновки до розділу 3	64
4 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА	65
4.1 Проведення наукового аудиту науково-дослідної роботи розробки засобу поляриметричного аналізу оптично активних рідин	65
4.2 Проведення комерційного та технологічного аудиту засобу поляриметричного аналізу оптично активних рідин	66

4.3 Розрахунок витрат на здійснення науково-дослідної роботи	67
4.4 Витрати на проведення науково-дослідної роботи	73
4.5 Розрахунок економічної ефективності науково-технічної розробки за її можливої комерціалізації потенційним інвестором.....	74
4.6 Висновки до розділу 4.....	77
ВИСНОВКИ	79
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	81
ДОДАТКИ	84
Додаток А Структурна схема засобу поляриметричного аналізу оптично активних рідин (обов'язковий).....	85
Додаток Б Алгоритм засобу вимірювань параметрів лінійної фазової анізотропії (обов'язковий).....	86
Додаток В Блок живлення He-Ne лазера (обов'язковий).....	87
Додаток Г Схема електрична принципова блоку керування модулятора поляризації (обов'язковий).....	88
Додаток Д Схема електрична функціональна фотометричного сенсора (обов'язковий).....	89
Додаток Е Протокол перевірки кваліфікаційної роботи на наявність текстових запозичень (обов'язковий).....	90

ВСТУП

Явище поляризації світла активно використовується у сучасних пристроях оптоелектронної техніки (рідкокристалічні монітори, поляризаційні мікроскопи, модулятори світла, поляризаційні окуляри, вимірювальні оптичні прилади тощо). У поляризаційних мікроскопах вдається значно підвищити якість зображення за рахунок більш чіткої візуалізації рельєфу відповідного зразка, а також отримати інформацію щодо особливостей його структури у поляризованому світлі [1-4].

Нові можливості оптичної поляриметрії тісно пов'язані з розвитком лазерних технологій. Унікальність характеристик лазерного випромінювання стала основою для широкого застосування лазерів у метрології та вимірювальній техніці. Велика кількість робіт присвячені дослідженню застосувань лазерів і технологічних конструкцій на їх основі для інформаційно-вимірювальної техніки [2-5].

Методи вимірювання стану поляризації лазерного випромінювання під впливом зовнішніх фізичних факторів широко використовуються при проектуванні волоконно-оптичних датчиків (вимірювачі струму, напруженості магнітного поля та ін.) [3].

Окремим класом оптичних вимірювальних приладів є поляризаційні, до яких відносять вимірювачі концентрації оптично активних складових у газах, рідинах та розчинах та інші. Поляризаційні елементи широко застосовують у лазерних технологіях для формування оптичних характеристик лазерних пучків та вимірювань і аналізу параметрів оптичного поля [3-7].

Методи, засновані на вимірюванні кута обертання площини поляризації, є одними з неруйнівних безконтактних методів контролю та дослідження органічних речовин і хімічних реакцій за їх участю. Засобами автоматизованої поляриметрії визначають вміст ряду оптично активних органічних речовин у розчинах (цукрів, спиртів, білків, амінокислот, антибіотиків та ін.), у оптичних кристалах та зразках біологічних тканин. Сучасні методи лазерної оптичної

поляриметрії поєднують в собі високу чутливість, наочність і можливість неруйнівного автоматизованого аналізу відповідних процесів у середовищах.

Разом з тим лазерні поляриметричні засоби, які використовують для аналізу оптично активних речовин переважно не здатні визначати поляризаційні характеристики з великою швидкістю, що унеможливує їх застосування для вимірювання аналізу швидкозмінних процесів у ряді оптично активних речовин [6].

Таким чином, розробка і удосконалення автоматизованих засобів поляриметричного аналізу фазових параметрів оптично активних речовин із підвищеною швидкістю є **актуальною науково-технічною** задачею сучасної інформаційно-вимірювальної техніки, вирішення якої дозволить розширити функціональні можливості автоматизованих засобів лазерної поляриметрії для аналізу оптично активних речовин шкіри порівняно із традиційними.

Метою магістерської кваліфікаційної роботи є розширення функціональних можливостей автоматизованої системи лазерного поляриметричного аналізу оптично активних рідин із підвищеною швидкістю.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі задачі:

1. Провести порівняльний аналіз сучасних методів і засобів поляриметрії оптично активних середовищ, здійснити класифікацію автоматизованих засобів лазерної поляриметрії та їх компонентів;
2. Провести розрахунок і моделювання параметрів лазерного випромінювача, модулятора, сенсора та інших функціональних блоків автоматизованого засобу поляриметричного аналізу оптично активних рідин.
3. Удосконалити метод стокс-поляриметричного аналізу параметрів лінійної фазової анізотропії у схемі лазерного поляриметра оптично активних рідин із підвищеною швидкістю;
4. Розробити структурну схему автоматизованого засобу лазерного поляриметричного аналізу анізотропних характеристик оптично активних рідин, оптичні та електричні схеми основних компонентів і вузлів;

5. Розрахувати функціональні характеристики компонентів схем та обґрунтувати вибір елементної бази засобу поляриметричного аналізу оптично активних рідин на основі запропонованого методу;

6. Розрахувати економічну доцільність та інші техніко-економічні показники розробки.

Об'єкт дослідження: процеси взаємодії лазерного поляризованого випромінювання із оптично активними рідинами.

Предмет дослідження: методи і засоби лазерної поляриметрії, їх фізико-технічні параметри та складові.

Методи дослідження. У процесі дослідження застосовувалися теорії: прикладної фізичної оптики; оптичних вимірювань; лазерної техніки та схемотехніки.

Наукова новизна: Подальшого розвитку отримав метод лазерного поляриметричного аналізу оптично активних рідин, в якому на відміну від існуючих використовується метод електрооптичної модуляції стану поляризації, що дозволило підвищити швидкодію процесу вимірювань параметрів анізотропії зразка до 1 мкс.

Практичне значення одержаних результатів полягає в тому, що на основі отриманих теоретичних результатів:

- Розроблено функціональну схему комп'ютеризованого засобу лазерної поляриметрії із розширеними функціональними можливостями з електрооптичним модулятором поляризації, мікрокомп'ютерним блоком керуванні та індикації, електричні та оптичні схеми основних функціональних вузлів.

Особистий внесок здобувача. Всі основні результати магістерської кваліфікаційної роботи отримано особисто.

1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ОПТИЧНИХ МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ АНАЛІЗУ РЕЧОВИН

1.1 Методи оптичного аналізу і контролю складу речовин

Оптичні методи досліджень є ефективним інструментом аналізу та неруйнівного контролю об'єктів і речовин різноманітного походження (полікристалічні, напівпровідникові, рідинні, астрономічні об'єкти та ін.) [1-4].

У оптичних методах аналізу складу рідин використовують зв'язок між складом розчину та оптичними властивостями системи, які створюються поглинанням, розсіюванням, заломленням, обертанням площини поляризації оптичного випромінювання та залежності вторинного світіння речовини від її складу. Відповідні зв'язки формують методологічну основу для відповідного способу аналізу складу речовини. Таким чином, до основних оптичних методів контролю складу речовин (розчини, гази, кристали, зразки біотканин та ін.) відносять [1-2]:

абсорбційний метод, при реалізації якого використовується явище селективного (вибіркового) поглинання світла у складі відповідної речовини;

нефелометричний – використовується явище розсіювання світла на частинках, що знаходяться в рідині або газі;

рефрактометричний – використовується залежність показника заломлення від концентрації контрольованого оптичного середовища;

поляриметричний – використовується властивість деяких оптично активних речовин повертати площину поляризації при проходженні через них плоскополяризованого світла;

люмінесцентний – використовується залежність вторинного світіння речовини в залежності від її складу.

Застосування у засобах оптичного контролю в якості джерел випромінювання лазерів дозволило підвищити точність та спростити процес вимірювань. Лазерним джерелам властиві гостра направленість випромінювання, висока

монохроматичність та спектральна густина енергії, вони здатні генерувати імпульси малої тривалості (до 10^{-18} с) та керувати поляризацією випромінювання. Це стимулювало розвиток нових методик виявлення та ідентифікації об'єктів, вивчення їх будови, а також дослідження природи процесів, які в них відбуваються [5, 7-10].

Вимірювання і контроль поляризаційних характеристик анізотропних речовин базуються на взаємодії монохроматичного поляризованого світла із детермінованими об'єктами, що математично описується відомими матричними методами Джонса і Мюллера [10–12]. Кожен з методів за певних обмежень можна застосовувати для дослідження анізотропних речовин. При цьому метод Мюллера є найбільш універсальним, хоча повна матриця Мюллера може містити надлишкову інформацію, яка не використовується при аналізі поляризаційних властивостей речовини. Для застосування методів, заснованих на аналізі неповних матриць Мюллера об'єкта, важливим є попередній аналіз структури зразка із визначенням кількості незалежних елементів.

1.2 Методи і схеми поляриметричного аналізу складу речовин

Під поляриметричним аналізом розуміють процес отримання характеристик та параметрів складу речовини за допомогою ефектів, пов'язаних з поляризацією речовини при її зондуванні оптичним випромінюванням.

Поляриметричний аналіз речовин може мати якісний або кількісний характер. Якісний аналіз характеризується такими сферами застосування:

- ідентифікація речовин (питоме обертання площини поляризації лінійно поляризованого монохроматичного світла, що вимірюється при сталій температурі, є константою, характерною для даної речовини);
- дослідження будови і складу речовин (наприклад спектрополяриметрія абсолютної конфігурації хіральних молекул);

При цьому достовірність якісного аналізу для ідентифікації речовин

значно підвищується за умови збіжності кривих дисперсії оптичного обертання площини поляризації відповідної речовини та еталона.

Таблиця 1.1 – Питоме обертання площини поляризації лінійно поляризованого світла водними розчинами органічних речовин ($T=20^{\circ}\text{C}$)

Речовина	Питоме обертання, $^{\circ}$
α -молочна кислота	+1,7
<i>D</i> -винна кислота	+12,0
<i>L</i> -винна кислота	-12,0
<i>L</i> -аскорбінова кислота	+21,0
<i>D</i> -глюкоза	112,2 \rightarrow +52,5
фруктоза	-135,5 \rightarrow 92,4
рафіноза	+121,3
сахароза	+66,5
<i>D</i> -ксилоза	-93,6 \rightarrow +18,8
<i>L</i> -ксилоза	-79,3 \rightarrow -18,6

Кількісний аналіз заснований на тому, що кут обертання площини поляризації розчину залежить від концентрації розчину. Кількісний склад розчинів можна визначати по попередньо побудованому графіку залежності кута обертання площини поляризації від концентрації розчиненого оптично активної речовини або розрахунковим методом (за законом Біо).

Аналітичні характеристики поляриметрії мають свої переваги та недоліки.

Переваги методу:

- доступність обладнання, простота вимірювань (як наслідок, відсутність потреби у висококваліфікованому персоналі);
- експресність;
- економічність.

Недоліки методу:

- невисока чутливість (можна використовувати з метою кількісного аналізу, якщо концентрація компоненти вимірюється в розчині не нижче ніж 1%);
- невисока точність кількісного аналізу;

– низька селективність (оптична активність для різних речовин може бути дуже близькою).

Тому традиційний метод поляриметричного аналізу доцільно використовувати при аналізі індивідуальних речовин або їх розчинів.

Сучасний розвиток автоматизації та техніки оптичних вимірювань істотно підвищують традиційні можливості якісного і кількісного аналізу складу речовин.

Оптично активними називаються речовини та їх розчини, які змінюють (обертають) площину поляризації світла. Оптична активність речовини визначається будовою кристалічної решітки речовини і особливостями будови її молекул. До таких речовин відносяться органічні з'єднання: глюкоза, фруктоза, винна кислота, оптичні кристали. Оптична активність оцінюється переважно величиною питомого обертання площини поляризації, це кут α обертання плоскополяризованого світла, який є характерним тільки даній активній речовині при її густині, рівній одиниці концентрації розчину 1г/мл і товщині шару розчину 10 см. Питоме обертання α для розчину:

$$\alpha = \beta \cdot C / l, \quad (1.1)$$

де β – вимірювальний кут обертання площини поляризації; l – товщина шару, дм; C – концентрація речовини, г/мл розчину.

Значення α при $t=20^\circ\text{C}$ водних розчинах речовин для монохроматичного світла з довжиною хвилі, що відповідає жовтій лінії в спектрі натрію: сахароза + 66,3; глюкоза + 52,5; фруктоза – 93; масло – 24. Обертання площини поляризації може бути по (+) та проти (-) часової стрілки. Використовуючи спеціальні фільтри та термостати в поляриметрах концентрацію визначають при незмінній товщині шару і при відомому питомому куті обертання речовини.

Кювета з розчином розміщується між двома призми (поляроїдами). За допомогою першої призми (поляроїда) утворюють плоскополяризоване світло (поляризатор) а другою призмою (аналізатором) можна змінювати інтенсивність плоскополяризованого світла за рахунок повертання.

Інтенсивність світла, яке пройшло через аналізатор визначається за формулою:

$$F = F_o \cos \beta^2, \quad (1.2)$$

де F – інтенсивність світлового потоку, який пройшов через поляризатор; F_o - інтенсивність світлового потоку, який вийшов із аналізатора; β – кут між площинами поляризації аналізатора та поляризатора.

При введенні між аналізатором та поляризатором оптично активної речовини змінюється кут β і може бути визначена концентрація введеної речовини.

У харчовій промисловості велике значення має визначення оптично активних речовин у таких розчинах як сахароза, глюкоза, мальтоза, лактоза фруктова, ефірні мастила.

Принцип дії поляриметричного аналізатора заснований на взаємодії поляризованого електромагнітного випромінювання (як правило, лазера) з оптичними активними речовинами. При цій взаємодії відбувається ефект обертання площини поляризації лазерного випромінювання. Вимірювання кута обертання площини поляризації лазерного випромінювання здійснюється компенсаційними методами. Схему пристрою наведено на рис.1.1.

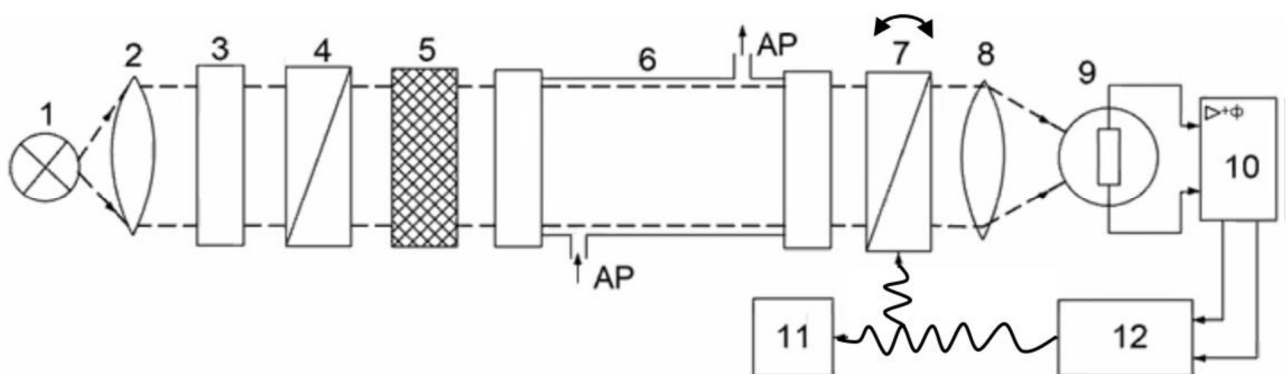


Рисунок 1.1 – Оптична схема поляриметричного аналізатора складу речовин

Оптичне випромінювання джерела 1 фокусує об'єктивом 2 направляється на інтерференційний фільтр 3 (виконується як дзеркало резонатора, налаштований на 1 робочу довжину хвилі). Далі світло

направляється на поляризатор 4 і модулятор 5 (забезпечує однакове відхилення з деякою частотою f азимуту поляризації від середнього положення). Поляризоване світло проходить через проточну кювету 6 з аналізованою речовиною і направляється на аналізатор 7 (він встановлений під кутом 90° до азимуту поляризації). Після аналізатора 7 поляризоване випромінювання фокусується об'єктивом 8 і направляється на ФП 9. Електричний сигнал з ФП 9 підсилюється і фільтрується апаратурою 10, сигнал розузгодження 11 надходить на електромеханічний перетворювач 12, механічно пов'язаний з аналізатором 7. Залежно від фази розузгодження він обертає аналізатор 7 навколо оптичної осі до тих пір, поки на ФП 9 не надійде випромінювання з подвоєною частотою f . Реєструючи кут повороту аналізатора 7, за допомогою відлікового пристрою 11 оцінюють концентрацію аналізованої речовини.

Узагальнену класифікацію поляризаційних пристроїв для аналізу характеристик анізотропних речовин представлено на рис. 1.2.

Пристрої поляриметрії найчастіше базуються на експериментальному вимірюванні параметрів вектора Стокса S випромінювання у локальній ділянці зразка одиничним фотодетектором і широко застосовують для дослідження однорідних анізотропних зразків.

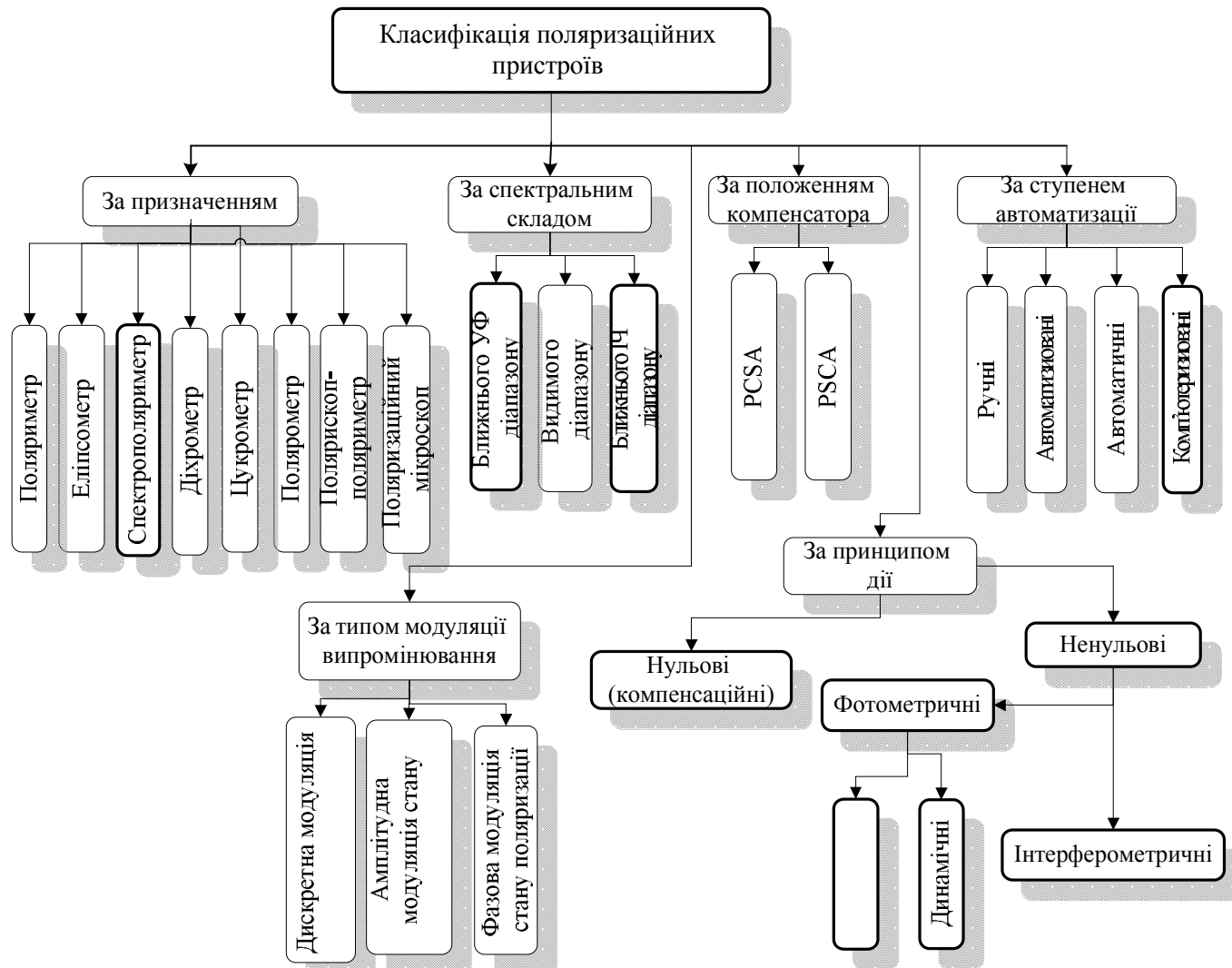


Рисунок 1.2 – Узагальнена класифікація поляризаційних приладів

Параметри S_i вектора Стокса можуть бути визначені на основі вимірювання шести значень інтенсивності світла після проходження крізь фільтри із заданими станами поляризації [11].

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} I \\ I_H - I_V \\ I_{+45^\circ} - I_{-45^\circ} \\ I_R - I_L \end{bmatrix}, \quad (1.3)$$

де I – інтенсивність вхідного випромінювання; I_H , I_V , I_{+45° , I_{-45° , I_R і I_L – інтенсивність випромінювання на виході фільтрів для горизонтальної, вертикальної, $+45^\circ$, -45° , правої і лівої циркулярно поляризованих складових, відповідно (I_{+45° і I_{-45° – інтенсивності, які передаються через лінійний

поляризатор, орієнтований уздовж осі поляризатора на $+45^\circ$ та на -45°).

Враховуючи, що вказані вище величини пов'язані співвідношенням

$$I_H + I_V = I_{+45^\circ} + I_{-45^\circ} = I_R + I_L = I,$$

вектор Стокса може бути визначений через вимірювання інтенсивності будь-яких чотирьох незалежних світлових потоків, наприклад I_H , I_V , I_{+45° та I_L .

Вимірюючи параметри вектора S до та після взаємодії світлового пучка із зразком, можна проводити аналіз його поляризаційно-фазових характеристик.

У 1943 році Ганс Мюллер для опису зв'язку вектора Стокса випромінювання, яке лінійно взаємодіє із зразком, із вихідним вектором Стокса запропонував матрицю M розмірністю 4×4 [4]

$$\mathbf{S}^{\text{вих}} = \mathbf{M} \cdot \mathbf{S}^{\text{вх}} = \begin{bmatrix} m_{00} & m_{01} & m_{02} & m_{03} \\ m_{10} & m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{20} & m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{30} & m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_0^{\text{вх}} \\ S_1^{\text{вх}} \\ S_2^{\text{вх}} \\ S_3^{\text{вх}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_0^{\text{вих}} \\ S_1^{\text{вих}} \\ S_2^{\text{вих}} \\ S_3^{\text{вих}} \end{bmatrix}, \quad (1.4)$$

де $S^{\text{вх}}$, $S^{\text{вих}}$ – вектори Стокса до та після взаємодії світла із об'єктом (БТ).

Елементи 4×4 матриці Мюллера m_{ij} є дійсними, в загальному випадку незалежними числами і є функціями частоти світла, розмірів, форми, орієнтації та складу розсіювальних частинок зразка [5-7]. Матриця Мюллера повністю описує перетворення об'єктом випромінювання із довільним станом поляризації, певною довжиною хвилі у заданому напрямку розповсюдження, і може характеризувати всі відомі поляризаційні властивості БТ.

При цьому вектор Стокса вихідного випромінювання визначається матричним рівнянням

$$\mathbf{S}' = \mathbf{M}_2 \cdot \mathbf{M}_1 \cdot \mathbf{S}. \quad (1.5)$$

Розглянемо метод вимірювання параметрів Стокса, побудований на обертанні фазової пластинки при фіксованому положенні поляроїда ($\beta = 0$). Тоді, враховуючи зв'язок інтенсивності випромінювання із параметрами вектора Стокса (1.3), після підстановки відповідних матриць Мюллера аналізатора 2 та фазової пластинки 1 у (1.5) отримаємо таку залежність інтенсивності

випромінювання від параметрів вектора Стокса [4]

$$I(t) = 0,5 \{ S_0 + (S_1 \cos^2 2\omega t + \sin^2 2\omega t \cdot \cos \delta) + 0,5 S_2 \sin 4\omega t (1 - \cos \delta) + S_3 \sin 2\omega t \cdot \sin \delta \}. \quad (1.6)$$

де $\delta = \frac{2\pi}{\lambda}(n_o - n_e)d$ – параметр лінійної фазової анізотропії (фазовий зсув між звичайним та незвичайним променями, $\delta \in [0; \pi]$); d – товщина зразка.

Таким чином, для визначення параметрів вектора Стокса необхідно виміряти значення інтенсивностей світла при чотирьох різних орієнтаціях фазової пластинки.

Позначимо вектор інтенсивностей, параметри якого вимірюються при різних положеннях ФП як $I = [I_0 \ I_1 \ I_2 \ I_3]^T$. Тоді матричне рівняння для визначення параметрів Стокса матиме вигляд

$$S = A^{-1} \cdot I, \quad (1.7)$$

де A – характеристична матриця поляриметра ($\det A \neq 0$) [2, 7].

З урахуванням (1.5), (1.6) матриця A матиме вигляд

$$A = \begin{bmatrix} 1 & \cos(2\alpha_0)^2 + \sin(2\alpha_0)^2 \cos \delta & 0,5 \sin(4\alpha_0)(1 - \cos \delta) & -\sin(2\alpha_0) \sin \delta \\ 1 & \cos(2\alpha_1)^2 + \sin(2\alpha_1)^2 \cos \delta & 0,5 \sin(4\alpha_1)(1 - \cos \delta) & -\sin(2\alpha_1) \sin \delta \\ 1 & \cos(2\alpha_2)^2 + \sin(2\alpha_2)^2 \cos \delta & 0,5 \sin(4\alpha_2)(1 - \cos \delta) & -\sin(2\alpha_2) \sin \delta \\ 1 & \cos(2\alpha_3)^2 + \sin(2\alpha_3)^2 \cos \delta & 0,5 \sin(4\alpha_3)(1 - \cos \delta) & -\sin(2\alpha_3) \sin \delta \end{bmatrix}. \quad (1.8)$$

Поширеною схемою вимірювання параметрів Стокса є схема із подвійною модуляцією поляризації (рис. 1.3), що містить додатковий поляризатор 2, який також обертається, змінюючи свій азимут [4, 8].

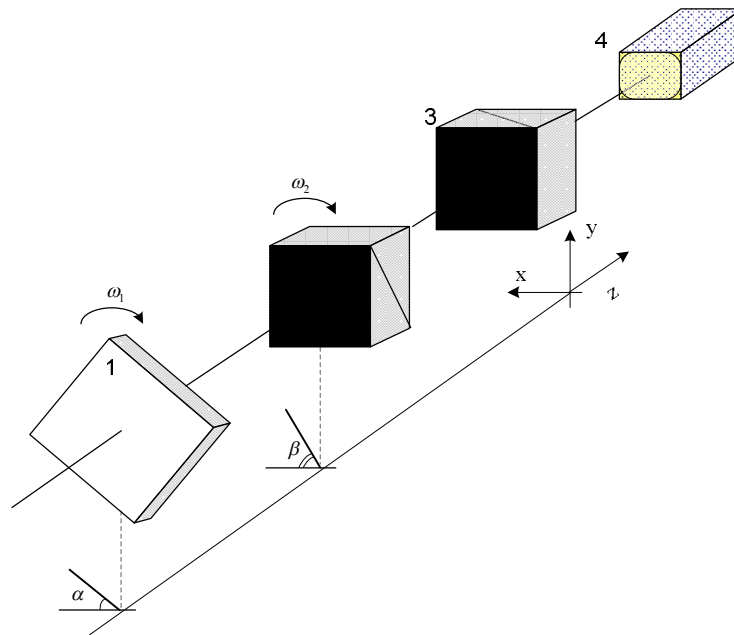


Рисунок 1.3 - Оптична схема приймального каналу поляриметра з подвійною модуляцією: 1 – фазова пластинка; 2, 3 – лінійні поляроїди; 4 – фотодетектор

Вектор Стокса випромінювання для динамічної схеми із подвійною модуляцією

$$\mathbf{S}' = \mathbf{M}_3 \cdot \mathbf{M}_2 \cdot \mathbf{M}_1 \cdot \mathbf{S}, \quad (1.9)$$

де \mathbf{M}_3 , \mathbf{M}_2 – відповідні матриці Мюллера нерухомого та рухомого аналізаторів.

Якщо провести аналіз зміни інтенсивності на виході аналізатора 3 цієї схеми при неперервному обертанні фазової пластинки 1 та поляризатора 2 з кутами поворотів $\alpha = \omega_1 \cdot t$ та $\beta = \omega_2 \cdot t$, можна довести, що інтенсивність аналізованого світлового потоку, який пройшов крізь оптичний пристрій поляриметра, дорівнює

$$I(t) = 0,5 (1 - \cos 2(\omega_2 t + \beta_0)) \{ S_0 + [S_1 \cos 2(\omega_1 t + \alpha_0) + S_2 \sin 2(\omega_1 t + \alpha_0)] \cos 2[(\omega_1 - \omega_2)t + (\alpha_0 - \beta_0)] + [S_1 \sin 2(\omega_1 t + \alpha_0) \cos \delta - S_3 \sin \delta] \sin 2[(\omega_1 - \omega_2)t + (\alpha_0 - \beta_0)] \}, \quad (1.10)$$

де α_0 та β_0 – початкові кути фазової пластинки 1 та поляроїда 2.

Аналіз виразу (1.20) показує, що сигнал на виході фотодетектора 5 може бути апроксимований функцією комбінацій частот обертання елементів ω_1 та ω_2 .

У більшості поляриметричних систем використовують оптико-механічні

перетворювачі поляризації. Однак для дослідження змінної поляризації у реальному часі необхідні високі частоти модуляції світлового потоку, максимальні значення яких для них не перевищують 1 МГц. Крім того, досить складною є постійна орієнтація робочої площини відповідних поляризаційних елементів.

Без урахування оптичних втрат вираз для розрахунку інтенсивності через параметри Стокса має вигляд [27]

$$I = \frac{I}{2} \left\{ S_0 + S_1 \cos 2\beta + \sin 2\beta [(S_2 \cos \Delta + S_3 \sin \Delta)(J_0(\delta_0) + \right. \\ \left. + 2 \sum_{m=1}^{\infty} J_{2m}(\delta_0) \cos 2m\omega t) + \right. \\ \left. + (S_3 \cos \Delta + S_2 \sin \Delta)(2 \sum_{m=0}^{\infty} J_{2m+1}(\delta_0) \sin(2m+1)\omega t) \right\}, \quad (1.11)$$

де $J_0(\delta_0)$, $J_{2m}(\delta_0)$, $J_{2m+1}(\delta_0)$ – функції Бесселя нульового та m -го порядку; Δ – залишкове подвійне променезаломлення.

Як приймачі, у схемах однопроменевої стокс-поляриметрії, зазвичай використовують фотодіоди або фотопомножувачі. Першим властиві висока лінійність та швидкодія, а також спектральна чутливість у видимому та ближньому ІЧ діапазонах, другим – висока границя чутливості та прийнятні значення квантового виходу, що дозволяють реєструвати випромінювання у діапазоні 300–900 нм (режим відліку імпульсів є основним у практиці поляриметрії слабких світлових потоків, зокрема при зворотному розсіюванні) [4- 11].

1.3 Аналіз модуляторів поляризації для схем лазерної поляриметрії

Принцип дії акустооптичних модуляторів (АОМ) заснований на дифракції світла на акустичних хвилях.

Акустична (ультразвукова) хвиля, що поширюється в оптично прозорому середовищі, створює в ній області локального стиснення і розрідження і викликає періодичну зміну показника заломлення n за рахунок ефекту фотопружності.

Ефект фотопружності (лінійний пружньооптичний ефект) полягає в тому, що показник заломлення середовища змінюється пропорційно механічній деформації.

На відміну від лінійного електрооптичного ефекту, спостережуваного тільки в п'єзокристалах, лінійний пружньооптичний ефект характерний для всіх кристалів і аморфних середовищ.

Швидкодія АОМ обмежується часом проходження звукової хвилі через перетин світлового пучка:

$$t = d/v, \quad (1.18)$$

де d - поперечний розмір лазерного променя, v - швидкість звуку в матеріалі модулятора, v складає приблизно від 2 до 10 мкс для колімованого лазерного променя діаметром кілька міліметрів. Чим менше пляма фокусування, тим краще швидкодія АОМ, тому зазвичай модулятор розміщується у фокусі лінзи, при цьому вихідні промені коліміуються другою лінзою. Товстий модулятор вимагає застосування довгофокусної лінзи; при правильній компоновці і юстировці можливо досягти швидкодії в приблизно 20нс. Акустооптичний модулятор може працювати в режимі модулятора і дефлектора (тоо також відхиляти по куту падаючий промінь при зміні частоти звукової хвилі).

Матеріали, які використовуються для виготовлення акустооптичних модуляторів світла наведені у таблиці 1.2.

Таблиця 1.2. Характеристики матеріалів для акустооптичних модуляторів

Матеріал	Оптичний діапазон, мкм	Показник заломлення	Швидкість звукової хвилі, км/с	Добротність, $10^{-15} \text{m}^2/\text{W}$
Халькогенідне скло	1.0 - 2.2	2.7	2.52	164
Флінт SF-6	0.45-2	1.8	3.51	8
Кварцеве скло	0.2-4.5	1.46	5.96	1.56
Фосфіт галію	0.59-10	3.3	6.3	44
Германій	2-12	4.0	5.5	180
Фосфат індію	1-1.6	3.3	5.1	80
Ніобат літію	0.6-4.5	2.2	6.6	15

Переваги:

- акустооптичний модулятор широко використовується в лазерній техніці через простоту і надійність. При цьому амплітудні, фазові, частотні, поляризаційні модулятори можуть бути реалізовані на базі одного і того ж пристрою при незначних змінах вхідної і вихідної оптики;

- просторове розділення дифрагованого і нульового пучків на виході акустооптичних модуляторів світла забезпечує 100% глибину модуляції;

- сумарні оптичні втрати в 3-6 разів менше, ніж в електрооптичних модуляторах світла;

- висока температурна стабільність.

Недоліки: - невисока швидкодія, обмежена часом поширення акустичної хвилі.

Характеристики деяких з представлених на ринку акустооптичних модуляторів світла від світових виробників наведено у таблиці 1.3.

Таблиця 1.3 – Характеристики акустооптичних модуляторів світла

Марка модулятора	<i>Brimrose</i> <i>TEM-85-10</i>	<i>AA</i> <i>optoelectronic</i> <i>MT80-A1.5-VIS</i>	<i>Rayser</i> AOM-1550- 40M-05-C2- PM1550-1-1-1- FA	<i>CT</i> AOMO3080- 12
Робочі довжини хвиль	380-1600 нм	450-700 нм	1520-1580 нм	442-633 нм
Час перемикання	55 нс	50 нс	60 нс	40 нс
Діаметр активної апертури	1 мм	1.5x2 мм	PM 1550 Panda Fiber with 900 μ m LooseTube	2мм
Ширина смуги модуляції	10 МГц	9 МГц	40МГц	80 МГц
Ефективність	80%	85%	н/д	н/д

Електрооптичний модулятор - пристрій, який можна використовувати для контролю потужності, фази або поляризації лазерного променя за допомогою електричного сигналу. Зазвичай він містить одну або дві комірки Покельса і додаткові оптичні елементи - поляризатори. Різні види комірок Покельса показані на рисунку 2.8. Принцип роботи заснований на лінійному електрооптичному ефекті (ефекті Покельса - зміні показника заломлення в нелінійному кристалі під дією електричного поля, пропорційного напруженості).

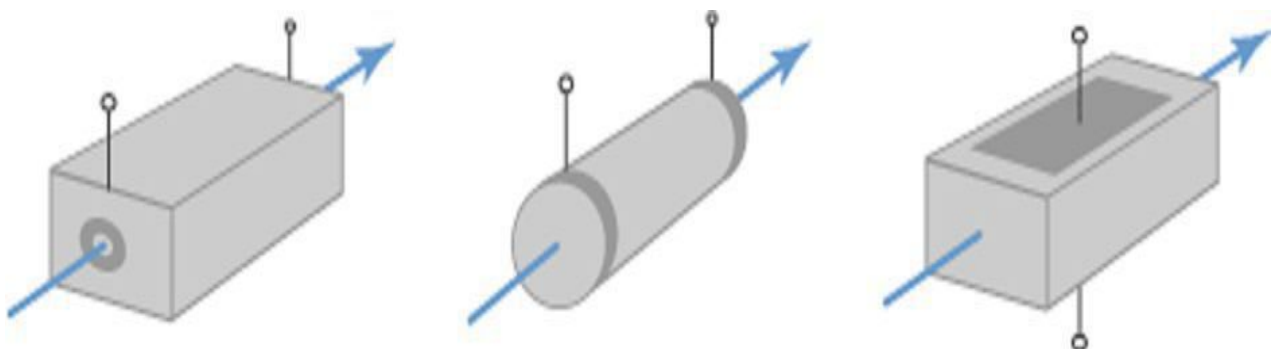


Рисунок 1.8 – Типи комірок Покельса

Найбільш поширені кристали для EOM:

- дідейтерофосфат калію KD_2PO_4 ($KD*P = DKDP$),

- титан-фосфаткалію KTiOPO_4 (КТР),
- бета-борат барію BaB_2O_4 (ВВО) (застосовується при вищій за середню потужність та / або більш високих частотах перемикання),
- ніобат літію (LiNbO_3),
- танталат літію (LiTaO_3),
- дігідрогенат фосфату амонію ($\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$).

Крім цих неорганічних електрооптичних матеріалів існують також спеціальні полімерні матеріали для модуляторів.

Напруга, необхідна для зміни фази світлової хвилі на π , називається напівхвильовою напругою (V_π). Для комірки Покельса, як правило, це зазвичай сотні або навіть тисячі вольт, так що потрібні високовольтні підсилювачі. Відповідні електронні схеми можуть перемикатися зі значних напруг протягом декількох наносекунд, що дозволяє використовувати ЕОМ як швидкодіючі оптичні перемикачі.

Перевагою модуляторів, в яких використовується ефект Покельса, є лінійна залежність зсуву фаз між звичайними і незвичайними променями від прикладеної напруги, в результаті чого для модуляції на високій частоті потрібна менша потужність, ніж для модулятора, що працює з використанням квадратичного ефекту Кера. Також зміна фази пропорційно довжині кристала. Ця перевага було використано при створенні електрооптичних модуляторів лазерних пучків з низькими керуючими напругами.

Недоліками розглянутих електрооптичних модуляторів є значні втрати, велика потужність, що підводиться, велика зосереджена ємність пристрою, що обмежує ширину смуги частот модуляції, обмежена довжина взаємодії світлового випромінювання з сигналом високих частот.

Найважливішою перевагою логічних схем на оптичних модуляторах є підвищення швидкодії оптоелектронних схем. У цьому відношенні найбільш перспективне використання електрооптичних модуляторів, що допускають швидкості перемикання, що лежать в гігагерцовому діапазоні. Існують різні

схеми логічних елементів з використанням як поздовжньої, так і поперечної модуляції, в останньому випадку вдається знизити керуючу напругу.

Розглянемо та порівняємо характеристики декількох електрооптичних амплітудних модуляторів, представлених на ринку. Ці характеристики зображено у таблиці 1.4.

Таблиця 1.4 – Характеристики електрооптичних модуляторів світла

Марка модулятора	<i>ThorLabs EO Amplitude Modulator</i>	<i>Newport 4102NF (4104NF)</i>	<i>EKSMA OPTICS PCB3S</i>	<i>InradOptics PKC 21 (PKC24)</i>
Матеріал кристалу	LiNbO ₃ +MgO	LiNbO ₃	BBO	KD*P
Робочі довжини хвиль	600-900 нм	500-900 нм	200-2000 нм	250-1320 нм
Діаметр апертури	2 мм	2 мм	2,5 мм	9,5мм-25мм
Напівхвильова напруга	205 В при 633 нм	160 В при 532 нм	2,5кВ при 532 нм	3,3 кВ при 1064нм
Вхідний імпеданс	14 пФ	10 пФ	4 пФ	8-17пФ

Принцип дії магнітооптичних модуляторів заснований на ефекті Фарадея. Цей ефект полягає у виникненні оптичної активності в середовищі під дією магнітного поля. Це явище зміни площини поляризації в магнітному полі відкрив у 1845 році Майкл Фарадей. При поширенні світла в оптично ізотропному середовищі або в напрямку оптичної осі кристалу і прикладанні магнітного поля вздовж напрямку поширення світла, ефект Фарадея проявляється у повертанні площини поляризації світла на кут, який лінійно залежить від напруженості магнітного поля. Знак повертання площини поляризації світла при ефекті Фарадея не залежить від знаку хвильового вектора.

Схематично ефект Фарадея зображений на рисунку 1.9

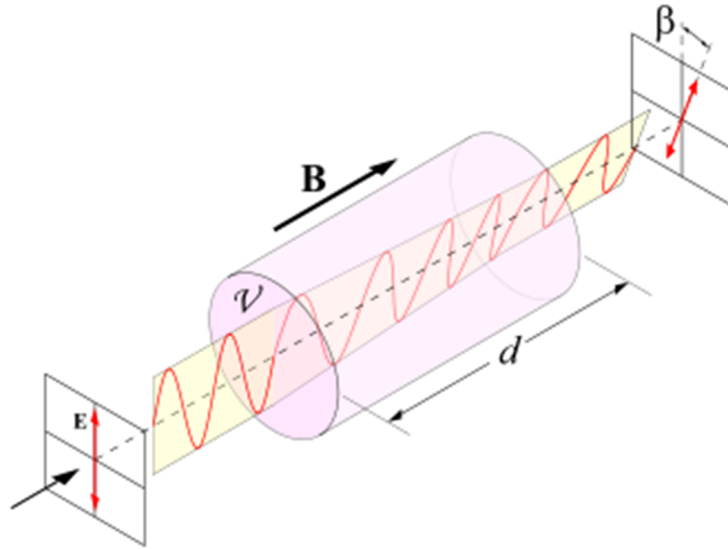


Рисунок 1.9 - Схематичне зображення обертання площини поляризації в магнітному полі

Ефект Фарадея пояснюється тим, що оптичні властивості намагніченої речовини не можна охарактеризувати одним показником заломлення n . Під дією магнітного поля показники заломлення n^+ і n^- для циркулярно право- і лівополяризованого світла стають різними. Внаслідок цього право- і лівополяризовані складові лінійно поляризованого світла поширюються уздовж магнітного поля через речовину з різними фазовими швидкостями. Виникає різниця їх ходу, лінійно залежна від довжини шляху. В результаті площину поляризації монохроматичного світла з довжиною хвилі λ , що пройшов у середовищі шлях l , повертається на кут

$$\theta = \pi l (n^+ - n^-) / \lambda \quad (1.19)$$

Одним з найбільш поширених магнітооптичних матеріалів є феромагнітний діелектрик рідкоземельний ферит-гранат з іонами вісмуту. Його хімічна формула $R_x \text{Bi}_{3-x} \text{Fe}_5 \text{O}_{12}$. У ній R позначає один або кілька рідкоземельних іонів, а x задає відносну концентрацію рідкоземельних іонів і вісмуту.

На підставі численних експериментів були виявлені склади феритів-гранатів, що забезпечують у видимому і ближньому інфрачервоному світлі великі магнітооптичні ефекти і мале оптичне поглинання. Наприклад, намагнічена плівка фериту-граната складу $Dy_{0,5}Bi_{2,5}Fe_5O_{12}$ товщиною 10 мкм здатна повернути площину поляризації червоного світла на кут близько 20° , що цілком підходить для можливих застосувань. А з преднамагнічуючим полем найвищі частоти модуляції оптичного випромінювання можуть досягати 10^9 Гц.

Недоліками даних модуляторів є те, що для їх керування потрібна велика намагніченість поля і вони мають досить малу глибину модуляції і сильне поглинання оптичного випромінювання.

Рідкокристалічні модулятори, які можуть керувати випромінюванням, що через них проходить, мають цілий ряд переваг у порівнянні з іншими електрооптичними елементами. Насамперед, це відсутність високих керуючих напруг, добре освоєна технологія виготовлення і низька вартість. Дослідження особливостей електрооптичних характеристик рідкокристалічних модуляторів обумовлює перспективи їх використання для побудови різноманітних приладів та пристроїв оптоелектроніки.

Призмий рідкокристалічний поляризатор складається з двох скляних призм і рідкокристалічного шару знаходиться між ними. При цьому можуть бути використані як відбитий, так і минулий промені. Призмий рідкокристалічний поляризатор може застосовуватися в різних областях оптики. Цей поляризатор є оптичним аналогом призм Глана-Томпсона.

Відмінні характеристики: високе пропускання, велика апертура, висока променева щільність $1\text{ГВт}/\text{см}^2$.

Відомо багато типів модуляторів оптичного випромінювання, побудованих на основі механічних та електромеханічних пристроїв. Наприклад, камертонний модулятор, що включає в себе U-подібну пластинку, одна з ніжок якій закріплена на корпусі приладу нерухомо, до другої рухомий прикріплений екрануючий елемент (зазвичай щілину або діафрагма з гострим краєм). Зворотно-поступальний рух екрануючого елемента забезпечується за рахунок

порушення коливань в електричних обмотках, встановлених на ніжках камертона, на резонансній частоті його механічних коливань. За інших переваг основним недоліком такого модулятора є малий діапазон переміщення екрануючого елемента, і, як наслідок, необхідність застосування лінз або дзеркал для формування пучка малого розміру в площині екрануючого елемента.

Найбільшого поширення набули різні дискові модулятори, що представляють собою осесиметричні пластинки з прорізами різної конфігурації.

Платівка при цьому встановлюється на вал, вісь обертання якого зазвичай паралельна осі оптичної системи або в окремих випадках схрещена під потрібним кутом.

Основним недоліком модулятора цього типу є те, що для повного перекриття пучка діаметром d необхідно використовувати диск діаметра більше $2d$. Ця обставина при інших рівних умовах призводить до збільшення габаритів приладу в цілому. Також вони мають досить низьку швидкодію і точність.

Вимірювання параметрів Стокса оптичного випромінювання, яке є основою більшості систем локальної різних об'єктів, пов'язано із реєстрацією інтенсивності світла, що проходить крізь перетворювач та аналізатор поляризації.

Порівняльний аналіз характеристик модуляторів світла як активних перетворювачів поляризації для пристроїв оптичної поляриметрії анізотропних речовин та особливості їх застосування представлено у таблиці 1.5 [5-8, 14-16].

Таблиця 1.5 - Характеристики модуляторів для оптичної поляриметрії

Технологія модуляції	Вид перетворювача	Швидкодія	Втрати, дБ	Особливості застосування
Оптико-механічна	Універсальний	~50 мкс	1	Поляризатор (аналізатор), що механічно обертається, зменшує точність, швидкодію і надійність системи
Електрооптична	Універсальний	10 нс-50пс	2-3	Велике поглинання в УФ-діапазоні, значні напруги керування, необхідність колімації пучка, мала кутова апертура (1°...2°)
Магнітооптична	Кругова фазова анізотропія	0,1мкс*	1-2	Низьке значення сталої Верде у видимому діапазоні зменшує діапазон змін площин поляризації, швидкодію
Акустооптична	Лінійна фазова анізотропія	0,01мкс	1-2	Широкий спектральний діапазон, велика кутова апертура, висока добротність; залишкове подвійне променезаломлення не дозволяє розрізняти лінійну і кругову поляризації
Рідкокристалічна	Лінійна фазова анізотропія	~10 мкс	2-3	Інерційність, низьке енергоспоживання, температурний контроль

Примітка: * – у інфрачервоному діапазоні

Перетворювач поляризації на подвійному електрооптичному ефекті Покельса реалізує повністю керовану фазову пластинку. Модулятор на його основі є одним з найбільш швидкодійних, але не здатний працювати із великими світловими апертурами. За допомогою перетворювача із магнітооптичним елементом на ітрій-феритовому-гранаті $Y_3Fe_5O_{12}$ можна реєструвати коливання площини поляризації інфрачервоного (ІЧ) випромінювання з точністю до $0,0002^\circ$

при полях керування у декілька ерстед (стала часу $10^{-7} \div 10^{-8} \text{с}$), але у видимому діапазоні для повороту площини поляризації на $1^\circ \div 2^\circ$ необхідно прикладати занадто велике магнітне поле (близько 1000 ерстед) [2].

1.4 Вимоги до засобу поляриметричного аналізу рідин

Сучасні лазерні поляриметричні системи для дослідження поляризаційних параметрів анізотропних рідин повинні відповідати таким вимогам:

- точність і повторюваність результатів вимірювань параметрів Стокса (вихідних інтенсивностей) та визначення інформативних параметрів анізотропії зразка;
- універсальність методу вимірювання та достовірність результатів аналізу параметрів, що характеризують зразок;
- оперативність (можливість одночасного вимірювання та оброблення результатів);
- автоматизація процесу вимірювань (застосування комп'ютерних та/або мікропроцесорних засобів);
- відповідність санітарним нормам лазерного випромінювання та електробезпека;
- ергономічність;
- надійність.

При аналізі результатів вимірювань необхідно враховувати наявність чинників, які здатні спотворити результати поляриметричних вимірювань.

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

- вплив сторонніх джерел світла і рухових артефактів на вірогідність результатів автоматизованого контролю;
- вплив інструментальної поляризації оптичної системи поляриметра, спектральної стабільності частоти випромінювання та наявних шумів інтенсивності лазерних джерел на точність результатів вимірювань.

Для мінімізації впливу вказаних чинників на точність результатів вимірювань і контролю пропонується калібрування та оброблення результатів вимірювань із застосуванням сучасних алгоритмів видалення поляризаційних шумів на ПЕОМ.

1.5 Висновки до розділу

Сучасні методи оптичного аналізу анізотропних середовищ дозволяють забезпечити високу чутливість і наочність при вимірюванні і контролі параметрів великої групи речовин у хімічній та цукровій промисловості, а також на оптичному виробництві та в науково-дослідних лабораторіях. Використання лазерів в таких приладах дозволило суттєво підвищити точність методик вимірювання.

Велику групу засобів оптичного аналізу складають поляризаційні прилади, класифікацію яких за різними ознаками наведено у розділі.

Проведено порівняльний аналіз схем оптичної поляриметрії, зокрема Стокс-поляриметрів для дослідження анізотропних речовин.

Для обґрунтування вибору елементної бази розробки проведено порівняльний аналіз характеристик акустооптичних та електрооптичних модуляторів відомих виробників на різних матеріалах.

Аналіз компонентів схем сучасних засобів поляриметрії та їх базових вузлів показав, що найбільшу швидкодію при дослідженні анізотропних середовищ мають пристрої, що використовують електрооптичні модулятори поляризації світла.

2. МЕТОД І ЗАСІБ ПОЛЯРИМЕТРИЧНОГО АНАЛІЗУ ПАРАМЕТРІВ АНІЗОТРОПІЇ РІДИН

2.1 Методика поляриметричного аналізу параметрів лінійної фазової анізотропії

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

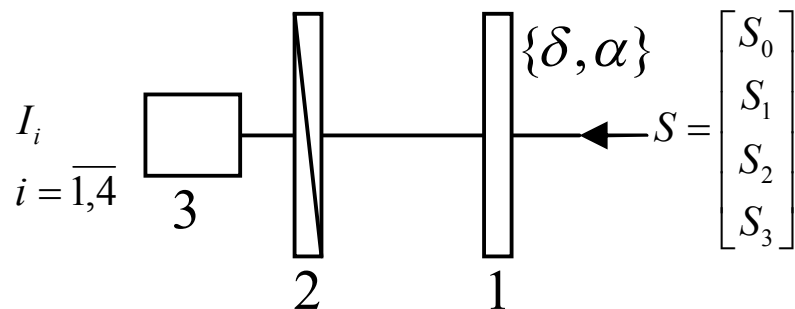


Рисунок 2.1 - Схема Стокс-поляриметра, побудованого на елементі з лінійною фазовою анізотропією: 1 – елемент з лінійною фазовою анізотропією; 2 – фіксований поляризатор (аналізатор); 3 – фотоприймач

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. Даний 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).

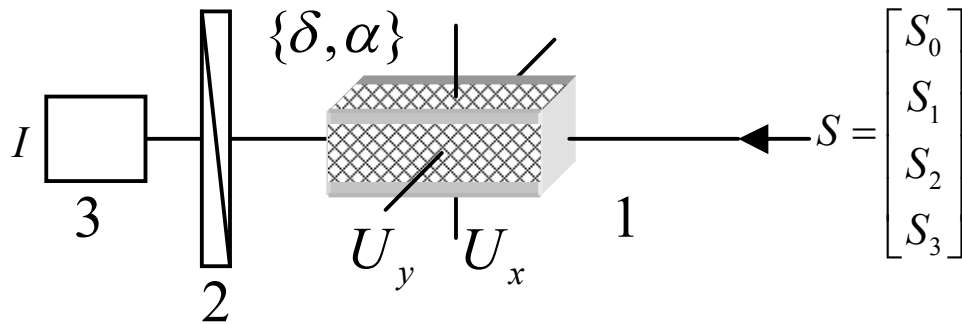


Рисунок 2.2 - Схема Стокс-поляриметра на двох електрооптичних комірках:

- 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.

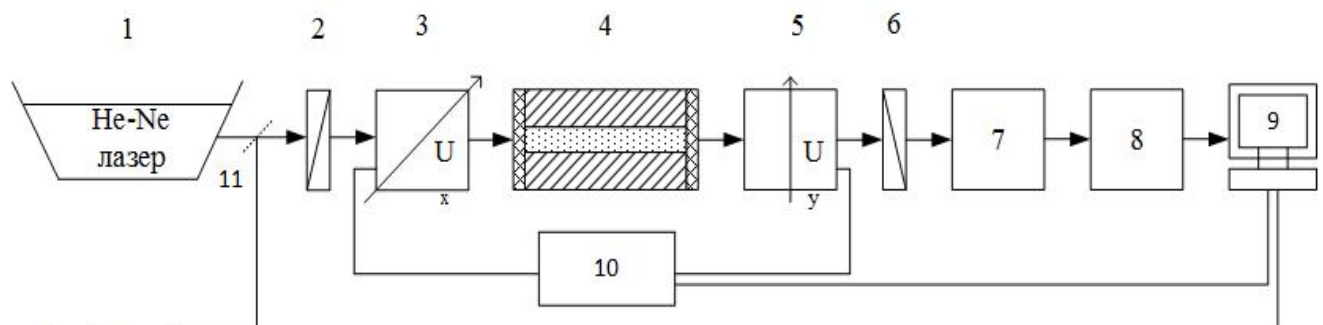


Рисунок 2.3 – Узагальнена структурна схема лазерного поляриметра

Далі опишемо кожен з блоків, зображених на схемі.

1. He-Ne лазер, джерело випромінювання, яке задовольняє усім вимогам щодо інтенсивності, довжині хвилі та параметрів пучка.
2. Поляризатор
3. Електрооптичний модулятор світла, який змінює площину поляризації (координата x).
4. Вимірювальна кювета – кварцовий капіляр, дозволяє мінімізувати об'єм досліджуваної речовини.
5. Електрооптичний модулятор світла (координата y).
6. Аналізатор.
7. Фотометричний сенсор.
8. Блок реєстрації та обробки сигналів.
9. Мікрокомп'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 методику 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 поляриметри 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.

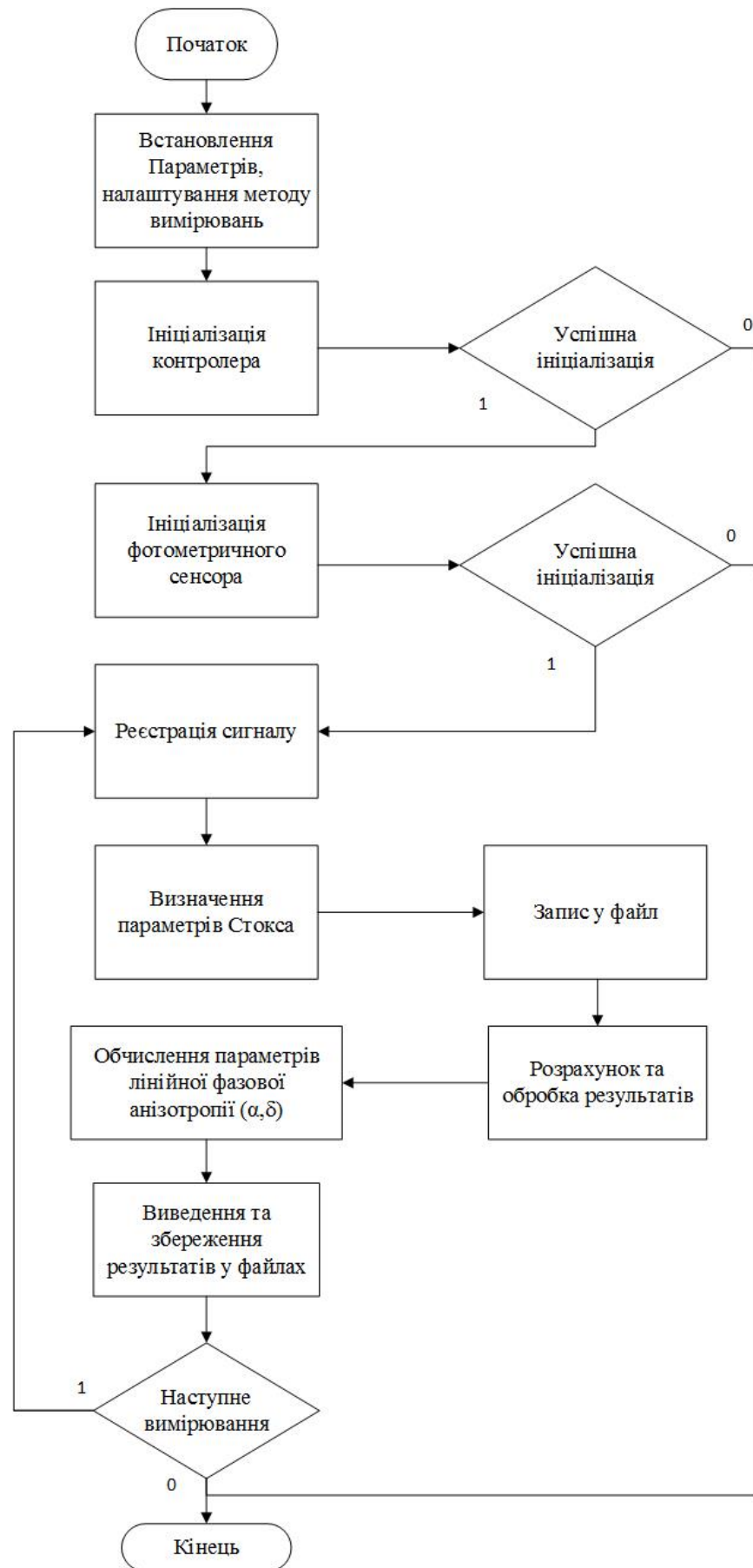


Рисунок 2.4 – Узагальнена схема методу лазерного поляриметричного аналізу

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.

2.3 Розрахунок характеристик основних функціональних вузлів засобу

2.3.1 Розрахунок лазерного випромінювача

Для розрахунків обираємо типові параметри *He-Ne* лазера:

- довжина резонатора лазера – $l=50$ см,
- довжина хвилі $\lambda=0,6328$ мкм,
- оптичний резонатор – конфокальний.

Загальні втрати оптичного резонатора лазера визначаються дифракційними втратами, втратами на дзеркалах, втратами на юстування, а також втратами на поглинання та розсіювання дзеркал та активного середовища.

Для основної моди у відкритих оптичних резонаторах дифракційні втрати конфокального резонатора є дуже малими ($<0,01\%$)[4], тобто добротність резонатора визначається переважно втратами на дзеркалах .

Для мінімізації втрат необхідно, щоб дзеркала були виготовлені у відповідності сучасним стандартам, оскільки інші втрати на поглинання та розсіювання для газів є дуже малими (ними умовно нехтуємо).

Для металевих дзеркал коефіцієнт відбиття при нормальному падінні хвилі [6]:

$$R = \frac{(n - 1)^2 + \kappa^2}{(n + 1)^2 + \kappa^2}, \quad (2.6)$$

де n та κ – показники заломлення та поглинання відповідно.

Високі значення R у видимому діапазоні має срібло. За довідковими даними знаходимо коефіцієнти заломлення та поглинання срібла на робочій довжині хвилі лазера: $n_{Ag} = 0,11$; $k_{Ag} = 26,73$ [1].

Таким чином для «глухого» дзеркала:

$$R_1 = \frac{(0,11-1)^2 + 26,73^2}{0(0,11+1)^2 + 26,73^2} = 0,999.$$

Значення коефіцієнта відбиття для вихідного дзеркала обираємо з урахування низького підсилення He-Ne лазера (в межах типового значення для таких лазерів 5% відбиття):

$$R_2 = (1 - 0,05)0,999 = 0,949.$$

Загальні приведені втрати резонатора на дзеркалах на одиницю довжини:

$$\alpha_{mir} = \frac{1}{2L} \ln \frac{1}{R_1 \cdot R_2} = 0,0533. \quad (2.7)$$

$$\alpha_{mir} = 0,0533.$$

Відповідне значення добротності такого оптичного резонатора з посрібленими дзеркалами:

$$Q = \frac{2\pi l}{\alpha_{tot} \lambda_0} = \frac{6,2832 \cdot 0,5}{0,0533 \cdot 0,6328 \cdot 10^{-6}} = 931443. \quad (2.8)$$

Сусідні моди резонатора відрізняються за частотою на величину:

$$\Delta f = \frac{c}{4l} = \frac{3 \cdot 10^8}{4 \cdot 0,5} = 150 \text{ МГц}. \quad (2.9)$$

Визначимо мінімальний кут розбіжності лазера на основі теорії дифракції оптичного резонатора. Для заданої довжини хвилі лазера 632,8 нм на основній TEM₀₀ моді мінімальний теоретичний кут розбіжності дорівнює:

$$\omega_d \approx 0,5 \cdot 1,22 \frac{\lambda}{D} \cong \frac{0,5 \cdot 1,22 \cdot 0,6328 \cdot 10^{-6}}{5 \cdot 10^{-3}} = 7,72 \cdot 10^{-5} \text{ рад}. \quad (2.10)$$

Зауважимо, що реальні значення кутів розбіжності такого типу лазерів дещо вищі (в межах $0,1-1$ мрад).

Оскільки заданий резонатор лазера є конфокальним, для нього можливе представлення поперечного розподілу поля основної моди функцією Гауса [4]:

$$E = A e^{-\frac{r^2}{w^2}} \cos \varphi. \quad (2.11)$$

Розподіл поля вздовж радіуса в перерізі пучка становить: $\frac{E}{E_{\max}} = e^{-\frac{r^2}{w^2}}$.

Розподіл амплітуди електричного поля на вихідному дзеркалі резонатора представлено на рис. 2.5.

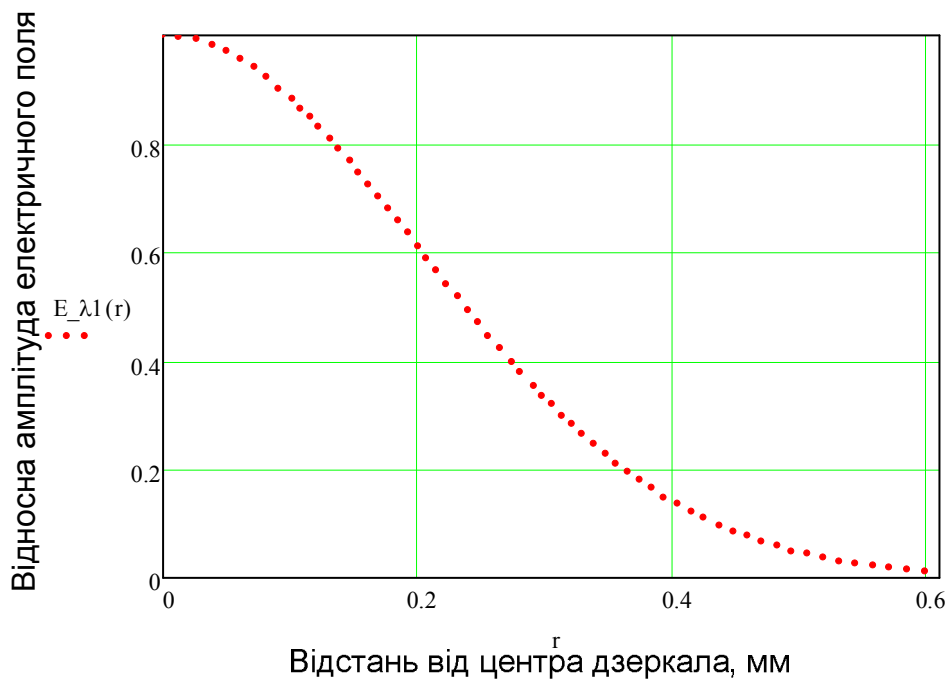


Рисунок 2.5 - Розподіл амплітуди електричного поля на вихідному дзеркалі резонатора лазера

Мінімальний розрахунковий радіус перетяжки лазерного пучка на дзеркалах конфокального резонатора становить

$$r_e = \omega_o = \sqrt{\frac{l\lambda}{2\pi}} = 0,224 \text{ мм} . \quad (2.12)$$

Для розрахунку коефіцієнта підсилення перевіримо порогову умову генерації лазера за відсутності власних втрат:

$$g \geq \alpha_s + \frac{1}{2L} \ln \left(\frac{1}{R_1 R_2} \right) = \frac{1}{2 \cdot 50} \ln \left(\frac{1}{0,999 \cdot 0,95} \right) = 0,00052 \text{ см}^{-1}. \quad (2.13)$$

Для розрахунку енергетичних характеристик газорозрядних лазерів використовують формулу [6]:

$$P_{\text{вих}} = B \left(\frac{G_o}{\alpha_w + \tau_\lambda} - 1 \right) \tau_\lambda, \quad (2.14)$$

де B – коефіцієнт насичення (вважаємо 0,7);

$G_o = \sqrt{\frac{\ln 2}{\pi}} \frac{\lambda_o^2}{\Delta \nu_D} \frac{A_{21}}{4\pi} \Delta N_{21}$ – резонансне значення коефіцієнта квантового підсилення для доплерівськи уширеної спектральної лінії (для вироджених ліній).

Для основної лазерної лінії з урахуванням відомих довідникових значень параметрів активного тіла He-Ne лазера (ширина доплерівського уширення $\Delta \nu_D = 0,5 \text{ МГц}$, коефіцієнт Ейнштейна спонтанного переходу $A_{21} = 10^{-7} \text{ сек}^{-1}$, інверсія населеності спонтанного переходу $\Delta N_{21} = 10^{11}$):

$$G_o = \sqrt{\frac{\ln 2}{\pi}} \frac{0,6328^2 \cdot 10^{-12} \cdot 10^7}{0,5 \cdot 10^6} \cdot 10^{11} = 0,0299 (\approx 3\%) \quad (2.15)$$

З урахуванням того, що сумарні дисипативні втрати α_w у активному елементі лазера не перевищують значення 0,01, отримуємо розрахункову вихідну потужність генерації

$$P_{\text{вих}}^{\text{теор}} = 0,7 \left(\frac{1,03}{0,96} - 1 \right) 0,95 = 0,0484 \text{ Вт} = 48,4 \text{ мВт}.$$

Для розрахунку спектральної ширини газового лазера використовують емпіричну формулу [6]:

$$\Delta \nu_N = 26 + 146 p_e [\text{МГц}], \quad (2.16)$$

де p_r – тиск газу (у мм.рт.ст.) (відомо, що нормальній роботі лазера на основній довжині хвилі *He-Ne* лазера необхідно забезпечити тиск основного газу 1 мм рт.ст.).

Таким чином,

$$\Delta \nu_N = 26 + 146 = 172 [\text{МГц}].$$

2.3.2 Розрахунок характеристик поляризаційного модулятора

У швидкодіючих пристроях лазерної поляриметрії найбільш поширеними перетворювачами поляризації є електрооптичні модулятори, які забезпечують максимальні значення частот модуляції (десятки ГГц), хоча і керуються високою напругою (типові значення для кристалів KDP ~ 3 кВ).

Розглянемо процес поширення світлової хвилі через електрооптичне середовище, в якому показник заломлення n однаковий для хвиль, поляризованих вздовж осей X і Y . Якщо падаюче світло має довільну поляризацію (еліптичну, кругову, лінійну), яка визначається вихідним фазовим зсувом δ_1 між векторами E_x і E_y , то форма цієї поляризації в такому випадку не зміниться. Нехай уздовж осі X прикладено електричне поле E (рис. 2.6), що призводить до зміни показника заломлення - Δn для світлової хвилі з поляризацією, спрямованої уздовж осі X . При цьому показник заломлення для світлової хвилі, поляризованої вздовж Y , залишиться без змін.

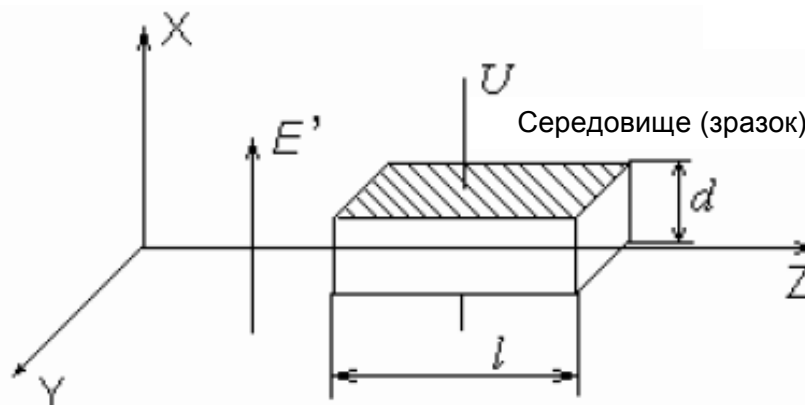


Рисунок 2.6 - Геометрія поля із параметрами зразка

В цьому випадку швидкості поширення для хвиль з X і Y поляризацією будуть різними:

$$v_x = \frac{c}{n - \Delta n} \text{ - для поляризації уздовж } X,$$

$$v_y = \frac{c}{n} \text{ - для поляризації вздовж } Y.$$

У цьому випадку між векторами E_x і E_y виникає фазовий зсув δ , рівний:

$$\delta = \frac{2\pi l}{\lambda} \Delta n, \quad (2.17)$$

де l - довжина середовища, λ -довжина хвилі світла у вакуумі, Δn -зміна показника заломлення.

При поширенні світла через зразок, в якому показники заломлення різні для ортогональних станів поляризацій, відбувається безперервна зміна стану поляризації світла, яке визначається фазовим зсувом δ .

Якщо на середовище, схематично зображене на рис. 2.5, направити лінійно поляризоване світло, азимут поляризації якого становить 45° з напрямком осі X (амплітуди напруженості полів E_x і E_y є однаковими), то за відсутності поля світло на виході з середовища збереже свою поляризацію (для ідеального середовища із відсутніми поглинанням і розсіянням світла), а при накладенні поля світло на виході середовища буде еліптично поляризованим у відповідності з (2.17).

Пропустимо світло, що вийшло з середовища, розташоване в електричному полі, через аналізатор, «схрещений» з вихідної лінійної поляризацією (вісь пропускання аналізатора становить кут 90° з азимутом вихідної поляризації). Через аналізатор пройде лише потік світла, інтенсивність якого I_{min} пропорційна квадрату амплітуди E_{min} компоненти електричного поля світлової хвилі, спрямованої уздовж його осі пропускання. Зміна амплітуди електричного поля описується виразом:

$$E_{min} = E_0 \sin\left(\frac{\delta}{2}\right), \quad (2.18)$$

де δ - набіг фази між компонентами поля з різною поляризацією, E_0 - амплітуда світлової хвилі з вихідної поляризацією на виході середовища.

Тоді зміна інтенсивності світла після аналізатора буде мати вигляд:

$$I_{\min} \propto E_0^2 \sin^2\left(\frac{\delta}{2}\right) \propto I_0 \sin^2\left(\frac{\delta}{2}\right), \quad (2.19)$$

де I_0 - інтенсивність світла з вихідною поляризацією на виході середовища за відсутності поля.

Підставляючи в формулу (2.19) вираз (2.18) з урахуваннями змін з формули (2.17), отримаємо вираз змін інтенсивності для ефекту Покельса:

$$I_{\min} = I_0 \sin^2\left(\frac{\pi l r_{63} n^3}{2\lambda} E\right) = I_0 \sin^2\left(\frac{\pi l r_{63} n^3 U}{2\lambda d}\right). \quad (2.20)$$

При повздовжньому електрооптичному ефекті різниця фаз між ортогональними компонентами [22]

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} (n'_x - n'_y) d = \frac{2\pi}{\lambda} r_{63} n_0^3 U, \quad (2.21)$$

де U – напруга, що прикладена до кристала; d – товщина кристалічної пластинки; r_{63} – електрооптичний коефіцієнт; n_0 – показник заломлення звичайного променя вздовж головних осей кристала.

У [4] наведений вираз для інтенсивності світлового потоку на виході аналізатора для електрооптичного перетворювача поляризації. Для схеми Стокс-поляриметра, наведеної на рис.2.1, можна показати, що

$$I = \frac{(1-R) \cdot e^{-2\gamma d}}{2} \left[(k_1 + k_2) \left(S_0 - \frac{S_2}{2} \right) + (k_1 - k_2) \left(S_1 \cos \delta + \frac{S_2}{2} \cos 2\delta - S_3 \sin 2\delta \right) \right], \quad (2.22)$$

де R та γ – коефіцієнти, відповідно, відбиття і поглинання світла у перетворювачі; $2d$ – товщина перетворювача; k_1 і k_2 – максимальне і мінімальне значення головних коефіцієнтів пропускання світла.

Інтенсивність світла на виході аналізатора електрооптичного перетворювача при прикладанні змінної напруги, яка змінюється за гармонічним законом

$U = U_m \sin \omega t$ (з відповідною різницею фаз $\delta_m = \delta \sin \omega t$) [4]

$$I = \frac{(1-R)e^{-2\gamma d}}{2} \{ [S_0 - S_2(1 - J_0(2\delta)) + S_1 J_0(\delta)] + [2S_2 J_2(2\delta)] \cos 2\omega t + [2S_1 J_4(\delta) + S_2 J_4(2\delta)] \cos 4\omega t - S_3 J_3(2\delta) \sin 3\omega t + \dots \}, \quad (2.23)$$

де $J_m(\delta)$ та $J_m(2\delta)$ – функції Бесселя m -го порядку.

До речовин, в яких спостерігається найбільший лінійний електрооптичний ефект, відносяться ніобат літію LiNbO₃, танталат літію LiTaO₃, дигідрофосфат калію KN₂PO₄ (KDP), дейтерований дигідрофосфат калію KD₂PO₄ (DKDP) та борати барію ВаВ₂О₄ або Ва(ВО₂)₂ (ВВО). Електрооптичні коефіцієнти r в кристалах істотно різняться для різних станів поляризації світла, напрямків його поширення та дії електричного поля.

Робочим діапазоном лазерного поляриметра є хвилі видимого діапазону ($\lambda=632,8$ нм), тому в якості матеріалу для електрооптичного модулятора світла (комірки Поккельса) обираємо кристал із високою гігроскопічністю DKDP.

Кристал KD₂PO₄ має такі довідникові параметри [12]:

- симетрія 42m;
- густина 2,355г/см³;
- робоча спектральна область $\lambda=0,25\text{мкм} \div 1,32\text{мкм}$;
- коефіцієнт температуропровідності $k_{11}=1,9 \cdot 10^{-2} (\text{Вт}/\text{см} \cdot \text{К})$;
- коефіцієнт залишкового поглинання (для $\lambda=1064$ нм) $\alpha=0,005\text{см}^{-1}$;
- руйнівна щільність потужності лазера $P_w=500\text{МВт}/\text{см}^2$ (для $\lambda=1064$ нм, $\tau=10\text{нсек}$);
- електрооптичні коефіцієнти: $r_{63}=72 \cdot 10^{-10} (\text{см}/\text{В})$, $r_{41}=26 \cdot 10^{-10} (\text{см}/\text{В})$.

Спектральні залежності показників заломлення побудуємо на основі формули Селмейра з урахуванням відповідних коефіцієнтів Селмейра для звичайної та незвичайної хвилі [15]:

$$n^2(\lambda) = A + \frac{B\lambda^2}{\lambda^2 - C} + \frac{D}{\lambda^2 - E}, \quad (2.24)$$

де для n_o : $A=2,2409$; $B=2,2470$; $C=126,9205$; $D=0,0097$; $E=0,0156$;

для n_e : $A=2,1260$; $B=0,7844$; $C=123,4032$; $D=0,00886$; $E=0,0120$.

Графіки отриманих у MatchCad2001 спектральних залежностей показників заломлення наведено на рис. 2.7, рис. 2.8.

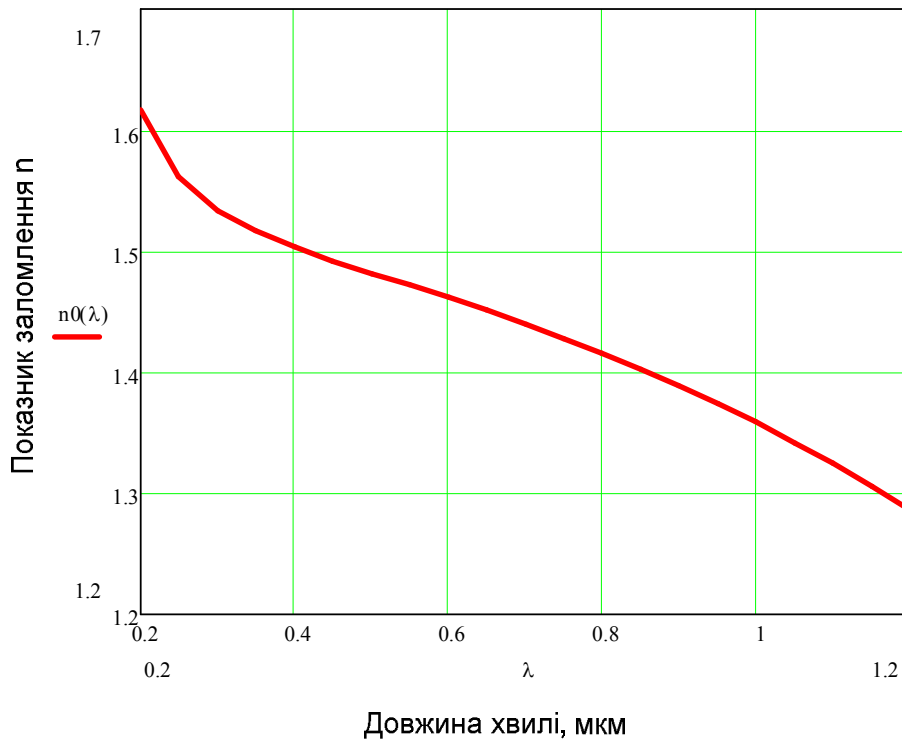


Рисунок 2.7 - Спектральна залежність показника заломлення звичайної хвилі DKDP кристала

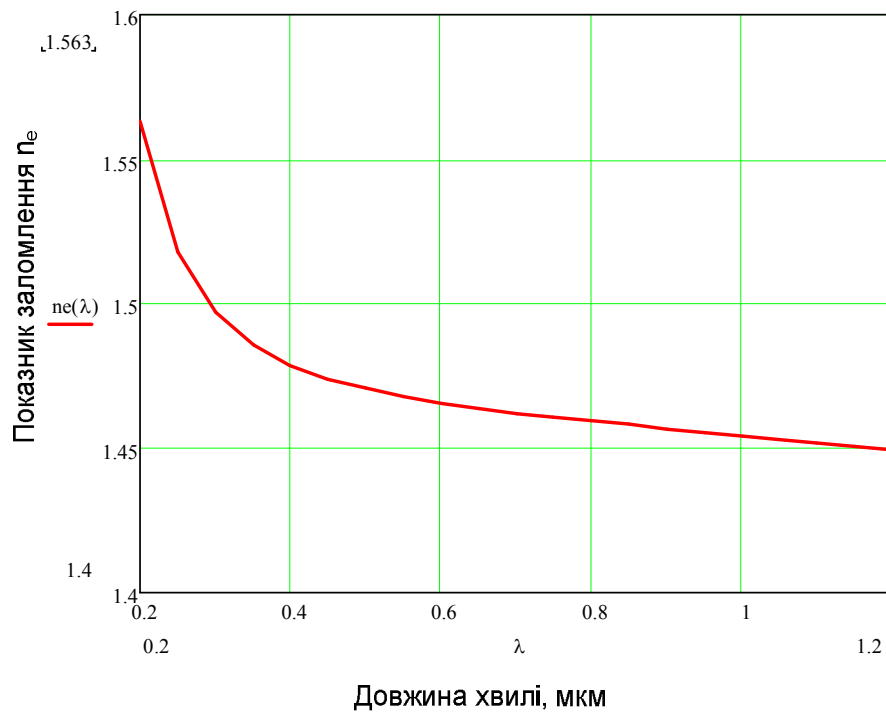


Рисунок 2.8 - Спектральна залежність показника заломлення незвичайної хвилі DKDP кристала

Розраховані на основі (2.13) у MathCad значення показників заломлення для робочої довжини хвилі лазера (0,6328 мкм):

$$n_o := \sqrt{A_0 + \frac{D_0}{(0.6218)^2 - E_0} + \frac{(B_0 \cdot 0.65)^2}{(0.6328)^2 - C_0}} = 1.452$$

$$n_e := \sqrt{A_e + \frac{D_e}{(0.6328)^2 - E_e} + \frac{(B_e \cdot 0.65)^2}{(0.6328)^2 - C_e}} = 1.464$$

Для подальших розрахунків вважаємо, що довжина комірки Поккельса $l=3\text{мм}$ (типове значення), а її товщина становить $d=50\text{мм}$.

Розрахуємо для $\lambda=632,8\text{нм}$ значення півхвилевої ($\lambda/2$) напруги:

$$U_\pi = \frac{\lambda}{2n_o^2 r_{63}}, \quad (2.25)$$

Отже
$$U_\pi := \frac{\lambda 00}{2n_o^3 r_0} = 1.436 \times 10^3 \quad (\text{В}).$$

Фазовий зсув, який вносить електрооптична комірка, розрахований за формулою (2.17) залежно від робочої довжини хвилі, наведено на рис. 2.9.

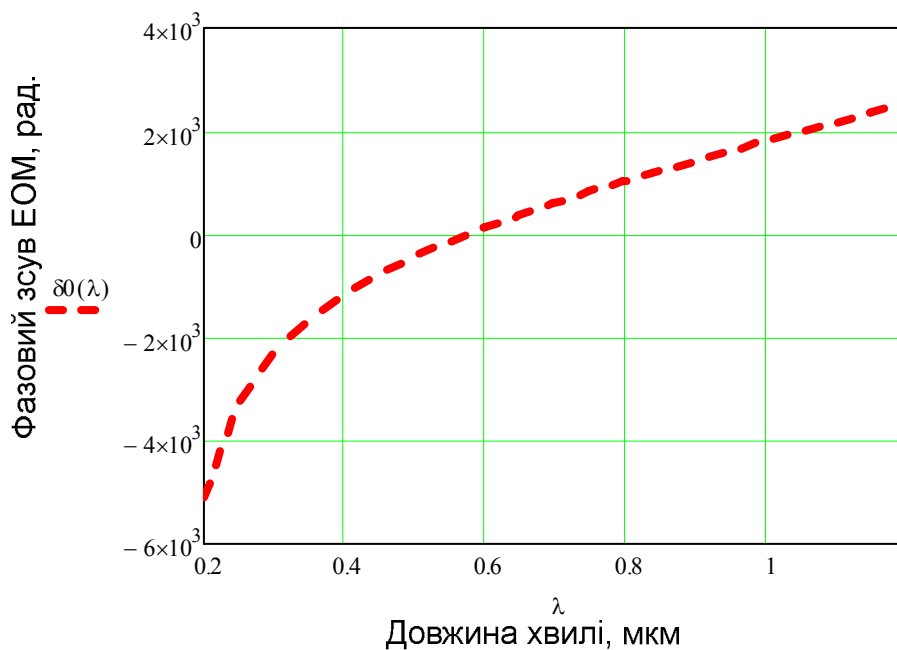


Рисунок 2.9 - Фазовий зсув ЕОМ на DKDP

Важливою характеристикою ЕОМ світла на комірці Поккельса є коефіцієнт контрастності в E_R режимі схрещених поляризаторів, який визначається мінімальною інтенсивністю світлового пучка. Використовуючи формулу (2.3) з урахуванням того, що $E_R = I/I_{min0}$, засобами MathCad отримали спектральні залежності даних параметрів ЕОМ на DKDP в робочому спектральному діапазоні хвиль (рис. 2.10, рис. 2.11).

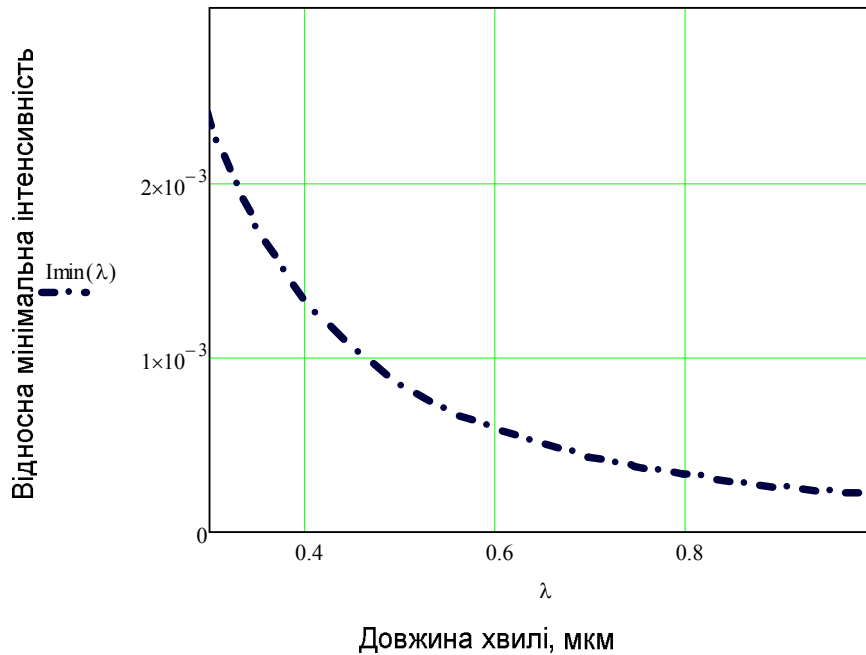


Рисунок 2.10 - Відносна інтенсивність ЕОМ (режим схрещених поляризаторів)

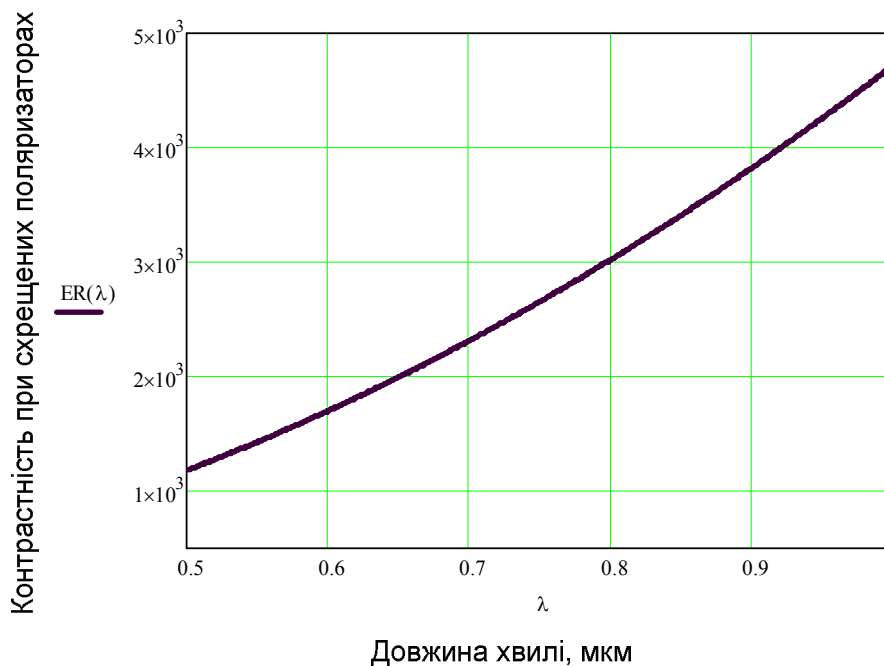


Рисунок 2.11 - Контрастність ЕОМ на DKDP (режим схрещених поляризаторів)

Отже, для робочої хвилі $\lambda=632,8\text{нм}$ відповідне значення максимумальної глибини контрастності E_r :

$$M := \frac{2}{\left(1 - \cos\left(\frac{2\pi \cdot 10 \cdot r_0 \cdot n_0 \cdot U}{2 \times 0.6328 d}\right)\right)} = 2.001 \times 10^3$$

Розраховане значення є цілком прийнятним значенням (типові значення для світових виробників EOM на DKDP $E_r > 1000$).

Розрахуємо значення наведеного кристалом DKDP із вказаними параметрами подвійного променезаломлення та побудуємо його спектральну залежність (рис. 2.12) [11]:

$$\Delta n(\lambda) = \frac{n_0^3(\lambda) r_{63} U_\pi}{d} \quad (2.26)$$

Для робочої довжини хвилі лазера 632,8 нм розраховане значення наведеного кристалом двоприменезаломлення:

$$\Delta n_1(0.6328) = 1.092 \times 10^{-5}$$

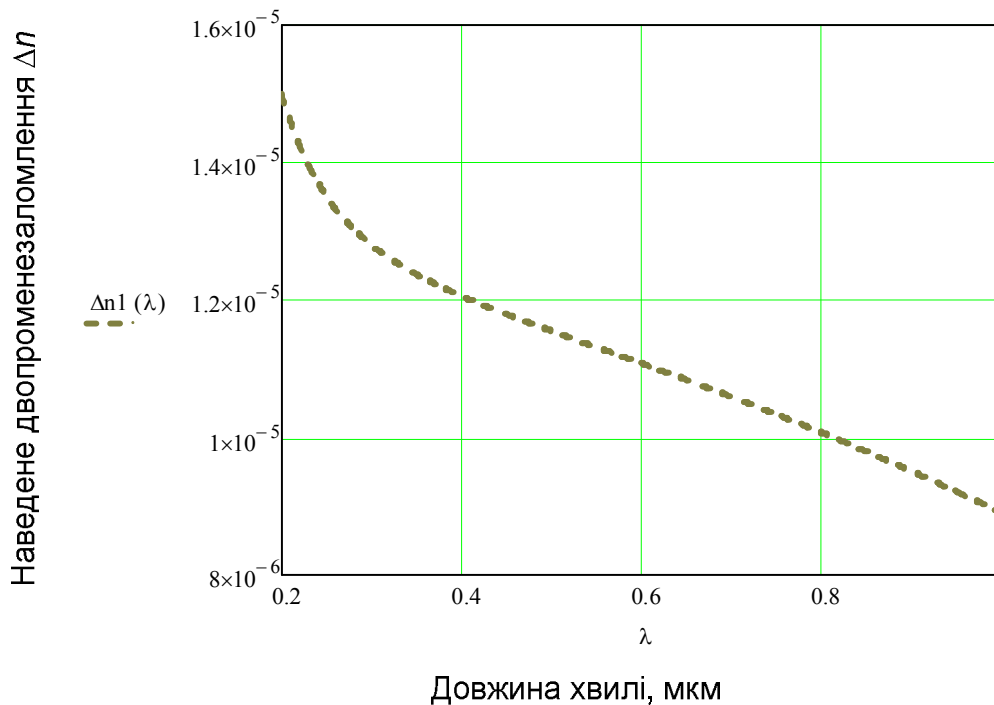
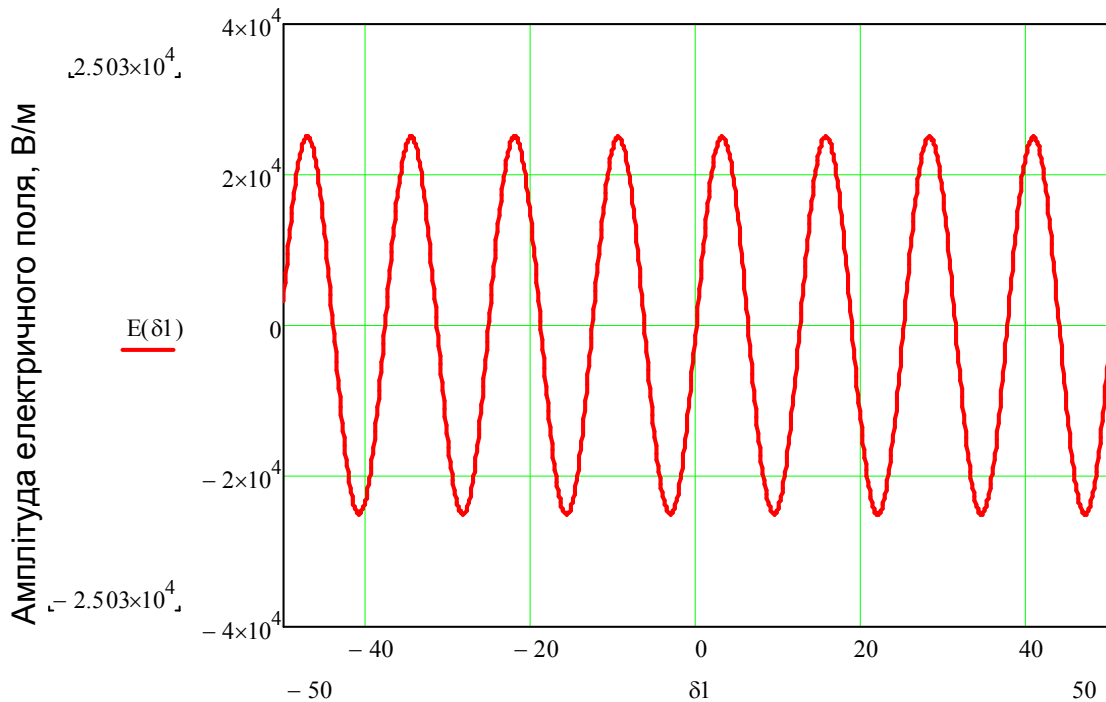


Рисунок 2.12 - Наведене двоприменезаломлення DKDP

Зміна напруженості електричного поля у розрахованому EOM на DKDP відбувається за гармонічним законом (2.18) (рис.2.13)



Фазовий зсув між компонентами поля з різною поляризацією, рад

Рисунок 2.13 - Амплітуда напруженості електричного поля EOM на DKDP

2.4 Висновки до розділу

У розділі 2 МКР запропоновано метод та розроблено структурну схему засобу автоматизованої лазерної поляриметрії для швидкісного аналізу параметрів анізотропії оптично активних рідин.

Виконано розрахунок основних оптичних та енергетичних параметрів лазерного випромінювача, розрахунок модельних характеристик електрооптичного модулятора поляризації (спектральні характеристики, наведене двозаломлення, контрастність, швидкодія та ін.).

Використання запропонованих підходів і схем дозволяє спроектувати швидкодіючий лазерний поляриметр на електрооптичному перетворювачі для аналізу параметрів анізотропії оптично активних рідин з лінійною фазовою анізотропією.

3 РОЗРОБКА І АНАЛІЗ СХЕМ ЗАСОБУ ПОЛЯРИМЕТРИЧНОГО АНАЛІЗУ ОПТИЧНО АКТИВНИХ РІДИН

3.1 Блок електрооптичного модулятора

Електрооптичні пристрої вимагають відносно високої напруги, як правило, порядку кіловольт для поздовжніх пристроїв і від однієї до декількох сотень вольт для поперечних пристроїв. Джерела живлення, які використовуються для їх роботи можуть бути звичайнимизаводськими рішеннями, якщо частоти не надто високі. Будь-який блок живлення або генератор, які можуть видавати на виході необхідну напівхвильову напругу на необхідній частоті, як правило, будуть задовольняти потребам.

Комірка Поккельса являє собою ємнісне навантаження, тому розсіяна потужність не є надмірно високою.

Якщо висока частота або потрібно дуже малий час перемикання, стає значно важче перемикати необхідні значення напруги на високій швидкості. Одназі схем, яка була використана для керування електрооптичним модулятором Поккельса на високій швидкості показана на рисунку 3.1. Ця схема використовує перемикання критрона - газонаповненої трубки, яка використовує дуговий розряд для перемикання напруги в діапазоні від 3 до 7 кіловольт. Керуючий імпульс, який ініціює роботу комутатора, подається через тиристор і трансформатор. Ця схема може перемикати електрооптичний модулятор світла на основі комірки Поккельса зі швидкістю в наносекундному діапазоні.

Виробники електрооптичних модуляторів світла, дефлекторів і Q-перемикачів зазвичай постачають свої пристрої блоками живлення. Значення напруги та опору окремих джерел живлення збігаються з вимогами деяких електрооптичних приладів. Час перемикання для деяких з цих джерел напруги може бути менше однієї наносекунди.

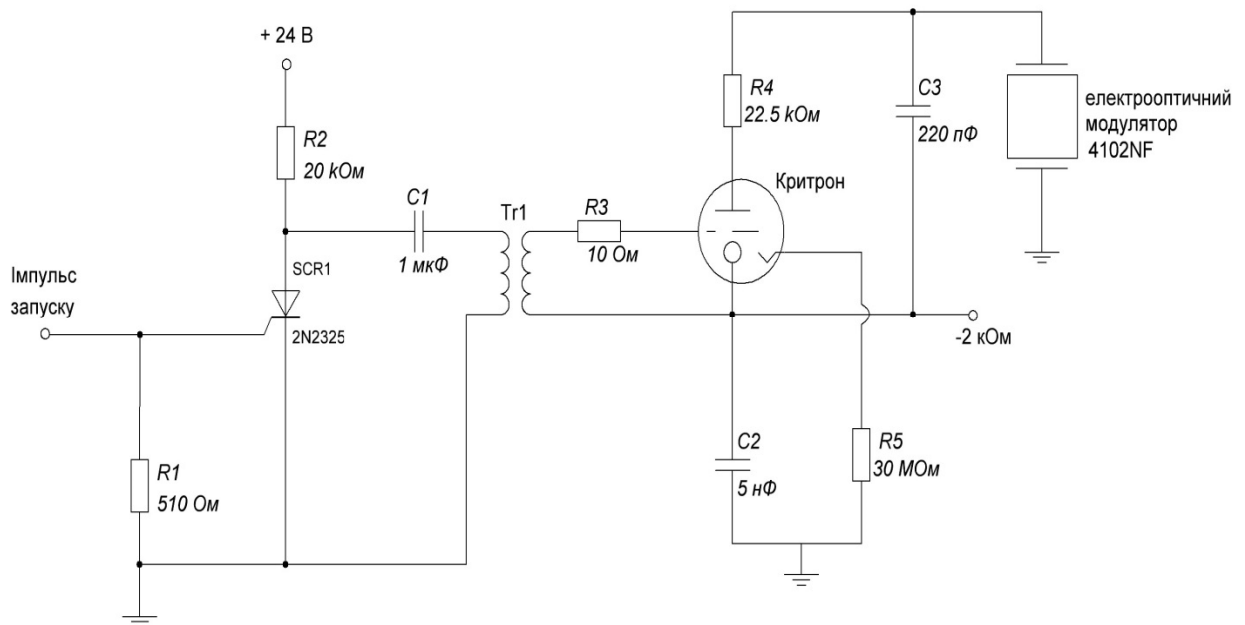


Рисунок 3.1- Схема драйвера електрооптичного модулятора світла для лазерного поляриметра

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 неонова 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.

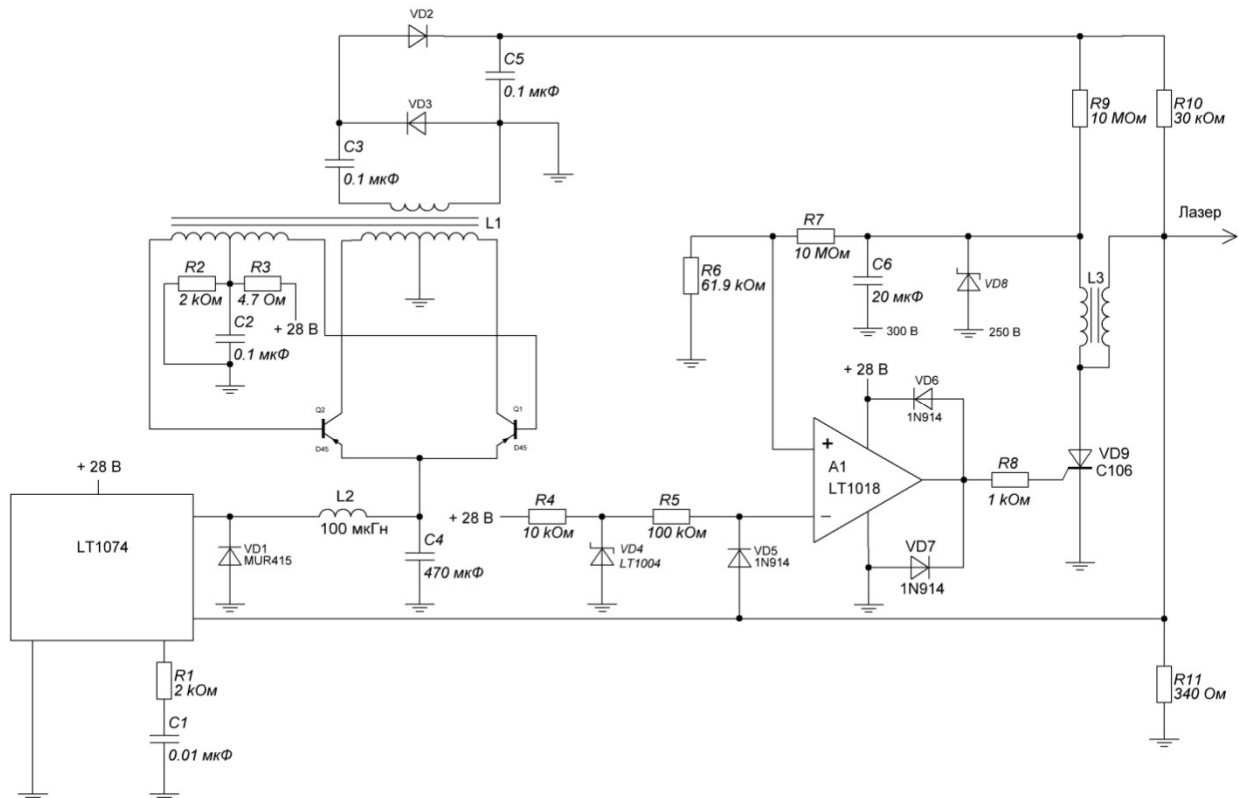


Рисунок 3.3 - Блок живлення гелій-неонового лазера

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,

індукуючи 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 А1 практично має потенціал землі і нічого не відбувається. Але, у міру заряду конденсатора С2 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 С2 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 запусниться автоматично.

3.3 Фотоприймальний пристрій і датчик позиціонування

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 темного 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.

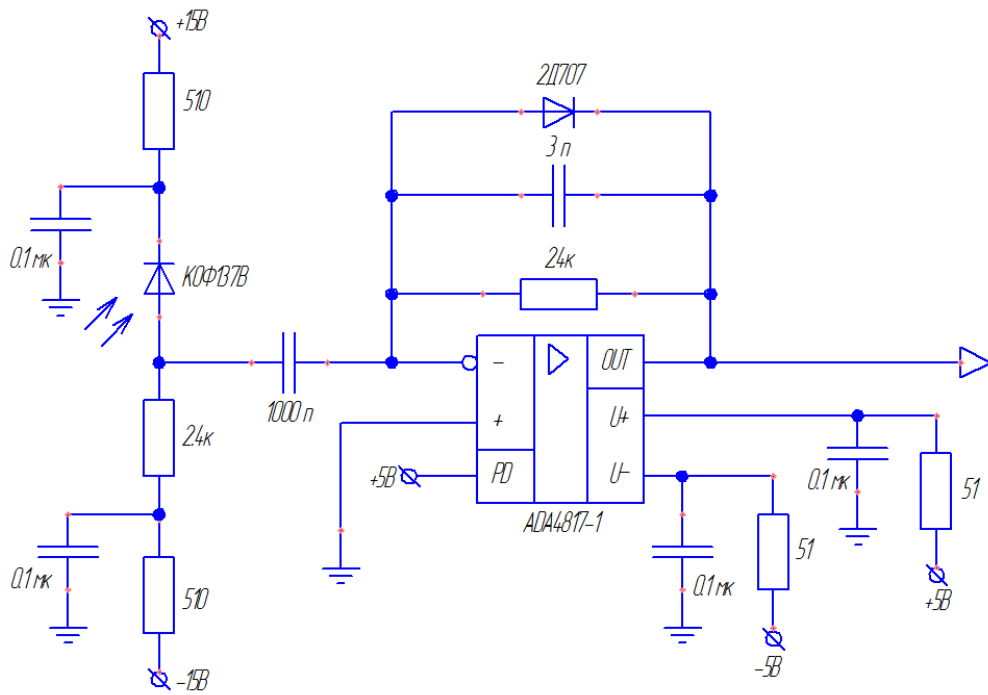


Рисунок 3.4 – Перший каскад підсилення ФПП

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

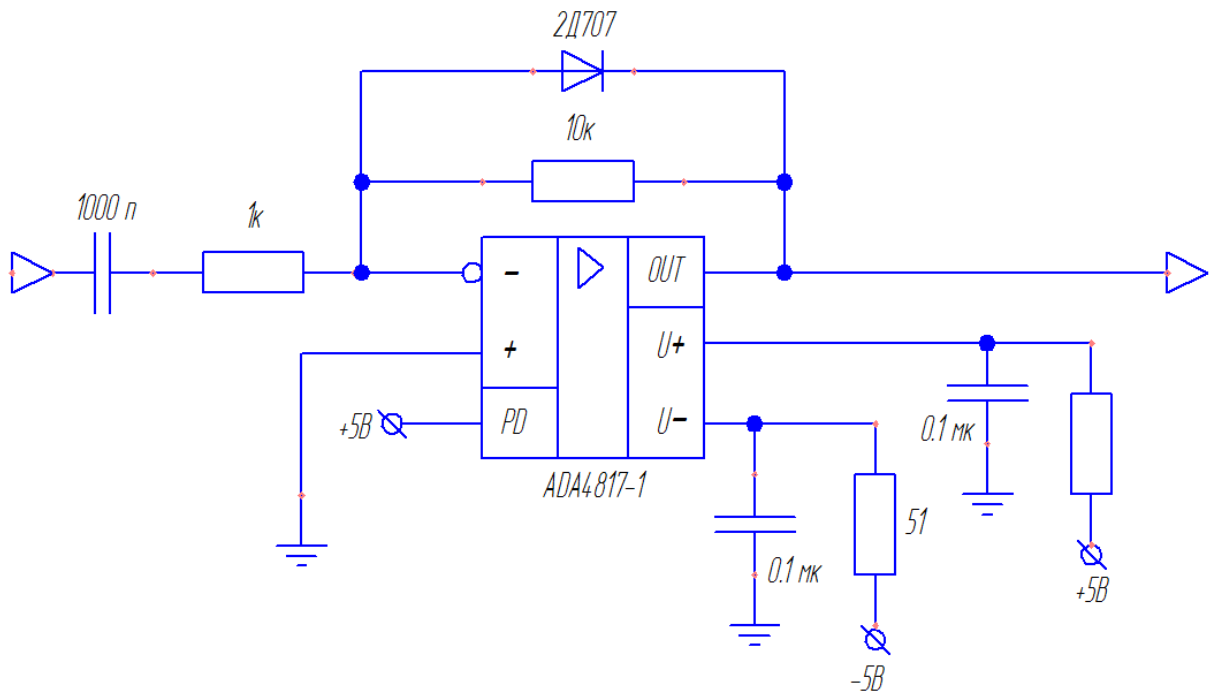


Рисунок 3.5 – Другий і третій каскади підсилення сенсора

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:

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

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:

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

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

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

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

Смуга пропускання:

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

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

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

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:

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

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.

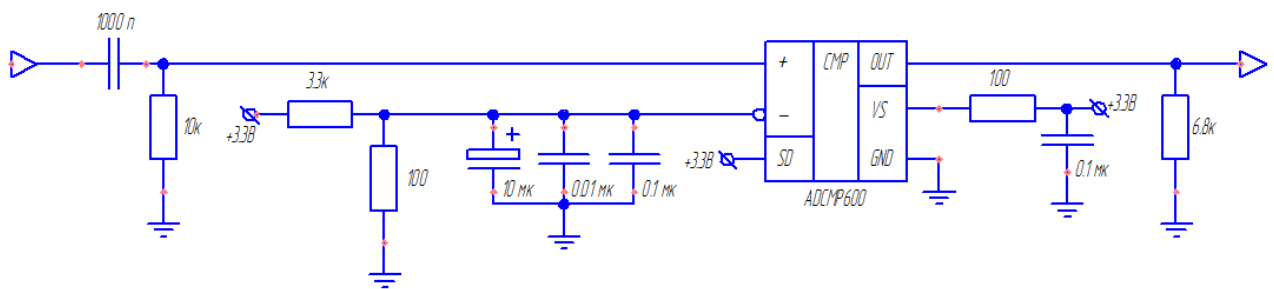


Рисунок 3.6 – Компаратор

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

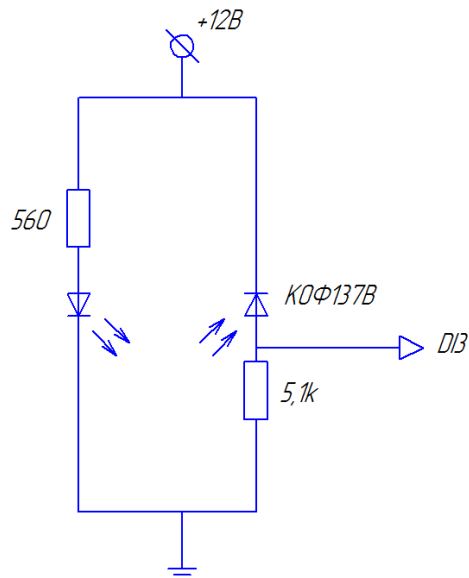


Рисунок 3.7 – Схема оптопары

Оптопара складається з інфрачервоного світлодіода і фотодіода СОФ137В з опором 5,1 кОм. Для того щоб світлодіод працював, 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.

3.4 Мікрокомп'ютер і блок індикації

Важливим структурним блоком керування оптико-електронного поляриметричного засобу є мікропроцесорний блок [26].

До недавнього часу найпопулярнішими у вбудованих системах були 8-ми розрядні мікроконтролери, які є кращими за показником ціна/функціональність. Однак сьогодні на ринку 32-розрядних мікроконтролерів з'явилися нові

мікроконтролери з ядром ARM, які, перевершуючи 8-бітні мікроконтролери за функціональними можливостями та продуктивністю, наблизилися до них за вартістю.

Збільшення конкуренції між виробниками мікроелектронної продукції призвело до появи мікроконтролерних модулів, які на одній платі об'єднують мікроконтролер, графічний процесор, пам'ять та різні інтерфейсні модулі, що дозволяє суттєво скоротити витрати на реалізацію різноманітних технічних рішень. Враховуючи викладене вище, у даній розробці будемо використовувати одноплатний комп'ютер.

Серед різних моделей одноплатних комп'ютерів будемо вибирати той, в якому закладена підтримка взаємодії з цифровою камерою. Це буде основним критерієм, оскільки можливість підключення графічних РК-дисплеїв та підтримка різноманітних комунікаційних інтерфейсів, таких як, наприклад USB, закладена майже в усіх моделях. Крім того, для отамання можливості проводити обробку зображення, отриманого з цифрової камери, потрібно мати не менше 1 Гбайт оперативної пам'яті.

Серед одноплатних комп'ютерів найбільш популярною є модель Raspberry Pi. Серед різних моделей Raspberry Pi зазначеним критерієм відповідає модуль Raspberry Pi 3 Model B, який є одноплатним комп'ютером третього покоління на основі 64-бітного чотирьох ядерного процесора BCM2837 компанії Broadcom SoC з ядром ARM v8 Cortex-A53 з тактовою частотою 1.2 ГГц, з двоядерним графічним співпроцесором Video Core IV Multimedia, що забезпечує Open GL ES 2.0, апаратне прискорення Open VG та 1080p30 H.264 декодування. Модель RPi3 доповнена оперативною пам'яттю SDRAM LPDDR2 на 1 ГБ. Модель підтримує інтерфейси зв'язку Ethernet, WiFi 802.11n та Bluetooth 4.1 [27].

У моделі Raspberry Pi 3 Model B+ наявний 40-піновий роз'єм GPIO, серед контактів якого є інтерфейси SPI, I²C, UART. Крім того, на платі є інтерфейси дисплея MIPI DSI (Display Serial Interface), відеокамери 15-pin MIPI CSI-2 (Camera Serial Interface), HDMI, комбінований 3.5 мм аудіо роз'єм і композитне

відео. Живлення Raspberry Pi 3 Model B здійснюється від 5-вольтового адаптера через роз'єм micro-USB або роз'єма живлення.

Функціонування Raspberry Pi може відбуватися під управлінням операційних систем, заснованих на Linux ядрі: Raspbian, Ubuntu MATE, Ubuntu Core, Android, Arch Linux ARM, openSUSE, Gentoo Linux, CentOS, Fedora, Kali Linux. Також можлива установка Windows 10 IOT, RISC OS Pi, FreeBSD, NetBSD і ін. [27].

Зовнішній вигляд модуля Raspberry Pi 3 Model B+ представлений на рис. 3.8, а його основні характеристики наведені у табл. 3.1 [27], [28].



Рисунок 3.8 – Модуль Raspberry Pi 3 Model B+

Для відображення результатів поляриметричного аналізу будемо використовувати рідкокристалічний графічний дисплей. Оскільки результати контролю обробляються і використовуються автоматизованою системою, їх візуалізація є лише допоміжною функцією. Тому підійде дисплей з діагоналлю не меншою за 2 дюйми. Іншим критерієм при виборі дисплею є сумісність з модулем Raspberry Pi 3 Model B+.

Таблиця 3.1 – Основні характеристики одноплатного комп'ютера Raspberry Pi 3 Model B+

Raspberry Pi 3 Model B+	
Основний чіп	Broadcom BCM2837
Архітектура ядра	64-бітний чотирьохядерний ARMv8 Cortex-A53 процесор з тактовою частотою 1.2 ГГц;
Графічний співпроцесор	2-ядерний Video Core IV® Multimedia
Оперативна пам'ять	1ГБ LPDDR2 SDRAM (900 MHz)
Постійна пам'ять	слот Micro-SD
Інтерфейси	Ethernet, WIFI 802.11n + Bluetooth 4.1 Low Energy (BLE), MiniHDMI, 4×Micro-USB 2.0, Композитний RCA, 15 MIPI Camera Serial Interface (CSI-2), 40 контактів портів введення/виведення;
Габаритні розміри	85 мм x 56 мм x 17 мм

Зазначеним критеріям задовольняє сенсорний кольоровий TFT дисплей на контролері ILI9341 з роздільною здатністю 320 × 240. Дисплей може бути встановлений поверх Raspberry Pi. За габаритами плата дисплея повторює розміри Raspberry Pi.



Рисунок 3.9 – Графічний дисплей для Raspberry Pi на ILI9327

Зовнішній вигляд вибраного дисплею наведений на рис. 3.9, а його основні технічні характеристики представлені у табл. 3.2 [22].

Таблиця 3.2 – Основні характеристики ILI9327

Найменування параметра	Значення
Роздільна здатність	320 x 240
Діагональ	3,5 дюйма;
Довжина x ширина x висота	85,1 мм x 56,7 мм x 5,6 мм
Інтерфейс	SPI
Тип екрана	резистивний

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.

Проведено розрахунки основних характеристик і розроблено схеми фотоприймального блоку, мікрокомп'ютерного блоку та блоку індикації.

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 оптичних та напівпровідникових кристалів, у оптичній астрополяриметрії, для виявлення напружень і температурних градієнтів у кристалооптиці та ін. [4, 22].

4 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

4.1 Проведення наукового аудиту науково-дослідної роботи розробки засобу поляриметричного аналізу оптично активних рідин

Основними ознаками наукового ефекту науково-дослідної роботи є новизна роботи, рівень її теоретичного опрацювання, перспективність, рівень розповсюдження результатів, можливість реалізації.

В даному випадку розробка засобу поляриметричного аналізу оптично активних рідин характеризується традиційним рівнем, що передбачає виконання за традиційною методикою, результати дослідження мають інформаційний характер, підтверджено або поставлено під сумнів відомі факти та твердження, які потребують перевірки, знайдено новий варіант рішення, який не дає суттєвих переваг порівняно з існуючим і становить – 10%.

Рівень теоретичного опрацювання за темою дослідження передбачає розробку засобу поляриметричного аналізу оптично активних рідин і відповідно становить – 40%.

Показник, який характеризує науковий ефект, визначається за формулою:

$$E_{\text{нау}} = 0,6 \cdot k_{\text{нов}} + 0,4 \cdot k_{\text{теор}} = 0,6 \cdot 0,1 + 0,4 \cdot 0,4 = 0,22,$$

де $k_{\text{нов}}$, $k_{\text{теор}}$ – показники ступенів новизни та рівня теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи, бали; 0,6 та 0,4 – питома вага (значимість) показників ступеня новизни та рівня теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи.

Відповідно до граничних значень показників наукового ефекту розробка характеризується достатнім рівнем новизни.

4.2 Проведення комерційного та технологічного аудиту засобу поляриметричного аналізу оптично активних рідин

Метою проведення комерційного і технологічного аудиту є оцінювання науково-технічного рівня та рівня комерційного потенціалу розробки, створеної під час виконання магістерської кваліфікаційної роботи.

Для проведення комерційного та технологічного аудиту залучаємо 3-х незалежних експертів, якими є провідні викладачі спорідненої кафедри ІРТС.

Оцінювання науково-технічного рівня розробки та її комерційного потенціалу здійснюємо із застосуванням п'ятибальної системи оцінювання за 12-ма критеріями, а результати зводимо до таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Результати оцінювання науково-технічного рівня і комерційного потенціалу засобу поляриметричного аналізу оптично активних рідин

Критерії	Експерти		
	Експерт 1	Експерт 2	Експерт 3
	Бали, виставлені експертами		
Технічна здійсненність концепції	1	2	2
Ринкові переваги (наявність аналогів)	2	3	2
Ринкові переваги (ціна продукту)	3	2	3
Ринкові переваги (технічні властивості)	2	1	2
Ринкові переваги (експлуатаційні витрати)	3	2	2
Ринкові перспективи (розмір ринку)	1	3	3
Ринкові перспективи (конкуренція)	2	4	2
Практична здійсненність (наявність фахівців)	3	3	3
Практична здійсненність (наявність фінансів)	2	2	2
Практична здійсненність (необхідність нових матеріалів)	4	2	4
Практична здійсненність (термін реалізації)	2	2	3
Практична здійсненність (розробка документів)	2	3	2
Сума балів	27	29	30
Середньоарифметична сума балів, СБ	29		

За результатами розрахунків, наведених в таблиці 4.1 робимо висновок про те, що науково-технічний рівень та комерційний потенціал засобу поляриметричного аналізу оптично активних рідни – середній.

4.3 Розрахунок витрат на здійснення науково-дослідної роботи

Витрати на оплату праці

Основна заробітна плата дослідників

Витрати на основну заробітну плату дослідників (Z_o) розраховують відповідно до посадових окладів працівників, за формулою:

$$Z_o = \frac{M}{T_p} \cdot t,$$

де M – місячний посадовий оклад конкретного розробника (інженера, дослідника, науковця тощо), грн.; T_p – число робочих днів в місяці; приблизно $T_p = (21 \dots 23)$ дні; t – число робочих днів роботи розробника (дослідника).

Зроблені розрахунки зводимо до таблиці 2.

Таблиця 4. 2 – Витрати на заробітну плату дослідників

Посада	Місячний посадовий оклад, грн.	Оплата за робочий день, грн.	Число днів роботи	Витрати на заробітну плату, грн.
Програміст	15000	682	10	6820
Інженер-електронік	15000	682	15	10230
Інженер-оптик	15000	682	10	6820
Всього:				23870

Основна заробітна плата робітників

Витрати на основну заробітну плату робітників (Z_p) за відповідними найменуваннями робіт розраховують за формулою:

$$Z_p = \sum_{i=1}^n C_i \cdot t_i,$$

де C_i – погодинна тарифна ставка робітника відповідного розряду, за виконану відповідну роботу, грн/год; t_i – час роботи робітника на виконання певної роботи, год.

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

$$C_i = \frac{M_m \cdot K_i \cdot K_c}{T_p \cdot t_{zm}}$$

де M_m – розмір прожиткового мінімуму працездатної особи або мінімальної місячної заробітної плати (залежно від діючого законодавства), грн; K_i – коефіцієнт міжкваліфікаційного співвідношення для встановлення тарифної ставки робітнику відповідного розряду; K_c – мінімальний коефіцієнт співвідношень місячних тарифних ставок робітників першого розряду з нормальними умовами праці виробничих об'єднань і підприємств до законодавчо встановленого розміру мінімальної заробітної плати; T_p – середня кількість робочих днів в місяці, приблизно $T_p = 21 \dots 23$ дні; t_{zm} – тривалість зміни, год.

Таблиця 4.3 – Витрати на заробітну плату робітників

Найменування робіт	Трудомісткість, н-год.	Розряд роботи	Погодинна тарифна ставка	Тариф. коеф.	Величина, грн.
Налагодження	4	4	172	1,27	688
Механічна зборка	4	4	172	1,27	688
Юстування оптичних вузлів	3	4	172	1,27	516
Всього					1892

Додаткова заробітна плата.

Додаткова заробітна плата Z_d всіх розробників та робітників, які брали участь у виконанні даного етапу роботи, розраховується як (10...12)% від суми основної заробітної плати всіх розробників та робітників, тобто:

$$Z_d = 0,1 \cdot (Z_o + Z_p) = 0,1 \cdot (23870 + 1892) = 2576 \text{ грн.}$$

Відрахування на соціальні заходи.

Нарахування на заробітну плату Нзп розробників та робітників, які брали участь у виконанні даного етапу роботи, розраховуються за формулою:

$$\begin{aligned} \text{Нзп} &= 0,22 \cdot (\text{З}_0 + \text{З}_р + \text{З}_д) = \\ &= 0,22 \cdot (23870 + 1892 + 2576) = 6234 \text{ грн.} \end{aligned}$$

де З_0 – основна заробітна плата розробників, грн.; $\text{З}_р$ – основна заробітна плата робітників, грн.; $\text{З}_д$ – додаткова заробітна плата всіх розробників та робітників, грн.; β – ставка єдиного внеску на загальнообов’язкове державне соціальне страхування, % (приймаємо для 1-го класу професійності ризику 22%).

Витрати на сировину та матеріали

До статті «Сировина та матеріали» належать витрати на сировину, основні та допоміжні матеріали, інструменти, пристрої та інші засоби й предмети праці, які придбані у сторонніх підприємств, установ і організацій та витрачені на проведення досліджень за прямим призначенням згідно з нормами їх витрачання, а також витрачені придбані напівфабрикати, що підлягають монтажу або виготовленню й додатковій обробці в цій організації, чи дослідні зразки, що виготовляються виробниками за документацією наукової організації.

Витрати на матеріали (М) у вартісному вираженні розраховуються окремо для кожного виду матеріалів за формулою:

$$M = \sum_{j=1}^n N_j \cdot C_j \cdot K_j - \sum_{j=1}^n V_j \cdot C_{vj},$$

де N_j – норма витрат матеріалу j -го найменування, кг; n – кількість видів матеріалів; C_j – вартість матеріалу j -го найменування, грн/кг; K_j – коефіцієнт транспортних витрат, ($K_j = 1,1 \dots 1,15$); V_j – маса відходів j -го найменування, кг; C_{vj} – вартість відходів j -го найменування, грн/кг.

Таблиця 4.4 – Матеріали, що використовуються при розробці

Найменування матеріалу	Ціна за одиницю, грн.	Витрачено	Вартість витраченого матеріалу, грн.
Флюс ФКСН	4	0,05	0,2
Припій	5	0,05	0,25
Провід МГТФ-0,125	60	3	180
Друкована плата	100	1	100
З врахуванням коефіцієнта транспортування			309

Розрахунок витрат на комплектуючі.

Витрати на комплектуючі K , що були використані під час виконання даного етапу роботи, розраховуються за формулою:

$$K = \sum_{1}^{n} N_i \cdot C_i \cdot K_i,$$

де N_i – кількість комплектуючих i -го виду, шт.; C_i – ціна комплектуючих i -го виду, грн.; K_i – коефіцієнт транспортних витрат, $K_i = (1, 1 \dots 1, 15)$; n – кількість видів комплектуючих.

Таблиця 4.5 - Комплектуючі, що використані на розробку

Найменування	Ціна, грн.	Витрачено, шт.	Вартість, грн
Лазерний модуль	400	2	800
Модулятор	800	1	800
Коліматор	50	2	100
Поляризатор	50	2	100
Фазова пластинка	120	2	240
Блок керування (драйвер)	500	1	500
Блок живлення	150	1	150
Фотосенсор	120	1	120
Кювета	30	1	30
Роз'єми	50	2	100
Блок індикації	70	1	70
Всього, з врахуванням коефіцієнта транспортних витрат			3311

Амортизація обладнання

Амортизація обладнання, комп'ютерів та приміщень, які використовувались під час (чи для) виконання даного етапу роботи.

У спрощеному вигляді амортизаційні відрахування A в цілому бути розраховані за формулою:

$$A = \frac{Цб}{Тв} \cdot \frac{t}{12},$$

де $Цб$ – загальна балансова вартість всього обладнання, комп'ютерів, приміщень тощо, що використовувались для виконання даного етапу роботи, грн.; t – термін використання основного фонду, місяці; $Тв$ – термін корисного використання основного фонду, роки.

Таблиця 4.6 – Амортизаційні відрахування за видами основних фондів

Найменування	Балансова вартість, грн.	Строк корисного використання, роки	Термін використання, м.	Сума амортизації, грн.
ПК	20000	5	1	333
Всього				333

Витрати на електроенергію для науково-виробничих цілей

Витрати на силову електроенергію Ve , якщо ця стаття має суттєве значення для виконання даного етапу роботи, розраховуються за формулою:

$$Ve = \sum \frac{Wi \cdot ti \cdot Ce \cdot Kвпi}{ККД} = \frac{0,2 \cdot 8 \cdot 4,52 \cdot 0,5}{0,98} = 4,5 \text{ грн.},$$

Wi – встановлена потужність обладнання, кВт; ti – тривалість роботи обладнання на етапі дослідження, год.; Ce – вартість 1 кВт електроенергії, грн.; $Kвпi$ – коефіцієнт використання потужності; $ККД$ – коефіцієнт корисної дії обладнання.

В даному випадку працює лише ПК із наступними параметрами: потужність ПК – 0,2 кВт, тривалість роботи ПК – 8 годин, $ККД$ – 0,98, $Kвпi$ – 0,5. Вартість 1 кВт електроенергії за даними енергопостачальної компанії у 2022 році становить 4,52 грн.

Службові відрядження

До статті «Службові відрядження» належать витрати на відрядження штатних працівників, працівників організацій, які працюють за договорами цивільно-правового характеру, аспірантів, зайнятих розробленням досліджень, відрядження, пов'язані з проведенням випробувань машин та приладів, а також витрати на відрядження на наукові з'їзди, конференції, наради, пов'язані з виконанням конкретних досліджень.

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

$$V_{св} = (Z_о + Z_p) \cdot \frac{H_{св}}{100\%} = (23870 + 1892) \cdot \frac{23}{100} = 5925 \text{ грн.},$$

Де $H_{св}$ – норма нарахування за статтею «Службові відрядження».

Інші витрати

До статті «Інші витрати» належать витрати, які не знайшли відображення у зазначених статтях витрат і можуть бути віднесені безпосередньо на собівартість досліджень за прямими ознаками.

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

$$V_{в} = (Z_о + Z_p) \cdot \frac{H_{в}}{100\%} = (23870 + 1892) \cdot \frac{70}{100} = 18033 \text{ грн.},$$

де $H_{в}$ – норма нарахування за статтею «Інші витрати».

Накладні (загальновиробничі) витрати

До статті «Накладні (загальновиробничі) витрати» належать: витрати, пов'язані з управлінням організацією; витрати на винахідництво та раціоналізацію; витрати на підготовку (перепідготовку) та навчання кадрів; витрати, пов'язані з набором робочої сили; витрати на оплату послуг банків; витрати, пов'язані з освоєнням виробництва продукції; витрати на науково-технічну інформацію та рекламу та ін.

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

$$\text{Внзв} = (\text{З}_0 + \text{З}_р) \cdot \frac{\text{Ннзв}}{100\%} = (23870 + 1892) \cdot \frac{130}{100} = 33491 \text{ грн.},$$

де Ннзв – норма нарахування за статтею «Накладні (загальнопромислові) витрати».

4.4 Витрати на проведення науково-дослідної роботи

Витрати на проведення науково-дослідної роботи розраховуються як сума всіх попередніх статей витрат за формулою:

$$\begin{aligned} \text{Взаг} &= \text{З}_0 + \text{З}_р + \text{З}_{\text{дод}} + \text{З}_м + \text{М} + \text{Кв} + \text{Вспец} + \text{Впрг} + \text{Аобл} + \text{Ве} + \\ &\quad + \text{Всв} + \text{Всп} + \text{Ів} + \text{Внзв} = \\ &= 23870 + 1892 + 276 + 6234 + 309 + 3311 + 333 + 4,5 + 5925 + \\ &\quad 18033 + 33491 = 93679 \text{ грн.} \end{aligned}$$

Загальні витрати

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

$$\text{ЗВ} = \frac{\text{Взаг}}{\eta} = \frac{93679}{0,7} = 133827 \text{ грн.},$$

де η – коефіцієнт, що характеризує етап виконання науково-дослідної роботи. Так, якщо науково-технічна розробка знаходиться на стадії: науково-дослідних робіт, то $\eta = 0,1$; технічного проектування, то $\eta = 0,2$; розробки конструкторської документації, то $\eta = 0,3$; розробки технологій, то $\eta = 0,4$; розробки дослідного зразка, то $\eta = 0,5$; розробки промислового зразка, то $\eta = 0,7$; впровадження, то $\eta = 0,9$.

4.5 Розрахунок економічної ефективності науково-технічної розробки за її можливої комерціалізації потенційним інвестором

В ринкових умовах узагальнюючим позитивним результатом, що його може отримати потенційний інвестор від можливого впровадження результатів тієї чи іншої науково-технічної розробки, є збільшення у потенційного інвестора величини чистого прибутку.

В даному випадку відбувається розробка засобу, тому основу майбутнього економічного ефекту буде формувати: ΔN – збільшення кількості споживачів, яким надається відповідна інформаційна послуга в аналізовані періоди часу; N – кількість споживачів, яким надавалась відповідна інформаційна послуга у році до впровадження результатів нової науково-технічної розробки; C_b – вартість послуги у році до впровадження інформаційної системи; $\pm \Delta C_o$ – зміна вартості послуги (зростання чи зниження) від впровадження результатів науково-технічної розробки в аналізовані періоди часу.

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

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

де $\pm \Delta C$ – зміна основного якісного показника від впровадження результатів науково-технічної розробки в аналізованому році. Зазвичай, таким показником може бути зміна ціни реалізації одиниці нової розробки в аналізованому році (відносно року до впровадження цієї розробки); $\pm \Delta C_o$ може мати як додатне, так і від'ємне значення (від'ємне – при зниженні ціни відносно року до впровадження цієї розробки, додатне – при зростанні ціни); N – основний кількісний показник, який визначає величину попиту на аналогічні чи подібні розробки у році до впровадження результатів нової науково-технічної розробки; C_o – основний якісний показник, який визначає ціну реалізації нової науково-

технічної розробки в аналізованому році; Цб – основний якісний показник, який визначає ціну реалізації існуючої (базової) науково-технічної розробки у році до впровадження результатів; ΔN – зміна основного кількісного показника від впровадження результатів науково-технічної розробки в аналізованому році. Зазвичай таким показником може бути зростання попиту на науково-технічну розробку в аналізованому році (відносно року до впровадження цієї розробки); λ – коефіцієнт, який враховує сплату потенційним інвестором податку на додану вартість. У 2022 році ставка податку на додану вартість становить 20%, а коефіцієнт $\lambda = 0,8333$; ρ – коефіцієнт, який враховує рентабельність інноваційного продукту (послуги). Рекомендується брати $\rho = 0,2 \dots 0,5$; ϑ – ставка податку на прибуток, який має сплачувати потенційний інвестор, у 2022 році $\vartheta = 18\%$.

Очікуваний термін життєвого циклу розробки 1 рік, тому:

$$\Delta \Pi_i = (-500 + 6000) \cdot 0,8333 \cdot 0,3 \cdot \left(1 - \frac{18}{100}\right) \cdot 100 = 95040 \text{ грн.}$$

Далі розраховують приведену вартість збільшення всіх чистих прибутків ПП, що їх може отримати потенційний інвестор від можливого впровадження та комерціалізації науково-технічної розробки:

$$ПП = \sum_{i=1}^T \frac{\Delta \Pi_i}{(1 + \tau)^t} = \frac{285120}{(1 + 0,1)^{0,5}} = 271851 \text{ грн.,}$$

де $\Delta \Pi$ – збільшення чистого прибутку у кожному з років, протягом яких виявляються результати впровадження науково-технічної розробки, грн.; T – період часу, протягом якого очікується отримання позитивних результатів від впровадження та комерціалізації науково-технічної розробки, роки; τ – ставка дисконтування, за яку можна взяти щорічний прогнозований рівень інфляції в країні, $\tau = 0,05 \dots 0,15$; t – період часу (в роках) від моменту початку впровадження науково-технічної розробки до моменту отримання потенційним інвестором додаткових чистих прибутків у цьому році.

Далі розраховують величину початкових інвестицій PV , які потенційний інвестор має вкласти для впровадження і комерціалізації науково-технічної

розробки. Для цього можна використати формулу:

$$PV = k_{\text{інв}} \cdot 3B = 1 \cdot 133827 = 133827 \text{ грн.}$$

де k – коефіцієнт, що враховує витрати інвестора на впровадження науково-технічної розробки та її комерціалізацію. Це можуть бути витрати на підготовку приміщень, розробку технологій, навчання персоналу, маркетингові заходи тощо; зазвичай $k_{\text{інв}}=2\dots5$, але може бути і більшим; $3B$ – загальні витрати на проведення науково-технічної розробки та оформлення її результатів, грн.

Тоді абсолютний економічний ефект $E_{\text{абс}}$ або чистий приведений дохід для потенційного інвестора від можливого впровадження та комерціалізації науково-технічної розробки становитиме:

$$E_{\text{абс}} = \text{ПП} - PV = 271851 - 133827 = 138024 \text{ грн.},$$

де ПП – приведена вартість зростання всіх чистих прибутків від можливого впровадження та комерціалізації науково-технічної розробки, грн.; PV – теперішня вартість початкових інвестицій, грн.

Оскільки $E_{\text{абс}} > 0$, то можемо припустити про потенційну зацікавленість інвесторів у розробці.

Для остаточного прийняття рішення з цього питання необхідно розрахувати внутрішню економічну дохідність $E_{\text{в}}$ або показник внутрішньої норми дохідності вкладених інвестицій та порівняти її з так званою бар'єрною ставкою дисконтування, яка визначає ту мінімальну внутрішню економічну дохідність, нижче якої інвестиції в будь-яку науково-технічну розробку вкладати буде економічно недоцільно.

Внутрішня економічна дохідність інвестицій $E_{\text{в}}$, які можуть бути вкладені потенційним інвестором у впровадження та комерціалізацію науково-технічної розробки, розраховується за формулою:

$$E_{\text{в}} = \sqrt[T_{\text{ж}}]{1 + \frac{E_{\text{абс}}}{PV}} = \sqrt[3]{1 + \frac{138024}{133827}} = 1,26,$$

де $T_{\text{ж}}$ – життєвий цикл розробки, роки.

Визначимо бар'єрну ставку дисконтування тмін, тобто мінімальну внутрішню економічну дохідність інвестицій, нижче якої кошти у впровадження науково-технічної розробки та її комерціалізацію вкладатися не будуть.

Мінімальна внутрішня економічна дохідність вкладених інвестицій тмін визначається за формулою:

$$t_{\text{мін}} = d + f = 0,9 + 0,05 = 0,95,$$

де d – середньозважена ставка за депозитними операціями в комерційних банках; в 2020 році в Україні $d = 0,9 \dots 0,12$; f – показник, що характеризує ризикованість вкладення інвестицій; зазвичай величина $f = 0,05 \dots 0,5$, але може бути і значно вищою.

Оскільки $E_{\text{в}} > t_{\text{мін}}$, то потенційний інвестор може бути зацікавлений у фінансуванні впровадження науково-технічної розробки та виведенні її на ринок, тобто в її комерціалізації.

Далі розраховуємо період окупності інвестицій T_0 , які можуть бути вкладені потенційним інвестором у впровадження та комерціалізацію науково-технічної розробки:

$$T_0 = \frac{1}{E_{\text{в}}} = \frac{1}{1,26} = 0,8 \text{ року} = 9,6 \text{ місяців.}$$

Оскільки $T_0 < 3$ -х років, то це свідчить про комерційну привабливість науково-технічної розробки і може спонукати потенційного інвестора профінансувати впровадження цієї розробки та виведення її на ринок.

4.6 Висновки до розділу 4

Економічна частина даної магістерської роботи містить розрахунок витрат на розробку та виготовлення нового технічного рішення сума яких складає 133827 гривень. Було прогнозовано орієнтовану величину витрат по кожній з статей витрат. Також обраховано величину приведенного прибутку, який може отримати виробник від реалізації нового технічного рішення, знайдено термін окупності витрат для виробника, що становить 9,6 місяців та величину

абсолютної ефективності вкладених інвестицій у розробку засобу поляриметричного аналізу оптично активних рідин, яка склала 138024 грн.

В результаті аналізу розрахунків можна зробити висновок, що розроблений засіб характеризується високими показниками якості та конкурентоспроможності і даний проект є привабливим з точки зору інвестиційної політики.

ВИСНОВКИ

У магістерській роботі здійснено аналіз сучасних методів і засобів поляриметрії оптично активних середовищ, а також класифікацію автоматизованих засобів лазерної поляриметрії та їх компонентів. Проаналізовано переваги і недоліки схем аналізу поляризаційних характеристик речовин з урахуванням особливостей модуляторів поляризації. Обґрунтовано вибір електрооптичного модулятора поляризації для запропонованого засобу поляриметричного аналізу оптично активних рідин.

Проведено розрахунок і моделювання параметрів лазерного випромінювача, модулятора, сенсора та інших функціональних блоків автоматизованого засобу поляриметричного аналізу оптично активних рідин.

Удосконалено метод стокс-поляриметричного аналізу параметрів лінійної фазової анізотропії у схемі лазерного поляриметра оптично активних рідин із підвищеною швидкістю (до 1 мкс);

Розроблено структурну схему автоматизованого засобу лазерного поляриметричного аналізу анізотропних характеристик оптично активних рідин, оптичні та електричні схеми основних компонентів і вузлів. Розраховано функціональні характеристики компонентів схем та обґрунтовано вибір елементної бази засобу поляриметричного аналізу оптично активних рідин на основі запропонованого методу.

Виконано моделювання характеристик і розрахунок основних вузлів поляриметра – лазера, електрооптичного модулятора та фотоприймального сенсора, блоку керування та індикації. Так, визначено енергетичні (вихідна потужність ~ 40 мВт) і спектральні (доплерівське уширення ~ 150 МГц) характеристики лазера. Розраховані характеристики наведеного двозаломлення у кристалі модулятора, його контрастність і зміну інтенсивності, які дозволили оптимізувати структуру з урахуванням робочої довжини хвилі лазера. Розраховані параметри фотосенсора свідчать про можливість високу чутливість

(мінімальний рівень оптичної потужності сигналу 4мкВт), швидкодію і високі значення сигнал/шум при реєстрації сигналів.

Розроблено електричні схеми блоку живлення лазера і керування електрооптичного перетворювача поляризації.

Розраховано економічну доцільність та інші техніко-економічні показники розробки.

Таким чином, розроблений засіб поляриметричного аналізу на електрооптичному перетворювачі є високочутливим і швидкодіючим вимірювальним засобом, що дозволяє на основі вимірювання параметрів Стокса оперативно визначати параметри лінійної фазової анізотропії у оптично активних рідинах.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Аззам Р., Башара Н. Эллипсометрия и поляризованный свет М.: Мир, 1981. 584 с.
2. Тужанський С. Є., Лисенко Г. Л. Системи лазерної відеополяриметрії для автоматизованого контролю параметрів неоднорідних біотканин: монографія Вінниця : ВНТУ, 2011. 156 с.
3. Шутов А.М. Методы оптической астрополариметрии М.: КомКнига, 2006. 232с.
4. Лисенко Г.Л. М'ялківська І. В. Аналіз сучасних типів оптичних транспарантів / Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. 2007. №2. с. 145-150.
5. Тужанський С. Є. Лазерні поляриметричні методи контролю оптичних параметрів біотканин / Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. 2006. №2(12). с. 201-213.
6. Марьенко В.В., Савенков С.Н. Представление произвольных матриц Мюллера в базисе матриц круговой и линейной анизотропии / Оптика и спектроскопия. 1994. Т.76. №1. с. 102–104.
7. Колесник Ю.І., Кіпенський А.В. Елементи та пристрої квантової електроніки : навч. посіб. Х. : НТУ «ХП», 2016. 318 с.
8. Крупич О.М. Поляриметрия зображення неоднорідних анізотропних об'єктів: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. фіз.-мат. наук: спец. 01.04.05 “Оптика, лазерна фізика”. Львів, 2002. 20 с.
9. Ушенко О.Г., Бойчук Т.М. [та ін] Основи лазерної поляриметрії. Біологічні рідини. Чернівці: Чернів. нац. ун-т, 2011. 656с.
10. Поджаренко В. А., Кухарчук В. В. Метрологические основы компьютерно-измерительной техники: [учеб. пособие] К.: УМК ВО, 1989. 216 с.
11. Иванов А.П. Оптика рассеивающих сред. Минск: Наука і тэхніка, 1969. 592 с.

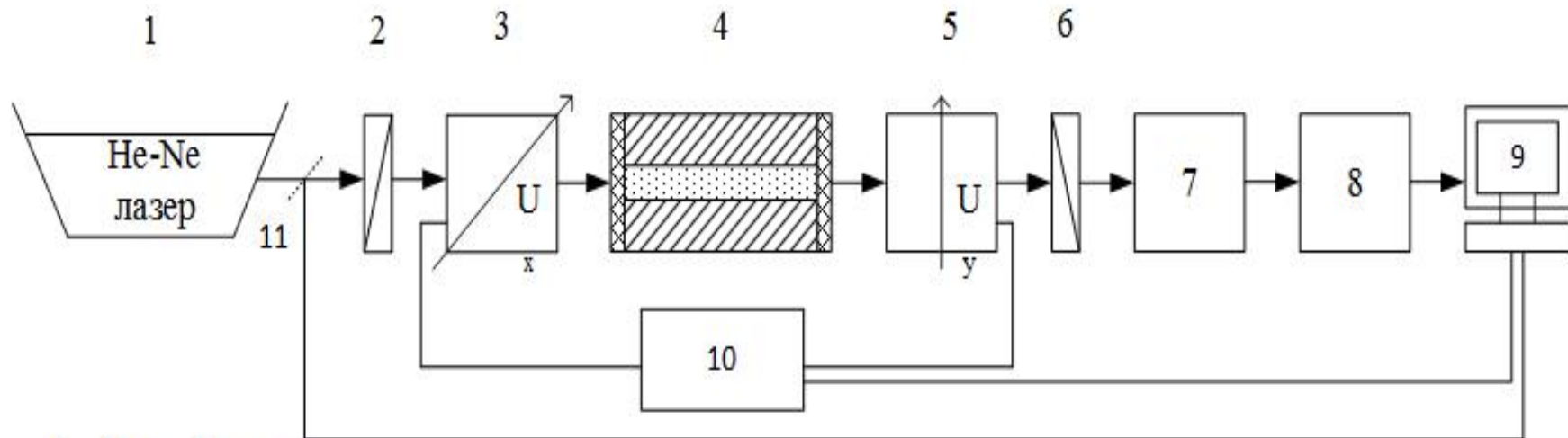
12. Мустель Е.Р., Парыгин В.Н. Методы модуляции и сканирования света. М.: Наука, 1970. 296с.
13. Нарасимхамурти Т. Фотоупругие и электрооптические свойства кристаллов. М.: Мир, 1984. 624 с.
14. Кожем'яко В.П., Готра З.Ю., Павлов С.В., Микитюк З.М., Готра О.З. Схемотехніка сучасного приладобудування. Ч.3 Оптичні сенсори. Навчальний посібник. Вінниця: ВДТУ, 2002. 164 с.
15. Ярив А., Юх П. Оптические волны в кристаллах: пер. с англ. М.: Мир, 1987. 310 с.
16. Eksmaoptics. Pocket cells [Электронный ресурс]: Режим доступа: <http://eksmaoptics.com/pockels-cells-and-drivers/pockels-cells/> - Назва з екрану.
17. Lsoptical. BBO Pocket cells [Электронный ресурс]: Режим доступа: http://www.lsoptical.com/BBO_Pockels_cell.html - Назва з екрану.
18. Киселев Г.Л. Квантовая и оптическая электроника: Учебное пособие. – Спб.: Издательство «Лань», 2011. 320 с.
19. Григорук В. І., Коротков П. А., Хижняк А. І. Лазерна фізика: Підручник. К. : «МП Леся», 1997. 480 с.
20. Скворцов Л. А. Основы фототермической радиометрии и лазерной терморграфии. М.: ТЕХНОСФЕРА, 2017. 220 с.
21. Обзор рынка микроконтроллеров для встраиваемых приложений. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.russianelectronics.ru/leader-r/review/optic/349/doc/549/>
22. Кожем'яко В.П., Павлов С.В., Тарновський М.Г. Оптоелектронна схемотехніка. Навчальний посібник. Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2008. - 189 с.
23. Заказнов Н.П. Теория оптических систем: Учебник для приборостроительных специальностей вузов / Н.П. Заказнов, С.И. Кирюшин, В.Н. Кузичев. М.: Машиностроение, 1992. 448 с.
24. Кожем'яко В.П., Тарновський М.Г. Прикладна оптика: навч. посіб. Ч. 1. Основи теорії оптичних систем. ВНТУ. Вінниця: ВНТУ, 2017. 107 с.

25. Міхеєнко Л.А., Мамута М.С. Оптичні вимірювання: Навчальний посібник. К.: НТУУ «КПІ», 2014. 190 с.
26. Андреев А.Н., Гаврилов Е.В., Ишанин Г.Г. Оптические измерения: Учеб. пособие. М.: Университетская книга; Логос, 2008. 416 с.
27. Chipman R. A. Handbook of optics (polarimetry) New York : OSA / McGraw-Hill, 1994. 360 p.
28. Козловський В. О. Методичні вказівки до виконання студентами-магістрантами економічної частини магістерських кваліфікаційних робіт. Вінниця: ВНТУ, 2012. 22 с.

ДОДАТКИ

Додаток А
(обов'язковий)

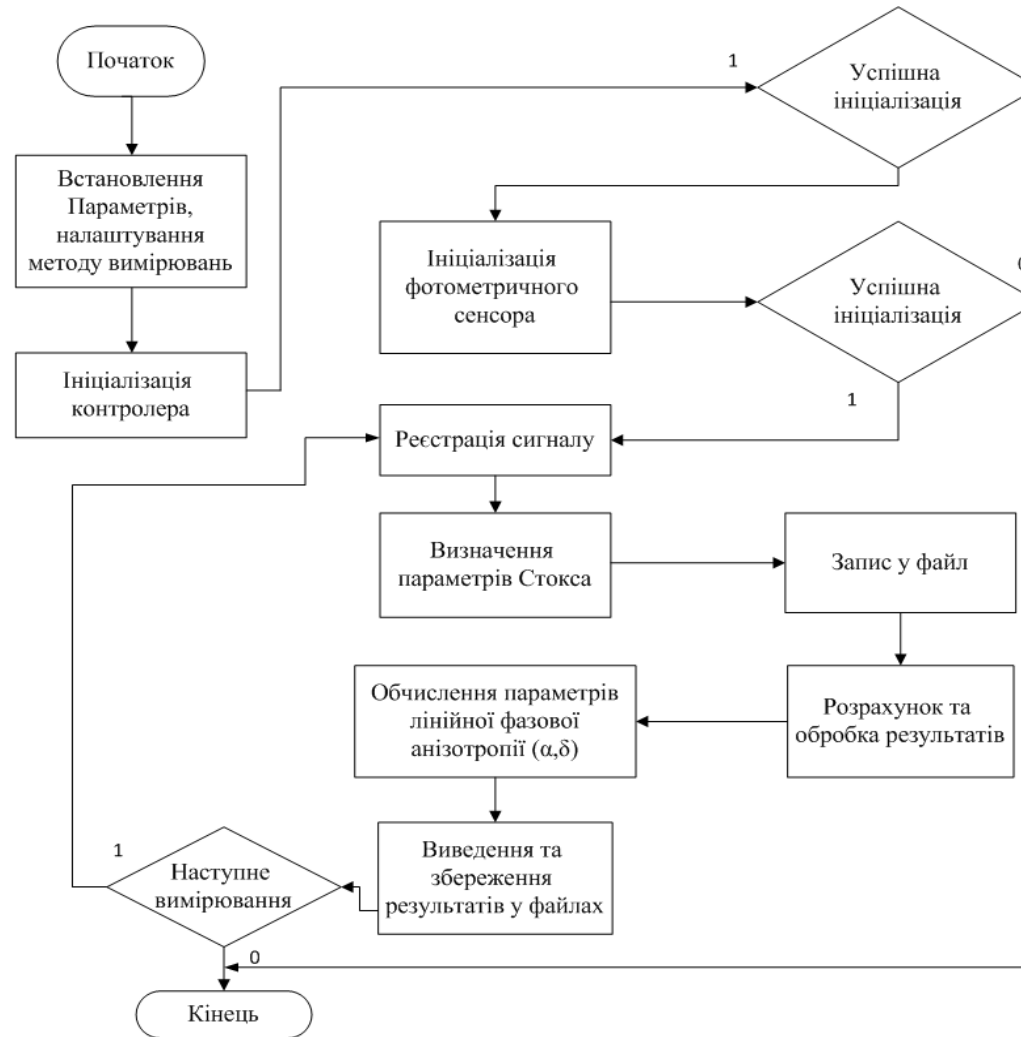
Структурна схема засобу поляриметричного аналізу оптично активних рідин



1. *He-Ne лазер*
2. *Поляризатор*
3. *Електрооптичний модулятор світла (Ox).*
4. *Вимірвальна кювета*
5. *Електрооптичний модулятор світла (Oy).*
6. *Аналізатор.*
7. *Фотометричний сенсор.*
8. *Блок обробки сигналів.*
9. *Блок індикації.*
10. *Мікрокомп'ютерний блок керування.*
11. *Електронний затвор*

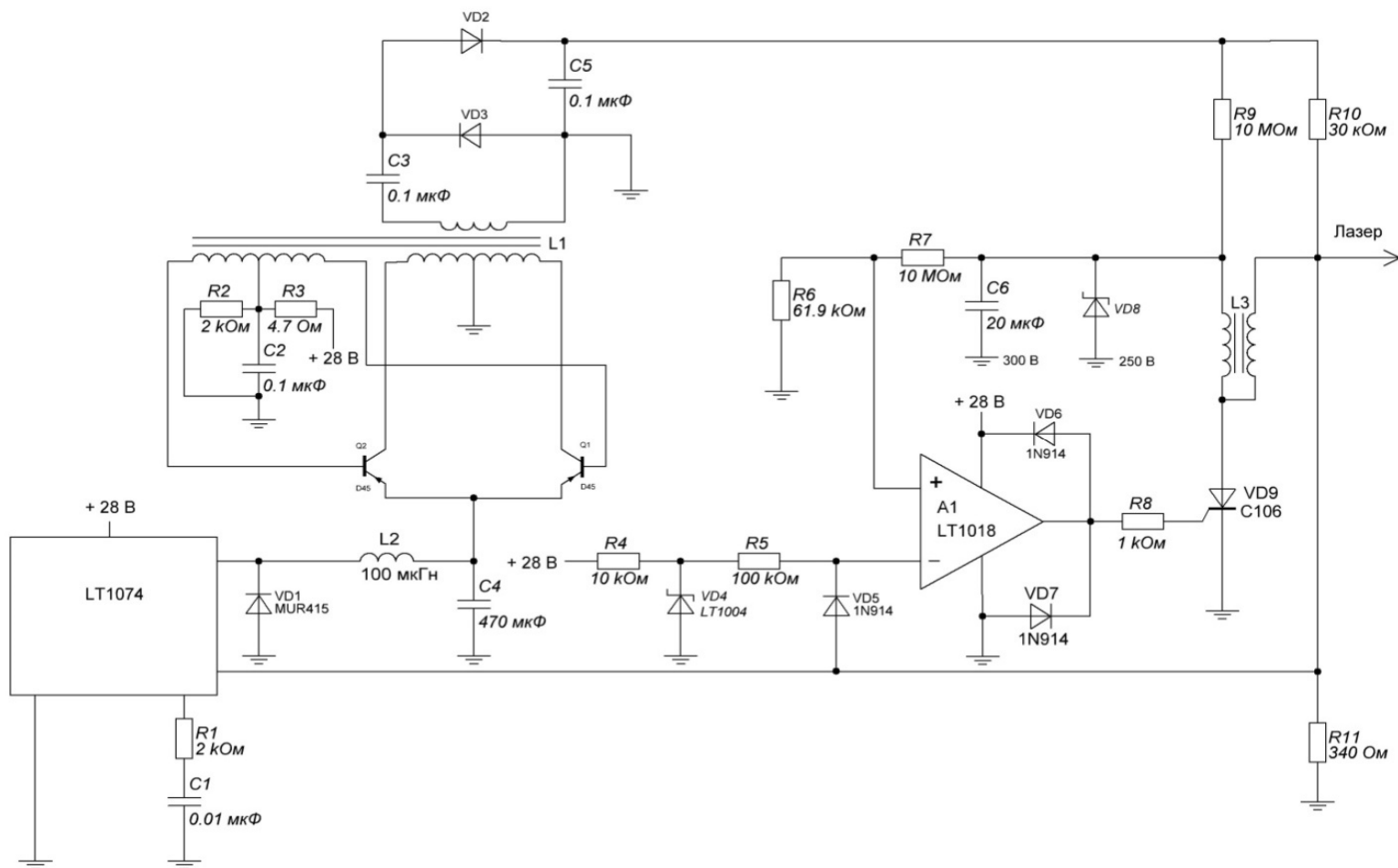
Додаток Б
(обов'язковий)

Алгоритм засобу вимірювань параметрів лінійної фазової анізотропії



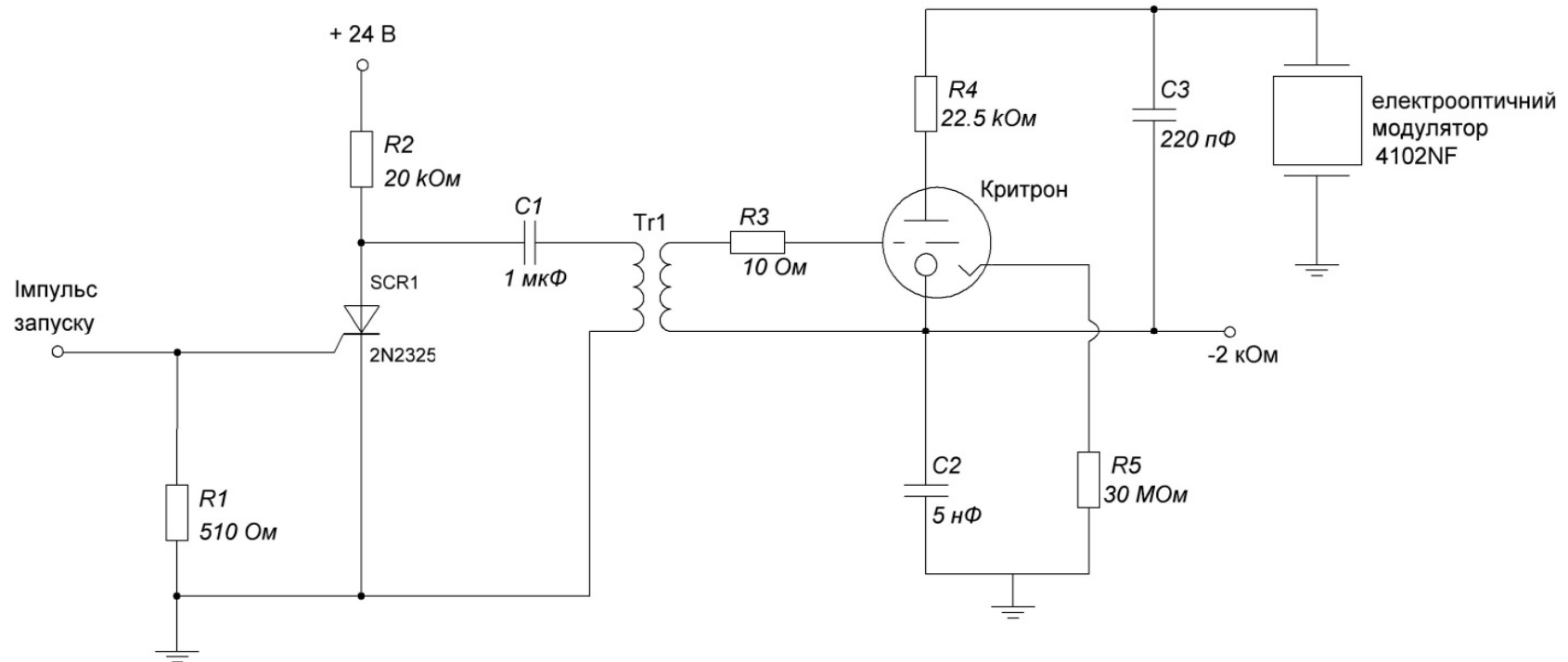
Додаток В
(обов'язковий)

Блок живлення He-Ne лазера



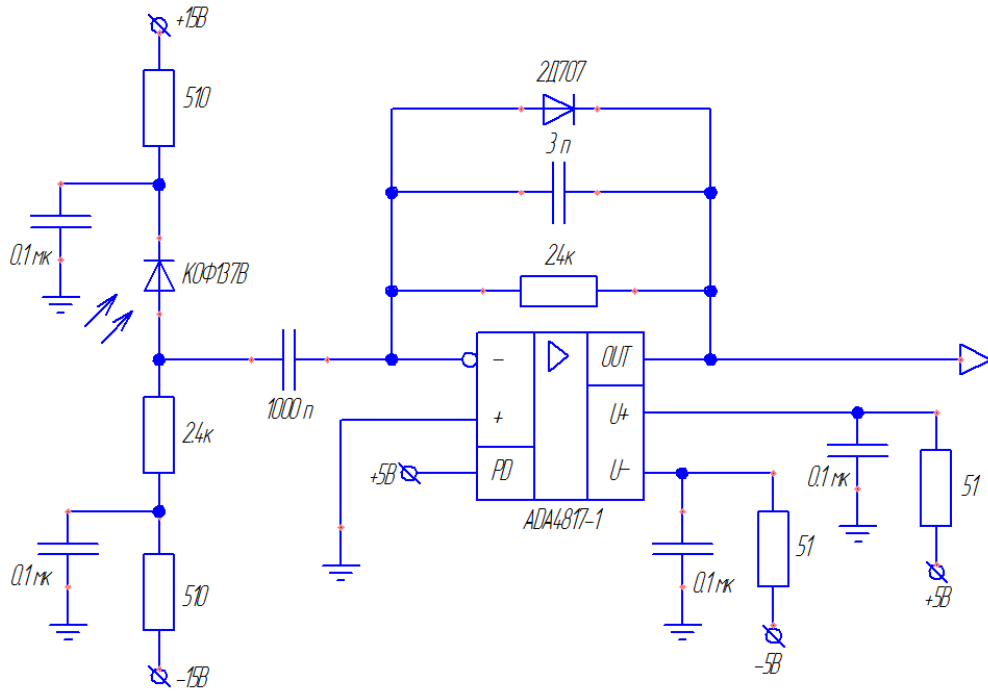
Додаток Г
(обов'язковий)

Схема електрична принципова блоку керування модулятора поляризації



Додаток Д
(обов'язковий)

Схема електрична функціональна фотометричного сенсора
(перший каскад підсилення)



Додаток Е
(обов'язковий)

90

ПРОТОКОЛ
ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ
НА НАЯВНІСТЬ ТЕКСТОВИХ ЗАПОЗИЧЕНЬ

Назва роботи: Засіб поляриметричного аналізу оптично активних рідин

Тип роботи: магістерська кваліфікаційна робота
(МКР, БДР)

Підрозділ: кафедра БМІОЕС, ФІЕС
(кафедра, факультет)

Показники звіту подібності Unicheck

Оригінальність 88,5% Схожість 11,5%

Аналіз звіту подібності (відмітити потрібне)

1. Запозичення, виявлені у роботі, оформлені коректно і не містять ознак плагіату

2. Виявлені у роботі запозичення не мають ознак плагіату, але їх надмірна кількість викликає сумніви щодо цінності роботи і відсутності самостійності її виконання автором. Роботу направити на розгляд експертної комісії кафедри

3. Виявлені у роботі запозичення є недобросовісними і мають ознаки плагіату та/або в ній містяться навмисні спотворення тексту, що вказують на спроби приховування недобросовісних запозичень

Особа, відповідальна за перевірку С.Є. Тужанський С.Є.
(підпис) (прізвище, ініціали)

Ознайомлені з повним звітом подібності, який був згенерований системою Unicheck щодо роботи

Автор Жарук О.М.
(підпис) (прізвище, ініціали)

Керівник роботи Лисенко Г.Л.
(підпис) (прізвище, ініціали)