

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю. М. Потебні  
Кафедра електроніки, інформаційних систем та програмного  
забезпечення

## Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи

рівень вищої освіти другий магістерський  
(другий магістерський рівень)

на тему Дослідження та розробка оптоелектронного сенсора абсо-  
лютних кутових положень

Виконав: студент (ка) II курсу, групи 8.1531

Головко К.М.

(прізвище та ініціали)

(підпис)

Напряму підготовки \_\_\_\_\_  
(шифр)

Спеціальності 153

Мікро- та наносистемна техніка

(назва)

Керівник доцент, доцент к.т.н.

Ніконова А.О.

(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Рецензент ген.директор ТОВ "Омега, ЛТД" Шевченко Т.В.

(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

м. Запоріжжя - 2022 рік

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**  
**Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю. М. Потебні**

Рівень вищої освіти \_\_\_\_\_ другий магістерський \_\_\_\_\_  
(перший (бакалаврський) рівень, другий (магістерський) рівень)  
Напрямок підготовки \_\_\_\_\_ 153 \_\_\_\_\_  
(шифр)  
Спеціальність \_\_\_\_\_ Мікро- та наносистемна техніка \_\_\_\_\_  
(назва)

**ЗАТВЕРДЖУЮ**  
Завідувач кафедри \_\_\_\_\_ ЕІСПЗ \_\_\_\_\_  
Критська Т.В. \_\_\_\_\_

“ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 20\_\_ року

**З А В Д А Н Н Я**  
**НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

\_\_\_\_\_ Головко Кирилу Михайловичу \_\_\_\_\_  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту (роботи) \_\_\_\_\_ Дослідження та розробка оптоелектронного сенсора абсолютних кутових положень \_\_\_\_\_

керівник проекту (роботи) \_\_\_\_\_ Ніконова Аліна Олександрівна \_\_\_\_\_  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від “02” червня 2022 року №598-с

2. Строк подання студентом проекту (роботи) \_\_\_\_\_ 01 грудня 2022 року \_\_\_\_\_

3. Вихідні дані до проекту (роботи) \_\_\_\_\_ Лазерний вимірювач переміщень, частота генератора 2 кГц, двополярною напруга живлення +5 і -5 В, точність вимірювання кута менше 12 біт \_\_\_\_\_

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) \_\_\_\_\_ Дослідження методів вимірювання параметрів кутових положень. Розробка оптоелектронного сенсора абсолютних кутових положень. Техніко-економічне обґрунтування розробки кодуєчого пристрою введення інформації. Охорона праці та техногенна безпека. \_\_\_\_\_

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) \_\_\_\_\_ Вимірювачі кутових положень. Абсолютний оптичний енкодер. Загальна схема пристрою. Схема реєстрації оптоелектронного сенсора абсолютних кутових положень. \_\_\_\_\_

## 6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата
		завдання прийняв
<i>I</i>	<i>Ніконова А.О., доцент</i>	
<i>II</i>	<i>Ніконова А.О., доцент</i>	
<i>III</i>	<i>Ніконова А.О., доцент</i>	
<i>IV</i>	<i>Ніконова А.О.Л., доцент</i>	

7. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_ 02.06.2022 року

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
<i>1</i>	<i>Дослідження методів вимірювання куткових координат</i>	<i>14.09.2022</i>	
<i>2</i>	<i>Дослідження оптичних енкодерів</i>	<i>08.10.2022</i>	
<i>3</i>	<i>Дослідження конструкцій оптичного абсолютного енкодера</i>	<i>15.10.2022</i>	
<i>4</i>	<i>Розробка структурної схеми оптоелектронного сенсора абсолютних куткових положень</i>	<i>22.10.2022</i>	
<i>5</i>	<i>Моделювання роботи блоку формування імпульсів системи реєстрації оптоелектронного сенсора абсолютних куткових положень</i>	<i>04.11.2022</i>	
<i>6</i>	<i>Техніко-економічне обґрунтування розробки</i>	<i>11.11.2022</i>	
<i>7</i>	<i>Охорона праці та техногенна безпека</i>	<i>18.11.2022</i>	
<i>8</i>	<i>Оформлення пояснювальної записки</i>	<i>02.12.2022</i>	
<i>9</i>	<i>Рецензування, нормоконтроль, підписання роботи</i>	<i>10.12.2022</i>	
<i>10</i>	<i>Оприлюднений захист магістерської роботи</i>	<i>14.12.2022</i>	

**Студент** \_\_\_\_\_

( підпис )

*Головко К.М.*

(прізвище та ініціали)

**Керівник проекту (роботи)** \_\_\_\_\_

( підпис )

*Ніконова А.О.*

(прізвище та ініціали)

**Нормоконтроль пройдено** \_\_\_\_\_

( підпис )

*Верьовкін Л.Л.*

(прізвище та ініціали)

## Реферат

Дипломна робота містить 81 сторінку, 33 рисунки, 9 таблиць, 22 джерела літератури.

Об'єкт дослідження – оптоелектронні сенсори абсолютних кутових положень.

Мета роботи – розробка оптоелектронного сенсора абсолютних кутових положень, більш точного при роботі в електронних системах, ніж існуючі аналоги.

Завдання роботи – забезпечити точність передачі інформації; забезпечити синхронність функціонування вузлів оптоелектронного сенсора; забезпечити інформаційність вимірів за допомогою датчиків; забезпечити мобільність і автономність використання оптоелектронного сенсора.

Методика досліджень – моделювання пристрою за допомогою програмних забезпечень Electronics Workbench 5.12, SPlan 5.0, Layout 4.0.

Короткий виклад результатів досліджень – використання в вхідних колах емітерних повторювачів зменшує навантаження на перевіряємий пристрій, що забезпечує точність позиціонування.

Результати впроваджень – макет електронного приладу пройшов випробування на кафедрі ЕІСПЗ.

Прогнозні пропозиції – рекомендується подальша доробка схеми, для забезпечення запам'ятовування інформації і переді її на персональний комп'ютер для подальшого аналізу.

СВІТЛОДІОД, ЕНКОДЕР, ДАТЧИК, СЕНСОР, ДИСК, КОМУТАТОР, ЛІЧИЛЬНИК, ГЕНЕРАТОР, ДЕШИФРАТОР, ІНДИКАТОР

Дипломну роботу виконано на кафедрі електроніки, інформаційних систем та програмного забезпечення з 01.09.2022 р. по 10.12.2022 р.

## Зміст

	Стор.
Вступ .....	6
1 Дослідження методів вимірювання параметрів кутових положень.....	8
1.1 Загальні питання проблеми вимірювання параметрів кутових положень.....	8
1.2 Методи вимірювання кутових координат .....	8
1.3 Аналіз методів вимірювання кутового положення .....	14
1.3.1 Магнітні енкодери .....	14
1.3.2 Оптичні енкодери .....	16
1.4 Інкрементні оптичні енкодери .....	19
1.5 Абсолютні оптичні енкодери .....	21
1.6 Види цифрових кодів і особливості їх використання в системах позиціонування .....	22
1.7 Конструкція оптичного абсолютного енкодера .....	26
2 Розробка оптоелектронного сенсора абсолютних кутових положень ..	33
2.1 Структурна схема оптоелектронного сенсора абсолютних кутових положень.....	33
2.1.1 Обґрунтування вибору структурної схеми оптоелектронного сенсора абсолютних кутових положень.....	33
2.1.2 Схема прототипу оптоелектронного сенсора абсолютних кутових положень.....	36
2.2 Система реєстрації оптоелектронного сенсора абсолютних кутових положень.....	40
2.3 Моделювання роботи блоку формування імпульсів системи реєстрації оптоелектронного сенсора абсолютних кутових положень.....	43
2.3.1 Електрична схема блоку формування імпульсів системи реєстрації оптоелектронного сенсора абсолютних кутових положень.....	43

2.3.2 Розробка друкованої плати блоку формування імпульсів системи реєстрації оптоелектронного сенсора абсолютних кутових положень...	47
2.4 Моделювання роботи блоку формування імпульсів на основі генератора числових послідовностей.....	49
2.5 Моделювання блоку формування імпульсів системи реєстрації оптоелектронного сенсора абсолютних кутових положень в програмному середовищі Electronics Workbench 5.12.....	54
3 Техніко-економічне обґрунтування розробки оптоелектронного сенсора абсолютних кутових положень .....	58
3.1 Обґрунтування вибору технології виготовлення оптоелектронного сенсора абсолютних кутових положень .....	58
3.2 Розрахунок витрат на виробництво оптоелектронного сенсора абсолютних кутових положень .....	62
4 Охорона праці та техногенна безпека при розробці оптоелектронного сенсора абсолютних кутових положень .....	64
4.1 Характеристика потенційних небезпечних та шкідливих виробничих факторів .....	64
4.2 Заходи зі зменшення впливу небезпечних та шкідливих виробничих факторів .....	65
4.3 Виробнича санітарія .....	66
4.4 Електробезпека .....	68
4.5 Пожежна безпека. Техногенна безпека .....	69
4.6 Розрахунок місцевого освітлення робочого місця при монтажі елементів на плату .....	72
Висновки та рекомендації .....	74
Перелік посилань.....	76
Додаток А .....	79

## Вступ

У багатьох задачах, зокрема при створенні великогабаритних антенних систем супутникового зв'язку, необхідні сенсори кута високої роздільної здатності, придатні для експлуатації в жорстких кліматичних умовах. Сенсори кута також використовуються в станках з ЧПК, промислових роботах, системах наведення телескопів тощо. Сенсор кута в сучасних умовах використання, окрім високої точності та надійності, повинен мати високі динамічні характеристики відліку, простоту взаємодії з вимірювально-інформаційною системою, зручність початкового встановлення, функції самодіагностики та автоматичного виявлення метрологічних відмов. Ряд застосувань додатково ставлять вимогу обмежених габаритів, надійності передавання результатів на великі відстані, стійкості до впливу кліматичних факторів та промислових завад [1].

Збільшення попиту на телекомунікаційні послуги вимагає розроблення доступного наземного сегмента супутникового зв'язку, а використання високих робочих частот за наявності великої кількості космічних апаратів спонукає застосовувати антени з вузькою діаграмою направленості, що одночасно підвищує вимоги до точності та технологічності сенсорів кута систем позиціонування. В автоматичних вимірювально-інформаційних системах особливого значення набуває функція самодіагностики, яка дає змогу своєчасно виявити відмову сенсора та запобігти аварійній ситуації.

Створення високоточних і швидкодіючих оптоелектронних сенсорів кута вимагає врахування та подолання значної кількості дестабілізуючих чинників: механічних похибок виготовлення, особливостей оптоелектронного зчитування кодового диска, недосконалостей існуючих методів опрацювання зображень тощо.

Розв'язок цієї задачі потребує не тільки врахування особливостей конструкції, а й удосконалення методів опрацювання вимірювальної

інформації. Розвиток електроніки уможливив реалізацію складних алгоритмів опрацювання вимірювальної інформації безпосередньо в сенсорі. Це дає змогу зменшити похибку, підвищити надійність вимірювання та послабити вимоги до точності механічних вузлів шляхом застосування досконаліших схемних рішень та методів опрацювання сигналів, що і обумовлює актуальність обраної теми.

На сьогоднішній день важко уявити сучасне автоматизоване виробництво, або пристрій який б не був оснащеним датчиком кутового повороту (ДКП). Енкодер – електромеханічний пристрій, призначений для вирішення однієї з найважливіших задач в області промислової автоматизації: вимірювання лінійних і кутових переміщень. Це датчик, який застосовується в промисловості з метою перетворення підконтрольної величини в електричний сигнал. За допомогою нього визначається, наприклад, положення вала електричного двигуна. У зв'язку з тим, кожен пристрій, в якому застосовується обертання, обов'язково повинен бути оснащений приладом, контролюючим точність обертального моменту. Популярними сферами використання подібних перетворювачів є системи точного переміщення.

Енкодери незамінні в процесі виробництва на верстатобудівних підприємствах, в робототехнічних комплексах. Використовують їх також у багатьох сучасних вимірювальних приладах, які потребують реєстрації високоточних вимірювань кутів обертання, поворотів і нахилів. Наприклад використання енкодерів в системах наведення проміння антени для відслідковування руху космічних апаратів.



## 1 Дослідження методів вимірювання параметрів кутових положень

### 1.1 Загальні питання проблеми вимірювання параметрів кутових положень

Перевагами оптоелектронних сенсорів кута на основі псевдовипадкової послідовності є можливість роботи при великих похибках закріплення, використання простих технологій та доступних компонентів.

Положення твердого тіла, яке обертається навколо нерухомої осі, може бути описаним двограним кутом  $\varphi$ , утвореним двома площинами, які вміщують вісь обертання, одна з яких нерухома, інша – зв'язана з тілом [2]. Із одержанням інформації про кутове положення тіла також пов'язане визначення його кутової швидкості та прискорення – відповідно першої та другої похідної кутового положення по часу. В ряді випадків виникає потреба контролювати додаткові параметри тіла, такі як зміщення осі обертання чи биття.

Потреба визначати кутове положення твердого тіла та параметри його обертового руху виникає в багатьох галузях техніки, з розвитком якої розвивалися і засоби вимірювання кутових координат.

### 1.2 Методи вимірювання кутових координат

Найпростішим сенсором кута є потенціометр, в якому ковзний контакт зв'язаний із об'єктом вимірювання і переміщується уздовж резистивного елемента, виготовленого з дроту чи провідного пластику. Для однооборотних потенціометричних сенсорів кута діапазон вимірювання обмежений і не досягає повного оберту. Допуск відхилення від лінійності потенціометричних сенсорів кута складає  $6'..10^\circ$ . Перевагою даного методу є можливість отри-

мання абсолютного відліку та простота використання; недоліками є зношування провідної доріжки та відносно низька точність.

Відсутність механічного зношування провідної доріжки властива оптоелектронним безконтактним потенціометрам на основі позиційно-чутливих фотопотенціометрів чи функціональних фоторезисторів.

Вихідна напруга фотопотенціометра визначається положенням світлового зонду, який формується за допомогою оптичної системи, механічно sprzęженої з вхідною віссю пристрою.

Перевагами такого підходу є відсутність тертя електричних контактів, відсутність механічного гістерезису, можливість герметизації конструктивних елементів, можливість роботи в агресивних середовищах та вакуумі, висока роздільна здатність, чутливість та надійність. Водночас недоліками оптоелектронних безконтактних потенціометрів є відносно низька точність (відхилення від лінійності 0,2%) та складна конструкція.

Ємнісні сенсори кута використовують залежність ємності плоского чи циліндричного конденсатора від взаємного перекриття його обкладин. Перевагою ємнісних сенсорів кута є малі механічні зусилля, проста технологія виготовлення, відсутність рухомих контактів (в окремих випадках одна рухома щітка). Трудністю застосування цього принципу є вимірювання невеликої робочої ємності на фоні паразитної ємності такого ж порядку, великі вимоги до опору ізоляції та вплив дестабілізуючих факторів [3].

Використання принципу електричної редукції дає змогу суттєво підвищити точність ємнісних сенсорів кута завдяки зменшенню діапазону вимірювання каналу точного відліку та зменшенню впливу похибок виготовлення окремої секції сенсора. Таким чином, вдалося зменшити похибку ємнісників до 1". Обмеженням ємнісних сенсорів є складність їх взаємодії з цифровою інформаційно-вимірювальною системою (ІВС) та чутливість до електромагнітних завад.

Синусно-косинусний поворотний трансформатор - електрична мікромашина змінного струму, призначена для перетворення кута повороту  $\varphi$  в

напругу, амплітудою пропорційною синусу та косинусу кута повороту  $\varphi$ . Точні поворотні трансформатори, окрім каналу грубого відліку, можуть мати канал точного відліку, сигнал якого змінюється декілька разів за оберт валу. Похибка обертових трансформаторів без електричної редуції може знаходитися в межах  $\pm 20'' \dots \pm 10'$ . Похибку систем на основі обертових трансформаторів із електричною редуцією зменшують до  $1''$ .

Перевагою синусно-косинусних поворотних трансформаторів як сенсорів кута є безконтактне вимірювання, потенційно висока точність та стійкість до жорстких умов експлуатації (вібрація, пил, волога, іонізуюче випромінювання). Використання обертових трансформаторів обмежується складністю їх виготовлення та спряження з цифровою системою керування.

Одним із різновидів поворотних трансформаторів є індуктосини - багатополюсні оборотні трансформатори з торцевими друкованими обмотками. Можливість використання великих коефіцієнтів електричної редуції, усереднення похибок виконання окремих провідників та близькість функції коефіцієнту взаємоіндукції до синусоїди дає змогу зменшувати межу похибки до декількох кутових секунд. Перевагами індуктосинів є висока точність, нечутливість до ексцентриситету диска та стійкість до впливів жорстких умов експлуатації. Недоліками - чутливість до електромагнітних завад та складна обробка сигналу.

Магнітний сенсор кута використовує принцип вимірювання, заснований на визначенні напрямку магнітного поля постійного магніту, прикріпленого до ротора за допомогою двох взаємоперпендикулярно розміщених сенсорів Хола [4]. Перевагою цього методу є малі розміри перетворювача, надійність та стійкість до забруднень; недоліком - низька точність (похибка  $\pm 20'$ ).

Сенсори лінійних та кутових переміщень на основі магнітних шкал засновані на використанні кільця з магнітотвердого матеріалу, на яке нанесена магнітна шкала, яка зчитується голівкою, чутливою до залишкової намагніченості [5]. Два вихідні парафазні гармонічні сигнали інтерполюються для

отримання вищої роздільної здатності. Перевагами використання магнітної шкали, в порівнянні з оптичною, є краща стійкість до забруднень. Недоліками - нижча точність, накопичення феромагнітного пилу та небезпека розмагнічування шкали.

Недоліків попереднього методу вимірювання позбавлена технологія AMOSIN, яка використовує індуктивний принцип вимірювання лінійних та кутових переміщень. За вимірювальну шкалу слугує стрічка з нержавіючої сталі, на яку фотолітографічним методом нанесено рисунок зон з різним магнітним опором. Ця послідовність зчитується за допомогою декількох мікрокатушок, виконаних в підкладці головки зчитування. Похибка інкрементних сенсорів кута лежить в межах  $\pm 3'' \dots \pm 50''$ , абсолютних  $\pm 3'' \dots \pm 30''$ . Перевагами даного методу є висока точність та стійкість до зовнішніх впливів; недоліками - високі вимоги до точності виготовлення та монтажу.

Високої точності вимірювання кутових та лінійних переміщень дозволяють досягнути електроакустичні методи. В основі роботи сенсорів переміщення на поверхневих акустичних хвилях (ПАХ) лежить використання концентричної лінії затримки на ПАХ з рухомим приймачем ПАХ [6]. У хвилеводі, виконаному у вигляді тонкої плівки ZnO на поверхні кварцу, збуджують ПАХ. Положення рухомого приймача можна визначити за фазовим зсувом вихідного сигналу. Серед переваг методу - відносно висока точність та малі габарити.

Принцип роботи сенсора кута повороту на основі методу просторової модуляції полягає в тому, що кутові положення визначають за зміщенням променя, відбитого від прикріпленого до об'єкта просторового модулятора у формі Архімедової спіралі. Положення світлової плями відбитого променя фіксують за допомогою позиційно-чутливого детектора, що складається з чотирьох світлочутливих ділянок, ввімкнених у диференційному режимі. Перевагами даного способу є повна відсутність контакту, високі динамічні характеристики, можливість вимірювання кутової швидкості, биття та вібрацій. Недоліком способу є велика похибка вимірів ( $\pm 0,8\%$ ).

Принцип дії оптоелектронних інкрементних сенсорів кута (растрових інтерполяторів) полягає у модуляції світлового потоку за допомогою оптично спряжених вимірювального та індикаторного растру [7]. При обертанні диска з нанесеним концентричним вимірювальним растром світловий потік від освітлювача до фотоприймача модулюється растровим спряженням і перетворюється у два зсунені на чверть періоду растру гармонічні або прямокутні сигнали. Гармонічні сигнали можуть бути інтерпольовані внутрішньою або зовнішньою схемою для отримання роздільної здатності, вищої за період растру. Доступні оптоелектронні інкрементні сенсори кута з похибкою від часток кутових секунд до декількох мінут. До переваг таких сенсорів слід віднести високу точність, відсутність тертя між растрами, нечутливість до електромагнітних завад; до недоліків - ймовірність помилок підрахунку імпульсів, складна технологія виготовлення та високі вимоги до умов експлуатації.

Для визначення положення інкрементні сенсори кута можуть передбачати додатковий канал мітки, який генерує один чи декілька імпульсів на період обертання - такі сенсори називають квазіабсолютними. Абсолютне положення осі визначають підраховуючи кількість імпульсів, отриманих після сигналу мітки. Для визначення абсолютного положення після ввімкнення живлення вісь сенсора слід повертати до перетину з міткою, що недопустимо для деяких застосувань.

На відміну від інкрементних, оптоелектронні сенсори абсолютного кута (перетворювачі зчитування) визначають положення осі зчитуючи код, нанесений на одну або декілька доріжок диска, що дає змогу отримувати інформацію про положення осі зразу ж після ввімкнення. Щоб виключити грубі помилки зчитування, для кодового диску використовують код Грея, який характерний тим, що сусідні кодові комбінації відрізняються лише в одному розряді (рис. 1.1, а). Недоліком такого сенсора є складність отримання високої роздільної здатності в обмежених габаритах сенсора. Оптична схема зчитування для більше як 14 доріжок та розмірів диска до 100 мм надто ускладнюється. Щоб обійти це обмеження, деякі сенсори підвищують роздільну

здатність інтерполюючи сигнал, отриманий з останньої кодової чи додаткової інкрементної доріжки.

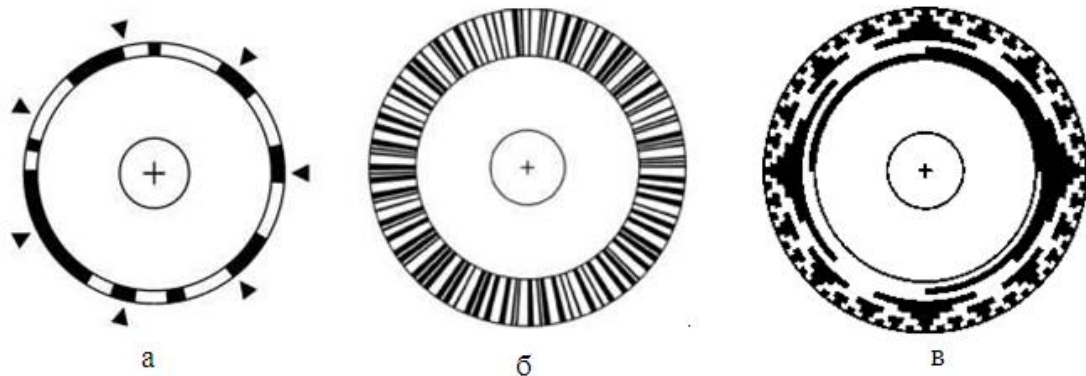


Рисунок 1.1 - Кодовий диск на основі класичного коду Грея (а), однодоріжкового коду Грея (б) та псевдовипадкової послідовності (в)

Перевагою сенсорів кута на основі коду Грея є можливість отримати інформацію про абсолютне положення осі та висока роздільна здатність; недоліком - складна конструкція та високі вимоги до точності виготовлення.

В.Е. Jones та К. Zia запропонували альтернативний спосіб створення оптоелектронних сенсорів кута та переміщення на основі однієї кодової доріжки з символів псевдовипадкової послідовності [8]. На прозорий диск наносять доріжку, яка складається з символів послідовності, закодованої прозорими та непрозорими секторами різної ширини (рис. 1.1, в). За допомогою світлодіода фрагмент кодової доріжки проектується на однорядковому багатоеlementному фотоприймальному пристрої (ОБФП), розміщеному поперек секторів. Отримане зображення аналізується мікроконтролером, при цьому грубий відлік кута визначається кодовою комбінацією на диску, а точний - врахуванням зміщення елементів коду відносно початку відліку ОБФП. Модифікації способу також дозволяють визначати положення за двома координатами, об'єднують інкрементальний та абсолютний відлік чи відрізняються способом кодування диска. Перевагами сенсорів кута на основі псевдовипадкової послідовності (ПВП) є простота схеми, можливість роботи при великих похибках закріплення диска та ОБФП, а також застосування простих технологій та доступних серійних компонентів. Обмеженнями методу є похибки

вимірювання, спричинені недоліками методу локалізації меж секторів, ексцентриситетом та люфтом в опорах осі диска.

Розглянуті методи вимірювання кута можна класифікувати за декількома ознаками: відліком, діапазоном вимірювання, вихідним сигналом, фізичним принципом.

### 1.3 Аналіз методів вимірювання кутового положення

Вимірювання абсолютного кутового положення є дуже важливим у промислових додатках та робототехнічних системах, а особливо при взаємодії об'єктів промислової автоматизації з використанням технології Internet of Things [9]. Існує багато різних методів для датчиків абсолютного положення, особливо енкодерів. Існує два великих класи енкодерів – магнітні та оптичні.

#### 1.3.1 Магнітні енкодери

Порівняно з оптичними енкодерами кількість методів вимірювання абсолютного кутового положення магнітних енкодерів невелика. Для магнітних енкодерів у яких відсутній вал, як правило, підтримується два вихідні канали (канали А і В), які мають розходження фаз між собою на 90 градусів. Оскільки Z-фаза, яка генерується один раз на коло, використовується для створення опорної точки або нульової точки в магнітних енкодерах, більшість типів магнітних енкодерів є датчиками відносного положення. Хоча багатополюсні були досліджені досить давно, в них важко виконати намагнічення та задовольнити вимоги щодо досягнення малих розмірів, високої роздільної здатності та абсолютного кута.

Для типу магнітних енкодерів з валом буде генеруватися лише одне коло синусоїдальних та косинусних сигналів, і, отже, абсолютне кутове положення можна легко отримати за допомогою зворотних тригонометричних

функцій. Однак цей тип датчика не можна закріпити на пристроях з порожнім валом, наприклад, на роботах.

Принцип дії магнітного абсолютного енодера: над датчиком розміщуються магніт, який спеціально намагнічено таким чином, щоб полюси розташовувались в вертикальній площині. Датчик реагує на зміну магнітного поля в радіальній системі координат. Сигнал з датчика магнітного поля потрапляє спочатку на мільтиплексор де відбувається первинне кодування сигналу. На даному етапі механічний кут перетворюється в два диференціальних сигнали з фазовою різницею  $90^\circ$  – синусний і косинусний.

Синусно-косинусні сигнали пропорційні величині магнітного потоку, обробляються в диференціально аналоговому колі із застосуванням класичної техніки скасування зрушень, а потім оцифровуються АЦП з роздільною здатністю в 14 або 15 біт.

Отримані дані передаються в блок цифрової обробки сигналу (ЦОС). Основним елементом блоку ЦОС є 16-бітний RISC-мікроконтролер, який використовує цифрове представлення сигналів для обчислення кута а допомогою табличній функції арктангенса, застосовуваної до співвідношення сигналів  $U_Y/U_X$ :

$$\varphi = \arctg\left(\frac{U_Y}{U_X}\right).$$

Функціональність ЦОС управляється спеціальним алгоритмом мікроконтролера, який зберігається в пам'яті ROM.

На додаток до функції арктангенса ATAN алгоритм контролює усе аналогове коло, вихідну передавальну характеристику, вихідний протокол, етапи калібрування, програмування і режими самодіагностики.

На відміну від класичних датчиків Холла розглянутий вимірювальний принцип забезпечує поліпшену температурну точність, здатність вимірювати кути в діапазоні  $360^\circ$  з високою лінійністю, незалежної від взаімоположення датчику і магніту.



На рисунку 1.4 показано принцип дії абсолютного багато-обертального магнітного енкодера.

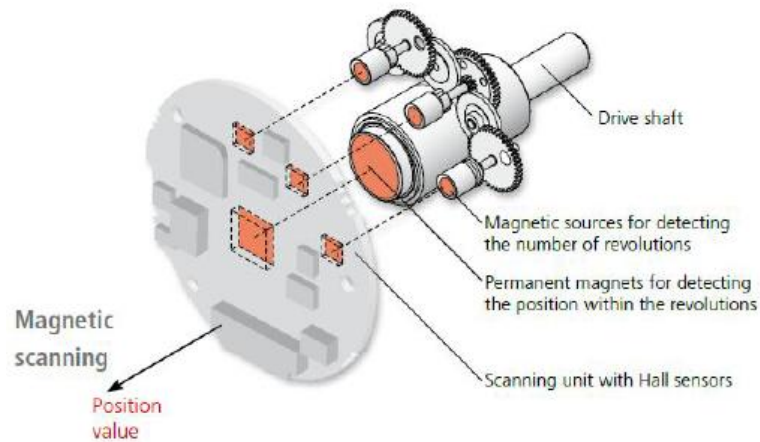


Рисунок 1.4 – Принцип дії абсолютного багато-обертального магнітного енкодера

Завдяки сучасній технології Opto-Asic за один оборот може бути сформовано до 18 біт (262 144 кроки). Це доповнюється до 4096 абсолютних відсканованих оборотів. Обробка сигналу відбувається на швидкості FPGA. Цей тип сканування використовується завжди, коли значення позиції потрібно фіксувати дуже швидко та з високою роздільною здатністю.

Магнітні поворотні енкодера – це вибір для пристроїв з меншими вимогами щодо точності, роздільної здатності та часу. Роздільна здатність обертання становить 11 біт, і це доповнюється 4096 абсолютними відсканованими обертами. Розширена обробка сигналу відсутня, хоча роздільна здатність цього пристрою є програмована.

### 1.3.2 Оптичні енкодера

Оптичний енкодер, показаний на рисунку 1.5, складається із спеціального оптичного диска, який обертається, світлодіода і фотодетектора. Диск з нанесеною оптичною шкалою закріплений на валу. Кодовий диск обертається перед нерухомою маскою, перекриваючи світлове випромінювання світ-

лодіода. Світло, яке проходить через маску, приймається фотодетектором, який генерує імпульси у формі квазісинусоїди, яка перетворюється в меандр, що обробляється лічильником. При обертанні об'єкту спеціальний датчик прочитує інформацію і перетворює її в імпульси.

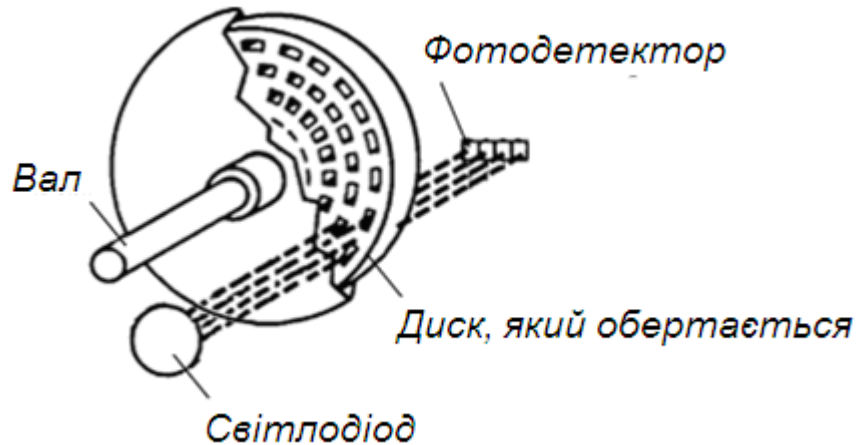


Рисунок 1. 5 – Схема оптичного енкодера

Оптичні енкодери розрізняють за типом отримуваної інформації:

- одиночні;
- здвоєні (квадратурні);
- на двійкових кодах;
- на кодах Грея.

Одиночний енкодер має оптичний диск з рівномірно нанесеними радіальними прорізами по колу. Куту повороту відповідає кількість підраховуваних імпульсів. Гідність такого енкодера – дешевизна і простота реалізації.

Недоліки:

- при запуску системи не ясне початкове положення валу;
- помилки при підрахунку імпульсів на кордоні прорізу – можуть бути помилкові спрацьовування;
- неможливо визначити напрям обертання.

Квадратурний енкодер має оптичний диск з прорізами, показаними на рисунку 1.6.

У такому енкодері прочитується кількість імпульсів і враховується напрям обертання. Крім того, можна уникнути помилкових спрацьовувань при підрахунку імпульсів.



Рисунок 1.6 - Квадратурний енкодер

Недолік – при запуску невідоме початкове положення валу.

Енкодер на двійкових кодах. Оптичний диск такого енкодера забезпечує відсутність помилок при запуску, відсутність помилок при підрахунку імпульсів, можливість визначити напрям обертання.

Недоліки:

- проблеми з граничним положенням, якщо міняється більш за один біт;
- дорожнеча і складність реалізації;
- обмеження в роздільній здатності – чим вище точність, тим більше потрібно каналів для збільшення розрядності передаваного кута.

Енкодер на кодах Грея. Оптичний диск з кодом Грея забезпечує визначення точного положення валу в кожен момент часу, відсутність помилок при запуску системи, підрахунку імпульсів на кордонах, можливість визначити напрям обертання, відсутність проблем з граничними положеннями – міняється одночасно не більш за один біт.

Недоліки:

- збільшення вартості і складність реалізації;
- додаткові обмеження в роздільній здатності – чим вище точність, тим більше необхідно каналів.

Є два основних типи оптичних еncoderів: інкрементні і абсолютні. Інкрементний еncoder вимірює швидкість обертання і може видати відносне положення, в той же час як абсолютний еncoder вимірює безпосередньо кутове положення і на виході дає швидкість. Якщо не брати до уваги зміну інформації про місцезнаходження, то з інкрементного еncoderом, як правило, легше працювати і він забезпечує еквівалентну дозвіл при набагато нижчій вартості, ніж абсолютні оптичні еncoderи.

#### 1.4 Інкрементні оптичні еncoderи

Оптичні поворотні інкрементні еncoderи (датчики кута повороту) стали найбільш популярним пристроєм для вимірювання кутової швидкості і положення в моторах, на валу колеса або рульового механізму (рис.1.7). У мобільних роботів, еncoderи використовуються для контролю положення або швидкості коліс і інших, керованих за допомогою моторів з'єднань (рис. 1.8).

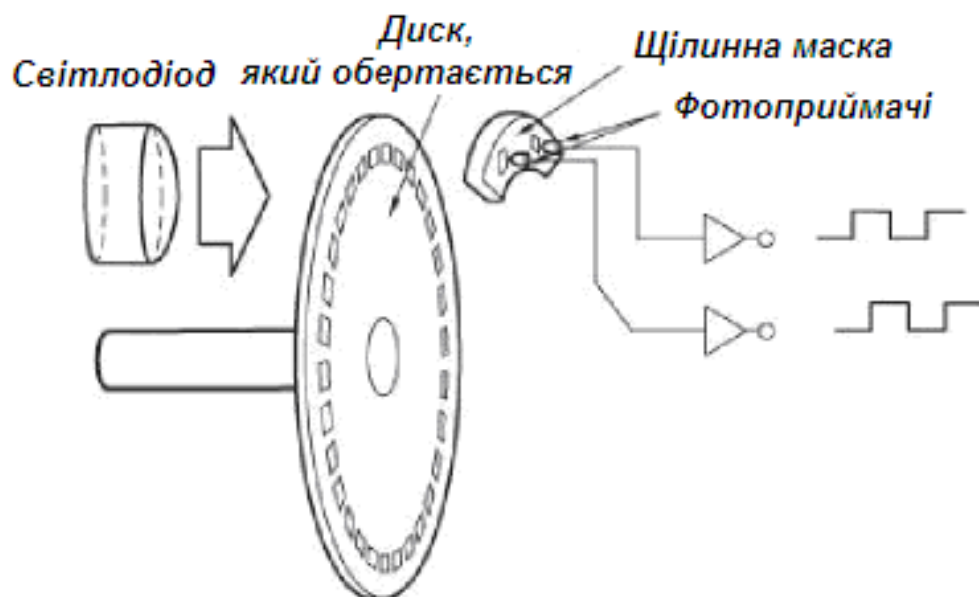


Рисунок 1.7 - Принцип дії інкрементного еncoderа

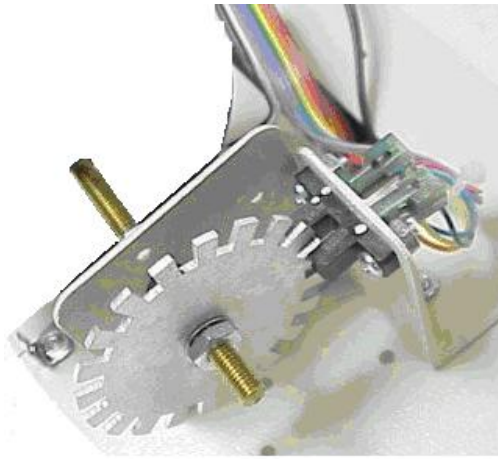


Рисунок 1.8 – Контроль положення або швидкості коліс

Інкрементні енкодери використовуються в якості датчиків швидкості в колі зворотного зв'язку в системах управління, які працюють на середніх і високих швидкостях, але на дуже малих швидкостях чутливі до шумів і проблем зі стабілізацією через помилки квантування. Поліпшена перехідна характеристика вимагає більшої швидкості оновлення, яка для даного числа ліній зменшує число можливих імпульсів енкодера для інтервалу дискретизації (рис. 1.9).

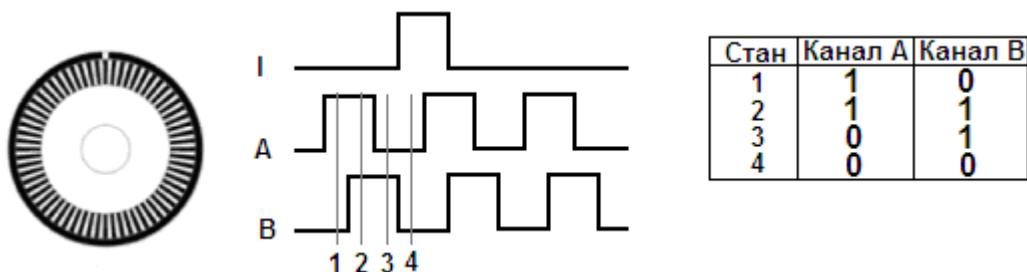


Рисунок 1.9 - Принцип дії квадратурного інкрементного оптичного енкодера

Наслідком інкрементного характеру фазо-квадратурних вихідних сигналів є те, що будь-який дозвіл кутового положення може бути виражено не в абсолютній формі, а тільки щодо деякої опорної точки. Створення такої точки відліку може бути зроблено декількома способами. Для додатків, які включають безперервне обертання на 360 градусів, більшість енкодерів включає в якості третього каналу спеціальний індексний вихід, який перехо-

дить в високий стан на кожному повному обороті вала. Проміжні положення вала потім визначаються числом, на яке збільшився, або зменшився лічильник імпульсів від цього відомого індексованого положення. Одним з недоліків такого підходу є втрата інформації про відносне становище в разі збою живлення.

У разі обмеженого обертання, такого як зворотно-поступальний рух уздовж напрямних (як в верстатах з ЧПУ) можна використовувати електричні кінцеві вимикачі або механічні обмежувачі для завдання початкового положення. Для поліпшення повторюваності, повернення в вихідне положення розбивається на два етапи. Ось обертається зі зниженою швидкістю у відповідному напрямку до тих пір, поки не зустрінеться механізм зупинки, після чого відбувається зворотне обертання протягом визначеного короткого проміжку часу. Вал обертається повільно назад до зупинки на заданій повільній швидкості з цієї заданої початкової точки, тим самим, усуваючи будь-які зміни в інерціальній навантаженні, які могли б вплинути на остаточне вихідне положення. Цей двоетапний підхід використовується, наприклад, при старті крокової двигуна для ініціалізації позиціонування друкуючої головки в принтерах.

### 1.5 Абсолютні оптичні енкодери

У машинобудуванні для здійснення правильного позиціонуванні систем контролю за пересуванням постійно потрібні найостанніші і точніші позиційні дані. Завдяки своїй здатності у будь-який момент здійснювати привласнення точних і однозначних позиційних значень якій-небудь кутовій позиції або позиції переміщення абсолютні енкодери стали однією з найважливіших сполучних ланок між механічною частиною машини і її блоком управління.

Абсолютний енкодер не втрачає свого значення при втраті живлення і, якщо в знеструмленому стані вал енкодера повернув на певний кут або

якусь кількість зворотів, то при появі напруги енкодер відразу видасть нове, фактичне кутове положення валу і фактичний номер звороту. Завдяки цій властивості не потрібно після кожного включення системи виконувати рух механічних частин машини на стартову позицію, що є безперечною перевагою абсолютних енкодерів перед Інкрементними (імпульсними).

Перевагою абсолютного енкодера є також і те, що він не схильний до перешкод. У випадках, коли сигнал з диска не може бути повноцінно прочитаний енкодером, наприклад, якщо вал обертається дуже швидко, точний кут повороту буде зареєстрований, коли швидкість обертання зменшиться. Але навіть при швидкому обертанні валу можлива реєстрація положення, хоч і з меншою точністю. Для цього в увагу просто береться лише інформація яка поступає від більш старших розрядів, тобто спотворена (за рахунок великої швидкості обертання) інформація поступає від молодших розрядів просто ігнорується. Абсолютний енкодер стійкий до вібрацій і іншого роду перешкодам, оскільки помилка в результаті підрахунку «помилкових» імпульсів, які виникли в результаті, наприклад, вібрації, виключена.

## 1.6 Види цифрових кодів і особливості їх використання в системах позиціонування

Бінарні коди (БК) складаються лише з двох символічних станів наприклад чорний або білий, світлий або темний, провідник або ізолятор. Бінарний код в цифровій техніці це спосіб представлення даних у вигляді комбінації двох знаків, які можна позначити як 0 і 1 [10]. Знаки або одиниці БК називають бітами. Одним з обґрунтувань вживання БК є простота і надійність накопичення інформації в якому-небудь носієві у вигляді комбінації всього двох його фізичних станів, наприклад у вигляді зміни або постійності світлового потоку при прочитуванні з оптичного кодового диска.

У таблиці 1.1 представлено дві основні можливості кодування – двійкове кодування і кодування по методу Грея, а також способи представлення інформації в різних системах числення [10].

#### Двійково-десятковий код (Binary code decimal)

Двійково-десятковий код є широко розповсюдженим кодом, який може оброблятися безпосередньо мікропроцесором і є основним кодом для обробки цифрових сигналів. Двійково-десятковий код складається лише з 0 і 1.

Найбільше число, яке може бути виражене двійковим кодом, залежить від кількості використаних розрядів, тобто від кількості біт в комбінації, яка виражає число. Наприклад, для вираження числових значень від 0 до 7 досить мати 3-розрядний, тобто 3-бітовий код.

Таблиця 1.1 – Види кодування

Десяткове число	Звичайне двійкове кодування		Кодування у кодї Грея	
	Двійково-десятковий BCD (Binary)	Шістнадцятирічний HEX (hexadecimal)	Код Грея BCD (Gray)	Шістнадцятирічний HEX (hexadecimal)
0	0000	0	0000	0
1	0001	1	0001	1
2	0010	2	0011	3
3	0011	3	0010	2
4	0100	4	0110	6
5	0101	5	0111	7
6	0110	6	0101	5
7	0111	7	0100	4
8	1000	8	1100	C
9	1001	9	1101	D
10	1010	A	1111	F
11	1011	B	1110	E
12	1100	C	1010	A
13	1101	D	1011	B
14	1110	E	1001	9
15	1111	F	1000	8

Двійково-десятковий код є багатокроковим кодом. Це означає, що при переході від одного положення (значення) в інше можуть змінюватися декілька біт одночасно [10]. Наприклад, число 3 в двійковому кодї 011. Число ж 4 в двійковому кодї 100. Відповідно, при переході від 3 до 4 міняють свій стан



на протилежне все 3 біта одночасно. Прочитування такого коду наводить до того, що із-за недосконалості зчитування, наприклад, із-за неминучих відхилень (допусків) при виробництві кодового диска, зміна інформації від кожної з доріжок окремо ніколи не відбувається одночасно. Як наслідок, при переході від одного числа до іншого, короткочасно (або постійно в разі зупинки валу енодера безпосередньо на критичній ділянці переходу) видається невірна інформація про положення валу. Так, на ділянці вищезазначеного переходу від числа 3 до 4 дуже вірогідна видача числа 7, коли, наприклад, старший біт під час переходу поміняв своє значення трохи раніше чим останні. Таким чином, використання звичайної двійкової коди може з великою вірогідністю наводити до видачі числа, далекого від реального значення, і, як наслідок, непередбачуваного реагування системи управління або контролера на спотворений сигнал енодера. Аби уникнути цього застосовується однокроковий код, наприклад, код Грея [10].

#### Код Грея (Gray code).

Код Грея ідеально личить для систем механічного позиціювання, в т.ч. абсолютних енодерів. Код Грея переважає звичайний двійковий тим, що володіє властивістю постійності бінарної комбінації: зміна кодованого числа на одиницю відповідає зміні кодовій комбінації лише в одному розряді. Таким чином, код Грея є однокроковим кодом. Він будується на базі двійкового за наступним правилом: старший розряд залишається без зміни, а кожен подальший розряд інвертується, якщо попередній розряд вихідного двійкового коду дорівнює одиниці [10].

З таблиці 1.1 видно, що число представлене кодом Грея, при переході від одного числа до іншого (сусіднього), міняє своє значення лише в одному розряді інформації, в той час, як в двійковому коді можуть поміняти свій стан декілька розрядів (біт) одночасно.

В разі використання коду Грея погрішність при прочитуванні інформації на ділянці переходу від одного числа до іншого приведе лише до того, що цей перехід буде лише декілька зміщений за часом, проте видача абсолютно

невірного значення кутового положення на ділянці переходу повністю виключається. Це особливо актуально для датчиків, де носієм/джерелом інформації (наприклад, про положення валу енкодера) є механічний елемент. В разі абсолютного енкодера це оптичний диск з механічно нанесеними на нього мітками, де мінімальні геометричні погрішності/зсуви декількох оптичних доріжок/секторів відносно одне одного не виключаються із-за погрішностей офсетного друку при виробництві на стадії нанесення малюнка на оптичний диск. На рисунку 1.10 представлений диск енкодера з малюнком (растром) у форматі коду Грея.

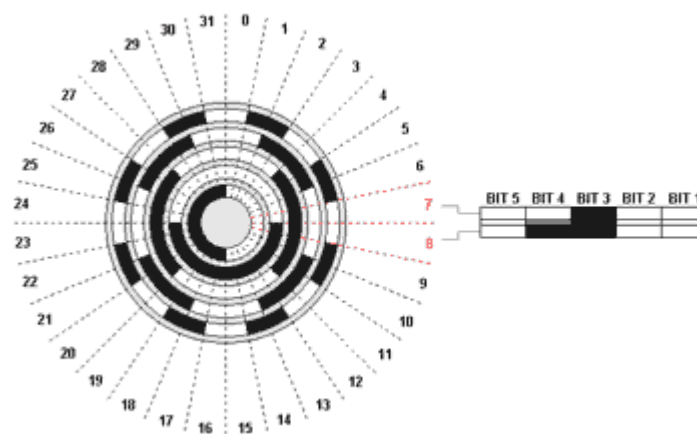


Рисунок 1.10 - Диск абсолютного енкодера з растром в кодї Грея

Перевагою коду Грея є також його здатність дзеркального відображення інформації. Так, інвертуючи старший біт можна простим чином міняти напрям рахунку. Цю функцію виконує вхід «Complement». Залежно від потенціалу на цьому вході видаване енкодером значення буде таким, що зростає або спадає при одному і тому ж фізичному напрямі обертання осі.

Оскільки інформація, виражена в кодї Грея, має чисто кодований характер, що не несе реальної числової інформації, його необхідно перед подальшою обробкою спершу перетворити в стандартний двійковий код. Перетворення коду Грея в звичний бінарний код можна здійснити програмно (у контролері) або використовуючи просту схему з інверторами і логічними елементами «Виключне АБО» (XOR) (рис. 1.11).

## 1.7 Конструкція оптичного абсолютного енкодера

Вимірювальна система абсолютного оптичного енкодера складається з наступних основних компонентів:

- поворотний вал вмонтований на двох підшипниках;
- кодовий оптичний диск, встановлений на вал;
- інфрачервоний світлодіод (як джерело світла);
- опто-електронна (фототранзисторна) прочитуюча матриця;

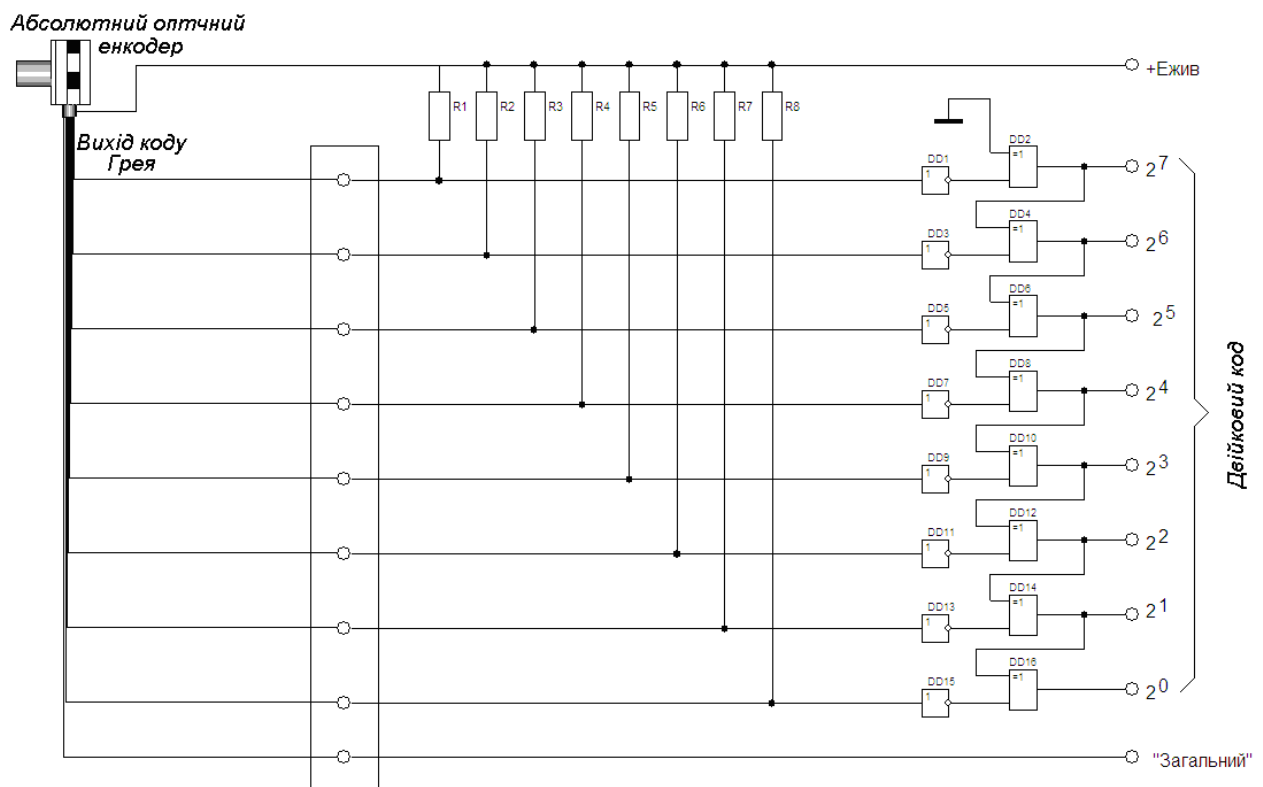


Рисунок 1.11 - Схема перетворення коду Грея у двійковий код

- схема обробки сигналу;
- у багатооборотному енкодері додатково вбудовується редуктор з декількох кодових оптичних дисків зі світлодіодами і прочитуючими матрицями для кожного з них.

Інфрачервоні промені світлодіода просвічують кодовий диск і потрапляють на фототранзисторну прочитуючу матрицю, розташовану із зворотного боку кодового диска (рис. 1.12).

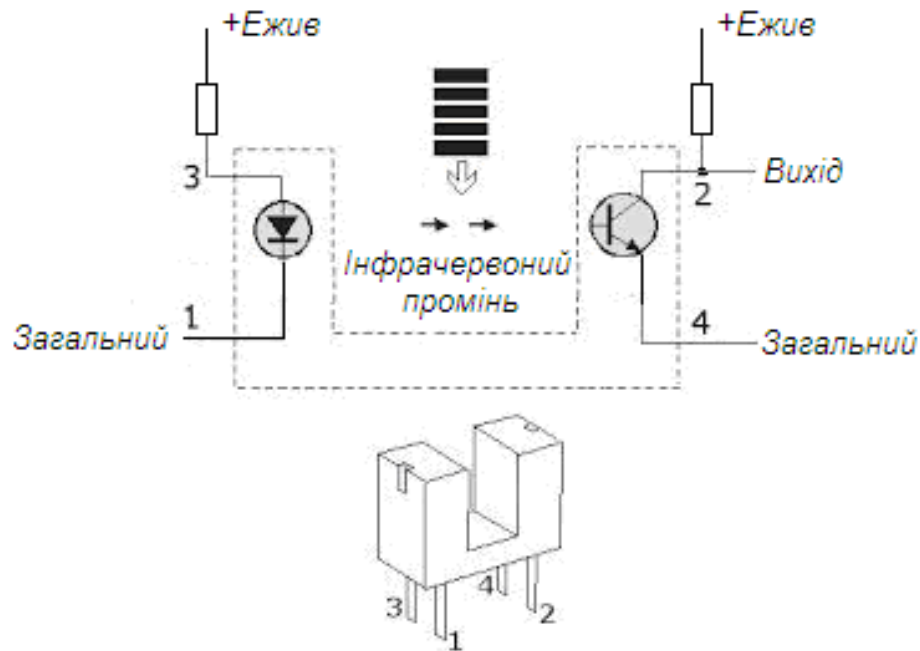


Рисунок 1.12 – Датчик енкодера

При кожному кроці кутового положення кодового диска темні його ділянки запобігають попаданню світла на ті або інші фототранзистори прочитуючої матриці які перетворюють світлові сигнали в електричні. Електричні сигнали перетворюються електронікою енкодера у двійковий код.

У більшості промислових застосувань використовуються поворотні енкодери з роздільною здатністю до 15 біт за оберт і до 4096/256000 відсканованих обертів. Обробка сигналу в процесорі забезпечує безліч функцій оцінки та оптимальне пристосування до певних вимог. Також можуть генеруватися такі сигнали, як кінцеві вимикачі та контроль швидкості.

Для оптичних енкодерів, заснованих на формах розташування фотодетекторів, методи можна розділити на два типи.

У першому типі способу кодування фотодетектори розташовані вздовж радіального напрямку. Одним із методів цього типу є природний двійковий метод кодування, який полегшує енкодерам отримання абсолютного кута обертання. Однак енкодери схильні до помилок зчитування, особливо перехресних помилок, оскільки більша кількість бітів може змінюватися між сусідніми секторами масштабу [11]. Метод кодування сірого кольору - це один

ефективний спосіб вимірювання абсолютного кутового положення, широко використовується в оптичних енкодерах [12]. Цей метод може усунути перехресні помилки, введені природним двійковим методом кодування.

Недоліком цього методу є те, що він не може зчитувати значення кута безпосередньо, оскільки сигнали повинні бути переведені в натуральний двійковий код. Оскільки чим вище роздільна здатність енкодера, тим більше доріжок потрібно в цих двох методах. Енкодери, які використовують цей метод, відносно великі та складні [11].

В другому типі способу кодування всі фотодетектори розташовані вздовж окружного напрямку (рис. 1.13).

Матричне кодування є одним із методів цього типу. Згідно з ним, кодовий диск енкодера розділений на різні віялоподібні області (рис. 1.14).

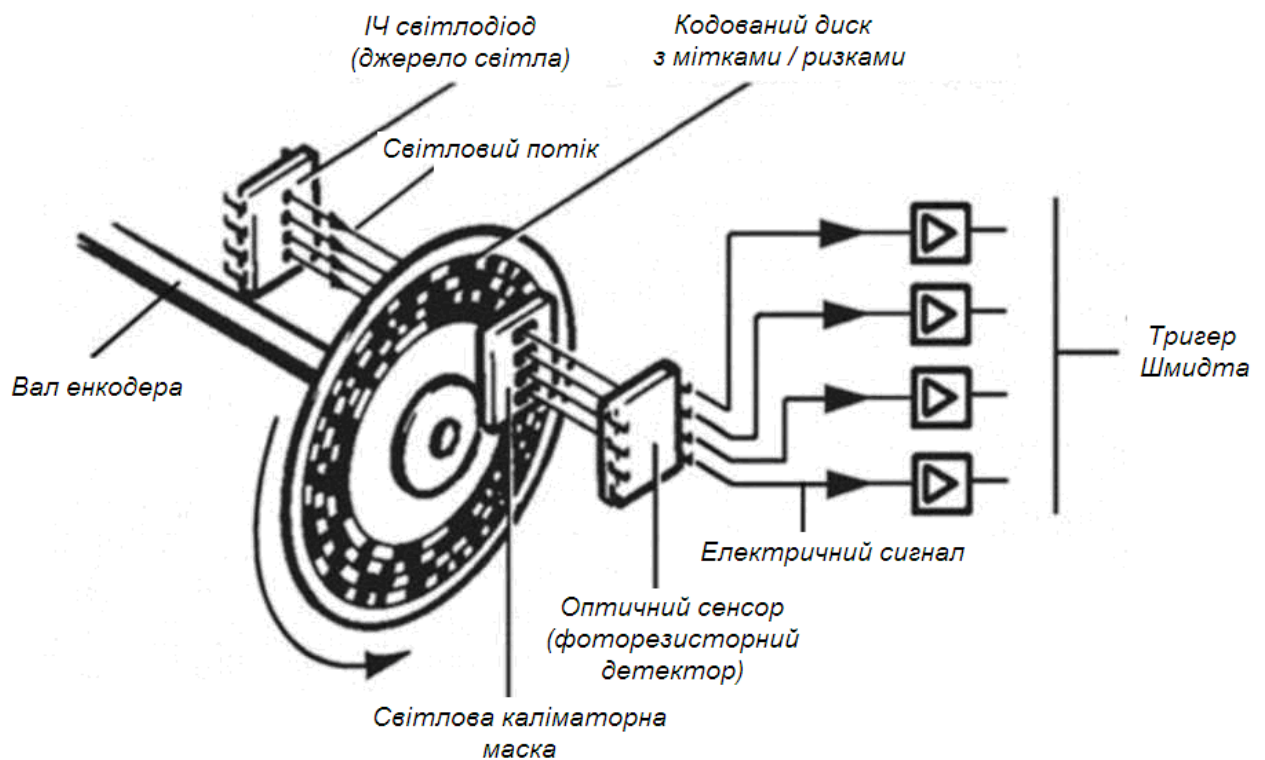


Рисунок 1.13 - Фотодетектори розташовані вздовж окружного напрямку

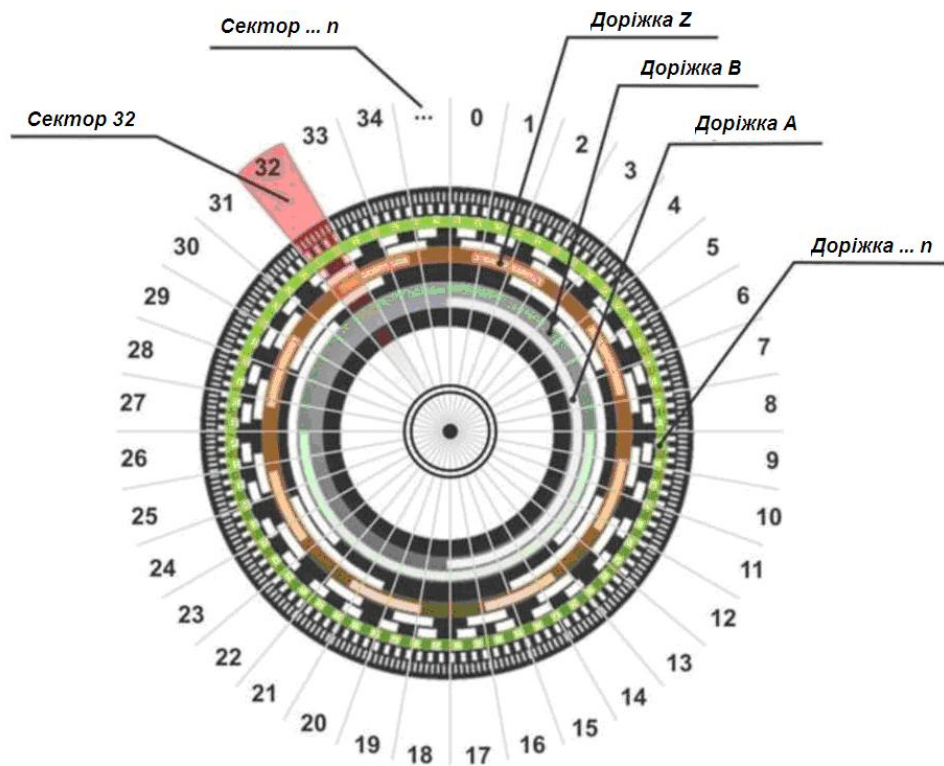


Рисунок 1.14 - Розділення диска на сектори

Крім того, головки для читання, які лежать в одній доріжці, але на різних ділянках, використовуються для представлення різних бітів інформації про місцезнаходження. Розмір енкодера може бути значно зменшений. Однак похибки вимірювання, спричинені помилками встановлення енкодерів, будуть більшими, ніж інші два методи, згадані вище [12]. Метод псевдовипадкового кодування використовується для вимірювання абсолютного кутового положення.

У цьому методі енкодер складається з доріжки коду синхронізації та доріжки коду індексу, що допомагає зменшити розмір енкодера. Однак кількість головки зчитування та щілин буде збільшуватися в геометричній прогресії із покращенням точності вимірювання енкодера. Тому метод рідко використовується у високобітових енкодерах.

Енкодери типу ноніуса мають дві - три доріжки на кодовому диску для вимірювання абсолютного положення обертання, прості в конструкції та компактні в порівнянні з іншими. Однак метод вимірювання абсолютного ку-

та положення повинен «знати» номери щілин, навколо яких обертався кодер, що навряд чи можна отримати в реальному застосуванні.

Метод кодування шин з М-кодом [13] дозволяє уникнути грубих помилок і корисний для мінімізації фізичних розмірів енкодерів. Однак для досягнення більш високої роздільної здатності абсолютні енкодери, що використовують метод кодування М-коду, повинні включати невеликий крок щілини, що заважає фотодетектору енкодера отримувати фіксовану амплітуду сигналу.

В методі квазіабсолютного кодування, кодовий диск енкодера складається з доріжки циклічного коду та доріжки коду індексу. Всі ефективні біти кодування позиції перераховані в доріжці індексного коду. Отже, по окружному напрямку повинно бути багато фотодетекторів. Метод корисний для мінімізації розмірності енкодера, однак для отримання першого коду позиції йому потрібен процес завантаження. Тому певною мірою воно не належить до методу абсолютного вимірювання положення. Використовуючи метод даного типу, розмір енкодерів можна значно зменшити порівняно з двома іншими методами першого типу. Однак у цих методах існує багато фотодетекторів, що є ще одним обмеженням для збільшення роздільної здатності вимірювання та зменшення розмірів енкодерів.

Існують два типи абсолютних енкодерів:

- абсолютні одно-оборотні енкодери;
- абсолютні багато-оборотні енкодери.

Абсолютний одно-оборотний енкодер - це датчик кутового положення, який підраховує кількість унікальних цифрових кодів за один оборот обертання диска.

Абсолютний багато-оборотний енкодер - це датчик кутового положення, який підраховує кількість унікальних цифрових кодів за більш, ніж один оборот обертання диска за допомогою спеціального механічного вузла і додаткових фотодетекторів.

На рисунку 1.15 показано принцип роботи абсолютного оптичного енкодера з редуктором. Такий пристрій можна використовувати для вимірювання куту оберту, коли енкодер розмінюється на осі двигуна, що здійснює багато обертів перш, ніж механізм редуктору здійснить хоча б один повний оберт.

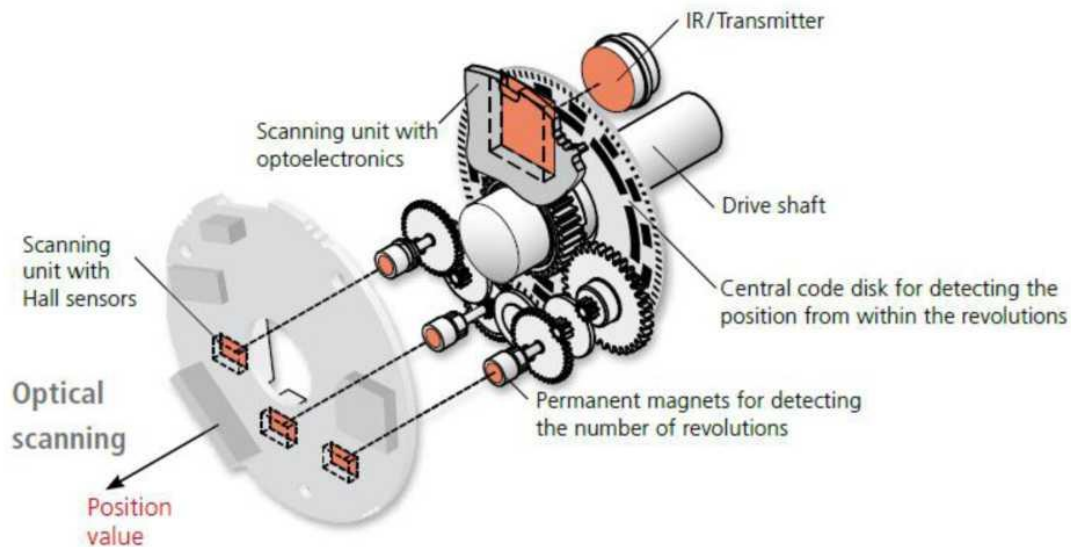


Рисунок 1.15 - Принцип роботи абсолютного оптичного енкодера з редуктором

Метою дипломної роботи являється розробка оптоелектронного сенсора абсолютних кутових положень, більш точного при роботі в електронних системах, ніж існуючі аналоги.

Для досягнення поставленої мети в роботі необхідно виконати наступні завдання:

- 1) провести аналіз існуючих систем вимірювання кутових положень та переміщень;
- 2) розробити структурну схему оптоелектронного сенсора абсолютних кутових положень;
- 3) провести дослідження структурної схеми обраної системи;
- 4) провести моделювання електричних схем окремих блоків системи;



5) провести техніко-економічні дослідження системи та розробити заходи з охорони праці та техногенної безпеки робіт, що планується виконати.

## 2 Розробка оптоелектронного сенсора абсолютних кутових положень

### 2.1 Структурна схема оптоелектронного сенсора абсолютних кутових положень

#### 2.1.1 Обґрунтування вибору структурної схеми оптоелектронного сенсора абсолютних кутових положень

Лазерні вимірники переміщень, розроблені на основі лазерних інтерферометрів Майкельсона або лазерних доплерівських інтерференційних перетворювачів, не мають механічного контакту з об'єктом і забезпечують можливість дистанційних вимірів швидкості і довжини з високою точністю.

Відомі інтерференційні вимірники лінійних переміщень, які містять лазерне джерело випромінювання, оптичний інтерферометр Майкельсона з фотоелектричною системою перетворення модульованого світлового потоку в послідовності прямокутних імпульсів і процесор для фіксації результатів виміру [14]. Частота дотримання прямокутних імпульсів відповідає швидкості об'єкту, а період дотримання цих імпульсів відповідає половині довжини хвилі стабілізованого по частоті лазера. Переміщення об'єкту фіксується уздовж лазерного пучка вимірювального плеча інтерферометра. Такі вимірники призначені для прецизійних абсолютних вимірів довжини. Вони дозволяють вимірювати довжину з високою роздільною здатністю (долі нанометра) і точністю. Максимальна вимірювана довжина залежить від потужності випромінювання лазера і не перевищує декілька десятків метрів. Такі вимірники вимагають при їх створенні дорогих оптичних вузлів і не дозволяють використовувати їх в тих випадках, коли поверхня об'єкту виміру є розсіюючою, а не дзеркальною.

Відомі лазерні вимірники довжини, побудовані на основі лазерних доплерівських інтерференційних перетворювачів швидкості рухомих об'єктів

[15]. Лазерний інтерференційний перетворювач виконує пасивні функції і призначений для формування уявних або дійсних ґраток інтенсивності, що проєктуються за допомогою оптичної системи на об'єкт переміщення. Інтерференційні ґратки задають необхідну метрику простору. Інтерференційний сигнал виходить за рахунок дифракції світла на частках, що пересікають світлові ґратки. На практиці широко використовується схема, де два пучки двопроменевого інтерферометра фокусуються об'єктивом в досліджувану область. При пересіченні пучків під певним кутом утворюються інтерференційні ґратки. Розсіювальна частка об'єкту переміщення, яка проходить крізь такі ґратки, дає імпульс сигналу на фотодетекторі, що модулюється з частотою, зворотною періоду ґратки і пропорційної швидкості переміщення об'єкту. Вимірюючи частоту сигналу при відомій довжині хвилі лазера і геометрії інтерферометра, можна визначити швидкість руху об'єкту, а підсумовуючи значення швидкості, помноженої на час між відліками швидкості, - величину переміщення об'єкту за повний час його руху. Такі вимірники дозволяють вимірювати чималі переміщення (десятки і більше метрів) об'єктів з дифузно відзеркалювальною поверхнею. Погрішність таких вимірників досить висока і складає десятки мікрон.

Відомі лазерні інтерферометри лінійних переміщень, засновані на явищах оптичного зворотнього зв'язку в напівпровідникових лазерах [16]. Такі вимірники переміщень містять напівпровідниковий лазер із вбудованим в нього фотодіодом. Випромінювання лазера через коліматор прямує на об'єкт переміщення. До складу інтерферометра входять також трансїмпедансний підсилювач, низькочастотний фільтр, два формувачі рахункових імпульсів, реверсивний лічильник імпульсів і дисплей результату виміру. Вказані вимірники не вимагають дорогих оптичних вузлів і дозволяють вимірювати переміщення об'єктів з дифузно відзеркалювальною поверхнею в діапазоні від декількох десятків сантиметрів до 2-2,5 метрів. При цьому роздільна здатність вимірників дорівнює половині довжини хвилі випромінювання

напівпровідникового лазера. Такий вимірник переміщень не дозволяє проводити вимірювання переміщень з манометричною роздільністю.

Відомі також вимірники дальності [16], засновані на використанні як на явищі оптичного зворотнього зв'язку, так і частотної модуляції випромінювання в напівпровідникових лазерах. Датчиком інтерференційного сигналу є напівпровідниковий лазер із вбудованим фотодіодом і використання таких датчиків у вказаних вимірниках дозволяє практично виключити вживання елементів традиційної оптики. В основі таких вимірників покладена властивість напівпровідникових лазерів змінювати частоту випромінювання під впливом змін інжекційного струму.

Близьким за технічним рішенням до зазначених вище вимірників, є лазерний вимірник відстані до об'єкту [16]. Вимірник відстані містить напівпровідниковий лазер з фотоприймальним пристроєм, оптично зв'язаним через коліматор з об'єктом, відстань до якого потрібно виміряти, модулятор струму лазера, блок термостабілізації лазера і електронний блок обробки вихідного сигналу фотоприймача, що забезпечує набуття значення дальності до об'єкту з погрішністю 1-1.5 мм. У цьому пристрої також використовується властивість оптичного зворотного зв'язку і частотна модуляція випромінювання лазера. Проте цей вимірник не дозволяє вимірювати переміщення об'єкту. У роботах [17] для пристроїв з датчиками інтерференційного сигналу, приведені залежності між характеристиками інтерференційного сигналу (частота, фаза) і величинами деяких вимірюваних параметрів, наприклад відстані до об'єкту, його швидкості і переміщення. Показано, що при використанні даних датчиків (лазер плюс фотодіод) дальність (відстань до розсіюючого об'єкту) визначається частотою інтерференційного сигналу. Якщо об'єкт нерухомий, то частота інтерференційного сигналу строго відповідає відстані до об'єкту. Величину переміщення розсіюючого об'єкту можна визначити шляхом обчислення зсуву фази інтерференційного сигналу, що виникає при переміщенні об'єкту. Ці положення і використані в пропонованому технічному рішенні.

## 2.1.2 Схема прототипу оптоелектронного сенсора абсолютних кутових положень

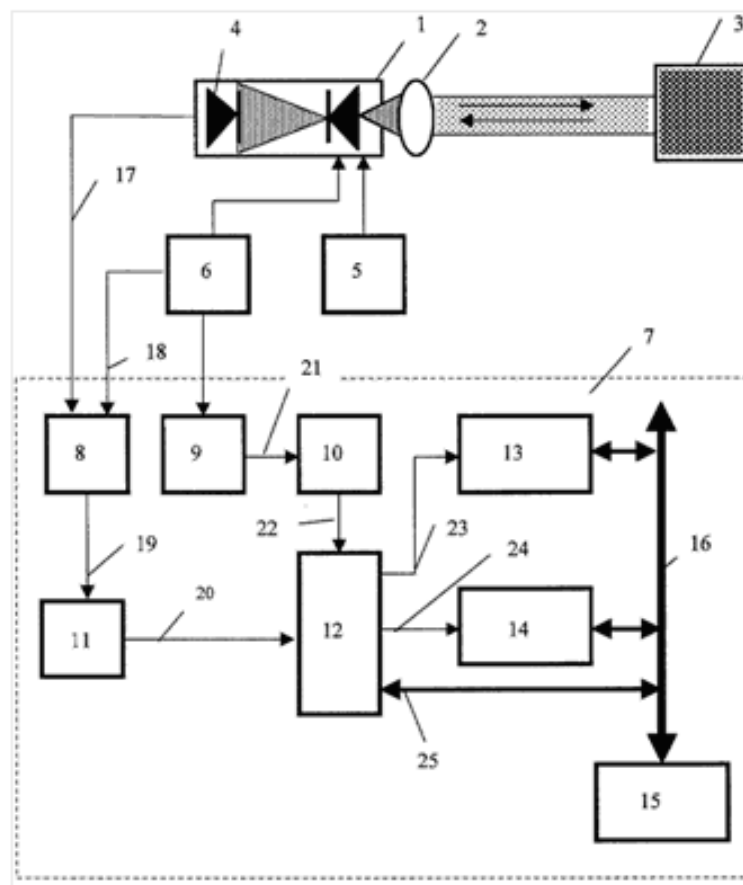
У розглянутому лазерному вимірнику дальності і лінійних переміщень вказаний недолік прототипу (неможливість виміру переміщень) усувається за рахунок того, що в електронний блок обробки сигналу фотодіода введені нові електронні вузли. Ці вузли забезпечують формування не лише сигналів, що забезпечують вимір дальності до об'єкту, але і сигналів, що дозволяють виконувати вимір і підрахунок цілого числа періодів інтерференційних смуг і величини його дробової частини, що і забезпечує вимір величини переміщення.

Вимір цих параметрів досягається за рахунок того, що в лазерному вимірнику дальності, що містить напівпровідниковий лазер з фотоприймальним пристроєм, введений операційний пристрій, до неінвертуючого входу якого підключений вихід фотодіода, а інвертуючий вхід сполучений з першим додатковим виходом модулятора. Це дозволяє у вихідному сигналі фотодіода усунути принципово присутню перешкоду, обумовлену модуляцією струму лазера. До другого додаткового виходу модулятора послідовно приєднані формувачі синхроімпульса і стробімпульса, що забороняють роботу пристрою на час перехідного процесу, викликаного стрибкоподібною зміною модуляційного струму. До виходу операційного пристрою послідовно підключені компаратор і перший вхід блоку формування трьох імпульсних сигналів. Вихідним сигналом компаратора є послідовність прямокутних імпульсів з частотою інтерференційного сигналу. Другий вхід блоку формування трьох імпульсних сигналів сполучений з виходом формувача стробімпульса. Перший і другий виходи згаданого блоку формування сполучені відповідно з вимірниками тривалості початкової фази і періоду інтерференційного сигналу, а виходи вказаних вимірників і третій вихід формувача трьох імпульсних сигналів сполучені з шиною комп'ютера. Вимірники тривалості перетворюють свої вхідні сигнали в цифровий код.

Прийом даних від вимірників і формувача трьох імпульсів і управління їх роботою здійснюється по шині комп'ютера.

Новизною, вибраного прототипу [18], є введення елементів пристрою зв'язку між ними. До них відносяться: операційний пристрій, один з входів якого підключений до першого додаткового виходу модулятора струму напівпровідникового лазера з метою компенсації модуляційної перешкоди у вихідному сигналі фотодіода; формувач синхроімпульсів і формувач імпульсів фіксованої тривалості (стробімпульс), що забороняють роботу пристрою на час перехідних процесів; компаратор, що формує імпульси з частотою інтерференційного сигналу; блок формування трьох імпульсних сигналів і вимірники (у цифровому вигляді) його вихідних сигналів; комп'ютер, управління роботою пристрою.

На рисунку 2.1 представлена схема лазерного вимірника дальності і лінійних переміщень.



Рисункок 2.1 – Лазерний вимірювач переміщень

Лазерний вимірник містить напівпровідниковий лазер 1, оптично зв'язаний через коліматор 2 з об'єктом та його зображенням 3, відстань до якого потрібно виміряти, вбудований в напівпровідниковий лазер фотоприймач 4, блок термостабілізації 5, модулятор 6 струму лазера, підключений до напівпровідникового лазера, і електронний блок 7 обробки вихідного сигналу фотоприймача. Напівпровідниковий лазер і фотоприймач утворюють датчик інтерференційного сигналу. Електронний блок обробки 7 містить операційний пристрій 8, формувач 9 синхроімпульсів, формувач 10 стробоскопічних імпульсів фіксованої тривалості. У електронний блок обробки 7 також входять компаратор 11, блок формування 12 трьох імпульсних сигналів, блоки 13 і 14 вимірів відповідно тривалості поточної фази і періоду інтерференційного сигналу, комп'ютер 15 для обчислення результату виміру і шина 16 даних і управління для зв'язку комп'ютера з блоками 12-14. Неінвертуючий і інвертуючий входи операційного пристрою 8 позначені відповідно цифрами 17 і 18. Фотоприймач 4 напівпровідникового лазера 1 сполучений з неінвертуючим входом 17 операційного пристрою 8, що інвертує вхід 18, який сполучений з першим додатковим виходом модулятора струму лазера. Вихідні сигнали блоків 8, 11, 9 і 10 позначені відповідно цифрами 19, 20, 21 і 22, а вихідні сигнали формувача 12 позначені цифрами 23, 24 і 25. На виході 19 операційного пристрою 8 формується інтерференційний сигнал.

Працює пристрій таким чином. Струм напівпровідникового лазера 1 змінюється модулятором 5 по лінійному закону. В даному випадку модуляційний струм змінюється по пилкоподібному закону. Модульований таким чином пучок через коліматор 2 прямує на досліджуваний об'єкт. Розсіяне ним випромінювання потрапляє назад в активне середовище лазера, де посилюється і інтерферує з вихідним випромінюванням, оскільки із-за кінцевого значення швидкості світла розсіяне випромінювання приходить в напівпровідниковий лазер з деякою затримкою. Унаслідок цієї затримки частота цього випромінювання не збігається з частотою, що генерується напівпровідниковим лазером в даний момент. В результаті на виході вбудо-

ваного в напівпровідниковий лазер 1 фотодіода 4 виникає електричний сигнал, параметри якого несуть інформацію про відзеркалювальну поверхню об'єкту, його віддаленість і характеристики руху. При модуляції лазера пилкоподібним струмом змінюється не лише частота випромінювання, але і потужність лазера. Тому сигнал на виході фотодіода 4, окрім корисної інтерференційної частини, містить пилкоподібну перешкоду. Ця перешкода фільтрується завдяки тому, що на інвертуючий вхід операційного пристрою 8 подається сигнал пилкоподібної модуляції з першого додаткового виходу модулятора 6. Вихідний сигнал 19 операційного пристрою 8 поступає на вхід компаратора 11 і перетворюється на його виході 20 в послідовність прямокутних імпульсів. Ці імпульси поступають на перший вхід формувача 12 трьох імпульсних сигналів, на другий вхід якого поступає стробімпульс з формувача 10. Синхроімпульс формувача 9, що запускається сигналом з другого додаткового виходу модулятора, з'являється на початку кожного циклу модуляції на виході 21 і запускає формувач 10, вихідний імпульс якого використовується у формувачі 12 трьох імпульсних сигналів для заборони проходження інтерференційного сигналу з виходу 20 компаратора 11 на якийсь час, що відповідає перехідному процесу під час стрибкоподібної зміни пилкоподібного модулюючого струму.

Для виміру дальності комп'ютер обчислює частоту інтерференційного сигналу як величину, зворотню виміряному періоду. Для фіксації результату виміру дальності в метричній системі одиниць значення частоти перемножається на відповідний коефіцієнт пропорційності.

Для виміру величини переміщення комп'ютер використовує інший алгоритм: значення відрізків часу, відповідних поточній фазі і періоду інтерференційного сигналу, використовуються комп'ютером для обчислення поточної фази, вираженої в частинах періоду інтерференційного сигналу. Частота зчитування цих інтервалів часу повинна, щонайменше, перевищувати частоту модуляції струму лазера в чотири рази. При переміщенні об'єкту комп'ютер порівнює значення поточної і попередньої фаз. Якщо він виявляє



стрибок фази, абсолютне значення якого перевищує 0.5 періоду, то залежно від знаку цього стрибка до поточного значення фази додає один період. Якщо знак стрибка негативний, то одиниця підсумовується із знаком плюс, а якщо знак стрибка позитивний, то одиниця підсумовується із знаком мінус. Знак стрибка фази визначає напрям руху об'єкту, а підсумовувана одиниця свідчить про те, що об'єкт переміщення змістився на величину, рівну одному періоду інтерференційного сигналу. Результат виміру переміщення фіксується в елементі пам'яті комп'ютера як сума цілого значення періодів інтерференційних смуг і дробової частини інтерференційної смуги. Результат виміру переміщення з початкового положення в кінцеве положення обчислюється як різниця значень кінцевої і початкової фаз інтерференційного сигналу. Для здобуття результату переміщення, представленого в метричній системі одиниць, комп'ютер перемножає різницю значень фаз інтерференційного сигналу на значення половини довжини хвилі випромінювання напівпровідникового лазера.

## 2.2 Система реєстрації оптоелектронного сенсора абсолютних кутових положень

У розроблюваній системі у якості реєструючої частини пропонується використати дифракційну решітку, яка розташовується безпосередньо на об'єкті дослідження.

Основним елементом датчика, схема якого наведена на рис. 2.2, є блок-сенсор, що є прозорою пластинкою товщиною кілька міліметрів. На одній стороні пластини знаходиться фазова дифракційна решітка з профілем у вигляді меандру, а на іншій стороні - дзеркальна плівка, що відбиває.

Блок-сенсор закріплюється на досліджуваній конструкції та просвічується оптичним лазерним випромінюванням. Промінь лазера, спрямований на

блок, дифрагує на фазових дифракційних ґратах, поширюється в прозорому матеріалі пластини, відбивається від дзеркальної плівки і повторно дифрагує на фазових ґратах.

Таким чином, в основі роботи пристрою, як і в попередньому випадку, лежить подвійна дифракція оптичного пучка на фазових дифракційних ґратах, що має профіль у вигляді меандра.

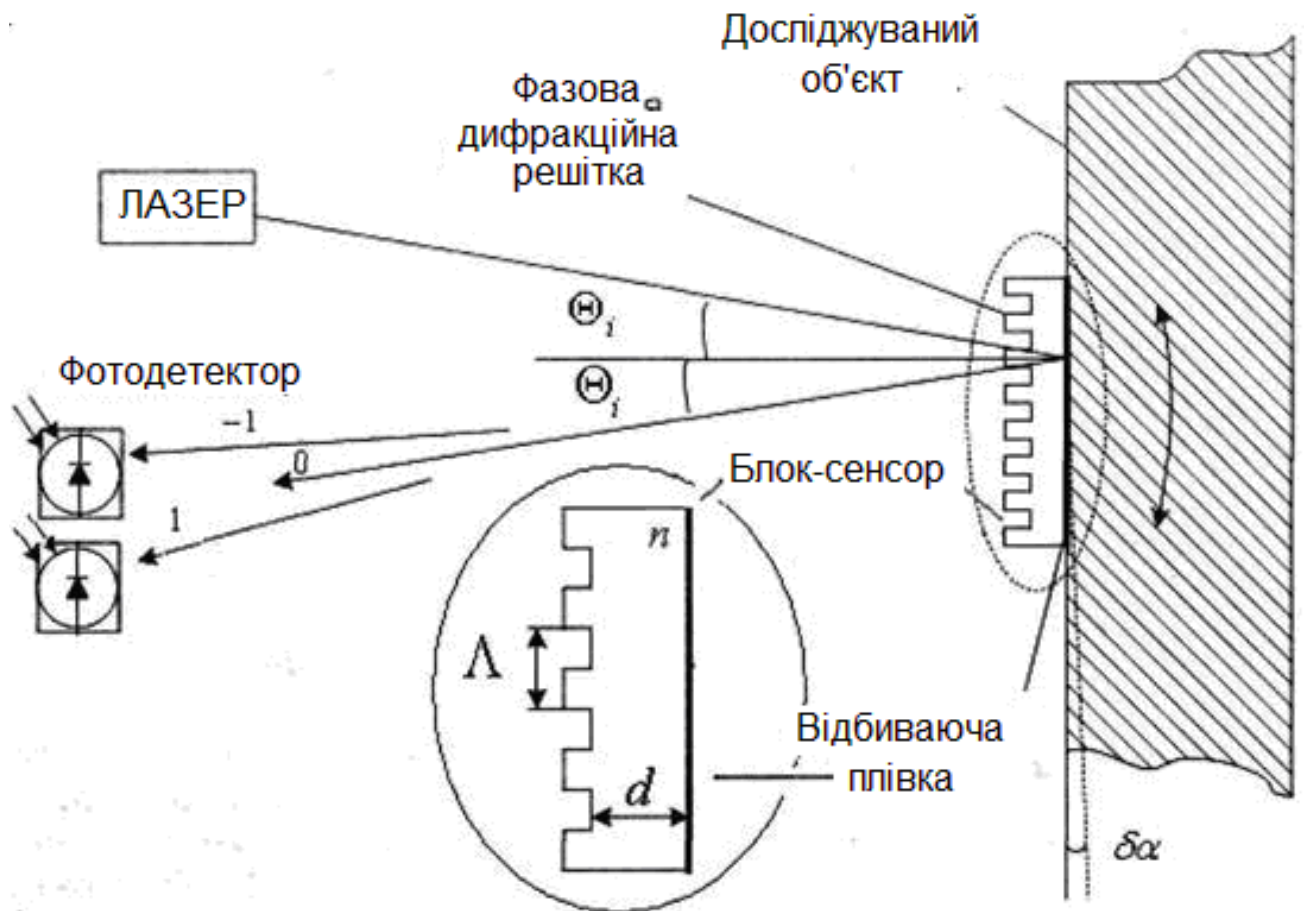


Рисунок 2.2 – Система реєстрації оптоелектронного сенсора абсолютних кутових положень

При нахилі ділянки конструкції на невеликий кут відбувається нахил блоку-сенсора. Це викликає усунення слідів падаючого та відбитого пучків по поверхні решітки. Якщо замінити відбитий промінь дзеркально симетрич-

ним, то можна замінити аналіз взаємодії оптичного пучка з блоком-сенсором аналізом еквівалентної схеми з двох решіток, що знаходяться на відстані, що дорівнює подвоєній товщині блока-сенсора.

Звідси у припущенні малого кута падіння  $\theta$  для блока-сенсора з решіткою, що має оптимальне значення амплітудної фазової модуляції  $\Phi_m=45^\circ$ , можна отримати вираз, що описує залежності потужностей випромінювання в перших порядках дифракційних від кута нахилу  $\alpha$ :

$$P_{\pm 1}(\alpha) = P_0 R \left[ \frac{2}{\pi^2} + \frac{2}{\pi^2} \cos \left( \frac{4\pi d}{n\Lambda} \alpha \mp L' \right) \right] \quad (2.1)$$

Тут  $P_0$  - падаюча потужність оптичного випромінювання;  $R$  - коефіцієнт відбиття дзеркальної плівки;  $d$  - товщина скляної пластини блока-сенсора;  $L' = 2d\pi\lambda/n\Lambda^2$  - параметр відстані.

Для реєстрації та вимірювання малих кутових коливань використовуються одна з безлічі лінійних ділянок гармонійної залежності потужності випромінювання одного з перших порядків дифракції від кута нахилу блока-сенсора -  $P_{-1}(\alpha)$  або  $P_{+1}(\alpha)$ . Для роботи пристрою потрібно забезпечити розташування робочої точки на середині лінійної ділянки. Це досягається вибором початкового кута падіння оптичного пучка.

## 2.3 Моделювання роботи блоку формування імпульсів системи реєстрації оптоелектронного сенсора абсолютних кутових положень

### 2.3.1 Електрична схема блоку формування імпульсів системи реєстрації оптоелектронного сенсора абсолютних кутових положень

Вихідні сигнали від фотодіодів надходять на однойменні контакти вилки XP1. Через провідники друкованої плати сигнали надходять на входи мікросхеми DD1, є АЦП, що представляє інформацію в послідовному дванадцятирозрядному коді. Мікросхема DD2 є генератором змінної напруги.

Мікросхеми DD1 і DD2, працюючи в парі, дозволяють врахувати та компенсувати фазові зрушення у вихідних сигналах, що необхідно для отримання точних даних. Для цього сигнали надходять на відповідні входи генератора DD2. Сигнал компенсації фазового зсуву надходить із виходу SRF мікросхеми DD2 через ланцюг C12, R1 на вхід REF мікросхеми DD1. Входи FS1... FS3 мікросхеми DD2 дискретно задають частоту генератора. При підключенні, вказаному на схемі, частота генератора дорівнює 2 кГц. За інших поєднань частоту можна підвищити до 20 кГц.

Живлення мікросхем DD1 і DD2 здійснюється двополярною напругою +5 і -5 В. Ці напруги створює імпульсний перетворювач напруги DA1. Діод VD1 захищає модуль від виходу з ладу при неправильному підключенні полюсів живлення. Конденсатори C1 та C2 зменшують перешкоди модуля в лінію живлення. Конденсатори C3 ... C11 знижують рівень перешкод, що надходять по лініях живлення +5 -5 В і зменшують вплив мікросхем один на одного.

Інформація про кут повороту передається мікросхемою DD1 через контакти вилки XP1 по трипровідному кабелю.

Кут повороту перетворюється на послідовний двійковий код, який передається через послідовний інтерфейс: ДАНІ контакти А14, В14, С14 вилки ХР1, ДОЗВІЛ ЧИТАННЯ контакти А12, В12, С12 вилки ХР1 і ТАКТ контакти з номерами 13 вилки. Вихід ДАНІ утримується у високоімпедансному стані, коли вхід ДОЗВІЛ ЧИТАННЯ встановлено в логічну одиницю.

Коли зовнішній пристрій встановлює логічний 0 на вході ДОЗВІЛ ЧИТАННЯ, вихід ДАНІ активовано, і інформація про поточний кут передається через послідовний інтерфейс. Дані передаються, використовуючи часові параметри сигналу, що надходить вхід ТАКТ. Максимальна частота сигналу ТАКТ становить 2 МГц. Гарантується надійна передача даних через часовий інтервал 600 нс (0.6 мкс ) після встановлення зовнішнім пристроєм логічного нуля на вході ДОЗВІЛ ЧИТАННЯ. Якщо потрібна точність вимірювання кута менше 12 біт, то сигнал ДОЗВІЛ ЧИТАННЯ переходить у високий рівень після читання необхідної кількості біт. Сигнал ДОЗВІЛ ЧИТАННЯ можна перевести у високий рівень, тим самим заборонивши читання, мінімум через 100 нс (0.1 мкс) після останнього негативного фронту імпульсу. Для повторення читання даних сигнал ДОЗВІЛ ЧИТАННЯ повинен бути відновлений мінімум через 250 нс. Час читання інформації про кут повороту можна розрахувати, враховуючи найбільшу довжину інформаційного кадру 12 біт і тактову частоту інформації - 2 МГц. Час читання складе  $[600+(12 \times 500)+600+100] = 7.3$  мкс, що відповідає частоті трохи більше 135 кГц.

Електрична схема пристрою представлена на рисунку 2.3

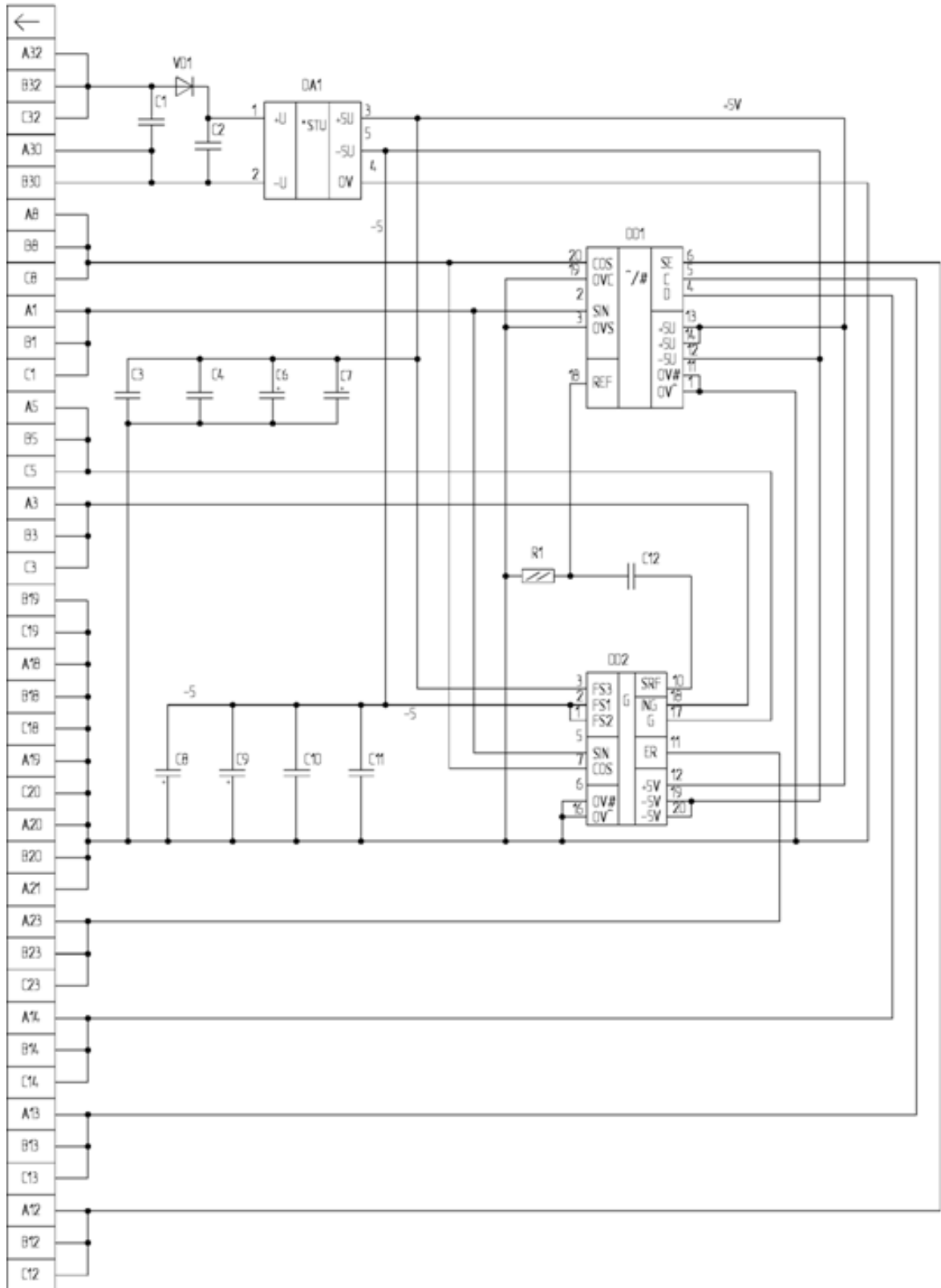


Рисунок 2.3 – Електрична схема блоку формування імпульсів системи реєстрації оптиелектронного сенсора абсолютних кутових положень

На рисунку 2.4 представлено часові діаграми функціонування пристрою.

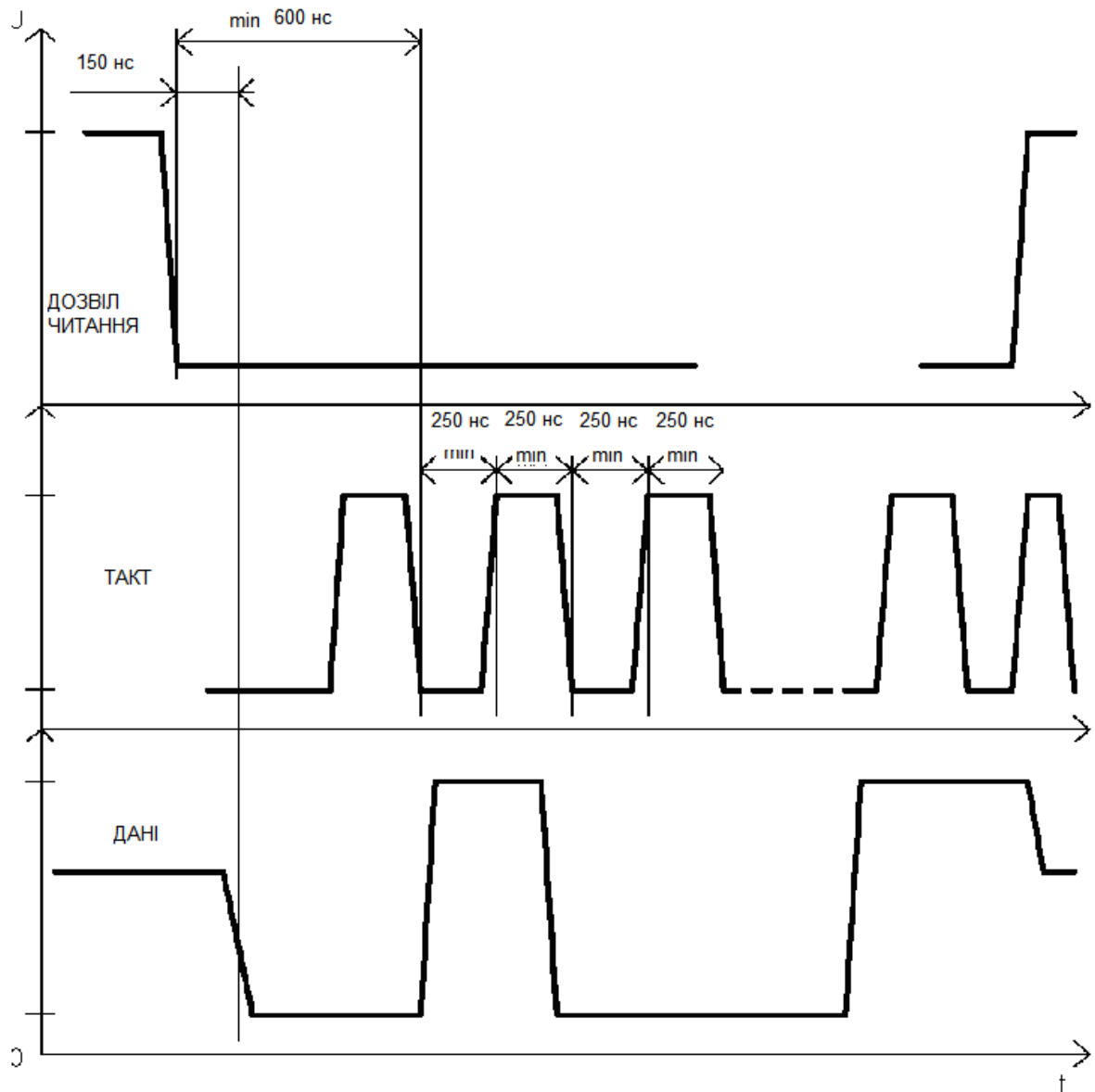


Рисунок 2.4 – Діаграми функціонування блоку формування імпульсів системи реєстрації оптичного сенсора абсолютних кутових положень

### 2.3.2 Розробка друкованої плати блоку формування імпульсів системи реєстрації оптоелектронного сенсора абсолютних кутових положень

Модуль виконаний на двосторонній друкованій платі розмірами 100×45 мм. Багатошарові керамічні конденсатори ємністю 0.1 та 0.47 мкФ можуть бути від будь-якого виробника. Конденсатори ємністю 22 мкФ найкращі типу HI-CAP, але можна застосувати електrolітичні. Працездатність схеми з електrolітичними конденсаторами перевірено. Частина XP1 – розетка DIN41612-396FSW.

Мікросхему DD2 можна замінити MC вищого класу – AD2S99BP. Прилад DA1 є високоефективним перетворювачем постійної напруги, що забезпечує роботу модуля в широкому діапазоні напруги живлення з рівнем шумів у вихідній напрузі 50 мВ.

Допустимо застосувати джерело напруги з такими чи вищими параметрами. Джерело живлення DA1 має гальванічну розв'язку, що зменшує вплив на роботу перешкод лінії живлення 24 В. На рисунках 2.5 – 2.7 представлено результат моделювання друкованої плати блоку формування імпульсів.

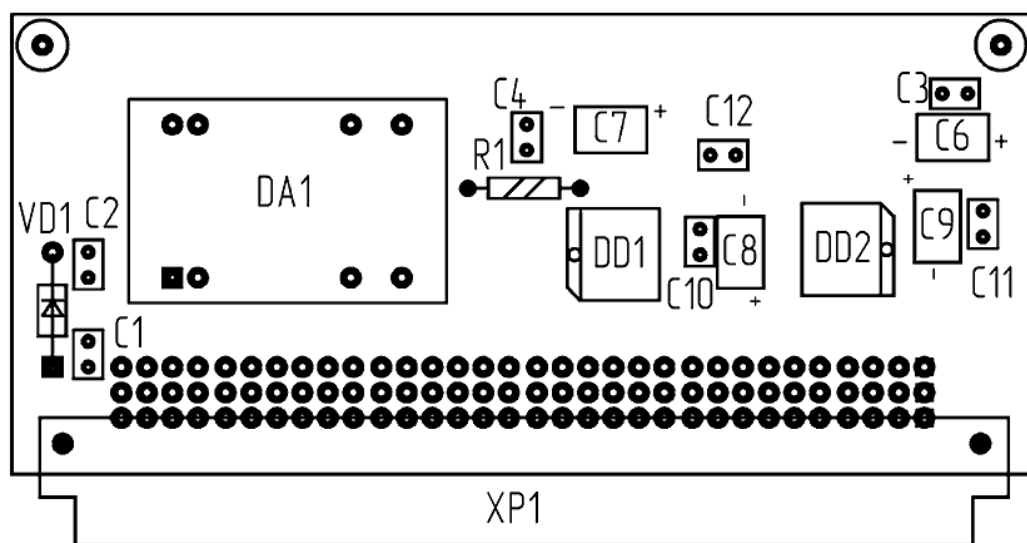


Рисунок 2.5 – Розміщення елементів на друкованій платі



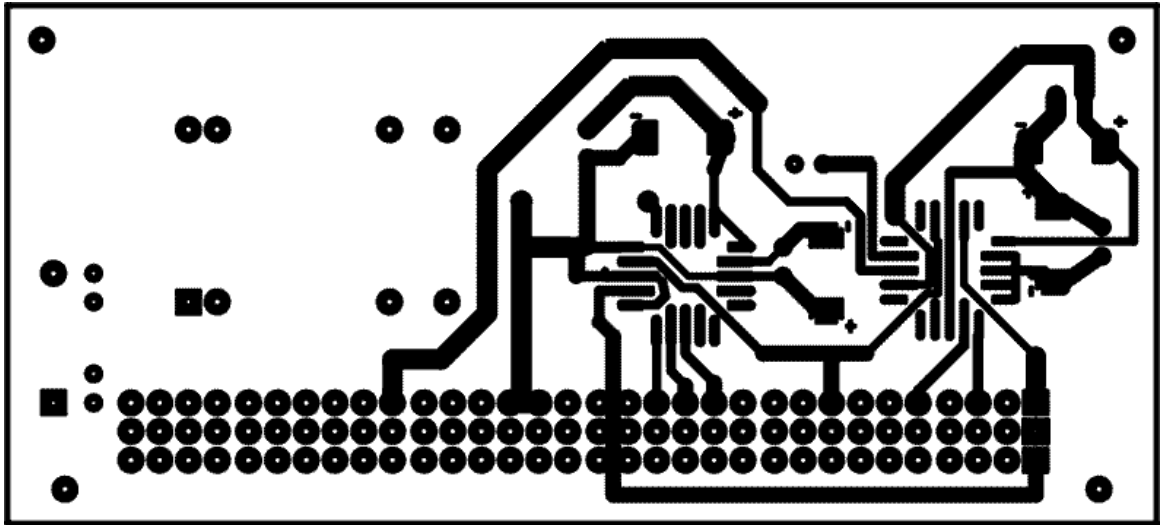


Рисунок 2.6 – Сторона установки елементів та пайки

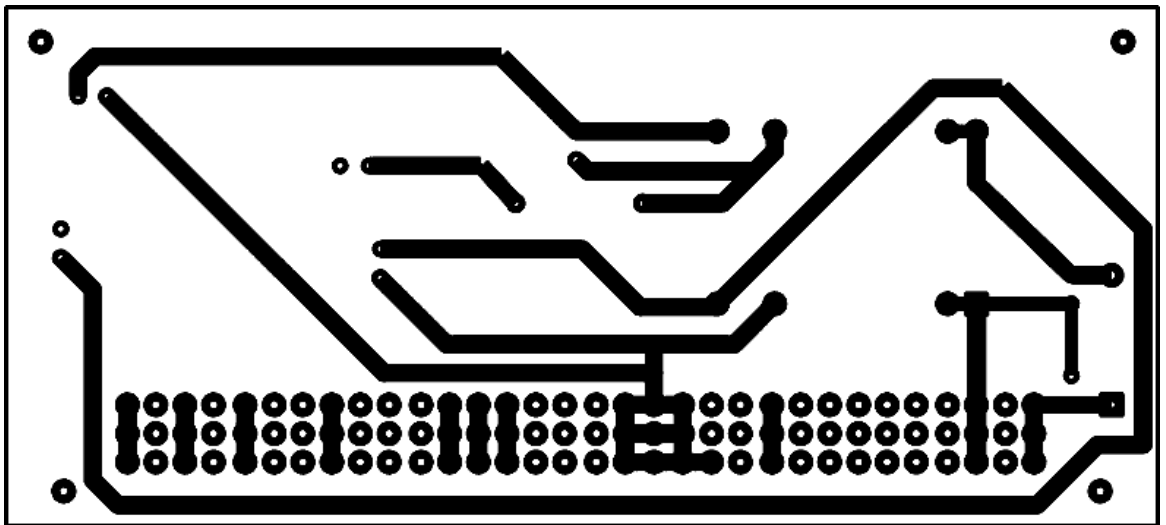


Рисунок 2.7 – Сторона пайки вивідних елементів

## 2.4 Моделювання роботи блоку формування імпульсів на основі генератора числових послідовностей

У роботі було проведено моделювання роботи блоку формування імпульсів на основі генератора числових послідовностей [10].

Послідовнісні пристрої - генератори чисел називають також розподільниками сигналів, оскільки послідовність двійкових чисел на їх виходах використовується для управління роботою інших цифрових вузлів. Число станів генератора називається довжиною послідовності чисел  $L_n$ , яка дорівнює кількості тактів, після якої послідовність чисел на виході генератора повторюється. По своїй структурі генератори чисел близькі або до лічильників, або до регістрів. Будь-який лічильник можна вважати генератором послідовності чисел, яка має  $L_n = K_{\text{рах.}}$ . Як правило, необхідне число розрядів генератора дорівнює числу двійкових розрядів  $m$  в числах, які генеруються. Якщо  $m > \log_2 L_n$ , то для зменшення числа використовуваних тригерів, структура генераторів змінюється. В цьому випадку генератор доцільніше будувати у вигляді лічильника з модулем рахунку  $K_{\text{рах.}} = L_n$  і підключеною до його виходів комбінаційною схемою, яка синтезує необхідні значення двійкових чисел послідовності. Розглянемо генератор чисел  $4 - 3 - 2 - 12$ . Оскільки  $L_n = 4$ , то за основу генератора можна взяти двохрозрядний лічильник  $K_{\text{рах.}} = 4$ , який генерує числа  $0 - 1 - 2 - 3$ . Підключивши до виходів лічильника комбінаційну схему, яка виконує перетворення коду відповідно до таблиці функціонування, отримуємо структуру генератора, який створює задану послідовність чисел.

Для побудови генератора використовуємо лічильник, побудований на двох JK – тригерах. Використовуємо схему віднімаючого лічильника, отже, подамо сигнал перенесення на тригер старшого розряду не з прямого виходу попереднього тригера, а з інверсного. Складемо таблицю переходів станів розрядів лічильника (табл. 2.1).

Таблиця 2.1 – Таблиця станів розрядів лічильника генератора

n	$Q2^n$	$Q1^n$	$Q2^{n+1}$	$Q1^{n+1}$
0	0	0	1	1
1	0	1	0	0
2	1	0	0	1
3	1	1	1	0

Складемо карти Карно для функцій переходів тригерів кожного розряду (рис. 2.8).

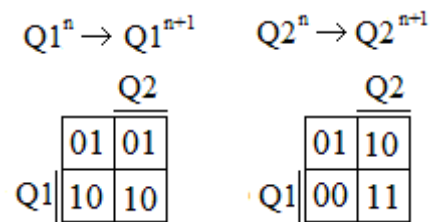


Рисунок 2.8 – Карти функцій переходів тригерів генератора

Використовуючи словник переходів JK – тригера для кожного входу тригера, складемо карти Карно, в клітинках яких проставимо сигнали, необхідні для забезпечення переходів тригерів, вказаних в однойменних клітинках карт функцій переходів (рис. 2.9).

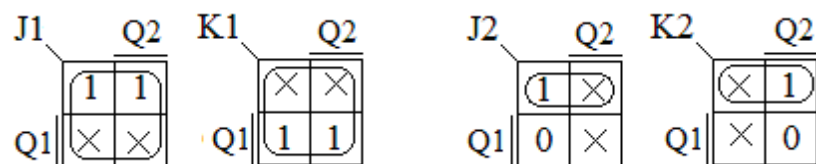


Рисунок 2.9 – Карти Карно функцій входів тригерів лічильника

Виконаємо мінімізацію логічних функцій входів в картах Карно з метою отримання їх аналітичних виразів. У результаті отримуються наступні функції входів тригерів лічильника генератора:

$$J1 = 1; K1 = 1;$$

$$J2 = \overline{Q1}; K2 = \overline{Q1};$$

Складемо логічну схему лічильника генератора чисел (рис. 2.10).

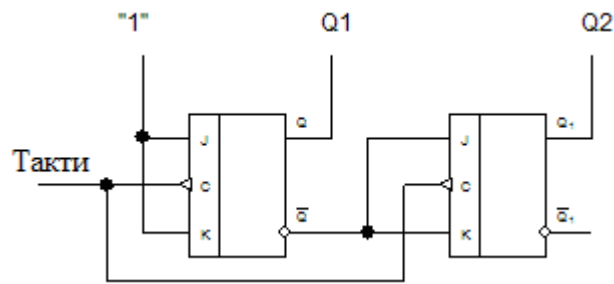


Рисунок 2.10 – Лічильник генератора чисел

Перевіримо алгоритм спрацьовування тригерів лічильника по тактах відповідно до рівняння JK – тригера:  $Q^{n+1} = J\overline{Q}^n + \overline{K}Q^n$

Вихідний стан виходів тригерів:

$$Q1^n = 0; Q2^n = 0; \overline{Q1}^n = 1; \overline{Q2}^n = 1.$$

Спрацьовування тригерів по тактах:

- ①  $Q1^{n+1} = 1 \cdot 1 + 0 \cdot 0 = 1; Q2^{n+1} = 1 \cdot 1 + 0 \cdot 0 = 1;$
- ②  $Q1^{n+1} = 1 \cdot 0 + 0 \cdot 1 = 0; Q2^{n+1} = 1 \cdot 0 + 0 \cdot 1 = 0;$
- ③  $Q1^{n+1} = 1 \cdot 1 + 0 \cdot 0 = 1; Q2^{n+1} = 0 \cdot 1 + 1 \cdot 0 = 0;$
- ④  $Q1^{n+1} = 1 \cdot 0 + 0 \cdot 1 = 0; Q2^{n+1} = 1 \cdot 1 + 0 \cdot 0 = 1.$

Це відповідає таблиці станів розрядів лічильника генератора чисел.

Розрахуємо комбінаційну схему, яка виконує перетворення коду відповідно до таблиці функціонування (табл. 2.2).

Таблиця 2.2 – Алгоритм функціонування комбінаційної схеми генератора чисел

Число	Q2	Q1	F4	F3	F2	F1
4	1	1	0	1	0	0
3	0	0	0	0	1	1
2	0	1	0	0	1	0
12	1	0	1	1	0	0

У результаті отримуємо наступні функції виходів генератора числової послідовності 4 – 3 – 2 – 12:

$$F1 = \overline{Q2} \cdot \overline{Q1};$$

$$F2 = \overline{Q2} \cdot \overline{Q1} + \overline{Q2} \cdot Q1 = \overline{Q2} \cdot (\overline{Q1} + Q1) = \overline{Q2} \cdot 1 = \overline{Q2};$$

$$F3 = Q2 \cdot Q1 + Q2 \cdot \overline{Q1} = Q2 \cdot (Q1 + \overline{Q1}) = Q2 \cdot 1 = Q2;$$

$$F4 = Q2 \cdot \overline{Q1}.$$

З метою скорочення кількості елементів схеми проінвертуємо вихідні сигнали F1 і F2:

$$F1 = \overline{\overline{Q2} \cdot \overline{Q1}} = \overline{Q2 + Q1};$$

$$F2 = \overline{Q2};$$

$$F3 = Q2;$$

$$F4 = \overline{Q2} \cdot Q1 = \overline{\overline{Q2} + \overline{Q1}}.$$

Схема генератора числової послідовності представлена на рисунку

2.11.

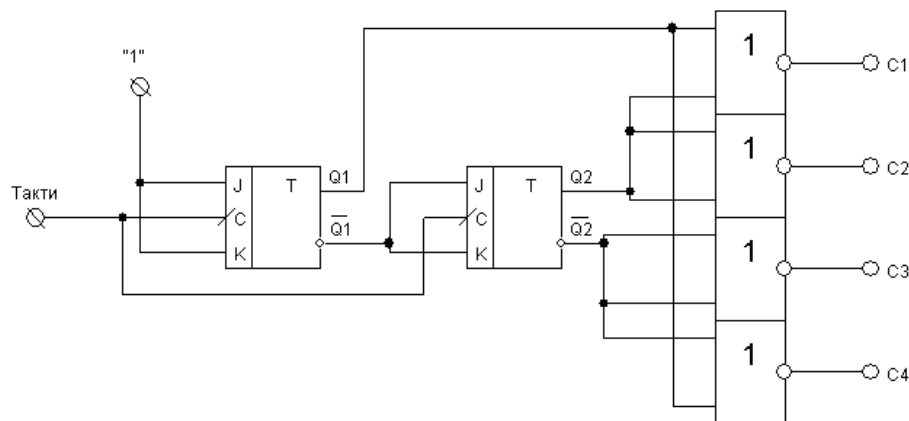


Рисунок 2.11 – Генератор числової послідовності 4 – 3 – 2 – 1 на основі лічильника з вихідною комбінаційною схемою

Часова діаграма роботи генератора (рис. 2.12) показує, що періодична зміна вихідних комбінацій відбувається згідно з заданою числовою послідовністю. Розробка такого генератора за звичайною методикою проектування недвійкових лічильників зажадала б в два рази більше лічильників і додаткової логіки. Синтез структури генераторів послідовностей на регістрах зсуву, в першу чергу, полягає в знаходженні вигляду функцій входів. Відповідно до схеми регістра зсуву на вхід X подається періодична послідовність інформаційних «0» і «1».

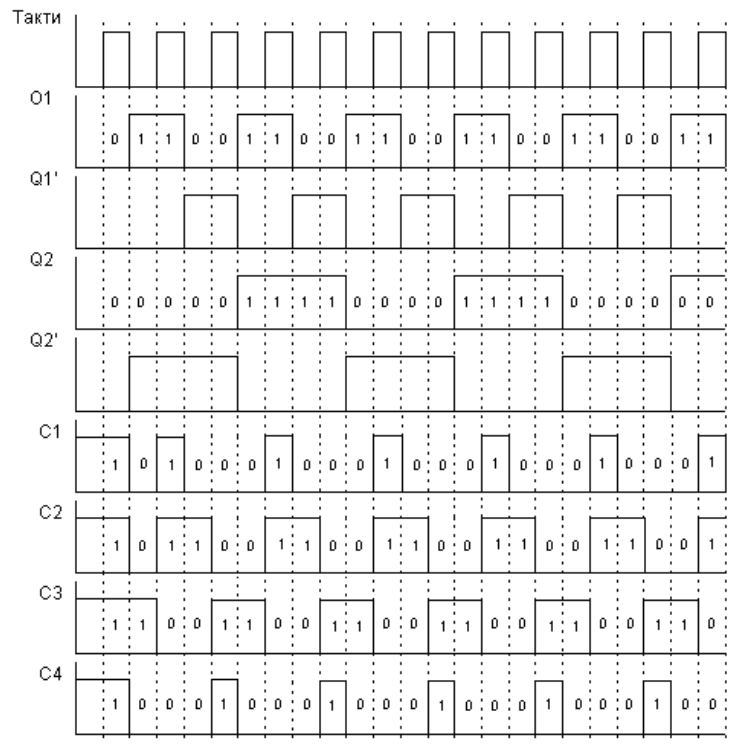


Рисунок 2.12 – Часова діаграма роботи генератора

Синтез структури генераторів послідовностей на регістрах зсуву в першу чергу полягає в знаходженні вигляду функцій входів. Відповідно до схеми регістра зсуву (рис. 2.12), на вхід  $x$  подається періодична послідовність інформаційних «0» і «1».

Синтезувавши комбінаційну схему з перебудовуваною структурою, можна отримати ряд різних послідовностей від одного пристрою (рис. 2.13)

Генератори на основі регістрів утворюють лише циклічні послідовності чисел. Для реалізації будь-яких нециклічних послідовностей потрібне використання додаткових комбінаційних перетворювачів коду, які включаються на виході генератора. Порядок появи чисел в послідовності можна вважати випадковим, а повторення чисел відбувається через  $2m - 1$  тактів. Тому такі схеми називаються генераторами псевдовипадкових послідовностей.

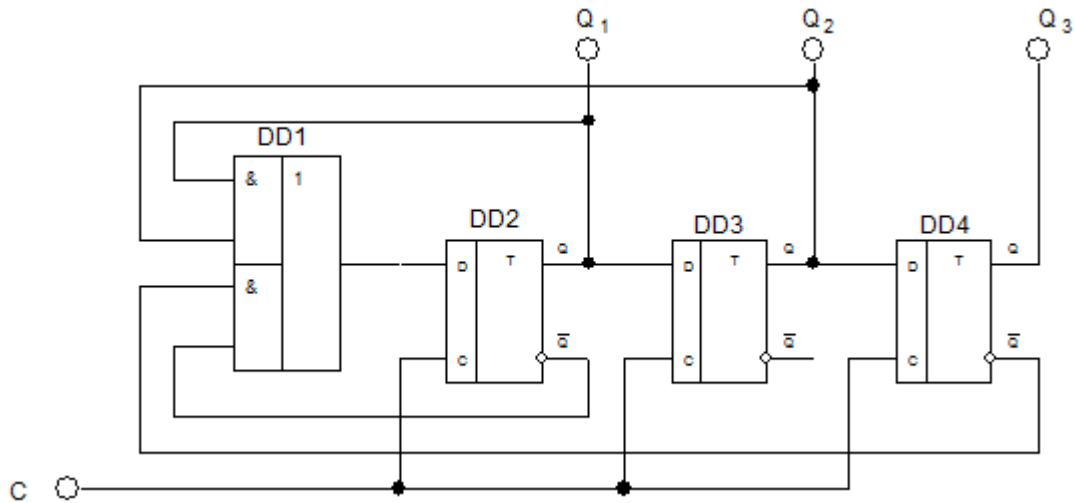


Рисунок 2.13 – Логічна схема генератора числової послідовності на основі регістра зсуву

При збільшенні  $m$  довжина псевдовипадкових послідовностей швидко зростає, тому генератори, що мають  $m > 10$ , широко використовуються в цифровій апаратурі для формування безлічі тестових сигналів, необхідних для контролю і діагностики несправностей.

## 2.5 Моделювання блоку формування імпульсів системи реєстрації оптоелектронного сенсора абсолютних кутових положень в програмному середовищі Electronics Workbench 5.12

Для проведення аналізу функціонування схеми у якості об'єкта моделювання було обрано частину пристрою, яка відповідає за систему автоматизованого управління – блок формування імпульсів.

Моделювання проводилось у програмному середовищі Electronics Workbench 5.12.

Результати моделювання представлено на рисунках 2.14 та 2.15.

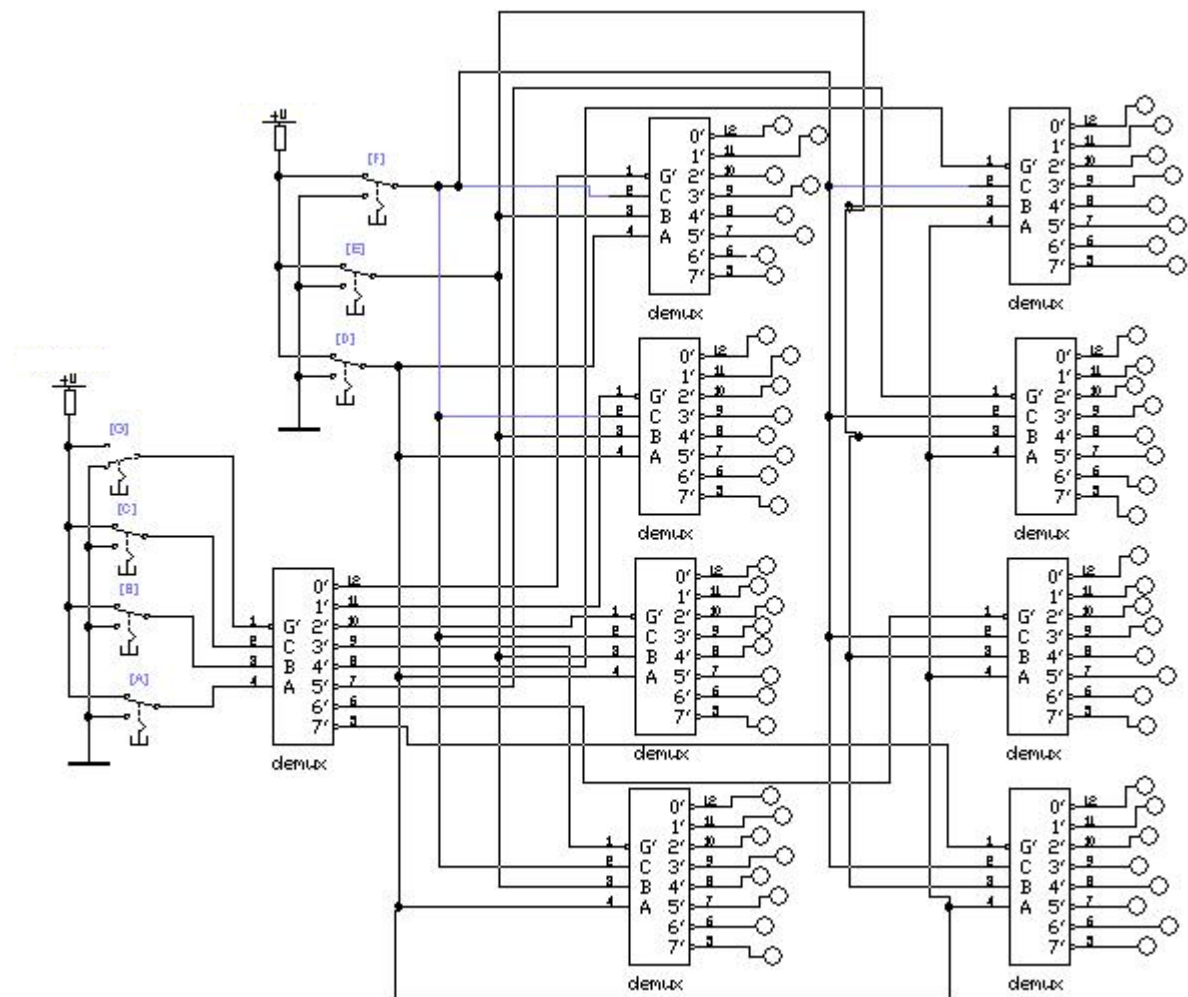


Рисунок 2.14 – Схема блоку формування імпульсів системи реєстрації оптичного сенсора абсолютних кутових положень в програмному середовищі Electronics Workbench 5.12



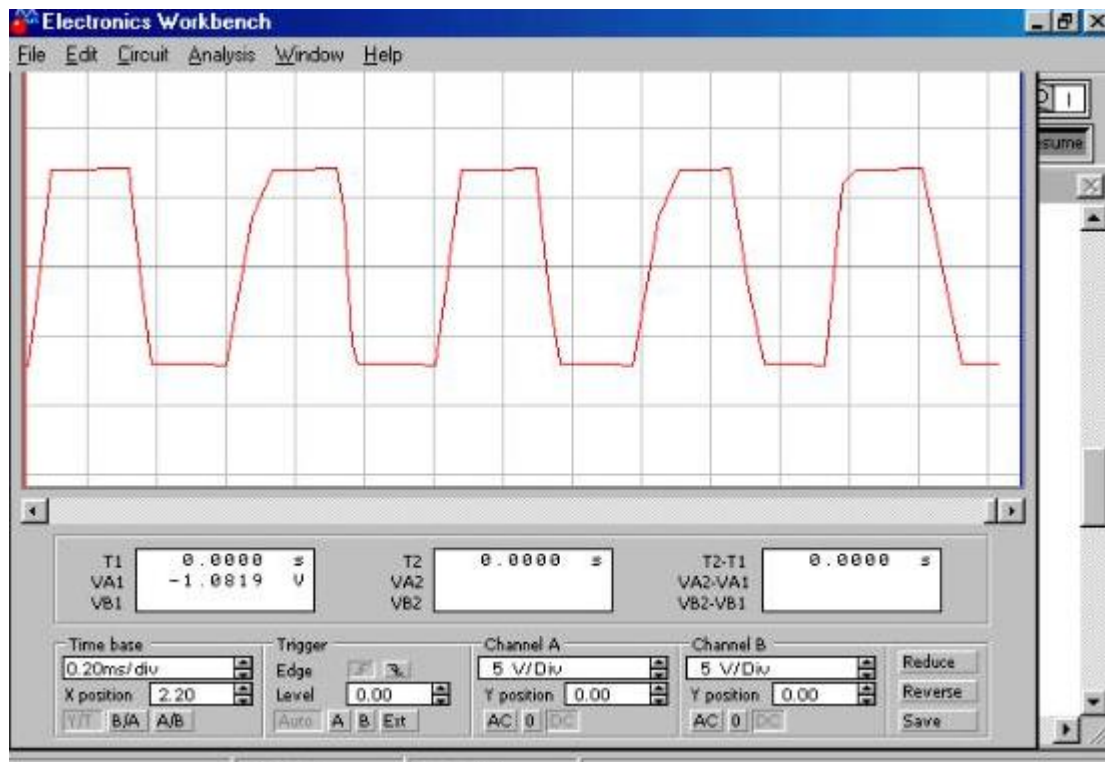


Рисунок 2.15 – Діаграма функціонування блоку формування імпульсів системи реєстрації оптоелектронного сенсора абсолютних кутових положень в програмному середовищі Electronics Workbench 5.12

Як видно із побудованих діаграм результати моделювання добре узгоджуються із раніше отриманими теоретичними розрахунками.

Отже, за результатами розділу можна зробити наступні висновки:

1) на підставі проведеного дослідження для розробки пристрою обрано лазерну схему вимірювання кутових положень. Новизною, вибраного прототипу є введення таких елементів, як операційного пристрою, один з входів якого підключений до першого додаткового виходу модулятора струму напівпровідникового лазера з метою компенсації модуляційної перешкоди у вихідному сигналі фотодіода; формувача синхроімпульсів і формувача імпульсів фіксованої тривалості (стробімпульс), що забороняють роботу пристрою на час перехідних процесів; компаратора, що формує імпульси з частотою інте-

рференційного сигналу; блок формування трьох імпульсних сигналів і вимірники (у цифровому вигляді) його вихідних сигналів; комп'ютер, управління роботою пристрою;

2) у якості безпосередньої сенсорну частини пропонується використати дифракційну решітку, яка розташовується безпосередньо на об'єкті дослідження;

3) операційну частину пристрою пропонується реалізувати на мікросхемі AD2S99BP, яка є високоефективним перетворювачем постійної напруги, що забезпечує роботу модуля в широкому діапазоні напруги живлення з рівнем шумів у вихідній напрузі 50 мВ;

4) проведено розробку друкованої плати блоку формування імпульсів системи реєстрації у редакторі Layout 4.0;

5) результати моделювання блоку формування імпульсів системи у програмному середовищі Electronics Workbench 5.12 показали відповідність із теоретичними розрахунками.

### 3 Техніко-економічне обґрунтування розробки оптоелектронного сенсора абсолютних кутових положень

#### 3.1 Обґрунтування вибору технології виготовлення оптоелектронного сенсора абсолютних кутових положень

Топологічний аналіз показує, що пристрій може бути реалізований у вигляді малогабаритного мікромодуля і виконаний за сучасною маловитратною технологією тонкоплівкових гібридних мікроборок, або за технологією печатних плат на фольгованому текстоліті. Обидві технології передбачають, що всі елементи будуть навісними, а напиленням на підкладці, або травленням поверхні виконується лише струмопровідний шар.

Для вибору технології виготовлення оптоелектронного сенсора абсолютних кутових положень проаналізуємо ієрархії чотирьох варіантів (табл. 3.1), враховуючи шкалу відносної важливості (табл. 3.2) [19].

Таблиця 3.1 - Можливі варіанти технологій виробництва пристрою

Технологія		Короткий опис
A	Технологія печатних плат на фольгованому текстоліті	Активні та пасивні елементи схеми навісні, а струмопровідний шар виконано травленням фольгованого текстоліту.
B	Толстоплівкових гібридних інтегральних схем	Всі елементи та між елементні з'єднання виконані у вигляді товстих композитних плівок.
C	Тонкоплівкових гібридних інтегральних схем	Всі елементи та між елементні з'єднання виконані у вигляді тонких плівок провідних та резистивних матеріалів.
D	Тонкоплівкових гібридних мікроборок	Активні та пасивні елементи схеми навісні, а струмопровідний шар виконано у вигляді тонких плівок.

Таблиця 3.2 - Шкала відносної важливості

Інтенсивність відносної важливості	Визначення
1	рівна важливість
3	помірна перевага
5	сильна перевага
7	значна перевага
9	дуже сильна перевага
2,4,6,8	проміжні судження

Вибір робимо за критеріями, наведеними в таблиці 3.3.

Встановлюємо відносну вагу кожного критерію на основі матриці попарних порівнянь для обраних критеріїв (табл. 3.3) [19].

У матриці прийняті наступні позначення:  $i$  – номер критерію; при порівнянні 6-ох критеріїв (табл. 3.3)  $i = 1, 2, 3, 4, 5, 6$ ;  $X_i$  - локальний пріоритет, тобто відносна вага  $i$ -го критерію в глобальному критерії:

Таблиця 3.3 – Попарне порівняння критеріїв

Критерій	1	2	3	4	5	6	$\sqrt[6]{\prod_{i=1}^6 \omega_i}$	$X_i$
1. Швидкодія	1	1/3	3	1/7	1/5	3	0,664	0,073
2. Завадостійкість	3	1	3	1/3	1/7	3	1,042	0,116
3. Споживання	1/3	1/3	1	1/5	1/7	3	0,460	0,051
4. Площа	7	3	5	1	1/5	7	2,297	0,254
5. Сумісність	5	7	7	5	1	5	4,277	0,473
6. Вартість	1/3	1/5	1/3	1/7	1/5	1	0,293	0,033
$\Sigma$							9,033	1,00

Далі аналогічно складаємо 6 матриць попарних порівнянь альтернатив стосовно кожного критерію (табл. 3.4 - 3.9). Оскільки тепер порівнюються 4 технології по одному критерію, то  $i = 1, 2, 3, 4$ .

$$X_i = \frac{\sqrt[4]{\prod_{i=1}^4 \omega_i}}{\sum_{i=1}^4 \sqrt[4]{\prod_{i=1}^4 \omega_i}},$$

де  $\sum$  - сума по стовпці  $\sqrt[4]{\prod_{i=1}^4 \omega_i}$ .

Таблиця 3.4 - Порівняння альтернатив стосовно критерію «швидкість»

Технологія	A	B	C	D	$\sqrt[4]{\prod_{i=1}^4 \omega_i}$	$X_i$
A	3	1/5	1	3	1,16	0,19
B	5	1	7	7	3,96	0,65
C	1/3	1/7	1	1/2	0,39	0,07
D	1/3	1/7	2	1	0,56	0,09
	$\Sigma$				6,07	1,00

Таблиця 3.5 - Порівняння альтернатив стосовно критерію «завадостійкість»

Технологія	A	B	C	D	$\sqrt[4]{\prod_{i=1}^4 \omega_i}$	$X_i$
A	1	5	1	1/3	1,14	0,21
B	1/5	1	1/5	1/7	0,48	0,09
C	1	5	1	1/3	1,56	0,29
D	3	7	3	1	2,20	0,41
	$\Sigma$				5,37	1,00

Таблиця 3.6 - Порівняння альтернатив стосовно критерію «споживання»

Технологія	A	B	C	D	$\sqrt[4]{\prod_{i=1}^4 \omega_i}$	$X_i$
A	1	5	1/5	1/7	0,61	0,09
B	1/5	1	1/7	1/9	0,24	0,04
C	5	7	1	1/3	1,85	0,29
D	7	9	3	1	3,71	0,58
	$\Sigma$				6,41	1,00

Таблиця 3.7 - Порівняння альтернатив стосовно критерію «площа»

Технологія	A	B	C	D	$\sqrt[4]{\prod_{i=1}^4 \omega_i}$	X <sub>i</sub>
A	1	5	3	5	0,99	0,21
B	1/5	1	1/3	1/2	0,24	0,05
C	1/3	3	1	3	2,03	0,43
D	1/5	2	1/3	1	1,47	0,31
Σ					4,73	1,00

Таблиця 3.8 - Порівняння альтернатив стосовно критерію «сумісність»

Технологія	A	B	C	D	$\sqrt[4]{\prod_{i=1}^4 \omega_i}$	X <sub>i</sub>
A	1	5	1/3	1/5	0,76	0,13
B	1/5	1	1/7	1/9	0,24	0,04
C	5	7	1	1/2	2,41	0,41
D	3	9	2	1	2,47	0,42
Σ					5,88	1,00

Таблиця 3.9 - Порівняння альтернатив стосовно критерію «вартість»

Технологія	A	B	C	D	$\sqrt[4]{\prod_{i=1}^4 \omega_i}$	X <sub>i</sub>
A	1	3	5	6	3,08	0,56
B	1/3	1	3	4	1,41	0,26
C	1/5	1/3	1	2	0,60	0,11
D	1/6	1/4	1/2	1	0,38	0,07
Σ					5,47	1,00

Глобальний пріоритет для кожної альтернативи обчислюється як сума добутків кожного локального пріоритету на його ваговий коефіцієнт (табл.. 3.10) [19].

З порівняння глобальних пріоритетів різних технологій видно, що найбільшим є пріоритет у варіанта реалізації оптоелектронного сенсора абсолютних кутових положень з використанням технології печатних плат на фольгованому текстоліті.

Таблиця 3.10 - Глобальний пріоритет для кожної альтернативи

Пріоритети	№1	№2	№3	№4	№5	№6	Глобальний
Вага	0,073	0,116	0,051	0,254	0,473	0,033	
Печатних плат на фольгованому текстоліті	0,07	0,29	0,29	0,43	0,41	0,11	0,360
Толстоплівкових гібридних інтегральних схем	0,65	0,09	0,04	0,05	0,04	0,26	0,100
Тонкоплівкових гібридних інтегральних схем	0,19	0,21	0,09	0,21	0,13	0,56	0,176
Тонкоплівкових гібридних мікроборок	0,09	0,41	0,58	0,31	0,42	0,07	0,364

За допомогою методу аналізу ієрархій проведено порівняння чотирьох типів технологій реалізації оптоелектронного сенсора абсолютних кутових положень за наступними критеріями: 1) швидкодія; 2) завадостійкість; 3) споживана потужність; 4) площа, займана на кристалі; 5) сумісність; 6) вартість. Найбільший локальний пріоритет у критерію «сумісність» (табл. 3.3). За даними таблиці 3.9 локальний пріоритет за критерієм «вартість» є найвищим для технології печатних плат на фольгованому текстоліті. Проте найбільший глобальний пріоритет мають технологія тонкоплівкових гібридних мікроборок та печатних плат на фольгованому текстоліті. Саме технологія печатних плат на фольгованому текстоліті й буде використовуватися для виготовлення оптоелектронного сенсора абсолютних кутових положень.

### 3.2 Розрахунок витрат на виробництво оптоелектронного сенсора абсолютних кутових положень

Витрати на матеріали і напівфабрикати вказані в таблиці 3.11. Витрати на матеріали і напівфабрикати склали 153,49 грн.

Таблиця 3.11 – Розрахунок вартості матеріалів на виробництво оптоелектронного сенсора абсолютних кутових положень

Найменування матеріалу	Одиниця виміру	Кількість ед/цикл	Ціна за од., грн.	Всього витрат, грн.
К155КП5	шт.	2	18,11	36,22
К155ИЕ5	шт.	1	10,77	10,77
К155ИД4	шт.	1	14,04	14,04
К155ЛА3	шт.	2	10,04	22,08
Транзистори КТ315Б	шт.	8	2,40	19,20
Транзистори КТ361Б	шт.	8	2,40	19,20
Резистор пост.	шт.	45	0,01	0,45
Конденсатор пост.	шт.	20	0,10	2,00
Конденсатор електр.	шт.	2	0,60	1,20
Діоди	шт.	6	0,51	3,06
Індикатор АЛС318А	шт.	1	22,00	22,00
Дріт	м	3	0,90	2,70
ПОС-61	кг	0,01	7,20	0,07
ФЛЮС	кг	0,01	3,40	0,03
Спирт	л.	0,1	12,00	1,20
Марля	м <sup>2</sup>	1	0,75	0,75
Пластик	м <sup>2</sup>	0,1	5,00	0,50
Усього				153,49



## 4 Охорона праці та техногенна безпека при розробці оптоелектронного сенсора абсолютних кутових положень

### 4.1 Характеристика потенційних небезпечних та шкідливих виробничих факторів

Роботи, що проводяться в дослідницькій лабораторії, не представляють великої безпеки, оскільки приміщення інженерної академії належать до приміщень без підвищеної безпеки. Проте вживання електроустаткування може нести в собі ряд шкідливих і небезпечних для життя і здоров'я людей чинників, що працюють з ним. Основну небезпеку дослідницької лабораторії представляють використання електроприладів, які працюють при напрузі небезпечній для життя.

Дія електричного струму на живу тканину носить своєрідний характер. Проходячи через організм, електричний струм виробляє термічну, електролітичну і біологічну дію [20].

Міра небезпечної і шкідливої дії на людину електричного струму і електричної дуги залежить від роду і величини напруги струму, частоти струму, шляху струму через тіло організму, тривалість дії електричного струму, умов зовнішнього середовища.

У дослідницькій лабораторії існує можливість виникнення небезпеки при роботі з шкідливими речовинами в процесі моделювання плати пристрою. При монтажі електронних плат застосовують ацетон, спирт для знежирення і очищення від пилу мікросхеми, а також олово і каніфоль для припаювання ніжок напівпровідникового приладу до плати.

Спирт, ацетон викликає сухість шкіри. При систематичному вдиханні можливі захворювання сітківки ока. Також можливі нирково-психічні захворювання.

Каніфоль дратівливо діє на слизисті оболонки дихальних шляхів і на шкіру, що наводить до дерматитів.

При недостатній освітленості на робочому місці може виникнути зорова втома.

#### 4.2 Заходи зі зменшення впливу небезпечних та шкідливих виробничих факторів

Тривала робота перед екраном монітора наводить до різних функціональних розладів організму, не говорячи вже про неймовірне навантаження на очі. Захворювання, викликані травмою навантажень, що повторюються, не виявляються відразу, це нездужання, що поступово накопичуються. У цьому їх небезпека. В основному страждають кисті, зап'ястя, плечі, шийна область [20].

У виникненні хвороб такого роду найчастіше винні: погана ергономіка робочих місць, дуже високо розташована клавіатура, непідходяще крісло, незнання основних правил роботи за комп'ютером. Правила, що стосуються освітлення в приміщенні і на робочому місці, мікроклімату, розташування клавіатури прості:

- повна тривалість робочого часу, проведеного за екраном монітора із захисним екраном, для дорослого користувача не повинна перевищувати 4 години за 8-годинний робочий день;

- не рекомендується працювати на клавіатурі безперервно більше 30 хвилин, кожна годину необхідно робити п'ятихвилинну перерву, а кожні дві години - 15-хвилинний, причому краще покинути робоче місце, влаштувати розминку для пальців, зробити просту гімнастику для очей;

- для устаткування робочого місця краще використовувати спеціальні столи і стільці, що дають можливість регулювати положення всіх вузлів, - висоти столу, полички для клавіатури, крісла користувача;

- висоту клавіатури слід відрегулювати так, щоб кисть розташовувалася прямо;

- спина має бути пряма, кут між стегнами і хребтом теж прямий, для чого слід підібрати таке крісло, спинка якого здатна підтримувати спину користувача.

- монітор слід розташувати так, щоб нижній рівень екрану знаходився на 20-25 см нижче за рівень очей, а рівень верхньої кромки розташовувався на висоті лоба, від екрану монітора до очей має бути не менше 75-120 см.

- відстань між столами з комп'ютерами - не менше 1,5 метрів, між моніторами - не менше 2,2 метрів.

- екран комп'ютера краще розташувати під прямим кутом по відношенню до вікон, які необхідно завісити або закрити жалюзі.

#### 4.3 Виробнича санітарія

У виробничих приміщеннях, в яких робота на відеотерміналах і персональних комп'ютерах є основною (диспетчерські, операторські, розрахункові, кабінети і пости управління, зали обчислювальної техніки і ін.) повинні забезпечуватися оптимальні параметри мікроклімату відповідно до таблиці 4.1 [21].

Таблиця 4.1 - Оптимальні норми мікроклімату для приміщень з відеотерміналами і персональними комп'ютерами

Період року	Категорія робіт	Температура повітря, °С (не більше)	Відносна вологість повітря, %	Швидкість руху повітря, м/с
Холодний	Легка – 1а	22-24	40-60	0.1
	Легка – 1б	21-23	40-60	0.1
Теплий	Легка – 1а	23-25	40-60	0.1
	Легка – 1б	22-24	40-60	0.2

До категорії 1а відносяться роботи, вироблювані сидячи і що не вимагають фізичної напруги, при яких витрата енергії складає до 120 ккал/ч. До категорії 1б відносяться роботи, вироблювані сидячи, стоячи або пов'язані з ходьбою і такі, що супроводяться деякою фізичною напругою, при яких витрата енергії складає від 120 до 150 ккал/ч

При монтажі компонентів на плату і формуванні топологічного рисунка струмопровідного шару виникає потенційна небезпека небажаної дії на організм речовин, що обертаються в технологічному процесі, і матеріалів. Всі речовини, що забруднюють повітря, надають шкідливу дію, якщо вони потрапляють в організм в кількостях, що перевищують деяку порогову величину (ГДК). У виробництві плат застосовують певні речовини, які шкідливі для організму. Клас небезпеки шкідливих речовин встановлюється залежно від гранично допустимої концентрації речовин в повітрі робочої зони. Це та концентрація яка переноситься без відхилень від нормального полягання в перебігу робочого дня при щоденному диханні. Згідно СН 245-71 встановлюють чотири класи шкідливих речовин: 1-й клас – речовини надзвичайно небезпечні; 2-й клас – речовини високо небезпечні; 3-й клас – речовини помірно небезпечні; 4-й клас – речовини мало небезпечні. Дія токсичних речовин виявляється в гострих і хронічних отруєннях.

При монтажі електронних плат застосовують ацетон, спирт для знежирення і очищення від пилу, а також олово і каніфоль для припаювання ніжок напівпровідникового приладу до плати.

У таблиці 4.2 [121] приведені гранично допустимі концентрації небезпечних речовин, вживаних при монтажі елементів, згідно СН 245-71.

Таблиця 4.2 - Гранично допустимі концентрації шкідливих речовин в повітрі робочої зони

Речовини	ГДК, мг/м <sup>3</sup>
Ацетон	30
Каніфоль	150
Олово	90
Спирт	1000

Основні засоби техніки безпеки – герметизація апаратури і устаткування, наявність припливний витяжній вентиляції в приміщенні проведення робіт і витяжна шафа для виготовлення печатних плат і монтажу компонентів паянням (рис. 4.1).

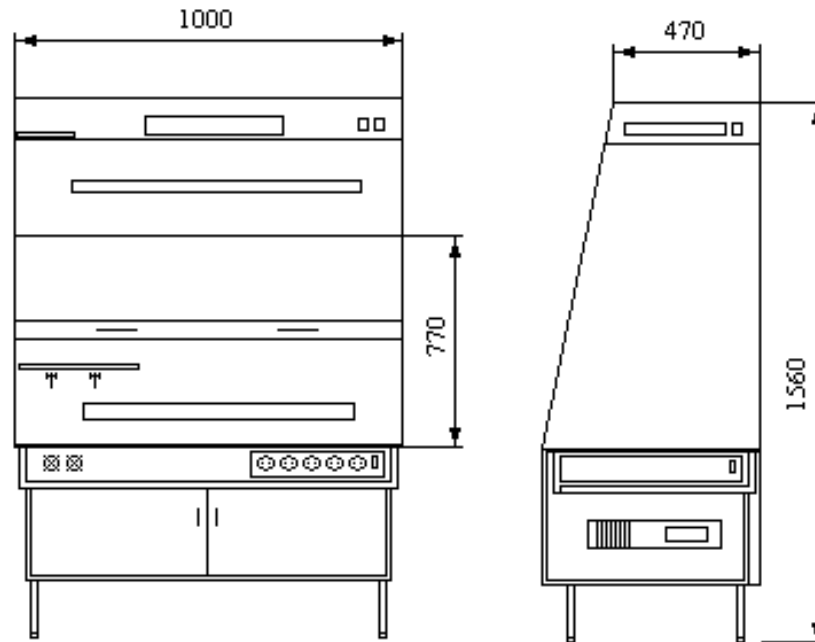


Рисунок 4.1 – Витяжна шафа для виготовлення печатних плат

#### 4.4 Електробезпека

Дія електричного струму на організм людини може бути теплова, хімічна і біологічна. При дії електричного струму на організм людини можуть бути два види поразки: електричні удари і електричні травми. Часто ці види супроводять один одному [21].

Захистом від дотику до струмопровідних частин електроустановок є ізоляція дротів, обгороджування, блокування і захисні засоби. Захистом від напруги, що з'явилася на корпусах електроустановок в результаті порушення ізоляції, є захисне заземлення, занулення і захисне відключення.

Захисне заземлення влаштовується в мережах з ізолюваною нейтраллю. Воно є навмисним з'єднанням із землею неструмопровідних металевих частин електроустановок.

Захисне заземлення необхідне для зниження напруги відносно землі до безпечної величини на металевих корпусах електроустановок, що нормально не знаходяться під напругою, але що виявилися під таким в результаті пошкодження ізоляції.

При зниженні напруги на корпусах відносно землі струм, що проходить через людину, що стосується корпусу, знижується до безпечної величини (10 мА).

На ділянці проведення експерименту в лабораторії застосовується електроустаткування до 220 В. Електроживлення здійснюється від розподільних щитів за допомогою комутуючих автоматів, що виробляють захист того або іншого об'єкту.

Приміщення відноситься до приміщень без підвищеної безпеки.

Відповідно до ПЗП приміщення лабораторії відносять до класу по пожежобезпеці П-11 а. Міра захисту електроустаткування 1 Р44.

Прокладка сполучних дротів здійснюється в трубах, що забезпечує надійний захист від механічних пошкоджень дротів [21].

#### 4.5 Пожежна безпека. Техногенна безпека

Приміщення, де виробляється травлення печатних плат, відноситься до вибухонебезпечного, оскільки водень, що виділяється при травленні, з атмосферним киснем утворює вибухонебезпечну суміш. Проте це може статися лише при відключенні вентиляції, тобто при аваріях. Отже, приміщення відноситься до класу В-Іа. По мірі пожежної безпеки дане виробництво згідно СНіП 11-90-81 може бути віднесене до категорії Д, оскільки характеризується

ся наявністю речовин, що лише не згорають, і матеріалів в холодному стані [22].

Характерними причинами виникнення пожеж в лабораторії є необережне поводження з вогнем, порушення технологічних процесів, неправильні електропроводки і устаткування, неправильне користування електричними приладами і ін.

Основні будівельні конструкції будівлі, в якій знаходиться лабораторія, виконані з тих, що не згорають і важко згорають матеріалів, що цегельних і виштукатурюють. Отже, вогнестійкість будівлі має 2 рівень. Для евакуації людей на випадок пожежі, згідно СНІП 11-90-81, в лабораторії є два евакуаційні виходи, розташованих в протилежних кінцях приміщення ділянки. Ширина дверей і сходів рівна 1,6 м, що відповідає нормі.

Відстань від найбільш видаленого робочого місця до найближчого виходу – 15 м. Швидкість просування людей при евакуації – 16 м/хв [20].

Згідно ПУЕ, будівля, в якій знаходиться лабораторія по захисту від блискавки, відноситься до категорії С і захищається від прямих ударів блискавок, і від замету високих потенціалів через землю, тобто підземні металеві комунікації, їх приєднують при введенні в захищаний об'єкт до заземлення електроустаткування. Отже, грозозахист засновано на стержневих громовідводах.

Для попередження пожеж в лабораторії необхідно створити строгий протипожежний режим. Створюється загально об'єктова і лабораторна інструкція по ПБ, проводиться первинний протипожежний інструктаж при на робочому місці; створюється план протипожежних заходів і евакуації людей на випадок пожежі.

Як вогнегасні речовини можна застосовувати воду, вуглекислоту, хімічну і повітряно-механічну піну. Для гасіння вогнищ усередині будівлі на майданчиках сходових кліток, в коридорах і отворі встановлюють пожежні крани, які розміщені в шафках, де знаходиться і рукав з протипожежним стволом. Для гасіння пожежі горючих матеріалів, що починається, а також

горючих рідин використовується ручний пінний вогнегасник ОХП-10. Для гасіння пожеж електроустановок використовується вуглекислий вогнегасник ОУ-2, ОУ-5, ОУ-8, в кількості двох вогнегасників на кожену установку. Існують пожежна електрична сигналізація, яка забезпечує прямий зв'язок пожежної охорони з охоронним об'єктом. У даній будівлі застосовують звукову систему сигналізації.

Забезпечення техногенної безпеки є складовою частиною виробничої та іншої діяльності суб'єктів господарювання. Забезпечення техногенної безпеки покладається на відповідних посадових осіб, керівників і уповноважених ними осіб, якщо інше не передбачено відповідними нормативно-правовими або цивільно-правовими актами. Заходи щодо забезпечення техногенної безпеки враховуються органами архітектури, замовниками, забудовниками, проектними та будівельними організаціями при проектуванні та забудові населених пунктів, будівництві, розширенні, реконструкції та технічному переоснащенні потенційно небезпечних об'єктів, установ та організацій.

У даній будівлі застосовують звукову систему сигналізації. При появі сигналу сповіщення про пожежу співробітники лабораторії № 216 організовано без паніки покидають лабораторію і, залежно від місця спалаху, слідує або вліво через лабораторний корпус для виходу на вулицю Добролюбова, або управо для виходу на вулицю Незалежної України (рис. 4.2).

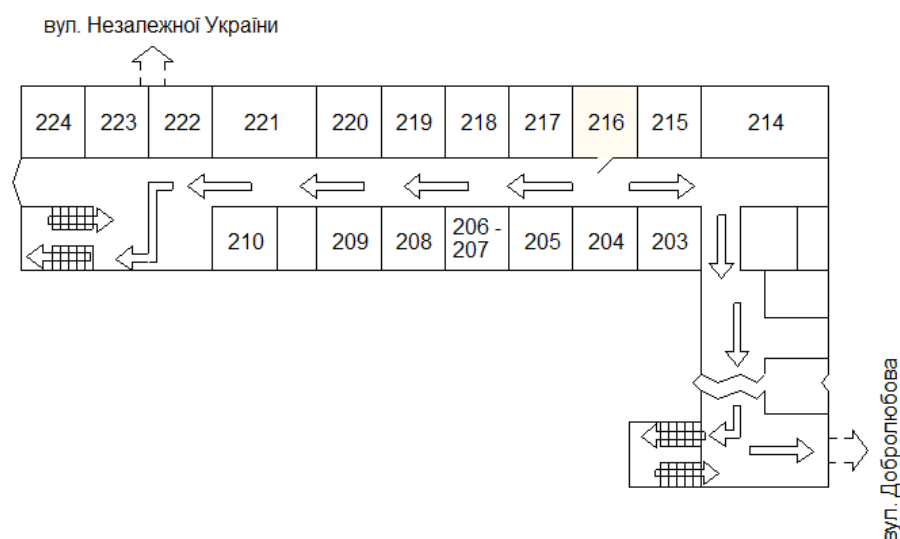


Рисунок 4.2 – План евакуації при пожежі із аудиторії № 216



#### 4.6 Розрахунок місцевого освітлення робочого місця при монтажі елементів на плату

Згідно СНіП 23-05-95 для місцевого освітлення (у складі комбінованого освітлення) слід використовувати світильники з непрозорими відбивачами. Світильники місцевого освітлення слід розташовувати так, щоб їх елементи, що світять, не потрапляли прямо у поле зору працівників як даного так і інших робочих місць [21].

Вираження для освітленості даної точки “а” поверхні спостережуваного об'єкту визначається вираженням:

$$E_a = \frac{J_{ce}}{l_{ca}^2} \cos \gamma_{ca}.$$

Тут  $J_{ce}$  – сила світла, що випромінюється світильником, кд/м<sup>2</sup>;  $l_{ca}$  – довжина шляху світлового променя від елемента, що світить, до точки “а” спостережуваного об'єкту, м;  $\gamma_{ca}$  – кут, що утворюється світловим променем в напрямі від елемента, що світить, до точки “а” і нормаллю до спостережуваної поверхні в точці “а”, рад. Розташування світильника на робочому місці показане на рисунку 4.3.

У точці “а” світильник місцевого освітлення повинен створювати освітленість, рівну нормативному значенню для місцевого освітлення (в даному випадку 180 лк), з відхиленням в межах –10% - +20%.

Визначимо силу світла, потрібну від світильника місцевого освітлення:

$$x_{ce} = 20 \text{ см}; y_{ce} = 10 \text{ см}; z_{ce} = 20 \text{ см}; x_a = 20 \text{ см}; y_a = 30 \text{ см}$$

$$l_{ca}^* = \sqrt{\overbrace{(x_{ce} + x_a)^2}^{\text{}} + \overbrace{(y_{ce} + y_a)^2}^{\text{}}} = 56,6 \text{ см}$$

$$l_{ca} = \sqrt{l_{ca}^{*2} + z_{ce}^2} = 60 \text{ см}$$

$$\gamma_{ca} = \frac{\pi}{2} - \arcsin\left(\frac{z_{ce}}{l_{ca}}\right) = 1.231 \text{ рад}$$

У світильнику використовується лампа розжарювання, тому лампи світильника місцевого освітлення обираються по величині створюваного світлового потоку.

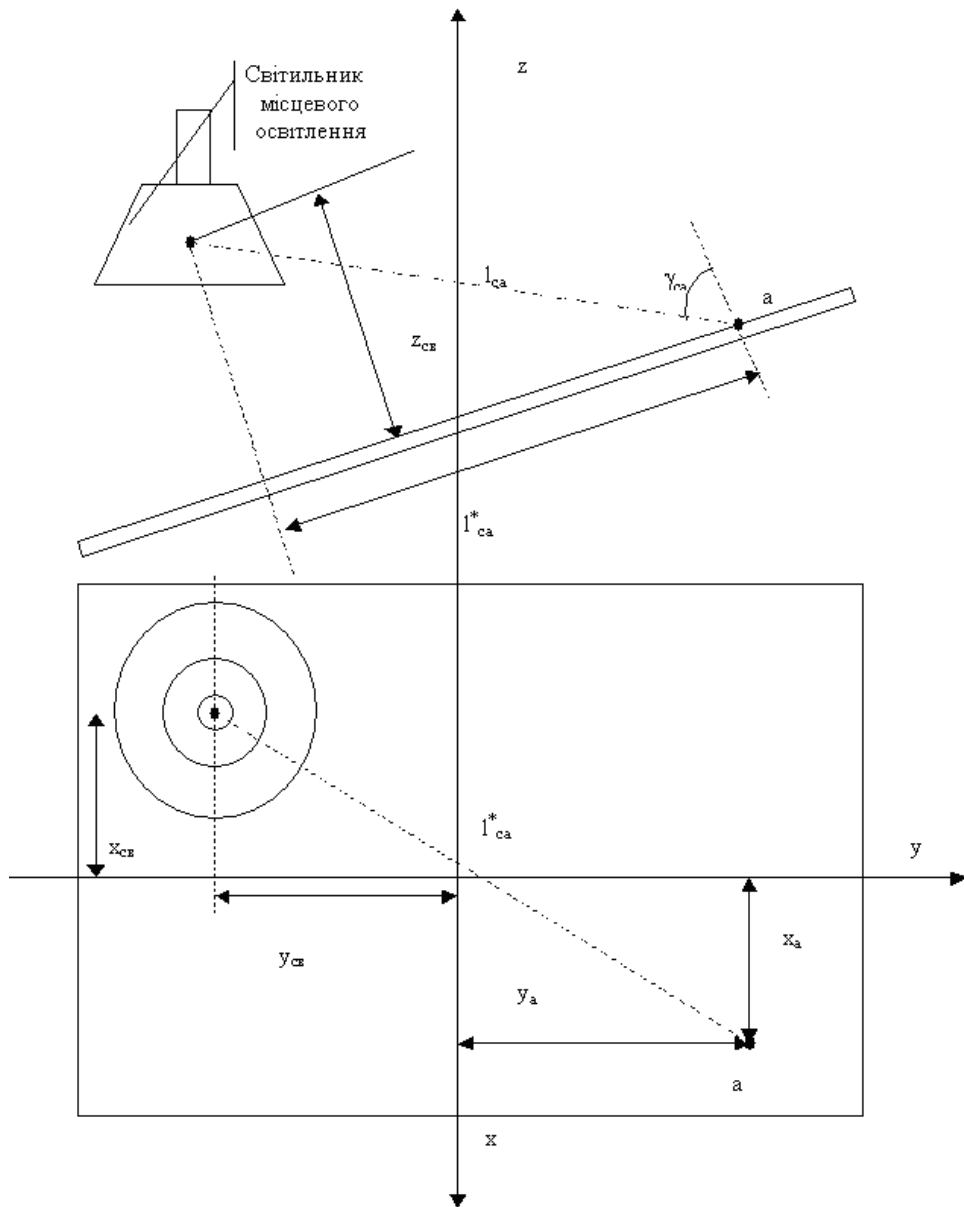


Рисунок 4.3 – Розташування світильника місцевого освітлення

$$\Omega_{св} = 2\pi \left\{ 1 - \cos \left[ \arctg \left( \frac{d_{св}}{2h_l} \right) \right] \right\} = 4,14$$

$$\Phi_{л} = E_{норм.м} \cdot l_{св.а.}^2 \cdot \frac{4\pi}{\cos \gamma_{са}} \left[ 1 + \chi_{св} \rho_{св} \left( \frac{4\pi}{\Omega_{св}} - 1 \right) \right]^{-1} = 796$$

З таблиці [21] вибираємо лампу розжарювання типа БК-215-225-60 потужністю 60 Вт.

## Висновки та рекомендації

Отже, за результатами роботи можна зробити наступні висновки:

1) на підставі проведеного дослідження для розробки пристрою обрано лазерну схему вимірювання кутових положень. Новизною, вибраного прототипу є введення таких елементів, як операційного пристрою, один з входів якого підключений до першого додаткового виходу модулятора струму напівпровідникового лазера з метою компенсації модуляційної перешкоди у вихідному сигналі фотодіода; формувача синхроімпульсів і формувача імпульсів фіксованої тривалості (стробімпульс), що забороняють роботу пристрою на час перехідних процесів; компаратора, що формує імпульси з частотою інтерференційного сигналу; блок формування трьох імпульсних сигналів і вимірники (у цифровому вигляді) його вихідних сигналів; комп'ютер, управління роботою пристрою;

2) у якості безпосередньої сенсорну частини пропонується використати дифракційну решітку, яка розташовується безпосередньо на об'єкті дослідження;

3) операційну частину пристрою пропонується реалізувати на мікросхемі AD2S99BP, яка є високоефективним перетворювачем постійної напруги, що забезпечує роботу модуля в широкому діапазоні напруги живлення з рівнем шумів у вихідній напрузі 50 мВ;

4) проведено розробку друкованої плати блоку формування імпульсів системи реєстрації у редакторі Layout 4.0;

5) результати моделювання блоку формування імпульсів системи у програмному середовищі Electronics Workbench 5.12 показали відповідність із теоретичними розрахунками.

Як рекомендації щодо розроблюваного пристрою можна відмітити наступне:

1) система може бути використана в подальших розробках оптичних інформаційних систем;

2) макетний варіант оптоелектронного сенсора абсолютних кутових положень може бути використаний в лабораторному практикумі та при проведенні практичних занять кафедри електроніки, інформаційних систем та програмного забезпечення.

## Перелік посилань

1. Паламар М. І., Чайковський А. В. Інтелектуальні оптоелектронні сенсори кута: схемотехнічні та програмно-алгоритмічні методи синтезу: монографія. ТНТУ ім. І. Пулюя. Тернопіль, 2015. 144 с.
2. Юкиш М. Й. Оптико-електронні засоби контролю параметрів обертального руху на основі методу просторової модуляції: монографія. Вінниця : ВНТУ, 2009. 138 с.
3. Ацюковский В. А. Ёмкостные дифференциальные датчики перемещения. М. : Гос. энергетическое изд., 1960. 103 с.
4. Фрайден Дж. Современные датчики : справочник. М. : Техносфера, 2005. 592 с.
5. Вульвет Дж. Датчики в цифровых системах. М. : Энергоиздат, 1981. 200 с.
6. Лепіх Я. І. Особливості створення хвилеводних структур для датчиків переміщень на ПАХ. Sensor Electronics and Microsystem Technologies. 2008. №3. С. 24-27.
7. Бриндли К. Измерительные преобразователи : Справочное пособие; пер. с англ. М. : Энергоатомиздат, 1991. 144 с.
8. Jones B. E. Digital Displacement Transducer Using Pseudo-random Binary Sequences and a Microprocessor. Trans Inst M C, Vol. 3, No. 1, Jan-Mar 1981, Pp. 13-20.
9. Новоселов С. П., Сычова О. В., Теслюк С. И., Гринченко И. Г. Анализ методов взаимодействия объектов промышленной автоматизации с использованием технологии Internet of Things. Системи управління, навігації та зв'язку, 2017. Вип. 2. С. 43-45. Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/suntz\\_2017\\_2\\_14](http://nbuv.gov.ua/UJRN/suntz_2017_2_14).
10. Верьовкін Л.Л., Світанько М.В., Кісельов Є.М., Хрипко С.Л. Цифрова схемотехніка: Підручник. Запоріжжя : ЗДІА, 2016. 214 с.

11. Тихонов Є. С. Виконавчий пристрій для переміщення деталей на виробничій лінії.: матеріали конференції «Автоматизовані системи та комп'ютеризовані технології радіоелектронного приладобудування», 7-9 квітня 2020 року, ХНУРЕ, м. Харків, Україна, С. 15 – 16.

12. Юревич Е. И. Основы робототехники. – 2-е изд., перераб.и доп.– СПб. : учеб. БВХ-Петербург, 2005. 416 с.

13. Левченко О. Е., Воловоденко М. С., Аналіз похибок позиціонування сенсорів в системах автоматизованого вихрострумовеого контролю: матеріали XI всеукраїнської науково-практичної конференції студентів та аспірантів «Погляд у майбутнє приладобудування», 15-16 травня 2018 року, КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, Україна. с. 428 – 430.

14. Коронкевич В.П, Соколов В.С., Дубнищев Ю.Н., Лазерная интерферометрия. Наука. Сибирское отделение, Новосибирск, 1983.

15. Дюрани Т., Грейтид К. Лазерные системы в гидродинамических измерениях. Plenum Press. New York, 1977. Перевод на русский язык. Энергия, 1980.

16. Silvano Donati, Giliani and Sabina Merlo. Laser Diode Feedback Interferometer for Measurement of Displacements without Ambiguity. IEEE Journal of Quantum Electronics. Vol.31, NO. 1, January 1995.

17. hierry Bosch, Noel Servagent, Flore Gouaux and Gregory Mourat. The self-mixing interference inside a laser diode: application to displacement, velocity and distance mesurement. SPIE. Vol.3478, JULY 1998.

18. Соколов В.С., Щербаченко А.М., Кашеева Г.А. и др. Лазерная доплеровская система нового поколения как датчик скорости для автоматизации научного эксперимента и технологических процессов. Датчики и системы, 2000, №2.

19. Белуха М.Т. Основы научных досліджень [Текст] / Белуха М.Т. - К: Вища шк., 1997. - 271с.

20. Ткачук К.Н., Степаненко А.И. Охрана труда и окружающей среды в радиоэлектронной промышленности. – К.: Вища шк., 1988. - 240 с.

21. Горобец А.И. Охрана труда в радиоэлектронной промышленности. – К.: Техника, 1987. – 345 с.

22. Кожемякін Г.Б., Рижков В.Г., Белоконь К.В. Охорона праці та техногенна безпека: методичні вказівки до виконання розділу магістерських робіт для студентів ЗДІА всіх спеціальностей денної та заочної форм навчання. – Запоріжжя: ЗДІА, 2012. – 48 с.

ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
МІНІСТЕРСТВА ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Науково-дослідна частина ЗНУ  
Наукове товариство студентів, аспірантів та докторантів ЗНУ  
Рада молодих вчених ЗНУ

**19-24 квітня 2021 року**  
*відбудеться XIV університетська науково-практична конференція студентів,  
аспірантів, докторантів і молодих вчених*  
**«МОЛОДА НАУКА-2021»**



Запоріжжя, 2021



**Головко Кирило**  
студент 4 курсу ІННІ

Наук. кер.: канд. техн. наук, доц. Ніконова А.О.

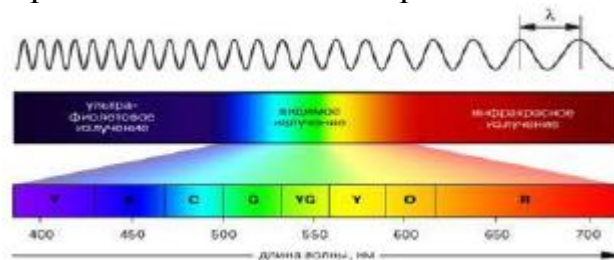
## **РОЗРОБКА ПРИСТРОЮ УФ-ВИПРОМІНЮВАННЯ З АВТОМАТИЧНОЮ СИСТЕМОЮ КЕРУВАННЯ**

Ультрафіолетове випромінювання, або ультрафіолет - невидиме оком людини електромагнітне випромінювання, яке посідає спектральну область між видимим і рентгенівськими випромінюваннями у межах довжин хвиль 400- 10нм. Спектр ультрафіолетового випромінювання може бути лінійчатим, безперервним або складатися зі смуг залежно від природи джерела випромінювання.

На сьогоднішній день застосування ультрафіолету набуло ще більшого розповсюдження у різних сферах діяльності людей - зокрема у медицині, харчовій, фармацевтичній, текстильній, хімічній промисловостях, криміналістиці, для створення світлових ефектів. Із нових напрямків застосування УФ-випромінювання досить перспективним можуть стати технології по знешкодженню техногенних токсикантів (діоксинів, гербіцидів та ін.) шляхом їх розкладу на токсичні сполуки під дією ультрафіолету та озону.

Оскільки УФ-випромінювання є бактерицидним і дійовим санітарно-протиепідеміологічним засобом, направленим на знищення активності мікроорганізмів у водному, повітряному середовищах та на поверхності предметів. Принцип бактерицидної дії УФ в основному пов'язаний з тим, що фотони УФ знищують зв'язки у нуклеїнових молекулах, РНК або ДНК, мікроорганізмів. Окрім того, УФ спричиняє фотохімічні реакції в білках мікробів. Найбільш чутливою мішенню для бактерицидного УФ є ДНК бактерій, далі йде ДНК ДНК-вмісних вірусів, потім РНК РНК-вмісних вірусів, а також ДНК грибів.

Існує три спектральні ділянки УФ-випромінювання:



- близький ультрафіолет, УФ-А промені (UVA, 315—400 нм);
- УФ-В промені (UVB, 280—315 нм);
- далекий ультрафіолет, УФ-С промені (UVC, 100—280 нм).

Біологічний вплив кожної з цих ділянок суттєво різний.

Опромінення УФ області спектру (290 - 400нм), згідно досліджень, підвищує тонус симпатико-адреналінової системи, активує захисні механізми, підвищує рівень неспецифічного імунітету, а також збільшує секрецію цілої низки гормонів. Ультрафіолетове випромінювання є

невідчутним для зору людини, адже поглинається кристаликом та роگیлкою, проте у разі інтенсивного опромінення викликає опік сітківки.

УФ-випромінювання використовується і для засвітлення фоторезисту. На сьогодні існує багато приладів, котрі за допомогою ультрафіолету справляються з цим завданням. Слід пам'ятати, що ультрафіолетове випромінювання дуже сильно поглинається більшістю речовин, що не дозволяє застосувати при роботі з ним звичайну скляну оптику. До 0,18 мкм використовують кварц, фтористий літій, до 0,12 мкм - флюорит; для ще більш коротких хвиль доводиться застосовувати відбивну оптику.

Метою дипломної роботи є розробка безпечної установки для УФ-засвітлення з 4 лампами до 18W кожна та багатофункціональним таймером з LED-індикатором та динаміком для сповіщення зі встроєним генератором. Принцип дії розробляемого приладу для засвітлення фоторезисту полягає в тому, що при приєднанні пристрою до джерела струму, за допомогою таймера задається час роботи, починається індикація відліку, подається звуковий сигнал про початок роботи і по завершенню та відключення нагрівки з УФ- ламп пристрою. Індикація працює на LED індикаторі, а звук подається завдяки мініатюрному динаміку.

### Література

1. Чалий О. В. Медична та біологічна фізика: підручник для студентів вищих медичних (фармацевтичних) навчальних закладів / О. В. Чалий. – Вінниця : Нова книга, 2013. – 528 с.
2. Ультрафіолетове випромінювання та захист від його впливу [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [http:// oppb.com.ua/news/ultrafioletove-vyprominyuvannya-tazahyst-vid-yogo-vplyvu](http://oppb.com.ua/news/ultrafioletove-vyprominyuvannya-tazahyst-vid-yogo-vplyvu).