

Вінницький національний технічний університет  
Факультет комп'ютерних систем та автоматики  
Кафедра лазерної та оптикоелектронної техніки

**МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**  
на тему:

**«Засіб вимірювального контролю товщини покриття оптичних елементів»**

Виконав: студент 2 курсу групи ЛТО-20м спеціальності 152 – Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка освітньої програми «Лазерна техніка та оптоінформатика»

Д. В. Стригун Стригун Д. В.

Керівник: к.т.н., доц. каф. ЛОТ

С. С. Тужанський Тужанський С.С.  
« 7 » з грудня 2021 р.

Опонент: д.т.н., проф. каф. МПА

П. І. Кулаков Кулаков П.І.  
« 16 » 12 2021 р.

**Допущено до захисту**


Завідувач кафедри ЛОТ

Н. І. Заболотна д.т.н., доц. Заболотна Н.І.  
(прізвище та ініціали)

« 11 » 12 2021 р.

Вінниця ВНТУ – 2021 рік

Вінницький національний технічний університет  
 Факультет комп'ютерних систем і автоматики  
 Кафедра лазерної та оптикоелектронної техніки  
 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 ЛОТ  
 д.т.н., доц. Заболотна Н.І.  
  
 «24» \_\_\_\_\_ 29 2021 р.

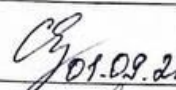
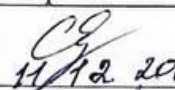
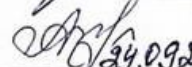

### ЗАВДАННЯ НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Стригуну Дмитру Володимировичу

1. Тема роботи: Засіб вимірювального контролю товщини покриття оптичних елементів.  
 Керівник роботи Тужанський Станіслав Євгенович, к.т.н., доцент каф. ЛОТ, затверджені наказом ВНТУ від «24» вересня 2021 року № 277.
2. Строк подання студентом роботи: 06.12.2021 р.
3. Вихідні дані до роботи:  
 Метод контролю товщини покриття – автоматизований вимірювальний контроль, метод світлових перетинів із оптимізацією вибору спектрального складу випромінювача, склад засобу контролю: освітлювач – набір світловипромінювальних діодів різних довжин хвиль (5 шт.), оптична система – інструментальний мікроскоп, приймальний блок – матрична CCD камера 1024×768 пікс, система контролю та відображення інформації – одноплатний комп'ютер з LCD дисплеєм, механічна конструкція – координатний стіл із моторизованим приводом. Діапазон вимірювань товщини покриття 0,04 – 500 мкм, точність – 0,04 мкм.
4. Зміст текстової частини : Аналіз та класифікація сучасних методів і засобів неруйнівного контролю якості поверхонь світлотехнічних матеріалів; розробка методу автоматизованого контролю товщини покриття оптичних та слабопрозорих матеріалів; обґрунтування елементної бази, розрахунок та проектування електричних та оптичних схем засобу вимірювального контролю товщини покриття оптичних елементів; розробка та аналіз роботи схем засобу; економічна частина; висновки по роботі.
5. Перелік ілюстративного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): узагальнена структурна схема автоматизованого засобу контролю (Е1); структурна оптична схема засобу (Л1); електрична функціональна схема

засобу (E1); блок-схема методу вимірювального контролю (E1); оптична схема об'єктива (Л1)

#### 6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
1-3	Тужанський С.Є., к.т.н., доц. каф. ЛОТ	 01.09.21	 11.12.2021
4	Адлер О. О. к.е.н., доц. каф. ЕПВМ	 24.09.21	 01.12.2021

7. Дата видачі завдання «13» вересня 2021 р

#### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Аналіз та класифікація методів і засобів неруйнівного контролю якості поверхонь світлотехнічних матеріалів	15.09.2021- 07.10.2021	ВИК
2	Розробка методу автоматизованого контролю товщини покриття оптичних та слабопрозорих матеріалів	08.10.2021- 25.10.2021	ВИК
3	Обґрунтування елементної бази, розрахунок та проектування електричних та оптичних схем. Розробка та аналіз роботи схем засобу	26.10.2021- 15.11.2021	ВИК
4	Економічна частина	16.11.2021- 03.12.2021	ВИК

Студент  Стригун Д. В.  
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи  Тужанський С. Є.  
(підпис) (прізвище та ініціали)

## АНОТАЦІЯ

УДК 53.08, 535.16

Стригун Д. В. Засіб вимірювального контролю товщини покриття оптичних елементів. Магістерська кваліфікаційна робота зі спеціальності 152 – метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка, освітня програма – лазерна техніка та оптоінформатика. Вінниця: ВНТУ, 2021. 102 с.

На укр. мові. Бібліогр.: 50 назв; рис.: 23; табл. 12.

В магістерській кваліфікаційній роботі проведено проектування автоматизованого засобу вимірювального контролю товщини покриття оптичних та слабопрозорих матеріалів. Здійснено аналіз та класифікацію сучасних методів і оптичних засобів вимірювального контролю якості покриття матеріалів. Удосконалено метод світлового перетину для контролю товщини покриття оптичних та слабопрозорих матеріалів. Розроблено електричні та оптичні схеми засобу. Проведено розрахунок і проектування оптичних елементів засобу.

Графічна частина складається з 6 плакатів із результатами дослідження.

Ключові слова: вимірювальний контроль, товщина покриття, метод світлового перетину, оптичні матеріали.

## ABSTRACT

Strygun D.V. Digital FM radio with mp3 player. Master's thesis in specialty 152 – metrology and information measurement engineering. Educational program - laser technology and optoinformatics. Vinnitsya: VNTU, 2021. – 102 p.

In Ukrainian language. Bibliographer: 50 titles; fig.: 23; tabl. 12.

In the master's qualification work the design of the automated means of measuring control of thickness of a covering of optical and weakly transparent materials is carried out. The analysis and classification of modern methods and optical means of measuring quality control of coating materials is carried out. The method of light section for controlling the thickness of the coating of optical and opaque materials has been improved. Electrical and optical circuits of the tool have been developed. Calculation and design of optical elements of the tool is done.

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

Keywords: measuring control, coating thickness, light section method, optical materials.

## ЗМІСТ

<b>ВСТУП</b> .....	7
<b>1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ КОНТРОЛЮ ТОВЩИНИ ПОКРИТТЯ</b> .....	11
1.1 Аналіз сучасних методів контролю покриттів.....	11
1.2 Аналіз сучасних засобів контролю товщини покриття .....	19
1.3 Висновки до розділу 1.....	30
<b>2 МЕТОД І ЗАСІБ АВТОМАТИЗОВАНОГО ОПТИЧНОГО КОНТРОЛЮ ТОВЩИНИ І ЯКОСТІ ПОКРИТТЯ</b> .....	31
2.1 Розробка методу оптичного контролю товщини і якості покриття.....	31
2.1.1 Обґрунтування вибору оптичного методу контролю.....	31
2.1.2 Удосконалення методу світлового перетину для автоматизованого контролю товщини покриття.....	37
2.2 Розробка структурної схеми автоматизованого засобу вимірювального контролю .....	40
2.3 Висновки до розділу.....	45
<b>3 РОЗРОБКА ТА АНАЛІЗ РОБОТИ СХЕМ ЗАСОБУ КОНТРОЛЮ</b> .....	46
3.1 Реалізація структурних компонентів та обґрунтування вибору елементної бази засобу .....	46
3.2 Розробка функціональної електричної схеми засобу контролю .....	57
3.3 Розробка, аналіз та моделювання оптичної схеми засобу.....	62
3.4 Висновки до розділу 3 .....	71
<b>4 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА</b> .....	72
4.1 Проведення наукового аудиту науково-дослідної роботи .....	72
4.2 Проведення комерційного та технологічного аудиту засобу вимірювального контролю товщини покриття оптичних елементів.....	72
4.3 Розрахунок витрат на здійснення науково-дослідної роботи.....	74
4.4 Розрахунок економічної ефективності науково-технічної розробки та її можливої комерціалізації .....	80

4.5 Висновки до розділу 4.....	6 84
<b>ВИСНОВКИ.....</b>	<b>85</b>
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....</b>	<b>86</b>
<b>ДОДАТКИ.....</b>	<b>91</b>
Додаток А Схема структурна засобу вимірювального контролю товщини покриття оптичних елементів (обов'язковий).....	92
Додаток Схема методу світлового перетину для вимірювального контролю товщини покриття (обов'язковий).....	93
Додаток В Функціональна електрична схема засобу вимірювального контролю (обов'язковий).....	94
Додаток Г Оптична схема засобу вимірювального контролю (обов'язковий).....	95
Додаток Д Оптична схема проєкційного об'єктива (OSLO EDU) (ілюстративний).....	96
Додаток Е Оптична схема об'єктива фотокамери (ілюстративний).....	97
Додаток Є Протокол перевірки навчальної (кваліфікаційної) роботи (обов'язковий).....	98

## ВСТУП

Поверхневий шар, який наноситься на зразок деталі чи виробу різними технологічними методами, називають покриттям. Зміна умов експлуатації, вплив високих і низьких температур, навантажень, різних агресивних речовин, висувають високі вимоги до якості покриттів деталей. Таким чином, експлуатаційні характеристики багатьох сучасних виробів (зносостійкість, корозійна стійкість, відбивна здатність, теплоопір та інші) визначаються властивостями відповідної поверхні. Діапазон матеріалів і технологій формування покриття для різноманітних деталей і виробів, зокрема електронної та оптичної техніки є доволі великим.

Значною мірою надання поверхні необхідних якостей досягають за допомогою нанесення на поверхню зразка тонких металевих або діелектричних плівок, характеристики яких можуть суттєво відрізнитись. Обираючи матеріал покриття, умови його нанесення та поєднання, поверхням виробів надають різноманітний колір, фактуру, потрібні фізико-механічні та хімічні властивості [1], [2].

При формуванні покриттів встановлюються вимоги до їх товщини, пористості і міцності зчеплення з основним матеріалом, зовнішнього вигляду та інших спеціальних властивостей. Значиму роль у забезпеченні потрібних експлуатаційних характеристик грає товщина та цілісність захисного покриття [3]. Ці параметри визначають довговічність виробів. Відповідно до цього виникають завдання контролю цих показників як у процесі нанесення покриттів та вихідному контролі на виробництві, так і під час експлуатації виробів.

Ефективність використання покриття матеріалів оцінюється як комплекс функціональних властивостей за час експлуатації. Відповідно встановлюються вимоги до товщини покриття, міцності зчеплення, пористості, захисних та оптичних властивостей. При цьому товщина покриття розглядається як визначальний функціональний параметр [4].

Для контролю товщини покриттів застосовують руйнівні і неруйнівні методи [3], [4]. Руйнівні методи є універсальними, оскільки дозволяють



контролювати товщину покриттів, виготовлених з різних матеріалів, при різних матеріалах основи. Однак вони можуть призвести до пошкодження покриття, отже застосовується доволі рідко.

При неруйнівному контролі параметри оцінюються без погіршення якості зразка, такі методи надають можливість вести суцільний контроль. У зв'язку з цим використання неруйнівного контролю останнім часом набуло важливого значення, зокрема при виробництві та експлуатації дорогих і наукомістких об'єктів. Очевидно, що недостатність контролю або його недостовірність можуть призводити до значних економічних втрат [5].

Неруйнівний контроль товщини покриттів, що використовуються в промисловості, представляє певні труднощі, пов'язані як з фізичними властивостями матеріалів в різних комбінаціях «покриття - підкладка», так і з їх товщиною. Вирішення цих проблем стимулює розробку та впровадження нових, а також вдосконалення існуючих методів і засобів контролю [5], [6]. Найчастіше для неруйнівного контролю товщини покриттів застосовуються магнітний, акустичний, вихрострумний, радіаційний, термоелектричний, оптичний, електричний, тепловий та радіохвильовий методи [3].

Інтенсивний розвиток оптичних технологій стимулює інтерес до створення більш досконалих неруйнівних засобів і методів контролю покриття деталей та елементів. Оптичні методи визначення товщини покриття є наочними, високочутливими і доволі точними при контролі параметрів оптично прозорих деталей, однак є недосконалими при дослідженні слабопрозорих матеріалів.

Таким чином, розробка й вдосконалення методів, алгоритмів та технічних засобів оптичного вимірювального контролю товщини покриття одночасно прозорих і слабопрозорих елементів на базі сучасних оптико-електронних технологій є **актуальною** науково-технічною задачею, вирішення якої дозволить розширити функціональні можливості вимірювального контролю порівняно із традиційними методами.

**Метою** магістерської кваліфікаційної роботи є розширення функціональних можливостей засобу засобу вимірювального контролю товщини покриття оптичних та слабопрозорих матеріалів, зокрема для елементів світлотехніки.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі задачі:

1. Провести порівняльний аналіз та здійснити класифікацію методів контролю товщини покриття матеріалів, проаналізувати оптичні засоби вимірювання товщини покриття матеріалів фотоніки і світлотехніки;

2. Удосконалити метод світлового перетину для вимірювання товщини покриття оптичних і слабопрозорих матеріалів;

3. Розробити і проаналізувати структурну схему засобу автоматичного контролю товщини покриття оптичних елементів, електричні схеми компонентів і вузлів;

4. Розрахувати функціональні характеристики компонентів схем та обґрунтувати вибір елементної бази засобу вимірювального контролю на основі запропонованого методу;

5. Розрахувати і спроектувати схему оптичних модулів і компонентів запропонованого засобу;

6. Розрахувати економічну доцільність та інші економічні показники розробки.

**Об'єкт дослідження:** процеси вимірювання геометричних розмірів світних ліній на поверхні оптичних та слабопрозорих матеріалів.

**Предмет дослідження:** методи і засоби оптичного вимірювального контролю параметрів покриття оптичних елементів.

**Методи дослідження.** У процесі дослідження застосовувалися теорії: прикладної оптики; оптичних вимірювань; оптоелектронної схемотехніки; проектування оптичних та електронних засобів.

**Наукова новизна:** Подальшого розвитку отримав метод автоматизованого вимірювального контролю товщини покриття оптичних елементів на основі світлового перетину, в якому на відміну від існуючих використовується зондування на різних довжинах хвилі для визначення

найкращих умов вимірювального контролю товщини покриття та виявлення дефектів поверхонь, що дозволило розширити функціональні можливості методу для дослідження слабопрозорих матеріалів та підвищити інформативність вимірювань.

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

- Розроблено функціональну схему засобу вимірювального контролю товщини покриття оптичних елементів, електричні та оптичні схеми основних функціональних вузлів, що враховують спектральні особливості покриття в процесі контролю;

- Здійснено комп'ютерне моделювання елементів оптичного блоку засобу контролю.

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

**Публікації:** за матеріалами МКР опубліковано 1 тези у матеріалах І Науково-технічної конференції факультету комп'ютерних систем і автоматики ВНТУ.

# 1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ КОНТРОЛЮ ТОВЩИНИ ПОКРИТТЯ

## 1.1 Аналіз сучасних методів контролю покриттів

Різноманітність складів матеріалу основи і технології нанесення покриттів деталей призвела до розробки та використання на практиці різних методів неруйнівного контролю товщини покриттів, які визначаються складом основного матеріалу і покриття, видом додаткової обробки основи і т.п. Відповідно до цього, можливості та ефективність існуючих методів не є однаковими. Області застосування кожного методу обмежуються фізичними властивостями матеріалу основи та покриття, діапазоном контрольованої товщини, складністю і громіздкістю відповідної апаратури. Отже, успіх впровадження неруйнівних методів контролю товщини покриттів може бути забезпечений лише за умови правильного вибору методів і засобів вимірювань для кожного конкретного завдання.

Узагальнену класифікацію безконтактних методів неруйнівного контролю покриття деталей і виробів наведено на рисунку 1.1.



Рисунок 1.1 – Класифікація методів неруйнівного контролю покриття деталей і виробів

Серед неруйнівних методів контролю товщини покриттів сьогодні найбільше поширення отримали магнітний, вихрострумний, радіаційний, акустичний, електричний, термоелектричний, оптичний, тепловий та радіохвильовий.

Серед різноманітних методів контролю та вимірювання товщини покриттів окремо слід відзначити методи, засновані на використанні електромагнітних коливань оптичного діапазону. Вони засновані на реєстрації параметрів оптичного випромінювання, що взаємодіє з покриттям і матеріалом основи. Оптичні методи мають високу роздільну здатність, наочність та чутливість. Вони дозволяють автоматизувати обробку одержуваних зображень [4], [8], [9]. Проте оптичні методи в основному застосовують для контролю товщини прозорих, а також тонких і надтонких покриттів. З іншого боку, вони можуть бути використанні для матеріалів з різними фізичними властивостями, що утворюють пару покриття-основа – електропровідних, діелектричних, феромагнітних та немагнітних. Крім того, оптичні методи дозволяють проводити контроль товщини покриттів одночасно на великих поверхнях складної форми. З врахуванням викладеного вище задача розширення функціональних можливостей засобу для контролю параметрів покриттів за допомогою оптичних методів є актуальним технічним завданням.

Магнітні методи засновані на аналізі взаємодії магнітного поля з контрольованим об'єктом. Завдяки своїй простоті вони отримали широке застосування на практиці для контролю товщини немагнітних провідних і діелектричних покриттів на виробках з феромагнітних сплавів у діапазоні товщини від 0 до 50 мкм і феромагнітних покриттів в діапазоні товщини від 0 до 30 мкм. При контролі багат шарових покриттів магнітні методи дозволяють визначати суму товщини шарів [6]. Серед магнітних методів найбільш часто застосовуються: магнітоіндукційний, магнітостатичний та пондеромоторний.

Магнітоіндукційний метод заснований на визначенні змін магнітного опору ділянки магнітного кола: первинний перетворювач - феромагнітна контрольована деталь, які залежать від товщини покриття, за ЕРС, що

наводиться у вимірювальній котушці первинного перетворювача, первинна котушка якого живиться струмом низької частоти [10], [11].

При магнітостатичному методі товщина покриття вимірюється за допомогою магніточутливих елементів: датчики Холла та магніторезистори. Магнітне поле створюється за допомогою постійних магнітів або електромагнітів, що живляться постійним струмом. Датчики поміщаються в розрив магнітного ланцюга і вимірюють зміну індукції магнітного поля, обумовлену зміною товщини покриття [11].

Магнітний пондеромоторний метод заснований на вимірюванні сили відриву постійного магніту від поверхні діелектричного покриття, нанесеного на феромагнітну основу. Сила відриву, яка залежить від товщини покриття, визначається за розтягненням пружини, якою тягнуть за магніт [4], [11].

До недоліків магнітних методів слід віднести залежність результатів контролю від електромагнітних і феромагнітних характеристик матеріалу основи, можливість застосування лише для діелектричних покриттів, низьку чутливість при контролі великої товщини покриттів, а для пондеромоторного методу – ще й низьку чутливість і залежність результатів контролю від форми магніту і поверхні виробу.

Електромагнітні методи засновані на взаємодії електромагнітного поля, створюваного котушкою індуктивності первинного перетворювача, з електромагнітним полем вихрових струмів, що наводяться в електропровідному матеріалі плівки або основи. Вони дозволяють контролювати товщину одношарових покриттів при різних поєднаннях матеріалів покриття і основи, за винятком випадку діелектричних покриттів на виробих з діелектриків [1].

Електромагнітні методи ефективно застосовують для контролю тонких електропровідних покриттів на виробих з діелектриків і діелектричних покриттів - на виробих з немагнітних сплавів. У даний час розроблено багато різних типів електромагнітних товщиномірів, призначених для контролю товщини анодних, лакофарбових, пластмасових та інших діелектричних покриттів на виробих з немагнітних сплавів в діапазоні товщини від 0 до 50

мкм, електропровідних покриттів на виробах з діелектриків в діапазоні товщини від 0 до 5 мкм і тонких струмопровідних покриттів на виробах з феромагнітних і немагнітних сплавів в діапазоні товщини від 0 до 100 мкм [4].

Радіаційні методи засновані на вимірі параметрів іонізуючого випромінювання, що виникає в результаті взаємодії первинного іонізуючого випромінювання з контрольованим матеріалом. Ці методи можна віднести до числа найбільш універсальних методів контролю товщини тонких покриттів. Вони дозволяють проводити контроль практично при будь-яких поєднаннях матеріалів покриття і основи. Найбільш ефективним є застосування радіаційних методів при контролі товщини покриттів в діапазоні від 0 до 100 мкм, особливо покриттів з дорогоцінних металів на дрібних виробах [3], [12], [13].

Перевагами радіаційних методів є дистанційність, зручність застосування в автоматизованих системах контролю. Головний недолік –небезпека для персоналу.

Електричні методи засновані на реєстрації електростатичних полів і електричних параметрів контрольованих виробів. Вони можуть бути використані для контролю товщини одношарових електропровідних і непровідних покриттів на виробах з провідників і діелектриків при наявності різниці в провідності, діелектричної проникності або будь-яких інших електричних властивостей матеріалів покриття та основи [6], [14].

Найпоширенішим з електричних методів є ємнісний метод [14], [15], заснований на взаємодії електричного поля між електродом і електропровідною основою при наявності неелектропровідного покриття між ними. Фізичної інформативною величиною є ємність отриманого конденсатора, зі значення якої визначається товщина покриття, якщо відома його діелектрична проникність.

До переваг ємнісного методу слід віднести відносну простоту реалізації при контролі плоских виробів. Основними недоліками є залежність результатів контролю від шорсткості поверхні, малий діапазон контрольованих товщин, складності контролю при наявності кривизни поверхні.

Акустичні (ультразвукові) методи засновані на взаємодії ультразвукових коливань з межами розділу матеріалів з різними акустичними властивостями. Вони використовуються у тих випадках, коли матеріали покриття і основи суттєво відрізняються за величиною акустичного опору або ступеня поглинання звуку. Можуть застосовуватися як імпульсні, так і безперервні ультразвукові коливання, поздовжні, зсувні, а поверхневі хвилі [6], [16].

Перевагами акустичних методів є їх безпечність та широкий діапазон вимірювань товщини покриттів. Основний недолік - складна інтерпретація результатів контролю, що обумовлено складною картиною результуючого акустичного поля.

Теплові методи контролю засновані на вимірі теплопровідності покриття в залежності від його товщини і фізико-хімічних характеристик. Вони використовуються у тих випадках, коли теплопровідність, теплоємність або інші теплотехнічні властивості матеріалів покриття і основи суттєво відрізняються. При однакових властивостях матеріалу покриття та умов контролю, чим більше товщина покриття, тим більше час падіння температури на контрольованій ділянці, що нагрівається спеціальним пристроєм. При контролі аналізується поширення теплових полів у покритті за допомогою, пірометри, тепловізори та інша апаратура загального призначення [3], [6], [17].

Перевагами теплових методів є можливість безконтактного контролю товщини покриття в широкому діапазоні товщин від кількох мкм до 1 мм. Основні недоліки – є тривалість кожного циклу контролю і застосовність тільки до матеріалів покриття, що витримує нагрівання.

Оптичні методи контролю засновані на взаємодії світлового випромінювання з покриттям і основою. Вони призначені головним чином для контролю товщини прозорих, а також тонких і надтонких покриттів (за допомогою інтерференційних і еліпсометричних пристроїв). При цьому інтерференційні методи можуть бути використані для контролю товщини покриттів в діапазоні від часток мікрметрів до декількох десятків мікрметрів, а еліпсометричні методи від тисячних часток мікрметра до декількох



мікрометрів [3], [6].

Оптичний інтерференційний метод заснований на тому, що при проходженні випромінювання крізь тонку плівку в ній відбувається інтерференція, викликана багаторазовим відбиванням від поверхонь плівки на межах розділу тришарової системи «повітря - плівка - підкладка». Інтенсивність відбитого випромінювання визначається різницею фаз хвиль, що відбиваються від нижньої та верхньої меж розділу. Ця різниця для заданої довжини хвилі залежить від товщини плівки та її показника заломлення. Таким чином, спектр відбитого випромінювання несе інформацію про зазначені параметри плівки [18], [19]. Метод передбачає проведення багатоспектральних вимірювань: або освітлення поверхні з плівкою в широкому спектральному діапазоні і формування спектральної залежності коефіцієнта відбиття спектроаналізатором, або використання джерела, довжиною хвилі випромінювання якого може перебудовуватися в широкому спектральному діапазоні [19].

Еліпсометричний метод заснований на тому, що лінійно поляризоване світло після відбивання від досліджуваного зразка змінює свою поляризацію на еліптичну. При еліпсометричних вимірюваннях аналізують зміни параметрів, що описують поляризацію світла, яке відбилося або пройшло через досліджуваний об'єкт. Зокрема, при відбиванні аналізується відношення комплексних коефіцієнтів відбиття для двох типів поляризації світлової хвилі: в площині падіння і перпендикулярно до неї. Це відношення, яке залежить від оптичних властивостей досліджуваної структури, а також від кута падіння світла і довжини хвилі, прийнято виражати через, так звані, еліпсометричні параметри [20].

Тонке покриття чинить додатковий вплив на еліпсометричні параметри через інтерференцію променів, відбитих на межі навколишнє середовище – покриття та покриття - основа. При цьому зміни еліпсометричних параметрів залежать від товщини та показника заломлення покриття [20], [21]. На відміну від фотометричних вимірювань, до яких належить інтерференційний метод,

еліпсометричні є більш інформативними, оскільки одночасно вимірюються відразу дві величини: амплітуда та фаза.

Перевагами оптичних методів є висока роздільна здатність і чутливість, можливість проведення безконтактного контролю, застосовність практично для будь-яких матеріалів. Крім того, вони дозволяють порівняно просто автоматизувати процес контролю. Основними недоліками оптичних методів є залежність результатів контролю від правильного вибору геометричних, спектральних, світлотехнічних і часових характеристик, а також можливість їх застосування лише для покриттів, які за своєю товщиною або властивостями матеріалу є оптично прозорими у використовуваному спектральному діапазоні.

Разом з тим використання світлових мікроскопів не дозволяє отримувати збільшення, яке необхідне для ретельного спостереження за будовою поверхневого шару матеріалу або нанесеного покриття. Як правило, якісних оптичних мікроскопах проблематично зафіксувати зображення зі збільшенням вище  $1000^{\times}$ . Цього буває недостатньо для аналізу тонких нанопокриттів, плівок, будови монокристалів. Використання електронно-променевих мікроскопів дозволяє розширити можливості світлових технік, а також разом із зображенням обраної ділянки визначити хімічний склад матеріалу у різних точках поверхні.

До сучасних методів дослідження складу та будови тонких плівок на твердих поверхнях відноситься Раманівська спектроскопія, яка є ефективним, експресним, неруйнуючим та багатоінформативним методом діагностики матеріалів, оксидних плівок та інших вторинних структур, які виникають під час тертя. Це стосується і вуглецевих матеріалів, таких як графіт, фулерени, вуглецеві нанотрубки, карбін, алмаз, графен та ін. Для кожного з вищеназваних матеріалів в раманівських спектрах проявляються характерні смуги, причому їхня форма, частота та інтенсивність дозволяють їх кількісно характеризувати [10].

При вирощуванні вуглецевих наноструктур використання для їх діагностики раманівської спектроскопії дозволяє контролювати формування

тієї чи іншої модифікації чи їх суміші та визначати вплив технологічних параметрів на їх властивості. В процесі синтезу вуглецевих структур раманівська діагностика важлива для оцінки їх якості та визначення типу наявних дефектів.

Важливе значення та можливості дає використання раманівської спектроскопії на різних етапах відпрацювання технології при вирощуванні графену та надтонких графенових шарів ( $\leq 10$ ), а також в процесі його виробництва. Для цього використовують є раманівський спектрометр та цілий ряд лазерів ( з наступними довжинами хвиль: гелій-кадмієвий з  $\lambda=442$  нм, гелій-неоновий з  $\lambda=633$  нм та твердотільні з  $\lambda=457, 532$  та  $671$  нм) для збудження раманівських спектрів. Важливим для діагностики матеріалів мати також ультрафіолетовий лазер з довжиною хвилі  $355$  нм. По-перше, велика енергія квантів лазерного випромінювання дозволяє збуджувати спектри випромінювання у широкозонних матеріалах, по-друге, у непрозорих матеріалах, глибина проникнення ультрафіолетового випромінювання досить мала, що дозволяє діагностувати тільки їхній приповерхневий шар. Що стосується вуглецевих матеріалів, то тільки використання ультрафіолетового випромінювання для збудження раманівських спектрів дозволяє зареєструвати в них  $sp^3$  фазу. Як відомо, в графена наявні тільки  $sp^2$  зв'язки, а в багат шарових структурах наявні як  $sp^2$ , так і  $sp^3$  зв'язки.

Як видно з проведеного аналізу з найбільш поширених методів контролю товщини покриттів лише радіаційні, теплові та оптичні методи надають змогу проводити контроль дистанційно та можуть бути застосовані для різних за своїми електричними та магнітними властивостями матеріалів, що утворюють пару покриття-основа. Оптичні методи за порівнянням з радіаційними є більш безпечними, а за порівнянням з тепловими – більш швидкодіючими. Проте вони можуть бути використані для контролю товщини або прозорих, або надтонких непрозорих покриттів.

Враховуючи такі переваги оптичних методів як висока точність, можливість застосування для як для електропровідних, так і для діелектричних

матеріалів, висока придатність для автоматизації процесу контролю, у тому числі, безконтактного, актуальним завданням стає пошук підходів, які б дозволили розширити можливість застосування оптичних методів для контролю параметрів покриттів з непрозорих матеріалів.

## **1.2 Аналіз сучасних засобів контролю товщини покриття**

Одним з сучасних перспективних засобів контролю покриття є цифровий вимірювач товщини покриттів PCE-CT 26FN (PCE, Німеччина), призначений для вимірювання немагнітних покриттів (лак, фарба, цинк, хром, мідь, емаль, папір, скло, пластмаса та ін.) на кольорових і чорних металах. Вимірювач товщини PCE-CT 26FN працює на основі магнітно-індуктивного методу, відповідно до якого шар покриття різної товщини індукує електромагнітне поле з різною магнітною індукцією. Вимірювач має ергономічну форму, великий РК дисплей з підсвічуванням для роботи в погано освітлених місцях. Дисплей також має функцію повороту зображення на 180° для зручного зчитування результатів вимірів. Прилад оснащений математичними функціями відображення максимального, мінімального і середнього значень результатів вимірювань.

Перевагами пристрою PCE-CT 26FN є простота експлуатації, малі габарити та вага, зручний ергономічний корпус. Проте, він дозволяє контролювати товщину покриттів лише на електропровідній основі, а на точність вимірювання можуть впливати зовнішні електромагнітні поля.

Основні технічні показники вимірювача PCE-CT 26FN наведені у таблиці 1.1 [22].

Таблиця 1.1 – Основні технічні параметри PCE-CT 26FN [22]

Найменування параметра	Одиниця виміру	Значення
Діапазон вимірювання	мкм	0...1250
Точність вимірювання	%	3
Крок вимірювання	мкм	1
Час вимірювання	с	1
Мінімальний радіус кривизни поверхні	мм	50
Мінімальна площа вимірювання	мм	5 × 5
Мінімальна товщина основи	мм	0,5
Дісплей		3.5" LCD
Тип приладу		портативний
Вартість	грн	14 000

Ще одним засобом контролю покриттів є ультразвуковий вимірювач PosiTector 200 (DeFelsco, США), призначений для вимірювання товщини різних покриттів на немагнітній основі (кольорові метали, дерево, бетон, пластмаса, композити та інші). Принцип дії вимірювача PosiTector заснований на ультразвуковому методі, в процесі якого ультразвукова хвиля від перетворювача, проникає в покриття через контактну рідину і відбивається від будь-якої поверхні, матеріал якої відрізняється від щільності покриття. Вимірювання часу проходження хвилі від перетворювача до межі покриття-основа та у зворотньому напрямку перераховується електронним блоком у показники товщини покриття.

Вимірювач товщини покриттів PosiTector 200 має дві модифікації, що передбачають підключення датчиків трьох типів. Стандартна модифікація вимірює сумарну товщину всіх покриттів. Покращена може вимірювати сумарну товщину і товщину окремих шарів у багатошаровому покритті (до трьох шарів), відображати показання в графічній формі та може зберігати в пам'яті більшу кількість вимірювань. Три типи датчиків дозволяють проводити

вимірювання у трьох різних діапазонах: від 13 до 965 мкм, від 50 до 3800 мкм та від 500 до 7600 мкм, відповідно. Серед інших технічних особливостей вимірювача товщини PosiTector 200 можна виділити такі [23]:

- розрахунок середнього, середньоквадратичного відхилення, мінімальної та максимальної товщини, кількості показань вимірювань;
- USB порт для завантаження отриманих даних в ПК для детального аналізу і складання аналітичних звітів;
- налаштування за відомою товщиною покриття (за зразком);
- можливість роботи в режимі сканування (до 40 значень/хв);
- вбудований ІЧ-порт для друку.

Основні технічні характеристики вимірювача PosiTector 200 наведені у таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 – Основні технічні характеристики засобу PosiTector 200

Найменування параметра	Одиниця виміру	Значення
Діапазон вимірювань (залежно від датчика)	мкм	13 ... 965 50 ... 3800 500 ... 7600
Похибка вимірювання відповідно до діапазону вимірювання	мкм	±2 ±2 ±20
Тип приладу		портативний
Орієнтовна вартість	грн	68 550

Перевагами пристрою PosiTector 200 є можливість вимірювати товщину різноманітних покриттів у широкому діапазоні. Проте, він дозволяє контролювати товщину покриттів лише на немагнітних основах та вимагає використання контактної рідини.

Альтернативним наведеним вище пристроям є оптичні, зокрема інфрачервоний вимірювач товщини RM 320 FSIR (США), призначений для вимірювання тонких і надтонких покриттів смугового металу з використанням повноспектрального аналізу ближньої ІЧ-області спектра. Вимірювач товщини

функціонально є сканувальним спектрометром, який встановлюють у виробничу лінію для одночасного визначення спектральних параметрів усієї ближньої ІЧ-області спектра [24].

Принцип дії вимірювача товщини RM 320 FSIR заснований на аналізі поглинання інфрачервоного випромінювання вуглеводневими сполуками у складі матеріалу покриття. За цим поглинанням визначається маса матеріалу покриття, з якої розраховується його товщина. Вимірювач товщини з унікальною технологією вимірювання аналізує увесь спектр, а не обрані діапазони довжини хвилі, як це прийнято у звичайних інфрачервоних вимірювачах товщини. Аналіз усього спектра в поєднанні з розширеним ІЧ-діапазоном дозволяє більш точно вимірювати товщину покриття під час виробничого процесу.

Засіб RM 320 FSIR відстежує поглинання оптичного випромінювання з довжиною хвилі від 1,35 до 3,4 мікрон. Завдяки одночасному аналізу хвиль різної довжини вимірювач товщини може розпізнавати різні компоненти, а також виділяти компоненти, що володіють подібними, але не ідентичними параметрами поглинання ІЧ-випромінювання.

Основні характеристики вимірювача товщини RM 320 FSIR наведені у таблиці 1.3 [24].

Таблиця 1.3 – Основні технічні характеристики вимірювача RM 320 FSIR

Найменування параметра	Одиниця виміру	Значення
Діапазон вимірювання	нм	0,1...30
Точність вимірювання	%	5
Ширина полоси матеріалу для вимірювання товщини покриття	м	до 2,5
Спосіб вимірювання		безперервний, автоматичний
Орієнтовна вартість	грн	480 000

Розподілена обробка даних блоку вимірювача товщини RM 320 FSIR дозволяє швидко вимірювати весь спектр, при цьому процес вимірювання не чутливий до змін параметрів покриття у різних ділянках. Перевагами вимірювача товщини RM 320 FSIR є можливість проведення безперервного автоматичного контролю товщини покриття. Головними недоліками – необхідність наявності точних початкових даних про хімічний склад покриття та його фізичні властивості та дуже висока вартість.

Найбільш близьким для виконання поставленої задачі засобом є вимірювач товщини SE 400adv (Німеччина), що працює за методом лазерної (сканувальної) еліпсометрії та дозволяє проводити високоточне вимірювання товщини і оптичних характеристик плівкових структур (коефіцієнт заломлення, показник поглинання) на різних типах поверхонь. Основною сферою застосування засобу SE 400adv є вимірювання товщини і коефіцієнта заломлення одиничних шарів або двошарових плівок у виробництві або лабораторії. Особливостями вимірювача SE 400adv є висока стабільність, точність та швидкість вимірювань.

Основні технічні характеристики вимірювача товщини SE 400adv наведені у таблиці 1.4 [25].

Таблиця 1.4 – Основні технічні характеристики вимірювача SE 400adv

Найменування параметра	Одиниця виміру	Значення
Діапазон вимірювання: для прозорих плівок для слабопоглинальних	нм	100 ... 6000 100 ... 2000
Точність вимірювання	нм	0,01
Час вимірювання	с	від 0,01 до 1
Джерело випромінювання		He-Ne лазер
Довжина хвилі випромінювання	нм	632
Вартість	грн	340 000



Перевагами вимірювача товщини SE 400adv є можливість вимірювати товщину покриттів на будь-якій основі, висока точність та малий час вимірювання.

До основних недоліків вимірювача SE 400adv можна віднести можливість застосування для вимірювання товщини лише прозорих та слабопоглинальних покриттів та високу вартість тощо.

### 1.2.1 Інтерференційні засоби контролю товщини поверхонь

Інтерферометри є одними з найбільш точних вимірювальних приладів, які використовують принцип інтерференції світлових хвиль. Мікроелектроніка, оптика, лазерні технології, телекомунікації, астрономія, точна механіка, вимірювальна техніка не могли б існувати без застосування інтерферометрів. Якість оптичних поверхонь різних елементів визначається відповідними методами контролю. При виготовленні сучасних оптичних систем потрібно контролювати форму поверхонь (пластин, дзеркал і лінз) з точністю до однієї і навіть фракцій нанометрів.

Існує багато типів датчиків хвильового фронту та інтерферометрів, з яких найбільш поширеними є конфігурації Фізо (ІФ) і Тваймана-Гріна (ІТГ). Ідеальний інтерферометр повинен утворювати карту тривимірної оптичної поверхні без дисторсії (похибки), незалежно від типу поверхні (плоска, сферична або асферична). Ідеальна система має бути стійкою до вібрацій, перепадів температури, бути простою у використанні та працювати без збоїв. Для практичного використання інтерферометрів потрібно знати і розуміти їх особливості, сфери застосування та напрямки їх вдосконалення [27].

Зазвичай інтерферометри великого поля будуються за схемою Фізо, яка вимагає мінімального набору оптичних компонентів: джерела випромінювання і приймача, колімації лінзи, еталонної пластини контрольованого об'єкта. Такий інтерферометр використовує загальний хід вимірювальних і еталонних променів світла, тому особливі вимоги до якості компонентів не висуваються.

Діаметр світлового поля, з одного боку, визначає розміри контрольованих деталей, а з іншого – розміри та вартість пристрою. У наш час виробляються інтерферометри з робочим полем від 5 до 150 мм. Найбільш поширеними є пристрої з полем 102 мм.

У якості джерела випромінювання, як правило, використовують одночастотні He-Ne або напівпровідникові лазери. Однією з основних характеристик джерела є довжина когерентності, яка може досягати 100 м. Іноді в інтерферометрах використовуються одночастотні 532/1064-нм лазери. Так, для точного контролю асферичних поверхонь із використанням синтезованих голограм вибір залишається за He-Ne лазером, довжина хвилі якого визначається з високою точністю. В даний час інтерферометри Фізо серійно виробляються багатьма компаніями (Zygo, QED, Mahr, Optophasе). Сучасні пристрої управляються з комп'ютера і дозволяють формувати дво- і тривимірні карти контрольованої оптичної поверхні. Для обробки інтерферограм використовуються алгоритми часового фазового зсуву (ЧФЗ) або спектральний аналіз (СА). Метод ЧФЗ є найбільш точним, але він не застосовується в умовах вібрації, оскільки час вимірювання становить  $\sim 0,3$  секунди. Метод СА використовує одну інтерферограму, тому час вимірювання скорочується до десятків мікросекунд. Головною особливістю методу є реєстрація інтерферограми з багатьма смугами, що призводить до появи помилок, викликаних порушенням принципу загального перебігу променів, а також до необхідності застосування відеокамери високої чіткості без захисного скла. При контролі асферичних поверхонь великої кривизни при нахилі існує аберація типу коми. Ця аберацію необхідно виключити з результатів вимірювань програмно, що не завжди зручно.

Узагальнену оптичну схему ІФ наведено на рис. 1.2. Оптичне випромінювання від джерела (S) за допомогою світлового сепаратора (SD) і колімуючого об'єктива (O1) спрямовується на опорну пластину (EP) і далі до поверхні контрольованого об'єкта (площина P1). Випромінювання, відбите від цієї поверхні та з боку А контрольної пластини (сторона В має клин  $\alpha$ ),

орієнтована об'єктивом  $O1$  в площині діафрагми  $D$  (точка  $S'$ ) і за його межами за допомогою об'єктива  $O2$ , спрямовується на відеокамеру  $VK1$ , розташовану в площині  $P2$ . Одним з ключових елементів ІФ є діафрагма  $D$ , яка служить для блокування паразитного випромінювання, відбитого від елементів схеми, зокрема з боку  $B$  опорної пластини (пунктирна лінія і точка  $S'$ ). Діаметр діафрагми  $d$  визначає просторову роздільну здатність пристрою. Інтерферометр з плоскою еталонною пластинкою (ЕП) дозволяє контролювати поверхню об'єкта лише з невеликим відхиленням від площини (рис. 1.2).

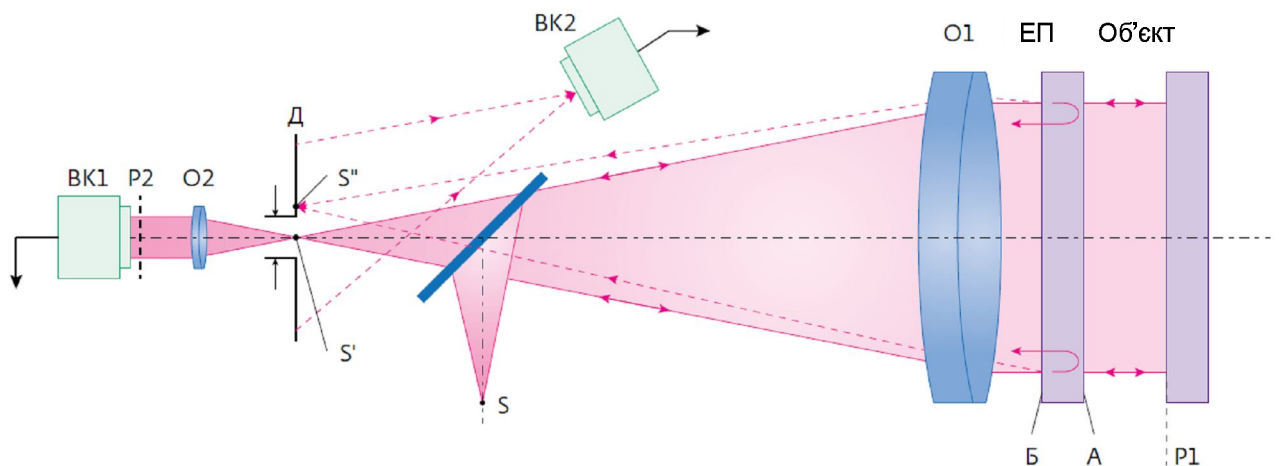


Рисунок 1.2 – Схема інтерферометра Фізо

Для обробки інтерферограм використовується універсальне (Durango, IntelliWave, Reveal і т.д.), а також спеціалізоване програмне забезпечення, інтегроване з пристроєм [31]. Останній варіант дозволяє реалізувати серію вимірювань, виведення фазової карти в режимі реального часу, автоматичне регулювання та усі стандартні функції калібрування та регулювання приладів. Інтерферометр зв'язується з комп'ютером через дротове або бездротове з'єднання за одним з варіантів. У першому випадку блок керування розміщується в комп'ютері на спеціальній карті розширення (PCI, PCI Express), а відеокамери з'єднані окремо на таких інтерфейсах, як USB 3.0. або Camera Link. У другому випадку підключення інтерферометра і керуючого комп'ютера через інтерфейс USB3.0 має ряд переваг: високу швидкість передачі даних і можливість підтримки технології PnP, що спрощує процедуру підключення

пристрою. Однак значними недоліками USB є обмеження довжини кабелю та низька стабільність. У третьому варіанті комунікації, який є найбільш прогресивним, зв'язок інтерферометра з ПК реалізує мережевий інтерфейс Gigabit Ethernet (GigE) специфікації 802.3ab. Він забезпечує необхідну швидкість передачі даних і в той же час позбавлений недоліків, пов'язаних з обмеженням довжини кабелю і стабільністю.

Переваги методу ЧФЗ при обробці вимірювальних зображень добре демонструє приклад інтерферограми і карти поверхні фазової пластини, показані на рис. 1.3.

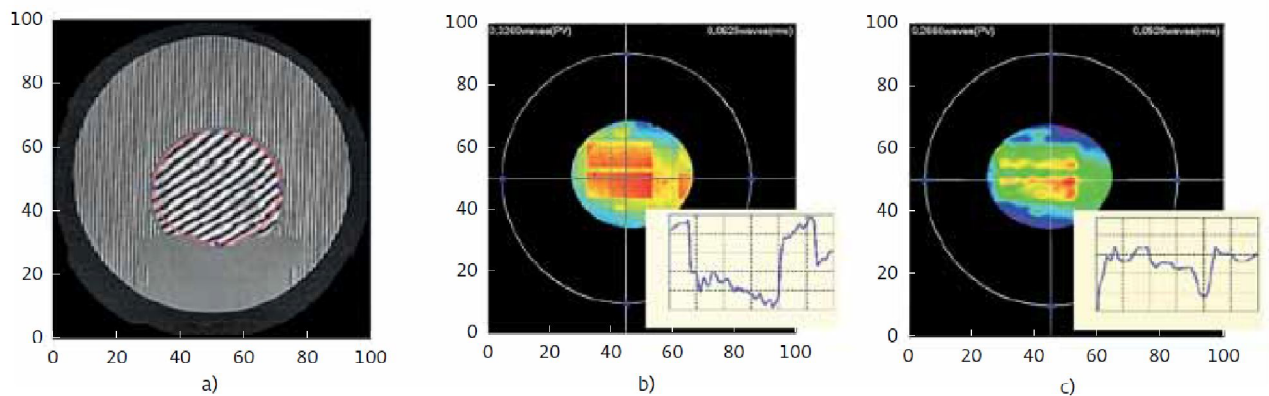


Рисунок 1.3 – Результати контролю оптичних поверхонь : *a)* карта поверхні фазової пластинки 60мм, що отримують *b)* - методом ЧФЗ; *c)* – методом СА (ІФ ФТІ-100, Росія)[30]

Так, метод ЧФЗ відтворює прямокутну форму рельєфу фазової пластини, в той час як метод спектрального аналізу його згладжує, як показано на вбудованих графіках (рис. 1.3, *b*, *c*).

Порівняльний аналіз технічних характеристики лазерних інтерференційних засобів вимірювання і контролю форми і товщини поверхні оптичних елементів наведено у таблиці 1.5.

Таблиця 1.5 – Основні характеристики лазерних інтерферометрів для контролю оптичних поверхонь

Виробник/назва/ параметри	ZYGO Inc., Verifire XPZ	Mahr GmbH MarSurf FI 1100Z	4D Technology FizCam 2000	MOLLERWE DEL OPTICAL GmbH, VI-direct 100	ОПТОПНА SE, SILO 100AV	ЗАО Дифрак- ция, ФТИ- 100PS
Лазер, нм	632,8	632,8	658,0	632,8	632,8	632,8
Роздільна здатність камери	640x480	1000x1000	1000x1000	1600x1200	1000x1000	1312x1082
Похибка	-	1/100 $\lambda$ PV	1/20 $\lambda$ PV	1/20 $\lambda$ PV	1/60 $\lambda$ PV	1/200 $\lambda$ PV
Відновлюваність	1/1800 $\lambda$ rms	1/5000 $\lambda$ rms	1/1000 $\lambda$ rms	1/300 $\lambda$ rms	1/300 $\lambda$ rms	1/1000 $\lambda$ rms
Методи вимірювання	ЧФЗ	ЧФЗ, СА	ОФЗ	СА	СА	ЧФЗ, СА
Орієнтовна ціна, тис. USD	80	72	120	30	40	32

Аналіз інтерференційних засобів контролю поверхонь деталей показує, що не зважаючи на високі технічні характеристики, а також параметри чутливості, точності, відновлюваності та наочності вимірювань такі засоби є дорогі для використання на вітчизняному ринку промисловості оптичних та оптико-механічних деталей і вузлів.

Враховуючи характеристики та параметри розглянутих вище засобів неруйнівного безконтактного контролю якості покриття зразків у відповідності з індивідуальним завданням до роботи, сформулюємо основні технічні показники розроблюваного засобу для контролю покриттів та порівняємо його за цими показниками з аналогами, враховуючи описані вище методи, тип пристрою (автоматичний чи ручний) та інші особливості.

Результати порівняння характеристик розглянутих вище автоматичних та інших сучасних засобів вимірювального контролю товщини і якості покриття зразків і виробів з різних типів матеріалів широкого діапазону вимірювань наведені у таблиці 1.5.

Таблиця 1.5 – Порівняльні характеристики аналогів та нової розробки

Назва і тип пристрою	Діапазон вимірювань	Точність вимірювання	Джерело випромінювання	Довжина хвилі	Орієнтовна вартість, грн
SE 400adv (автоматичний еліпсометр)	прозорі 100 ... 6000 слабопоглинаючі 100 ... 2000 (нм)	0,01 нм	He-Ne лазер	632,8 нм	~350 000
SE 2000-IR Semilab (автоматичний спектральний еліпсометр)	5...50000 нм	5нм	н/д	380-850нм	~700 000
RM 320 FSIR (автоматичний сканувальний спектрометр)	0,1...30 нм	5%	ІЧ лампа	1,5...3,4 мкм	~480 000
PosiTector 200 (ручний УЗ вимірювач)	13 ... 965 50 ... 3800 500 ... 7600 (мкм)	±2 ±2 ±20 (мкм)	УЗ	3 діап.	~69 000
ZYGO Inc., Verifire XPZ (автоматизований інтерферометр)	0,1...500мкм	-	He-Ne лазер	632,8 нм	~1 900 000
Розроблюваний засіб (автоматичний, метод світлового перетину)	0,04-500 мкм	0,04 мкм	Світлодіоди (5 шт.)	380 нм, 420-650 нм, 850 нм, 940нм	>100 000 (проектна)

Можливість контролювати товщину не лише оптично прозорих покриттів зразків з різних матеріалів може суттєво розширити області застосування розроблюваного засобу. Розширення діапазону вимірюваних значень товщини дозволить підвищити інформативність вимірювань (за умови такої ж похибки). Реалізація запропонованого засобу у вигляді, що дозволяє його використання на виробничій дільниці, також дозволить проводити контроль покриття безпосередньо під час виробничого процесу. Для цього зручним може бути використання координатного стола із моторизованим приводом для руху зразка за відповідними координатами у площині. Менша проектна вартість такого засобу може зробити нову розробку більш конкурентною на ринку.

### 1.3 Висновки до розділу 1

У розділі 1 МКР проведено порівняльний аналіз методів і засобів контролю товщини та інших параметрів покриття деталей та областей їх застосування. Здійснено узагальнену класифікацію методів вимірювального контролю і якості покриття з урахуванням особливостей їх роботи. Також у розділі виконано порівняльний аналіз технічних характеристик вимірювачів товщини покриття виробників, представлених на ринку. Проведено порівняльний аналіз оптичних інфрачервоних та інтерференційних вимірювальних засобів, які застосовують для точного контролю поверхонь оптичних елементів і деталей.

Серед неруйнівних методів неруйнівного контролю товщини покриттів, що використовуються в промисловості, найбільш перспективним є безконтактні методи, оскільки вони зручні для застосування в автоматизованих системах. Основними безконтактними методами, які можуть бути використанні для матеріалів з різними фізичними властивостями, що утворюють пару покриття-основа, сьогодні є радіаційні, теплові та оптичні.

Оптичні методи за порівнянням з іншими є безпечними для персоналу, характеризуються меншим часом отримання результату, мають високу роздільну здатність, наочність та чутливість. Проте їх застосування обмежено покриттями, які є оптично прозорими для використовуваного випромінювання. Це вимагає пошуку підходів для можливості застосування удосконалених оптичних методів для контролю товщини не лише прозорих та надтонких покриттів.

Для ефективного аналізу та контролю товщини покриття у засобах рекомендується розробка комп'ютеризованої системи, яка дозволяє проводити аналіз та обробку результатів вимірювань з використанням стандартних прикладних програм.

## **2 МЕТОД І ЗАСІБ АВТОМАТИЗОВАНОГО ОПТИЧНОГО КОНТРОЛЮ ТОВЩИНИ І ЯКОСТІ ПОКРИТТЯ**

### **2.1 Розробка методу оптичного контролю товщини і якості покриття**

#### **2.1.1 Обрунтування вибору оптичного методу контролю**

Основними безконтактними оптичними методами нейрунівного контролю товщини покриттів, як було зазначено у підрозділі 1.2, є інтерференційні і еліпсометричні методи. Вони характеризуються високою точністю проте можуть бути застосовані для вимірювання товщини тонких та надтонких прозорих покриттів, товщина яких порівняна з довжиною хвилі оптичного випромінювання. Крім того, проведення вимірювань за допомогою цих методів ускладнено через певні обмеження. Наприклад, [26] принцип роботи спектральних еліпсометрів заснований на тому, що світло повинне відбиватися на межі розділу плівка-підкладка і міняти поляризацію при проходженні плівки. Отже, в разі скляної підкладки, товщина якої менше 8-10 мм, дуже важко виключити потрапляння в аналізатор світла, відбитого від нижньої площини підкладки. Тому в еліпсометрії необхідно використовувати зразки плівок, нанесених на поліровану відбивальну підкладку.

Ще одну групу оптичних методів, що можуть бути використані для безконтактного контролю параметрів покриттів, складають фотометричні методи, засновані на дослідженні процесів взаємодії оптичного випромінювання з матеріалом плівки. Одним з таких методів є метод оптичної рефлектометрії, відповідно до якого товщина покриття оцінюється за коефіцієнтом відбивання. Для прозорих покриттів розглядається відбивання світла на системі плівка-основа [18]. Різновидами методу оптичної рефлектометрії є методи спектральної та лазерної рефлектометри. Метод спектральної рефлектометрії включає в себе реєстрацію спектра відбиття випромінювання плівковим покриттям і подальшу обробку цього спектру з метою знаходження невідомих товщини. Метод лазерної рефлектометрії є



більш простим, оскільки використовує тільки інформацію про коефіцієнт відбивання тришарової системи "повітря (вакуум)-плівка-підкладка" на одній довжині хвилі [27].

Загальним недоліком усіх розглянутих вище методів є те, що вони можуть бути застосовані лише за умов, що плівка має гарні оптичні властивості і нанесена на добре підготовлену поверхню підкладки. Крім того, для визначення товщини плівки необхідно знати її показник заломлення [28]. Проте, якщо необхідно лише оцінювати відхилення товщини вздовж поверхні без визначення її абсолютного значення, останній недолік можна не приймати до уваги.

Ще одним підходом до неруйнівного контролю покриттів є фототермічні методи, які об'єднують підходи, що використовуються у методах теплового та оптичного контролю. За допомогою фотометричних методів може бути проведена оцінка товщини покриття, виявлені відшарування покриття та підповерхневі дефекти їх поверхні. Це пов'язано з тим, що межа розділу та будь-який дефект вносить викривлення в розповсюдження теплових хвиль.

Основним фототермічним методом є метод лазерної термографії, заснований на збудженні теплових хвиль в зразку модульованим лазерним випромінюванням. Зміна температури об'єкта контролю при оптичному нагріванні залежить від потужності джерела і поглинаючих властивостей контрольованого матеріалу. Створена лазерним променем теплова хвиля (імпульсна або періодична) поширюється внаслідок теплової дифузії згідно диференціальних рівнянь теплопровідності [29]:

$$\frac{\lambda}{C\rho} \nabla^2 T = \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (2.1)$$

де  $\lambda$  – теплопровідність;

$C$  – теплоємність;

$\rho$  – щільність;

$t$  – час;

$T$  – температура.

На основі аналізу за допомогою інфрачервоного фотодетектора розповсюдження створеного таким чином теплового поля, можна визначати товщину покриття та виявляти дефекти відшарування на межі покриття-основа [30], [31]. Такий контроль є можливим через те, що межа розділу будь-яких матеріалів характеризується більш-менш різкою зміною властивостей, у тому числі, теплових. При цьому для бездефектної межі між покриттям та основою має місце різкий тепловий перехід. При наявності відшарування виникає збільшується тепловий опір, що порушує перенесення тепла між шарами. Збільшується відбивання теплової хвилі, що веде до збільшення температури поверхні [31].

За порівнянням з бездефектною областю при наявності неоднорідності на межі розділу двох середовищ коефіцієнт теплового відбивання має такі особливості [31]:

- коефіцієнт відбивання дефектної межі може бути комплексною величиною, що призводить до фазового зсуву у відбитій хвилі;
- коефіцієнт відбивання дефектної межі залежить від частоти модуляції, тому виявлення розривів та відшарувань повинно здійснюватися при скануванні частоти модуляції.

Головним недоліком фототермічного контролю є те, що для отримання значення, наприклад, товщини покриття треба знати хоча б одну з таких характеристик шару, як теплопровідність, теплоємність, щільність [30]. Крім того, оскільки нагрівання здійснюється оптичним шляхом за допомогою лазерного променя, на результат вимірювання впливають коефіцієнти поглинання та відбивання матеріалу покриття. Тобто кількість параметрів, які треба враховувати при інтерпретації отримуваних результатів контролю набагато більша, ніж в традиційних оптичних методах. Крім того, можливості застосування методу лазерної термографії обмежуються контролем параметрів покриттів, що мають гарну теплопровідність. У зв'язку з цим вони можуть ефективно використовуватися лише для дослідження параметрів покриттів на основі металів.

З проведеного аналізу випливає, що не існує універсального оптичного методу, який можна було б одночасно застосовувати для нейрунівного контролю параметрів як прозорих, так і світлопоглинальних покриттів. Тому у даній роботі обмежимося розгляданням покращення функціональних характеристик засобу для оптичного контролю параметрів оптично прозорих або напівпрозорих покриттів, товщиною від кількох десятків мкм. Як було зазначено вище, для таких застосувань можуть бути використані інтерференційні, еліпсометричні та рефлектометричні методи. Проте їх можливості обмежені застосуванням лише для покриттів з гарними оптичними властивостями нанесеними на гарно відполіровану поверхню.

Основною складовою оптичного контролю є процес вимірювання.

В процесі оптичного вимірювання виділяють такі основні етапи (рис. 2.1) [29]:

1. Створення оптичного зображення, пов'язаного з параметрами об'єкта, що вимірюються (оптико-вимірювального зображення).
2. Визначення (зчитування) координат елементів зображення шляхом оптичних вимірювальних наведень чи установок.
3. Обробка даних, отриманих в результаті оптичних вимірювальних наведень на зображення та отримання результатів вимірювання для визначення необхідних параметрів об'єкта.
4. Аналіз похибок вимірювань для визначення точності отриманих результатів.

Під інформативністю оптичних вимірювань будемо надалі розуміти величину  $I=L/\sigma$ , де  $L$  – діапазон вимірювань товщини покриття,  $\sigma$  - середньоквадратична похибка результатів вимірювання [30].

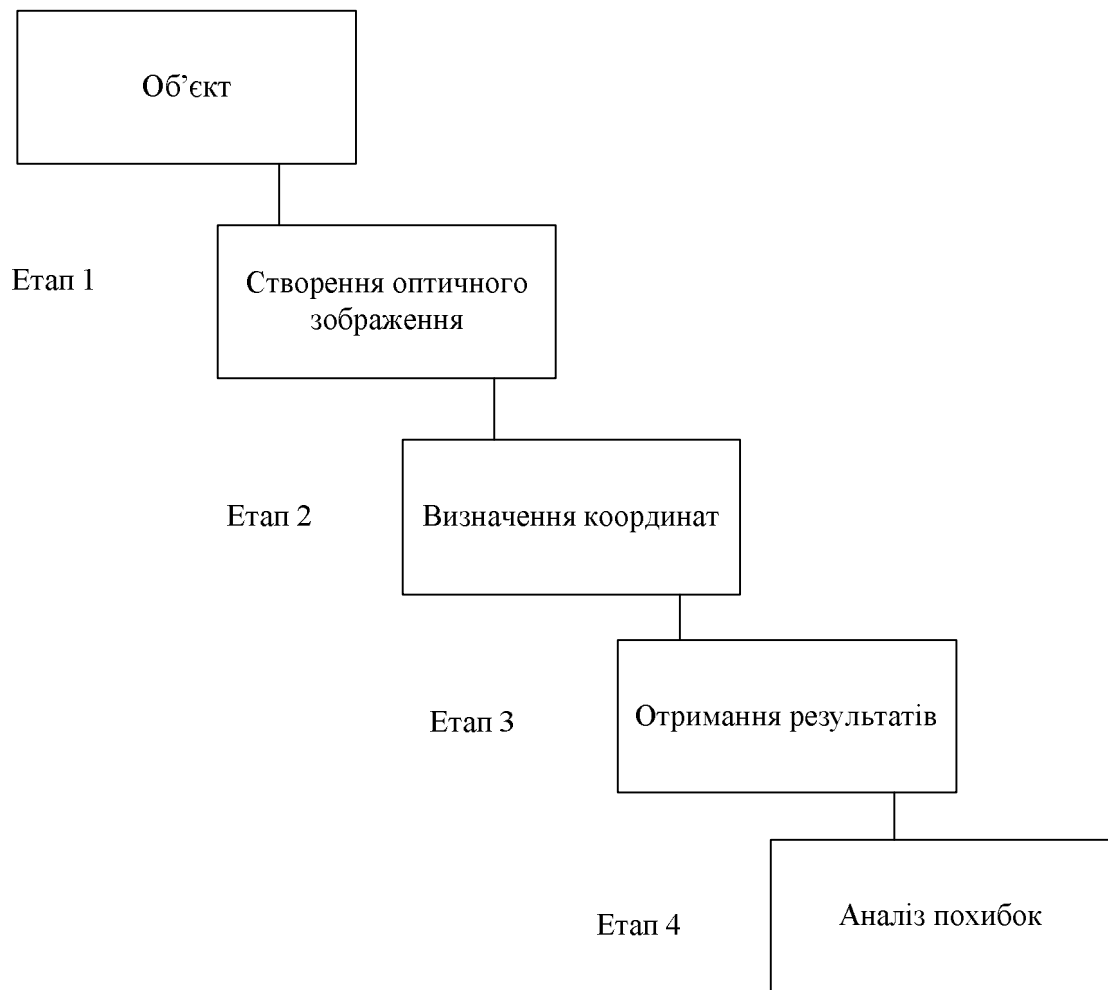


Рисунок 2.1 – Етапи оптичного вимірювання

Для отримання можливості проводити контроль параметрів покриттів, які не відповідають жорстким вимогам до відбивальної здатності їх поверхні та поверхні основи, візьмемо за основу оптичні методи тіньового або світлового перетину, що реалізуються за допомогою подвійного мікроскопа Лінника. Схема вимірювання товщини прозорих покриттів за методом світлового перетину наведена на рис. 2.2 [32].

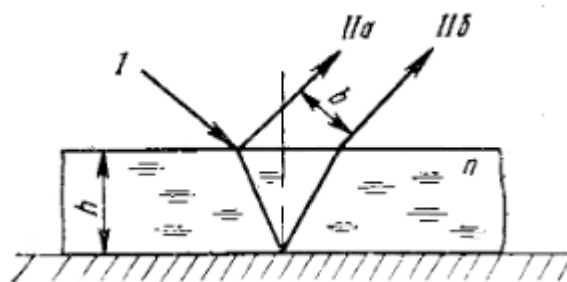


Рисунок 2.2 – Схема вимірювання товщини плівки за методом світлового перетину

Освітлена вузька щілина проектується за напрямом  $I$  на поверхню деталі з прозорим покриттям. Після відбивання від поверхні покриття та основи світло розповсюджується за напрямками  $IIa$  та  $IIb$ . У результаті, у полі зору мікроскопа спостереження спостерігаються два зображення щілини, що утворилися на поверхні покриття та поверхні основи. Зображення щілини зсунуті на значення  $b$ , пропорційне товщині покриття.

Традиційний метод світлового перетину полягає у наступному: пучок світлових променів, що поступають від джерела світла крізь вузьку щільну діафрагму 3 (рис. 2.3) шириною близько 0,1 мм, спрямовується об'єктивом 2 під углом  $\alpha$  на контрольну поверхню 1 (покриття зразка). Після відбиття від поверхні промені крізь об'єктив 5 переносять зображення щілини у площину фокусу окуляра 6. Якщо контрольна поверхня є ідеально рівною, то у окулярі щілина буде мати вигляд світної прямої лінії.

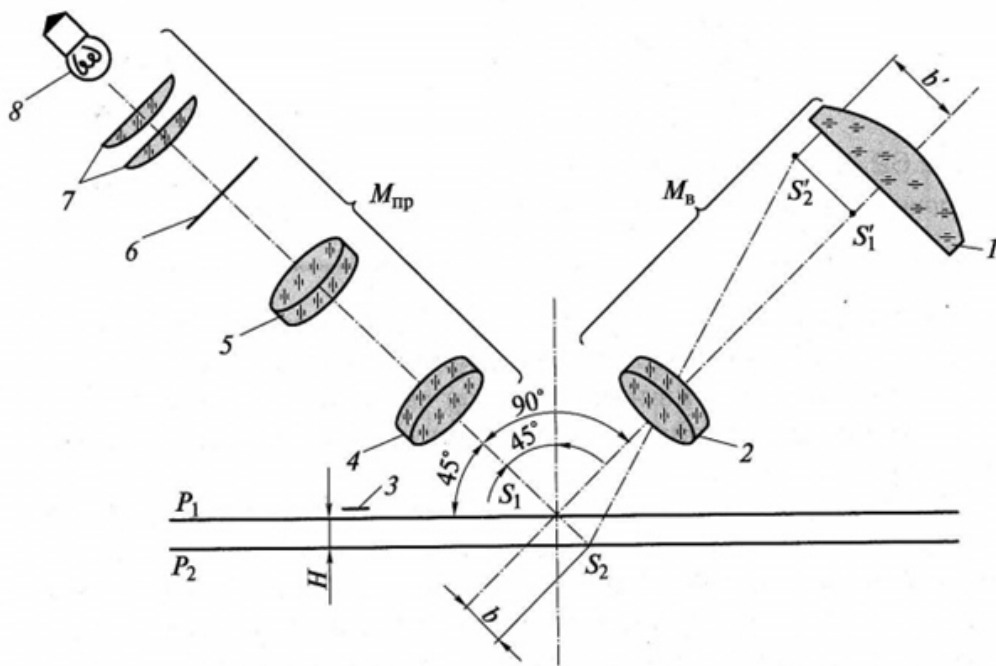


Рисунок 2.3 – Оптична схема інструментального подвійного мікроскопа Лінника: 1 — окулярний мікрометр; 2 — об'єктив; 3 — зразок ; 4 і 5 — система лінз; 6 — діафрагма; 7 — конденсор; 8 — освітлювач

Якщо на поверхні існує канавка, то у площині окуляра спостерігається викривлена світна лінія, як зображено на рис. 2.4.

При глибині канавки  $H$  її світловий перетин  $b = H/\sin\alpha$ , розмір світлового перетину канавки у площині об'єктива  $b_1 = bV^x$ , де  $V^x$  — кратність лінійного збільшення об'єктива мікроскопа.

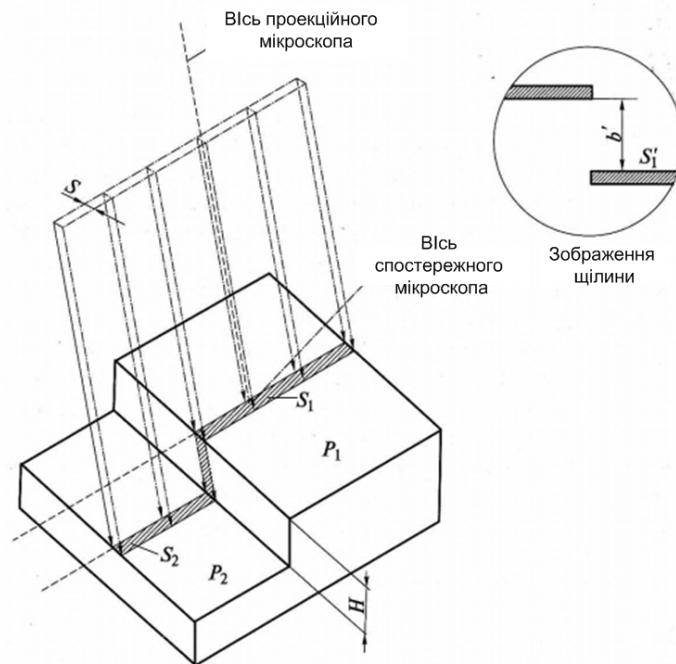


Рисунок 2.4 – Схема формування світної лінії

2.1.2 Удосконалення методу світлового перетину для автоматизованого контролю товщини покриття

Для розширення функціональних можливостей методу світлового перетину для автоматизованого вимірювального контролю, зокрема діапазону та інформативності оптичних вимірювань пропонується принципова схема, наведена на рисунку 2.5.

На етапі 1 вимірювального контролю спочатку виконується встановлення зразка, далі відбувається почергова генерація випромінювання світлодіодів та фіксація найкращих спектральних умов поглинання (експериментальна оптимізація за довжиною хвилі поглинання зондувального випромінювання, на якій проводяться подальші вимірювання).

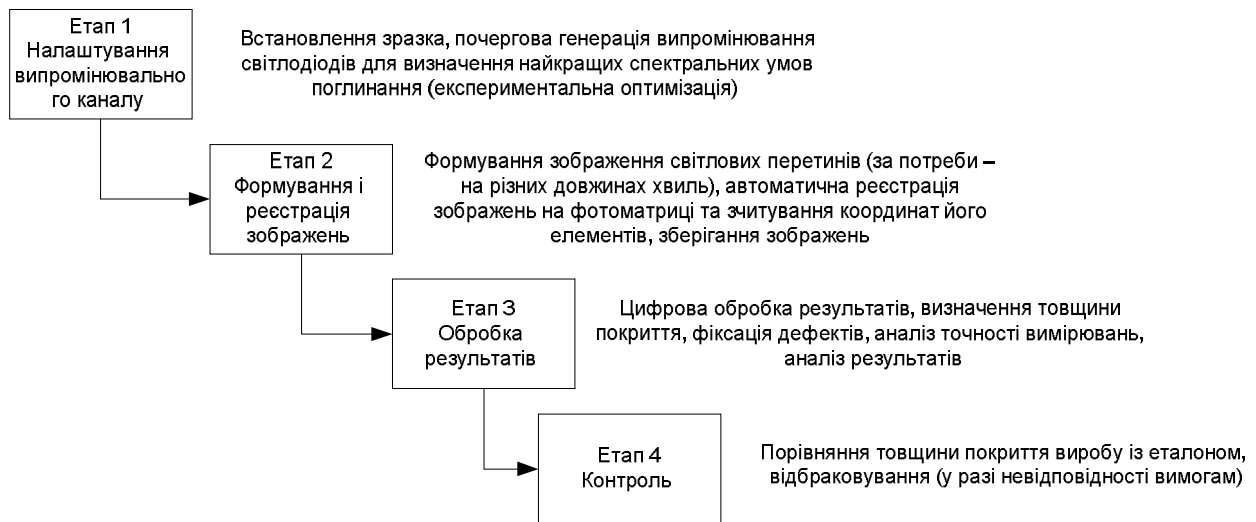


Рисунок 2.5 – Удосконалена схема методу світлового перетину для вимірювального контролю товщини покриття

На етапі 2 відбувається формування зображення світлових перетинів (за потреби – на різних довжинах хвиль), автоматична реєстрація зображень на фотоматриці та зчитування координат його елементів, зберігання зображень.

На 3 етапі проводиться цифрова обробка результатів, визначення товщини покриття, фіксація дефектів (за наявності), аналіз похибки вимірювань засобами математичної статистики, аналіз отриманих результатів.

На 4 етапі відбувається безпосередньо контроль. Для цього виконують порівняння товщини покриття виробу із еталоном та її відбраковування (у разі невідповідності вимогам).

Для отримання можливості контролювати товщину покриттів оптичних та інших елементів з меншими вимогами як до якості їх поверхні, так і до поверхні основи в удосконаленому методі світлового перетину будемо використовувати не дзеркальне, а дифузне відбивання світла. Тому замість косоного падіння променів, більш доцільно застосовувати нормальне. Це збільшить його проникаючу здатність, тобто надасть можливість досліджувати параметри слабо прозорих покриттів. Знайдемо зв'язок між відстанню між зображеннями щілини, що спостерігаються, та товщиною покриття (рис. 2.6).

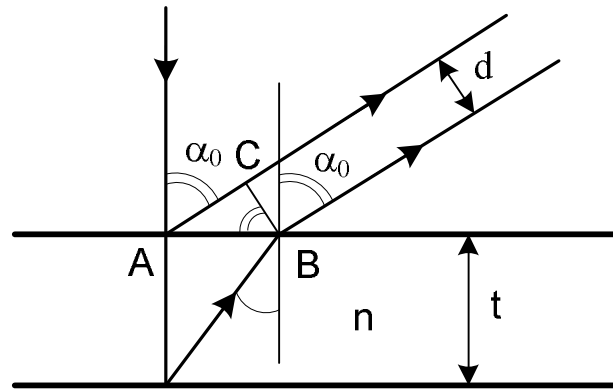


Рисунок 2.6 – Хід променів через покриття

При дифузному відбиванні промені рівномірно розсіюються у всіх напрямках. Тому для будь якого кута спостереження  $\alpha_0$  відстань  $d$  між зображеннями щілини, що утворюються на поверхнях покриття та основи відповідно до рис. 2.6 з трикутника ABC:

$$d = BC = AB \cdot \cos \alpha_0, \quad (2.2)$$

Товщина покриття  $t$ :

$$t = \frac{AB}{\operatorname{tg} \alpha} = \frac{AB \cdot \cos \alpha}{\sin \alpha} = AB \cdot \frac{\sqrt{1 - \sin^2 \alpha}}{\sin \alpha}. \quad (2.3)$$

З врахуванням (2.2) вираз (2.3) набуде вигляду:

$$t = \frac{d}{\cos \alpha_0} \cdot \frac{\sqrt{1 - \sin^2 \alpha}}{\sin \alpha}. \quad (2.4)$$

Із закону заломлення на межі покриття-повітря:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \alpha_0} = \frac{1}{n}, \quad (2.5)$$

де  $n$  – показник заломлення матеріалу покриття.



З виразу (2.5):

$$\sin \alpha = \frac{1}{n} \cdot \sin \alpha_0. \quad (2.6)$$

Підставляючи (2.6) у вираз (2.4), для товщини покриття:

$$t = \frac{d}{\cos \alpha_0} \cdot \frac{\sqrt{1 - \frac{1}{n^2} \cdot \sin^2 \alpha_0}}{\frac{1}{n} \cdot \sin \alpha_0} = \frac{d \cdot \sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha_0}}{\cos \alpha_0 \cdot \sin \alpha_0} = \frac{2d \cdot \sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha_0}}{\sin 2\alpha_0}. \quad (2.7)$$

Якщо матеріал покриття не прозорий, та такий що дифузно розсіює світло, то замість двох зображень щілини, що знаходься на відстані  $d$ , буде спостерігатися світлова смуга шириною  $d$ .

Як видно з виразу (2.7), якщо потрібно не лише контролювати відхилення товщини покриття, а й визначати її абсолютне значення, необхідно знати значення показника заломлення  $n$ . При невідомому  $n$  треба буде виміряти відстань між зображеннями щілини при двох кутах спостереження  $\alpha_0$  та  $\alpha_0'$ .

У запропонованому методі використано адаптивний підхід до формування зображень у оптимальному спектральному діапазоні, підвищено інформативність методу вимірювань, розширено функціональні можливості методу для слабопрозорих матеріалів.

## **2.2 Розробка структурної схеми автоматизованого засобу вимірювального контролю**

Відповідно до запропонованого методу контролю товщини покриттів у розроблюваному засобі треба реалізувати формування світлової смуги, введення її зображень, що утворюються на поверхні покриття та поверхні основи, та виконати оцінювання відстані між цими зображеннями. Таким чином розроблюваний у даній роботі засіб є оптико-електронним пристроєм,

що складається з оптичних та електронних блоків та компонентів.

Оптичні блоки забезпечують отримання зображень світлової смуги, що, відповідно рис. 2.3, утворюються на поверхні покриття та поверхні, що є межею між покриттям та основою. Електричні блоки повинні забезпечувати перетворення оптичного зображення у цифрову форму, його обробку та аналіз, відображення отримуваних результатів та їх передачу для подальшого опрацювання автоматизованою системою. Крім того, для отримання можливості здійснювати контроль по всій поверхні деталі, необхідно забезпечити переміщення блоку введення зображення хоча б за однією з координат. З врахуванням цього приходимо до загальної структурної схеми оптико-електронного засобу контролю покриттів, яка наведена на рис. 2.7 та у Додатку А. Основними блоками розробленої схеми є: мікропроцесорний блок, блок оптичного випромінювання, проєкційна система (блок дзеркал, діафрагма, об'єктив), цифровий матричний фотоприймач, дисплей, USB модуль та блок механічної розгортки із драйвером.

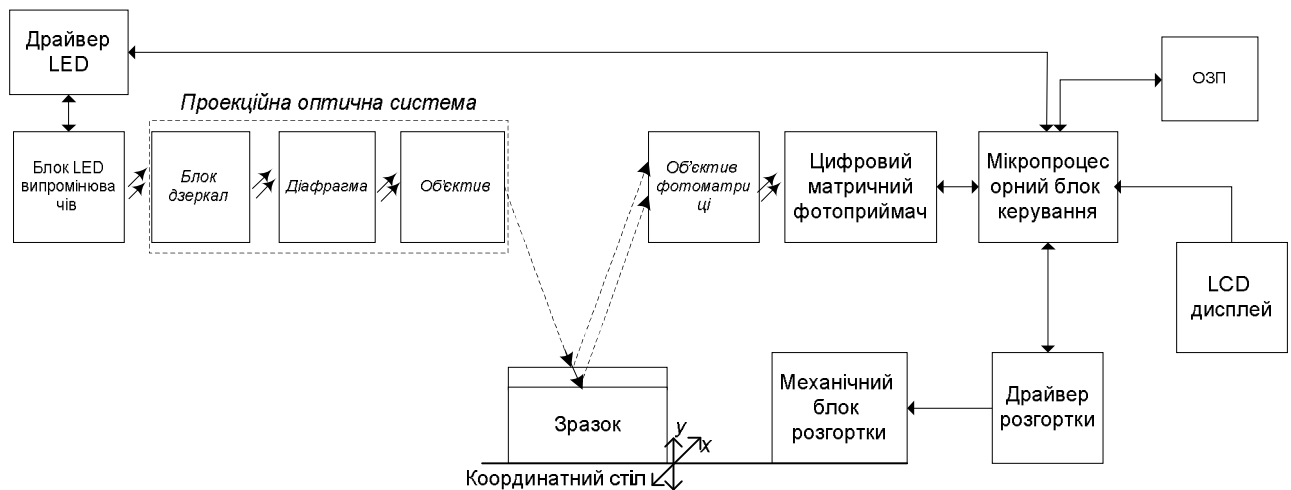


Рисунок 2.7 – Узагальнена структурна схема засобу вимірювань

Мікропроцесорний блок керування є головним блоком засобу, який забезпечує його функціонування за рахунок керування усіма іншими блоками. Разом з джерелом оптичного випромінювання, цифровим матричним фотоприймачем, дисплеєм, USB модулем та блоком механічної розгортки він

утворює електронний модуль. Основними завданнями мікропроцесорного блоку є забезпечення періодичного поступально зворотного переміщення засобу над контрольованою поверхнею, аналіз зображень світлової смуги, відображення результатів аналізу на дисплеї та передачу отримуваних даних у головний блок автоматизованої системи контролю.

Формування світлового потоку для отримання світлової смуги на контрольованій поверхні здійснюється джерелом оптичного випромінювання. Самими перспективними та енергозберігаючими на даний час є світлодіодні джерела. Сучасні світлодіоди крім високої світлової віддачі, малого енергоспоживання, слабкої залежності параметрів випромінювання від температури і можливості отримання будь-якого кольору світіння, мають інші суттєві переваги, зокрема, надзвичайно великий термін служби. Виробники пропонують термін служби до 100 тисяч годин, або 11 років безперервної роботи. Крім того, за порівнянням зі звичайними лампами, у світлодіодів відсутня скляна колба, що обумовлює їх високу механічну міцність і надійність. Мале тепловиділення і низька напруга живлення гарантують високий рівень безпеки їхнього використання [33].

Для отримання можливості здійснювати контроль товщини покриттів з різних матеріалів, що можуть характеризуватися різними спектрами поглинання, доцільно застосувати різні світлодіоди для отримання світлового потоку з широким спектром довжин хвиль.

При потраплянні світлового потоку від джерела оптичного випромінювання на контрольовану поверхню на ній, відповідно до рис. 2.2, утворюються дві світлові смуги, відстань між якими пов'язана з товщиною покриття. Крім того, будь які дефекти як на поверхні покриття, так і на межі покриття-основа будуть викривляти ці смуги. За допомогою об'єктива та цифрового матричного фотоприймача зображення світлових смуг отримується у цифровій формі, що надає можливість комп'ютерної обробки.

Чутлива поверхня цифрового матричного фотоприймача утворюється множиною фоточутливих елементів – пікселів, кожний з яких формує електричний сигнал пропорційний кількості світла, що потрапляє на нього.

Матричні фотоприймачі виконують п'ять основних операцій: поглинання фотонів, перетворення їх в електричний заряд, накопичення цього заряду, його передачу та перетворення в напругу. Залежно від технології виготовлення різні фотоприймачі здійснюють завдання зберігання і накопичення фотоелектронів по-різному. Крім того, можуть використовуватися різні методи перетворення накопичених електронів в електричну напругу (аналоговий сигнал), яка, у свою чергу, перетворюється в цифровий сигнал.

Цифрове зображення, що отримується за допомогою фотоприймальної матриці, зчитується мікропроцесорним блоком. Мікропроцесорний блок оцінює відхилення зображень смуг від прямолінійності, нерівномірність ширини смуг та відстань між ними. За цими даними здійснюється контроль рівномірності ширини покриття та наявності у ньому дефектів.

Розроблюваний засіб конструктивно буде реалізовуватися у вигляді рухомого блоку для отримання можливості здійснювати контроль за всією шириною поверхні. Рух блоку над контрольованою поверхнею у вигляді поступально зворотних переміщень забезпечується блоком механічної розгортки. Керування рухом здійснюється мікропроцесорним блоком.

Результати контролю відображаються на дисплеї та передаються в головний блок автоматизованої системи контролю. Для відображення результатів будемо використовувати графічний рідкокристалічний дисплей. У даний час РК-дисплеї застосовуються в найрізноманітніших електронних і комп'ютерних пристроях. Одна з найбільш помітних останніх тенденцій в області РК-технології - зміщення інтересів виробників в сторону дисплеїв з невеликим розміром екрана (від 1,5 до 4 дюймів), що пояснюється зростанням сегменту портативних електронних пристроїв. У даний час на ринку РК-дисплеїв невеликого розміру спостерігається не тільки активний кількісний, але і помітний якісний ріст. Зокрема, значно підвищилася роздільна здатність подібних дисплеїв. Крім того, переважна більшість таких дисплеїв випускається у вигляді дисплейних модулів, що крім безпосередньо дисплею мають у своєму складі відеоконтролер та відео пам'ять [34]. Це суттєво спрощує інтеграцію таких модулів з мікропроцесорними засобами контролю та управління. Тому

використання саме такого рідкокристалічного дисплейного модуля будемо передбачати у розроблюваному у даній бакалаврській роботі оптико-електронного засобу контролю.

Для передачі результатів контролю для подальшого опрацювання в автоматизованій системі передбачимо підтримку у розроблюваному засобі одного з найпоширеніших сьогодні інтерфейсу USB. Інтерфейс USB (Universal Serial Bus - універсальна послідовна шина) є промисловим стандартом для обміну даними між хост-комп'ютером і різноманітними периферійними пристроями. Фізично інтерфейс USB утворюється чотирма лініями: дві для передачі даних, дві для подання напруги живлення. Для передачі інформаційних сигналів використовується диференціальний спосіб передачі сигналів по лініях, які позначаються як D+ та D- [35].

Діафрагма та об'єктив утворюють оптичний модуль розроблюваного засобу. Основне призначення діафрагми, яка являє собою непрозорий екран з прорізю – формування на контрольованій поверхні світлової смуги. Світлові промені, що проходять через діафрагму, дифузно відбиваючись на поверхні покриття та поверхні основи, утворюють на цих поверхнях дві світлові смуги. За допомогою об'єктива на фоточутливій поверхні матричного фотоприймача утворюються дійсні зображення цих смуг, які внаслідок заломлення світлових променів у матеріалі покриття, розташовані на певній відстані одне від одного. Якщо лінійне збільшення об'єктива дорівнює  $\beta_{об}$ , а його оптична вісь спрямована під кутом  $\alpha_0$  до нормалі до контрольованої поверхні, то з врахуванням виразу (2.7) відстань  $d_{фм}$  між зображеннями світлових смуг у площині фотоматриці буде пов'язано з товщиною покриття виразом:

$$d_{фм} = \beta_{об} \cdot \frac{\sin 2\alpha_0}{2 \cdot \sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha_0}} \cdot t. \quad (2.8)$$

### 2.3 Висновки до розділу 2

Для контролю товщини прозорих покриттів найбільш широко використовуються такі оптичні методи як інтерференційні, еліпсометричні та рефлектометричні. Контроль товщини світлопоглинальних покриттів можна здійснити фототерімчними методами, зокрема, методом лазерної термографії. Інтерференційні, еліпсометричні та рефлектометричні методи можуть бути застосовані лише для покриттів з гарними оптичними властивостями нанесеними на гарно відполіровану поверхню. При цьому найбільша точність досягається коли товщина покриття порівняна з довжиною світлової хвилі.

Контроль товщини прозорих та слабо прозорих покриттів з невисокою відбивальною здатністю поверхні, до якої не висувалися жорсткі вимоги щодо шорсткості, можна здійснити за методом світлового перетину.

Запропоновано удосконалений метод світлового перетину для контролю товщини покриття оптичних і слабопрозорих матеріалів, в якому підвищено інформативність за рахунок розширення діапазону вимірювань, що відбувається при виборі оптимальної (за мінімумом спектрального поглинання) довжини хвилі світлодіодного випромінювача. Це дозволило розширити функції контролю товщини покриття як для прозорих оптичних, так і для слабопрозорих матеріалів.

Запропонована структурна схема засобу дозволяє здійснювати автоматизований контроль усієї поверхні покриття на виробничій ділянці за методом світлового перетину із заданими характеристиками.

## **3 РОЗРОБКА ТА АНАЛІЗ РОБОТИ СХЕМ ЗАСОБУ КОНТРОЛЮ**

### **3.1 Реалізація структурних компонентів та обґрунтування вибору елементної бази засобу**

Розробку схем автоматизованого засобу для контролю покриттів будемо здійснювати за його структурною схемою. Розробку функціональної схеми розпочнемо з аналізу можливої реалізації структурних блоків.

Головним структурним блоком оптико-електронного засобу для контролю покриттів є мікропроцесорний блок. Сучасний ринок мікроконтролерів насичений різними моделями, здатними задовольнити практично будь-які вимоги. Поряд із цим вимоги розробників вбудованих систем до компонентів постійно зростають. Відповідно і на ринку постійно з'являються нові мікроконтролери, технічні параметри яких завдяки вдосконаленню технології виробництва постійно покращуються [36].

До теперішнього часу найпопулярнішими у вбудованих системах залишалися 8-ми розрядні мікроконтролери, які за показником ціна/функціональність були поза конкуренцією. Однак за останній час на ринку 32-ох розрядних мікроконтролерів з'явилися нові мікроконтролери з ядром ARM, які, перевершуючи 8-ми бітні мікроконтролери за функціональними можливостями та продуктивністю, наблизилися до них за своєю вартістю.

Збільшення конкуренції між виробниками мікроелектронної продукції призвів до появи мікроконтролерних модулів, які на одній платі об'єднують мікроконтролер, графічний процесор, пам'ять та різні інтерфейсні модулі, що дозволяє суттєво скоротити часові та грошові витрати на реалізацію різноманітних технічних рішень. Такі модулі, завдяки своїй завершений функціональності, отримали назву одноплатних комп'ютерів. 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 [37].

У моделі Raspberry Pi 3 Model B+ наявний 40-піновий роз'єм GPIO, серед контактів якого є інтерфейси SPI, I<sup>2</sup>C, 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-вольтного адаптера через роз'єм мікро-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. [37].

Зовнішній вигляд модуля Raspberry Pi 3 Model B+ представлений на рис. 3.1, а його основні характеристики наведені у табл. 3.1 [37], [38].





Рисунок 3.1 – Модуль 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

Наступним важливим елементом, від якого залежить точність контролю, є цифровий матричний фотоприймач. У теперішній час існує дві основні

технології виготовлення матричних фотоприймачів: ПЗЗ (CCD) та КМОН (CMOS). Різниця між матрицями ПЗЗ та КМОН полягає в принципах їх роботи. ПЗЗ оцифровує отриману аналогову картинку, КМОП - відразу кожен піксель зображення [39].

Найпростіший ПЗЗ-сенсор являє собою конденсатор, здатний під впливом світла накопичувати електричний заряд. Накопичений заряд перетворюється в електричний потенціал, посилюється в аналоговому підсилювачі за межами світлочутливого сенсора, а потім оцифровується за допомогою аналогово-цифрового перетворювача.

Внутрішня архітектура КМОП-сенсорів може бути різною. Так, в якості фоточутливого елемента можуть виступати фотодіоди або фототранзистори. Незалежно від типу фоточутливого елемента світлове випромінювання, що поглинається у напівпровіднику, електрони і дірки, які розділяються електричним полем [39], [40].

Основна відмінність КМОП-сенсорів від ПЗЗ полягає не у способі накопичення заряду, а в способі його подальшого перенесення. Технологія КМОН, на відміну від ПЗЗ, дозволяє здійснювати більшу кількість операцій прямо на кристалі, на якому розташована фоточутлива матриця. . Відповідно до технології КМОН кожний піксель містить свій транзисторний підсилювач, що і дозволяє перетворювати заряд в напругу безпосередньо на пікселі. Крім того, це надає можливість для довільного доступу до кожного пікселя сенсора. Зчитування заряду з активних пікселів CMOS-сенсора проводиться за паралельною схемою, що дозволяє безпосередньо зчитувати сигнал з кожного пікселя або з колонки пікселів. Довільний доступ дозволяє КМОП-сенсора зчитувати не тільки всю матрицю цілком, але і вибірккові області (метод віконного зчитування). Таким чином, крім вивільнення електронів і їх передачі, КМОН-сенсори можуть також обробляти зображення, виділяти контури зображення, зменшувати перешкоди і виробляти аналого-цифрові перетворення [39], [40].

Основною перевагою технології КМОН над ПЗЗ є широкий набір

функцій, які виконуються однією мікросхемою. При цьому скорочується кількість необхідних зовнішніх компонентів. Іншими перевагами КМОП-матриць є менша вартість, нижче енергоспоживання, більша швидкодія. Проте вони поступаються ПЗЗ за рівнем шумів, коефіцієнтом заповнення пік селів (ефективна поверхня пікселів  $\sim 75\%$  за порівнянням майже  $100\%$  у ПЗЗ), меншим динамічним діапазоном [40].

Не дивлячись на зазначені недоліки та враховуючи досягнуті успіхи в технології виробництва КМОН-фотоматриць, які практично нівелюють переваги ПЗЗ-матриць, у розроблюваному засобі будемо використовувати матричний фотоприймач, виготовлений за КМОН технологією. Основним критерієм при виборі типу фотоматриці є область оптичної чутливості.

Оскільки основним завданням розробки є покращення функціональних характеристик засобу для контролю покриттів. Його можна досягти, у тому числі, за рахунок розширення номенклатури матеріалів, з яких може бути виготовлене покриття. Оскільки різні матеріали характеризуються різними спектрами поглинання, для формування світлової смуги буде використовуватися джерело світлового потоку з широким спектром випромінювання. Це означає, що і область оптичної чутливості сенсора, що вибирається, повинна також охоплювати якомога більший спектральний діапазон – від ультрафіолетового до інфрачервоного. При цьому достатньо використати монохромну матрицю, що не лише буде сприяти зменшенню її вартості, а й знизить інформаційні витрати на обробку зображення.

Серед приладів, що відповідають зазначеним критеріям, перевагу будемо надавати тим, що мають більшу роздільну здатність, граничне значення якої у 15 Мпікселів обмежено можливістю підключення до вибраного одноплатного комп'ютера Raspberry Pi 3 Model B+. Крім того, матриця, що вибирається, повинна підтримувати підключення за інтерфейсом CSI-2, який підтримується Raspberry Pi 3 Model B+. Враховуючи усе це як фотоприймальну матрицю обираємо 13 М піксельну CMOS фотоматрицю AR1335.

Фотоматриця AR1335 - це 1/3,2-дюймовий CMOS-активний піксельний

датчик зображення з масивом пікселів 4208 x 3120, що обладнаний революційною технологією з розрізненням 1,1 мкм, яке забезпечує чудову якість зображення при слабкому освітленні завдяки високій чутливості, квантової ефективності і лінійному заповненню. Налаштування AR1335 здійснюється через простий дводотовий послідовний інтерфейс. Датчик AR1335 може генерувати зображення з повною роздільною здатністю зі швидкістю до 30 кадрів в секунду і підтримує розширені режими відео, включаючи 4K 30 кадрів в секунду, 1080P 60 кадрів в секунду та 720P 120 кадрів в секунду [41]. Основні характеристики фотоматриці AR1335 наведені у табл. 3.2.

Таблиця 3.2 – Основні характеристики фотоматриці AR1335

Найменування параметра	Значення
Роздільна здатність	4208 x 3120
Оптичний формат	4 : 3;
Розмір активної області	6,3 мм x 5,7 мм
Розмір пікселя	1,1 мкм x 1,1 мкм
Міжпіксельна відстань	0,3 мкм
Інтерфейс	CSI-2
Розрядність АЦП	10
Максимальне відношення сигнал/шум	37 дБ
Динамічний діапазон	69 дБ
Чутливість	4700 e <sup>-</sup> /(лк · с)
Оптичний діапазон на рівні 10% квантової ефективності	від 400 нм до 900 нм
Напруга живлення	1,2 В; 1,8 В; 2,7 В
Споживана потужність	270 мВт

Для відображення результатів контролю 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+.

Зазначеним критеріям задовольняє сенсорний кольоровий TFT дисплей на контролері ILI9341 з роздільною здатністю  $320 \times 240$ . Дисплей може бути встановлений поверх Raspberry Pi. За габаритами плата дисплея повторює розміри Raspberry Pi. Зовнішній вигляд вибраного дисплею наведений на рис.3.2, а його основні технічні характеристики представлені у табл. 3.3 [42].



Рисунок 3.2 – Графічний дисплей для Raspberry Pi на ILI9327

Таблиця 3.3 – Основні характеристики фотоматриці AR1335

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 тачскрина	резистивний

Наступним кроком є вибір світлодіодів для реалізації джерела оптичного випромінювання. Для отримання світлового потоку у спектральному діапазоні від ультрафіолетового до інфрачервоного випромінювання, треба буде використати кілька світлодіодів. Як основний світлодіод доцільно вибрати світлодіод білого кольору світіння, що перекриває майже весь видимий діапазон спектру. Основним параметром, що характеризує спектр випромінювання таких світлодіодів, є світлова температура. Спектральний розподіл енергії випромінювання для білих світлодіодів з різною кольоровою температурою, наведений на рис. 3.3 [43].

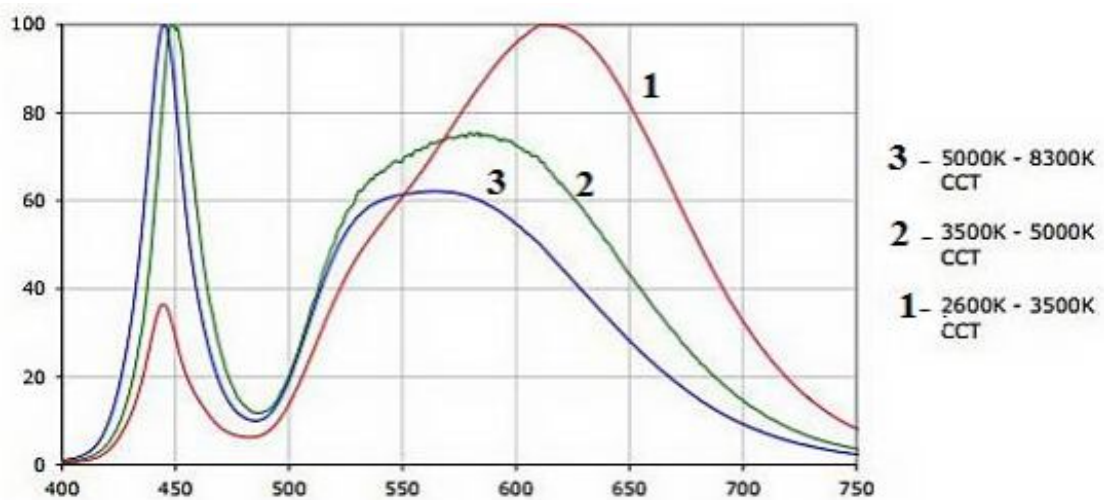


Рисунок 3.3 – Спектральна характеристика випромінювання світлодіодів

Як видно з рис. 3.3 для розглядуваного типу світлодіодів, незалежно від значення кольорової температури, у їх спектрі майже відсутні діапазон світлових хвиль від 470 нм до 520 нм, а більш рівномірний спектр мають світлодіоди з кольоровою температурою 3500...5000 К. Тому для отримання рівномірної спектральної характеристики випромінювання у видимій області спектру треба використати два приблизно однакових за значенням світлового потоку світлодіоди, один білого кольору світіння з кольоровою температурою від 3500 К до 5000 К, а другий – синезелений, для отримання випромінювання на довжині хвилі 480...500 нм, наприклад такі, що пропонується в [44] та в [45]. Основні характеристики вибраних світлодіодів наведені у табл. 3.4 та табл. 3.5,

відповідно.

Спектр випромінювання вибраного білого світлодіода відповідає кривій 2 на рис. 3.3. Довжина хвилі, на якій заходиться максимум спектральної характеристики вибраного синьозеленого світлодіода, дорівнює 500 нм. Ширина спектра випромінювання цього світлодіода, яка обмежується діапазоном хвиль, для яких світловий потік не менший за 50% від максимального, відповідає довжинам хвиль від 480 до 520 нм. Обидва світловоди є одноватними світлодіодами.

Таблиця 3.4 – Основні характеристики вибраного білого світлодіода [44]

Найменування параметра	Значення
Колір випромінювання	Білий, 4100 - 4300 К
Робоча напруга	3,0-3,6 В
Номінальний струм	360 мА
Світловий потік	120лм
Кут випромінювання	80°

Таблиця 3.5 – Основні характеристики вибраного синьозеленого світлодіода [45]

Найменування параметра	Значення
Колір випромінювання	Синьозелений, 500 нм
Робоча напруга	3,1-3,2 В
Номінальний струм	350 мА
Світловий потік	150 лм
Кут випромінювання	80°

Для отримання випромінювання у ближній ультрафіолетовій та ближній інфрачервоній областях спектру будемо використовувати також 1 Вт

світлодіоди. Оскільки спектр випромінювання будь-якого світлодіода є доволі вузьким, для охоплення в інфрачервоній області діапазону від 800 до 1000 нм, використаємо два світлодіоди. Отже треба використати три світлодіоди, один ультрафіолетовий та два інфрачервоних, наприклад такі, що описані в [46] - [48]. Їх основні характеристики наведені у табл. 3.6, 3.7 та 3.8, відповідно.

Таблиця 3.6 – Основні характеристики вибраного ультрафіолетового світлодіода [46]

Найменування параметра	Значення
Довжина випромінювання	400 нм
Робоча напруга	3,5 В
Номінальний струм	350 мА
Світловий потік	620 мВт
Кут випромінювання	80°

Таблиця 3.7 – Основні характеристики вибраного першого інфрачервоного світлодіода [47]

Найменування параметра	Значення
Довжина випромінювання	850 нм
Робоча напруга	1,5-1,7 В
Номінальний струм	400 мА
Світловий потік	300 мВт
Кут випромінювання	80°



Таблиця 3.8 – Основні характеристики вибраного другого інфрачервоного світлодіода [48]

Найменування параметра	Значення
Довжина випромінювання	940 нм
Робоча напруга	1,4-1,6 В
Номінальний струм	700 мА
Світловий потік	360 мВт
Кут випромінювання	80°

Останнім блоком структурної схеми є блок механічної розгортки, що забезпечує переміщення засобу вздовж контрольованої поверхні. Основним елементом цього блоку є електродвигун. Сигнали, що використовуються для керування електродвигуном, формуються мікроконтролером. Однак енергетичні характеристики цих сигналів не дозволяють здійснити пряме керування двигуном. Тому керування електродвигунами в мікропроцесорних системах здійснюється за допомогою драйвері, найпростішим з яких є транзисторний ключ. Але такий підхід не є ефективним через необхідність використання різних дискретних радіоелементів. Тому обираємо спеціалізований мікросхемний драйвер з робочим вихідним струмом керування до 2 А. Відповідає критерію модуль драйвера на мікросхемі L298N, що пропонується в [49], загальний вигляд якого представлений на рис. 3.4.

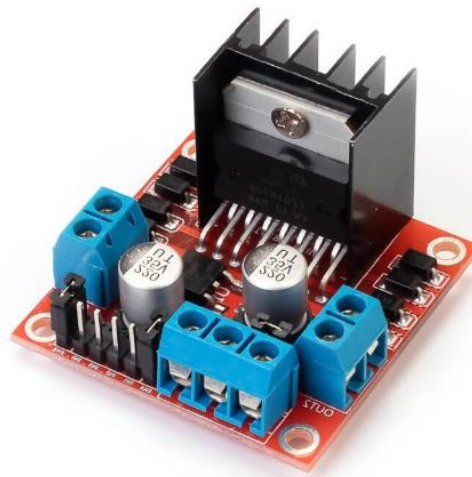


Рисунок 3.4 – Драйвер електродвигуна L298N

Вибраний модуль може бути використаний для багатофункціонального управління двигунами постійного струму. Модуль дозволяє підключати до нього один біполярний кроковий двигун або одночасно два щіткових двигуна постійного струму. При цьому є можливість змінювати швидкість і напрямок обертання моторів. Управління здійснюється шляхом подачі відповідних сигналів на командні входи, виконані у вигляді штирьових контактів.

Основним елементом модуля є мікросхема L298N, до складу якої входять два повноцінних Н-моста. Кожен Н-міст виконаний у вигляді збірки з чотирьох транзисторних ключів з включеною в центрі навантаженням у вигляді обмотки двигуна. Такий підхід дозволяє змінювати полярність в обмотці і як наслідок напрямок обертання двигуна шляхом чергування пар відкритих і закритих ключів.

Основні характеристики вибраного драйвера представлені у табл. 3.9.

Таблиця 3.9 – Основні характеристики вибраного модуля драйвера двигуна [49]

Найменування параметра	Значення
Напруга живлення двигунів	від 5 до 36 В
Робочий струм	2 А
Максимальна вихідна потужність	20 Вт
Вхідна напруга керування	5 В
Вхідний струм керування	36 мА

### 3.2 Розробка функціональної електричної схеми засобу контролю

Проведений у попередньому підрозділі вибір компонентів, за допомогою яких будуть функціонально реалізовуватися основні структурні блоки засобу для контролю покриттів, дозволяє перейти до розробки його функціональної

схеми. Останнім питанням, яке залишилося розглянути перш, ніж приступати до розробки, полягає в тому, як будуть вмикатися світлодіоди – усі одночасно при вмиканні живлення, чи керовано за допомогою мікроконтролера?

При некерованому вмиканні, коли світлодіоди вмикаються при прикладанні напруги живлення до засобу, світлова смуга на поверхні деталі буде формуватися за допомогою випромінювання усіх світлодіодів, тобто випромінюванням в оптичному діапазоні від 400 до 940 нм. Оскільки промені з різними довжинами хвилі внаслідок дисперсії будуть по різному заломлюватися у матеріалі покриття, це призведе до розширення світлової смуги на межі покриття-основа, що ускладнить інтерпретацію результатів контролю за вибраним методом. Виходячи з цього, більш доцільно використовувати почергове вмикання світлодіодів мікроконтролером. При такому підході світлова смуга у кожний момент часу буде формуватися за допомогою випромінювання лише одного світлодіода, тобто випромінювання більш вузького спектрального діапазону. Це сприятимемо зменшенню розширення через дисперсію світлової смуги, що утворюється на межі покриття-основа.

Для підвищення швидкості контролю почергове вмикання світлодіодів можна задіяти лише на початковому етапі, під час якого буде визначатися, при випромінюванні якого зі світлодіодів зображення світлової смуги є найбільш чітким та виразним, тобто для випромінювання якого зі світлодіодів поглинання у матеріалі покриття буде найменшим. У подальшому для проведення контролю цього покриття буде використовуватися лише випромінювання.

Керування світлодіодами реалізується за допомогою транзисторних ключів. Найбільше поширення отримала схема, що наведена на рис. 3.5 [50].

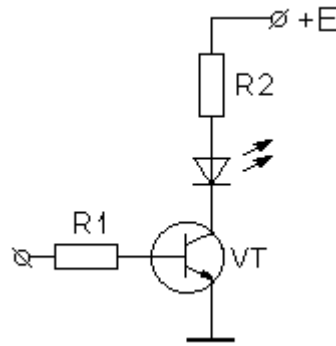


Рисунок 3.5 – Керування світлодіодом за допомогою транзисторного ключа

З врахуванням викладеного вище та вибраної у підрозділі 3.1 елементної бази приходимо електричної функціональної схеми оптико-електронного засобу для контролю покриттів, яка наведена у додатку Б.

Основним елементом схеми є одноплатний комп'ютер Raspberry Pi 3 Model B+, який забезпечує виконання усіх функцій контролю, обробки результатів, їх відображення та передачу для подальшого опрацювання автоматизованою системою контролю. Як було зазначено вище контроль здійснюється за зображеннями світлової смуги, що отримується на поверхні покриття та межі покриття-основа. Світлові смуги сприймаються фотоматрицею, яка перетворює їх оптичне зображення у зображення, описуване цифровими електричними сигналами, що робить його придатним для обробки комп'ютерними засобами. Фотоматриця являє собою матрицю фоточутливих елементів, кожний з яких перетворює інтенсивність оптичного випромінювання, що потрапляє на нього, у двійковий цифровий код.

Двійкові коди, що відповідають інтенсивностям світлового поля у різних точках зображення, зчитуються модулем Raspberry Pi 3 Model B+ по диференційним лініях даних DATA0+, DATA0- та DATA1+, DATA1-. Зчитування відбувається за сигналами PIXCLK+ та PIXCLK-, що утворюють диференційні лінію тактового сигналу. Сигнали вертикальної та горизонтальної синхронізації VSYNC та HSYNC забезпечують коректну інтерпретацію даних, що зчитуються, відповідно до їх належності окремим точкам зображення.

Сигнали DATA0+, DATA0-, DATA1+, DATA1-, PIXCLK+, PIXCLK-, VSYNC та HSYNC утворюють інтерфейс CSI-2 (Camera Serial Interface). Налаштування та керування фотоматриці здійснюється через інтерфейс I<sup>2</sup>C, що утворюється лінією даних SDA та лінією синхронізації SCL.

Результати контролю відображаються на сенсорному рідкокристалічному дисплеї. Обмін даними між дисплеєм та Raspberry Pi 3 Model B+ здійснюється через синхронний послідовний порт введення/виведення SPI. Для організації обміну використовується апаратна підтримка цього інтерфейсу за допомогою модуля SPI0 мікроконтролера BCM2837, що складає основу Raspberry Pi 3 Model B+. Дані для відображення передаються через лінію послідовного синхронного виведення SPI0\_MOSI. Дані із сенсорної панелі вводяться через лінію послідовного синхронного введення SPI0\_MISO. Обмін здійснюється за сигналом синхронізації, що формується на лінії SPI0\_SCLK. Обмін даними через SPI здійснюється в режимі master-slave, де одного master можуть бути підключені кілька slave. У даному випадку master – це Raspberry Pi 3 Model B+, а slave - це дисплей та сенсорна панель. Вибір між дисплеєм та сенсорною панеллю здійснюється за сигналами SPI0\_CE0 та SPI0\_CE1, відповідно. При дотиканні до сенсорної панелі формується сигнал запиту на переривання TP\_IRQ низького рівня, який подається на лінію GPIO 17 модуля Raspberry Pi 3 Model B+. Сигнал LCD\_RS, за яким контролер дисплею розрізняє прийом команд чи даних, формується на лінії GPIO 22. Передача команди супроводжується сигналом логічної одиниці на лінії GPIO 22. Низький рівень сигналу на лінії GPIO 22 супроводжує передачу даних. За сигналом логічного нуля на лінії GPIO 27 відбувається скидання контролера дисплею.

До складу вибраного дисплейного модуля входять три кнопки, які можуть бути задіяні для керування розробленим засобом. Стан кнопок визначається за сигналами KEY1, KEY2 та KEY3, які подаються на лінії GPIO 18, GPIO 23 та GPIO 24, відповідно.

Лінії GPIO 2, GPIO 3 та GPIO 19 використовуються для керування

двигуном. Керування здійснюється за допомогою драйвера. Сигнали IN1 та IN2, логічні значення на яких повинні бути протилежними, визначають напрям протікання струму між виходами OUT1 та OUT2, тобто напрям обертання двигуна. Обертання двигуна дозволяється за сигналом логічної одиниці на лінії ENA. При використанні широтно-імпульсної модуляції сигналу ENA можна змінювати швидкість обертання двигуна. Тому лінію ENA драйвера підключаємо до лінії GPIO 19 модуля Raspberry Pi 3 Model B+, яка може бути налаштована на формування ШІМ сигналу. Підключення обмоток двигуна здійснюється через роз'єм X2.

Світлодіоди VD1...VD5, випромінювання який використовується для формування світлової смуги на контрольованій поверхні, керуються через лінії GPIO 16, GPIO 20, GPIO 21, GPIO 25 та GPIO 26 за допомогою транзисторних ключів на транзисторах VT1...VT5. Вмикання світлодіода здійснюється за сигналом логічної одиниці на відповідній лінії GPIO, який переводить підключений до неї транзистор в режим насичення. Резистори R1...R5 та R6...R10 обмежують базові струми транзисторів та прямі струми світлодіодів, відповідно.

Інтеграція розроблюваного засобу для контролю покриттів в автоматизовану систему контролю реалізується через інтерфейс USB2.0. Для цього може бути використаний будь-який з чотирьох портів USB модуля Raspberry Pi 3 Model B+. Фізичне підключення здійснюється через роз'єм X1.

Запропоновану схему електричну функціональну автоматизованого засобу вимірювального контролю товщини покриття оптичних елементів наведено на рисунку 3.6 (пояснення блоків і компонентів наведено вище).

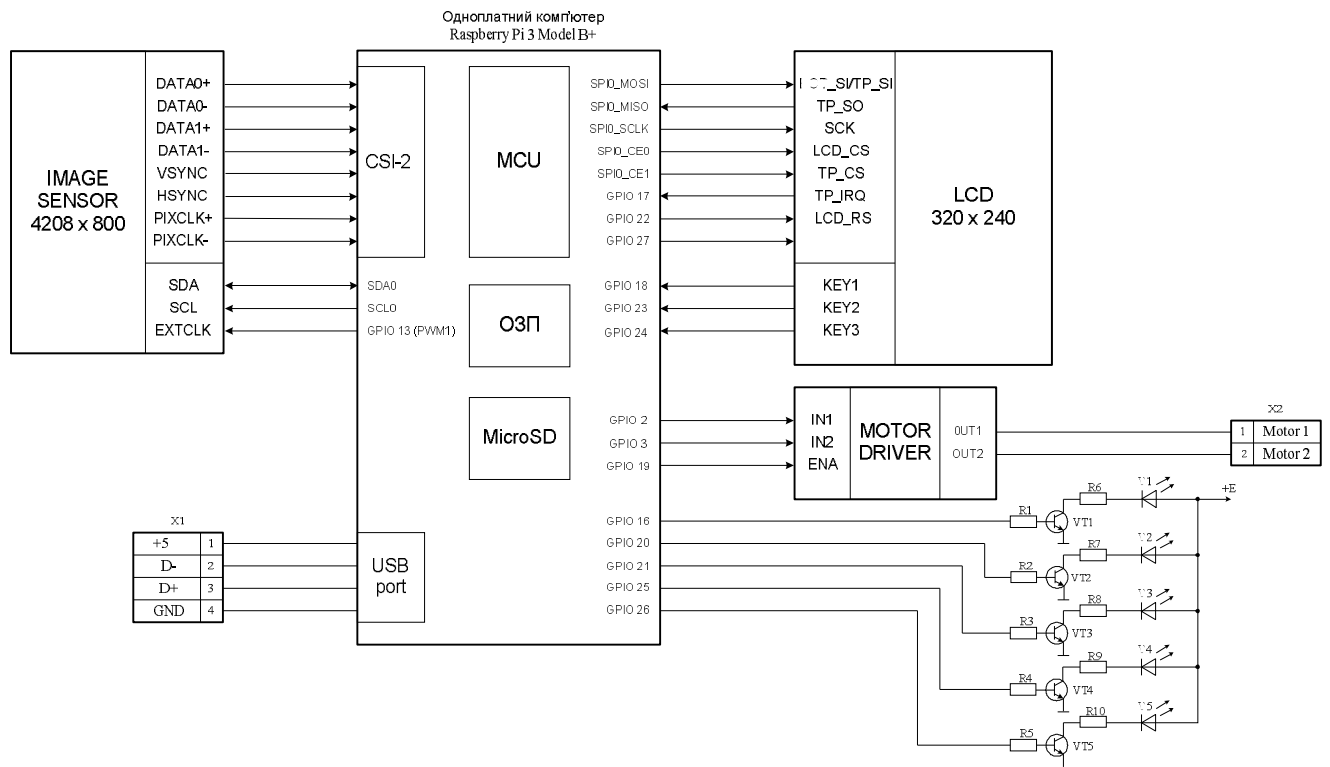


Рисунок 3.6 – Схема електрична функціональна засобу вимірювального контролю товщини покриття

### 3.3 Розробка, аналіз та моделювання оптичної схеми засобу

Задачами оптичних компонентів оптико-електронного засобу контролю покриттів є спрямування випромінювання п'яти світлодіодів на одну і ту саму ділянку контрольованої поверхні для формування на ній світлової смуги та отримання зображень смуги, яка через дифузне розсіювання випромінювання утворюється на поверхні покриття та поверхні основи на межі покриття-основа. Відповідно до цих задач, з врахуванням того, що світлодіоди характеризуються доволі значним кутом розходження випромінювання приходимо оптичної функціональної схеми засобу для контролю покриттів, яка представлена на рис. 3.7 та у додатку В.

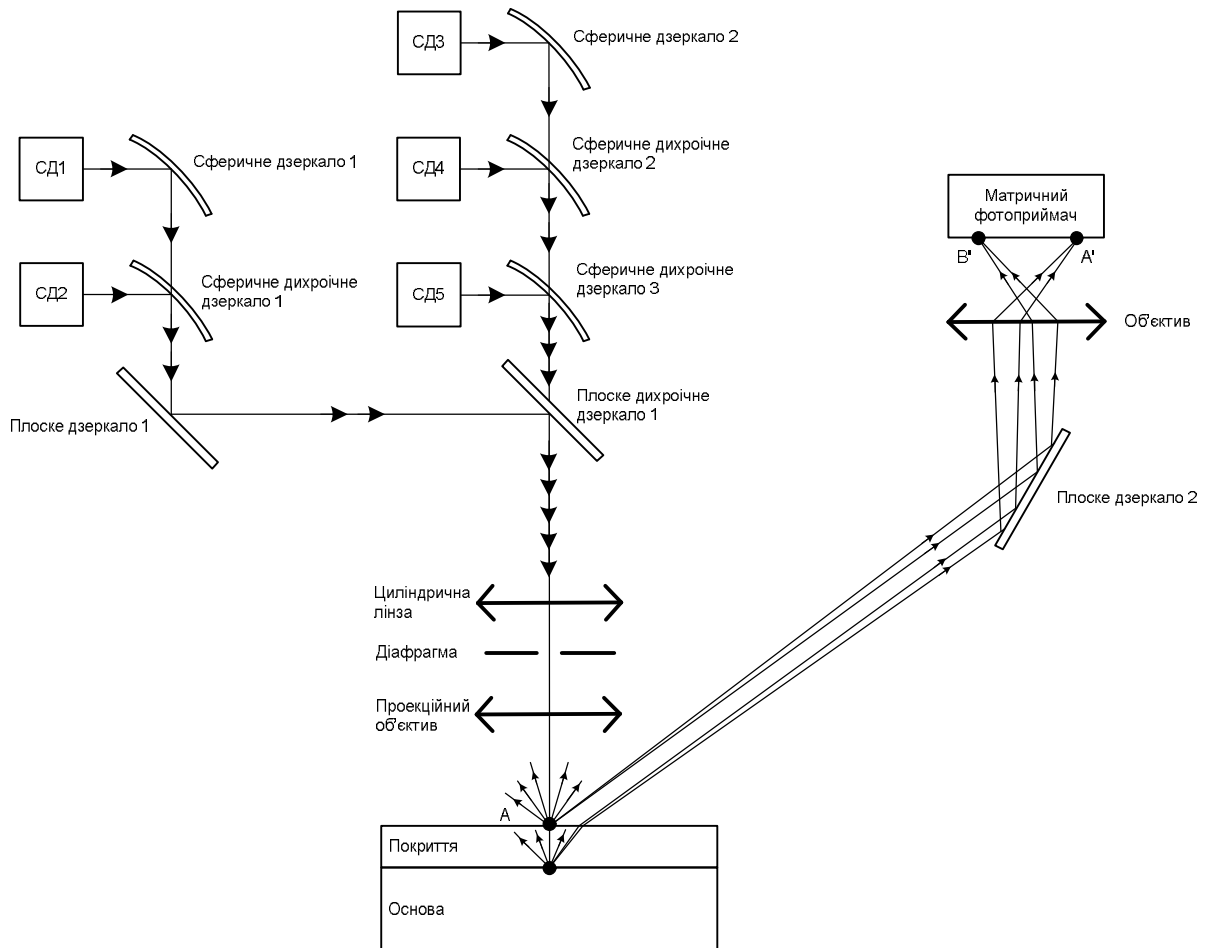


Рисунок 3.7 Оптична функціональна схема засобу

Для зменшення кута розходження випромінювання світлодіодів будемо використовувати сферичні дзеркала. Для спрямування світлових потоків від різних світлодіодів в одну і ту саму ділянку, частина дзеркал будуть дихроїчними – дзеркалами, відбивальна здатність яких відрізняється для різних довжин хвилі. Для одних променів дихроїчне дзеркало має гарну відбивальну здатність, тоді як для решти променів воно залишається майже повністю прозорим.

У розробленій схемі випромінювання світлодіодів СД1 та СД2 спочатку спрямовується вздовж однієї осі, а світлодіодів СД3, СД4 та СД5 – вздовж іншої. За допомогою плоского дихроїчного зеркала 1 відбувається об'єднання цих осей в одну, яка співпадає з оптичною віссю вихідної частини оптичної схеми. Такий підхід вибраний тому, що при розташуванні усіх дзеркал на одній осі відстань між першим та останнім дзеркалом вийде удвічі більшою.



Внаслідок цього в площині циліндричної лінзи суттєво збільшиться різниця між перерізом пучків променів, що відбилися від першого та останнього дзеркала, оскільки після відбивання від сферичного дзеркала пучок світлових променів все одно залишиться розбіжним.

Відповідно до вибраної схеми спрямування світлових потоків, випромінювання, що повинні відбиватися плоским дихроїчним дзеркалом 1, повинні бути близькими за спектральним складом. Тому світлодіод СД1 – це світлодіод, що випромінює на довжині хвилі 850 нм, а світлодіод СД2 – на довжині хвилі 940 нм. Оскільки спектр випромінювання білого світлодіода є більш широким, ніж решти світлодіодів, світлодіодом СД3, випромінювання якого відбивається звичайним сферичним дзеркалом 2, є білий світлодіод. Світлодіод СД4 випромінює на довжині хвилі 400 нм, а світлодіод СД5 – 500 нм.

Описана система дзеркал спрямовує випромінювання від будь якого зі світлодіодів СД1...СД5 на циліндричну лінзу, за допомогою якої світлові потоки фокусуються у площині діафрагми, отвір якої має вигляд вузької щілини. Використання циліндричної лінзи дозволяє здійснити фокусування за однією координатою, у результаті чого отримується світлова смуга, що за своїм положенням збігається зі щілиною. За допомогою проєкційного об'єктива щілина, що світиться, проєктується на контрольовану поверхню. У результаті утворюються дві світлові смуги: А, розташована на поверхні покриття, та В, розташована на межі покриття-основа (смуги орієнтовані перпендикулярно площині рисунку).

Об'єктив створює дійсні зображення смуг А' та В' у площині матричного фотоприймача. Відстань між зображеннями залежить від товщини покриття відповідно до виразу (2.8). Плоске дзеркало 2 задає кут спостереження  $\alpha_0$ . Від лінійного збільшення об'єктива  $\beta_{об}$  залежить діапазон і точність контролю. З виразу (2.8) для визначення діапазону та точності отримаємо:

$$t = \frac{2 \cdot \sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha_0}}{\beta_{об} \cdot \sin 2\alpha_0} \cdot d_{\phi_m}, \quad (3.1)$$

$$\Delta t = \frac{2 \cdot \sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha_0}}{\beta_{об} \cdot \sin 2\alpha_0} \cdot \Delta d_{\phi_m}. \quad (3.2)$$

Вибираючи кут спостереження  $45^\circ$  з виразів (3.1) та (3.2), одержимо:

$$t = \frac{2 \cdot \sqrt{n^2 - \sin^2 45^\circ}}{\beta_{об} \cdot \sin(2 \cdot 45^\circ)} \cdot d_{\phi_m} = \frac{\sqrt{2} \cdot \sqrt{2n^2 - 1}}{\beta_{об}} \cdot d_{\phi_m}, \quad (3.3)$$

$$\Delta t = \frac{2 \cdot \sqrt{n^2 - \sin^2 45^\circ}}{\beta_{об} \cdot \sin(2 \cdot 45^\circ)} \cdot \Delta d_{\phi_m} = \frac{\sqrt{2} \cdot \sqrt{2n^2 - 1}}{\beta_{об}} \cdot \Delta d_{\phi_m} \quad (3.4)$$

Задаємо максимальне значення товщини покриття для контролю рівним  $t_{max} = 0,5$  мм. Розмір чутливої області вибраної фотоматриці за висотою дорівнює 5,7 мм. Для отримання можливості контролювати відстань між зображеннями світлової смуги, необхідно розрізняти і самі смуги (рис.3.8).



Рисунок 3.8 – Зображення на фотоматриці при максимальній товщині покриття

Задаємо, що максимально можлива відстань  $d_{max}$  між краями смуг на зображенні повинна бути обмежена 5 мм. Використовуючи задані значення  $t_{max}$  та  $d_{max}$  з виразу (3.3) для лінійного збільшення об'єктива отримаємо:

$$\beta_{об} = \sqrt{2} \cdot \sqrt{2n^2 - 1} \cdot \frac{d_{max}}{t_{max}}, \quad (3.5)$$

$$\beta_{об} = \sqrt{2} \cdot \sqrt{2n^2 - 1} \cdot \frac{5}{0,5} = 10\sqrt{2} \cdot \sqrt{2n^2 - 1}, \quad (3.6)$$

Показник заломлення більшості прозорих та слабо прозорих матеріалів лежить в діапазоні від 1,4 до 1,8. З виразу (3.6) для показника заломлення  $n = 1,4$  значення лінійного збільшення буде дорівнювати:

$$\beta_{об} = 10\sqrt{2} \cdot \sqrt{2 \cdot 1,4^2 - 1} = 24,16,$$

а при  $n = 1,8$ :

$$\beta_{об} = 10\sqrt{2} \cdot \sqrt{2 \cdot 1,8^2 - 1} = 33,1.$$

Остаточне значення лінійного збільшення об'єктива не повинно перевищувати отримані значення. Відповідно до цього приймаємо  $\beta_{об} = 24$ .

Найбільша точність контролю характеризується мінімальним відхиленням товщини покриття  $\Delta t$ , яке можна зафіксувати. При зміні товщини покриття на  $\Delta t$  відстань між зображеннями смуги зміниться на  $\Delta d_{фм}$ . Мінімальне значення  $\Delta d_{фм}$ , яке може бути зафіксоване, дорівнює міжпіксельній відстані, яка для вибраної фотоматриці складає 0,3 мкм. З врахуванням цього з виразу (3.4) для точності контролю при  $n = 1,4$  отримаємо:

$$\Delta t = \frac{\sqrt{2} \cdot \sqrt{2 \cdot 1,4^2 - 1}}{24} \cdot 0,3 = 0,03 \text{ (мкм)},$$

при  $n = 1,8$ :

$$\Delta t = \frac{\sqrt{2} \cdot \sqrt{2 \cdot 1,8^2 - 1}}{24} \cdot 0,3 = 0,04 \text{ (мкм)},$$

Таким чином при лінійному збільшенні рівному 24 та куті спостереження  $45^\circ$  можна здійснювати контроль товщини прозорих та слабо прозорих покриттів з точністю до 0,04 мкм в діапазоні від 0,04 до 500 мкм.

Лінійне збільшення  $\beta$ , що визначає масштаб зображення, залежить від фокусної відстані об'єктива та положення предмета [51], [52]:

$$\beta = -y' / y = -f / z = -z' / f'. \quad (3.7)$$

де  $z$  – відстань між переднім фокусом об'єктива та предметом;

$z'$  – відстань між заднім фокусом об'єктива та зображенням;

$f$  та  $f'$  – передня та задня фокусні відстані об'єктива, відповідно (при розташуванні об'єктива в однорідному середовищі  $f = -f'$ ).

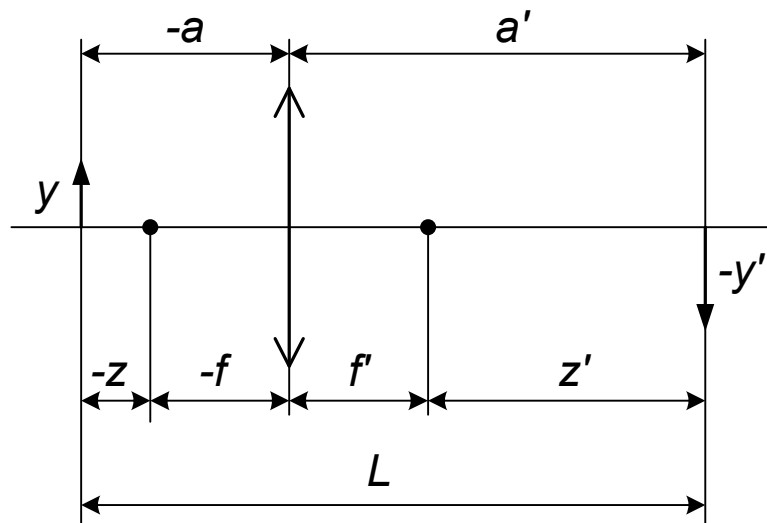


Рисунок 3.9 – Схема формування зображення об'єктивом

З рис. 3.9 видно, що відстань  $a$  між об'єктивом та предметом дорівнює:

$$-a = -z - f, \quad (3.8)$$

а між предметом та зображенням:

$$L = -z - f + f' + z' = -z + 2f' + z', \quad (3.9)$$

З врахуванням виразу (3.7) вирази (3.8) та (3.9) набудуть вигляду:

$$a = \frac{f'}{\beta} + f' = f' \cdot \frac{1 + \beta}{\beta}, \quad (3.10)$$

$$L = -z - f + f' + z' = \frac{f'}{\beta} + 2f' + \beta \cdot f' = f' \cdot \frac{1 + \beta + \beta^2}{\beta}. \quad (3.11)$$

З виразу (3.10) маємо:

$$f' = \frac{a \cdot \beta}{1 + \beta}. \quad (3.12)$$

З конструктивних міркувань вибираємо  $a = 31$  мм. Тоді з виразу (3.12) з врахуванням того, що  $\beta = 24$ , для фокусної відстані об'єктива отримаємо:

$$f' = \frac{31 \cdot 24}{1 + 24} = 29,7 \text{ (мм)}$$

На основі отриманого значення відстань між предметом та зображенням на основі виразу (3.11) складе:

$$L = 29,7 \cdot \frac{1 + 24 + 24^2}{24} = 721,2 \text{ (мм)}$$

Отримане значення є прийнятним.

При прийнятих параметрах відстань між заднім фокусом об'єктива та зображенням з врахуванням (3.7) буде дорівнювати:

$$z' = 24 \cdot 28,8 = 691,2 \text{ (мм)}$$

Зображення буде віддалено від об'єктива на (див. рис.3.7):

$$a' = 28,8 + 691,2 = 720 \text{ (мм)}$$

Параксіальний аналіз основних оптичних параметрів об'єктива будемо проводити у програмі OSLO EDU. На рис. 3.10 наведений вікно з вхідними

даними. Результати розрахунку основних оптичних параметрів об'єктива наведені на рис. 3.11.

Як видно з результатів розрахунку, фокусна відстань об'єктива дорівнює 29,7 мм.

SRF	RADIUS	THICKNESS	APERTURE RADIUS	GLASS	SPECIAL
OBJ	0.000000	1.0000e+20	1.0000e+14	AIR	
AST	375.563000	5.166000	25.495500	N-BK7	C
2	-77.742000	3.170000	25.495500	E-F3	C
3	-189.924000	0.000000	25.495500	AIR	
IMS	0.000000	0.000000	24.875697		S

Рисунок 3.10 – Вхідні дані для параксiального аналізу об'єктива

```

*PARAXIAL SETUP OF LENS

APERTURE
Entrance beam radius: * 25.000000      Image axial ray slope: -0.083913
Object num. aperture: 2.5000e-19      F-number: 5.958535
Image num. aperture: 0.083913        Working F-number: 5.958535

FIELD
Field angle: * 5.7296e-05             Object height: -1.0000e+14
Gaussian image height: 0.000298      Chief ray ims height: 5.3795e-06

CONJUGATES
Object distance: 1.0000e+20           Srf 1 to prin. pt. 1: 3.917588
Gaussian image dist.: 296.445355     Srf 3 to prin. pt. 2: -1.481390
Overall lens length: 8.336000        Total track length: 1.0000e+20
Paraxial magnification: -2.9793e-18  Srf 3 to image srf: --

OTHER DATA
Entrance pupil radius: 25.000000     Srf 1 to entrance pup.: --
Exit pupil radius: 25.333118         Srf 3 to exit pupil: -5.451179
Lagrange invariant: -2.5000e-05      Petzval radius: -416.208040
Effective focal length: 297.926745

SPOT DIAGRAMS
Aperture divisions: 17.030000        Gaussian apod. spec.: off
X 1/e^2 entr. irradi.: 1.000000     Y 1/e^2 entr. irradi.: 1.000000
  
```

Рисунок 3.11 – Основні оптичні параметри об'єктива

Оптична схема об'єктива, отримана у програмі OSLO EDU, наведена на рис. 3.12.

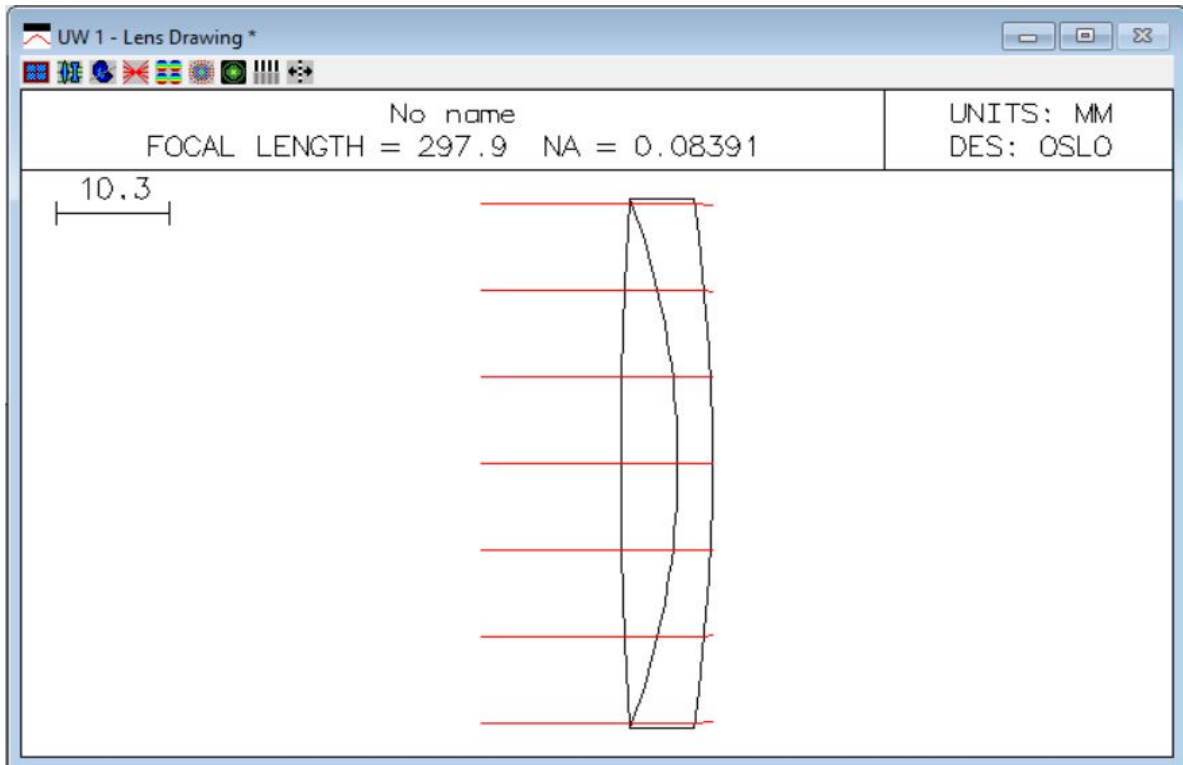


Рисунок 3.12 – Оптична схема об'єктива

Результати розрахунку координат апертурного та головного променів на кожній із заломлюваних поверхню об'єктива наведені на рис. 3.13 (PY – висота падіння, PU – кут розповсюдження та PI – кут падіння апертурного променя, PYC – висота падіння, PUC – кут розповсюдження та PIC – кут падіння головного променя).

SRF	PY	PU	PI	PYC	PUC	PIC
0	--	2.5000e-19	2.5000e-19	-1.0000e+14	1.0000e-06	1.0000e-06
1	25.000000	-0.022680	0.066567	--	6.5928e-07	1.0000e-06
2	24.882833	-0.002253	-0.342750	3.4059e-06	6.2260e-07	6.1547e-07
3	24.875692	-0.083913	-0.133230	5.3795e-06	9.8685e-07	5.9428e-07
4	24.875692	-0.083913	-0.083913	5.3795e-06	9.8685e-07	9.8685e-07

Рисунок 3.13 – Координати апертурного та головного променів

### 3.4 Висновки до розділу 3

За рахунок використання світлового випромінювання у спектральному діапазоні від 400 до 940 нм розроблений автоматизований засіб може бути використаний для вимірювального контролю за удосконаленим методом світлового перетину прозорих та слабо прозорих покриттів з різних матеріалів, включаючи оптичні елементи.

Для розрахунку параметрів проєкційного об'єктива засобу проведено модельний розрахунок основних конструкційних параметрів та здійснено комп'ютерне моделювання його конструкції та основних характеристик у пакеті прикладних програм OSLO EDU.

Реалізація запропонованого засобу на конструктивно та функціонально завершених модулях дозволяє скоротити час розробки, зменшити витрати на неї та спростити процес вимірювального контролю. Запропоновані рішення надають можливість здійснювати контроль товщини прозорих та слабо прозорих покриттів з точністю до 0,04 мкм в діапазоні від 0,04 до 500 мкм



## 4. ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

### 4.1 Проведення наукового аудиту науково-дослідної роботи

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 вимірювального контролю товщини покриття оптичних елементів характеризується відносно новим рівнем і становить – 30%.

Рівень теоретичного опрацювання за темою дослідження передбачає розробку засобу вимірювального контролю товщини покриття оптичних елементів відповідно становить – 60%.

Показник, який характеризує науковий ефект, визначається за формулою:

$$E_{\text{нау}} = 0,6 \cdot k_{\text{нов}} + 0,4 \cdot k_{\text{теор}} = 0,6 \cdot 0,3 + 0,4 \cdot 0,6 = 0,42,$$

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 вимірювального контролю товщини покриття оптичних елементів

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

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

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 розробки

Критерії	Експерти		
	Експерт 1	Експерт 2	Експерт 3
	Бали, виставлені експертами		
Технічна здійсненність концепції	2	2	3
Ринкові переваги (наявність аналогів)	3	3	2
Ринкові переваги (ціна продукту)	4	4	3
Ринкові переваги (технічні властивості)	4	2	3
Ринкові переваги (експлуатаційні витрати)	4	3	3
Ринкові перспективи (розмір ринку)	4	4	3
Ринкові перспективи (конкуренція)	3	3	2
Практична здійсненність (наявність фахівців)	3	3	3
Практична здійсненність (наявність фінансів)	3	4	4
Практична здійсненність (необхідність нових матеріалів)	2	3	3
Практична здійсненність (термін реалізації)	3	3	3
Практична здійсненність (розробка документів)	2	3	3
Сума балів	37	37	35
Середньоарифметична сума балів, СБ	36		

За результатами розрахунків, наведених в таблиці 4.1 робимо висновок про те, що науково-технічний рівень та комерційний потенціал засобу вимірювального контролю товщини покриття оптичних елементів – вище середнього. Досягнення такого рівня обумовлене зростанням швидкодії та ефективності нової технології.

### 4.3 Розрахунок витрат на здійснення науково-дослідної роботи

Розглянемо спочатку витрати на оплату праці.

Перша стаття – основна заробітна плата дослідників.

Витрати на основну заробітну плату дослідників ( $Z_0$ ) розраховують відповідно до посадових окладів працівників, за формулою:

$$Z_0 = \frac{M}{T_p} \cdot t,$$

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 4.2.

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.
Керівник	12000	571	5	2855
Програміст	10000	476	5	2380
Консультант	10000	476	3	2380
Всього:				7615

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 електронних вузлів	7	4	88,4	1,5	619
Налагодження оптичних та оптико-механічних вузлів	5	4	88,4	1,5	442
Всього					1061

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:

$$Z_d = 0,1 \cdot (Z_o + Z_p) = 0,1 \cdot (7615 + 1061) = 867,6 \text{ грн.}$$

Далі розглянемо відрахування на соціальні заходи.

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

$$\begin{aligned} N_zp &= 0,22 \cdot (Z_o + Z_p + Z_d) = \\ &= 0,22 \cdot (38418 + 867,6 + 3841,8) = 2100 \text{ грн.} \end{aligned}$$

де  $Z_0$  – основна заробітна плата розробників, грн.;  $Z_p$  – основна заробітна плата робітників, грн.;  $Z_d$  – додаткова заробітна плата всіх розробників та робітників, грн.;  $\beta$  – ставка єдиного внеску на загальнообов’язкове державне соціальне страхування, % (приймаємо для 1-го класу професійності ризику 22%).

Окремий вид витрати – витрати на сировину та матеріали

До статті 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 розраховуються окремо для кожного виду матеріалів за формулою:

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

де  $H_j$  – 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	40	0,05	2
Припій ПОС	150	0,1	15
Монтажний провід МГТФ -0,25	170	0,15	25,5
З врахуванням коефіцієнта транспортування			49

Розрахуємо витрати на комплектуючі.

Витрати на комплектуючі К, 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
Одноплатний комп'ютер Raspberry Pi3	1300	1	1300
Матричний фотоприймач	200	1	200
Світлодіоди	12	5	60
Індикатор LCD	100	1	100
Електродвигун	150	2	300
Драйвер електроприводу	170	1	170
Резистори С2-23-0,125	0,25	8	2
Сферичне дихроїчне дзеркало	25	5	125
Плоске дзеркало	20	3	60
Циліндрична лінза	25	1	25
Проекційний об'єктив	150	1	150
Об'єктивкамери	100	1	100
Механічні деталі і кріплення	250	1	250
Всього з врахуванням коефіцієнта транспортних витрат			3268

Розрахуємо амортизацію обладнання для розробки.

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

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

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

де  $C_6$  – загальна балансова вартість всього обладнання, комп'ютерів, приміщень тощо, що використовувались для виконання даного етапу роботи, грн.;  $t$  – термін використання основного фонду, місяці;  $T_v$  – 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	15000	5	4	1000
Паяльна станція	4000	3	1	111
Оптичний монтажний стіл	7000	5	1	117
Всього	1228			

Додаємо витрати на електроенергію для науково-виробничих цілей.

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

$$V_e = \sum \frac{W_i \cdot t_i \cdot C_e \cdot K_{впi}}{ККД} = \frac{0,25 \cdot 10000 \cdot 4,52 \cdot 0,5}{0,98} = 5765 \text{ грн.},$$

$W_i$  – встановлена потужність обладнання, кВт;  $t_i$  – тривалість роботи обладнання на етапі дослідження, год.;  $C_e$  – вартість 1 кВт електроенергії, грн.;  $K_{впi}$  – коефіцієнт використання потужності; ККД – коефіцієнт корисної дії обладнання.

В даному випадку працює лише ПК із наступними параметрами: потужність ПК – 0,25 кВт, тривалість роботи ПК – 10000 годин, ККД – 0,98,  $K_{впi}$  – 0,5. Вартість 1 кВт електроенергії за даними енергопостачальної компанії у 2021 році становить 4,52 грн.

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:

$$I_v = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{N_{iv}}{100\%} = (7615 + 1061) \cdot \frac{50}{100} = 4338 \text{ грн.},$$

де  $N_{iv}$  – норма нарахування за статтею «Інші витрати».

Розрахуємо також 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 (загальновиробничі) витрати розраховуються як 100...150% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою:

$$V_{nzv} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{N_{nzv}}{100\%} = (7615 + 1061) \cdot \frac{150}{100} = 13014 \text{ грн.},$$

де  $N_{nzv}$  – норма нарахування за статтею «Накладні (загальновиробничі) витрати».

Таким чином, визначимо загальні витрати на проведення науково-дослідної роботи. Витрати на проведення науково-дослідної роботи розраховуються як сума всіх попередніх статей витрат за формулою:

$$\begin{aligned} V_{zag} &= Z_o + Z_p + Z_{dod} + Z_m + M + K_v + V_{spec} + V_{prg} + A_{obl} + V_e + \\ &\quad + V_{sv} + V_{sp} + I_v + V_{nzv} = \\ &= 7615 + 1061 + 867,6 + 2100 + 49 + 3268 + 0 + 0 + 1228 + 5765 + 0 + \\ &\quad + 0 + 4338 + 13014 = 39306 \text{ грн.} \end{aligned}$$

Визначимо загальні витрати на дослідження і розробку засобу



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

$$ЗВ = \frac{Взаг}{\eta} = \frac{39306}{0,4} = 98265 \text{ грн.},$$

де  $\eta$  – 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  $\eta = 0,9$ .

#### **4.4 Розрахунок економічної ефективності науково-технічної розробки та її можливої комерціалізації**

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 вимірювального контролю товщини покриття оптичних елементів, тому основу майбутнього економічного ефекту буде формувати:  $\Delta N$  – 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;  $Цб$  – вартість послуги у році до впровадження інформаційної системи;  $\pm \Delta Цо$  – зміна вартості послуги (зростання чи зниження) від впровадження результатів науково-технічної розробки в аналізовані періоди часу.

Можливе збільшення чистого прибутку у потенційного інвестора  $\Delta \Pi$  для кожного із років, протягом яких очікується отримання позитивних результатів

від можливого впровадження та комерціалізації науково-технічної розробки, розраховується за формулою:

$$\Delta\Pi_i = (\pm\Delta C_0 \cdot N + C_0 \cdot \Delta N_i) \cdot \lambda \cdot \rho \cdot \left(1 - \frac{\vartheta}{100}\right),$$

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);  $\pm\Delta C_0$  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;  $C_0$  – основний якісний показник, який визначає ціну реалізації нової науково-технічної розробки в аналізованому році;  $C_b$  – основний якісний показник, який визначає ціну реалізації існуючої (базової) науково-технічної розробки у році до впровадження результатів;  $\Delta N$  – 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);  $\lambda$  – коефіцієнт, який враховує сплату потенційним інвестором податку на додану вартість. У 2021 році ставка податку на додану вартість становить 20%, а коефіцієнт  $\lambda = 0,8333$ ;  $\rho$  – коефіцієнт, який враховує рентабельність інноваційного продукту (послуги). Рекомендується брати  $\rho = 0,2 \dots 0,5$ ;  $\vartheta$  – ставка податку на прибуток, який має сплачувати потенційний інвестор, у 2021 році  $\vartheta = 18\%$ .

Очікуваний термін життєвого циклу розробки 10 років, тому:

$$\begin{aligned} \Delta\Pi_1 &= (-15000 \cdot 1500 + 45000 \cdot 1000) \cdot 0,8333 \cdot 0,3 \cdot \left(1 - \frac{18}{100}\right) = \\ &= 87633995 \text{ грн.} \end{aligned}$$

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

$$ПП = \sum_{i=1}^T \frac{\Delta\Pi_i}{(1 + \tau)^t} = \frac{87633995}{(1 + 0,1)^{10}} + \dots \frac{12045120}{(1 + 0,1)^1} = 33786699 \text{ грн.},$$

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;  $\tau$  – 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:

$$PV = k_{\text{інв}} \cdot 3B = 2 \cdot 98265 = 196530 \text{ грн.}$$

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  $k_{\text{інв}} = 2 \dots 5$ , 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:

$$E_{\text{абс}} = ПП - PV = 33786699 - 196530 = 33590169 \text{ грн.},$$

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

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

Для остаточного прийняття рішення з цього питання необхідно розрахувати внутрішню економічну дохідність  $E_V$  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  $E_V$ , які можуть бути вкладені потенційним інвестором у впровадження та комерціалізацію науково-технічної розробки, розраховується за формулою:

$$E_V = \sqrt[T_{ж}]{1 + \frac{E_{абс}}{PV}} - 1 = \sqrt[10]{1 + \frac{33590169}{196530}} - 1 = 1,67,$$

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

Визначимо бар'єрну ставку дисконтування  $\tau_{мін}$ , 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  $\tau_{мін}$  визначається за формулою:

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

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  $E_V > \tau_{мін}$ , 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:

$$T_0 = \frac{1}{E_B} = \frac{1}{1,67} = 0,6 \text{ року} = 7,2 \text{ місяці.}$$

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.

#### **4.5 Висновки до розділу 4**

Економічна частина даної магістерської роботи містить розрахунок витрат на розробку та виготовлення нового технічного рішення сума яких складає 98265 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 7,2 місяці та величину абсолютної ефективності вкладених інвестицій у розробку засобу вимірювального контролю, яка склала 33786699 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 та класифікацію методів контролю товщини покриття оптичних матеріалів, проведено аналіз сучасних оптичних засобів контролю товщини покриття оптичних і слабопрозорих матеріалів.

Удосконалено метод світлового перетину для контролю товщини покриття оптичних і слабопрозорих матеріалів, в якому підвищено інформативність за рахунок розширення діапазону вимірювань, що відбувається при виборі оптимальної (за мінімумом спектрального поглинання) довжини хвилі світлодіодного випромінювача.

Проведено модельний розрахунок параметрів елементів та обґрунтовано вибору елементної бази засобу вимірювального контролю на основі запропонованого методу. Розроблено і проаналізовано структурну схему засобу, електричні схеми компонентів, схему автоматичного контролю товщини покриття елементів, спроектовано схеми оптичних блоків запропонованого засобу.

Розраховано економічну доцільність розробки та основні економічні показники її впровадження.

Запропоновані рішення у поєднанні з автоматизованою системою керування дозволяють розширити функціональні можливості засобів вимірювального контролю товщини покриття оптичних і слабопрозорих матеріалів за рахунок оптимізації вибору спектрального каналу випромінювання.

Розроблений оптико-електронний засіб дозволяє здійснювати автоматизований контроль параметрів прозорих та слабо прозорих покриттів з невисокою відбивальною здатністю поверхні, до якої не висувалися жорсткі вимоги до шорсткості. При цьому забезпечується можливість проводити контроль товщини та наявності дефектів по всій поверхні покриття безпосередньо на виробничій ділянці.

Запропоноване технічне рішення надає можливість здійснювати контроль товщини прозорих та слабо прозорих покриттів товщиною від 0,04 до 500 мкм з точністю до 0,04 мкм.

**СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ**

1. Защитные покрытия: учеб. пособие / М. Л. Лобанов, Н. И. Кардонина, Н. Г. Россина, А. С. Юровских. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2014. 200 с.
2. Глоба С. Н. Состояние методов и средств контроля толщины покрытий / С. Н. Глоба, Ле Чи Хиеу, Г. М. Сучков и др. // Вісник НТУ «ХП». – 2014. № 19 (1062). С. 84–112.
3. Потапов А. И., Сясько В. А. Неразрушающие методы и средства контроля толщины покрытия и изделий / Научное, методическое и справочное пособие. СПб: «Константа», 2009. 904 с.
4. Наумчик И.В. Неразрушающий контроль толщины покрытий / И. В. Наумчик, А. В. Шевченко, К. В. Алексеев // Фундаментальные исследования. - 2015. № 12. С. 935–939.
5. Комраков Б. М., Шапочкин Б. А. Измерение параметров оптических покрытий. – М.: Машиностроение, 1986. 132 с.
6. Андреев С. В., Губанов Л. А. Исследование оптических постоянных металлов // Оптические и лазерные технологии. Сб. стат. Санкт-Петербург. – 2001. С.74 – 83.
7. Неразрушающий контроль: Справочник: В 8 т. / Под общ. ред. В. В. Клюева. Т. 6: В 3 кн. Кн. 1: В. В. Клюев, В. Ф. Мужичкий, Э. С. Горкунов, В. Е. Щербинин. Магнитные методы контроля. М.: Машиностроение, 2006. 832 с.
8. Горбаш В. Г. Неразрушающий контроль в промышленности. Магнитный контроль / В. Г. Горбаш, М. Н. Делендик, П. Н. Павленко // Неразрушающий контроль и диагностика. 2011. № 2. С. 48 -63.
9. Сясько В.А. Бесконтактные радиационные методы и средства измерения толщины металлических покрытий. [Электронный ресурс]. Режим доступа:  
<https://constanta.ru/upload/medialibrary/6ab/6abb7081c0b01cb090a223e1a5992c49.pdf>
10. Седалищев В.Н. Методы и средства измерений неэлектрических величин. Учебное пособие. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2008. – 392 с.

11. Емкостные методы и средства измерения толщины пленок. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://studfile.net/preview/3909433/page:4/>
12. Неразрушающий контроль: Справочник: в 8 т. Под общ. ред. В. В. Клюева. Т. 3. Ультразвуковой контроль. – М.: Машиностроение, 2003. – 864 с
13. Сясько В. А. Перспективные методы измерения толщины защитных покрытий. Проблемы методов и метрологического обеспечения. [Электронная библиотека Белорусско-Российского университета]. Режим доступа: <http://e.biblio.bru.by/bitstream/handle/1212121212/4970/30-39.pdf?sequence=2&isAllowed=y>.
14. Цепулин В. Г. Метод определения параметров тонких пленок по анализу спектрального коэффициента отражения / В. Г. Цепулин // Молодежный научно-технический вестник. 2013. № 5. С. 41 – 47
15. Городничев В. А. Лидарный метод контроля толщины тонких пленок нефтепродуктов на безопасной для зрения длине волны излучения / В. А. Городничев, М. Л. Белов, Т. И. Копысова и др. // Радиостроение. 2018. №3. С. 17 – 29.
16. Боголюбова С. Ю. Эллипсометрические методы контроля параметров материалов и структур радиоэлектроники / С. Ю. Боголюбова, Е. Г. Полякова, Р. Р. Резвый // Радиопромышленность. 2016. №3. С. 59 – 62.
17. Юрин А. И. Контроль толщины нанопокровов / А. И. Юрин, В. В. Филимонов, Е. А. Карцев // Датчики и системы. 2012. №1. С. 60 – 65.
18. PCE-CT 26FN толщиномер покрытий. [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://pragmatic.com.ua/tolshinometry/pce\\_ct26n](https://pragmatic.com.ua/tolshinometry/pce_ct26n).
19. Толщиномер покрытий PosiTector 200. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.ntcexpert.ru/uc/uc2/1600-tolshinomer-pokrytij-positector-200>
20. Thermo Scientific RM 300 EL, RM 320 FW и RM 320 FSIR Измерители толщины лакокрасочных и органических покрытий. [Электронный ресурс]. Режим доступа: [http://www.thermo.com.cn/Resources/200802/productPDF\\_2142.pdf](http://www.thermo.com.cn/Resources/200802/productPDF_2142.pdf).
21. Лазерный эллипсометр SE 400adv. [Электронный ресурс]. Режим



доступу: [https://agrovектор.ru/physical\\_product/1696849-lazernyy-ellipsometr-se-400adv.html](https://agrovектор.ru/physical_product/1696849-lazernyy-ellipsometr-se-400adv.html).

22. Кондрашин В. И. Определение толщины тонких оптически прозрачных пленок  $SnO_2$  конвертным методом / В. И. Кондрашин // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион: Технические науки. Электроника, измерительная и радиотехника. 2016. №2(38). С. 93 – 101.

23. Белов М. Л. Лазерный рефлектометрический метод измерения толщины и оптических характеристик тонких пленок в процессе их роста / М. Л. Белов, А. М. Белов, В. А. Городничев и др. // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. “Приборостроение”. 2011. № 2. С. 16 – 24.

24. Секацкий, В. С., Мерзликина Н.В. С 28 Методы и средства измерений и контроля: Учебное пособие / В. С. Секацкий, Н.В. Мерзликина. Красноярск: ИПЦ СФУ, 2007. 286 с.

25. Вавилов В. П. Тепловой неразрушающий контроль материалов и изделий (обзор) / В. П. Вавилов // Дефектоскопия. 2017. № 10. С. 34 -47.

26. Мелюков Д. В. Технология бескалибровочной лазерной фототермической диагностики тонких слоев и покрытий / Д. В. Мелюков, А. Г. Григорьянц // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. “Машиностроение”. 2012. № 5. С. 104 – 114.

27. Скворцов Л. А. Основы фототермической радиометрии и лазерной термографии. М.: ТЕХНОСФЕРА, 2017. 220 с.

28. Методы оптических измерений. [Электронный ресурс]. Режим доступа:

[https://portal.tpu.ru/SHARED/s/STEPANOVSA/Study/UMKD\\_OiSI/Lecture4.pdf](https://portal.tpu.ru/SHARED/s/STEPANOVSA/Study/UMKD_OiSI/Lecture4.pdf).

29. Стригун Д. В. Пристрій оптичного контролю якості поверхонь деталей. НТКП ВНТУ. Факультет комп'ютерних систем і автоматики (м. Вінниця, 2021). [Электронный ресурс]. Режим доступа:

<https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fksa/all-fksa-2021/paper/view/12692/10657>.

30. Сергей Асмаков Электронные дисплеи: заглядывая в будущее. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://compress.ru/article.aspx?id=9645>.

31. Интерфейс USB: описание и основы устройств сопряжения. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.windxp.com.ru/usbinf.htm>.
32. Обзор рынка микроконтроллеров для встраиваемых приложений. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.russianelectronics.ru/leader-r/review/optic/349/doc/549/>
33. Raspberry Pi 3 Model B — одноплатный мини компьютер с 64-х битным 4-ядерным процессором ARM Cortex-A53. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://micro-pi.ru/raspberry-pi-3-model-b-rpi-bcm2837/>.
34. Raspberry Pi 3 Model B+. [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://minicomp.com.ua/raspberry-pi/raspberry-pi-3-model-b-plus?gclid=EAJalQobChMik8OG3NSG4gIVik8YCh3tkwNCEAQYASABEgJ3mPD\\_BwE](https://minicomp.com.ua/raspberry-pi/raspberry-pi-3-model-b-plus?gclid=EAJalQobChMik8OG3NSG4gIVik8YCh3tkwNCEAQYASABEgJ3mPD_BwE).
35. Пахомов С. ПЗС- и КМОП-сенсоры для цифровых фото- и видеокамер / КомпьютерПресс. № 12. 2001. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://compress.ru/article.aspx?id=12513>.
36. В чем различия матриц CMOS и CCD? [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://optimus-cctv.ru/stati/27-v-chem-razlichiya-matrits-cmos-i-ccd>.
37. 1/3.2-Inch 13 Mp CMOS Digital Image Sensor. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.gizbeat.com/wp-content/uploads/AR1335-D-PDF-framos.pdf>.
38. Цветной графический TFT-экран с тачем 320x240 / 3,2 дюйма для Raspberry Pi на ili9327. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://controller.in.ua/cvetnoj-graficheskij-tft-jekran-s-tachem-480x320---3-2%E2%80%9D-dlja-raspberry-pi>.
39. Сверхяркий светодиод LED 1W Neutral White 120 Lm BIN1. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://foton.ua/catalog/sverkhyarkie-svetodiody/led-1w-neutral-white-120-lm-bin1.html>.
40. Светодиод 1 Вт CYAN EPISTAR 500 нм. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://luxpl.com/product-7071211511>.
41. Specific Lighting LTPL-C034UVD405 – TME. [Электронный ресурс]. Режим доступа:

<https://www.tme.eu/Document/3a49aae9a125d797291d996b793d480c/LTPL-C034UVD405.pdf>

42. Светодиод ИК (инфракрасный) 1 Вт (1 W). [Електронний ресурс].  
Режим доступу: <https://pkf-elektroplast.com.ua/p60632731-svetodiod-infrakrasnyj.html>

43. Specific Lighting LTPL-C034UVD405 – TME. [Електронний ресурс].  
Режим доступу:  
<https://www.tme.eu/Document/3a49aae9a125d797291d996b793d480c/LTPL-C034UVD405.pdf>.

44. Драйвер двигателя L298N. [Електронний ресурс]. Режим доступу:  
<https://3d-diy.ru/wiki/arduino-moduli/drayver-dvigatelya-l298n/>.

45. Кожем'яко В.П., Павлов С.В., Тарновський М.Г. Оптоелектронна схемотехніка. Навчальний посібник. Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2008. - 189 с.

46. Заказнов Н.П. Теория оптических систем: Учебник для приборостроительных специальностей вузов / Н.П. Заказнов, С.И. Кирышин, В.Н. Кузичев. М.: Машиностроение, 1992. 448 с.

47. Кожем'яко В.П. Прикладна оптика: навч. посіб. Ч. 1. Основи теорії оптичних систем / В.П.Кожем'яко, М.Г.Тарновський; ВНТУ. Вінниця: ВНТУ, 2017. 107 с.

48. Міхеєнко Л.А., Мамута М.С. Оптичні вимірювання: Навчальний посібник. К.: НТУУ «КПІ», 2014. 190 с.

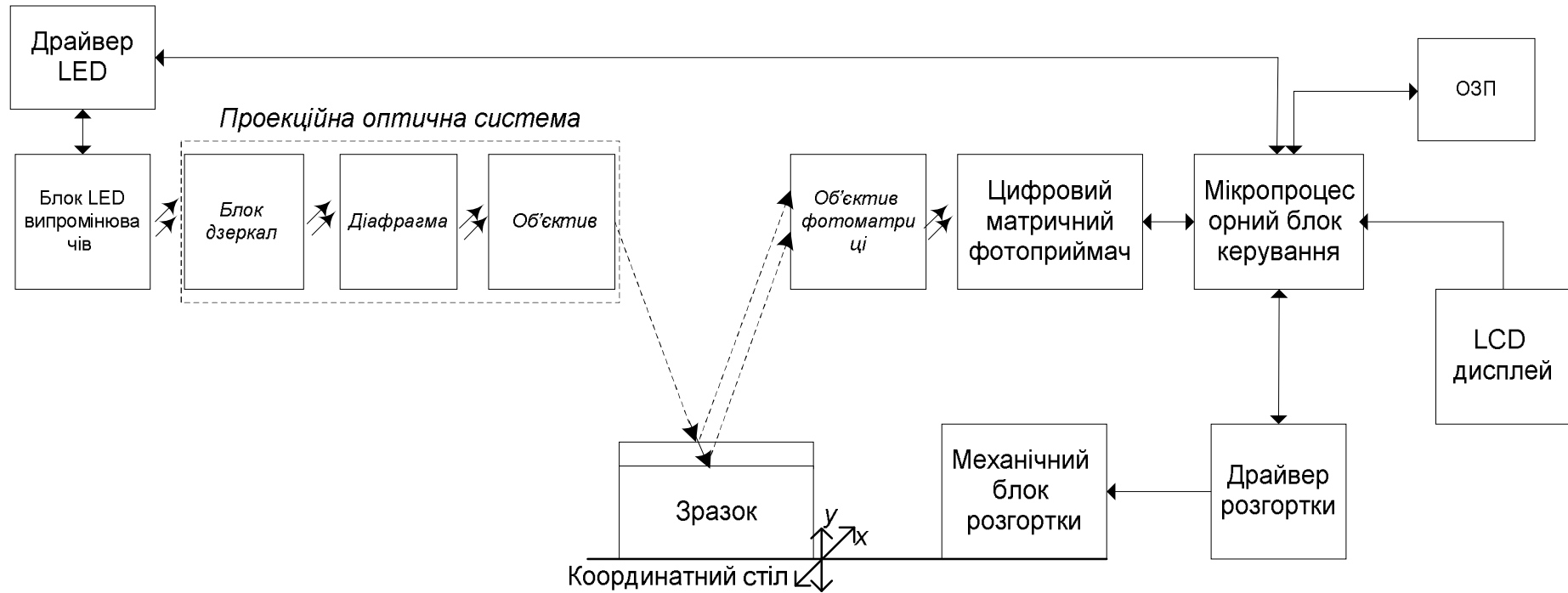
49. Андреев А.Н., Гаврилов Е.В., Ишанин Г.Г. Оптические измерения: Учеб. пособие. М.: Университетская книга; Логос, 2008. 416 с.

50. Методичні вказівки до виконання студентами-магістрантами економічної частини магістерських кваліфікаційних робіт / Уклад. В. О. Козловський – Вінниця: ВНТУ, 2012. – 22 с.

## **ДОДАТКИ**

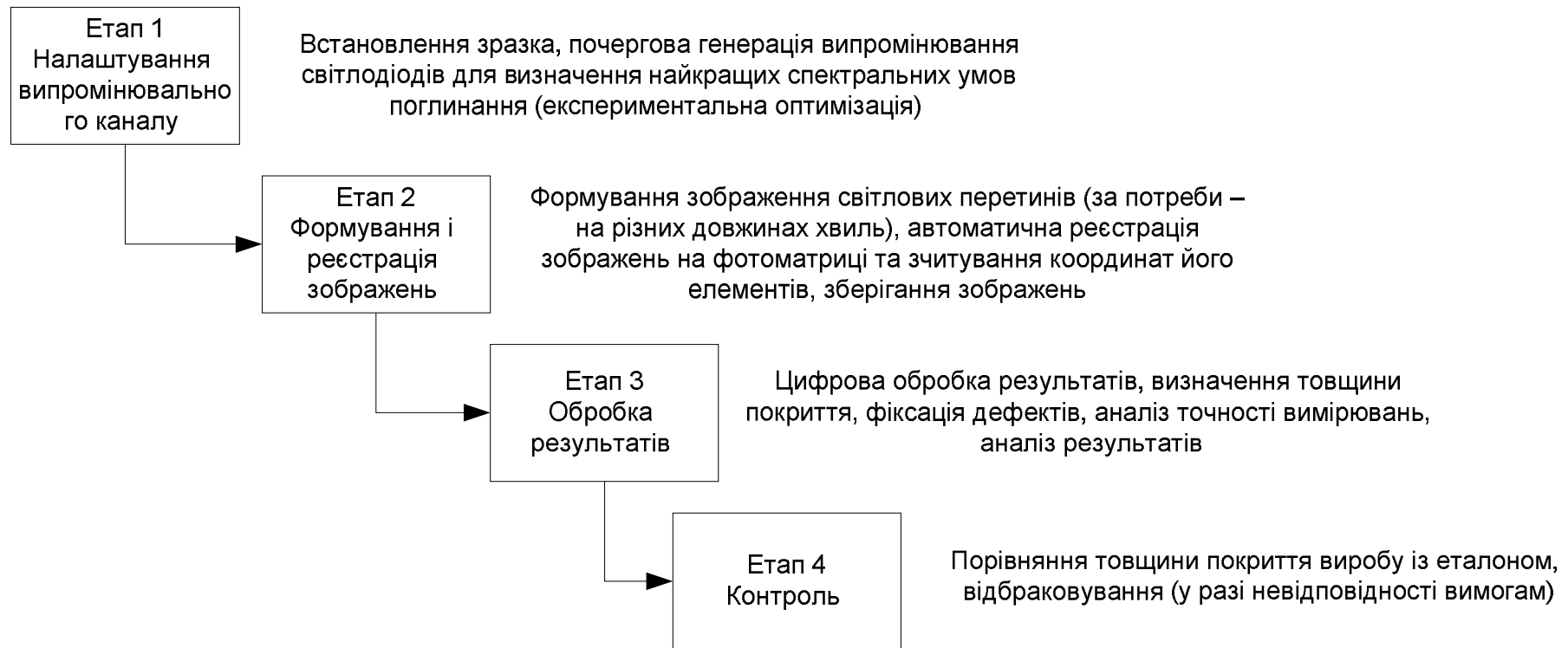
Додаток А  
(обов'язковий)

Схема структурна засобу вимірювального контролю товщини покриття оптичних елементів



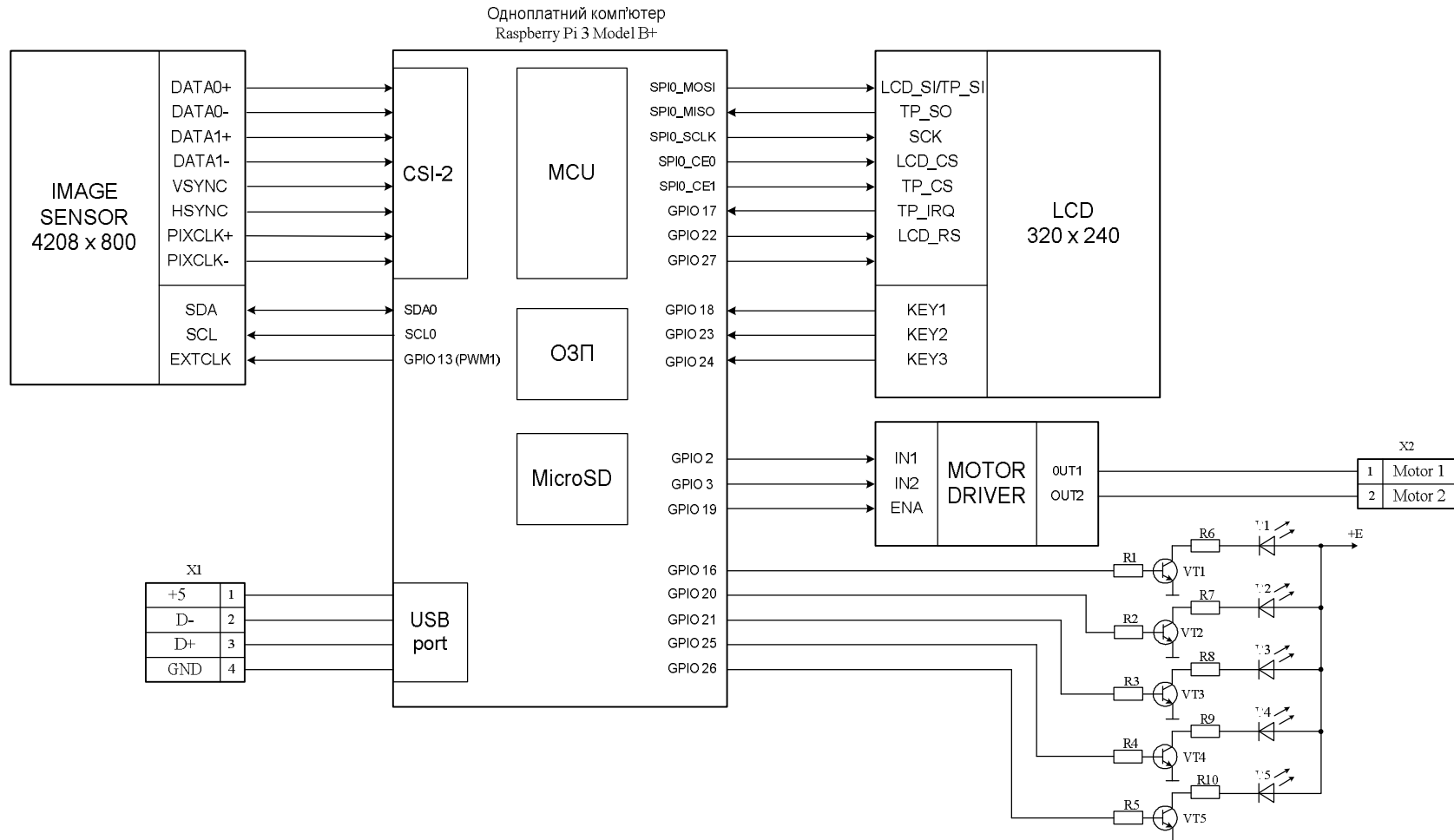
Додаток Б  
(обов'язковий)

Схема методу світлового перетину для вимірювального контролю товщини покриття



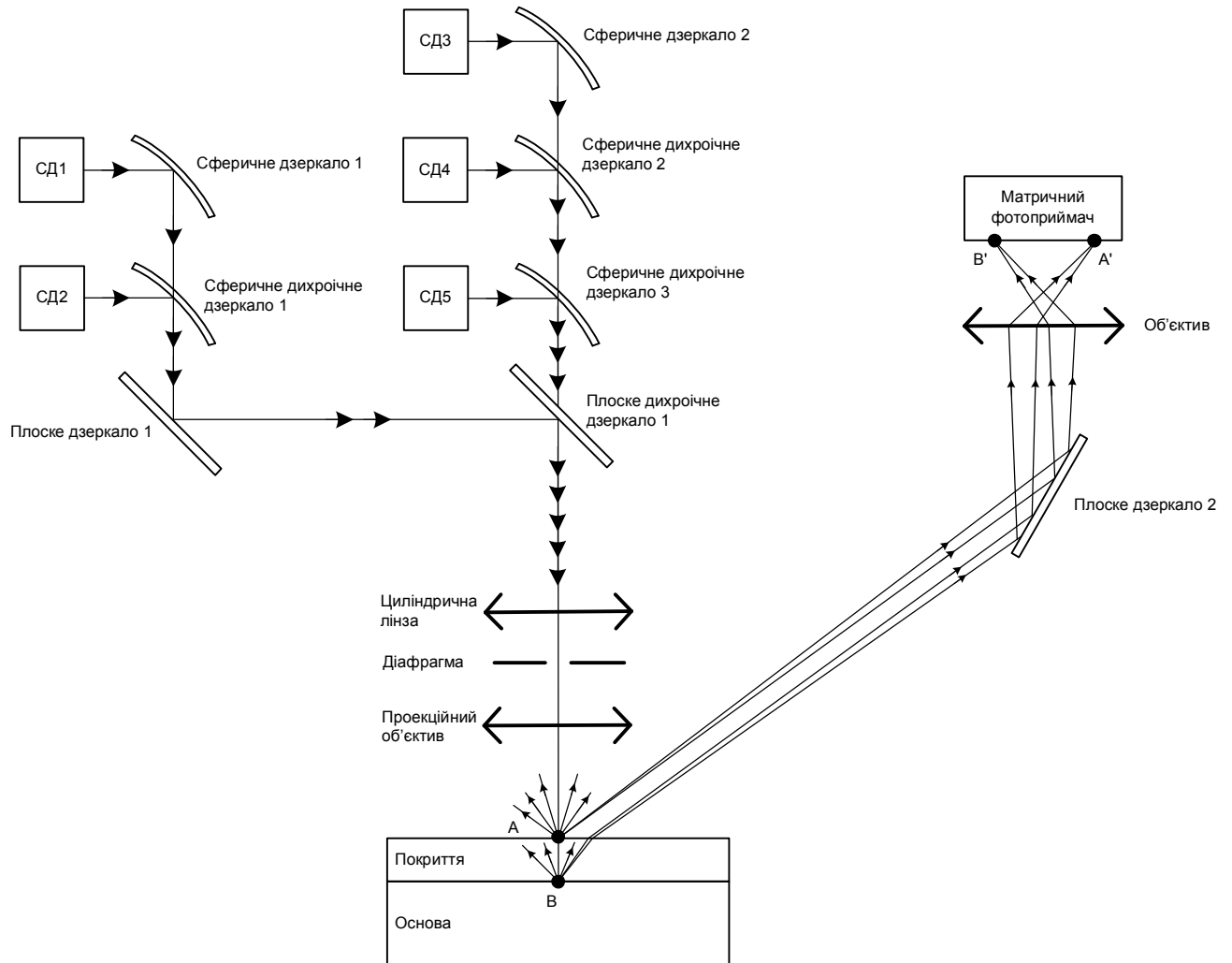
## Додаток В (обов'язковий)

### Функціональна електрична схема засобу вимірювального контролю



## Додаток Г (обов'язковий)

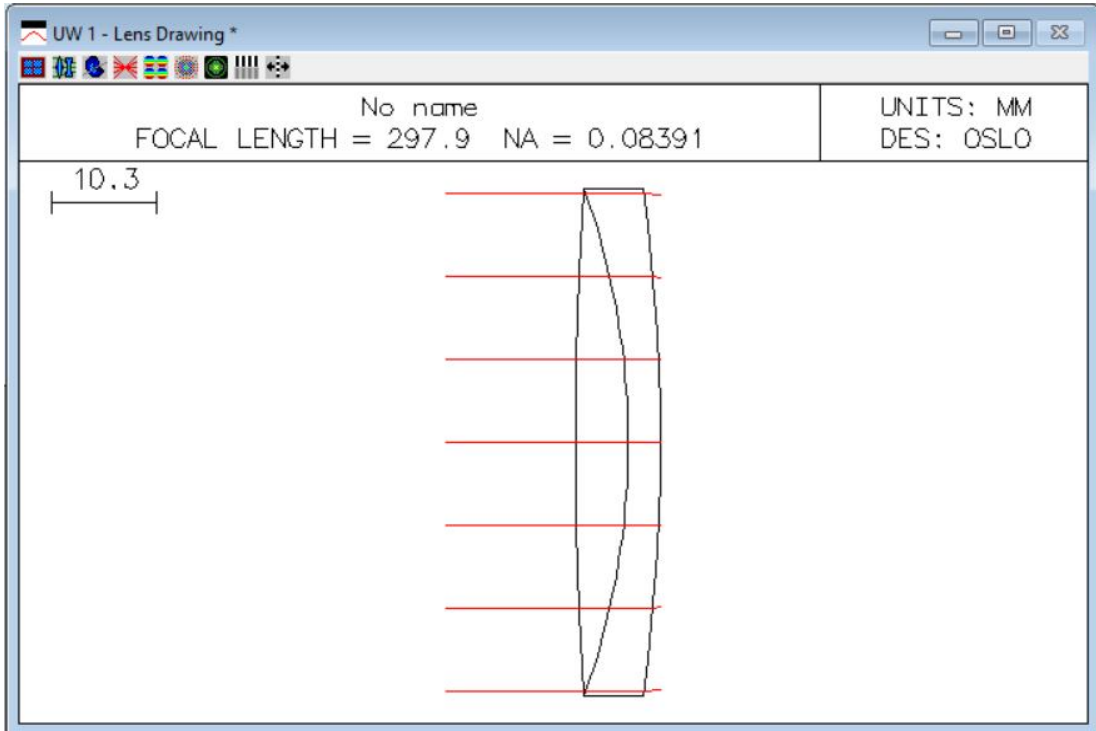
### Оптична схема засобу вимірювального контролю





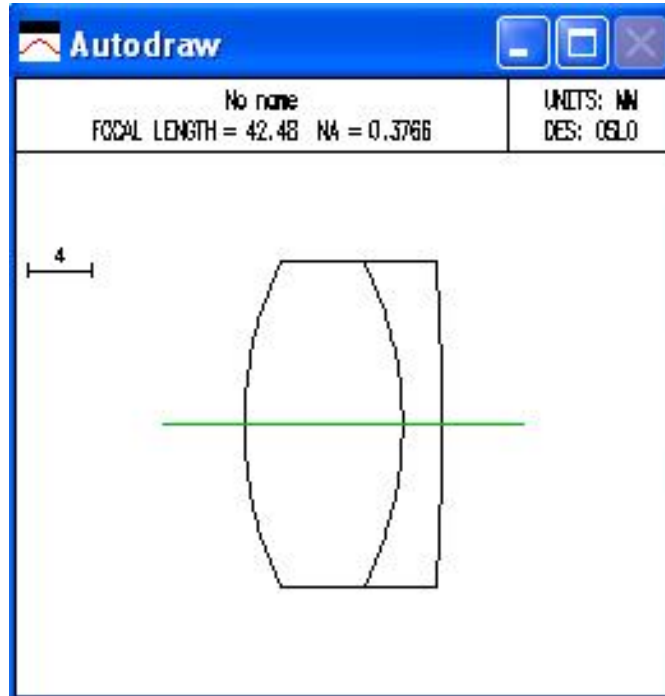
Додаток Д  
(ілюстративний)

Оптическая схема проекционного объектива (OSLO EDU)



Додаток Е  
(ілюстративний)

Оптическая схема об'єктива фотокамери



Додаток Є  
(обов'язковий)

**ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ НАВЧАЛЬНОЇ (КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ) РОБОТИ**

Назва роботи: Засіб вимірювального контролю товщини покриття оптичних елементів

Тип роботи: кваліфікаційна робота

(кваліфікаційна робота, курсовий проект (робота), реферат, аналітичний огляд, інше – зазначити)

Підрозділ: кафедра ЛОТ, ФКСА, ЛТО-20м

(кафедра, факультет, навчальна група)

Науковий керівник: Тужанський С.Є., доц. каф. ЛОТ

(прізвище, ініціали, посада)

Показники звіту подібності

<i>Plagiat.pl (StrikePlagiarism)</i>		<i>Unicheck</i>	
КП1	-	Оригінальність	98,6%
КП2	-		
Тривога/Білі знаки	/	Схожість	1,4%

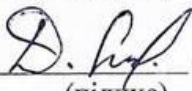
Аналіз звіту подібності (відмітити потрібне)

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

Виявлені у роботі запозичення не мають ознак плагіату, але їх надмірна кількість викликає сумніви щодо цінності роботи і відсутності самостійності її автора. Роботу направити на доопрацювання

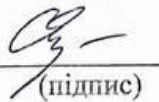
Виявлені у роботі запозичення є недобросовісними і мають ознаки плагіату та/або в ній містяться навмисні спотворення тексту, що вказують на спроби приховування недобросовісних запозичень

Заявляю, що ознайомлений (-на) з повним звітом подібності, який був згенерований Системою щодо роботи (додається)

Автор  Стригун Д.С.  
(підпис) (прізвище, ініціали)

Опис прийнятого рішення:

Допустити до захисту

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