

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
УЖГОРОДСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНЖЕНЕРНО-ТЕХНІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ
КАФЕДРА ПРИЛАДОБУДУВАННЯ

ДО ЗАХИСТУ ДОПУЩЕНО

Завідувач кафедри

доц. Чичура І.І.

“ ” 2024р.

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до кваліфікаційної магістерської роботи

на тему:

**АВТОМАТИЗОВАНИЙ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИЙ ДАТЧИК ТОВЩИНИ
ДІАЛЕКТРИЧНИХ ШАРІВ**

Виконав:

Лютянський Олексій Олексійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис)

Науковий керівник:

канд. фіз.-мат. наук, доцент Туряниця І.І.

(вчене звання, ПБ, посада)

(підпис)

Ужгород 2024

Ужгородський національний університет

Інженерно-технічний факультет

Кафедра приладобудування

Освітньо-кваліфікаційний рівень "Магістр"

Спеціальність 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та
роботехніка

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
доц. Чичура І.І.

“ ” _____ 2024р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ студенту Лютянському Олексію Олексійовичу (прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема КБР «Автоматизований волоконно-оптичний датчик товщини діелектричних шарів»

керівник роботи Туряниця Іван Іванович канд. фіз.-мат. наук, доцент

(вчене звання, ПІБ, науковий ступінь)

затверджені Розпорядженням по ІТФ від “ ” _____ 20__ року № ____.

2. Строк подання студентом роботи “5” грудня 2024 року.

3. Вихідні дані до роботи: Розрахувати параметри і сконструювати автоматизований пристрій для контролю товщини плівки при її зміні. В конструкції ПВП використати волоконно-оптичний Y-відгалужувач. В якості джерела і приймача випромінювання використати світлодіод та фотодіод. Робоча довжина хвилі оптичної системи $\lambda=0,8\text{мкм}$. Точність вимірювання товщини плівки $\Delta d = \frac{\lambda}{2}$. Під вакумний ковпак розмістити тільки багатомодове оптичне волокно.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки(перелік питань, які потрібно розробити): 1. Аналіз технічного завдання. 2. Аналіз літератури і аналогів. 3. Розрахунок передавальної характеристики. 4. Обґрунтування вибору структурної та принципової електричних схем. Розрахунок друкованої плати. Написання коду для Arduino. Висновки.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): 1. Схема комбінована структурна – 1ф. А3. 2. Схема електрична принципова – 1ф. А3. 3. Друкована плата – 1ф. А2. 4. Складальне креслення – 1ф. А3.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
	Порядок виконання КМР здобувач визначає самостійно		
1	Написання пояснювальної записки та передача її керівнику на перевірку .		
2	Оформлення конструкторських документів та передача їх на кафедру для нормоконтролю.		
3	Врахування зауважень керівника та нормо контролю, оформлення і подання комплекту всіх необхідних матеріалів на кафедру для захисту.		

Студент

_____ / _____
(підпис) (ініціали та прізвище)

Керівник роботи

_____ / _____
(підпис) (ініціали та прізвище)

Гарант ОП «Магістр»

_____ / _____
(підпис) (ініціали та прізвище)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної магістерської роботи: 61 с., 5 табл., 14 рис., 13 джерел.

ІНТЕРФЕРЕНЦІЯ, Y-ВІДГАЛУЖУВАЧ, ПЕРВИННИЙ ВИМІРЮВАЛЬНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ.

Об'єкт дослідження — автоматизований пристрій контролю діелектричних шарів.

Мета роботи — розробка автоматизованого пристрою контролю товщини плівки в процесі її зміни. Проект включає вибір первинного вимірювального перетворювача та розрахунок вихідних характеристик; вибір та обґрунтування структурної та принципової схем; розрахунок друкованої плати та оцінка надійності вузла.

Методи дослідження — пошук та збір інформації в інтернет ресурсах та відповідній літературі, а також аналіз знайденої інформації.

У результаті виконання роботи розроблена схема первинного вимірювального перетворювача з використанням Y-відгалужувача та написаний код для автоматизації пристрою за допомогою Arduino. Також був розроблений повний комплект документації для виготовлення електричного вузла блоку реєстрації.

ABSTRACT

Explanatory note to the qualifying master's thesis: 61 p., 5 chart, 14 draw., 13 sources.

INTERFERENCE, Y-BRANCH, PRIMARY MEASURING TRANSDUCER.

Object of research — automated dielectric layer control device.

The purpose of the work — development of an automated device for controlling film thickness during its change. The project includes the selection of the primary measuring transducer and the calculation of the output characteristics; selection and justification of structural and principle schemes; calculation of the printed circuit board and assessment of node reliability.

Research methods — search and collection of information in Internet resources and relevant literature, as well as analysis of the information found.

As a result of the work, a scheme of the primary measuring transducer using a Y-branch was developed and the code was written for automating the device using Arduino. A complete set of documentation was also developed for the manufacture of the electrical unit of the registration unit.

ЗМІСТ

Вступ.....	(8)
1 АНАЛІЗ ТЕХНІЧНОГО ЗАВДАННЯ.....	(9)
2 ОГЛЯД АНАЛОГІВ ПЕРВИННОГО ВИМІРЮВАЛЬНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА.....	(10)
2.1 Методи визначення товщини плівок.....	(10)
2.2 Оптичний метод.....	(11)
2.3 Мікрозважування.....	(13)
2.4 Радіометричний метод.....	(13)
2.5 Метод кварцового вібратора.....	(14)
3 ПРОЕКТУВАННЯ ПЕРВИННОГО ВИМІРЮВАЛЬНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА.....	(17)
3.1 Пояснення вибору структури ПВП.....	(17)
3.2 Характеристика джерела випромінювання.....	(19)
3.3 Характеристика приймача випромінювання.....	(21)
3.4 Характеристика оптичного волокна	(23)
3.5 Розрахунок світлової енергії, що падає у оптичне волокно.....	(23)
3.6 Розрахунок інтерферуючих променів.....	(24)
3.7 Розрахунок струму фотодіода.....	(27)
3.8 Графік залежності вихідної напруги від часу.....	(29)
4 ПРОЕКТУВАННЯ БЛОКУ СИСТЕМИ РЕЄСТРАЦІЇ.....	(32)
4.1 Огляд схем підсилення.....	(32)
4.2 Обґрунтування вибору комбінованої структурної схеми.....	(34)
4.3 Обґрунтування вибору принципової схеми.....	(35)
4.4 Розрахунок друкованої плати.....	(36)
4.5 Оцінка показників надійності.....	(40)

КМР.АКІТ.19050030. 01.000 ПЗ							
Зм.	Арк	№ докум	Підпис	Дата			
розробив		Лютянський О.О.			Автоматизований волоконно-оптичний датчик товщини діелектричних шарів	Літера	Аркуш
Перевірив		Турияниця І.І.				у	6
							55
Н. Контр.						УжНУ, ІТФ 2 курс магістр гр. АКІТ	
Затв.							

5 АВТОМАТИЗАЦІЯ З ДОПОМОГОЮ ARDUINO	(48)
5.1 Мета додавання Arduino.....	(48)
5.2 Огляд нових елементів.....	(48)
5.3 Алгоритм роботи системи.....	(51)
5.4 Перемикання між парами світлодіодів та фотодіодів.....	(52)
5.5 Підключення елементів до Arduino.....	(53)
5.6 Код для програми Arduino.....	(54)
Висновки.....	(59)
Список використаних джерел.....	(61)
Додатки.....	(63)

ВСТУП

Блок контролю товщини плівки в процесі її зміни займає важливе місце в системі нанесення діелектричних плівок, виготовлення інтерференційних фільтрів та ін. Тому постає проблема високої точності і зручності вимірювання товщини плівки, зменшення маси та габаритів вимірювального блоку, також виведення інформації в зручній формі для користувача.

Було обрано метод вимірювання товщини плівки, який базується на реєстрації інтерференційної картини. Перевагами даного методу є більша автоматизація, на відмінну від інших видів, достатньо велика точність вимірювання. Також пристрій який працює за даним методом є можливість зробити якомога простим та надійним. Це досягається також використанням в конструкції ПВП волоконно-оптичного Y-відгалужувача.

Метою даного проекту є розробка автоматизованого пристрою для контролю товщини плівки в процесі її зміни. До проекту входить вибір первинного вимірювального перетворювача та розрахунок вихідної характеристики; вибір та обґрунтування структурної та принципової схем; розрахунок друкованої плати та оцінка надійності вузла.

					КМР.АКІТ.19050030. 01.000 ПЗ	Арк
Зм.	Арк	№ докум	Підпис	Дата		8

1 АНАЛІЗ ТЕХНІЧНОГО ЗАВДАННЯ

Вимірювач товщини тонких плівок призначений для контролю товщини плівки в процесі її зміни.

Принцип роботи — реєстрація інтерференційної картини на тонких плівках

Даний пристрій повинен складатись із двох основних блоків:

- Первинний вимірювальний перетворювач, що складається з волоконно-оптичного У-відгалужувача, джерела випромінювання та приймача.
- Блок реєстрації, який представляє собою електронний блок для обробки вихідного сигналу з ПВП та виведення сигналу в потрібному вигляді для мікроконтролера, який дозволить повністю автоматизувати процес реєстрації піків інтерференційної картини, або самописця для наглядності результату.

ПВП приладу буде містити волоконно-оптичний У-відгалужувач. В якості джерела випромінювання та приймача слід використати ствітлодіод та фотодіод, які працюють в інфрачервоній області спектру.

Особливістю даного приладу є простота конструкції ПВП, яка не вимагає чистки, завдяки використанню оптоволокна, також конструкція проста в складанні та використанні.

2 ОГЛЯД АНАЛОГІВ ПВП

2.1 Основні методи визначення товщини плівок

Для одержання високоякісних плівок з наперед заданими і повторюваними параметрами необхідно строго контролювати процес конденсації плівки. Вимірювання швидкості нарощування у процесі її напilenня та контроль товщини тонкоплівкових шарів являє собою значну технічну трудність. Різноманітність хімічного складу напильованих матеріалів і різні способи, що застосовуються для їх випаровування, а також широкий діапазон потрібних швидкостей нарощування змушують використовувати методи вимірювання, основані на різних хімічних принципах.

Зараз детально опрацьовано багато систем визначення товщин плівок і швидкості нарощування, кожна з яких має свої переваги недоліки порівняно з іншими. Вибір того чи іншого способу визначається конкретними умовами та фізичними властивостями плівок.

До приладів, призначених для контролю швидкості нарощування плівки та її товщини, ставляться такі специфічні вимоги.

1. Мінімальна похибка при вимірюванні як швидкості нарощування так і товщини плівки – порядку декількох процентів.

2. Висока надійність, стабільність у часі та незалежність показників від умов роботи.

3. Придатність для вимірювання товщини як металевих, так і діелектричних плівок.

4. Незмінність у широких діапазонах товщин чутливості датчиків.

По фізичних принципах методи вимірювання товщини і швидкості нанесення тонких плівок можна розділити на три основні типи

- Методи, засновані на вимірюванні параметрів напиленої на підкладку плівки на протязі визначеного проміжку часу.

- Методи, засновані на вимірюванні параметрів потоку матеріалу, який випаровується.

- Методи, засновані на вимірюванні реакції якої-небудь контрольної підкладки на удари частинок, які випаровуються, об її поверхню.

Методи першого класу дозволяють безпосередньо вимірювати масу (або товщину) плівки в процесі нанесення, а методи другого і третього типів - швидкість нанесення плівки. Незважаючи на це користуючись методами першого типу, в принципі завжди можна визначити і швидкість нанесення плівки шляхом вимірювання приростів товщини (або маси) шару за одиницю часу (диференціювання), а користуючись методами другого і третього типів можна визначити масу (або товщину) плівки шляхом додавання приростів швидкості нанесення за одиницю часу (інтегрування).

Методи вимірювання товщини і швидкості нанесення плівок, не дивлячись на різновид фізичних принципів, які лежать в їх основі володіють універсальністю і можуть бути використані для вимірювання як параметрів потоку матеріалу, що випаровується, так і параметрів плівки, яка наноситься на підкладку.

Опишемо деякі з найбільш поширених методик вимірювання товщин плівок.

2.2 Оптичний метод

Оптичні методи в основному базуються на явищах інтерференції. Наприклад, «кольоровий метод» вимірювання товщини тонких плівок заснований на інтерференції рівно нахилених променів, паралельних поверхні тонкої плівки. При визначенні товщини під час напилення спостерігають колір контрольної пластини у відбитому світлі. За допомогою цього методу можна вимірювати плівки довільної товщини до 1 м. При використанні методу смуг рівного хроматичного порядку

(РХП) на паралельних пластинах спостерігаються інтерференційні картини з малими повітряними проміжками.

Процес вимірювання ділиться на кілька операцій. Спочатку готують плоско-паралельні пластини і на одну з пластин наносять досліджувану плівку. При цьому частина плати екранується шматком фольги. Після напилення фольгу знімають, створюючи на дошці прямокутні сходи. Потім на цю пластину напилюється непрозорий шар срібла, повторюється вихідний рельєф, а на іншу пластину наноситься напівпрозорий шар срібла. Пластини притискаються одна до одної і освітлюються паралельними пучками білого світла. Інтерференційна картина, що утворюється в повітряному проміжку між пластинами, проектується через лінзу на щілину спектрометра. На фокальній площині утворюються дві системи ліній з однаковою послідовністю кольорів.

Точність вимірювання 0,5 мм. Цей метод служить для калібрування проти інших посередніх методів.

Товщину плівки можна виміряти, вимірявши ступінь поглинання світла, коли воно проходить через плівку. Інтенсивність поглиненого світла описується наступним виразом:

$$I = I_0 \exp \left(\frac{-4\pi k t}{\gamma_0} \right) \quad (2.1)$$

Де k – коефіцієнт поглинання; t – товщина плівки; γ_0 – довжина хвилі.

Але I та I_0 повинні бути заміряні всередині середовища, що поглинає. Тому 0 слід замінити на $(1-R)$, де R – коефіцієнт відбивання, який значно залежить від товщини

Цей метод найбільше підходить для вимірювання товщини металевих плівок, що полегшує контроль товщини багат шарових покриттів.

2.3 Мікрозважування

Для вимірювань тонкоплівкових покриттів користуються мікровагами різної складності їх пристроїв. Принципи, на яких засновані прилади такого роду, дуже різноманітні.

1. Згин тонкої стрічки, один з кінців якої нерухомий, а на інший поміщається тіло, що зважується;
2. Розтяг тонких кварцових чи вольфрамових спіралей (пружинні б терези);
3. Скручування довгої тонкої нитки (крутильні терези);
4. Магнітні підвіски;
5. Системи підвісів на обертовій осі.

Найкращі результати дає використання в пристроях автоматичного балансування, розроблених на дії електростатичних або електромагнітних сил, що виводять систему з рівноваги.

За допомогою мікрозважування можна проводити перевірку інших посередніх методів контролю товщини.

2.4 Радіометричний метод

При використанні цього методу плівка, товщину якої потрібно виміряти, і контрольний зразок, виготовлений з того самого матеріалу одночасно опромінюється в пучку α - або β - частинок. Товщина визначається через співвідношення утворених внаслідок опромінення активностей плівки і контрольного зразка.

2.5 Метод кварцового вібратора

Найбільш поширеним методом контролю процесу напилення в сучасних промислових установках для отримання тонких плівок став метод "кварцового резонатора", який вирізняється серед інших універсальністю та простотою проведення необхідних вимірів. Ним можна вимірювати як товщини плівок, так і швидкість нарощування плівок різних матеріалів – металів, діелектриків напівпровідників. Перевага також полягає в тому, що товщину та швидкість осадження можна безпосередньо контролювати під час процесу напилення.

В основі методу лежить вимірювання відхилення резонансної частоти кварцового кристалічного резонатора, зумовленого зміною маси кварцової пластини. При збільшенні маси пластини механічного резонатора, подібно до кристалу кварцу, внаслідок нанесення речовини на його поверхню, резонансна частота зміщується. Можна показати, що

$$J_n^2 = J_{0n}^2 \frac{1}{1 + \frac{K_n^2 m}{A \rho t}} \quad (2.2)$$

де J_n та J_{0n} – резонансні частоти збуреного та незбуреного кристалу; t – товщина пластинки; ρ – густина покриття; m – повна маса, що нанесена на площу A ; K_n – постійна; n – порядок обертогу. Таким чином,

$$\frac{\Delta J}{J_{0n}} = - \frac{K_m}{A \rho t} \quad (2.3)$$

І для основної частоти $n = 1$ маємо

$$\frac{m}{A} = - \frac{\rho t \Delta J}{K_j} \quad (2.4)$$

Введемо постійну N , що визначається як $N = j \cdot t$,

$$\Delta J = - \frac{j}{t} \cdot \frac{K}{\rho} \cdot \frac{m}{A} = \frac{A^2 K}{N \rho} \frac{m}{A} = C_j \frac{m}{A} \quad (2.5)$$

Тут C_j – постійна, що називається "масовою чутливістю" кристалу. Знак мінус показує, що приріст маси викликає зменшення резонансної частоти. На практиці для кожного кристалу кварцу величину визначають експериментально.

Однак є інша можливість визначити залежність зсуву частоти від товщини плівки. Запишемо залежність між зсувом частоти і зміною маси кварцевого резонатора

$$\frac{\Delta j}{j_0} = \frac{\Delta m}{m_0} \quad (2.6)$$

Якщо маса напильної плівки Δm , її густина ρ , площа, яку займає плівка на кварцовій пластині, S , то можна записати:

$$h = \frac{\Delta m}{\rho S} \quad \text{або} \quad h = \frac{m_0}{j_0 S} \cdot \frac{1}{\rho} \cdot \Delta j \quad (2.7)$$

На практиці правильно показати залежність товщини від частоти вимірювання кварцевого датчика, а не від зсуву частоти. Оскільки $\Delta j = j_0 - j$, то після перетворень маємо:

$$h = \frac{m_0}{S\rho} - \frac{m_0}{j_0 S\rho} j \quad (2.8)$$

Отже, залежність $h = \varphi(t)$ є прямою з кутовим коефіцієнтом $\frac{m_0}{j_0 S\rho}$.

Пропорційність між зсувом частоти та з масою 1 покриття зберігається при зміщенні частоти Δj до 5% від основного значення. Точність методу визначається точністю вимірювання частоти та зсуву частоти і при застосуванні сучасної радіоапаратури може досягти часток процента. Практично точність вимірювань лімітується точністю визначення постійної C_j . Однак кварцові кристали дуже чутливі до зміни температури, що є основним джерелом помилок при визначенні товщини. Крім цього, певне значення має адгезія до кварцевого матеріалу, що напильюється, оскільки при високих ($j \sim 10^7$ Гц) частотах відбувається самоочищення поверхні кварцової пластинки від бруду та сторонніх частинок.

Слід відзначити також, що густина плівок, знання якої необхідне для визначення товщини h , може відрізнятися від значення, властивого масивним зразкам. Це особливо проявляється при малих товщинах (порядку десятків ангстрем), де густина плівки – функція товщини.

					КМР.АКІТ.19050030. 01.000 ПЗ	Арк
Зм.	Арк	№ докум	Підпис	Дата		16

3 ПРОЕКТУВАННЯ ПВП

3.1 Обґрунтування вибору структури ПВП волоконно-оптичного датчика товщини

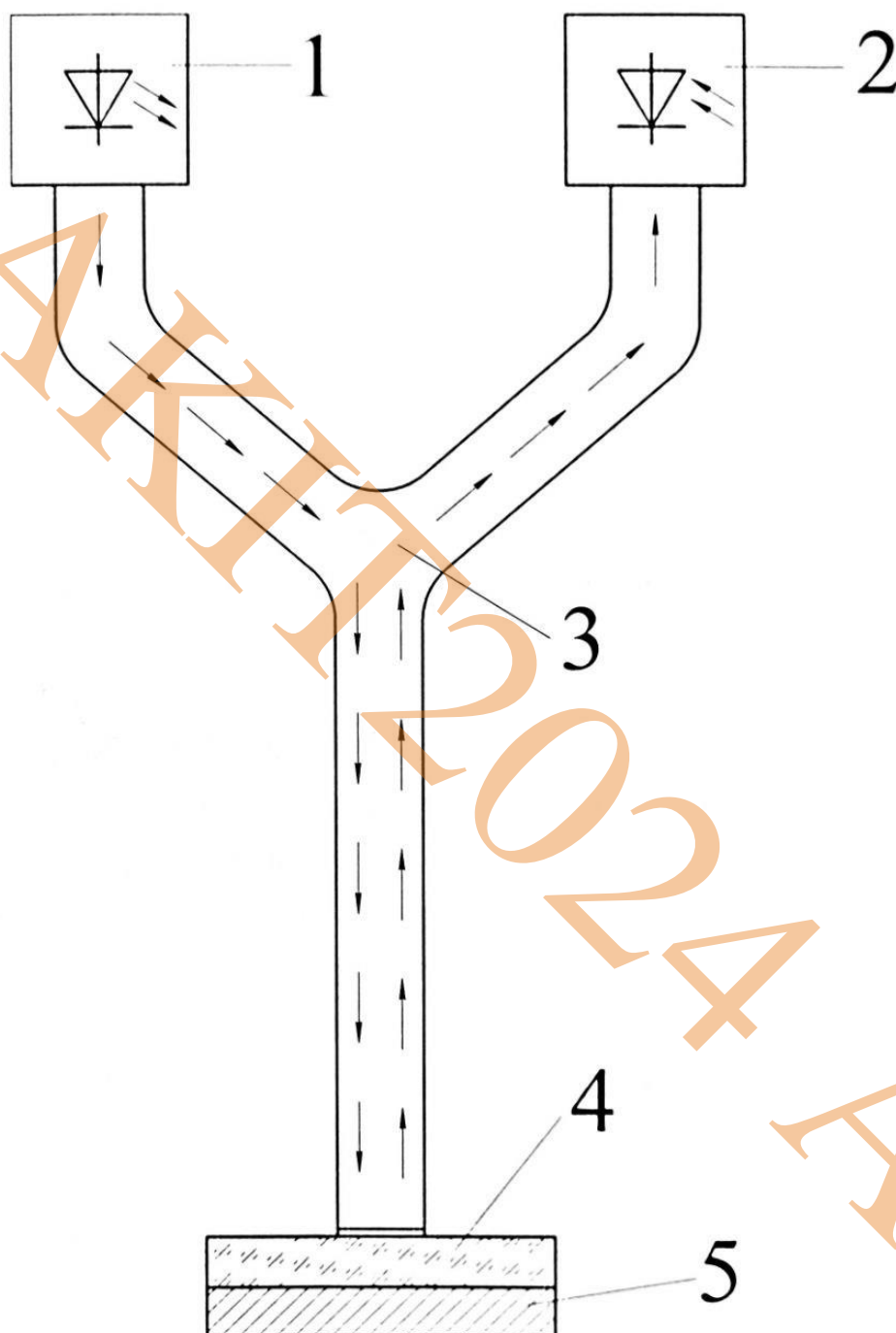


Рисунок 3.1 — Схема волоконно-оптичного датчика

Зм.	Арк	№ докум	Підпис	Дата

КМР.АКІТ.19050030. 01.000 ПЗ

Арк

17

Позначення елементів які наведені на рис.3.1:

- 1- Джерело випромінювання (світлодіод).
- 2- Приймач випромінювання (фотодіод).
- 3- Волоконно оптичний Y-відгалужувач.
- 4- Прозора підкладка.
- 5- Плівка, товщина якої контролюється.

Волоконно-оптичні датчики мають ряд переваг:

- Забезпечує передачу інформації на великі відстані з великою швидкістю.
- Волоконно-оптичні датчики мають велику стійкість до дії навколишнього середовища (волога, хімічні речовини, температура).
- Не проводять струм, тому не виникає явище індукції, на них не впливають електромагнітні хвилі.
- Принцип роботи волоконно-оптичних датчиків не є складним.
- Оптичне волокно є тонким, легким та досить гнучким, тому зручне у використанні.

Принцип роботи схеми зображеної на рис.3.1 наступний: напруга живлення подається на світлодіод, він випромінює оптичний сигнал який потрапляє у оптоволокно, далі він проходить через Y-відгалужувач і направляється на прозору підкладку, на яку з іншого боку наноситься плівка, яку ми повинні контролювати, відбившись від підкладки і плівки інтерферуючі промені направляються назад в оптоволокно і проходячи через Y-відгалужувач потрапляють на площадку приймача випромінювання, фотодіода, який перетворює світловий потік у електричний сигнал, що передається в блок обробки інформації, цей блок реєструє піки інтерференційної картини. При досягненні певної товщини мікроконтролер припиняє напilenня плівки.

Зм.	Арк	№ докум	Підпис	Дата

3.2 Характеристика джерела випромінювання.

Умовам оптичного узгодження відповідає лазерний світлодіод M8080-3-1230. Спектральна характеристика потужності випромінювання приведена на рис 3.2.

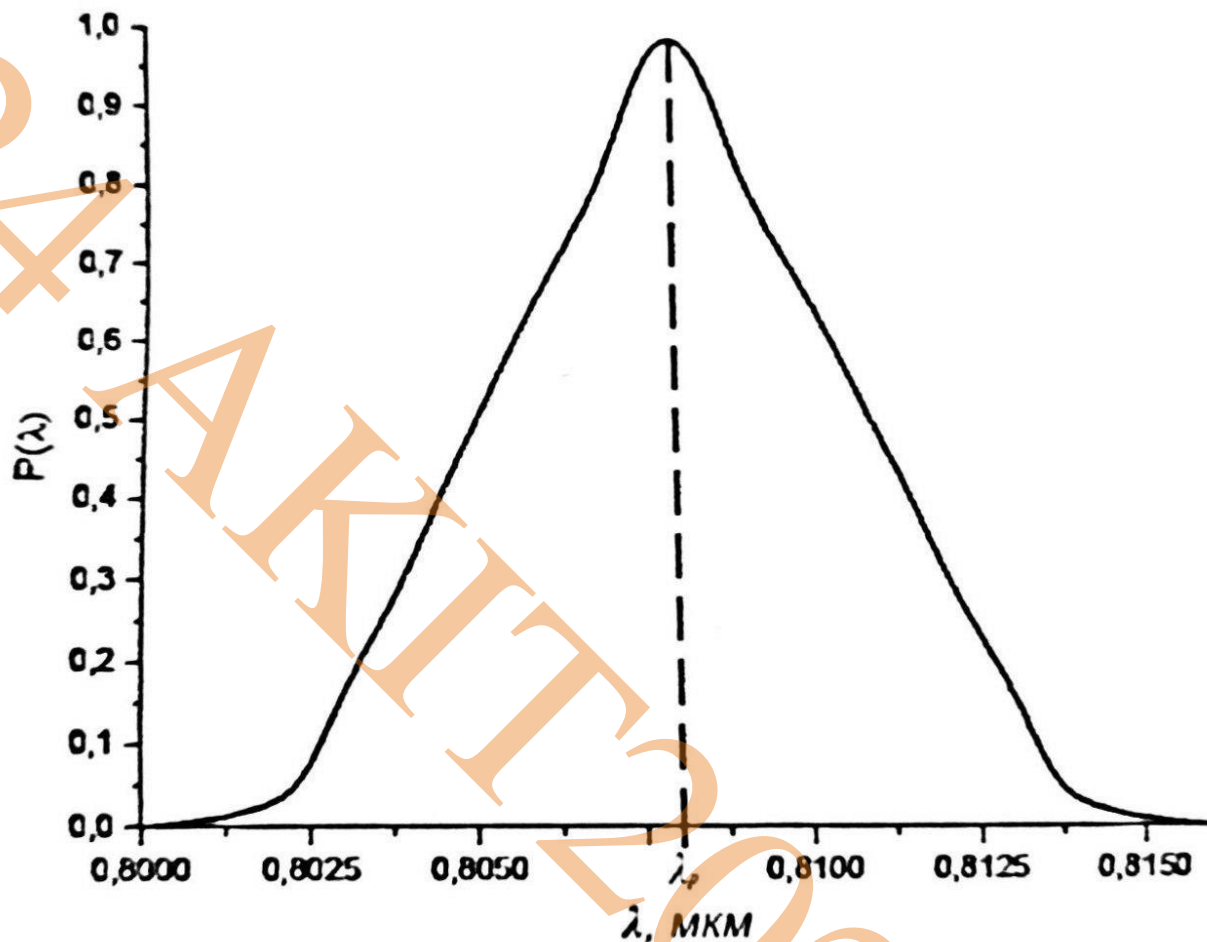


Рисунок 3.2 — Спектральна залежність потужності вимірювання світлодіода M8080-3-1230 ($\lambda_p=0,808$ мкм).

Характеристики світлодіода:

- Максимум спектрального розподілу знаходиться в діапазоні $\lambda=0,803...0,813$ мкм.
- Інтегральна потужність випромінювання при $I_{пр} = 100$ мА складає не менше 50 мВт.
- Оптимальний робочий струм 100 мА.

- Вихідний опір $R - 4,0 \text{ Ом}$.
- Діаметр вихідного світлового пучка $0,25 \text{ мм}$.
- Діапазон робочих температур $t -40 \dots 85^\circ \text{C}$

Також розглянемо додатковий варіант випромінювача, щоб можна було реалізувати зміну довжини хвилі, для розширення діапазону вибору речовин, товщину яких можемо контролювати. Під час проходження практики, проводив дослідження світлодіода Thorlabs M1300D3, його спектральна характеристика приведена на рис. 3.3.

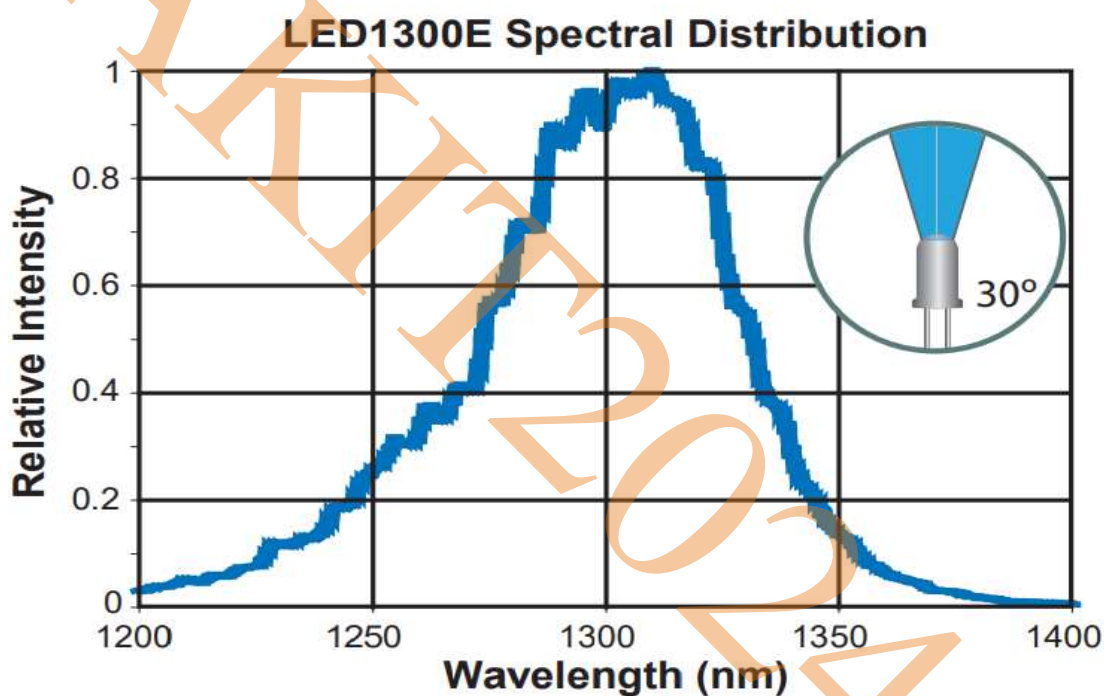


Рисунок 3.3 — Спектральна залежність потужності вимірювання світлодіода Thorlabs M1300D3.

Характеристики світлодіода:

- Тип: InGaAsP (індій-галій-арсенід-фосфідний)
- Довжина хвилі: 1300 нм

Зм.	Арк	№ докум	Підпис	Дата

-Спектральна ширина: близько 50-100 нм

Світлодіод M1300D3 випромінює у ближній інфрачервоній області (1300 нм), що є підходящим для вимірювання з інфрачервоними фотодіодами.

3.3 Характеристика приймача випромінювання

Діапазон чутливості багатьох фотодіодів значно ширший в порівнянні з випромінювальною здатністю світлодіода. Додатково при виборі фотодіода враховувалися конструктивні особливості щодо його стиковки з оптичним волокном для більш стабільної роботи обраної оптопари. Цим вимогам задовольняє фотодіод OPT101, спектральна характеристика чутливості якого приведена на рис 3.4.

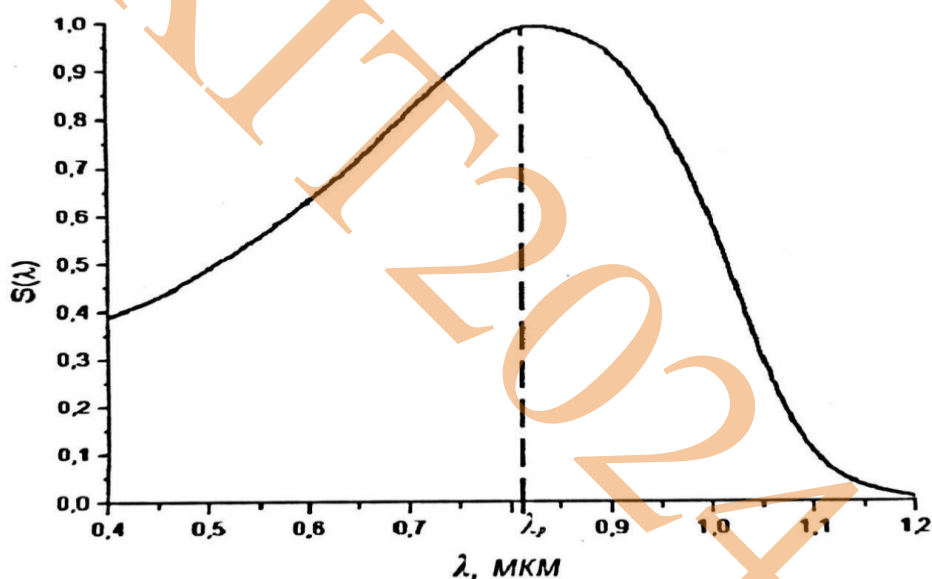


Рисунок 3.4 — Спектральна характеристика чутливості фотодіода OPT101($\lambda_p=0,808$ мкм).

Характеристика фотодіода:

- Струмова інтегральна чутливість $S_{\text{ін}} \geq 0,55$ А/Вт.
- Номінальна робоча напруга U_p —від 2,7 до 36В.

Зм.	Арк	№ докум	Підпис	Дата

- Постійна часу при включенні або виключенні не більше $\tau = 0,005\text{мкс}$.
- розмір чутливого елементу – $2,9 \times 2,9\text{мм}^2$.
- плоский кут зору $2 \cdot \beta$ не менше 36° .

Як у випадку з світлодіодом, розглянемо додатковий варіант, який так само досліджувався при проходженні практики, це фотодіод Hamamatsu G12180-003A. Також фотодіод Hamamatsu G12180-003A володіє високим коефіцієнтом чутливості саме на довжинах хвиль поблизу 1300 нм, що забезпечує найкраще узгодження для детекції випромінювання світлодіода Thorlabs M1300D3. Спектральну характеристику фотодіода Hamamatsu G12180-003A наведено на рис 3.5.

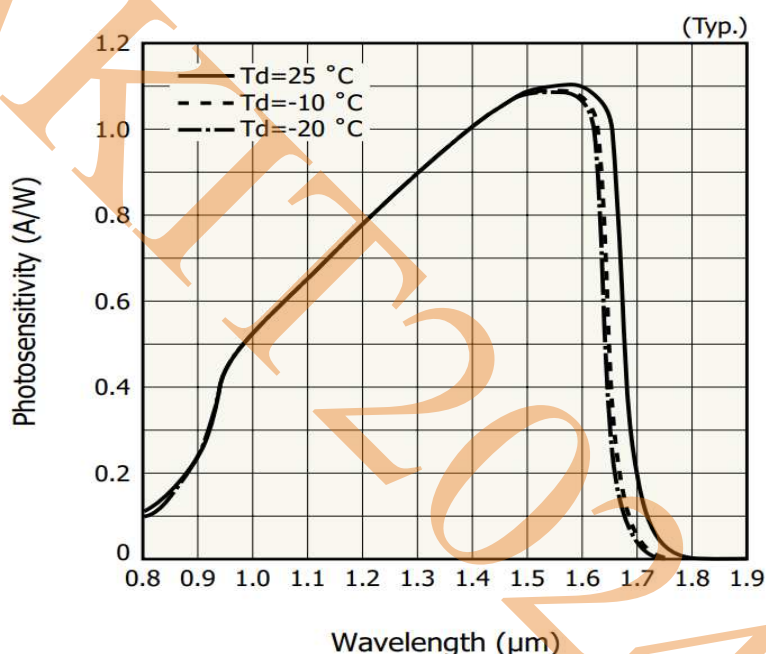


Рисунок 3.5 — Спектральна характеристика чутливості фотодіода Hamamatsu G12180-003A.

Характеристика фотодіода:

- Тип: InGaAs (індій-галій-арсенідний)
- Діапазон чутливості: 900 - 1700 нм
- Пікова чутливість: близько 1300 нм

Зм.	Арк	№ докум	Підпис	Дата

3.4 Характеристика оптичного волокна

- Матеріал волокна - кварц, легований бромом (FinMark PS001MM PVC).
- тип волокна - багатомодове.
- показник заломлення $n = 1,553$ на довжині хвилі $\lambda = 0,81$ мкм.
- діаметр серцевини – $d_c = 0,1$ мм.
- втрати у волокні $2,7 \dots 3,0$ дБ/км.
- робочий інтервал температури : від -60 до $+170^\circ\text{C}$.

3.5 Розрахунок світлової енергії, що попадає у оптичне волокно.

Величина електричного сигналу на виході фотодіода знаходяться в прямій залежності від величини світлового потоку. Оцінимо значення цієї світлової енергії. Нехай струм світлодіода дорівнює $I_{\text{пр}} = 50 \text{ мА}$. При цьому інтегральна потужність випромінювання буде становити $P_{\text{інт}} = 40 \cdot 10^{-3}$ Вт. Оскільки діаметри випромінюючої площадки світло діоду серцевини оптичного волокна різні, то в оптичне волокно при їх стиковці зайде тільки незначна частина світлової енергії $P_{\text{вх}}$, яку можна обчислити за формулою (4):

$$P_{\text{1вх}} = P_{\text{інт}} \cdot \frac{S_{\text{в}}}{S_{\text{д}}} \quad (3.1)$$

Де $S_{\text{в}}$ і $S_{\text{д}}$ – відповідно площі випромінюючої площадки світлодіоду і серцевини оптичного волокна. Враховуючи приведені технічні параметри відмічених елементів, обчислимо $P_{\text{1вх}} = 8 \cdot 10^{-6}$ Вт.

Величина $P_{\text{1вх}}$ є малою в зрівнянні з $P_{\text{інт}}$. Тому для збільшення величини світлового потоку, що надходить на оптичне волокно, використовуються оптичні з'єднувачі в які входять фокони. Це дозволить збільшити ефективність вводу світла в оптичне волокно в 4 рази, тоді $P_{\text{2вх}} = 32 \cdot 10^{-6}$ Вт.

					KMP.AKIT.19050030. 01.000 ПЗ	Арк
Зм.	Арк	№ докум	Підпис	Дата		23

3.6 Розрахунок інтерферуючих променів

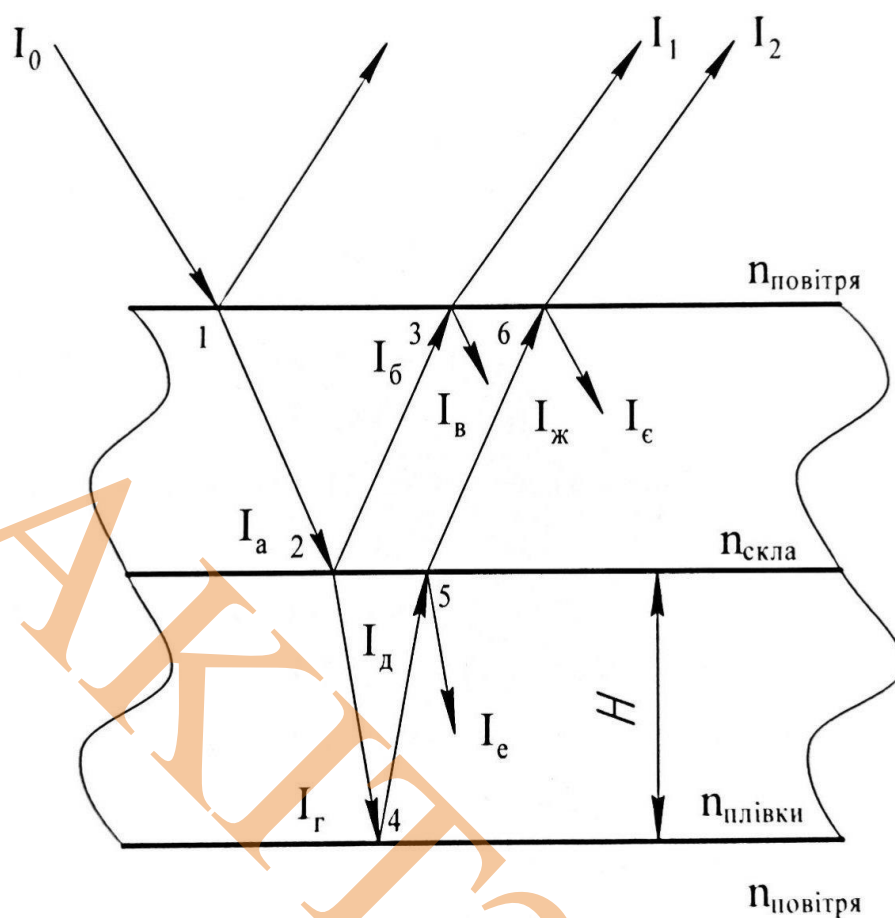


Рисунок 3.6 — Картина інтерференції в підкладці

На межі оптичних середовищ відбувається ослаблення світлового променя, і при нормальному попаданні променя на межу двох середовищ коефіцієнт пропускання визначається за формулою:

$$\tau = 1 - \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2 \quad (3.2)$$

Де n_1 і n_2 , показники заломлення суміжних середовищ.

Коефіцієнти відбивання середовищ визначаються за формулами:

$$\left(\frac{n_{\text{скла}} - n_{\text{пов.}}}{n_{\text{скла}} + n_{\text{пов.}}} \right)^2 = R_1 \quad (3.3)$$

$$\left(\frac{n_{\text{плівки}} - n_{\text{скла}}}{n_{\text{плівки}} + n_{\text{скла}}} \right)^2 = R_2 \quad (3.4)$$

Зм.	Арк	№ докум	Підпис	Дата

$$\left(\frac{n_{\text{плівки}} - n_{\text{пов.}}}{n_{\text{плівки}} + n_{\text{пов.}}}\right)^2 = R_3 \quad (3.5)$$

Знаходження інтенсивності променя I_1

Інтенсивність променя I_a в підкладці до точки 2, знаходиться за добутком інтенсивності світла що падає на підкладку I_0 на коефіцієнт ослаблення на границях середовищ (3.2):

$$I_a = (1 - R_1)I_0 \quad (3.6)$$

Інтенсивність променя I_6 який відбився в точці 2:

$$I_6 = I_a R_2 \quad (3.7)$$

Відбитий промінь I_b в точці 3:

$$I_b = I_a R_1 R_2 = (1 - R_1) I_0 R_1 R_2 \quad (3.8)$$

Інтенсивність променя I_1 що вийшов з підкладки визначається як різниця падаючого I_6 променя та відбитого I_b :

$$I_1 = I_6 - I_b = (1 - R_1)I_0 R_2 - (1 - R_1)I_0 R_1 R_2 = (1 - R_1)^2 I_0 R_2 \quad (3.9)$$

Знаходження інтенсивності променя I_2

Інтенсивність променя, що попадає в плівку з точки 2 визначається як різниця падаючого I_a променя та відбитого I_6 :

$$I_a - I_6 = I_a - I_a R_2 = I_a (1 - R_2) = I_0 (1 - R_1) (1 - R_2) \quad (3.10)$$

Плівка поглинає світло, тому врахуємо поглинання за законом Бугера-Ламберта-Бера, інтенсивність променя який попадає в точку 4 буде:

$$I_r = I_0 (1 - R_1) (1 - R_2) e^{-\alpha H} \quad (3.11)$$

де α – коефіцієнт поглинання, H – товщина плівки.

Промінь, що відбився в точці 4:

$$I_d = I_0 (1 - R_1) (1 - R_2) R_3 e^{-\alpha H} \quad (3.12)$$

Для променя I_d враховуємо поглинання при доходженні до точки 5:

$$I_d = I_0(1 - R_1)(1 - R_2)R_3e^{-\alpha H}e^{-\alpha H} = I_0(1 - R_1)(1 - R_2)R_3e^{-2\alpha H} \quad (3.13)$$

Інтенсивність променя що відбився в точці 5:

$$I_e = I_0(1 - R_1)(1 - R_2)R_3R_2e^{-2\alpha H} \quad (3.14)$$

Інтенсивність променя що попадає в підкладку з точки 5 визначається як різниця падаючого променя I_d і відбитого I_e :

$$\begin{aligned} I_e &= I_0(1 - R_1)(1 - R_2)R_3e^{-2\alpha H} - \\ &- I_0(1 - R_1)(1 - R_2)R_3R_2e^{-2\alpha H} = \\ &= I_0(1 - R_1)(1 - R_2)R_3e^{-2\alpha H}(1 - R_2) = \\ &= I_0(1 - R_1)(1 - R_2)^2R_3e^{-2\alpha H} \end{aligned} \quad (3.15)$$

Промінь, що відбився у точці 6:

$$I_{ж} = I_0(1 - R_1)(1 - R_2)^2R_3e^{-2\alpha H}R_1 \quad (3.16)$$

Інтенсивність променя який виходить з підкладки в точці 6 визначається як різниця падаючого променя $I_{ж}$ відбитого I_e :

$$I_2 = I_0(1 - R_1)^2(1 - R_2)^2R_3e^{-2\alpha H} \quad (3.17)$$

Інтерференція двох променів буде знаходитись за формулою:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1I_2}\cos\varphi \quad (3.18)$$

φ знаходиться за формулою:

$$\varphi = \frac{4\pi Hn}{\lambda} \quad (3.19)$$

Де λ – довжина хвилі, n – показник заломлення плівки.

Товщину плівки H розпишемо як добуток швидкості напilenня на час:

$$H = B \cdot t \quad (3.20)$$

Де V – швидкість напilenня (мкм/с), t – час напilenня (секунди).

3.7 Розрахунок струму фотодіода

В якості приймача випромінювання, як вже відмічалось, використовують фотодіод який перетворює потік світлового випромінювання в електричний сигнал. В аналітичних розрахунках струму фотодіода необхідно знати не тільки величину потоку, але і ефективність використання фотодіодом випромінювання світлодіода пов'язану з різними спектральними розподілами його випромінюючої здатності і чутливості фотодіоду. Струм фотодіода для нашого випадку можна оцінити за формулою

$$I_{\text{фд}} = \tau_{\text{о,р}} \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S^a(\lambda) \cdot P_{\lambda}^a(\lambda) \cdot \tau(\lambda) d\lambda \quad (3.21)$$

Де $S^a(\lambda)$ – спектральний розподіл чутливості фотодіода в абсолютних одиницях [А/Вт].

τ – пропускання ВОДТ. Цю величину будемо вважати сталою.

$\tau(\lambda)$ – спектральна залежність пропускання чутливого елементу при заданій температурі.

$(\lambda_1 - \lambda_2)$ – спектральний діапазон чутливості фотодіоду.

Визначення струму фотодіода за формулою (3.21) ускладнюється тим, що як правило, в характеристиках джерела і приймача випромінювання спектральні розподіли випромінювальної здатності і відносної чутливості фотоприймача приводяться не в абсолютних, а в відносних одиницях. $P^B(\lambda), S^B(\lambda)$ які визначаються як:

$$P^B(\lambda) = \frac{P_{\lambda}^a(\lambda)}{P_{\lambda_m}^a(\lambda_m)} = \frac{P^a(\lambda)}{P_m^a(\lambda_m)} \quad (3.22)$$

$$S^B(\lambda) = \frac{S^a(\lambda)}{S_m^a(\lambda_m)} \quad (3.23)$$

Де $S_m^a(\lambda_m)$, $P_m^a(\lambda_m)$ – максимальне значення чутливості S , випромінювальної здатності P відповідно, фотодіода і світлодіода на довжині хвилі λ_m , виражені в абсолютних одиницях.

Для знаходження $I_{\text{фд}}$ з виразу (3.21) необхідно знати $S^a(\lambda)$, $P^a(\lambda)$. Знайдемо їх з виразів (3.22) і (3.23).

$$S^a(\lambda) = S^B(\lambda) \cdot S_m^a(\lambda_m) \quad (3.24)$$

$$P^a(\lambda) = P^B(\lambda) \cdot P_m^a(\lambda_m) \quad (3.25)$$

Підставимо (3.25) і (3.26) у вираз (3.22) та отримаємо

$$I_{\text{фд}} = \tau_{\text{о,р}} \cdot S_m^a(\lambda_m) \cdot P_m^a(\lambda_m) \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S^B(\lambda) \cdot P^B(\lambda) \cdot \tau(\lambda) d\lambda \quad (3.26)$$

Величини $S_m^a(\lambda_m)$, $P_m^a(\lambda_m)$ в довідниках також не приводяться Частіше приводяться значення інтегральної чутливості $S_{\text{інт}}^a$ для фотодіода і випромінювальної здатності для світлодіода $P_{\text{інт}}^a$. [6].

З іншого боку, інтегральні значення $S_{\text{інт}}^a$, $P_{\text{інт}}^a$ у відповідності до [6], можуть бути представлені у вигляді:

$$S_{\text{інт}}^a = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S^a(\lambda) d\lambda / \int_0^\infty \varepsilon(\lambda) d\lambda \quad (3.27)$$

Підставивши в (27) замість $S^a(\lambda)$ вираз (3.24), отримаємо:

$$S_{\text{інт}} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S^B(\lambda) \cdot S_m^a(\lambda_m) d\lambda = S_m^a(\lambda_m) \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S^B(\lambda) d\lambda \quad (3.28)$$

З виразу (28) знайдемо значення $S_m^a(\lambda_m)$

$$S_m^a(\lambda_m) = \frac{S_{\text{інт}}}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S^B(\lambda) d\lambda} \quad (3.29)$$

$P_{\text{інт}}$ що входить в формулу (26) представимо як

$$P_{\text{інт}} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} P^a(\lambda) d\lambda = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} P^B(\lambda) \cdot P_m^a(\lambda_m) d\lambda =$$

$$=P_m^a(\lambda_m) \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} P^B(\lambda) d\lambda \quad (3.30)$$

Звідси:

$$P_m^a(\lambda_m) = \frac{P_{\text{інт}}}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} P^B(\lambda) d\lambda} \quad (3.31)$$

Підставивши знайдені вирази (3.29) і (3.31) в (3.26), отримаємо вираз для $I_{\text{фд}}$

$$I_{\text{фд}} = \tau_0 \cdot S_{\text{інт}} \cdot P_{\text{інт}} \cdot \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S^B(\lambda) P^B(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} P^B(\lambda) d\lambda} \quad (3.32)$$

При розрахунках $I_{\text{фд}}$, замість $P_{\text{інт}} \cdot \tau^0$, то ми підставимо значення інтенсивності I яке знаходиться за формулою (18).

Так як спектральна ширина смуги випромінювання світлодіода набагато вужча в порівнянні з спектральною чутливістю фотодіода, тому для спрощення вираз $\frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S^B(\lambda) P^B(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} P^B(\lambda) d\lambda}$ з формули (3.32) ми можемо знехтувати і взяти рівним одиниці.

Кінцева формула для визначення струму фотодіода буде така:

$$I_{\text{фд}} = S_{\text{інт}} \cdot I \quad (3.33)$$

3.8 Побудова графіка залежності вихідної напруги від часу

Для побудови залежності потрібно обрахувати R_1, R_2, R_3 , які знаходяться за формулами (3.3), (3.4), (3.5). Показники заломлення візьмемо наступні $n_{\text{пов}} = 1$; $n_{\text{скла}} = 1,5$; $n_{\text{плівки}} = 2,5$ (для As_2Se_3). Підставивши дані показники у формулу отримаємо:

$$R_1=0,04; R_2=0,0625; R_3=0,183673.$$

Обрахуємо інтенсивності променів I_1 та I_2 , за формулами (3.9) та (3.17):

$$I_1 = (1 - R_2)^2 I_0 R_2$$

$$I_2 = I_0 (1 - R_2)^2 (1 - R_2)^2 R_3 e^{-\alpha H}$$

Де $I_0 = 32 \cdot 10^{-6} \text{ Вт}$ це інтенсивність яка входить у оптичне волокно, так як ми використовуємо Y-відгалужувач, в ньому виникають втрати, тобто до підкладки дійде тільки частина: $I_0/2$; коефіцієнт α для As_2Se_3 візьмемо рівним $35 \cdot 10^3$;

H знаходиться за формулою (3.20)

$$H = B \cdot t$$

Швидкість напilenня B візьмемо $0,3 \cdot 10^{-3} \text{ мкм/с}$.

Для того щоб обрахувати результуючу інтенсивність за формулою (3.18) потрібно знайти φ з формули (3.19)

$$\varphi = \frac{4\pi H n_{\text{пльовки}}}{\lambda}$$

Де $\lambda = 0,8 \text{ мкм}$.

З цими значеннями ми можемо знайти результуючу інтенсивність I , яка вийшла з підкладки:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \varphi$$

Як раніше зазначалось, що в оптичному волокні Y-відгалужувача є витрати, тому до площадки з приймачем випромінювання дійде тільки частина: $I/2$.

Підставивши результуючу інтенсивність I , яка попадає на площадку приймача, та $S_{\text{інт}}$ в (33) знаходимо $I_{\text{фд}}$.

Обрахуємо вихідну напругу фотодіода:

$$U_{\text{вих}} = I_{\text{фд}} \cdot R_{\text{ф}}$$

$R_{\text{ф}}$ візьмемо рівним 10^3 Ом

Підставимо значення для $t = 1 \text{ с}$. та розрахуємо вихідну напругу світлодіода за формулами які були приведені.

Інтенсивність I_1 :

$$I_1 = (1 - 0,04)^2 0,000016 \cdot 0,0625 = 0,000000922$$

					КМР.АКІТ.19050030. 01.000 ПЗ	Арк
Зм.	Арк	№ докум	Підпис	Дата		30

Інтенсивність I_2 :

$$I_2 = 0,00016(1 - 0,04)^2 \cdot (1 - 0,0625)^2 0,183e^{-2 \cdot 35000 \cdot 3 \cdot 10^{-9}} = \\ = 0,000002,38$$

Кут φ :

$$\varphi = \frac{4 \cdot \pi \cdot 3 \cdot 10^{-9} \cdot 2,5}{8 \cdot 10^{-7}} = 0,117$$

Результуюча інтенсивність:

$$I = 9,22 \cdot 10^{-7} + 2,38 \cdot 10^{-6} + 2\sqrt{9,22 \cdot 10^{-7} \cdot 2,38 \cdot 10^{-6}} \cos(0,117) = \\ = 6,24 \cdot 10^{-6} \text{ Вт}$$

Струм фотодіода:

$$I_{\text{фд}} = 0,55 \cdot 3,12 \cdot 10^{-6} = 1,72 \cdot 10^{-6} \text{ А}$$

$$U_{\text{вих}} = 1,72 \cdot 10^{-6} \cdot 10000 = 1,72 \cdot 10^{-2} \text{ В}$$

Склавши таблицю значень (Табл. 1Д) в результаті по цим значенням можемо побудувати графік залежності вихідної напруги фотодіода від часу:

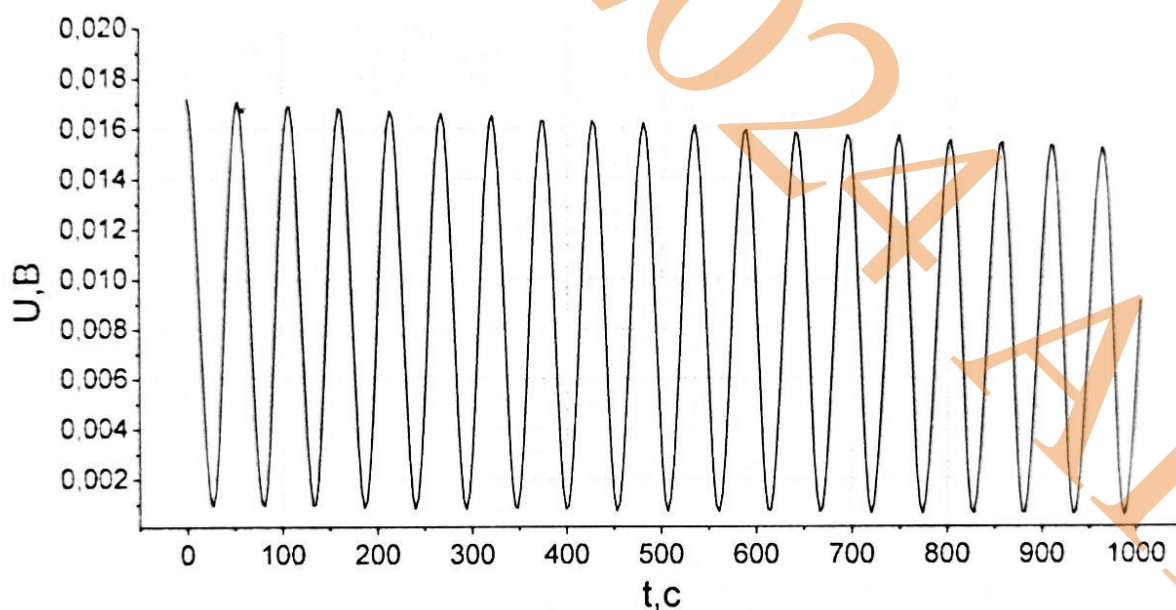


Рисунок 3.7 — Залежність вихідної напруги від часу.

4 ПРОЕКТУВАННЯ БЛОКУ СИСТЕМИ РЕЄСТРАЦІЇ

4.1 Огляд схем підсилення

Очевидно що найкращі схеми підсилення сигналів із фотоприймачів це схеми на операційних підсилювачах, тому такий тип підсилення використовується найчастіше. Існують багато призначених для цього різномісних схем підсилення. Обрати потрібну схему можна в відповідності до вимог таких параметрів: лінійністю, постійним зміщенням, шумом та полосою пропускання. Основною задачею є точне перетворення вихідного сигналу фотодіоду в лінійно залежний від нього сигнал, та підсилення його до потрібного рівня.

Основними схемами на ОП є неінвертуючі та інвертуючі, режим роботи яких здійснюється в межах лінійного участку передавальної характеристики.

Неінвертуючий підсилювач

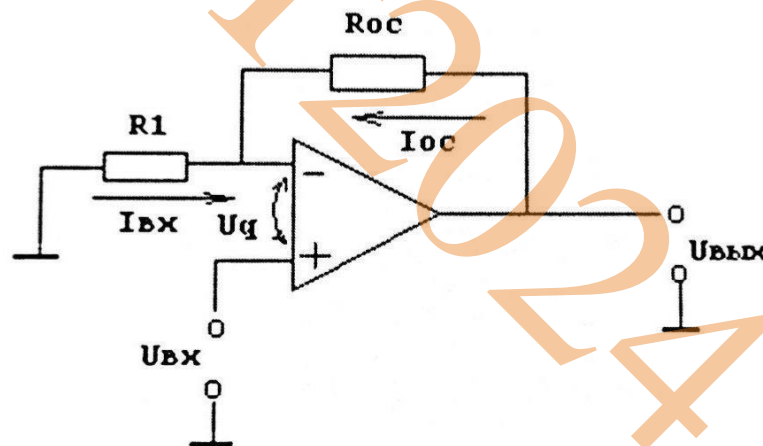


Рисунок 4.1 — Схема неінвертуючого підсилювача[9].

Дана схема (рис 2.1) використовує операційний підсилювач, вона має високий повний вихідний опір, причому коефіцієнт підсилення всієї схеми по напрузі може бути жорстко заданий за допомогою опорів R_1 та R_{oc} (опір зворотного зв'язку). В даній схемі сигнал подається на неінвертуючий вхід ОП. Підсилювач включає

послідовний від'ємний зворотній зв'язок по напрузі, виникаючий на R_{oc} , яка подається на не інвертований вхід. Повний опір всієї системи виявляється високим, так як єдиним шляхом для струму між виходом і землею є високий повний вихідний опір ОП.

Інвертуючий підсилювач

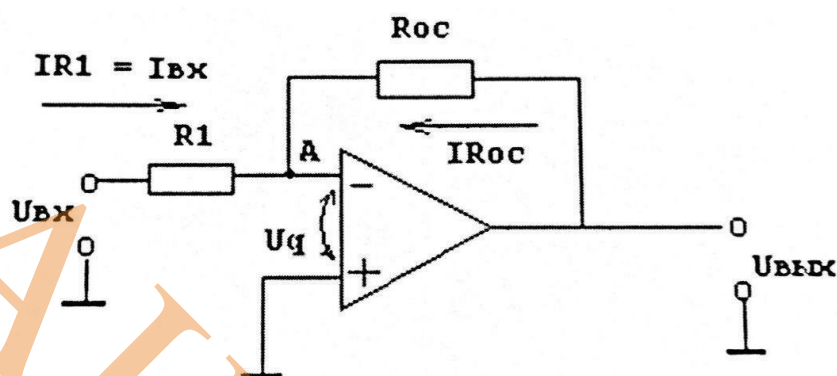


Рисунок 4.2 — Схема інвертуючого підсилювача[9].

Вхідний і вихідний сигнали інвертуючого підсилювача здвинуті по фазі на 180° . Зміна знаку вихідного сигналу відносно вхідного створюється введенням по не інвертованому входу ОП за допомогою резистора R_{oc} паралельний зворотній зв'язок по напрузі. Неінвертуючий вхід пов'язаний з загальною точкою входу і виходу схеми (заземлюється). Вхідний сигнал подається через резистор R_1 на інвертуючий вхід ОП. Якщо на схему подати позитивну напругу $U_{вх}$ то U_q стане позитивним, а вихідний потенціал почне знижуватись. Вихідна напруга буде змінюватись в від'ємному напрямі до тих пір, поки напруга на інвертуючому вході в точці А не стане почти рівна нулю: $U_q = U_{вх}/K_{оп} \gg 0$. Таким чином R_1 та R_2 діють як подільник напруги між $U_{вих}$ і $U_{вх}$ і $\frac{U_{вих}}{U_{вх}} = R_{oc}/R_1$. Точка А називається потенційно заземленою.

4.2 Обґрунтування вибору комбінованої структурної схеми

Була розроблена комбінована структурна схема блоку реєстрації сигналу з волоконно-оптичного датчика автоматизованого контролю товщини плівки (рис 4.3).

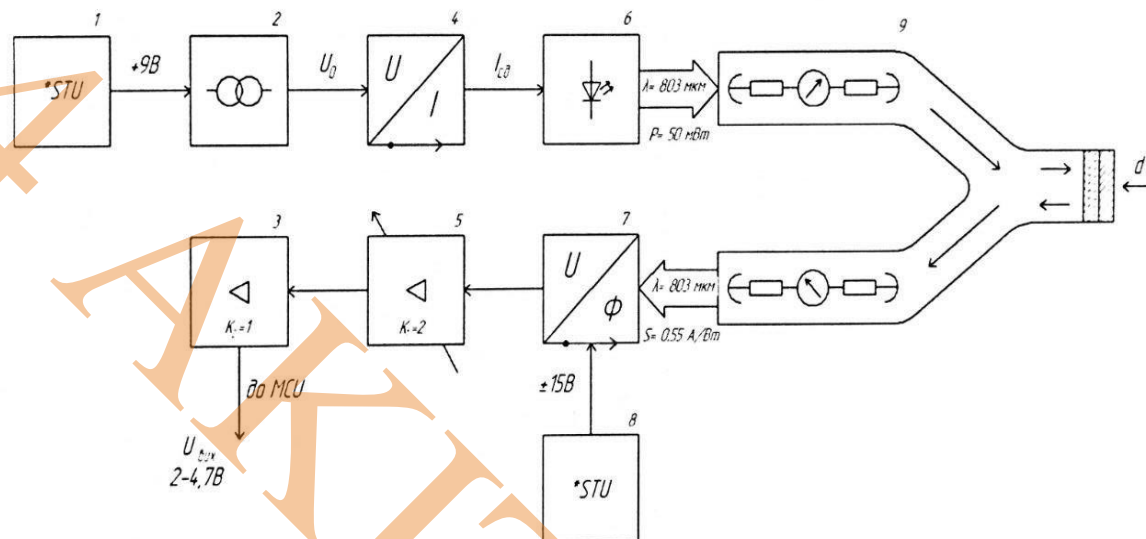


Рисунок 4.3 — Комбінована структурка схема блоку реєстрації

В дану схему входять наступні блоки:

- 1- Стабілізатор напруги +9В
- 2- Джерело опорної напруги (регульоване)
- 3- Повторювач напруги
- 4- Перетворювач «напруга-струм»
- 5- Підсилювач масштабуючий
- 6- ІЧ випромінювальний діод
- 7- Перетворювач «випромінювання-напруга»
- 8- Біполярний стабілізатор напруги $\pm 15 \text{ В}$
- 9- Волоконно-оптичний Y-відгалужувач.

Ця комбінована структурна схема задовільняє потрібні функції по досягненню необхідного рівня сигналу на виході (2-4,7В) для подачі його в подальшому на самописець або мікроконтролер для обробки. Також виконує живлення фотоприймача (ОРТ101), та випромінювального діода.

4.3 Обґрунтування вибору принципової схеми

Була побудована принципова схема для блоку реєстрації електронного сигналу з волоконно-оптичного датчика автоматизованого контролю товщини плівки (рис 4.4). Схема була вдосконалена, в порівнянні з стандартними схемами підсилення на ОП, та адаптована під конкретну задачу згідно технічного завдання. Водночас схема не є складною, вона є надійною. Приймачі та випромінювачі було вирішено розмістити окремо від основної плати блоку реєстрації.

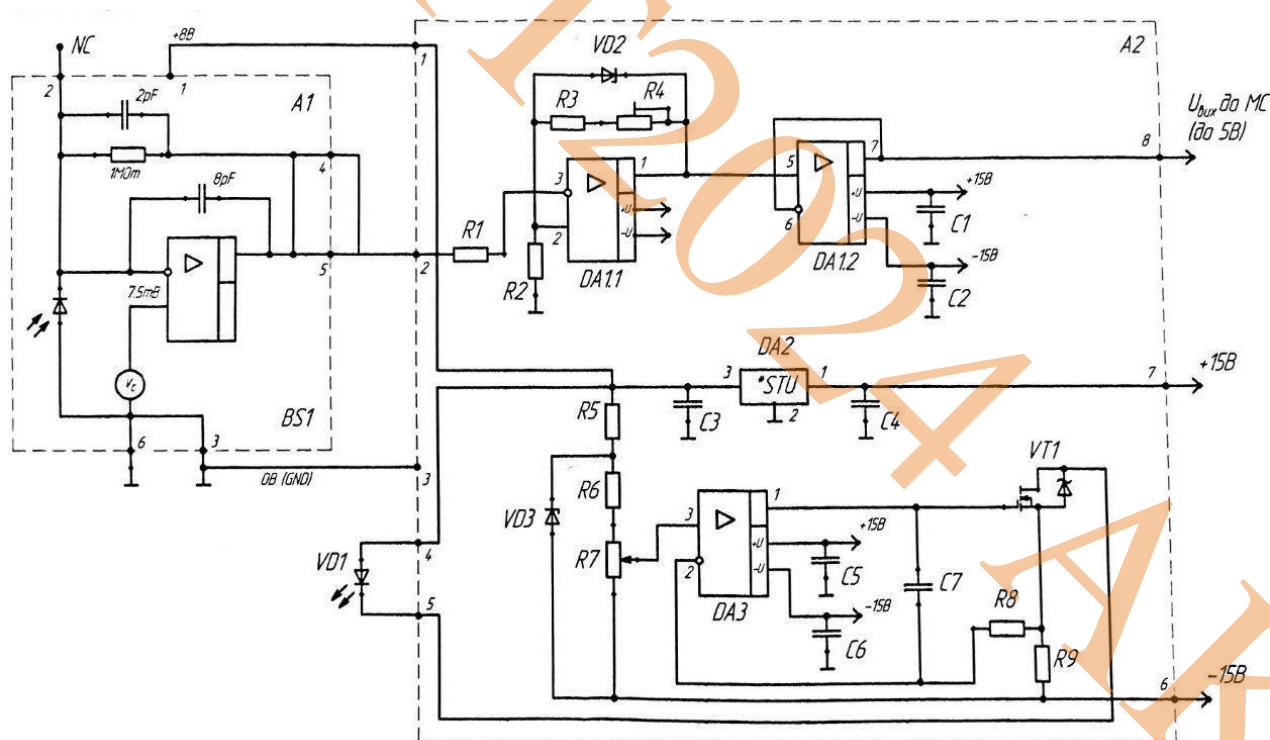


Рисунок 4.4 — Схема електрична принципова блоку реєстрації

Так як переважно використовується фотоприймач OPT101, який являє собою зібрану схему датчика (BS1) з фотодіодом та операційним підсилювачем в корпусі DIP-8, тобто сигнал з фотоприймача виходить вже підсилений з коефіцієнтом підсилення рівним 100 [10], тобто максимальна напруга на виході фотоприймача, якщо врахувати данні попередньої курсової роботи з дисципліни «Аналітичні прилади», буде 1,72 В. Цього рівня не вистачає для подачі на мікроконтроллер (2-4,7В) чи самописець, тому було задіяно операційний підсилювач (DA1) з коефіцієнтом підсилення рівним 2. В схемі вбудований підстроювальний резистор, який дає можливість плавно налаштувати коефіцієнт підсилення ОП.

Також схема підтримує необхідний рівень живлення фотоприймача та фотодіода, та дає можливість регулювати опорне джерело живлення випромінювального діода.

Даний блок реєстрації використовує біполярне живлення $\pm 15\text{В}$.

4.4 Розрахунок друкованої плати

Розрахунок габаритних розмірів друкованої плати

Для визначення розмірів отворів плати друкованої під виводи елементів необхідно знайти еквівалентні діаметри $d_{\text{екв}}$ виводів з прямокутним перерізом

$$d_{\text{екв}} = \sqrt{a^2 + b^2} \quad (4.1)$$

де a і b – сторони прямокутника.

Для мікросхеми LF353:

$$d_{\text{екв}} = \sqrt{0,38^2 + 0,25^2} \approx 0,45 \text{ мм}$$

А для стабілізатора $\mu\Phi 7807$:

$$d_{\text{екв}} = \sqrt{0,77^2 + 0,34^2} \approx 0,84 \text{ мм}$$

Таблиця 4.1 — Розрахункова таблиця установочних площ

Категорія установочних площин	Елементи та їх тип	Діаметр виводу, мм	Установочна площа S, мм	Кількість	Установочна площа однотипних елементів S, мм
$S_{\text{мг}}$	Резистори RM0207S	0,6	26,45	7	185,15
	Резистори Type 82P	0,43	31,6	2	63,3
	Конденсатори Z5U-LS508	0,51	9,6	5	48,3
	Конденсатори T110	0,51	41,68	2	83,3
	Мікросхеми LF353	0,45	83,9	2	167,8
	Стабілізатор $\mu A7807$	0,84	48,6	1	48,6
	Стабілітрони BZX85	0,85	22,75	2	45,5
	Транзистор IRF3205	0,69	49,4	1	49,4
Всього					691,3

Враховуючи допуски на розміри ЕРЕ, необхідність вільного проходження у монтажних отворах, діаметри отворів повинні бути на $0,2 \div 0,3$ мм більшими від

					КМР.АКІТ.19050030. 01.000 ПЗ	Арк
Зм.	Арк	№ докум	Підпис	Дата		37

розрахованих. Згідно ГОСТ 4.010.010-78 рекомендується також обмеження номенклатури діаметрів отворів, що підвищує технологічність монтажних процесів. Тому обмежимося трьома розмірами - 0,7; 0,8 та 1,1.

Розрахунок площі монтажно́ї зони S_m для низької густини монтажу виконаємо на основі формули (4.2) [6]:

$$S_m = 4S_{mg} + 3S_{cg} + 1,5S_{kg} \quad (4.2)$$

де S_{mg} , S_{cg} , S_{kg} відповідно сумарні площі установи малогабаритних в (всі мініатюрні елементи), середньо габаритні (МС у прямокутних корпусах, постійні опори вище 0.5 Вт конденсатори у круглих корпусах і т.д) та крупно габаритні (трансформатор, напівпровідникові прилади на радіаторах т. д.).

Під установчою площею ЕРЕ розуміють площу прямокутника(квадрата), у яку вписується ЕРЕ разом з виводом та контактними площинками при його установці на плати друкованої.

Результати розрахунків установчих площ ЕРЕ. Варіанти встановлення їх за ОСТ 4.010.030-81, а також розміри виводів елементів наведені у табл.4.1.

Площа монтажно́ї зони згідно (4.2):

$$S_m = 4S_{mg} + 3S_{cg} + 1,5S_{kg} = 4 \cdot 691,3 = 2765 \text{ мм}^2$$

З переліку рекомендованих лінійних розмірів ДП, найближчі розміри монтажно́ї зони становить $50 \times 60 \text{ мм}$, тоді $S_m = 3000 \text{ мм}^2$, а з врахуванням S_{kp} габаритні розміри плати складають $60 \times 75 \text{ мм}$, $S_{\pi} = 4500 \text{ мм}^2$.

Розрахунок діаметру контактних площинок

Розрахунок мінімального діаметра контактної площинки D навколо монтажного отвору проведемо за формулою (ГОСТ 23751-75)[6]:

$$D = (d + \Delta d_{bb}) + 2b_m + \Delta t_{bb} + (\delta_b^2 + \delta_p^2 + \Delta t_{mb}^2)^{0,5} \quad (4.3)$$

де d – номінальне значення діаметрів монтажного отвору;

Δd_{bb} – верхнє граничне відхилення діаметру контактної площинки;

b_m – гарантійний поясок на зовнішньому шарі;

Δt_{bb} – верхнє граничне відхилення ширини провідника;

δ_d – допуск на розташування отворів;

δ_p – допуск на розташування контактних площин;

Δt_{mb} – нижнє граничне відхилення ширини провідника.

Для плати друкованої 3 класу точності з покриттям:

$$\Delta d_{bb} = 0,1 \text{ мм}; 0,05 \text{ мм};$$

$$\Delta t_{mb} = 0,8 \text{ мм};$$

$$b_m = 0,1 \text{ мм};$$

$$\delta_p = 0,15 \text{ мм};$$

$$\Delta t_{bb} = 0,1 \text{ мм};$$

$$\delta_d = 0,08 \text{ мм}.$$

Для отвору $d=0,7$ мм мінімальний діаметр контактної площини $D_{0,7}$ рівний:

$$D_{0,7} = (0,7 + 0,05) + 2 \cdot 0,1 + 0,1 + (0,08^2 + 0,15^2 + 0,8^2) = 1,71 \text{ мм}.$$

Для отвору з $d=0,8$ мм:

$$D_{0,8} = (0,8 + 0,05) + 2 \cdot 0,1 + 0,1 + (0,08^2 + 0,15^2 + 0,8^2) = 1,81 \text{ мм}.$$

Для отвору з $d=1,1$ мм:

$$D_{1,1} = (1,1 + 0,05) + 2 \cdot 0,1 + 0,1 + (0,08^2 + 0,15^2 + 0,8^2) = 2,16 \text{ мм}.$$

Мінімальне значення номінальної ширини провідників для плати $t=0,25$ мм,
а допуск на ширину провідників Δt з покриттям $\Delta t = \pm_{0,10}^{0,15}$ мм.

Зм.	Арк	№ докум	Підпис	Дата

4.5 Оцінка показників надійності

Метою проведення розрахунків з надійності є оцінка імовірності безвідмовної роботи об'єкта проектування за визначений час наробітку t і значення середнього наробітку на відмову.

Згідно ДСТУ 2861-94 існує ряд методів аналізу показників надійності технічних виробів, а саме:

- метод аналізу характеру та наслідків відмов;
- метод аналізу діагностичного дерева відмов;
- метод аналізу за допомогою блок-схеми надійності;
- метод прогнозування надійності за кількістю елементів (лямбда-метод);
- метод марківського аналізу;
- метод імовірісно-фізичного аналізу надійності.

При курсовому проектуванні доцільно користуватись "лямбда- методом", який є найбільш простим розрахунковим підходом і використовує специфікації всіх елементів та дані про їх відмови (таблиці значень інтенсивності відмов Λ_0 кожного з радіо компонентів). Одночасно цей метод дає змогу оцінити чи задовольняють прийняті схемотехнічні рішення технічному завданню (ТЗ), визначити причини найбільшої інтенсивності відмов, вірно прогнозувати склад комплектів ЗІП.

Імовірність відмови (ІБР) — це ймовірність того, що об'єкт не вийде з ладу протягом заданого періоду експлуатації. Як правило, на початку інтервалу часу або доходу передбачається, що об'єкт здатний виконувати необхідні функції. З цього визначення ми бачимо, що певні числа в ІБР мають певні значення лише тоді, коли вони встановлені відповідно до певних дат отримання. Дохід також включає тривалість або обсяг робіт на об'єкті.

Наробіток може бути як безперервним (години роботи), так і цілочисельним (цикл роботи, кількість запусків тощо).

Для виконання розрахунків з надійності необхідно використати наступні вихідні дані електричного розрахунку об'єкта проектування та довідникові матеріали:

- принципову електричну схему (ЕЗ) та перелік елементів (ПЕЗ) до цієї схеми;
- Карту режимів роботи активних і пасивних радіоелементів, які входять до принципової електричної схеми;
- довідникові матеріали з інтенсивностями відмов радіоелектронних компонентів λ_0 з приведеними до режиму номінальних електричних навантажень нормальних умов експлуатації;
- довідникові матеріали, що дозволяють враховувати вплив електричного режиму, температури і зовнішніх факторів на інтенсивність з відмов.

Вихідною з величиною для проведення розрахунків з надійності приймається параметр надійності елементів схем РЕА – *інтенсивність відмов λ* , кількісна величина якої вибирається із довідникової літератури.

Інтенсивність відмов (ІВ) — це умовна густина імовірності виникнення відмови об'єкта, яка визначається за умови, що до цього моменту відмова не виникла. Інтенсивність відмов є показникомості не придатних до ремонту і невідновлюваних об'єктів.

При аналізі відмов важливо знати етап життєвого циклу виробу РЕА і з'ясувати першопричину виникнення відмов. В цьому зв'язку розрізняють наступні види відмов: конструкційні, виробничі і експлуатаційні.

Конструкційні відмови виникають в результаті помилок або порушень правил і норм конструювання в період розробки, тобто після ідентифікації такої відмови повинні бути прийняті відповідні заходи по доробці конструкції, при яких виключається виникнення таких відмов у подальшому.

Під виробничими умовами розуміють відмови елементів, вузлів блоків в результаті недосконалості процесу виготовлення або порушення технології виготовлення.

Експлуатаційні відмови пов'язані з конкретними умовами використання виробів РЕА. Такі відмови обумовлені зовнішніми факторами, які по інтенсивності перевищують межі, що допускаються технічними умовами. Крім того, відмови при експлуатації можуть бути викликані порушеннями з боку обслуговуючого персоналу, правил та інструкцій по експлуатації, правил профілактики, ремонту.

Розрахункова сумарна інтенсивність відмов кожного з і-типів елементів принципової електричної схеми визначається за умови незалежності відмов елементів за наступною формулою:

$$\lambda_{i\Sigma} = \lambda_{i0} \cdot n \cdot k_e \cdot k_{TH} \cdot 10^{-8} [\text{год}^{-1}] \quad (4.4)$$

де λ_{i0} – інтенсивність відмов елементів і-типу, отримана при випробуваннях в режимі номінального електричного навантаження та нормальних зовнішніх умовах експлуатації;

n – кількість однакових елементів і-типу;

k_e – експлуатаційний поправочний коефіцієнт для – перерахунку ІВ елементів при фактичних умовах експлуатації;

k_{TH} – поправочний коефіцієнт, який враховує вплив електричного режиму (через коефіцієнт електричного навантаження k_e) і температури елемента (або оточуючого повітря) на зміну табличних значень ІВ.

Експлуатаційний поправочний коефіцієнт k_e – для перерахунку ІВ елементів при фактичних умовах експлуатації через λ_{i0} можливо оцінити за формулою:

$$k_e = k_H \cdot k_B \cdot k_{a.T.}$$

k_H – поправочний коефіцієнт, що враховує дію механічних факторів (вібрації, ударні навантаження, сумарні дії механічних навантажень);

k_B – поправочний коефіцієнт, що враховує вплив вологості і температури;

$k_{a.t.}$ – поправочний коефіцієнт, що враховує дію атмосферного тиску.

Поправочний коефіцієнт $k_{тн}$, який враховує вплив і електричного режиму і температури, визначається шляхом табличного нормування (див. таблицю 6-Д) значень коефіцієнта електричного навантаження k_e , який розраховується за методикою, що наведена в розділі 3.

У випадку відсутності поправочних коефіцієнтів для визначення $k_{тн}$, k_e для певних груп елементів в довідникових таблицях, їх значення умовно приймається рівним одиниці.

Сумарна інтенсивність відмов для всіх елементів, які входять до принципової схеми, розраховується за формулою:

$$\lambda_{\Sigma} = \sum_{i=1}^m \lambda_{i\Sigma} [\text{год}^{-1}] \quad (4.6)$$

$i=1...m$ – кількість різних типів елементів, які входять до схеми. Величина СНВ визначається в цьому випадку через λ_{Σ} наступним чином:

$$T = \frac{1}{\lambda_{\Sigma}} [\text{год}] \quad (4.7)$$

а значення ІБР можливо оцінити за виразом:

$$P(t) = e^{-\lambda_{\Sigma} \cdot t} \approx 1 - \lambda_{\Sigma} \cdot t \quad (4.8)$$

де t – заданий в ТЗ час наробітку (як правило, 1000 або 2000 год)

Розраховані значення $P(t)$ і T для об'єкта проектування порівнюють з відповідними показниками надійності аналогічних виробів і роблять висновки стосовно рівня надійності розробленої конструкції.

Таблиця 4.2 — Карта робочих режимів Блоку реєстрації

Позн.	Типономінал	Викон. функ.	Режим роботи	Напруга, В	Р _{роз} , ВТ	k _и	k _p
				Пост			
1	2	3	4	5	6	7	8
R1	RM0207S-0.6-100кОм ±1%	Под. напр	в/д	15/250	-	0,06	-
R2	RM0207S-0.6-10кОм ±1%	Под. напр	в/д	15/250	-	0,06	-
R3	RM0207S-0.6-5кОм ±1%	Под. напр	в/д	15/250	-	0,06	-
R4	Type 82P-5кОм ±1%	Под. напр	в/д	15/250	-	0,075	-
R5	RM0207S-0.6-1кОм ±1%	Под. напр	в/д	15/250	-	0,06	-
R6	RM0207S-0.6-68кОм ±1%	Под. напр	в/д	15/250	-	0,06	-
R7	Type 82P-1кОм ±1%	Под. напр	в/д	15/250	-	0,075	-
R8	RM0207S-0.6-10кОм ±1%	Под. напр	в/д	15/250	-	0,06	-
R9	RM0207S-0.6-1кОм ±1%	Под. напр	в/д	15/250	-	0,06	-
C1	Z5U-LS508-0.1мкФ-25B±10%	Фільтр	в/д	15/25	-	0,6	-
C2	Z5U-LS508-0.1мкФ-25B±10%	Фільтр	в/д	15/25	-	0,6	-

Зм.

Арк

№ докум

Підпис

Дата

KMP.AKIT.19050030. 01.000 ПЗ

Арк

44

C3	T110-2.2мкФ- 20B±4%	Фільтр	в/д	15/20	-	0,75	-
C4	T110-2.2мкФ- 20B±4%	Фільтр	в/д	15/20	-	0,75	-
C5	Z5U-LS508- 0.1мкФ- 25B±10%	Фільтр	в/д	15/25	-	0,6	-
C6	Z5U-LS508- 0.1мкФ- 25B±10%	Фільтр	в/д	15/25	-	0,6	-
C7	Z5U-LS508- 0.1мкФ- 25B±10%	Фільтр	в/д	15/25	-	0,6	-
DA1	LF353	Підсилювач	в/д	-	0,1/0,5	-	0,2
DA2	μA7807	Стабілізатор	в/д	-	0,1/2	-	0,05
DA3	LF353	Підсилювач	в/д	-	0,1/0,5	-	0,2
VD2	BZX85/C4V7- 4.6B±5%	Стаб. напр.	в/д	-	0,1/0,3	-	0,07
VD3	BZX85/C9V1- 9.1B±5%	Стаб. напр.	в/д	-	0,1/1,3	-	0,07
VT1	IRF3205	Регулятор	в/д	-	1/200	-	0,005

Коефіцієнти навантаження k_n визначають із врахуванням карти робочих режимів (див. таблицю 4.2) [7] та заносять в таблицю 4.3.

Таблиця 4.3 — Показники надійності елементів блоку реєстрації

№	Найменування і типомінали елементів	п, шт	λ_0 , год ⁻¹	k_e	$\ominus$, °C	k_n	λ_1 , год ⁻¹
1	2	3	4	5	6	7	8
1	R1-RM0207S-0.6-100кОм $\pm 1\%$	1	2,2	2,14	20	0,06	0,28
2	R2, R8- RM0207S-0.6-10кОм $\pm 1\%$	2	2,2	2,14	20	0,06	0,28
3	R3- RM0207S-0.6-5кОм $\pm 1\%$	1	2,2	2,14	20	0,06	0,28
4	R4- Type 82P-5кОм $\pm 10\%$	1	2,0	2,14	20	0,075	0,32
5	R5, R9- RM0207S-0.6-1кОм $\pm 1\%$	2	2,2	2,14	20	0,06	0,28
6	R6- RM0207S-0.6-68кОм $\pm 1\%$	1	2,2	2,14	20	0,06	0,28
7	R7- Type 82P-1кОм $\pm 10\%$	1	2,0	2,14	20	0,075	0,32
8	C1,C2-Z5U-LS508-0.1мкФ-25B $\pm 10\%$	2	3,0	2,14	20	0,06	3,85
9	C3,C4- T110-2.2мкФ-20B $\pm 4\%$	2	0,6	2,14	20	0,75	0,96
10	C5-C7- Z5U-LS508-0.1мкФ-25B $\pm 10\%$	3	3,0	2,14	20	0,06	3,85
11	DA1,DA3-LF353	2	26	2,14	20	0,2	11,1
12	DA2- μ A7807	1	34	2,14	20	0,05	3,63
13	VD2,VD3- BZX85/C4V7-4.6B $\pm 5\%$	2	2,0	2,14	20	0,07	0,29
14	VT1-IRF3205	1	7,0	2,14	20	0,005	0,07
15	Пайки	80	1	2,14	20	-	80
Разом							130,25

Значення сумарної інтенсивності відмов для всіх елементів, які входять до принципової схеми рівне:

					КМР.АКІТ.19050030. 01.000 ПЗ	Арк
Зм.	Арк	№ докум	Підпис	Дата		46

$$\lambda_{\Sigma} = 130,25 \cdot 10^{-8} [\text{год}^{-1}]$$

На підставі отриманого значення λ_{Σ} за формулою (4.7) розраховують величину до принципової схеми рівне:

$$T = \frac{1}{\lambda_{\Sigma}} = \frac{1}{(130,25 \cdot 10^{-8})} = 767754,31 = 767 [\text{тис. год}].$$

Значення ІБР за час $t=2000$ год оцінюють за формулою (4.8):

$$P(t) = e^{-\lambda_{\Sigma} \cdot t} \approx 1 - (130,25 \cdot 10^{-8} \cdot 1000) = 0,9986.$$

5 АВТОМАТИЗАЦІЯ З ДОПОМОГОЮ ARDUINO

5.1 Мета додавання Arduino

Метою додавання Arduino є розробка пристрою на основі мікроконтролера, який забезпечує:

- Автоматичний підрахунок кількості піків у сигналі.
- Управління шторкою випарника за допомогою сервопривода при досягненні заданої кількості піків.
- Механічне перемикання між двома парами світлодіодів і фотодіодів за допомогою сервоприводів для забезпечення оптимальних умов роботи.
- Інтерактивне управління пристроєм через дисплей та кнопки для налаштування порогового значення кількості піків.

В таблиці 5.1 наведемо перелік всіх необхідних елементів.

5.2 Огляд нових елементів

1. Сервопривід SG90.

Сервопривід SG90 — це малий, недорогий сервопривід, який зазвичай використовують для точного контролю положення в різноманітних механізмах. Він має компактні розміри і може рухати елементи на кут до 90 або 180 градусів, в залежності від моделі. Зображений на рис.5.1.

Основні характеристики:

- Напруга живлення: 4.8 - 6.0 В.
- Ток споживання: від 10 до 250 мА в залежності від навантаження.
- Максимальний крутний момент: близько 1.8 кг·см.
- Робочий діапазон кута: 0 - 90° (для SG90) або до 180°.

- Швидкість руху: близько 0.1 с/60° при 5 В.
- Тип сигналу: PWM (широтно-імпульсна модуляція), для управління кутом повороту.

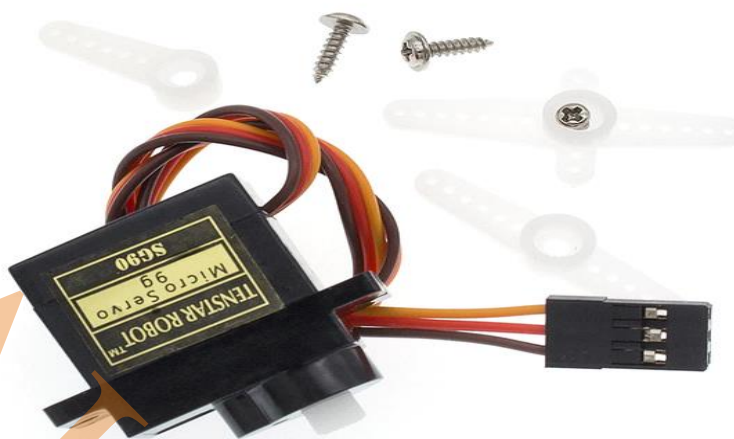


Рисунок 5.1 — Сервопривід SG90

2. LCD дисплей (I2C).

LCD дисплей з інтерфейсом I2C (зазвичай 16x2 або 20x4 символів) дозволяє відображати текстову інформацію на невеликому екрані. Завдяки використанню I2C інтерфейсу, для його підключення потрібні лише два проводи для зв'язку з Arduino (SDA і SCL), що значно спрощує підключення. Зображений на рис.5.2.

Основні характеристики:

- Тип екрану: 16x2 або 20x4 символів.
- Інтерфейс: I2C (2-wire).
- Напруга живлення: 5 В.
- Розміри: 80 мм x 36 мм (16x2) або 99 мм x 59 мм (20x4).
- Контрастність: регулюється за допомогою потенціометра на платі дисплею.

Зм.	Арк	№ докум	Підпис	Дата



Рисунок 5.2 — LCD дисплей (I2C)

3. Arduino Uno.

Arduino UNO — одна з найпопулярніших моделей мікроконтролера, що забезпечує простоту програмування і підключення до різноманітних сенсорів та виконавчих пристроїв. Вона ідеально підходить для проектів, що потребують управління кількома сервоприводами, датчиками та іншими електронними компонентами. Зображена на рис.5.3.

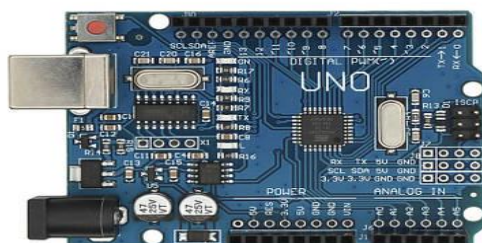


Рисунок 5.3 — Arduino Uno

Основні характеристики:

- Процесор: ATmega328P.
- Напруга живлення: 7-12 В (через вхідний джек) або 5 В (через USB або через пін 5V).
- Цифрові піни: 14 пінів, з яких 6 можна використовувати як виходи ШИМ.
- Аналогові піни: 6 пінів для підключення аналогових сенсорів.
- Пам'ять: 32 кБ флеш-пам'яті, 2 кБ SRAM.
- Інтерфейс USB: для програмування і живлення.

5.3 Алгоритм роботи системи

1. При запуску: ініціалізація обох сервоприводів для вибору початкової пари світлодіод-фотодіод, відкриття шторки та увімкнення випарника.
2. Перемикання пари: перемикання пари світлодіод-фотодіод залежить від команди, яку можна подати з кнопок або через встановлений часовий інтервал.
3. Підрахунок піків: аналіз аналогового сигналу та підрахунок піків.
4. Керування шторкою та випарником: при досягненні заданої кількості піків шторка закривається, а випарник вимикається.

Зм.	Арк	№ докум	Підпис	Дата

Таблиця 5.1 — Перелік необхідних елементів

№	Назва компонента	Модель	Призначення
1	Мікроконтролер	Arduino Uno	Обробка сигналів та керування системою
2	Світлодіод 1	M8080-3-1230	Формування світлового сигналу
3	Фотодіод 1	OPT101	Прийом світлового сигналу
4	Світлодіод 2	Thorlabs M1300D3	Формування світлового сигналу
5	Фотодіод 2	G12180-003A	Прийом світлового сигналу
6	Сервопривід 1	SG90	Перемикання положення світлодіодів
7	Сервопривід 2	SG90	Перемикання положення фотодіодів
8	Сервопривід для шторки	SG90	Керування шторкою випарника
9	Резистори	10 кОм	Підключення фотодіодів
10	Дисплей	LCD 1602 з I2C модулем	Відображення інформації про кількість піків та стан системи
11	Кнопки	Тактові кнопки 2 шт	Зміна кількості піків для управління
12	Блок живлення	5 В, 2 А	Живлення системи
13	Друкована плата	Наявна	Реєстрація

5.4 Перемикання між парами світлодіодів та фотодіодів

Для перемикання між двома парами світлодіодів і фотодіодів використовується два сервоприводи. Один сервопривід переміщує механічний важіль, який встановлює в робоче положення відповідний світлодіод, а інший сервопривід аналогічно перемикає фотодіоди.

Сервопривід 1 контролює перемикання між світлодіодами (M8080-3-1230 або Thorlabs M1300D3).

Сервопривід 2 контролює перемикання між фотодіодами (OPT101 або G12180-003A).

Кожен сервопривід має два положення: Положення 1 – активна перша пара (M8080-3-1230 + OPT101). Положення 2 – активна друга пара (Thorlabs M1300D3 + G12180-003A).

5.5 Підключення елементів до Arduino

1. Підключення світлодіодів і фотодіодів (по дві пари):

- Світлодіоди: підключаємо паралельно обидві пари світлодіодів (M8080-3-1230 та Thorlabs M1300D3) та використовуємо цифрові виводи для керування світлодіодами. Світлодіод 1 (M8080-3-1230) підключається до виводу D2, а Світлодіод 2 (Thorlabs M1300D3) підключається до виводу D3.

- Фотодіоди: підключаємо паралельно обидві пари фотодіодів (OPT101 та G12180-003A) та підключаємо аналогові виводи для зчитування сигналів з фотодіодів. Фотодіод 1 (OPT101) підключається до A0, а Фотодіод 2 (G12180-003A) підключається до A1.

2. Сервоприводи для перемикання світлодіодів та фотодіодів:

Для перемикання між парами світлодіодів і фотодіодів використовуються два сервоприводи. Сервоприводи підключаються до цифрових пінів Arduino. Сервопривід для світлодіодів підключається до D10, а Сервопривід для фотодіодів підключається до D11. Кожен сервопривід буде керувати положенням світлодіодів і фотодіодів, перемикаючи між парою 1 (M8080-3-1230 + OPT101) та парою 2 (Thorlabs M1300D3 + G12180-003A).

3. Сервопривід для шторки:

Шторка контролюється через окремий сервопривід. Підключаємо його до цифрового піну D9. Цей сервопривід буде відкривати або закривати шторку залежно від кількості піків, які ми отримуємо.

4. Випарник:

Випарник може бути керований через релейний модуль для керування живленням випарника. Підключаємо до цифрового піну D8. Коли кількість піків досягає порогу, випарник вимикається.

5. Кнопки для зміни кількості піків:

Для зміни кількості піків використовуються дві тактові кнопки, кнопка збільшення підключається до D6, кнопка зменшення підключається до D7. Ці кнопки будуть дозволяти змінювати порогове значення кількості піків для активації шторки і вимикання випарника.

6. Дисплей LCD для відображення інформації:

Для відображення інформації (кількість піків, поріг, статус шторки) використовується дисплей LCD з I2C. LCD дисплей підключається через шину I2C до пінів SDA (A4) і SCL (A5) на Arduino.

Стисло про підключення:

1. Світлодіоди: підключити до пінів D2 і D3.
2. Фотодіоди: підключити до аналогових пінів A0 і A1.
3. Сервоприводи: підключити до пінів D9, D10 та D11.
4. Випарник: підключити через релейний модуль або транзистор до D8.
5. Кнопки: підключити до пінів D6 і D7.
6. LCD дисплей: підключити до пінів SDA (A4) і SCL (A5).

5.6 Код для програми Arduino

```
#include <Servo.h>
```

```
#include <Wire.h>
```

```
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
```

```
const int ledPin1 = 2; // Піни для сенсорів // M8080-3-1230
const int ledPin2 = 3; // Thorlabs M1300D3
const int photodiodePin1 = A0; // OPT101
const int photodiodePin2 = A1; // G12180-003A
```

```
// Піни для сервоприводів
const int servoPin1 = 10; // для світлодіодів
const int servoPin2 = 11; // для фотодіодів
Servo servo1;
Servo servo2;
```

```
// Піни для шторки та реле
const int shutterServoPin = 9; // Сервопривід для шторки
Servo shutterServo;
const int relayPin = 8; // Реле для випарника
```

```
// Піни для кнопок
const int buttonIncreasePin = 6; // кнопка збільшення
const int buttonDecreasePin = 7; // кнопка зменшення
```

```

// LCD дисплей
LiquidCrystal_I2C lcd(0x3F, 16, 2); // I2C дисплей 16x2

// Змінні для підрахунку піків
int peakCount = 0;
int threshold = 2; // Початковий поріг для шторки
bool shutterOpen = false;

void setup() {
// Ініціалізація пінів
pinMode(buttonIncreasePin, INPUT_PULLUP);
pinMode(buttonDecreasePin, INPUT_PULLUP);
pinMode(relayPin, OUTPUT);

// Ініціалізація сервоприводів
servo1.attach(servoPin1);
servo2.attach(servoPin2);
shutterServo.attach(shutterServoPin);

// Ініціалізація LCD дисплея
lcd.begin();

lcd.print("Peak Count:");

}

```



```

void loop() {

// Читання значень з фотодіодів

int signal1 = analogRead(photodiodePin1);

int signal2 = analogRead(photodiodePin2);

// Підрахунок піків

if (signal1 > 500 && signal2 > 500) { // Поріг для визначення піка
    peakCount++;
}

// Відображення кількості піків на дисплеї

lcd.setCursor(0, 1);
lcd.print(peakCount);

// Перевірка кнопок для зміни порогу

if (digitalRead(buttonIncreasePin) == LOW) {
    threshold++;
    delay(200); // Дебаг-крок для кнопки
}

if (digitalRead(buttonDecreasePin) == LOW) {
    threshold--;
    delay(200); // Дебаг-крок для кнопки
}
}

```

```

// Якщо кількість піків досягла порогу,
// закриваємо шторку і вимикаємо випарник

if (peakCount >= threshold && !shutterOpen) {

    shutterServo.write(90);                // Закрити шторку

    digitalWrite(relayPin, LOW);           // Вимкнути випарник

    shutterOpen = true;
}

// Якщо кількість піків зменшується,
// відкриваємо шторку і вмикаємо випарник

if (peakCount < threshold && shutterOpen) {

    shutterServo.write(0);                // Відкрити шторку

    digitalWrite(relayPin, HIGH);         // Увімкнути випарник

    shutterOpen = false;
}

// Затримка для стабільної роботи

delay(100);

}

```

Розроблений пристрій забезпечує автоматичне перемикання між двома парами світлодіодів і фотодіодів за допомогою сервоприводів, що підвищує стабільність та точність вимірювань. Інтерактивне налаштування параметрів через дисплей дозволяє гнучко керувати процесом вимірювань та управління випарником.

ВИСНОВКИ

В ході даної роботи було проведено наступне:

- Обраний метод контролю товщини плівки.
- Розроблена схема первинного вимірювального перетворювача з використанням Y-відгалужувача
- Підібрані елементи схеми ПВП, такі як світлодіод та фотодіод, та приведені їх характеристики
- Проведений розрахунок інтенсивності яка попадає в оптоволокно, яка рівна $I_0 = 32 \cdot 10^{-6} \text{ Вт}$
- Приведено розрахунок по знаходженню інтенсивності яка попадає на площадку приймача випромінювання. Обрахована вихідна напруга фотодіода.
- По розрахованим значенням складена таблиця, основні значення якої приведені у таблиці 1Д в додатках, та побудована кінцева залежність вихідної напруги приймача випромінювання від часу (рис 3.5).
- Огляд основних схем підсилення
- Побудова і обґрунтування вибору структурної схеми
- Побудова і опис електричної принципової схеми
- Розрахунок друкованої плати, в результаті були отримані наступні дані: клас точності ДП – третій; розміри ДП – 60x75мм; діаметри контактних площинок – $D_{0,7} = 1,71 \text{ мм}$, $D_{0,8} = 1,81 \text{ мм}$, $D_{1,1} = 2,16 \text{ мм}$.
- Оцінка надійності друкованої плати: сумарна інтенсивність відмов для всіх елементів $\lambda_{\Sigma} = 130,25 \cdot 10^{-8} [\text{год}^{-1}]$; середній наробіток до відмови $T = \frac{1}{\lambda_{\Sigma}} = 767$ (тис. год); імовірність безвідмовної роботи за час $t=2000$ год складає $P(t) = 0,9986$.
- Доданий до пристрою Arduino, що забезпечує автоматичне перемикання між двома парами світлодіодів і фотодіодів за допомогою сервоприводів, що підвищує

					КМР.АКІТ.19050030. 01.000 ПЗ	Арк
Зм.	Арк	№ докум	Підпис	Дата		59

стабільність та точність вимірювань. Інтерактивне налаштування параметрів через дисплей дозволяє гнучко керувати процесом вимірювань та управління випарником.

Також був розроблений повний комплект документації для виготовлення електричного вузла блоку реєстрації.

					КМР.АКІТ.19050030. 01.000 ПЗ	Арк
Зм.	Арк	№ докум	Підпис	Дата		60

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Інтерференційні картини в тонких пластинках і плівках. [Електронний ресурс]. – режим доступу: <https://mozok.click/2531-nterferencyn-kartini-v-tonkih-plastinkah-plivkah.html>.
2. Фізика і хімія твердого тіла, т.16, №3(2015) с.487-490, Я.В.Грицище, В.Ю.Лоя, М.І.Козак.
3. Передавальна характеристика волоконно-оптичного датчика температури з чутливим елементом з халькогенідного скла, І.І.Туряниця, І.І.Чичура, О.В.Козусенок.
4. Texas Instruments Inc. Datasheet OPT101 Monolithic Photodiode and Single-Supply Transimpedance Amplifier – JANUARY 1994 – JUNE 2015.
5. Бутурлакін О.П., Овчаренко В.В., Чичура І.І. Друковані плати (частина 1). Методичні вказівки до виконання курсового проекту для студентів інженерно-технічного факультету спеціальностей «Приладобудування» та «Електронні системи». – Ужгород, УжНУ, 2016. – 40 с.
6. Бутурлакін О.П., Овчаренко В.В., Федак В.В. Надійність електронної апаратури. Методичні рекомендації до виконання розрахунків по оцінці показників надійності радіоелектричної апаратури. Методична розробка для студентів інженерних спеціальностей. УжНУ, 2016, – 56 с.
7. EasyEDA. [Електронний ресурс]. – режим доступу: <https://easyeda.com/>.
8. OPT101 Monolithic Photodiode and Single-Supply Transimpedance Amplifier. [Електронний ресурс]. – режим доступу: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/opt101.pdf>.
9. Визначення товщини плівки. [Електронний ресурс]. – режим доступу: <https://uscc.ua/uploads/page/images/normativnye%20dokumenty/dstu/vigotovlennya-mk-mizhnarodna-gilka-standarty/111-dstu-iso-2808-2019-farbi-ta-laki-viznachennya-tovshchini-pl-vki.pdf>.

10. Методичні вказівки. [Електронний ресурс]. – режим доступу:
<https://www.dstu.dp.ua/Portal/Data/3/22/3-22-mz10.pdf>.
11. Підсилювачі. [Електронний ресурс]. – режим доступу:
<https://org2.knuba.edu.ua/mod/book/view.php?id=32480&chapterid=501>.
12. Публікація на Zenodo «АВТОМАТИЗОВАНИЙ ПРИСТРІЙ КОНТРОЛЮ ТОВЩИНИ ПЛІВКИ В ПРОЦЕСІ ЇЇ КОНДЕНСАЦІЇ АБО РОЗЧИНЕННЯ» [Електронний ресурс]. – режим доступу:
<https://zenodo.org/records/14211679?token=eyJhbGciOiJIUzUxMiJ9.eyJpZCI6IjAyMTYxMzI2LTA2NmItNDFmNC04OGFiLTBINGEyZmRlMjM5YiIsImRhdGEiOiOnt9LCJyYW5kb20iOiI0MGJkNzBlZTk3ODIwYjFmZTkxYWY3MDkwZDhjZDczZCJ9.MYDoXZ9hJv-0Dz5WVAhfMoGleXWrrGSdJcV7l8Es4gaeDomuZU6Z-jpvNWk1T8HuUOIu1QXyXYb2e5Gm-TyIYw>.
13. Лютянський О.О. АВТОМАТИЗОВАНИЙ КОНТРОЛЬ ТОВЩИНИ ПЛІВКИ В ПРОЦЕСІ ЇЇ КОНДЕНСАЦІЇ АБО РОЗЧИНЕННЯ Автоматизація та роботехніка: матеріали 2-ї науково-практичної конференції Modern Perspectives on Global Scientific Solutions.

Додатки

					КМР.АКІТ.19050030. 01.000 ПЗ	Арк
Зм.	Арк	№ докум	Підпис	Дата		63

Таблиця 1Д — До визначення вихідної напруги фотодіода

Товщина плівки $H, \text{м}$	Результуюча інтенсивність I	Час $t, \text{с}$	Струм фотодіода $I_{\text{фд}}, \text{А}$	Вихідна напруга $U_{\text{вих}}, \text{В}$
$3,00 \cdot 10^{-9}$	$6,24 \cdot 10^{-6}$	1	$1,72 \cdot 10^{-6}$	$1,72 \cdot 10^{-2}$
$1,62 \cdot 10^{-7}$	$6,21 \cdot 10^{-6}$	54	$1,71 \cdot 10^{-6}$	$1,71 \cdot 10^{-2}$
$3,24 \cdot 10^{-7}$	$6,14 \cdot 10^{-6}$	108	$1,69 \cdot 10^{-6}$	$1,69 \cdot 10^{-2}$
$4,77 \cdot 10^{-7}$	$6,11 \cdot 10^{-6}$	159	$1,68 \cdot 10^{-6}$	$1,68 \cdot 10^{-2}$
$6,39 \cdot 10^{-7}$	$6,09 \cdot 10^{-6}$	213	$1,67 \cdot 10^{-6}$	$1,67 \cdot 10^{-2}$
$8,01 \cdot 10^{-7}$	$6,05 \cdot 10^{-6}$	267	$1,66 \cdot 10^{-6}$	$1,66 \cdot 10^{-2}$
$9,63 \cdot 10^{-7}$	$6,00 \cdot 10^{-6}$	321	$1,65 \cdot 10^{-6}$	$1,65 \cdot 10^{-2}$
$1,13 \cdot 10^{-6}$	$5,93 \cdot 10^{-6}$	375	$1,63 \cdot 10^{-6}$	$1,63 \cdot 10^{-2}$
$1,28 \cdot 10^{-6}$	$5,91 \cdot 10^{-6}$	426	$1,63 \cdot 10^{-6}$	$1,63 \cdot 10^{-2}$
$1,44 \cdot 10^{-6}$	$5,89 \cdot 10^{-6}$	480	$1,62 \cdot 10^{-6}$	$1,62 \cdot 10^{-2}$
$1,60 \cdot 10^{-6}$	$5,85 \cdot 10^{-6}$	534	$1,61 \cdot 10^{-6}$	$1,61 \cdot 10^{-2}$
$1,76 \cdot 10^{-6}$	$5,79 \cdot 10^{-6}$	588	$1,59 \cdot 10^{-6}$	$1,59 \cdot 10^{-2}$
$1,92 \cdot 10^{-6}$	$5,74 \cdot 10^{-6}$	639	$1,58 \cdot 10^{-6}$	$1,58 \cdot 10^{-2}$
$2,08 \cdot 10^{-6}$	$5,73 \cdot 10^{-6}$	693	$1,57 \cdot 10^{-6}$	$1,57 \cdot 10^{-2}$
$2,24 \cdot 10^{-6}$	$5,70 \cdot 10^{-6}$	747	$1,57 \cdot 10^{-6}$	$1,57 \cdot 10^{-2}$
$2,40 \cdot 10^{-6}$	$5,65 \cdot 10^{-6}$	801	$1,55 \cdot 10^{-6}$	$1,55 \cdot 10^{-2}$
$2,57 \cdot 10^{-6}$	$5,59 \cdot 10^{-6}$	855	$1,54 \cdot 10^{-6}$	$1,54 \cdot 10^{-2}$
$2,72 \cdot 10^{-6}$	$5,56 \cdot 10^{-6}$	906	$1,53 \cdot 10^{-6}$	$1,53 \cdot 10^{-2}$
$2,88 \cdot 10^{-6}$	$5,54 \cdot 10^{-6}$	960	$1,52 \cdot 10^{-6}$	$1,52 \cdot 10^{-2}$
$3,04 \cdot 10^{-6}$	$5,51 \cdot 10^{-6}$	1014	$1,52 \cdot 10^{-6}$	$1,52 \cdot 10^{-2}$