

Вінницький національний технічний університет

Факультет інформаційних електронних систем

Кафедра біомедичної інженерії та оптико-електронних систем

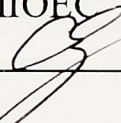
Бакалаврська кваліфікаційна робота на тему:

«ЛАЗЕРНИЙ ВИМІРЮВАЧ ВІДСТАНИ»

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

 Саранча А.В.

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

 Тужанський С.Є.

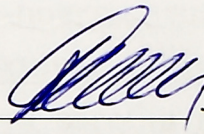
«10» червня 2025 р.

Рецензент: к.т.н., ст.викл. каф. ІРТС

Притула М.О.
(прізвище та ініціали)

«16» червня 2025 р.

Допущено до захисту

Зав. кафедри БМІОЕС  Л.Г. Коваль

«17» червня 2025 р.

Вінниця ВНТУ - 2025 рік

Вінницький національний технічний університет

Факультет інформаційних електронних систем

Кафедра біомедичної інженерії та оптико-електронних систем

Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)

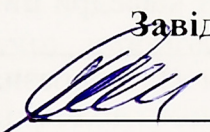
Галузь знань 15 - автоматизація та приладобудування

Спеціальність 152 - метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка

Освітньо-професійна програма – комп'ютеризовані оптико-інформаційні системи

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри БМІОЕС

 **Л.Г. Коваль**

«21» березня 2025 року

З А В Д А Н Н Я

НА БАКАЛАВРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Саранча Андрій Володимирович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Лазерний вимірювач відстані

Керівник роботи Тужанський Станіслав Євгенович, к.т.н., доцент

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

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

2. Термін подання студентом роботи 30 травня 2025 р.

3. Технічні вимоги до засобу – автоматизований пристрій вимірювання відстані до об'єкта, робоча довжина хвилі лазера – 905 нм, потужність лазера – 30мВт; робоча відстань – до 1000м, фотоприймач - *pin* фотодіод, похибка вимірювань – ± 2 мм, блок керування – мікропроцесорний, блок живлення – 220 В, 50 Гц.

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

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

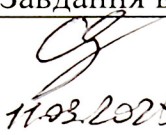
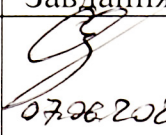
5.1 Схема структурна лазерного вимірювача відстані

5.2 Схема мікропроцесорного блоку керування

5.3 Схема оптичного модуля пристрою

5.4 Схема блоку живлення лазера

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Спеціальна частина	Тужанський С.Є. к.т.н., доцент кафедри БМІОЕС	 11.03.2025	 07.06.2025

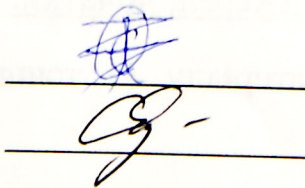
7. Дата видачі завдання «11» березня 2025 р

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

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

Студент

Керівник роботи



А.В. Саранча

С.Є. Тужанський

АНОТАЦІЯ

Бакалаврська кваліфікаційна робота складається з 68 сторінок формату А4, на яких є 6 таблиць, список використаних джерел містить 25 найменувань.

Бакалаврська кваліфікаційна робота присвячена дослідженню високоточних методів і засобів вимірювання відстані. Запропоновано метод вимірювань і розроблено схему лазерного далекоміра із підвищеними характеристиками точності вимірювання відстані до об'єкта.

На основі аналізу методів і схем вимірювання відстані обґрунтовано вибір імпульсного методу та визначено ключові компоненти пристрою: лазерний діод, драйвер, фотоприймач, мікроконтролер та оптичний модуль.

Особливу увагу приділено формуванню вузького колімованого променя та використанню модуля РІО для точного керування імпульсами.

Результатом роботи стала розробка прототипу лазерного далекоміра, здатного забезпечити більш високу точність вимірювання завдяки оптимізованій оптичній та програмній частині.

Також в роботі підсумовано результати модельних експериментів та режимів роботи пристрою.

Ключові слова: лазер, далекомір, мікропроцесор, коліматор, вимірювання.

ABSTRACT

The bachelor's qualification thesis consists of 61 A4-format pages, includes 5 tables, and a list of 25 references.

The thesis is dedicated to the study of high-precision methods and tools for distance measurement. A measurement method is proposed, and a laser rangefinder circuit is developed with enhanced distance measurement accuracy.

Based on the analysis of distance measurement methods and circuit configurations, the pulsed method was justified and the key components of the device were identified: laser diode, driver, photodetector, microcontroller, and optical module.

Special attention was paid to forming a narrow collimated beam and utilizing the PIO (Programmable I/O) module for precise pulse control.

As a result, a prototype of the laser rangefinder was developed, capable of delivering higher measurement accuracy due to optimized optical and software components.

The work also summarizes the results of simulation experiments and the operating modes of the device.

Keywords: laser, rangefinder, microprocessor, collimator, measurement.

ЗМІСТ

ВСТУП	6
1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАННЯ ВІДСТАНІ	8
1.1.1 Принцип та короткий опис імпульсного лазерного далекоміра.....	8
1.1.2 Метод підвищення точності імпульсних лазерних далекомірів	10
1.2 Принцип та короткий опис фазового лазерного далекоміра	11
1.3 Прямий вимірювальний частотний метод.....	15
1.3 Непрямий вимірювальний частотний метод	15
1.4 Порівняння методів лазерного вимірювання відстані	16
1.5 Аналіз характеристик та елементної бази лазерних далекомірів.....	18
1.5.1 Елементна база лазерного далекоміра: лазерний діод	23
1.5.2 Елементна база лазерного далекоміра: фотоприймач.....	25
1.6 Висновки до розділу 1	28
2. ВИБІР ЕЛЕМЕНТНОЇ БАЗИ ДАЛЕКОМІРА.....	29
2.1 Вибір лазерного діода.....	29
2.2 Будова LD905A10C17.....	30
2.2.1 Вибір драйвера для лазера.....	31
2.2.2 Схема керування лазером.....	33
2.3 Вибір мікроконтролера.....	35
2.4 Вибір фотоприймача.....	36
2.5 Вибір оптики: об'єктив для фотоприймача	42
2.6 Вибір дисплея.....	44
2.7 Висновки до розділу 2	46
3. РОЗРОБКА СИСТЕМИ ЛАЗЕРНОГО ДАЛЕКОМІРА.....	47
3.1 Узагальнена схема	47
3.2 Алгоритм роботи далекоміра	48
3.3 Робота системи.....	50
3.4 Аналіз похибок лазерного далекоміра.....	53
3.5 Висновки до розділу 3	53

ВИСНОВКИ.....	54
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	56
Додаток А (обов’язковий) Протокол перевірки БКР	60
Додаток Б (обов’язковий) Графічна частина.....	61
Додаток В Лістинг програми мікроконтролера PR2040	62

ВСТУП

Актуальність дослідження: Оптичні далекоміри, як невід'ємна частина сучасних вимірювальних систем, знаходять широке застосування у різноманітних галузях: від геодезії, будівництва та картографії до робототехніки, безпілотних транспортних засобів, промислової автоматизації та оборонної промисловості.

Їхня здатність забезпечувати безконтактне та швидке вимірювання відстаней робить їх незамінними інструментами. Сьогодні на ринку представлено велику кількість різних цифрових засобів вимірювання відстані. Такі засоби відрізняються за принципом роботи, граничною відстанню вимірювання, точністю, наявністю додаткових функцій, блоками керування і живлення, конструктивним виконанням, а також можливістю підключення до ПК. Найкращі характеристики забезпечують лазерні вимірювачі відстані. Однак, незважаючи на значні наукові та практичні досягнення у розробці та впровадженні лазерних вимірювальних пристроїв, залишаються суттєві питання, пов'язані з досягненням високої точності вимірювань, особливо у складних умовах експлуатації або при потребі підвищеної дальності та надійності вимірювань. Таким чином, розробка удосконаленого автоматизованого лазерного вимірювача відстані є актуальним та перспективним напрямком досліджень, який має важливе значення для підвищення стабільності та точності вимірювань відстані у різних умовах експлуатації, а також для подальшого розвитку лазерних вимірювальних технологій.

Мета дослідження: Метою роботи є розширення функціональних можливостей і точності вимірювань імпульсного лазерного далекоміра шляхом автоматизації процесом управління параметрами лазерного випромінювача, оптичної системи і блоку фотоприймача.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні **завдання:**

провести аналіз сучасного стану та перспектив розвитку лазерних методів і засобів вимірювання відстані.

розробити структурну та функціональну схеми цифрового засобу лазерного вимірювача відстані.

обґрунтувати вибір елементної бази та розробити принципову схему системи.

розробити алгоритми управління параметрами діодного лазера та стабілізації його характеристик.

реалізувати програмне забезпечення для мікропроцесорного управління схем лазерного вимірювача відстані.

Об'єктом дослідження є процес вимірювання відстані до об'єкта.

Предметом дослідження є автоматизований цифровий пристрій вимірювання відстані на імпульсному діодному лазері, зокрема структура, компоненти, функціональні можливості та алгоритми управління пристроєм.

1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАННЯ ВІДСТАНІ

1.1.1 Принцип та короткий опис імпульсного лазерного далекоміра

Принцип роботи імпульсного методу вимірювання відстані для далекоміра аналогічний звичайному імпульсному радіолокаційному методу [3]. Він полягає у знаходженні часу, за який промінь лазера проходить туди і назад, за формулою:

$$D = \frac{1}{2n} C_0 t_D \quad (1)$$

де D — вимірювана відстань;

n — середнє значення показника заломлення середовища;

c — швидкість світла у вакуумі;

t — час, необхідний для проходження імпульсу лазера туди і назад.

Імпульсне лазерне вимірювання відстані використовує короткий час тривалості лазерного імпульсу, енергія якого відносно зосереджена в часі, що забезпечує високу миттєву потужність. У випадку наявності співпраці цілей імпульсне лазерне вимірювання може досягати великих відстаней. При проведенні вимірювань на кілька кілометрів, якщо вимоги до точності не є високими, навіть без використання співпрацюючих цілей, можна проводити вимірювання, використовуючи відбитий сигнал імпульсного лазера, що відбивається від самого об'єкта.

Імпульсна лазерна вимірювальна система зазвичай складається з п'яти частин: одиниці випромінювання лазера, приймального каналу, одиниці визначення моменту, одиниці вимірювання високої точності часу та обробного контролю[3]. Одиниця випромінювання лазера в момент t випромінює лазерний імпульс, частина потужності якого безпосередньо надходить до одиниці прийому відбитого сигналу, генеруючи початковий тригерний сигнал (START), що запускає вимірювання інтервалу часу; решта потужності

випромінюється з антени на ціль, після чого, пройшовши відстань L , досягає цілі та відбивається. Фотоелектричний детектор приймального каналу отримує повернений імпульс, який надходить до блоку підсилення та формування сигналу, генеруючи сигнал зупинки (STOP), що завершує вимірювання інтервалу часу; одиниця високої точності підрахунку виводить вимірний результат інтервалу часу t до обробного контролю, в результаті чого отримується відстань R .

Імпульсна лазерна дальномірна технологія отримала широке застосування завдяки своїм перевагам, таким як велика дальність вимірювання, висока точність вимірювання та відсутність необхідності у співпраці з цільовим об'єктом. Вимірювання та картографування землі, точні виміри по віддаленим цілям — багато з цих досягнень є результатом застосування імпульсної лазерної дальномірної технології.

Зазвичай імпульсна лазерна дальномірна технологія може легко досягати точності ± 6 м. Якщо частоту вимірювання підвищити та вжити певних заходів для стабілізації частоти, а також вдосконалити та ретельно налаштувати приймальний контур, можна досягти точності вимірювання ± 1 м. Однак, через обмеження, пов'язані з параметрами схем, швидкістю пристроїв тощо, подальше підвищення точності вимірювання лише шляхом збільшення частоти вимірювання є недоцільним[4].

Існує багато факторів, які впливають на точність імпульсної лазерної дальномірної технології, зокрема ширина імпульсу лазера, точність вимірювання швидкості поширення світлової хвилі, показник заломлення атмосфери, похибка частоти годинника, похибка вимірювання часу, похибка вимірювання приладів тощо.

Коли частота вимірювання досягає 100 МГц, основною причиною, що впливає на підвищення точності вимірювання, є те, що сигнал основної (відбитої) хвилі не синхронізується з годинником під час відкриття (закриття) лічильних воріт, що призводить до сліпої зони вимірювання. Введення системи вимірювання інтервалу часу є ефективним способом вирішення цієї проблеми,

за умов фіксованої частоти вимірювання, обмеженої швидкості пристроїв та параметрів схем, застосування системи вимірювання інтервалу часу в лазерному дальномірі може значно зменшити похибку вимірювання, викликану несинхронністю сигналів основної та відбитої хвилі з сигналом частоти лічення.

1.1.2 Метод підвищення точності імпульсних лазерних далекомірів

Далекомір з твердотільним лазером. В таких далекомірах використовується моноімпульсний метод виміру інтервалу T між випромінюваним та прийнятим від об'єкта імпульсом, дальність до об'єкта знаходиться за наступною форму:

$$R = \frac{cT}{2},$$

де c – швидкість світла.

Існують основні похибки вимірювання часового інтервалу T : систематична похибка, дискретність вимірювача часових інтервалів, похибка часової фіксації.

Систематична похибка, характеризується різним часом затримки сигналу в каналах фіксації старт- і стоп-імпульсів. В схемі поєднаного старту, коли старт- і стоп-сигнал подаються на один приймач, вказана похибка компенсується повністю.

Дискретність ВЧІ. Якщо тактова частота ВЧІ не синхронізована з початком випромінювання зондувального імпульсу, то щільність $W(r)$ розподілу ймовірності похибки є трикутною і визначається виразом[1]:

$$W(r) = \begin{cases} \frac{r}{(\Delta R)^2} + \frac{1}{\Delta R} & \text{при } -\Delta R \leq r \leq 0 \\ \frac{-r}{(\Delta R)^2} + \frac{1}{\Delta R} & \text{при } 0 \leq r \leq \Delta R \end{cases},$$

де r – дальність;

ΔR – дискретність ВЧІ в одиницях дальності.

Тоді дисперсія та середньоквадратична похибка оцінки дальності дорівнює:

$$D_{\text{ВЧІ}} = \int_{-\infty}^{+\infty} r^2 w(r) dr = \frac{\Delta R^2}{6},$$

$$\sigma_{\text{ВЧІ}} = \sqrt{D} = 0,408\Delta R$$

При тактовій частоті ВЧІ $f_T = 30$ МГц, середнє значення для більшості далекомірів, дискретність $\Delta R = 5$ м, а $\sigma_{\text{ВЧІ}} \approx 2$ м. Для нових розробок – $\Delta R = 1$ м, а $\sigma_{\text{ВЧІ}} \approx 0,4$ м. Якщо ці параметри не відповідають представленим вимогам, тоді зменшують дискретність відрахунку дальності – метод перетворення тимчасового масштабу. Цей метод широко використовується в недорогих далекомірах. Він забезпечує дискретність за дальністю 1 м при низькій частоті тактового генератора, що дозволяє застосовувати недорогі мікросхеми.

Похибка часової фіксації. Сигнал старт-імпульсу характеризується амплітудною та тимчасовою стабільністю. Залежно від дальності, стану локаційної, траси і типу цілі амплітуда сигналу може змінюватися на 4-6 порядків. При цьому суттєво змінюється форма сигналу через його обмеження у приймальному тракті[4].

Крім того, сигнал може спотворюватися шумами та перешкодами адитивного та мультиплікативного характеру. Найбільш поширений метод тимчасової прив'язки сигналу шляхом фіксації його за рівнем, коли момент фіксації визначається моментом перетину сигналом порога спрацьовування формувача. Максимальна розбіжність моменту фіксації дорівнює тривалості фронту імпульсу. Існують способи усунення цієї нестабільності, проте вони досить складні і використовуються рідко. Якщо необхідна точна фіксація імпульса, то використовують метод фіксації максимального імпульса та точки перетину нуля похідної.

1.2 Принцип та короткий опис фазового лазерного далекоміра

Зазвичай фазовий лазерний далекомір має високу точність вимірювання відстані. Наразі основними методами фазового лазерного далекоміра є метод

частотно-модульованої безперервної хвилі (FMCW - Frequency Modulated Continuous Wave), та метод амплітудно-модульованої безперервної хвилі (AMCW - Amplitude Modulated Continuous Wave). Перші два методи використовують лінійне частотне модулювання безперервної хвилі для оптичного несучого сигналу та оптичної потужності, що має переваги у тому, що точність вимірювання меншою мірою залежить від змін амплітуди зворотного світла та має високу стійкість до шумів. Однак їхня точність обмежена ступенем лінійності модуляції, а реалізація системи є досить складною.

Третій метод AMCW використовує безперервні хвилі для модуляції світла, але існують обмеження на нечітку відстань, можна вибрати дві випромінювальні частоти, які одночасно задовольняють вимоги до точності вимірювання та діапазону вимірювання[18].

Метод лазерного вимірювання відстані на основі фази використовує різницю фаз між випромінюваним модуляційним світлом і прийнятим світлом, відбитим від об'єкта вимірювання, для реалізації вимірювання відстані до об'єкта. Завдяки використанню технології модуляції та диференціального вимірювання фази, цей метод має високу точність вимірювання і широко застосовується в точних вимірюваннях відстані з кооперуючими об'єктами.

Метод фазового вимірювання відстані реалізується шляхом модуляції інтенсивності світла. Вимірюючи модуляційний лазерний сигнал, можна визначити зміщення фази, яке виникає під час двостороннього поширення лазерного променя на відстані D , і таким чином непрямо виміряти час t , за який лазер проходить між точкою вимірювання та об'єктом. Виходячи з швидкості світла, можна обчислити і відстань D .

Рисунок 1.1 є схемою принципу фазового вимірювання відстані. Тут D можна розглядати як двосторонню відстань між точкою вимірювання та об'єктом, A - це точка випромінювання, B - точка приймання, а ϕ - це різниця фаз сигналу між точками A і B . Взаємозв'язок між відстанню та фазою є[18]:

$$D = \frac{1}{2} ct$$

$$t = (N + \frac{\Delta\phi}{2\pi}) \frac{1}{f}$$

де ϕ - це значення фази, що не перевищує одного періоду;

f - це модуляційна частота;

N - це додатне ціле число.

У формулі c - це швидкість світла, f - це частота модуляції лазера. Отже, визначивши ціле число періодів та фазу синусоїдальної функції, що не перевищує одного періоду, можна визначити інтервал часу проходження світлової хвилі, а отже, обчислити відстань.

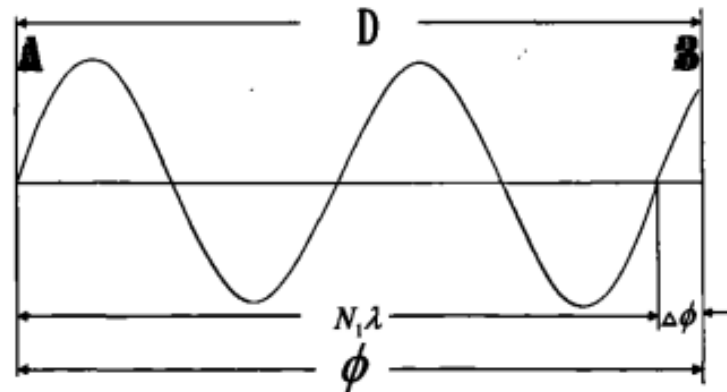


Рисунок 1.1 – Схема принципу діапазону фаз

Дивлячись на формули представленні зверху, можна зробити висновок, що коли довжина вимірювання перевищує довжину хвилі, що використовується для вимірювання, можуть виникнути проблеми з багатозначністю. Тобто, при вимірюванні відстані з використанням єдиної частоти неможливо визначити значення N . Для вирішення проблеми багатозначності можна використовувати кілька допоміжних частот модуляції, встановлених у приладі.

Існує два основних підходи: перший - для середніх та далекомірних приладів, це використовувати централізований спосіб непрямого вимірювання частоти, зазвичай встановлюючи 3-5 допоміжних частот; другий - для короткомірних приладів, використовувати розподілений спосіб прямого вимірювання частоти, встановлюючи дві частоти модуляції: для точного вимірювання та для грубого вимірювання.

Зазвичай частота вимірювання становить 17 Гц, довжина вимірювання - 12 м, а груба частота - 170 кГц, довжина вимірювання - 1200 м. Наприклад, для вимірювання відстані 600 м використовується модуляційне світло з довжиною вимірювання 1200 метрів як грубе вимірювання, а для точного вимірювання вибирається модуляційне світло з довжиною вимірювання 12 метрів.

Для точного вимірювання можна використовувати грубий вимірювальний інструмент, щоб виміряти відстань менше 1200 метрів, отримуючи результат 600 метри. За допомогою точного вимірювального інструмента можна виміряти відстань менше 12 метрів, отримуючи 6 метрів. Об'єднавши ці два результати, можна отримати 600 метрів. Таким чином, вирішується суперечність між високою точністю вимірювального приладу та його довжиною вимірювання, де найменша вимірювальна лінійка забезпечує необхідну точність, а найдовша - гарантує дальність вимірювання приладу.

В теорії, на точність вимірювання за допомогою фазового методу впливають в основному помилки швидкості світла, помилки модуляційної частоти f (стабільність частоти) та помилки вимірювання фази. Перша з цих помилок може бути знижена за допомогою компенсації помилок в реальному часі, враховуючи параметри навколишнього середовища (температура, атмосферний тиск тощо), тоді як останні дві залежать від можливостей обробки сигналу в електронних схемах. Тому в електричній системі ключовими є схеми генерації частоти та вимірювання фази, оскільки вони безпосередньо впливають на величину помилки вимірювальної системи. Крім того, необхідно враховувати додаткові зсуви фази, які виникають під час передачі сигналу по оптичному шляху та в електричних схемах. Додаткові зсуви фази є випадковими і змінюються в залежності від зовнішнього середовища, характеристик компонентів та їх стабільності, тому їх не можна усунути корекцією, і вони можуть суттєво вплинути на результати вимірювання[16].

1.3 Прямий вимірювальний частотний метод

Для досягнення високої точності фазового вимірювання відстані слід використовувати частоту вимірювання, яка пов'язана з довжиною вимірювання k за формулою[2]:

$$v_s = \frac{C}{2L_s}$$

У формулі вибираються два вимірювальні прилади, а саме: $L_{s1} = 12$ м, $L_{s2} = 1200$ м, підставляючи їх у наведену формулу, отримуємо що L_{s1} , L_{s2} рівні.

$$\frac{v_{s1}}{H_z} = \frac{C}{2L_{s1}} = 1.5 * 10^7$$

$$\frac{v_{s2}}{H_z} = \frac{C}{2L_{s2}} = 1.5 * 10^5$$

Якщо діапазон вимірювання фази є більшим при певних вимогах до точності вимірювання фази та відстані, необхідно збільшити кількість вимірювальних стрічок, отже, кількість частот вимірювальної стрічки також повинна відповідно збільшитися.

Наприклад, якщо $L=100$ км, вимога до точності становить 0,01 м, а точність вимірювання фази становить 1%, тоді потрібно більше оптичних стрічок, тобто $k=10$ м, $k_2=1000$ м, $k_3=105$ м.

Очевидно, що забезпечити точність вимірювання 0,01 в такому широкому діапазоні частот для системи вимірювання фази дуже складно. Тому пряме вимірювання частоти не підходить для вимірювання на великі відстані, зазвичай його можна використовувати лише для коротких дистанцій, таких як короткобазові лазерні далекоміри на основі напівпровідникового GaAs.

1.3 Непрямий вимірювальний частотний метод

У реальних вимірюваннях, оскільки вимоги до довжини вимірювання є досить великими, зазвичай використовують метод непрямого вимірювання частоти. Цей метод полягає в тому, щоб за допомогою групи чисел, близьких за значенням до модуляційної частоти, непрямо отримують значення для кожного вимірювального приладу.

Непряме вимірювання частоти також називають концентрованим вимірюванням частоти, оскільки значення різних непрямих частот вимірювання в цьому способі дуже близькі, а частота вимірювання зосереджена в досить вузькому діапазоні частот. Використання концентрованої частоти вимірювання має багато переваг, таких як те, що підсилювачі та модулятори можуть отримувати схожі значення підсилення та стабільності фази, а також відповідні кварцові генератори можуть бути об'єднані.

1.4 Порівняння методів лазерного вимірювання відстані

Після попереднього введення ми можемо чітко побачити схожості та відмінності між імпульсним і фазовим лазерним вимірюванням відстані:

Діапазон вимірювання: діапазон імпульсного лазерного далекоміра зазвичай може досягати тисячі метрів, тоді як діапазон фазового лазерного далекоміра зазвичай становить близько сотні метрів, тому діапазон імпульсного лазерного далекоміра є ширшим, ніж у фазового.

Точність: що стосується точності, імпульсний лазерний далекомір може досягати точності на рівні метра, тоді як точність фазового лазерного далекоміра може досягати міліметрового рівня, тому між ними існує значна різниця в точності.

Прямий та непрямий методи. Хоча обидва ці методи спрямовані на високоточне вимірювання відстані, їхні принципи та сфери застосування істотно різняться.

Основна складність прямого методу виникає при потребі вимірювання на великі відстані або з дуже високою точністю. Якщо вимога до діапазону значна (наприклад, 100 км з точністю 0.01 м), то для покриття всього діапазону довелося б використовувати величезну кількість "вимірювальних стрічок" (або еталонних довжин), що вимагало б генерування частот у дуже широкому діапазоні (наприклад, від 10 м до 10^5 м). Забезпечити точність 0.01 м в такому широкому спектрі частот для фазової системи є надзвичайно складним і практично нездійсненним завданням[2].

Через ці обмеження, прямий вимірювальний частотний метод не підходить для великомасштабних вимірювань. Його типове застосування обмежується короткими дистанціями, як, наприклад, у короткобазових лазерних далекомірах на основі напівпровідникового GaAs.

На відміну від прямого методу, непрямий підхід використовує групу частот, які є близькими за значенням до модуляційної частоти, для непрямого визначення вимірюваної відстані. Це означає, що замість генерування унікальної частоти для кожної потенційної "стрічки", він працює з вузьким спектром, з якого вже виводяться необхідні дані.

Завдяки роботі у вузькому частотному діапазоні, підсилювачі та модулятори можуть підтримувати схожі значення підсилення та стабільності фази, що спрощує проектування та калібрування системи.

Споріднені кварцові генератори можуть бути ефективно об'єднані, що сприяє зменшенню складності пристрою та підвищенню його загальної стабільності.

Підсумовуючи, прямий метод є простим, але практично обмеженим через необхідність роботи в широкому частотному діапазоні для великих відстаней. Натомість, непрямий метод, працюючи з концентрованим діапазоном частот, забезпечує більшу стабільність, ефективність та точність, що робить його кращим вибором для більшості сучасних систем вимірювання відстаней на значних дистанціях.

1.5 Аналіз характеристик та елементної бази лазерних далекомірів



Рисунок 1.2 - Bosch GLM 50 C Professional

1. Bosch GLM 50 C Professional [21]

Характеристики:

- Робочий діапазон: 0.05 - 50 метрів
- Похибка вимірювання: ± 1.5 міліметра
- Джерело живлення: 2 елементи живлення типу LR03 (AAA) по 1.5 В
- Вага: 100 грамів

Переваги:

1. Малогабаритний та неважкий.
2. Зручний у застосуванні.
3. Наявна технологія Bluetooth для передачі даних на портативні пристрої (смартфон або планшет).
4. Здатний визначати лінійні розміри, площу, об'єм, а також виконувати опосередковані обчислення (за теоремою Піфагора).
5. Достатня точність для більшості домашніх та професійних задач.
6. Зберігає в пам'яті останні 30 результатів вимірювань.

Недоліки:

1. Відносно невеликий максимальний діапазон вимірювання у порівнянні з

д
е
я
к
и

2. Інформація на дисплеї може бути менш помітною при яскравому сонячному світлі.



Рисунок 1.3 - Leica Disto D2

2. Leica Disto D2 [22]

Характеристики:

- Робочий діапазон: 0.2 - 100 м
- Похибка вимірювання: ± 1.5 мм
- Джерело живлення: 2 батарейки типу AAA по 1.5 В
- Вага: 116 грамів

Переваги:

1. Висока прецизійність вимірювань.
2. Компактний та зносостійкий корпус.
3. Просте та інтуїтивно зрозуміле меню.
4. Функції складання/віднімання значень, розрахунку площі та кубатури.
5. Оснащений відкидною скобою для здійснення вимірювань з кутів та кромки.

Недоліки:

1. Обмежений набір додаткових функцій у порівнянні з деякими аналогами.
- Відсутній модуль Bluetooth для бездротової передачі даних.



Рисунок 1.4 - Stanley TLM165

3. Stanley TLM165 [23]

Характеристики:

- Робочий діапазон: 0.5 - 50 метрів
- Похибка вимірювання: ± 3 мм
- Джерело живлення: 2 батарейки типорозміру AAA
- Вага: 100 г

Переваги:

1. Досить велика максимальна дистанція вимірювання.
2. Однокнопкове управління.
3. Міцна конструкція корпусу.
4. Можливості вимірювання відстані, площі та об'єму.

Недоліки:

1. Можлива дещо нижча точність у порівнянні з дорожчими моделями.
- Немає розширених опцій, таких як Bluetooth або непрямі вимірювання.



Рисунок 1.5 - Hilti PD-I

4. Hilti PD-I [24]

Характеристики:

- Робочий діапазон: 0.1 - 80 м
- Похибка вимірювання: ± 1.5 мм
- Джерело живлення: 2 батарейки типу AAA 1.5 В
- Вага: 130 грамів

Переваги:

1. Надійний та ударостійкий корпус, розроблений для будівельних умов.
2. Зручний у використанні, навіть в захисних рукавицях.
3. Великі та чіткі кнопки керування.
4. Функціонал включає вимірювання відстані, площі, об'єму, а також непрямі методи вимірювання.

5. Захищений від пилу та вологи відповідно до стандарту IP54.

Недоліки:

1. Вища ціна у порівнянні з непрофесійними моделями.
2. Може мати дещо більші габарити.



Рисунок 1.6 - Mileseeey X5

5. Mileseeey X5 [25]

Характеристики:

- Робочий діапазон: 0.05 - 100 метрів
- Похибка вимірювання: ± 2 мм
- Джерело живлення: Вбудована акумуляторна батарея
- Вага: 155 грамів

Переваги:

1. Значний діапазон дії.
2. Широкий набір функцій, включаючи вимірювання кутів, трапеції, безперервний режим вимірювання.
3. Кольоровий дисплей.
4. Інтегрований бульбашковий рівень.
5. Приваблива ціна за наявні можливості.

Недоліки:

1. Точність може бути дещо нижчою у порівнянні з продукцією більш відомих брендів.
2. Організація меню може здатися менш інтуїтивною деяким користувачам.

Для всебічного розуміння можливостей та особливостей сучасних лазерних далекомірів, представлено порівняльну таблицю п'яти розглянутих вище далекомірів:

Таблиця 1.1 Характеристики лазерних далекомірів

Характеристика	Bosch GLM 50 C Professional	Leica Disto D2	Stanley TLM165	Hilti PD-I	Mileseey X5
Робочий діапазон	0.05 - 50 м	0.2 - 100 м	0.5 - 50 м	0.1 - 80 м	0.05 - 100 м
Похибка вимірювання	±1.5 мм	±1.5 мм	±3 мм	±1.5 мм	±2 мм
Джерело живлення	2x AAA	2x AAA	2x AAA	2x AAA	Вбудований акумулятор
Вага	100 г	116 г	100 г	130 г	155 г
Bluetooth	Так	Ні	Ні	Ні	Ні
Додаткові функції	Лінійні, площа, об'єм, Піфагор, пам'ять	Площа, об'єм, складання/віднімання, відкидна скоба	Відстань, площа, об'єм	Відстань, площа, об'єм, непрямі	Кути, трапеція, безперервний, кольоровий дисплей, бульбашковий рівень
Особливість корпусу	Малогабаритний, неважкий	Компактний, зносостійкий	Міцний	Надійний, ударостійкий, IP54	Немає
Основні переваги	Малогабаритний, Bluetooth, різноманітність обчислень, пам'ять	Висока прецизійність, компактність, відкидна скоба	Велика дистанція, одно-кнопкове управління, міцна конструкція	Надійний, ударостійкий, зручний у рукавицях, IP54	Значний діапазон, широкий функціонал, кольоровий дисплей, приваблива ціна
Основні недоліки	Обмежений діапазон, дисплей на сонці	Обмежений функціонал, без Bluetooth	Нижча точність, немає розширених опцій	Вища ціна, більші габарити	Нижча точність (відносно), менш інтуїтивне меню
Цільове призначення	Домашні / легкі професійні	Професійні, точні	Базові вимірювання	Професійні, будівельні	Багатофункціональні, універсальні

1.5.1 Елементна база лазерного далекоміра: лазерний діод

Лазерні діоди також називають напівпровідниковими лазерами. Перше важливе застосування лазерних діодів почалося з появою програвачів компакт-дисків у 1980-х роках. З тих пір застосування цього пристрою розширилося до багатьох інших секторів, включаючи лазери CD-ROM, лазерні принтери, оптичні накопичувачі, що перезаписуються, сканери штрих-кодів, цифрові принтери і волоконно-оптичні комунікації[11].

Лазерні діоди є найбільшим сектором у світовому лазерному бізнесі і поділяються на короткохвильові діодні лазери і довгохвильові діодні лазери відповідно до довжини хвилі і діапазону застосування.

Рушійний ланцюг лазерного діода складається з ланцюга затримки повільного запуску, ланцюга фільтра, джерела струму, ланцюга автоматичного регулювання потужності та інших частин.

Зовнішній вигляд звичайного лазерного діода представлений на рисунку 1.2:

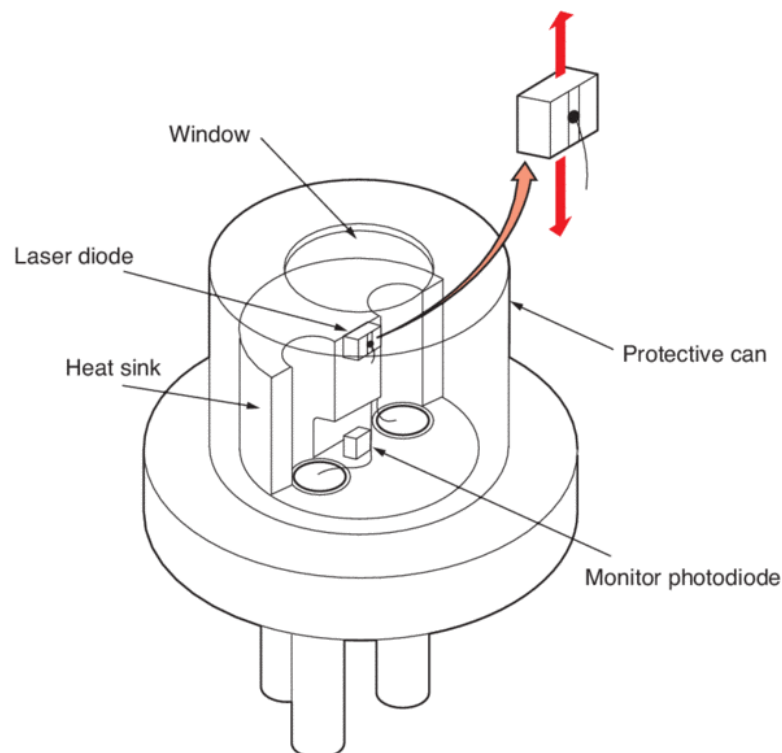


Рисунок 1.7 – Зовнішній вигляд лазерного діода

Існує три типи внутрішньої структури лазерних діодів. Як показано на рисунку 1.3, лазерний діод складається з двох частин: перша частина - це лазерна випромінювальна частина (яку можна позначити LD), яка використовується для випромінювання лазерного світла; друга частина - це лазерна приймальна частина (яку можна позначити PD), яка використовується для прийому і контролю лазерного світла, випромінюваного LD (звичайно, якщо вихід LD не потрібно контролювати, частина PD може бути опущена); ці дві частини мають спільний електрод, тому лазерний діод має три електроди.

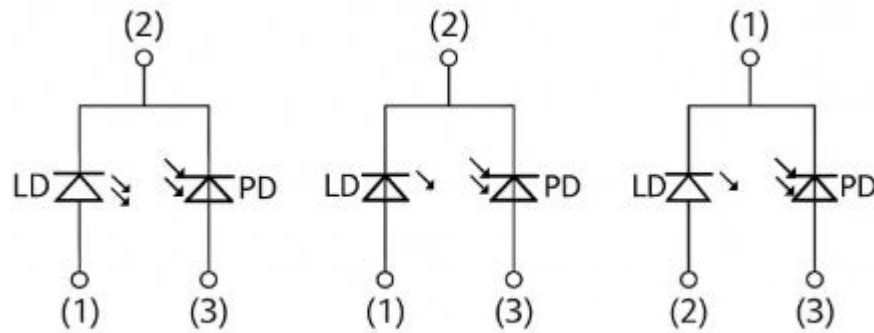


Рисунок 1.8 - Принципова схема внутрішньої структури лазерного діода

Лазерні діоди мають такі переваги, як малі розміри, невелика вага, низьке енергоспоживання, проста схема керування, зручна модуляція, стійкість до механічних ударів і вібрацій тощо. Однак вони надзвичайно чутливі до надмірного струму, перенапруги та електростатичних перешкод. Тому при їх використанні слід звертати особливу увагу на те, щоб їхні робочі параметри не перевищували гранично допустимих значень.

1.5.2 Елементна база лазерного далекоміра: фотоприймач

Перше, що зустрічається в лазерній приймальній системі - це фотоприймач, який є пристроєм, що перетворює оптичні сигнали у відповідні електричні сигнали.

В даний час методи виявлення лазерів включають пряме виявлення, некогерентне виявлення, гетеродинне виявлення і когерентне виявлення. Якщо довжина хвилі лазера збігається з відповідною довжиною хвилі детектора, детектор в принципі є універсальним.

Відповідно до різних механізмів, лазерні детектори можна розділити на дві категорії: термоелектричні детектори та фотоелектричні детектори. Термоелектричні детектори поділяються на термоелектричні, термісторні та піроелектричні. Фотодетектори поділяються на фотоемісійні, фотонапружні, фотопровідні, фотоелектромагнітні тощо[5].

Принципи роботи кількох найпоширеніших фотоприймачів такі:

1. Фотоемісійний тип

Коли світло опромінює певний метал або його оксид, коли енергія фотона, випромінюваного падаючим світлом, є достатньо великою, це може призвести до того, що поверхня металу або оксиду металу випромінює електрони, і під дією електричного поля утворюється струм.

Це явище називається фотоелектронною емісією або зовнішнім фотоелектом. Воно є фізичною основою роботи фотокатода вакуумного фотоелектричного приладу. Фотоелектронна емісія може бути використана для створення фотоемісійних детекторів. До цього типу належать широко використовувані фотоелектронні трубки та фотоелектронні помножувачі.

Фотоелектронну емісію в металевих і напівпровідникових матеріалах можна умовно розділити на три етапи:

- Поглинання фотонів. Після того, як світло падає на об'єкт, електрони в об'єкті поглинають енергію фотонів і переходять з основного стану в збуджений стан з енергією, вищою за енергетичний рівень вакууму (мінімальна енергія вільного заряду у вакуумі).

- Фотоелектрони рухаються до поверхні. Збуджені електрони рухаються до поверхні зі збудженого місця, і в цьому процесі вони втрачають частину енергії через зіткнення з іншими електронами або елементами.

- Електрони долають бар'єр поверхневого потенціалу і вириваються з поверхні матеріалу. Електрони, які досягли поверхні, можуть вилетіти з поверхні, якщо вони все ще мають достатньо енергії для подолання зв'язку поверхневого потенційного бар'єру з електронами (тобто робочої функції).

2. Фотоелектричний тип (фотоелектричний пристрій)

Це напівпровідниковий пристрій. Коли світло падає на його PN-перехід, електронно-діркові пари в області переходу рухаються в протилежному напрямку, створюючи додатковий потенціал, який називається

фотоіндукованою електрорушійною силою. Це явище, при якому світло потрапляє на тверді тіла, і створює різницю потенціалів між різними частинами неоднорідного напівпровідника або комбінації напівпровідника і металу, називається фотоелектричним ефектом. До цього типу відносяться широко використовувані твердотільні фотоприймачі, такі як різні фотоелементи, світлочутливі діоди, фотодіоди з PN-переходом, PIN-фотодіоди, лавинні фотодіоди, масивні фотоелектричні прилади, квадрантні фотоелектричні прилади і позиційні детектори (PSD).

Характеристики фотоелектричних пристроїв такі:

- Фотоелектричні характеристики. Фотоелектричні характеристики зазвичай відносяться до функціональної залежності між фотострумом і освітленістю, але іноді вони також виражаються як функціональна залежність між іншими вихідними величинами і освітленістю. Фотоелектричні характеристики пристрою в основному визначаються матеріалом, а також пов'язані зі структурою і умовами експлуатації (розмір навантаження, прикладена напруга і т.д.).

- Спектральні характеристики. Спектральні характеристики пристрою часто виражаються кривою відносної чутливості і довжини хвилі, а спектральні характеристики приладу в основному залежать від матеріалу.

- Температурні характеристики. Температура впливає на напругу холостого ходу, струм короткого замикання, темновий струм, фотострум і чутливість пристрою до монохроматичного світла.

- Частотні характеристики. Характеристики фотоелектричного пристрою залежать від величини ємності переходу і опору навантаження.

Під впливом світла провідність збільшується, опір зменшується, а провідні властивості змінюються. Це один з внутрішніх фотоелектричних ефектів. Явище, при якому зміни у світлі викликають зміни в провідності напівпровідникових матеріалів, називається ефектом фотопровідності. Коли

світло опромінює напівпровідникові матеріали, зв'язані електрони атомів решітки або домішкових атомів поглинають енергію фотонів і збуджуються, щоб стати провідними вільними електронами, в результаті чого концентрація носіїв в матеріалі збільшується, тим самим збільшуючи провідність матеріалу. Фоторезистори і світловоди належать до цієї категорії, але вони рідко використовуються в лазерних технологіях.

1.6 Висновки до розділу 1

Отже, в даному розділі були пояснені принципи та методи лазерного вимірювання відстані, проведено аналіз існуючих далекомірів. Також була повністю розписана елементна база лазерних далекомірів.

2. ВИБІР ЕЛЕМЕНТНОЇ БАЗИ ДАЛЕКОМІРА

2.1 Вибір лазерного діода

Відповідно до теми проекту, було обрано лазерний діод LD905A10C17.

Його основними особливостями є

- 905nm InGaAs Інфрачервоний лазерний діод
- Оптична вихідна потужність: 10 MBт CW
- Робоча температура: +70 °C
- Вбудований фотодіод для моніторингу лазерного діода

Структура:

- Датчик
- Промисловий оптичний модуль

Таблиця 2.1 – Електричні та оптичні характеристики LD905A10C17

Parameter	Symbol	Min.	Typ.	Max.	Unit	Conditions
Lasing wavelength	λ_p	895	905	915	nm	$P_O = 10mW$
Threshold current	I_{th}	-	8	15	mA	-
Operating current	I_{op}	-	16	25	mA	$P_O = 10mW$
Monitor Current	I_m	0.05	0.2	0.6	mA	$P_O = 10mW$
Slope Efficiency	η	0.8	1.2	1.5	mW/mA	$P_O = 10mW$
Operating voltage	V_{op}	1.5	1.7	2.3	V	$P_O = 10mW$
Parallel divergence angle	$\Theta_{//}$	6	8	12	deg	$P_O = 10mW$ FWHM
Perpendicular divergence angle	$\Theta_{\perp}$	24	28	32	deg	$P_O = 10mW$ FWHM
Parallel FFP deviation angle	$\Delta \Theta_{//}$	-3	-	+3	deg	$P_O = 10mW$
Perpendicular FFP deviation angle	$\Delta \Theta_{\perp}$	-3	-	+3	deg	$P_O = 10mW$
Optical Distance	$\Delta x \Delta y \Delta z$	-80	-	+80	um	

Також представлені граничні характеристики лазера у таблиці 2.2:

Таблиця 2.2 – Граничні характеристики LD905A10C17

Parameter	Symbol	Condition	Rating	Unit
Optical output power	P _O	CW	10	mW
Reverse voltage (LD)	V _{RL}	-	2	V
Reverse Voltage (PD)	V _{RD}	-	30	V
Operating temperature	T _{opr}	-	-10 to +70	°C
Storage temperature	T _{stg}	-	-40 to +85	°C

2.2 Будова LD905A10C17

Механічна схема лазерного діода показана на рисунках 2.1 та 2.2:



Рисунок 2.1 – LD905A10C17 Загальний вигляд

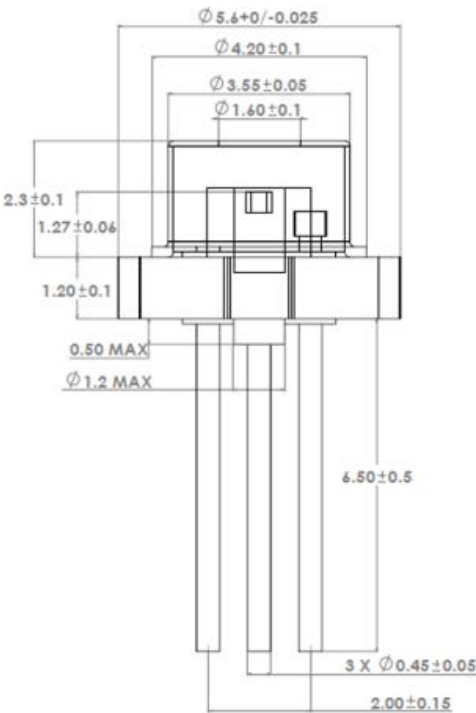


Рисунок 2.2 - LD905A10C17 вигляд збоку

Схема внутрішньої структури піна виглядає так:

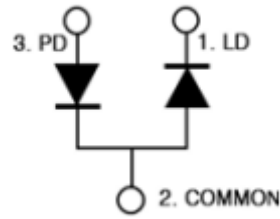


Рисунок 2.3 – Схема внутрішньої структури контакту

2.2.1 Вибір драйвера для лазера

Діод не має вбудованого обмеження струму, тому для безпечного і правильного живлення потрібно обрати драйвер. Для цього проекту я обрав драйвер Supertex HV7360. Це високошвидкісний імпульсний генератор з вбудованими FET транзисторами. Також він має високовольтні та сильнострумові Р-канальні та N-канальні MOSFET як вихідні каскади. Його особливості описані нижче:

- Технологія HVCMOS® для високої продуктивності
- Інтеграція високої щільності, пов'язана з змінним пульсером
- Напруга від 0 В до ± 100 В
- Низьке споживання електроенергії та плаваюча потужність

Таблиця робочих напруг драйвера представлена нижче:

Таблиця 2.3 – Робочі напруги HV7360

Parameters	Sym.	Min.	Typ.	Max.	Units	Conditions
Logic Supply Voltage Range	V_{LL}	2.25	—	3.63	V	
Supply Voltage	$V_{DD}-V_{SS}$	4.75	—	11.5	V	$4 \leq V_{DD} \leq 11.5V$
Low Side Supply Voltage	V_{SS}	-5.5	—	0	V	
Gate Drive High Side Voltage	V_H	$V_{SS}+4$	—	V_{DD}	V	$V_H-V_L \geq 4V$
Gate Drive Low Side Voltage	V_L	V_{SS}	—	$V_{DD}-4$	V	
Output Positive High Voltage	$V_{SP1,2}$	0	—	100	V	
Output Negative High Voltage	$V_{SN1,2}$	-100	—	0	V	
V_{DD} Quiescent Current	I_{DDQ}	—	50	—	μA	No input transitions, PE = 0
V_H Quiescent Current	I_{HQ}	—	2	—	μA	
V_{DD} Quiescent Current	I_{DDQ}	—	1	—	mA	No input transitions, PE = 1
V_H Quiescent Current	I_{HQ}	—	2	—	μA	
V_{DD} Average Current	I_{DD}	—	4	—	mA	One channel On at 5 MHz, No load
V_H Average Current	I_H	—	10	—	mA	
Input Logic Voltage High	V_{IH}	$V_{PE}-0.3$	—	V_{PE}	V	For logic inputs INA, INB, INC and IND
Input Logic Voltage Low	V_{IL}	0	—	0.3	V	
Input Logic Current High	I_{IH}	—	—	1	μA	
Input Logic Current Low	I_{IL}	—	—	1	μA	
PE Input Logic Voltage High	V_{PEH}	1.7	3.3	5.25	V	For logic input PE
PE Input Logic Voltage Low	V_{PEL}	0	—	0.3	V	
PE Input Impedance to GND	R_{INPE}	100	—	—	k Ω	

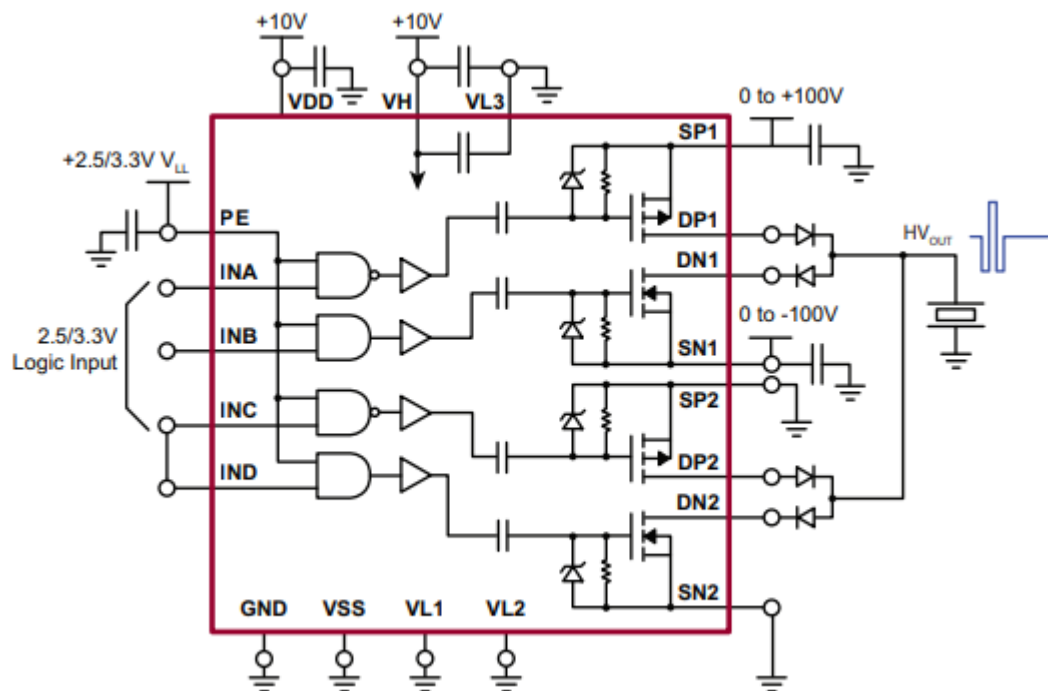


Рисунок 2.4 – Типова схема HV7360

Тепер коли можна працювати з лазерним діодом, потрібно підібрати мікроконтролер для точного керування імпульсами лазерного діода.

2.2.2 Схема керування лазером

Для керування лазером використовується схема, яка зображена на рисунку 2.5. Дана схема є типовою для застосування в лазерних імпульсних далекомірах і була взята з ресурсу - <https://github.com/iliasam/OpenTOFLidar>.

Лазерний діод на рисунку 2.5 позначений VD3. Спочатку транзистор VT1 закритий, лазер не світить, конденсатор C5 заряджається через резистор R5 до необхідної напруги. У заданий момент на драйвер транзистора DD1 (UCC27511DBVR) подається імпульс, він посилює цей імпульс, транзистор VT1 різко відкривається і лазерний діод починає випромінювати імпульс. Якщо б усі компоненти були ідеальними, то в такому випадку максимальний струм через лазер міг би бути дуже великим, але в реальності він сильно обмежується індуктивністю елементів.

Регулюючи напругу, можна регулювати максимальний струм лазера. Для формування цієї напруги на мікросхемі DD4 (MIC2288YD5-TR) зроблено вузол DC-DC перетворювача, вихідну напругу якого можна регулювати з мікроконтролера.

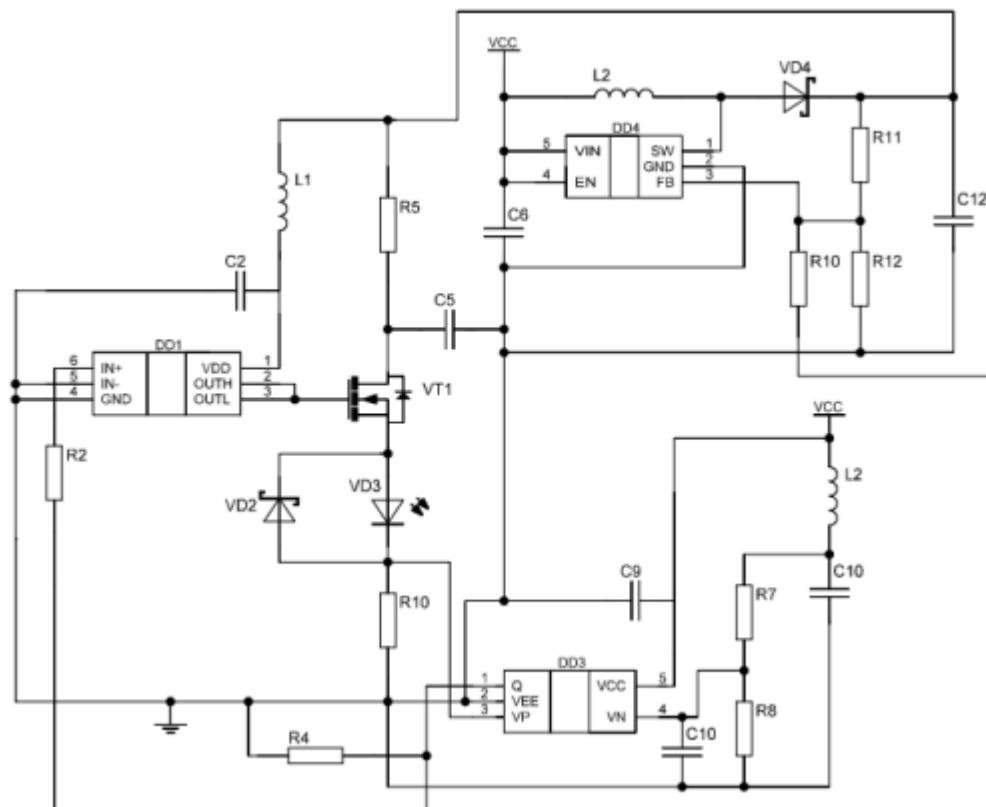


Рисунок 2.5 – Схема керування лазером

Для того, щоб повідомити мікросхему TDC про те, що лазер увімкнувся, зроблений спеціальний вузол за рахунок використання мікросхеми DD3 (ADCMR600). Ця мікросхема – високошвидкісний компаратор, який спрацьовує, коли струм через лазер досягає певного значення.

В таблиці 2.1 представлено докладний опис характеристик ключових елементів схеми керування лазером.

Таблиця 2.4 – Характеристики елементів схеми керування лазером

Назва мікросхеми	Характеристики
UCC27511DBVR	Високошвидкісний драйвер затвора, здатний ефективно керувати силовими перемикачами. Використовує конструкцію, яка за своєю суттю мінімізує наскрізний струм, що робить його здатним виводити та занурювати імпульси високого пікового струму в ємнісні навантаження. Мікросхема має конструкцію з подвійним входом, яка забезпечує гнучкість реалізації як інвертування (IN–), так і неінвертуючу (IN+) конфігурацію з тим самим пристроєм. Поріг вхідного контакту пристрою UCC27511 базується на TTL і CMOS-сумісній низьковольтній логіці, яка є фіксованою та незалежною від напруги живлення VDD. Широкий гістерезис між високим і низьким порогами забезпечує відмінну перешкодостійкість. Має широкий діапазон температур від -40 ° C до 140 ° C.

Продовження таблиці 2.4

Назва мікросхеми	Характеристики
ADCM600	Це дуже швидкий компаратор, надзвичайно універсальний та простий у використанні. Важливим є використання площин живлення з низьким опором, зокрема площини вихідного живлення (VCCO) і площини заземлення (GND). Забезпечення зворотного шляху з найменшою індуктивністю для перемикавання струмів забезпечує найкращу можливу продуктивність. Вхідний каскад компаратора забезпечує надійний захист від великого перевантаження вхідного сигналу, а виходи не змінюють фази, коли допустимий діапазон перевищено. Функції високошвидкісної засувки та програмованого гістерезису також надаються з унікальною опцією керування з одним контактом.
MIC2288YD5-TR	Підсилювальний імпульсний регулятор постійного струму. Висока щільність потужності досягається за допомогою внутрішнього перемикача пристрою MIC2288 на 34В/1А, що дозволяє йому жити великі навантаження. Реалізує постійну частоту, ШІМ 1,2 МГц, схему керування струмом режимом із внутрішньою компенсацією, яка забезпечує чудову характеристику перехідних процесів і ефективність регулювання виходу. Топологія ШІМ з фіксованою частотою також зменшує помилкові шуми перемикавання та пульсації на вхідному джерелі живлення. MIC2288 доступний у низькопрофільному 5-вивідному тонкому корпусі.

2.3 Вибір мікроконтролера

Мікроконтролер вибраний – RP2040. Він був обраний, тому що ідеально підходить для такого простого функціоналу як керування імпульсами лазера. Для програмування даного мікроконтролера достатньо трохи документації та базового знання C/C++.

Його особливості:

- Два ядра Arm Cortex-M0+ 133 МГц

- 264 КБ оперативної пам'яті
- DMA контролер
- Вбудований сенсор температури
- 4 x 12-розрядних АЦП
- Підтримка інтерфейсу SWD для завантаження та налагодження
- Підтримка сплячих режимів та зниженої частоти
- Два інтерфейси PWM

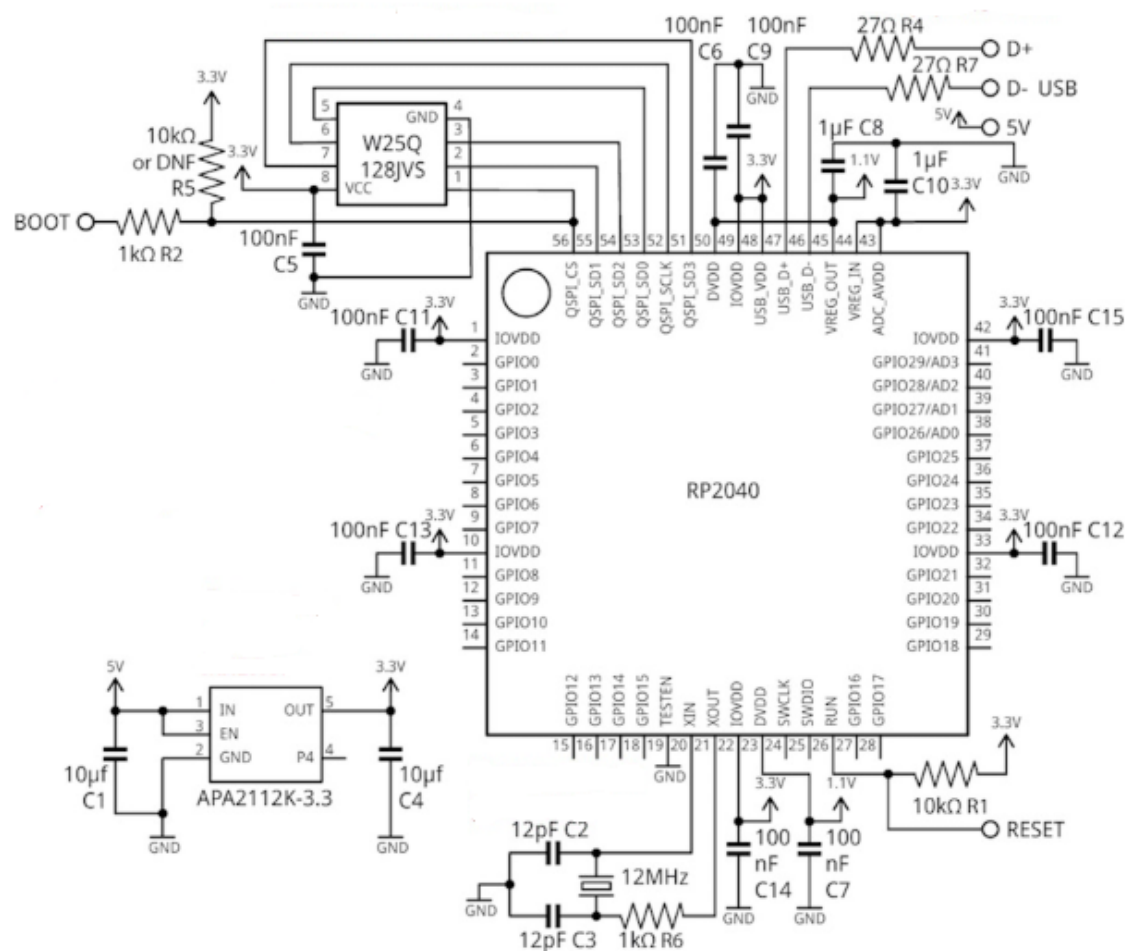


Рисунок 2.6 – Типова електрична схема включення RP2040

2.4 Вибір фотоприймача

Основною для вибору фотоприймачів є робоча довжина хвилі, а потім вже враховують їхню чутливість, шум і смугу пропускання.

Для видимого та інфрачервоного світла можна вибрати фотоелектронні помножувачі. Наприклад, гелій-неонові лазери мають центральну довжину хвилі 0,6328 мкм, і фотоелектронні помножувачі можуть бути обрані для отримання вищої чутливості і нижчого рівня шуму. Кремнієві PIN-фотодіоди також мають хороші можливості виявлення світла з довжиною хвилі 0,6328 мкм, і також можуть бути обрані.

Для лазерів на арсеніді галію з довжиною хвилі 0,8-0,95 мкм можна вибрати фотоелектронні помножувачі Ga-As-CS20 для реагування на більш високочастотні сигнали модуляції. Коли швидкість відгуку становить 10 наносекунд, квантова ефективність може досягати 90%. На цій довжині хвилі можна вибрати відповідні фотодіоди, лавинні фотодіоди та інші твердотільні детектори.

Лазер використовує неодимове скло або кристал YGA як робочі матеріали, а довжина хвилі становить 1,06 мкм. У цей час фотоелектронні помножувачі не можуть бути використані, але потрібні кремнієві фотодіоди або кремнієві лавинні фотодіоди. Тому що квантова ефективність фотоелектронного помножувача в цей час падає лише до 0,8%, тоді як кремнієві фотодіоди і кремнієві лавинні фотодіоди мають вищу чутливість. Твердотільні детектори зараз широко використовуються у видимому і ближньому інфрачервоному діапазонах. Окрім високої швидкості відгуку (час відгуку становить порядку нс), великої робочої смуги пропускання (порядку гігагерц), високої квантової ефективності та низького рівня шуму, вони також мають такі переваги, як малий розмір, легка вага та сильна ударостійкість. Однак більшість твердотільних детекторів виготовляються з кремнію або германію, і на їхній робочий стан сильно впливає температура середовища. Підвищення температури призводить до зниження чутливості та збільшення шуму. За особливих обставин можна вжити певних заходів для охолодження.

Деякі лазери працюють у далекому інфрачервоному діапазоні, наприклад, Са-лазер з довжиною хвилі 10,6 мкм. Можна використовувати ртутно-кадмій-

телуридні детектори (HgCdTe), які можуть реагувати на частоти модуляції вище 10 тГц.

Ключові моменти для вибору оптико-електронних приладів для застосування можна підсумувати наступним чином[16]:

- Оптиoeлектронний прилад повинен відповідати спектральним характеристикам джерела сигналу випромінювання та оптичної системи. Якщо вимірювана довжина хвилі знаходиться в ультрафіолетовому діапазоні, можна вибрати фотопомножувач або спеціальний ультрафіолетовий напівпровідниковий оптиoeлектронний прилад; якщо сигнал є видимим світлом, можна вибрати фоторезистор, кремнієвий оптиoeлектронний прилад або фотопомножувач; для інфрачервоних сигналів можна вибрати фоторезистор; для ближнього інфрачервоного діапазону можна вибрати кремнієвий оптиoeлектронний прилад або фотопомножувач.

- Фотоелектричний пристрій повинен бути просторово вирівняний з енергією падаючого випромінювання. Перш за все, слід зазначити, що світлочутлива поверхня фотоелектричного пристрою повинна бути просторово узгоджена з падаючим випромінюванням. Наприклад, сонячний елемент має велику світлочутливу поверхню, яка зазвичай використовується для прийому розсіяного світла або світлових променів, які не досягли сфокусованого стану.

Інший приклад - фоторезистор еквівалентний змінному резистору, що регулюється світлом. Опір зменшується при освітленні. Тому в оптичному тракті та механічній конструкції світло контролюється, щоб опромінювати весь резистор між двома електродами, так що вся світлочутлива поверхня може бути ефективно використана. Світлочутлива поверхня фотодіода і фототранзистора, це лише дуже маленька ділянка біля переходу. Тому лінза зазвичай використовується як вікно падаючого світла, тому фокус лінзи повинен бути сфокусований на світлочутливій точці. У порівнянні з іншими фотоелектричними пристроями, тремтіння фотоелектричного струму, що

генерується тремтінням опроміненого світла, у фотоелементі з великою світлочутливою площею є меншим.

- Характеристики фотоелектричного перетворення оптоелектронного пристрою повинні відповідати падаючому випромінюванню. Наприклад, центр зміни потоку падаючого випромінювання зазвичай знаходиться в межах лінійного діапазону оптоелектронного пристрою, щоб забезпечити хороше лінійне виявлення.

- Для слабких світлових сигналів пристрій повинен мати хорошу чутливість, щоб забезпечити певне співвідношення сигнал/шум і досить сильний вихідний електричний сигнал.

- Характеристики відгуку оптоелектронного пристрою повинні відповідати частоті сигналу, формі модуляції та формі сигналу оптичного сигналу, щоб забезпечити відсутність частотних спотворень вихідного сигналу та хороший час відгуку. У цьому випадку в основному необхідно вибрати пристрій з коротким часом відгуку або високою верхньою межею частоти, і в той же час звернути увагу на відповідність динамічних параметрів в ланцюзі.

- Оптоелектронний пристрій також повинен відповідати електричним характеристикам подальшого ланцюга, щоб забезпечити максимальний коефіцієнт перетворення і лінію дальності дії, відношення сигнал/шум та швидку динамічну реакцію.

- Для того, щоб забезпечити довгострокову надійність оптоелектронних пристроїв, необхідно звернути увагу на вибір технічних характеристик пристрою та умов навколишнього середовища. Зазвичай потрібно, щоб нормальна робота могла бути гарантована за умови нижче максимальної межі під час тривалого безперервного використання. Коли умови роботи перевищують максимальну межу, характеристики пристрою різко погіршуються, особливо при перевищенні допустимого значення струму, і пошкодження часто є постійними. Використовувана температура

навколишнього середовища така ж, як і поточний допуск. При перевищенні значення температурного допуску це часто призводить до повільного погіршення характеристик. Коротше кажучи, пристрій повинен використовуватися в номінальних умовах, і особливу увагу слід приділяти температурним характеристикам пристрою, щоб забезпечити довгострокову стабільну і надійну роботу системи.

Після всебічного порівняння ми обрали фотодіод моделі OPT301, який є фотоелектричним інтегральним пристроєм виробництва BURR-BROWN, що поєднує в собі фотодіод і підсилювач перетворення струму/напруги. Підсилювач перетворення струму/напруги складається з прецизійного вхідного операційного підсилювача на польовому транзисторі (FET) і резистора з металеві плівки на кристалі. Фотодіод з площею прийому світла $0,09 \times 0,09$ дюйма має хорошу лінійність і дуже низький темновий струм при нульовому зсуві. Його внутрішня принципова схема показана на рисунку (2.7).

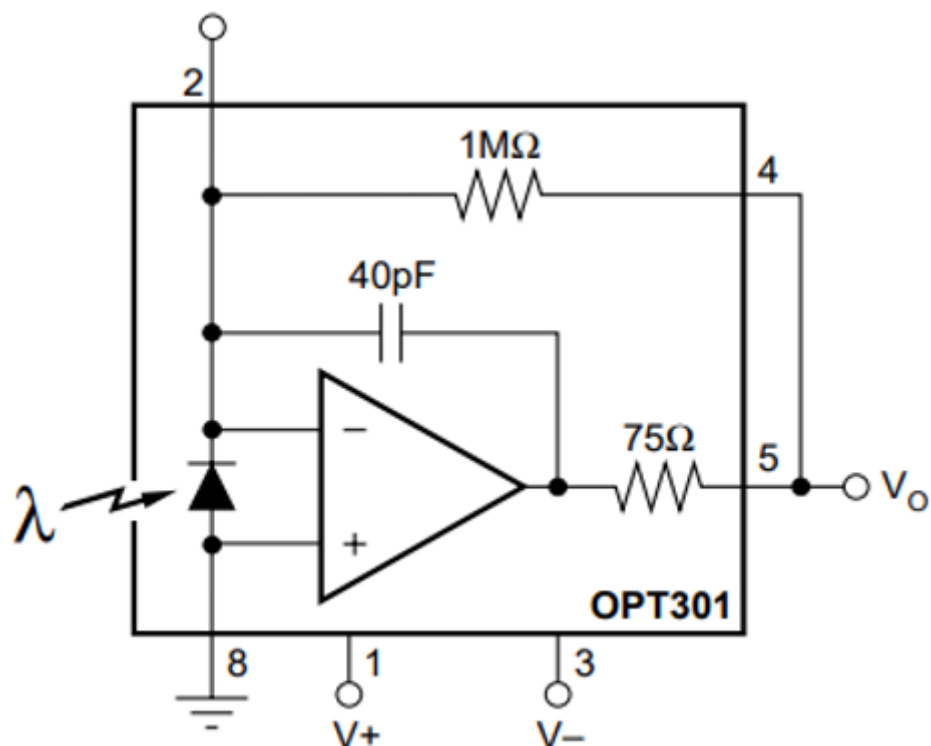


Рисунок 2.7 - Внутрішня принципова схема OPT301

OPT301 має широкий діапазон робочої напруги (від 25В до $\pm 18\text{В}$), а статичний робочий струм складає всього 400 мкА. При чутливості 0,47 А/Вт (0,65 мкА) похибка темного струму становить лише 2 мВ, смуга пропускання 4 кГц, хороші характеристики реакції на УФ-випромінювання, тому він має хороші робочі характеристики в діапазоні від 400°C до 850°C. OPT301 може широко використовуватися в медичних інструментах, експериментальних приладах, датчиках положення і наближення, аналізаторах камер, детекторах диму тощо. Струм фотодіода в OPT301 пропорційний падаючому світловому потоку. Коли довжина хвилі падаючого світла становить 650 нм (видиме червоне світло), відгук фотодіода становить близько 0,45 А/Вт. Вихідна напруга OPT301 є добутком фотодіода і резистора зворотного зв'язку. Резистор зворотного зв'язку налаштований лазером на $1\text{МГц} \pm 296$, так що вихідна напруга OPT301 становить близько 0,45В/Вт при довжині хвилі падаючого світла 650nm.

Фотоелектричні характеристики OPT301 показано на рисунку (2.8).

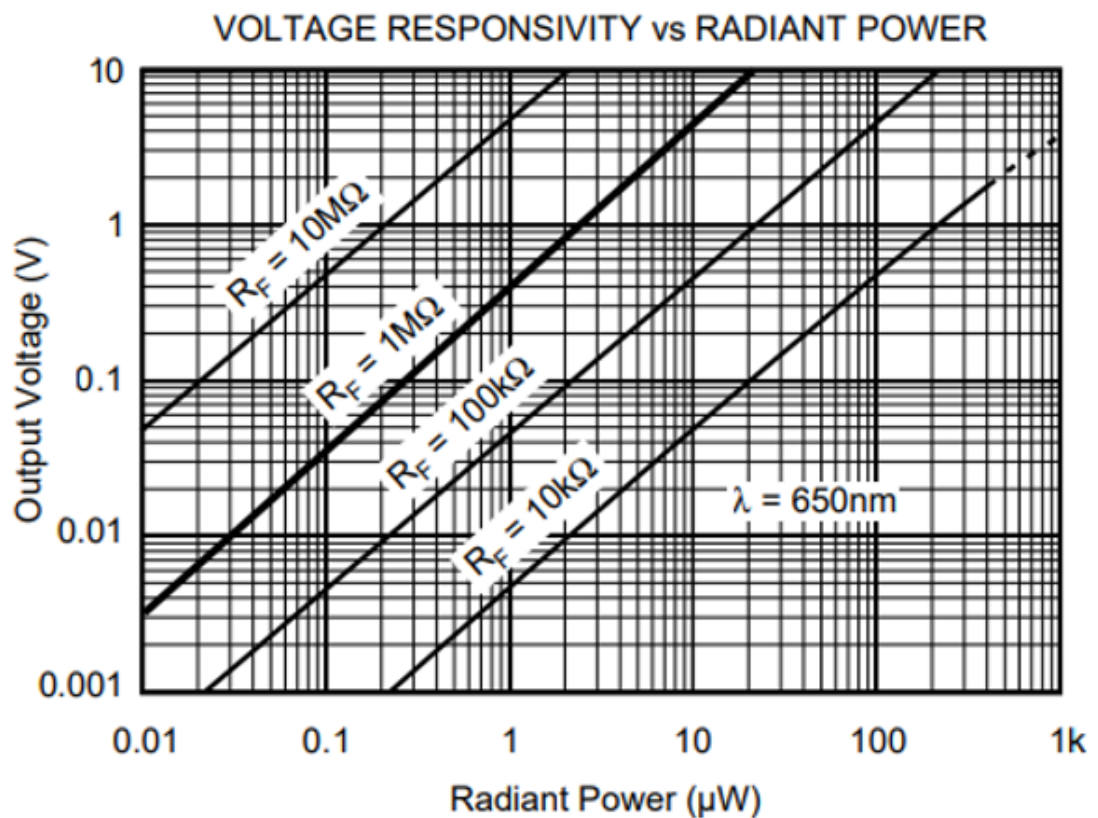


Рисунок 2.8 - Фотоелектрична характеристика OPT301

Температурні характеристики OPT301 показано на рисунку (2.9).

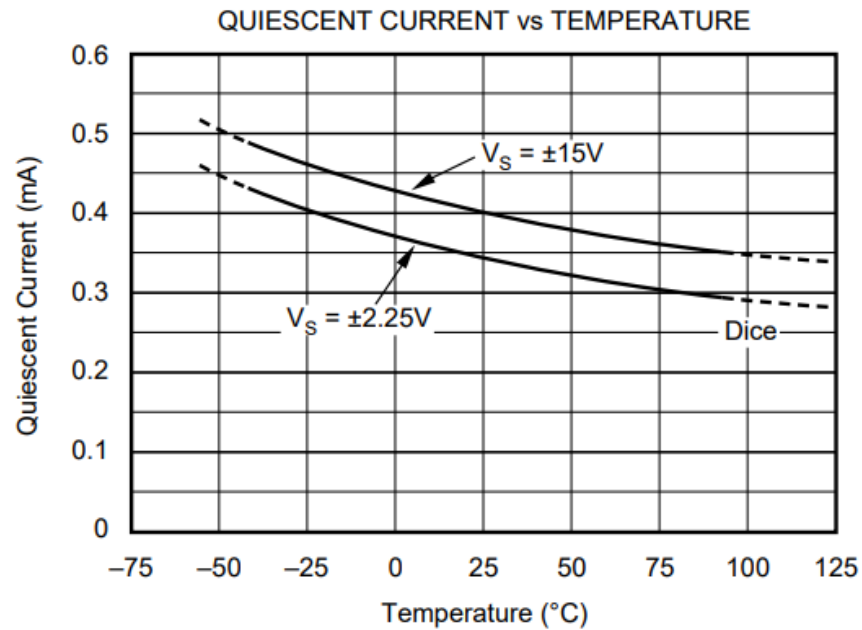


Рисунок 2.9 - Температурна характеристика OPT301

OPT301 може генерувати різні реакції на напругу, використовуючи різні зовнішні резистори. Коли резистор менше 1MQ, зовнішній конденсатор С слід підключати паралельно, щоб усунути піки підсилення і підвищити стабільність. Зазвичай використовується діапазон значень 30-400 pF.

2.5 Вибір оптики: об'єктив для фотоприймача

Щодо оптики, потрібно два елементи – об'єктив для фотоприймача, та коліматорний об'єктив для лазера. Для фотоприймача потрібен об'єктив діаметром до 20 мм. Було обрано Thorlabs ACL12708U-B . Вигляд представлено на рисунку 2.10



Рисунок 2.10 – Зовнішній вигляд ACL12708U-B

Основні характеристики даної моделі:

- Діаметр 12.7мм
- Ефективна довжина 8мм
- Фокусна довжина 3.7мм
- AR-покриття 650 – 1050нм
- Числова апература (NA) 0.78

Вона підходить для інтегрування в OPT301, в першу чергу через свою компактну конструкцію, високу NA та AR – покриття.

Об'єктив повинен бути діаметром приблизно до 10мм. Для максимальної точності було обрано об'єктив 10 мм VIS/NIR fiber-optic collimator. Він дозволяє юстувати фокус і забезпечує низьке розходження. Його схема показана на рисунку 2.11:

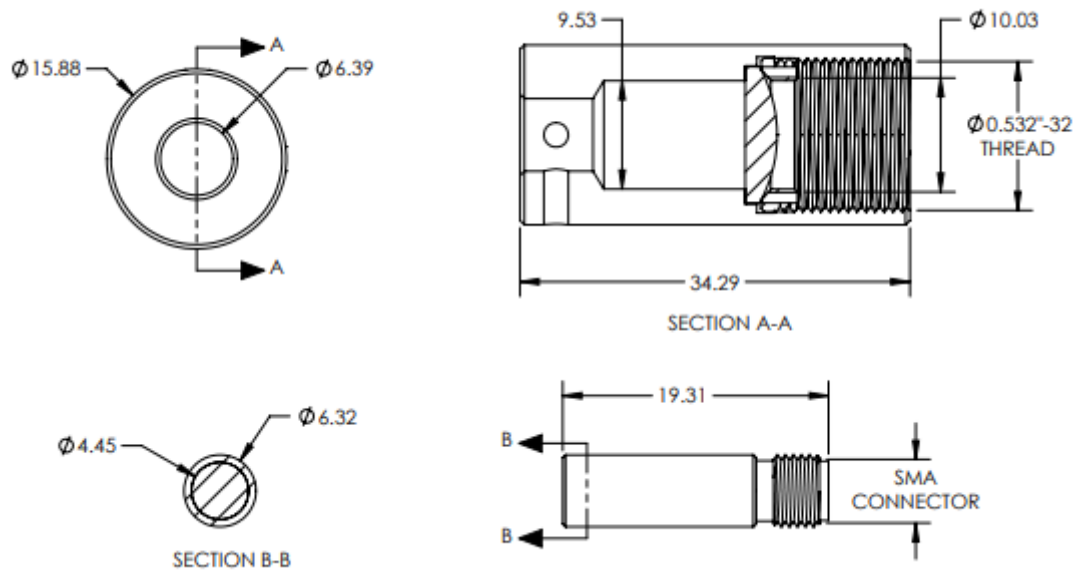


Рисунок 2.11 – Схема VIS/NIR fiber-optic collimator

Його характеристики:

- Діаметр 10 мм
- Діапазон довжин хвиль 350 – 2200 нм
- Фокусна відстань 18 мм

За рахунок широкого спектру покриття коліматор пропускає потрібні 905 нм без значних втрат, а 10 мм апература забезпечує гарну колімірацію з малою розсіяністю.

2.6 Вибір дисплея

З урахуванням специфіки проєкту, для реалізації виводу інформації обрано дисплей на базі контролера SSD1306, який широко застосовується в мікропроцесорних та мікроконтролерних системах.

На рисунку 2.12 вказана блок - схема дисплея SSD1306:

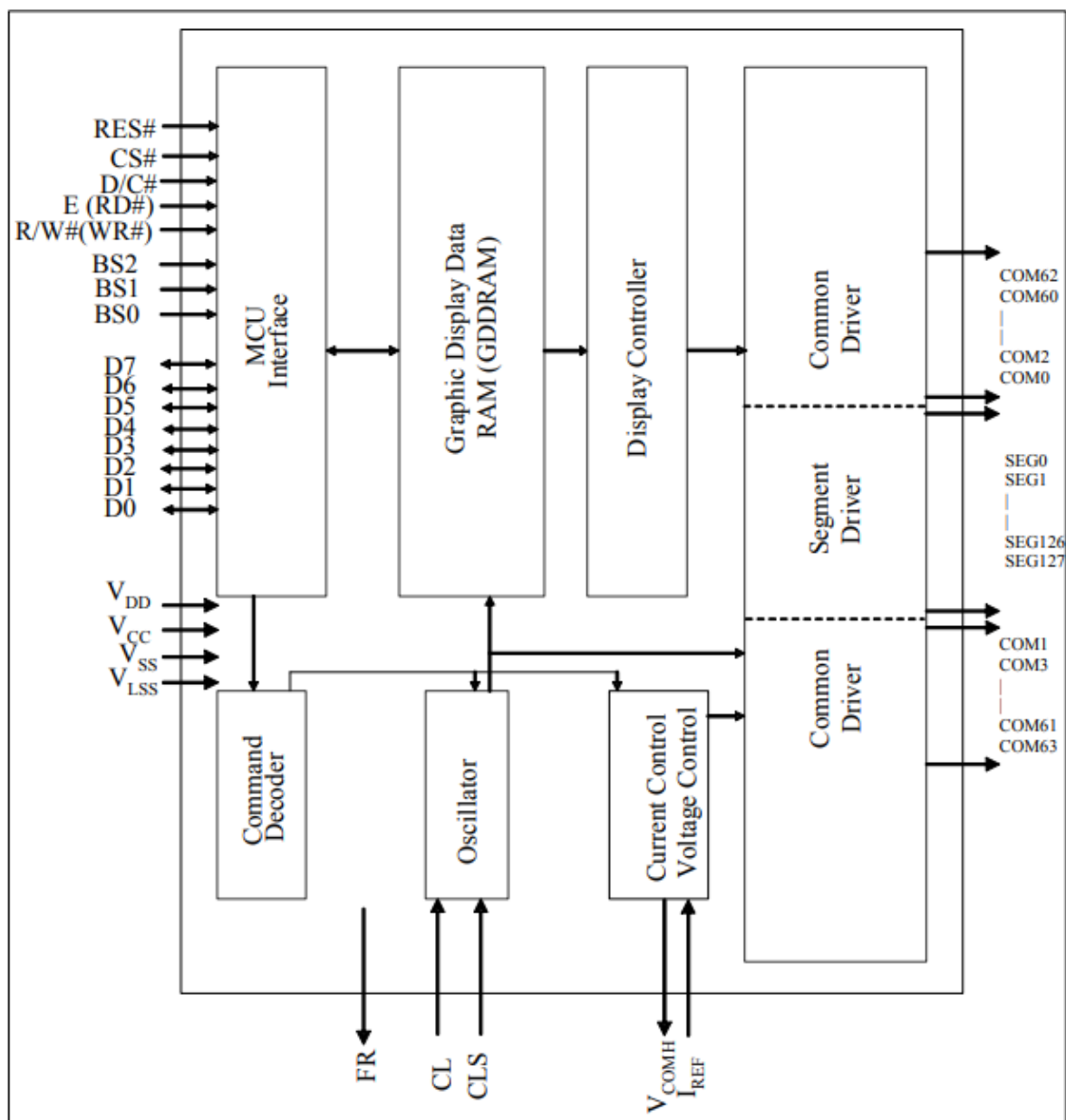


Рисунок 2.12 – Блок - схема дисплея SSD1306

Характеристики дисплея представлені у таблиці 2.5:

Параметр	Значення / Опис
Роздільна здатність дисплея	128 × 64 точок (матриця)
Живлення (логіка)	VDD = 1.65 В – 3.3 В
Живлення (панель OLED)	VCC = 7 В – 15 В
Напруга керування OLED-матрицею	До 15 В
Макс. струм сегмента (джерело)	100 мкА
Макс. струм загального електрода	15 мА
Контрастність	256 рівнів регулювання
Вбудована пам'ять	128 × 64 біт SRAM (буфер зображення)
Інтерфейси MCU	8-бітний паралельний (6800/8080)
Функція збереження екрана	Прокрутка (горизонтальна і вертикальна)
Сигнал синхронізації запису в RAM	Присутній
Програмовані параметри	Частота оновлення та коефіцієнт мультиплексування
Вбудований генератор (осцилятор)	Так
Робочий температурний діапазон	–40 °С до +85 °С

2.7 Висновки до розділу 2

Отже, в другому розділі було обґрунтовано вибір елементної бази імпульсного лазерного далекоміра.

3. РОЗРОБКА СИСТЕМИ ЛАЗЕРНОГО ДАЛЕКОМІРА

3.1 Узагальнена схема

Узагальнена схема лазерного вимірювача відстані представлена на рисунку 3.1.

Узагальнена схема складається з таких елементів:

- Блок імпульсного лазера. Блок містить лазер та електроніку, що керує ним. Головна вимога до роботи цього блоку – можливість сформувати максимально потужний імпульс з максимально крутим переднім фронтом. Чим потужніший імпульс - тим більше відношення сигнал/шум сигналу, що приймається, а чим крутіше фронт - тим вище точність вимірювання відстані.

- Блок фотоприймача. Включає в собі фотоприймач, що приймає відбитий від об'єкта сигнал та необхідну електроніку для його живлення, підсилювач сигналу та компаратор, що виділяє корисний сигнал серед перешкод. Головні вимоги до даного блоку – це забезпечити можливість максимального посилення прийнятого сигналу, не додаючи в нього занадто багато перешкод і не допустити погіршення крутості переднього фронту імпульсу.

- Блок виміру часу. Тут відбувається високоточне вимірювання часу польоту світлового імпульсу. Для вимірювання малих та середніх інтервалів часу були розроблені спеціальні мікросхеми TDC (Time-to-digital converter). Ці мікросхеми можуть використовувати різні методи виміру часу, але найпоширеніший - використання часу затримки.

- Мікроконтролер. Він відповідає за формування лазерних імпульсів у задані моменти часу, зчитує дані з TDC, обчислює відстань до об'єкта, обчислює необхідні корекції, керує деякими аналоговими параметрами схеми, надсилає оброблені та сформовані дані на індикатор для відображення інформації. Також мікроконтролер необхідний для приймання та обробки команд і запитів з клавіатури для подальшої роботи системи.

- Клавіатура. Модуль клавіатури необхідний для вводу даних та здійснювати різні операції з керування далекоміра. Клавіатура лазерного

далекоміра складається з необхідної кількості клавіш, які виконують відведену їм функцію.

- Індикатор. В проектованій системі лазерного вимірювання відстані буде використовуватися рідкокристалічний (РКІ) дисплей. Даний тип дисплеїв має низьке енергоспоживання. Індикатор відображує отримані дані в цифровому форматі, які він одержав від мікроконтролера.

- Годинник реального часу. В представленій схемі годинник реального часу необхідний для контролю обміну даних вимірювання. Даний модуль здатний формувати інформацію про реальну поточну дату та час, що необхідно для організації повної історії вимірювання відстаней.

- Енергонезалежна пам'ять. В узагальненій схемі даний модуль представлений оперативною пам'яттю, що зберігає свій вміст незалежно від наявності основного живлення в даній системі лазерного вимірювання відстані.



Рисунок 3.1 – Узагальнена схема лазерного далекоміра

3.2 Алгоритм роботи далекоміра

Алгоритм роботи лазерного вимірювача відстані представлено на рисунку 3.2.

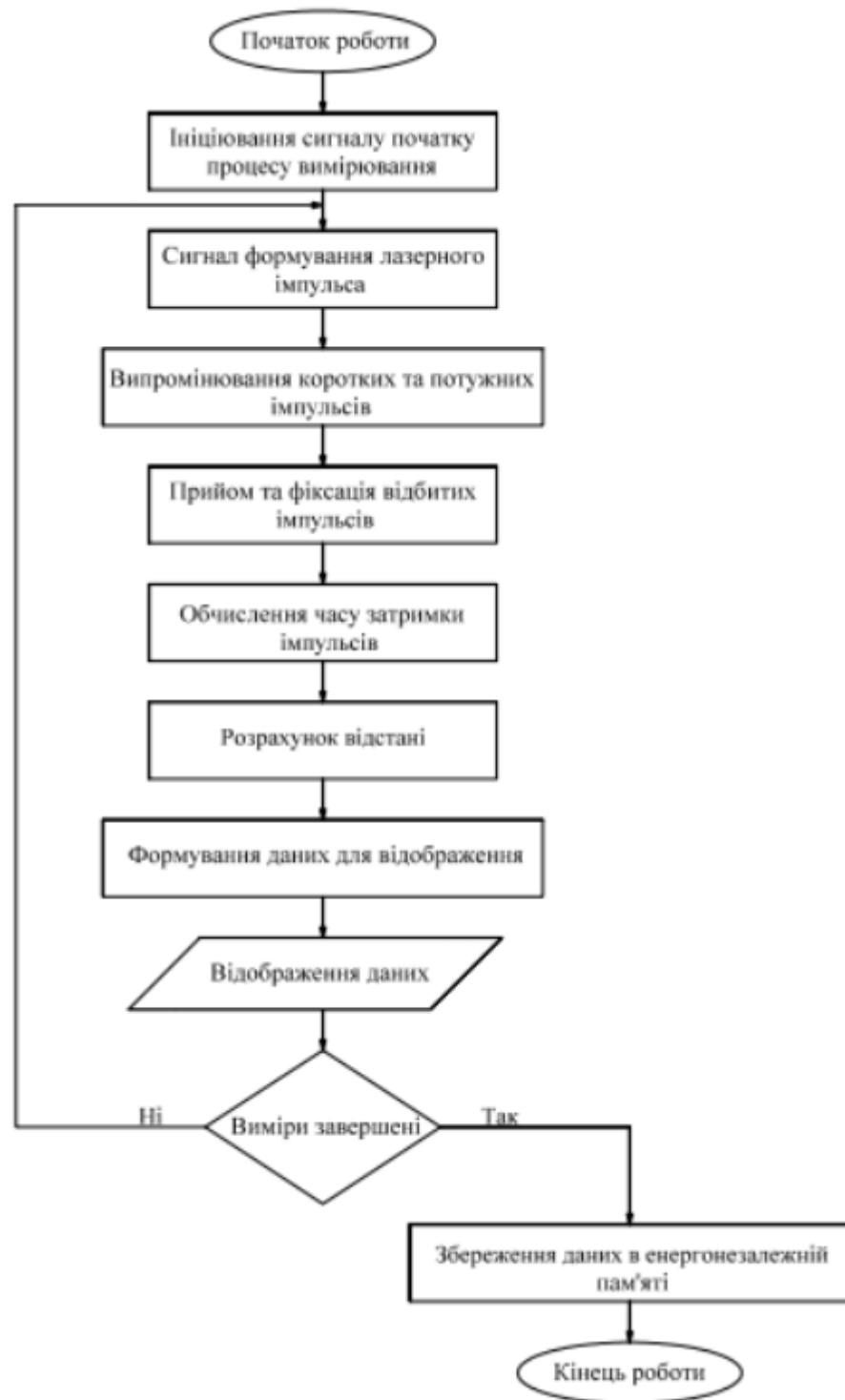


Рисунок 3.2 - Алгоритм роботи далекоміра

Процес вимірювання починається з налаштування системи за допомоги кнопок управління та індикатора. Пучок лазера генерує випромінювач, він відбивається від об'єкта, відстань до якого потрібно визначити, відбитий лазер реєструє спеціальний приймач. Вбудований у прилад точний таймер обчислює час, з урахуванням шумів та затримки, пройдений між відправкою та

отриманням сигналу. Обчислюється відстань до об'єкта, результат виводиться на дисплей. Всі данні вимірювань повинні зберігатися в енергонезалежній пам'яті. Завдяки використанню годинника реального часу з'являються додаткові функції, які можуть бути корисними при реалізації системи лазерного вимірювання відстані.

3.3 Робота системи

Мікроконтролер PR2040 починає роботу системи. Він генерує керуючий імпульс (цифровий сигнал), який передається на драйвер лазерного діоду HV7360, і одночасно з цим запускає таймер вимірювання часу. Далі лазерний діод LD905A10C17 отримує імпульс струму лазерного драйвера, і починає випромінювати лазерний імпульс світла. Це світло проходить через коліматорний об'єктив і формує паралельний промінь з випромінювання лазера. Проходження через коліматорний об'єктив забезпечує кращу дальність і зосередження імпульсу на об'єкті. Світловий імпульс летить до об'єкта, відстань до якого потрібно виміряти, і відбивається від нього назад, попадаючи у об'єктив для фотоприймача. Об'єктив в свою чергу фокусується на відбитому сигналі та направляє його на фотоприймач. Далі фотоприймач перетворює даний йому світловий імпульс у електричний сигнал і передає його назад у мікроконтролер. Задача мікроконтролера - зафіксувати момент генерації імпульсу і момент повернення цього ж імпульсу. Після отримання електричного сигналу від фотоприймача, мікроконтролер зупиняє таймер і починає вираховувати TOF (час, за який світловий імпульс проходить шлях від лазера до об'єкта і назад до приймача). Після вираховування TOF мікроконтролер виконує фінальний етап – обчислення відстані. Обрахована відстань виводиться на дисплей.

Оскільки це проектування лазерного TOF – далекоміра, тому для запуску потрібен одиночний, короткий імпульс на лазерний діод, який має тривалість 50 – 100 нс. Також імпульс повинен генеруватись за командою, а не постійно. І разом з генерацією імпульсу PR2040 повинен запускати вимірювання часу

польоту. Для цього буде використане РІО на мікроконтролері PR2040. Також мікроконтролер повинен приймати сигнал з фотодетектора і обчислити TOF та перетворити його у відстань. Знайденну відстань мікроконтролер повинен передати на дисплей.

Для початку, потрібно щоб через пін підключений до драйвера лазера, пройшов дуже короткий імпульс тривалість 50 – 100 нс. Було використано саме РІО тому що мікроконтроллери типу RP2040 не можуть точно контролювати такі короткі імпульси через `digitalWrite()` або `gpio_put()` – це занадто повільно. Тому РІО це оптимальний варіант. Він генерує точні сигнали з нано-секундною точністю.

Розберемо програму генерації імпульсу (Додаток Б.1). Щоб програмно згенерувати імпульс, потрібно встановити сигнал HIGH на пині (команда `set pins, 1`) – це ввімкне лазер. Далі потрібно зробити затримку ~ 100 нс(пор [3]), і вимкнути лазер (`set pins, 0`). Таким чином отримуємо короткий імпульс. Запуск РІО-програми відбувається напряду з “offset” (`pio_sm_exec(pio, sm, pio_encode_jump(offset))`), але перед цим виконується фіксація часу початку (`t_start = get_absolute_time()`).

Після генерації імпульсу, програма повинна чекати повернення сигналу, тобто активно “слухати” пін фотодетектора. Для випадків якщо сигнал якимось чином загубиться, або буде перевищено максимальну допустиму відстань вимірювання, було поставлено таймаут 50 мс – що свідчить про максимально допустимий час очікування сигналу фотодетектора. При отриманні відбитого імпульсу фотодетектор подає електричний сигнал 0 у разі якщо сигнал не отримав, і 1 якщо отримав. Тому було створено змінну – флаг (`got_signal`) для відстеження отриманого сигналу. Запускається цикл який працює до часу таймауту. Він відстежує – якщо PHOTO-PIN (фотодіодний пін) в режимі 1 (HIGH), це означає що фотодетектор зафіксував відбитий імпульс, і змінна – флаг виставляється в 1 (`true`). Тоді зупиняється таймер і також значення записується у змінну таймера (`t_end`). Лістинг циклу описано у додатку Б. Далі приступаємо до розрахунків, і на цьому етап очікування сигналу закінчено.

Після фіксування відбитого імпульсу потрібно обчислити TOF. TOF обчислюється як різниця часу між двома моментами часу – коли лазерний імпульс був надісланий, і коли відбитий сигнал був отриманий. Фізично формула обчислення виглядає так:

$$t = \frac{2d}{v}$$

У формулі d – відстань до об'єкта, v – швидкість поширення світла (для лазера це 3×10^8), t – час прольоту.

У лазерному далекомірі за розрахунок відповідає програма мікроконтролера. А обчислення відбувається за допомогою вбудованої функції бібліотеки `ricso/time.h` (Додаток В). Тому було створено змінну відповідальну за значення TOF (`tof_us`), і за допомогою функції (`absolute_time_diff_us(t_start, t_end)`) знайдено TOF. Дана функція приймає старт таймера (`t_start`) і кінець таймера (`t_end`).

Тепер є усе для знаходження відстані:

$$d = \frac{vt}{2}$$

Де, $v = 3 \times 10^8$ м/с – швидкість світла, t – обчислений вище TOF. Вираз ділиться на 2 тому що сигнал проходить туди й назад, а відстань це половина цього шляху.

Програмно вираз виглядає так (Додаток В):

```
float distance_m = (3.0e8 × (tof_us × 1e-6)) / 2.0f
```

У виразі, `tof_us × 1e-6` – TOF переведений з мікросекунд у секунди, `3.0e8` – швидкість світла, `2.0f` – ділення на два. Результат записується у змінну `distance_m` і відображається на дисплеї.

Для відображення було взято два параметри – дистанцію і TOF. Після отримання цих ключових параметрів, відбувається ініціалізація дисплея (Додаток В), і саме виведення на дисплей (`ssd1306_show(&disp)`). У разі, якщо сигнал відсутній, на дисплей виводиться актуальне повідомлення "No signal".

Вивід екрану дисплея:

TOF: 7 us

Dist: 1.05 m

Якщо сигнал відсутній:

No signal

Таким чином працює розроблений імпульсний лазерний далекомір.

3.4 Аналіз похибок лазерного далекоміра

Основні джерела похибок представлені у таблиці 3.1:

Джерело похибки	Похибки
Похибка вимірювання часу TOF	± 2 мм
Ширина лазерного імпульсу	± 0.5 мм
Атмосферні умови	± 0.3 мм
Шуми та завади	± 0.5 мм
Температурна нестабільність	До ± 0.3 мм при зміні >20 °C

Загальна похибка тоді буде така:

$$\Delta R \approx \sqrt{2^2 + 0.5^2 + 0.3^2 + 0.5^2 + 0.3^2} = \sqrt{4.68} \approx 2.16 \text{ мм}$$

Загальна похибка становить ≈ 2.16 мм, що практично досягає цільових ± 2 мм.

3.5 Висновки до розділу 3

В цьому розділі було розроблено принципову схему системи. Розроблено алгоритми управління параметрами діодного лазера та стабілізації його характеристик. Також було реалізоване програмне забезпечення для мікропроцесорного управління схем лазерного вимірювача відстані, та проведено аналіз похибок.

ВИСНОВКИ

Бакалаврська кваліфікаційна робота присвячена комплексному дослідженню лазерних далекомірів. Головною метою було не лише поглиблене вивчення, а й розробка рішень для підвищення точності лазерних далекомірів, що є критично важливим завданням.

На початку дослідження було надано аналітичний огляд існуючих методів вимірювання відстані, таких як імпульсний, фазовий, прямий та непрямий частотні методи. Також було проведено порівняння їх переваг, недоліків та областей застосування. Зокрема, було проаналізовано технічні характеристики існуючих лазерних далекомірів та окремих ключових компонентів.

Значну частину роботи було присвячено вибору елементної бази для розробки далекоміра. Було обрано лазерний діод, драйвер для його керування, мікроконтролер як центральний елемент керування та обчислення, фотоприймач, а також відповідну оптику, за допомогою якої вдалося сформувати більш вузький і стабільніший промінь. Вибір компонентів здійснювався з урахуванням критеріїв сумісності, компактності та ефективності для реалізації прототипу.

У роботі виконано поставлені завдання:

1. Проведено аналіз сучасного стану та перспектив розвитку лазерних методів і засобів вимірювання відстані.
2. Розроблено структурну та функціональну схеми цифрового засобу лазерного вимірювача відстані.
3. Обґрунтовано вибір елементної бази та розроблено принципову схему системи.
4. Розроблено алгоритми управління параметрами діодного лазера та стабілізації його характеристик.
5. Реалізоване програмне забезпечення для мікропроцесорного управління схем лазерного вимірювача відстані.

Також було розроблено узагальнену схему системи, реалізовано базові програмні модулі для роботи мікроконтролера, серед яких було використання РІО для більш точного формування лазерного імпульсу та фіксації моменту його приходу. Це дало змогу уникнути затримок, та значно покращити роздільну здатність часу прольоту.

Таким чином було досягнуто поставленої мети – підвищення точності імпульсного лазерного далекоміра.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Пупань Л. І. Лазерні технології у машинобудуванні. Навчальний посібник для студентів спеціальності «Прикладна механіка» денної, заочної та дистанційної форм навчання. Харків: НТУ «ХПІ», 2020. 109с.
2. Шуаїбов О.К., Опачко І.І., Качер І.Е., Чучман М.П. Лазерні джерела випромінювання та їх застосування в мікроелектроніці. Навчальний посібник. Ужгород. Ужгородський національний університет, фізичний та інженерно-фізичний факультети. 2009. 238 с.
3. Загоруйко, Є. Л. Використання лазерних технологій : ВНТУ, 2016.
4. В.П. Гаращук. Основи фізики лазерів : навчальний посібник. Київ, 2012. 342 с
5. Осінський, В. І.; Павлов, С. В.; Тужанський, С. Є. : Аналіз та перспективи застосування лазерних та світлодіодних джерел світла: ВНТУ, 2016.
6. Тужанський, С. Є.; Маліновський, В. І.; Паланюк : Технології лазерної розгортки для систем відтворення візуальної інформації : ВНТУ, 2012.
7. L. A. Coldren, S. W. Corzine and M. L. Mashanovitch, Diode lasers and photonic integrated circuits. Vol. 218. John Wiley & Sons, 2012.
9. Sony Corporation. SLD1133VL Laser Diode Datasheet. 2010.
10. John Morcom. Optical distance measurement : US pat. No 6753950, June 22, 2004.
11. Пономарьов, Р.В. Павлович. Х. Лазерні та оптико-електронні вимірювальні засоби: ХВУ, 1998. 174 с.
13. S. Fang, Y. Zheng, L. Li, X. Wang, X. Meng and J. Zhao, "A novel time extension method of the pulse laser ranging syste," (2015).
14. Довідник з аналогових пристроїв. Застосування синтезаторів частоти в високоточних вимірювальних системах. 2001.
15. Григорук В.І., Коротков П.А. Лазерна спектроскопія. К.: ВПЦ «Київський університет», 2017. 263 с.
16. Лазерні далекоміри: як вибрати і правильно використовувати URL:

<https://opticstore.com.ua/ua/news/read/lazernye-dalnomery-kak-vybrat-i-pravilno-ispolzovat#:~:text=Фазові%20далекоміри%20мають%20дещо%20відмінний,від%20бувається%20так%20званий%20зсув%20фази.>

17. Лазерні далекоміри URL:

https://uk.wikipedia.org/wiki/Лазерний_далекомір#:~:text=Лазерний%20далекомір%20або%20лазерний%20віддалемір,в%20астрономічних%20дослідження%20С%20в%20фотографія.

18. Принцип фаз URL:

[https://uk.wikipedia.org/wiki/Фаза_\(коливання\)](https://uk.wikipedia.org/wiki/Фаза_(коливання))

20. Лазерні діоди URL:

https://uk.wikipedia.org/wiki/Лазерний_діод#:~:text=Лазерний%20діод%20—%20лазер%20С%20в%20якому,перед%20одноцентовою%20монеткою%20для%20порівняння

21. Характеристики Bosch GLM 50 C Professional URL:

<https://www.bosch-professional.com/ua/uk/products/glm-50-c-0601072C00>

22. Характеристики Leica Disto D2 URL:

<https://leica-geosystems.com.ua/product/disto-d2/>

23. Характеристики Stanley TLM165 URL:

<https://cee.stanleytools.global/product/stht1-77139/stanley-50m-tlm-165s-laser-distance-measurer>

24. Характеристики Hilti PD-I URL:

https://www.hilti.com/c/CLS_MEA_TOOL_INSERT_7127/CLS_LASER_METER_S_7127/r9121031

25. Характеристики Mileseey X5 URL:

https://vireous.shop/en-je/products/mileseey®-x5-laser-distance-meter?srsltid=AfmBOoqnPezO2NPTrmJtm3Lg-M5fwUePGw5Pj215uvST-5L70pc8_3qU

ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИНазва роботи: Лазерний вимірювач відстаніТип роботи: Бакалаврська кваліфікаційна роботаПідрозділ Кафедра БМІОЕС, ФІЕС, гр. КОІС-216

Коефіцієнт подібності текстових запозичень, виявлених у роботі системою StrikePlagiarism 17%

Висновок щодо перевірки кваліфікаційної роботи (відмітити потрібне)

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

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

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

Експертна комісія:

Коваль Л.Г., зав. кафедри БМІОЕС

(прізвище, ініціали, посада)

Заболотна Н.І., проф. каф. БМІОЕС

(прізвище, ініціали, посада)

(підпис)

(підпис)

Особа, відповідальна за перевірку

(підпис)

Тужанський С.Є.

(прізвище, ініціали)

З висновком експертної комісії ознайомлений(-на)

Керівник

(підпис)

Тужанський С.Є., доцент каф. БМІОЕС

(прізвище, ініціали, посада)

Здобувач

(підпис)

Саранча А.В.

(прізвище, ініці)

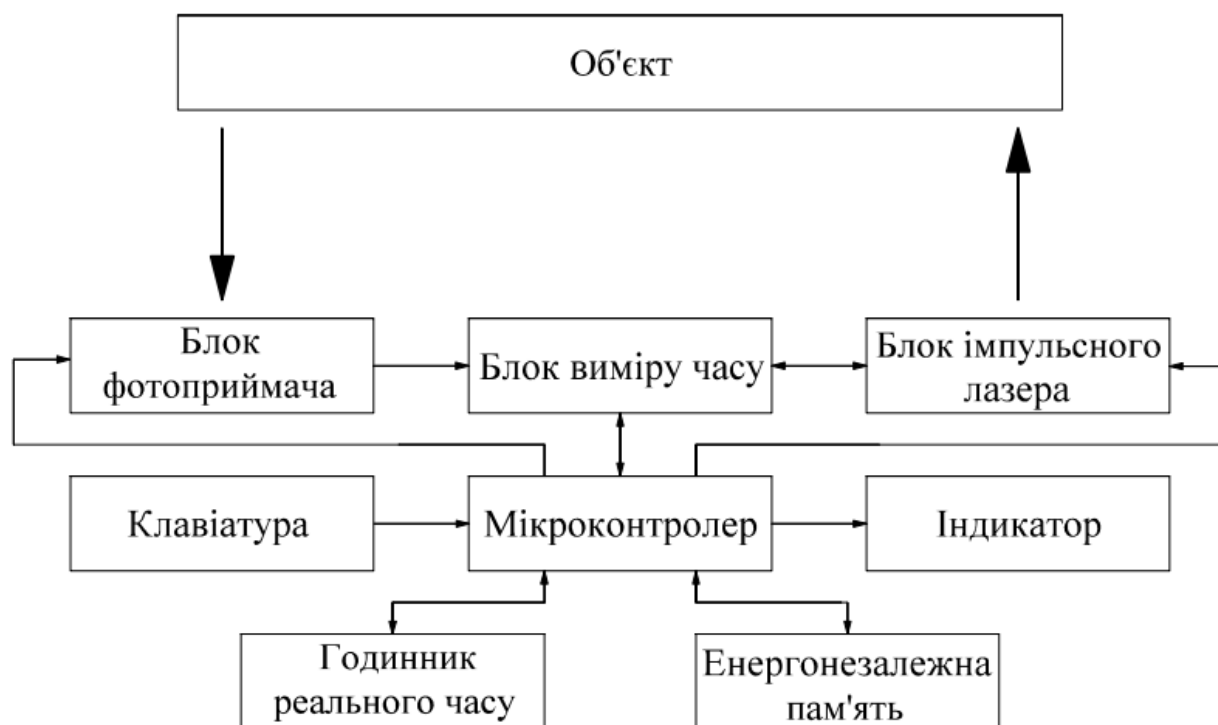
Додаток Б (обов'язковий)

ГРАФІЧНА ЧАСТИНА

Додаток Б.1

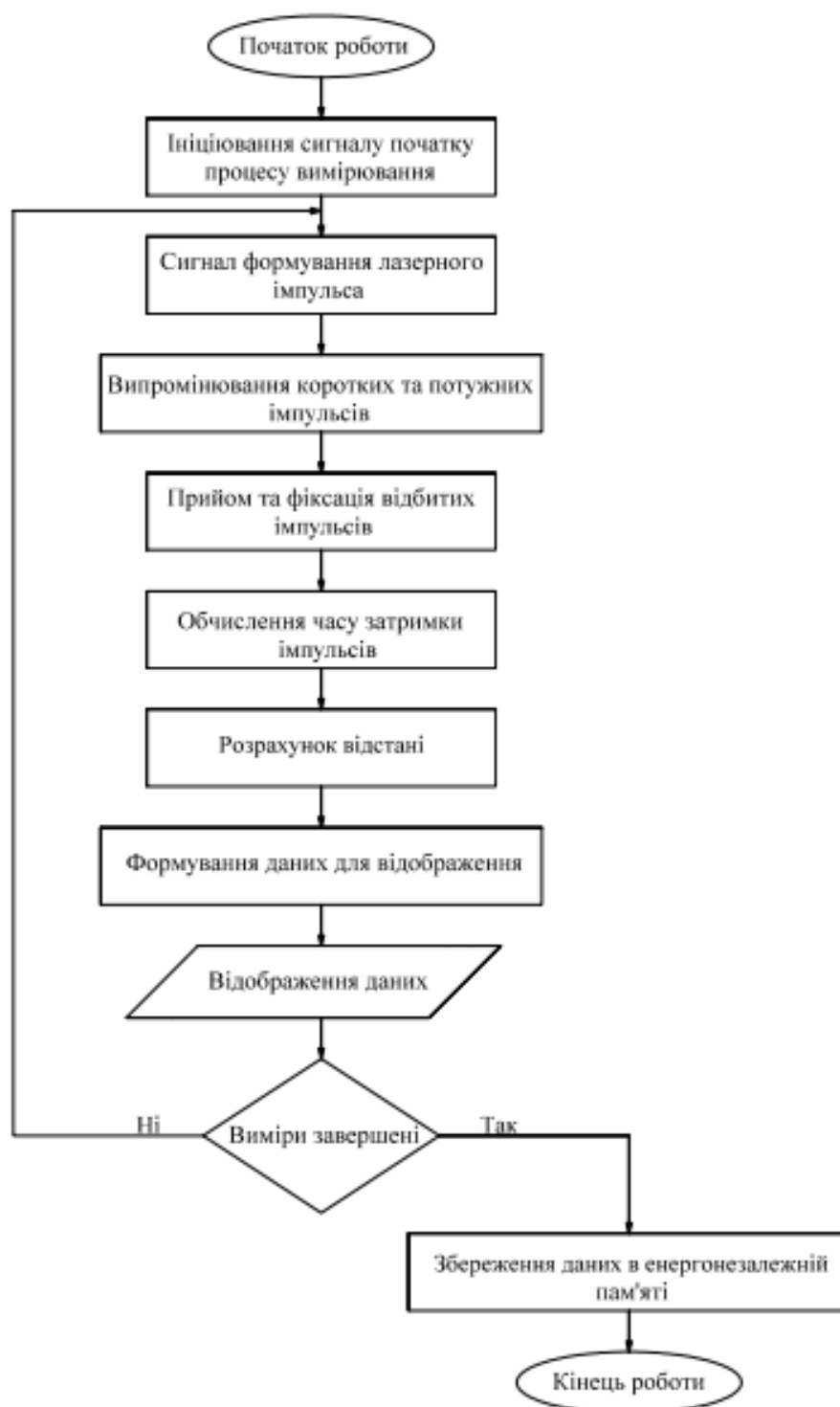
(обов'язковий)

Узагальнена схема лазерного далекоміра



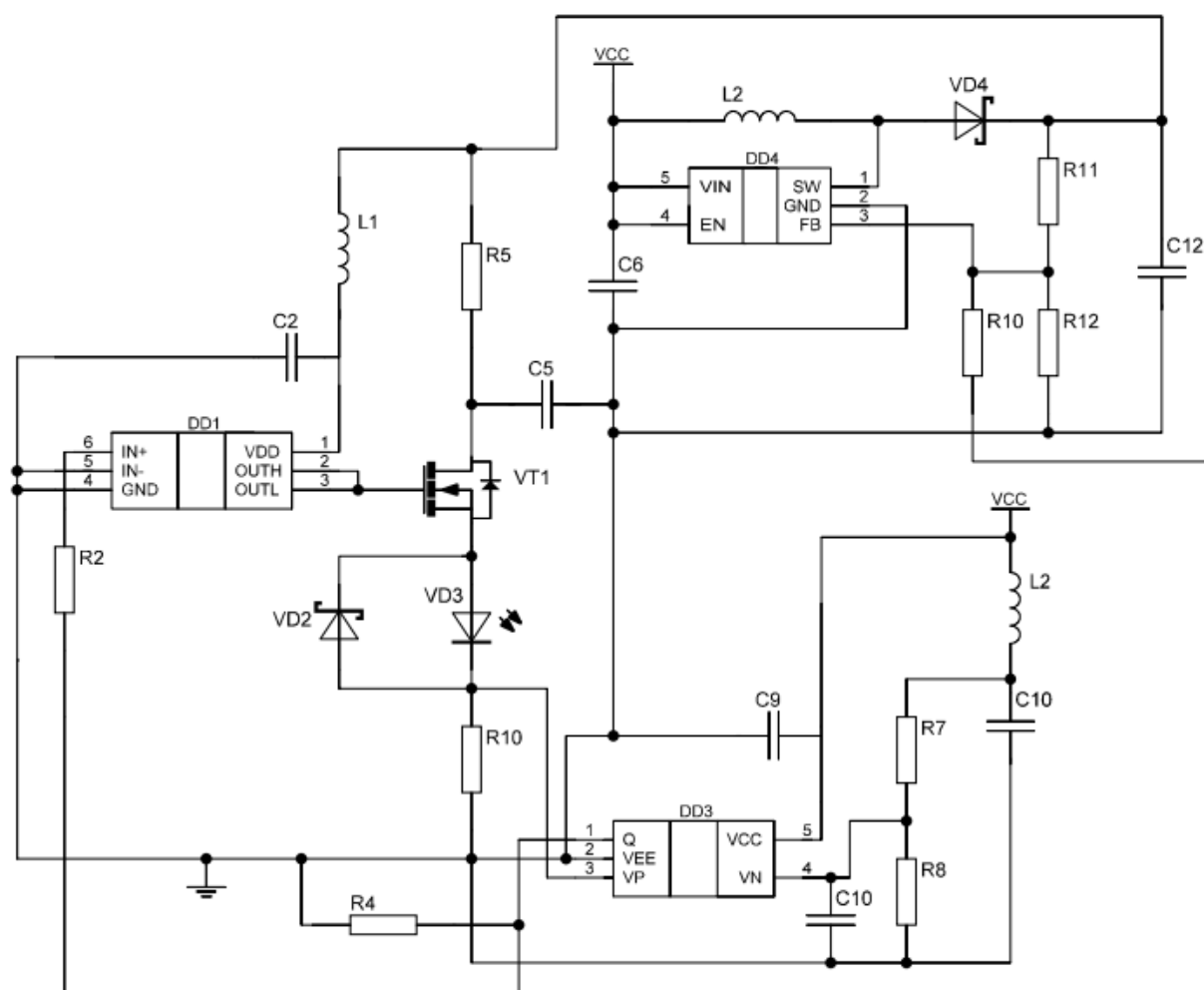
Додаток Б.1

Алгоритм роботи далекоміра



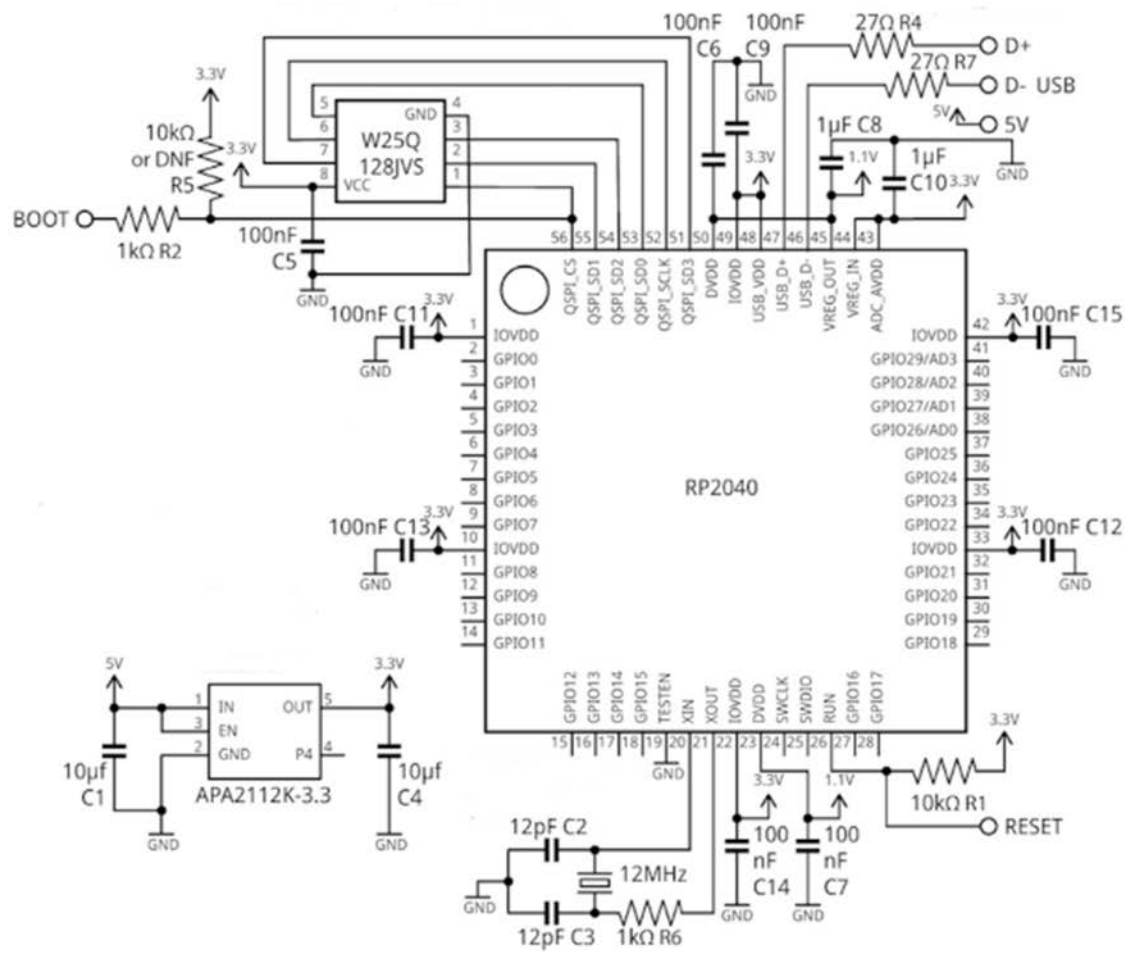
Додаток Б.2

Схема керування лазером



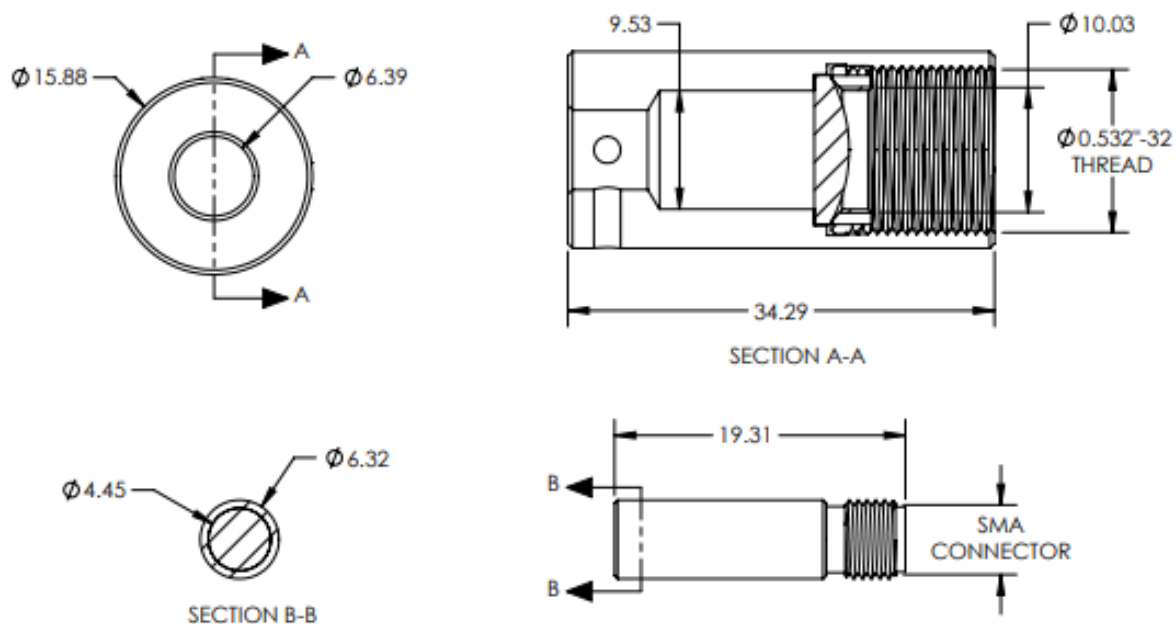
Додаток Б.3

Схема блоку керування



Додаток Б.4

Схема конструкції оптичного коліматора



Додаток В

Лістинг програми мікроконтролера PR2040

Ініціалізація PIO:

```
PIO pio = pio0;
```

```
uint offset = pio_add_program(pio, &laser_pulse_program);
```

```
uint sm = pio_claim_unused_sm(pio, true);
```

Налаштування state machine:

```
pio_sm_config c = laser_pulse_program_get_default_config(offset);
```

```
sm_config_set_set_pins(&c, LASER_PIN, 1);
```

```
pio_sm_set_consecutive_pindirs(pio, sm, LASER_PIN, 1, true);
```

```
pio_sm_init(pio, sm, offset, &c);
```

```
pio_sm_set_enabled(pio, sm, true);
```

Генерація 100нс імпульсу:

```
.program laser_pulse
```

```
.wrap_target
```

```
    set pins, 1;
```

```
    nop [3];
```

```
    set pins, 0;
```

```
.wrap
```

Запуск PIO-програми:

```
pio_sm_exec(pio, sm, pio_encode_jmp(offset));
```

Цикл очікування сигналу від фотодетектора:

```
int timeout_us = 50000;
```

```
bool got_signal = false;
```

```
for (int i = 0; i < timeout_us; i++) {
```

```
    if (gpio_get(PHOTO_PIN)) {
```

```

    t_end = get_absolute_time();
    got_signal = true;
    break;
}
sleep_us(1);
}

```

Ініціалізація дисплея:

```

i2c_init(i2c0, 400 * 1000);

gpio_set_function(I2C_SDA_PIN, GPIO_FUNC_I2C);
gpio_set_function(I2C_SCL_PIN, GPIO_FUNC_I2C);
gpio_pull_up(I2C_SDA_PIN);
gpio_pull_up(I2C_SCL_PIN);

```

```

disp.external_vcc = false;
ssd1306_init(&disp, 128, 64, 0x3C, i2c0);

```

Обчислення TOF, відстані та виведення результату на дисплей:

```

if (got_signal) {
    int64_t tof_us = absolute_time_diff_us(t_start, t_end);
    float distance_m = (3.0e8 * (tof_us * 1e-6)) / 2.0f;

    snprintf(buf, sizeof(buf), "TOF: %lld us", tof_us);
    ssd1306_draw_string(&disp, 0, 0, buf, 1, true);

    snprintf(buf, sizeof(buf), "Dist: %.2f m", distance_m);
    ssd1306_draw_string(&disp, 0, 16, buf, 1, true);
}

```

```

ssd1306_show(&disp);
sleep_ms(300);

```