

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Навчально-науковий інститут лазерної та біомедичної інженерії
(повна назва)

Кафедра Фізичних основ електронної техніки
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА Пояснювальна записка

рівень вищої освіти перший (бакалаврський)
РОЗРОБКА МОДУЛЯ ОПТИЧНОГО РОЗПІЗНАВАННЯ ДИСТАНЦІЇ
ДО ПРЕДМЕТА ДЛЯ АДАПТИВНОГО КЕРУВАННЯ
ЗАХОПЛЕННЯМ БІОНІЧНОГО ПРОТЕЗА
(тема)

Виконав:

здобувач 3 року навчання (скороч. терм. навч.)
групи МТІОЛСу-23-1

Дмитро КУКАРЄВ

(Власне ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Спеціальність 175 Інформаційно-вимірювальні
технології

(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна

Освітня програма «Інженерія
оптоінформаційних та лазерних систем»

(повна назва освітньої програми)

Керівник доц. каф. ФОЕТ Олена ЛІННИК

(посада, Власне ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Допускається до захисту

Завідувач кафедри ФОЕТ

(підпис)

Олександр ГНАТЕНКО

(Власне ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

2026 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Навчально-науковий інститут лазерної та біомедичної інженерії

Кафедра Фізичних основ електронної техніки

Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)

Спеціальність 152 Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка
(код і повна назва)

Тип програми освітньо-професійна

Освітня програма «Інженерія оптоінформаційних та лазерних систем»
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри (підпис)

« » 2026 р.

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

здобувачеві Кукарєву Дмитру Євгеновичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розробка модуля оптичного розпізнавання дистанції до предмета для адаптивного керування захопленням біонічного протеза

затверджена наказом університету від « 25 » травня 2026 р. № 419 Ст

2. Термін подання здобувачем роботи до екзаменаційної комісії 24 червня 2026 р.

3. Вихідні дані до роботи лазерні інформаційно-вимірювальні системи визначення дистанції; технологія Time-of-Flight та принципи її застосування; VCSEL-лазери та сучасні оптичні сенсори; біонічні протези верхніх кінцівок та системи адаптивного керування; методи оцінювання точності вимірювання дистанції; мікроконтролерні системи обробки вимірювальної інформації.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі

1 Дослідити сучасні біонічні протези та методи адаптивного керування захопленням.

2 Дослідити лазерні методи вимірювання дистанції до об'єкта.

3 Проаналізувати принцип роботи технології Time-of-Flight.

4 Розробити структуру модуля оптичного розпізнавання дистанції.

5 Розробити алгоритм функціонування системи та програмне забезпечення.

6 Провести дослідження метрологічних характеристик системи

Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів,
комп'ютерних ілюстрацій _____
Демонстраційний матеріал – 12 слайдів. _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Інформаційно-тематичний пошук та огляд літературних джерел конструкції біонічних протезів	09.02.26-14.03.26	Виконано
2	Дослідження конструкцій біонічних протезів	22.03.26-16.04.26	Виконано
3	Дослідження технології Time-of-Flight та VCSEL-лазерів	27.04.26-11.05.26	Виконано
4	Розроблення структури модуля оптичного розпізнавання дистанції	12.05.26-22.05.26	Виконано
5	Оформлення пояснювальної записки	25.05.26-07.06.26	Виконано
6	Оформлення демонстраційних матеріалів	09.06.26-12.06.26	Виконано
7	Проходження нормоконтролю та перевірки тексту на унікальність	13.06.26-19.06.26	Виконано
8	Отримання відгуку та рецензії	21.06.26-22.06.26	Виконано
9	Підготовка та захист кваліфікаційної роботи	23.06.26-25.06.26	Виконано

Дата видачі завдання 09 лютого 2026 р.

Здобувач _____
(підпис)

Керівник роботи _____ доц. каф. ФОЕТ Олена ЛІННИК _____
(підпис) (посада, Власне ім'я)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка кваліфікаційної роботи: 54 с., 14 рис., 2 табл., 2 додатки, 23 джерела.

АДАПТИВНЕ КЕРУВАННЯ, БІОНІЧНИЙ ПРОТЕЗ, ІНФОРМАЦІЙНО-ВІМІРЮВАЛЬНА СИСТЕМА, ЛАЗЕРНИЙ ДАЛЕКОМІР, МІКРОКОНТРОЛЕР, ОПТИЧНЕ РОЗПІЗНАВАННЯ ДИСТАНЦІЇ, ІМЕ-OF-FLIGHT, VCSEL.

Об'єкт дослідження – процес вимірювання дистанції до предмета для адаптивного керування захопленням біонічного протеза.

Метою кваліфікаційної роботи є розробка модуля оптичного розпізнавання дистанції до предмета для адаптивного керування захопленням біонічного протеза.

Метод дослідження – теоретичний та експериментальний аналіз лазерної інформаційно-вимірювальної системи.

Для досягнення мети в роботі поставлено та вирішено наступні завдання.

1. Дослідити сучасні біонічні протези та методи адаптивного керування захопленням.
2. Дослідити лазерні методи вимірювання дистанції та технологію Time-of-Flight.
3. Розробити структуру модуля оптичного розпізнавання дистанції.
4. Проаналізувати метрологічні характеристики розробленої системи.

ABSTRACT

Explanatory note of the qualification work: 54 pp., 14 figures, 2 tables, 2 appendices, 23 sources.

ADAPTIVE CONTROL, BIONIC PROSTHESIS, INFORMATION AND MEASUREMENT SYSTEM, LASER RANGEFINDER, MICROCONTROLLER, OPTICAL DISTANCE RECOGNITION, TIME-OF-FLIGHT, VCSEL.

The object of research is the process of distance measurement for adaptive grasp control of a bionic prosthesis.

The purpose of the qualification work is to develop an optical distance recognition module for adaptive grasp control of a bionic prosthesis.

The research method includes theoretical and experimental analysis of a laser information and measurement system.

To achieve this goal, the following tasks were set and solved.

1. Investigate modern bionic prostheses and adaptive grasp control methods.
2. Investigate laser distance measurement methods and Time-of-Flight technology.
3. Develop the structure of the optical distance recognition module.
4. Analyze the metrological characteristics of the developed system.

ЗМІСТ

Вступ.....	7
1 Фізичні основи лазерного вимірювання дистанції.....	9
1.1 Вимірювання дистанції в інформаційно-вимірювальних системах	9
1.2 Лазерні методи визначення відстані до об'єктів	11
1.3 Технологія Time-of-Flight	14
1.4 Оптичні сенсори та VCSEL-випромінювачі	21
1.5 Конструкція та принцип роботи VCSEL-випромінювачів.....	23
1.6 SPAD-фотоприймачі в системах Time-of-Flight	24
1.7 Формування карти глибин у ToF-системах	26
1.8 Висновки до розділу 1	28
2 Розроблення модуля оптичного розпізнавання дистанції до предмета	30
2.1 Аналіз сучасних систем вимірювання дистанції	30
2.2 Розроблення структурної схеми модуля	32
2.3 Алгоритм роботи та програмна реалізація.....	38
2.4 Дослідження характеристик розробленого модуля	44
2.5 Висновки до розділу 2.....	49
Висновки.....	51
Перелік джерел посилання	53
Додаток А Фрагменти програмного коду	55
Додаток Б Демонстраційний матеріал	58

ВСТУП

Сучасний розвиток біомедичної техніки характеризується активним впровадженням інтелектуальних систем керування біонічними протезами. Одним із перспективних напрямів удосконалення таких систем є застосування засобів автоматичного визначення просторового положення об'єктів та оцінювання відстані до них у реальному часі. Отримання достовірної інформації про дистанцію до предмета дозволяє реалізувати адаптивне керування захопленням, підвищити точність роботи протеза та покращити взаємодію користувача з навколишнім середовищем.

Серед сучасних методів вимірювання відстані особливе місце займають лазерні інформаційно-вимірювальні системи. Їх перевагами є висока точність, швидкодія, компактність та можливість безконтактного вимірювання. Значного поширення набули системи, побудовані на основі технології Time-of-Flight (ToF), принцип роботи яких полягає у визначенні часу проходження оптичного сигналу від випромінювача до об'єкта та назад до приймача. Використання ToF-сенсорів у поєднанні з VCSEL-лазерами дозволяє створювати компактні модулі вимірювання дистанції з високими метрологічними характеристиками.

Для систем біонічного протезування задача автоматичного визначення відстані до об'єкта є особливо актуальною. Наявність інформації про положення предмета дає можливість змінювати параметри руху захоплювача до моменту контакту, що сприяє підвищенню надійності захоплення та зменшенню ризику пошкодження предметів. Тому розроблення спеціалізованого модуля оптичного розпізнавання дистанції є актуальною науково-технічною задачею.

Об'єктом дослідження є процес вимірювання дистанції до предмета для адаптивного керування захопленням біонічного протеза.

Предметом дослідження є лазерний модуль оптичного розпізнавання дистанції на основі технології Time-of-Flight.

Метою кваліфікаційної роботи є розроблення модуля оптичного розпізнавання дистанції до предмета для адаптивного керування захопленням біонічного протеза.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- дослідити сучасні біонічні протези та методи адаптивного керування захопленням;
- проаналізувати існуючі методи вимірювання відстані до об'єктів;
- дослідити принцип роботи лазерних інформаційно-вимірювальних систем та технології Time-of-Flight;
- розробити структуру модуля оптичного розпізнавання дистанції;
- розробити алгоритм функціонування системи та програмне забезпечення;
- провести дослідження метрологічних характеристик розробленого модуля;
- оцінити ефективність використання модуля в системі адаптивного керування захопленням біонічного протеза.

Методи дослідження базуються на використанні теоретичного аналізу принципів лазерного вимірювання дистанції, методів математичного моделювання та експериментального дослідження характеристик оптичних вимірювальних систем.

Практичне значення роботи полягає у можливості використання розробленого модуля в складі сучасних біонічних протезів для підвищення точності та ефективності керування захопленням предметів.

1 ФІЗИЧНІ ОСНОВИ ЛАЗЕРНОГО ВИМІРЮВАННЯ ДИСТАНЦІЇ

1.1 Вимірювання дистанції в інформаційно-вимірювальних системах

Вимірювання відстані до об'єктів є однією з основних задач сучасних інформаційно-вимірювальних систем. Отримання інформації про просторове положення об'єкта необхідне для функціонування автоматизованих систем керування, робототехнічних комплексів, навігаційного обладнання та медичних пристроїв [1–4].

Інформаційно-вимірювальна система являє собою сукупність технічних засобів, призначених для отримання, обробки та передачі вимірювальної інформації. Основною метою таких систем є формування достовірних даних про параметри досліджуваного об'єкта або навколишнього середовища. До складу інформаційно-вимірювальної системи входять первинні вимірювальні перетворювачі, пристрої обробки сигналів, обчислювальні модулі та засоби відображення результатів вимірювання [2].

У сучасній техніці вимірювання дистанції використовується для вирішення широкого кола практичних задач. До них належать визначення положення об'єктів, побудова просторових моделей навколишнього середовища, керування робототехнічними комплексами та контроль технологічних процесів. Особливого значення вимірювання відстані набуває в системах біомедичного призначення, де від точності отриманої інформації залежить ефективність функціонування обладнання [5–8].

Існуючі методи вимірювання дистанції можна умовно поділити на контактні та безконтактні. Контактні методи передбачають безпосередню взаємодію вимірювального елемента з об'єктом контролю. Такі методи забезпечують достатньо високу точність, проте мають обмежену сферу застосування. У більшості сучасних автоматизованих систем використовуються безконтактні методи, які дозволяють виконувати вимірювання без впливу на об'єкт дослідження [1].

До найбільш поширених безконтактних методів належать ультразвукові, радіолокаційні, інфрачервоні та оптичні методи. Кожен із зазначених методів має свої переваги та недоліки. Ультразвукові системи характеризуються простотою реалізації, однак їх точність залежить від температури та інших параметрів навколишнього середовища. Радіолокаційні методи дозволяють вимірювати значні відстані, але потребують складного обладнання. Інфрачервоні системи мають невеликі габарити, проте чутливі до зовнішнього освітлення та властивостей поверхні об'єкта [9, 10].

Класифікацію основних лазерних методів вимірювання відстані наведено на рисунку 1.1.



Рисунок 1.1 – Класифікація лазерних методів вимірювання дистанції

Перспективним напрямом розвитку інформаційно-вимірювальних систем є використання оптичних методів визначення відстані. Завдяки високій точності, швидкодії та можливості мініатюризації такі системи набули широкого поширення в промисловості, робототехніці та біомедичній техніці [5–8]. Особливий інтерес становить використання оптичних методів у складі біонічних протезів, де інформація про відстань до об'єкта може використовуватися для адаптивного керування процесом захоплення.

Таким чином, вимірювання дистанції є важливою задачею сучасних інформаційно-вимірювальних систем, а розвиток оптичних методів відкриває нові можливості для створення високоточних та компактних вимірювальних пристроїв.

1.2 Лазерні методи визначення відстані до об'єктів

Серед сучасних методів безконтактного вимірювання дистанції особливе місце займають лазерні методи. Їх широке використання обумовлено високою точністю вимірювань, швидкістю та можливістю роботи в автоматизованих інформаційно-вимірювальних системах [9–13].

Основою лазерних методів є використання спрямованого оптичного випромінювання. На відміну від традиційних джерел світла, лазерне випромінювання характеризується високою когерентністю, малою розбіжністю променя та значною концентрацією енергії. Завдяки цьому забезпечується можливість точного визначення положення об'єктів і вимірювання відстані до них [11–12].

На сьогоднішній день існує декілька основних методів лазерного вимірювання дистанції. Найбільшого поширення набули триангуляційний метод, фазовий метод та метод вимірювання часу проходження сигналу. Кожен із них має свої особливості, переваги та обмеження [13].

Триангуляційний метод базується на геометричних співвідношеннях між джерелом випромінювання, об'єктом та фотоприймачем. Після відбиття

лазерного променя від поверхні об'єкта положення світлової плями реєструється фоточутливим елементом. На основі отриманих даних визначається відстань до об'єкта. Даний метод забезпечує високу точність вимірювання на невеликих відстанях і широко використовується в промислових датчиках переміщення та позиціонування [11–13].

Фазовий метод ґрунтується на вимірюванні фазового зсуву між випроміненим та прийнятим сигналами. При поширенні світлової хвилі до об'єкта та назад виникає зміна фази сигналу, величина якої залежить від відстані до об'єкта. Фазові далекоміри забезпечують високу точність вимірювань, однак потребують складних схем формування та обробки сигналів [10].

Подальший розвиток мікроелектроніки та напівпровідникових технологій сприяв появі компактних лазерних сенсорів, робота яких базується на вимірюванні часу проходження світлового імпульсу. Даний підхід отримав назву Time-of-Flight (ToF) і в даний час активно використовується в робототехніці, мобільних пристроях, системах автоматичного керування та біомедичній техніці [14–18].

Використання лазерних методів дозволяє реалізувати високоточне вимірювання дистанції при невеликих габаритах обладнання. Це є особливо важливим для систем біонічного протезування, де розміри електронних модулів обмежені конструктивними особливостями протеза. Наявність інформації про відстань до предмета дає можливість здійснювати адаптивне керування захопленням та підвищувати ефективність роботи біонічного пристрою [5–8].

У процесі розвитку лазерних інформаційно-вимірювальних систем постійно вдосконалювалися як джерела випромінювання, так і методи обробки отриманих сигналів. Сучасні лазерні далекоміри здатні забезпечувати вимірювання відстані з похибкою, що не перевищує одиниць міліметрів, при цьому швидкість отримання результатів може становити десятки або навіть сотні вимірювань за секунду [10–12].

Однією з головних переваг лазерних методів є висока спрямованість випромінювання. Завдяки малій розбіжності лазерного променя забезпечується

можливість локального вимірювання відстані до окремих ділянок поверхні об'єкта. Це особливо важливо для робототехнічних систем та пристроїв автоматичного керування, де необхідно визначати положення конкретного предмета серед великої кількості навколишніх об'єктів [11].

Точність вимірювання дистанції залежить від ряду факторів, серед яких важливе місце займають характеристики випромінювача, властивості поверхні об'єкта та умови навколишнього середовища. Значний вплив мають коефіцієнт відбиття поверхні, її колір, шорсткість та кут нахилу відносно оптичної осі вимірювальної системи. Крім того, на результати вимірювань можуть впливати сторонні джерела освітлення, атмосферні явища та електромагнітні завади [13].

Для підвищення достовірності результатів сучасні лазерні системи використовують цифрові методи обробки сигналів. До них належать фільтрація вимірювальної інформації, усереднення результатів, компенсація шумів та автоматичне коригування параметрів вимірювання. Застосування мікроконтролерів та спеціалізованих інтегральних схем дозволяє виконувати складну обробку даних у режимі реального часу [14].

Сфера застосування лазерних методів вимірювання відстані постійно розширюється. Вони використовуються у промисловій автоматизації, системах технічного зору, безпілотних літальних апаратах, транспортних засобах, мобільних роботах та медичному обладнанні. В останні роки особливу увагу приділяють використанню лазерних сенсорів у складі біонічних протезів та екзоскелетів, де необхідно забезпечити швидке визначення положення предмета перед виконанням дії захоплення [6–8].

Для адаптивного керування біонічним протезом вимірювання дистанції є важливим джерелом інформації про навколишнє середовище. На основі даних про відстань до об'єкта система керування може змінювати швидкість руху пальців, силу стискання та алгоритм виконання захоплення. Це дозволяє підвищити точність роботи протеза та забезпечити більш природну взаємодію користувача з предметами різної форми та розмірів.

Таким чином, лазерні методи вимірювання відстані є ефективним інструментом побудови сучасних інформаційно-вимірювальних систем. Їх розвиток створив передумови для появи компактних високоточних сенсорів, здатних працювати у складі складних технічних комплексів. Найбільш перспективним напрямом розвитку таких систем є технологія Time-of-Flight, яка поєднує високу швидкодію, точність та можливість мініатюризації вимірювального обладнання.

1.3 Технологія Time-of-Flight

Одним із найбільш перспективних напрямів розвитку сучасних оптичних інформаційно-вимірювальних систем є технологія Time-of-Flight (ToF). Принцип її роботи базується на визначенні часу проходження оптичного сигналу від джерела випромінювання до об'єкта та назад до фотоприймального пристрою. Завдяки високій точності вимірювання часу сучасні ToF-системи забезпечують швидке та достовірне визначення відстані до об'єктів у широкому діапазоні дистанцій [14–18].

Технологія Time-of-Flight широко використовується у робототехніці, системах технічного зору, мобільних пристроях, безпілотних літальних апаратах та автомобільних системах допомоги водію. Останніми роками ToF-сенсори активно впроваджуються у біомедичні системи та біонічні протези, де необхідно забезпечити швидке визначення просторового положення предметів перед виконанням захоплення [6–8].

Принцип роботи ToF-системи полягає у випромінюванні короткого світлового імпульсу в напрямку об'єкта. Після відбиття від поверхні об'єкта випромінювання повертається до приймача, де реєструється момент його надходження. Визначивши інтервал часу між випромінюванням та прийманням сигналу, можна розрахувати відстань до об'єкта. Принцип роботи технології Time-of-Flight наведено на рисунку 1.2.

Відстань до об'єкта визначається на основі швидкості поширення світла у повітрі та часу проходження імпульсу. Оскільки сигнал проходить шлях до об'єкта і назад, розрахована відстань дорівнює половині повного пройденого шляху. Такий підхід дозволяє виконувати вимірювання без безпосереднього контакту з об'єктом та забезпечує високу швидкодію системи.

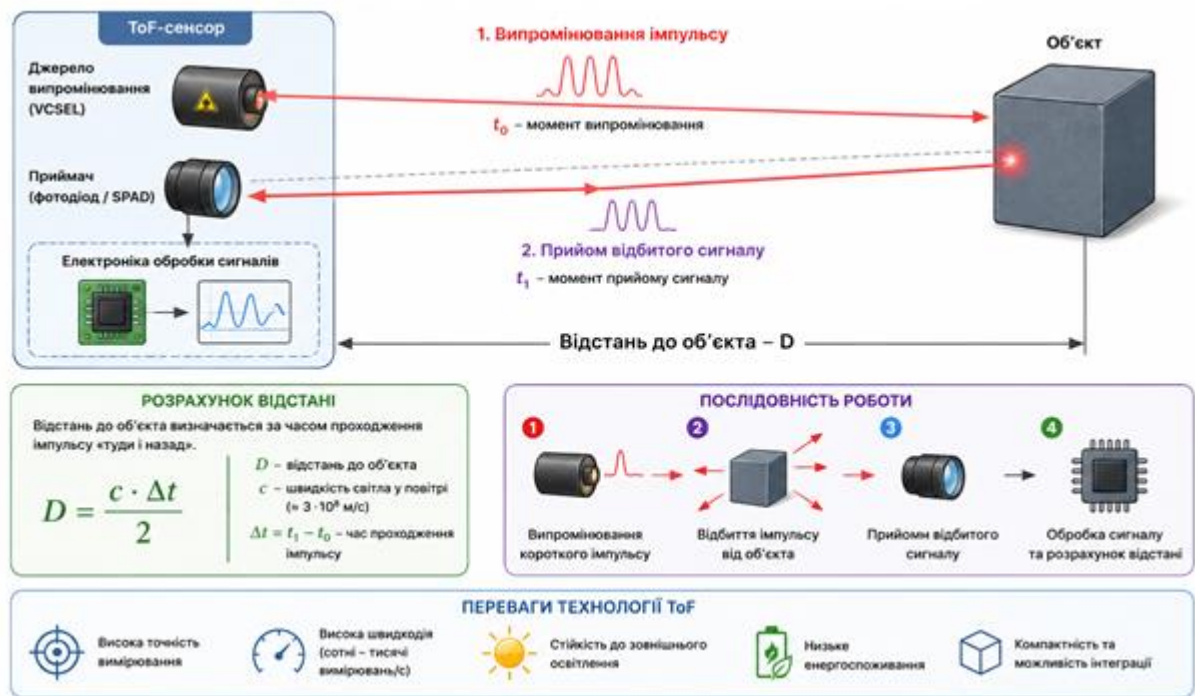


Рисунок 1.2 – Принцип роботи технології Time-of-Flight

Сучасні ToF-сенсори здатні виконувати сотні та навіть тисячі вимірювань за секунду. Це дозволяє використовувати їх у системах реального часу, де необхідно оперативно реагувати на зміну положення об'єктів. Для біонічних протезів така властивість має особливе значення, оскільки забезпечує можливість адаптивного керування захопленням залежно від положення предмета та швидкості руху руки користувача.

Перевагами технології Time-of-Flight є висока точність вимірювання, компактність апаратної реалізації, низьке енергоспоживання та можливість інтеграції у мініатюрні електронні пристрої. Крім того, сучасні ToF-сенсори

характеризуються стійкістю до зовнішнього освітлення та здатністю працювати в широкому діапазоні умов експлуатації [15–18].

Разом із перевагами технологія має певні обмеження. Точність вимірювання може знижуватися при роботі з поверхнями, що мають низький коефіцієнт відбиття або складну геометричну форму. Вплив також можуть здійснювати інтенсивні зовнішні джерела освітлення та наявність декількох відбиваючих поверхонь у зоні вимірювання. Для компенсації таких факторів використовуються спеціальні алгоритми цифрової обробки сигналів та методи статистичного аналізу результатів вимірювання.

Таким чином, технологія Time-of-Flight є одним із найбільш ефективних методів безконтактного визначення відстані до об'єктів. Поєднання високої точності, швидкодії та можливості мініатюризації робить її перспективною для використання у складі систем адаптивного керування біонічними протезами.

Для кількісного аналізу характеристик систем Time-of-Flight необхідно розглянути математичну модель процесу вимірювання відстані. Основним параметром, що визначається вимірювальною системою, є час проходження оптичного імпульсу від випромінювача до об'єкта та назад до фотоприймача. Відстань до об'єкта визначається за формулою:

$$D = \frac{ct}{2}, \quad (1.1)$$

де D – відстань до об'єкта, м;

c – швидкість світла у повітрі, м/с;

t – час проходження світлового імпульсу.

З формули (1.1) видно, що точність визначення відстані безпосередньо залежить від точності вимірювання часу. Для оцінювання впливу похибки часових вимірювань використовується диференціальний метод аналізу. Продиференціювавши вираз (1.1), отримаємо:

$$dD = \frac{c}{2} dt. \quad (1.2)$$

Відповідно абсолютна похибка вимірювання відстані визначається співвідношенням:

$$\Delta D = \frac{c}{2} \Delta t. \quad (1.3)$$

Отриманий вираз демонструє, що навіть незначна похибка вимірювання часу може суттєво впливати на результат визначення дистанції. Наприклад, для забезпечення похибки вимірювання не більше ± 5 мм необхідно реєструвати часові інтервали порядку десятків пікосекунд.

Для аналізу енергетичних характеристик вимірювальної системи використовується поняття енергії лазерного імпульсу. Якщо потужність випромінювання змінюється в часі за законом $P(t)$, то енергія імпульсу визначається інтегралом:

$$E = \int_0^T P(t) dt, \quad (1.4)$$

де E – енергія лазерного імпульсу;

$P(t)$ – миттєва потужність випромінювання;

T – тривалість імпульсу.

Після відбиття від поверхні об'єкта до фотоприймача повертається лише частина випроміненої енергії. Енергія прийнятого сигналу визначається виразом:

$$E_r = \int_0^T P_r(t) dt, \quad (1.5)$$

де E_r – енергія прийнятого сигналу;

$P_r(t)$ – миттєва потужність відбитого сигналу;

T – тривалість інтервалу приймання сигналу.

Із збільшенням відстані до об'єкта потужність відбитого сигналу зменшується, що призводить до погіршення точності визначення часової затримки та зростання похибки вимірювання.

У реальних умовах на результати вимірювання впливають різноманітні джерела шумів. Для їх кількісної оцінки використовується середньоквадратичне відхилення сигналу:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (s(t) - \bar{s})^2 dt}, \quad (1.6)$$

де σ – середньоквадратичне відхилення сигналу;

T – тривалість інтервалу спостереження;

$s(t)$ – миттєве значення сигналу в момент часу t ;

$\bar{s}$ – середнє значення сигналу за інтервал спостереження.

Чим більшим є значення середньоквадратичного відхилення, тим складніше визначити точний момент приходу відбитого імпульсу. Саме тому сучасні ToF-системи використовують цифрові методи фільтрації та усереднення результатів вимірювань.

Для підвищення точності визначення часової затримки широко застосовується кореляційна обробка сигналів. Кореляційна функція визначається співвідношенням:

$$R(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} S(t)r(t - \tau)dt, \quad (1.7)$$

де $S(t)$ – еталонний сигнал випромінювача;

$r(t)$ – прийнятий сигнал;

τ – часова затримка.

Максимум кореляційної функції відповідає моменту найкращого збігу еталонного та прийнятого сигналів. Отримане значення затримки використовується для подальшого визначення відстані до об'єкта відповідно до формули (1.1).

Для оцінювання ефективності роботи вимірювального каналу використовується відношення сигнал/шум:

$$SNR = \frac{P_r}{P_n}, \quad (1.8)$$

де SNR – відношення потужності корисного сигналу до потужності шуму;

P_r – потужність корисного сигналу;

P_n – потужність шуму.

Потужність відбитого сигналу залежить від характеристик випромінювача, властивостей поверхні об'єкта та відстані до нього. Для спрощеної моделі оптичного каналу потужність прийнятого сигналу може бути визначена за формулою:

$$P_r = P_t \rho \frac{A_r}{4\pi D^2}, \quad (1.9)$$

де P_t – потужність лазерного випромінювача, Вт;

ρ – коефіцієнт відбиття поверхні об'єкта;

A_r – ефективна площа фотоприймача, м²;

D – відстань до об'єкта, м.

З формули (1.9) видно, що зі збільшенням дистанції потужність прийнятого сигналу зменшується пропорційно квадрату відстані. Це пояснює поступове зниження точності вимірювання на великих дистанціях.

Середньоквадратична похибка визначення відстані пов'язана з похибкою вимірювання часу співвідношенням:

$$\sigma_D = \frac{c}{2} \sigma_t, \quad (1.10)$$

де σ_D – середньоквадратична похибка визначення відстані;

c – швидкість світла у повітрі, м/с;

σ_t – середньоквадратична похибка вимірювання часової затримки.

Таким чином, математична модель технології Time-of-Flight включає визначення відстані за часовою затримкою, аналіз похибок вимірювання, енергетичні характеристики лазерного імпульсу, статистичні методи оцінювання шумів та кореляційні методи обробки сигналів. Використання зазначених математичних моделей дозволяє підвищити точність вимірювання дистанції та забезпечити ефективну роботу систем адаптивного керування біонічними протезами. Структурна схема типової системи вимірювання дистанції за технологією Time-of-Flight показана на рис. 1.3.

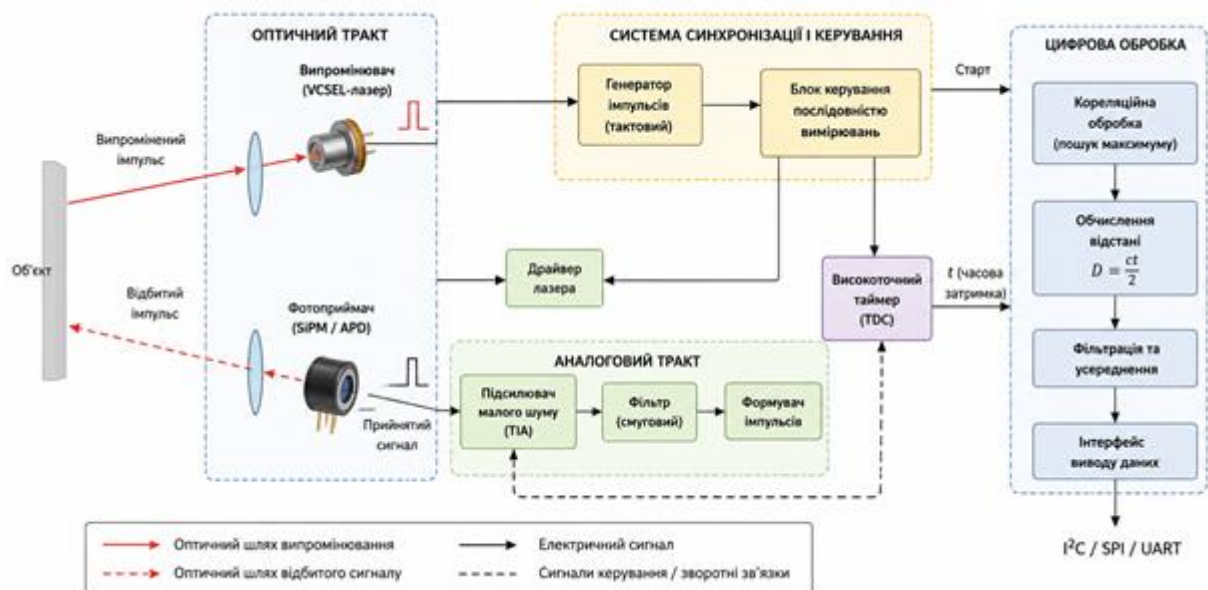


Рисунок 1.3 – Структурна схема ToF-сенсора

Структурна схема включає оптичний тракт(випромінювач і фотоприймач), аналогову електроніку для підсилення та формування сигналу, систему синхронізації та високоточний таймер для вимірювання часової затримки.

Цифровий блок виконує кореляційну обробку сигналу, обчислення відстані та передає результат через цифровий інтерфейс.

1.4 Оптичні сенсори та VCSEL-випромінювачі

Одним із ключових елементів сучасних систем вимірювання дистанції на основі технології Time-of-Flight є оптичний сенсор. Саме він забезпечує формування лазерного випромінювання, приймання відбитого сигналу та визначення часової затримки між моментом випромінювання і прийому світлового імпульсу. Від характеристик сенсора безпосередньо залежать точність вимірювання, швидкодія системи та її енергетична ефективність.

У сучасних ToF-системах найбільшого поширення набули сенсори, побудовані на основі вертикально-випромінюючих лазерів VCSEL (Vertical Cavity Surface Emitting Laser). Такі лазери характеризуються малими габаритами, низьким енергоспоживанням та високою стабільністю параметрів. Завдяки можливості формування коротких оптичних імпульсів VCSEL-випромінювачі забезпечують високу точність вимірювання часу проходження сигналу, що є необхідною умовою роботи систем Time-of-Flight.

До складу сучасного ToF-сенсора входять лазерний випромінювач, фотоприймальний елемент, оптична система формування променя та електронний блок обробки сигналів. Лазерний випромінювач формує короткі імпульси інфрачервоного випромінювання, які спрямовуються на об'єкт вимірювання. Після відбиття від поверхні об'єкта сигнал потрапляє на фотоприймач, де перетворюється на електричний імпульс для подальшої обробки. На рисунку 1.4 наведено конструкцію сучасного ToF-сенсора, що використовується для визначення відстані до об'єктів у робототехнічних та біомедичних системах.

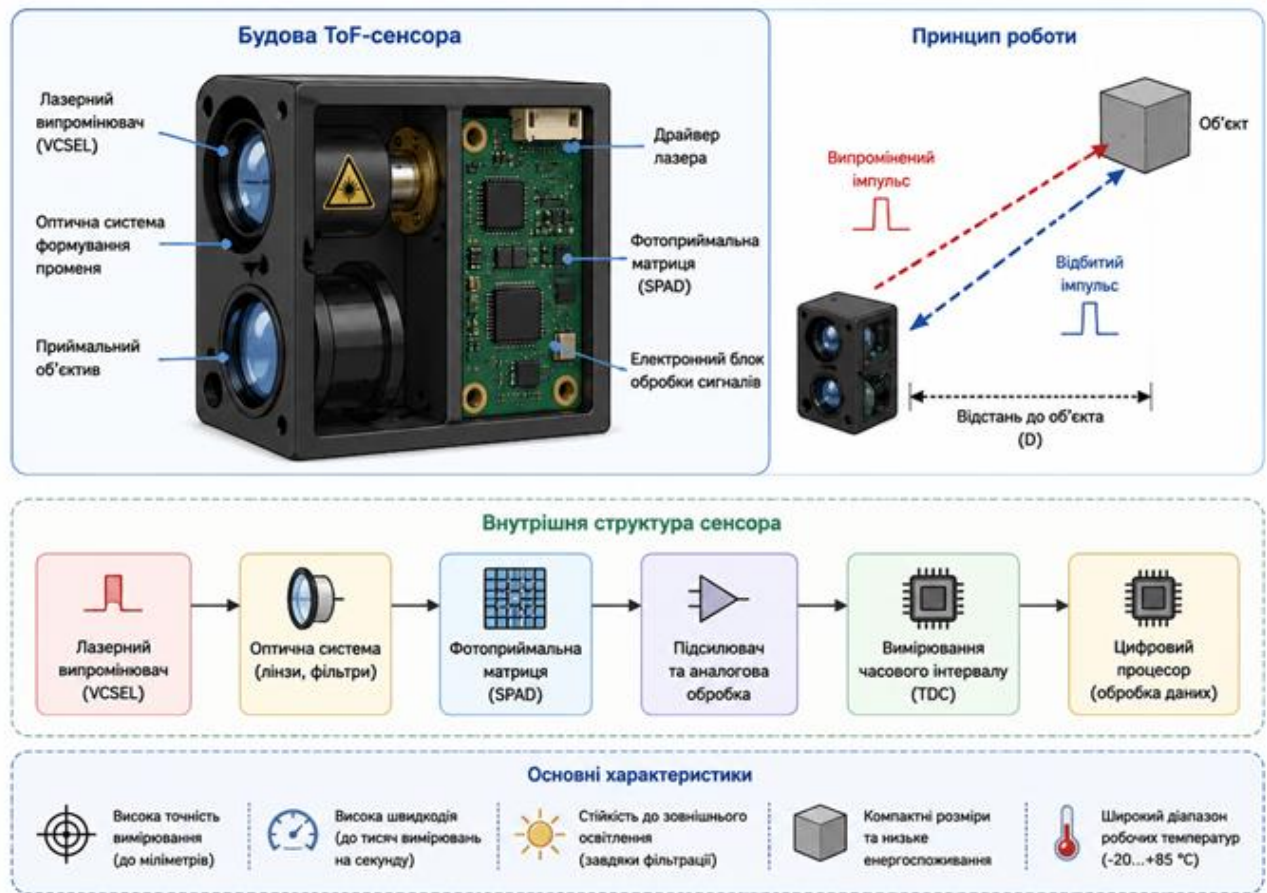


Рисунок 1.4 – Конструкція сучасного ToF-сенсора

Особливістю сучасних сенсорів є високий рівень інтеграції компонентів. В одному корпусі можуть розміщуватися лазерний випромінювач, фотоприймальна матриця, драйвер лазера, схема вимірювання часових інтервалів та цифровий процесор обробки сигналів. Такий підхід дозволяє значно зменшити габарити пристрою та підвищити його надійність.

Використання ToF-сенсорів у складі біонічних протезів відкриває можливість отримання інформації про положення предметів до моменту контакту із захоплювачем. Завдяки цьому система керування може адаптувати швидкість руху пальців протеза та силу захоплення відповідно до відстані до об'єкта. Це підвищує точність роботи біонічного пристрою та забезпечує більш природну взаємодію користувача з навколишнім середовищем.

1.5 Конструкція та принцип роботи VCSEL-випромінювачів

Ключовим елементом більшості сучасних ToF-сенсорів є вертикально-випромінюючий лазер VCSEL (Vertical Cavity Surface Emitting Laser). Саме цей пристрій формує короткі імпульси інфрачервоного випромінювання, які використовуються для визначення відстані до об'єкта. Завдяки особливостям конструкції VCSEL забезпечує високу стабільність параметрів, низьке енергоспоживання та можливість інтеграції у компактні вимірювальні модулі.

На відміну від традиційних напівпровідникових лазерів, у яких випромінювання виходить через бічну грань кристала, VCSEL формує лазерний промінь перпендикулярно до поверхні напівпровідникової структури. Така особливість значно спрощує виготовлення масивів випромінювачів та дозволяє отримувати високу щільність оптичних елементів на одному кристалі.

Основу VCSEL-випромінювача складає активна область, розташована між двома брегівськими дзеркалами (DBR – Distributed Bragg Reflector). Ці дзеркала утворюють оптичний резонатор, у якому відбувається багаторазове відбиття фотонів та формування когерентного лазерного випромінювання. Верхнє дзеркало виконується частково прозорим, що забезпечує вихід сформованого лазерного променя назовні.

Конструкцію типового VCSEL-випромінювача наведено на рисунку 1.5.

Використання VCSEL забезпечує низку переваг порівняно з традиційними лазерними діодами. До них належать висока швидкодія, можливість роботи в імпульсному режимі, мала споживана потужність та висока надійність. Крім того, VCSEL характеризуються вузькою діаграмою спрямованості випромінювання та стабільною довжиною хвилі, що позитивно впливає на точність вимірювання дистанції.

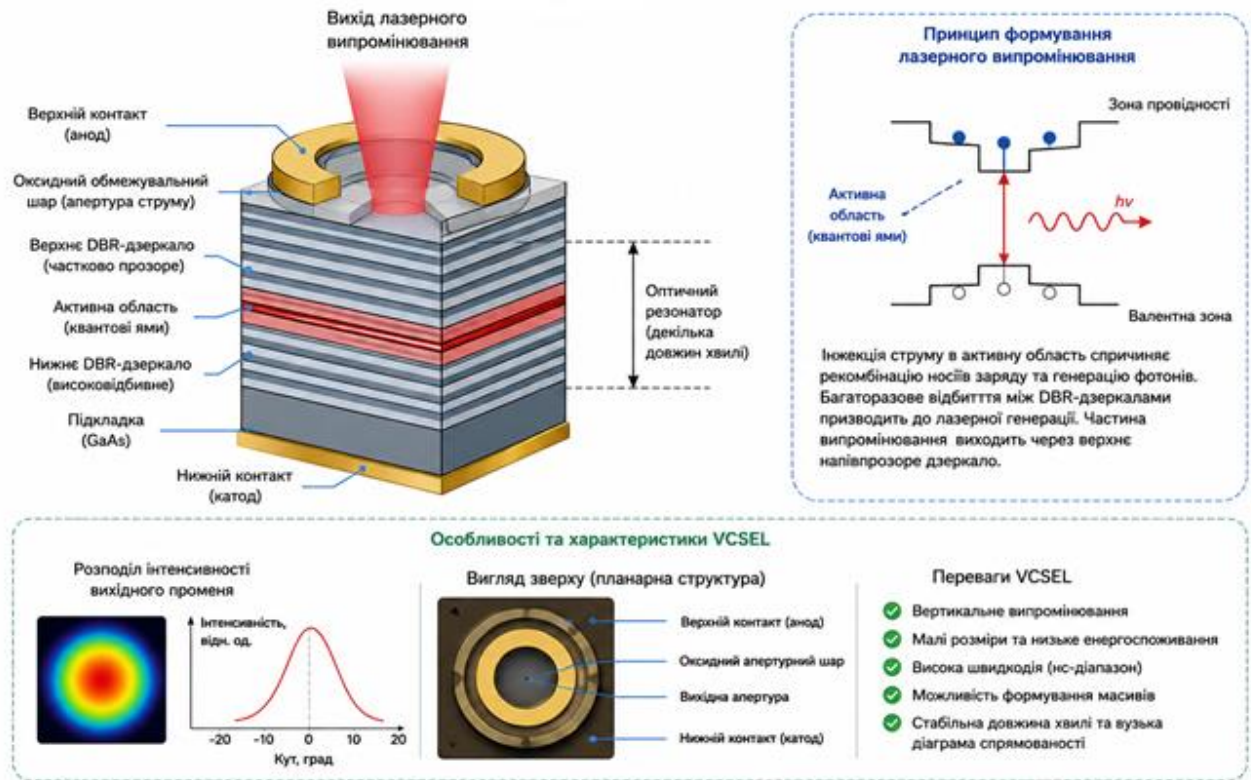


Рисунок 1.5 –Будова VCSEL-випромінювача

У більшості сучасних ToF-систем використовуються VCSEL-лазери з довжиною хвилі від 850 нм до 940 нм. Даний спектральний діапазон є безпечним для людини та забезпечує ефективне поширення випромінювання в повітрі. Завдяки цьому VCSEL-технологія широко застосовується у смартфонах, робототехнічних комплексах, системах технічного зору та пристроях біомедичного призначення.

1.6 SPAD-фотоприймачі в системах Time-of-Flight

Для реєстрації відбитого випромінювання в сучасних ToF-системах широко застосовуються лавинні фотодіоди типу SPAD (Single Photon Avalanche Diode). Дані фотоприймачі здатні реєструвати навіть окремі фотони, що

забезпечує високу чутливість вимірювальної системи та дозволяє працювати з дуже слабкими відбитими сигналами.

Принцип роботи SPAD-фотодіода базується на використанні режиму лавинного множення носіїв заряду. При надходженні фотона в активну область фотодіода утворюється електронно-діркова пара. Під дією сильного електричного поля виникає лавинний процес, у результаті якого формується короткий електричний імпульс, що легко реєструється електронною схемою обробки.

На відміну від традиційних фотодіодів, SPAD-сенсори характеризуються значно вищою чутливістю та меншою похибкою визначення моменту приходу сигналу. Це дозволяє підвищити точність вимірювання часової затримки та, відповідно, точність визначення відстані до об'єкта.

Принцип роботи SPAD-фотодіода наведено на рисунку 1.6.

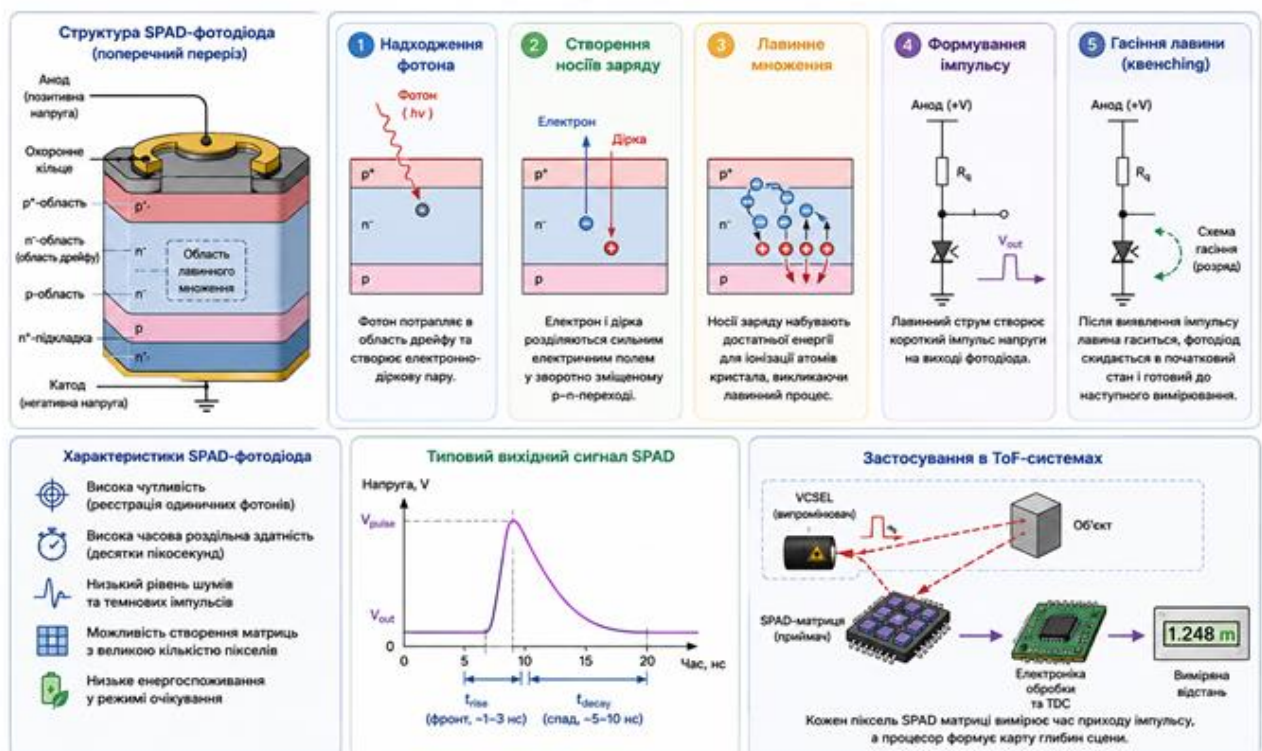


Рисунок 1.6 – Принцип роботи SPAD-фотодіода

Важливою перевагою SPAD-технології є можливість створення матриць фотоприймачів, що містять тисячі окремих чутливих елементів. Кожен елемент виконує незалежне вимірювання часу приходу відбитого сигналу, після чого результати об'єднуються цифровим процесором. Такий підхід дозволяє отримувати не тільки значення відстані до окремого об'єкта, але й формувати просторову карту навколишнього середовища.

Поєднання VCSEL-випромінювачів та SPAD-фотоприймачів стало основою більшості сучасних ToF-сенсорів. Саме ця комбінація забезпечує високу швидкість, компактність та точність вимірювання, необхідні для використання в робототехнічних системах, мобільних пристроях та біонічних протезах.

1.7 Формування карти глибин у ToF-системах

Однією з важливих переваг сучасних ToF-сенсорів є можливість не лише визначати відстань до окремого об'єкта, а й формувати просторову карту навколишнього середовища. Для цього використовується матриця фотоприймачів, кожен елемент якої виконує незалежне вимірювання часу проходження світлового імпульсу.

У процесі роботи ToF-система випромінює серію коротких лазерних імпульсів та визначає відстань для кожного пікселя фотоприймальної матриці. Отриманий набір значень використовується для побудови карти глибин (Depth Map), у якій яскравість або колір кожної точки відповідає відстані до відповідної ділянки об'єкта.

На рисунку 1.7 наведено принцип формування карти глибин за допомогою ToF-сенсора.

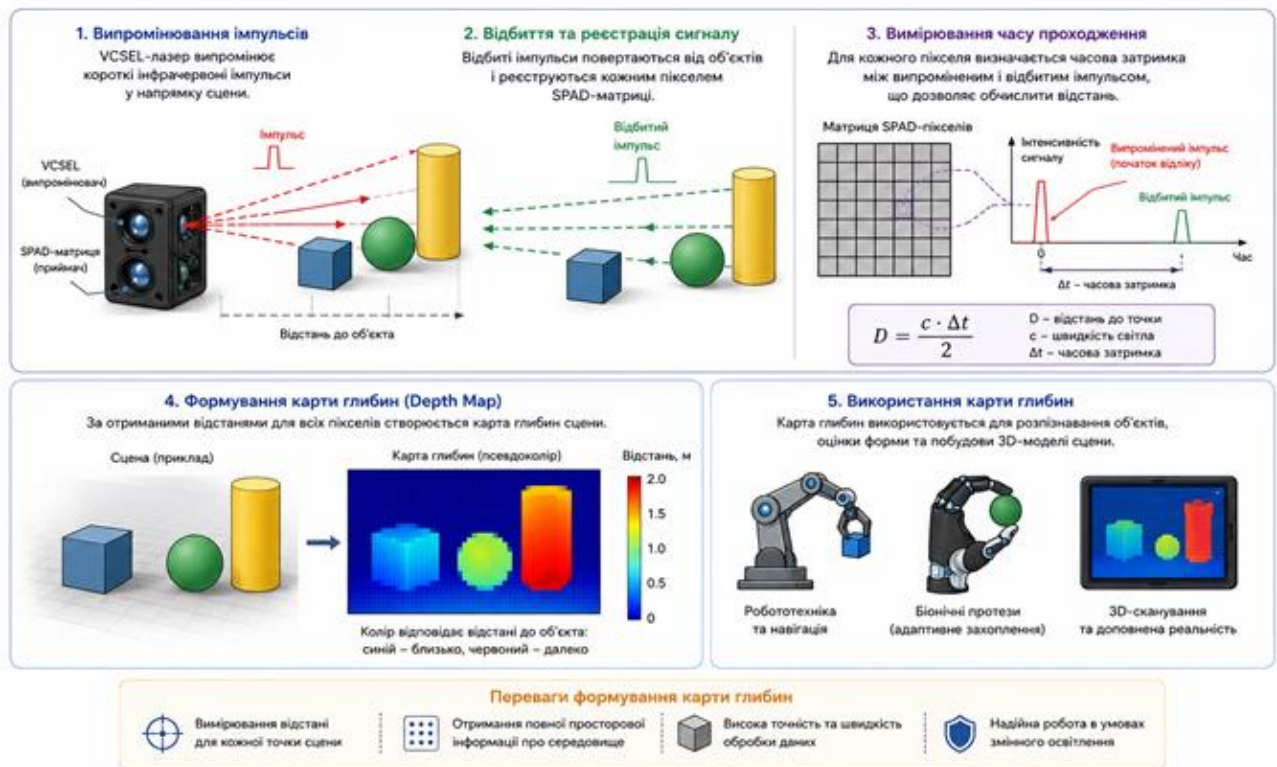


Рисунок 1.7 – Формування карти глибин за допомогою ToF-сенсора

Отримання карти глибин дозволяє системі визначати не лише положення об'єкта, але й його геометричні характеристики. Це особливо важливо для робототехнічних комплексів та біонічних протезів, де необхідно оцінювати форму предмета перед виконанням захоплення.

У системах адаптивного керування біонічними протезами карта глибин може використовуватися для автоматичного вибору режиму захоплення залежно від розмірів та положення об'єкта. Завдяки цьому забезпечується більш точне та безпечне виконання маніпуляцій. У таблиці 1.1 наведено порівняння методів вимірювання дистанції.

Таблиця 1.1 – Порівняння методів вимірювання дистанції

Метод вимірювання	Точність, мм	Робоча дистанція, м	Основні переваги	Доцільність використання в біонічному протезі
Ультразвуковий	$\pm 10-20$	до 5	Простота реалізації, низька вартість	Середня
Інфрачервоний	$\pm 5-10$	до 1	Компактність, низьке енергоспоживання	Добра
Триангуляційний лазерний	$\pm 1-5$	до 2	Висока точність на малих відстанях	Висока
Time-of-Flight (ToF)	$\pm 1-3$	до 4 м	Висока швидкість, побудова карти глибин	Найбільш перспективна

1.8 Висновки до розділу 1

У першому розділі кваліфікаційної роботи було розглянуто фізичні основи лазерного вимірювання дистанції та проаналізовано сучасні методи визначення відстані до об'єктів. Показано, що для побудови компактних інформаційно-вимірювальних систем найбільш перспективними є оптичні методи, які забезпечують високу точність та швидкодію вимірювань.

Проведено аналіз лазерних методів визначення відстані, серед яких розглянуто триангуляційний, фазовий та часовий методи вимірювання. Встановлено, що технологія Time-of-Flight поєднує високу точність, швидкість отримання результатів та можливість реалізації у вигляді компактних інтегрованих модулів.

Розглянуто принцип роботи технології Time-of-Flight та наведено математичні моделі, що описують процес визначення відстані, оцінювання похибок вимірювання та вплив шумів на результати вимірювань. Показано, що точність ToF-систем безпосередньо залежить від точності визначення часової затримки між випроміненим та прийнятим сигналами.

Досліджено конструкцію сучасних ToF-сенсорів, принцип роботи VCSEL-випромінювачів та SPAD-фотоприймачів. Встановлено, що поєднання

зазначених компонентів дозволяє створювати високоточні оптичні вимірювальні системи з малими габаритами та низьким енергоспоживанням. Окремо розглянуто можливість формування карти глибин, що є важливою перевагою сучасних ToF-систем.

За результатами проведеного аналізу для подальшої розробки модуля оптичного розпізнавання дистанції до предмета обрано технологію Time-of-Flight, яка найбільш повно відповідає вимогам систем адаптивного керування захопленням біонічного протеза.

2 РОЗРОБЛЕННЯ МОДУЛЯ ОПТИЧНОГО РОЗПІЗНАВАННЯ ДИСТАНЦІЇ ДО ПРЕДМЕТА

2.1 Аналіз сучасних систем вимірювання дистанції

Для розроблення модуля оптичного розпізнавання дистанції необхідно виконати вибір вимірювальної технології, яка найбільшою мірою відповідає вимогам адаптивного керування біонічним протезом. До основних вимог належать висока точність визначення відстані, мала затримка отримання результатів вимірювання, компактність конструкції та низьке енергоспоживання.

Під час роботи біонічного протеза система вимірювання повинна забезпечувати оперативне визначення положення предмета перед виконанням захоплення. У більшості випадків робоча дистанція знаходиться в межах від 50 мм до 1000 мм. При цьому допустима похибка вимірювання не повинна перевищувати декількох міліметрів, оскільки від точності визначення положення об'єкта залежить якість адаптивного керування захоплювачем.

Для оцінювання вимог до вимірювальної системи розглянемо відносну похибку визначення відстані:

$$\delta_D = \frac{\Delta D}{D} \times 100\%, \quad (2.1)$$

де δD – відносна похибка вимірювання;

ΔD – абсолютна похибка;

D – вимірювана відстань.

Для відстані 500 мм та допустимої абсолютної похибки 5 мм відносна похибка становить приблизно 1 %, що відповідає вимогам сучасних систем керування біонічними пристроями.

Одним із важливих параметрів є швидкодія вимірювального каналу. Частота оновлення даних повинна забезпечувати своєчасну реакцію системи керування на зміну положення об'єкта. Час одного циклу вимірювання

визначається як сума часу випромінювання імпульсу, приймання сигналу та цифрової обробки результатів:

$$T_{cycle} = T_{emit} + T_{recv} + T_{proc}, \quad (2.2)$$

де T_{cycle} – тривалість повного циклу вимірювання; T_{emit} – час випромінювання лазерного імпульсу;

T_{recv} – час приймання відбитого сигналу; T_{proc} – час цифрової обробки результатів.

Зменшення тривалості циклу вимірювання дозволяє підвищити швидкодію системи та забезпечити роботу протеза в режимі реального часу.

На рисунку 2.1 наведено порівняння сучасних систем вимірювання дистанцій для біонічного протеза., яке показує, що найбільш повно зазначеним вимогам відповідають інтегровані сенсори Time-of-Flight.

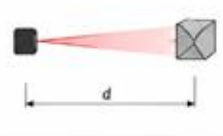
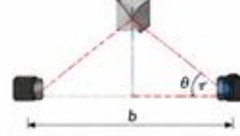
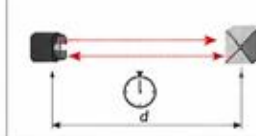
Параметр	Ультразвукові системи	Інфрачервоні (ІЧ) системи на основі інтенсивності	Тріангуляційні оптичні системи	Time-of-Flight (ToF) системи
Принцип роботи	Випромінювання ультразвукової хвилі та вимірювання часу повернення ехо-сигналу. 	Випромінювання ІЧ-світла та оцінка відбитої інтенсивності сигналу. 	Випромінювання світла та визначення відстані за геометрією утвореного трикутника. 	Вимірювання часу проходження імпульсу модульованого світла до об'єкта і назад. 
Робочий діапазон	0,2 – 5 м	0,1 – 3 м	0,1 – 2 м	0,05 – 5 м
Точність вимірювання	±10 – 30 мм	±10 – 50 мм	±0,1 – 2 мм	±1 – 5 мм
Роздільна здатність	Низька	Середня	Висока	Висока
Чутливість до освітлення	Відсутня	Висока	Середня	Низька
Вплив характеристик поверхні об'єкта	Середній	Високий	Середній	Низький
Швидкодія (частота оновлення)	Низька (10–50 Гц)	Середня (50–200 Гц)	Середня (100–500 Гц)	Висока (100–1000 Гц)
Енергоспоживання	Середнє	Низьке	Середнє	Низьке
Розміри та інтеграція	Великі	Малі	Середні	Малі (інтегровані сенсори)
Переваги	- Не залежить від кольору об'єкта - Дешевизна	- Низьке енергоспоживання - Проста реалізація	- Висока точність - Хороша роздільна здатність	- Висока точність на широких відстанях - Низька чутливість до умов освітлення - Компактність та інтеграція
Недоліки	- Низька точність - Великі габарити - Повільна реакція	- Сильна залежність від кольору та освітлення - Низька точність	- Залежність від текстури поверхні - Обмежений діапазон	- Вища вартість - Складніша обробка сигналів
Придатність для біонічного протеза	☆☆☆ (низька – середня)	☆☆☆☆ (середня)	☆☆☆☆☆ (висока)	☆☆☆☆☆ (найвища)

Рисунок 2.1 – Порівняння сучасних систем вимірювання дистанції для біонічного протеза

Такі пристрої забезпечують вимірювання відстані з міліметровою точністю, мають компактні розміри та можуть безпосередньо підключатися до мікроконтролерних систем керування через цифрові інтерфейси I²C або SPI.

2.2 Розроблення структурної схеми модуля

Після аналізу сучасних методів вимірювання дистанції та особливостей технології Time-of-Flight було прийнято рішення про розроблення модуля оптичного розпізнавання дистанції на основі інтегрованого ToF-сенсора. Основною задачею розроблюваного пристрою є безперервне визначення відстані до предмета та передавання отриманої інформації до системи керування біонічного протеза.

Структурна схема модуля повинна забезпечувати формування оптичного сигналу, приймання відбитого випромінювання, обробку вимірювальної інформації та передачу результатів до виконавчої системи. При цьому необхідно забезпечити мінімальні габарити пристрою, низьке енергоспоживання та можливість роботи в режимі реального часу.

До складу розроблюваного модуля входять такі основні функціональні блоки:

- ToF-сенсор вимірювання дистанції;
- мікроконтролер обробки вимірювальної інформації;
- блок живлення;
- інтерфейс обміну даними;
- система керування біонічним протезом.

ToF-сенсор виконує функцію первинного вимірювального перетворювача. Він формує короткі імпульси лазерного випромінювання, приймає відбитий сигнал та визначає часову затримку між моментами випромінювання і приймання сигналу. На основі отриманих даних сенсор обчислює відстань до об'єкта та передає результат до мікроконтролера.

Мікроконтролер забезпечує приймання даних від ToF-сенсора, їх цифрову обробку, фільтрацію та формування команд для системи керування

захопленням. Крім того, мікроконтролер виконує контроль працездатності модуля та забезпечує взаємодію з іншими вузлами біонічного протеза.

Для оцінювання швидкодії системи використовується час одного циклу вимірювання, який визначається виразом:

$$T_{\text{ц}} = T_{\text{вим}} + T_{\text{обр}} + T_{\text{пер}}, \quad (2.3)$$

де $T_{\text{вим}}$ – час виконання вимірювання;

$T_{\text{обр}}$ – час цифрової обробки даних;

$T_{\text{пер}}$ – час передавання результатів до системи керування.

Мінімізація часу циклу дозволяє забезпечити швидке реагування біонічного протеза на зміну положення об'єкта та підвищити ефективність адаптивного керування захопленням.

Структурну схему розроблюваного модуля наведено на рисунку 2.2.

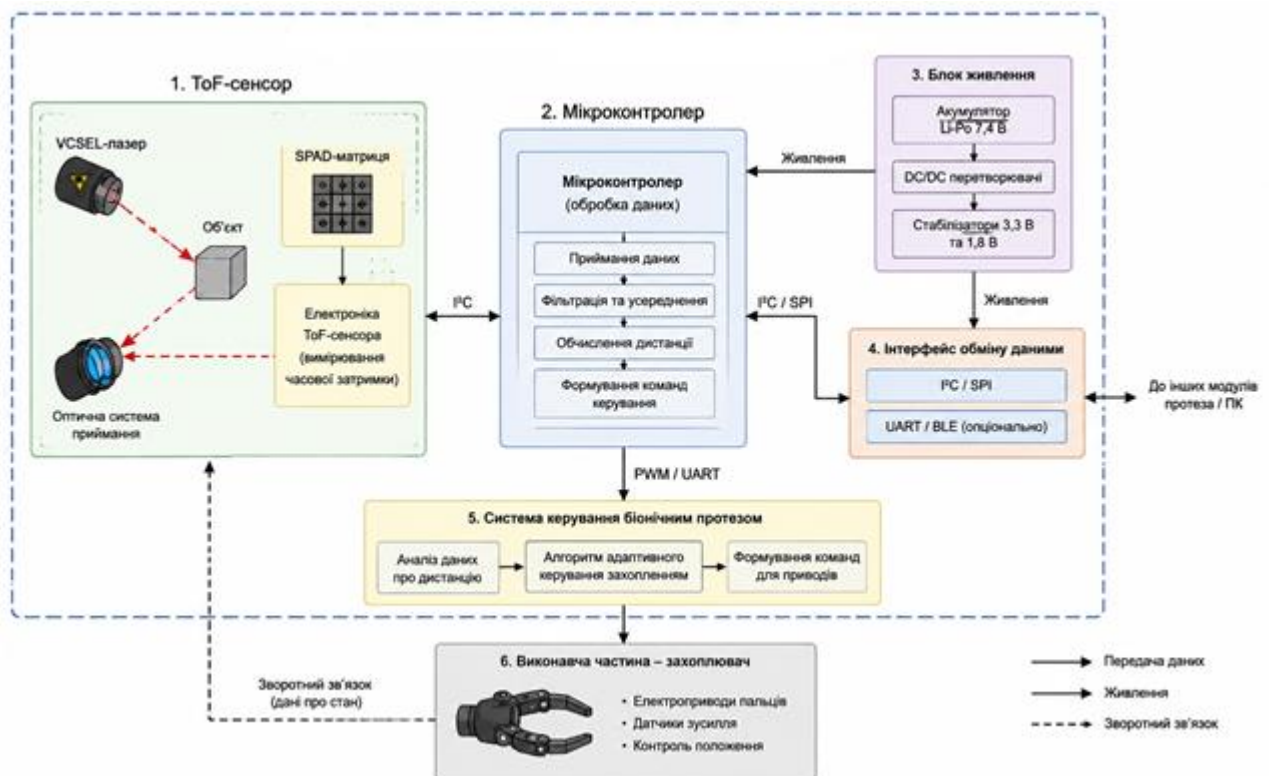


Рисунок 2.2 – Структурна схема модуля оптичного розпізнавання дистанції

Запропонована структура забезпечує вимірювання відстані до об'єкта, цифрову обробку результатів та формування керуючих сигналів для системи адаптивного керування біонічним протезом.

Основним елементом системи є ToF-сенсор, до складу якого входять VCSEL-випромінювач, фотоприймальна матриця SPAD та вбудований блок вимірювання часової затримки. Під час роботи сенсор формує короткі оптичні імпульси, приймає відбитий сигнал та визначає відстань до об'єкта на основі технології Time-of-Flight.

Отримані результати вимірювання передаються до мікроконтролера через цифровий інтерфейс I²C. Мікроконтролер виконує обробку даних, фільтрацію випадкових завад та усереднення результатів вимірювання. Після цього визначається поточна відстань до об'єкта та формується керуючий сигнал для системи захоплення.

Для підвищення достовірності результатів вимірювання використовується усереднення декількох послідовних вимірювань. Розрахунок середнього значення відстані виконується за формулою:

$$D_{\text{сер}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N D_i, \quad (2.4)$$

де N – кількість вимірювань;

D_i – результат окремого вимірювання дистанції.

Система керування біонічним протезом аналізує отриману інформацію та визначає оптимальні параметри руху захоплювача. На основі даних про відстань до предмета змінюється швидкість руху пальців, момент початку захоплення та сила стискання об'єкта.

Живлення всіх функціональних вузлів забезпечується від акумуляторної батареї через блок стабілізації напруги. Для обміну інформацією з іншими модулями протеза використовується цифровий інтерфейс UART або SPI, що забезпечує можливість інтеграції розробленого пристрою до складу існуючих

систем керування. Запропонована структурна схема забезпечує компактність конструкції, високу швидкодію та можливість реалізації адаптивного керування захопленням на основі інформації про відстань до об'єкта.

Для реалізації запропонованого модуля доцільно використовувати сучасні інтегровані ToF-сенсори сімейства STMicroelectronics, зокрема VL53L1X або VL53L5CX. Дані сенсори поєднують у собі VCSEL-випромінювач, SPAD-фотоприймальну матрицю та цифровий блок обробки сигналів, що дозволяє значно спростити побудову вимірювальної системи [16, 17]. Використання інтегрованого рішення забезпечує зменшення габаритів пристрою та підвищення надійності роботи системи.

Обмін даними між ToF-сенсором та мікроконтролером здійснюється за допомогою цифрового інтерфейсу I²C, який широко використовується в сучасних вбудованих системах завдяки простоті реалізації та невеликій кількості сигнальних ліній [19]. Передавання результатів вимірювання в цифровій формі дозволяє зменшити вплив зовнішніх завад та підвищити достовірність отриманої інформації.

Як центральний елемент системи доцільно використовувати мікроконтролер сімейства STM32, який забезпечує достатню обчислювальну продуктивність для обробки вимірювальної інформації та реалізації алгоритмів адаптивного керування [20]. Наявність апаратної підтримки інтерфейсів I²C, SPI та UART спрощує інтеграцію модуля до складу біонічного протеза.

Для оцінювання продуктивності системи розглянемо частоту оновлення вимірювальної інформації:

$$f = \frac{1}{T_{cycle}} , \quad (2.5)$$

де f – частота оновлення даних;

T_{cycle} – тривалість одного циклу вимірювання.

Зі зменшенням тривалості циклу вимірювання підвищується швидкодія системи та зменшується затримка реакції протеза на зміну положення об'єкта. Для задач адаптивного керування захопленням доцільним є забезпечення частоти оновлення не менше 30–50 Гц, що дозволяє здійснювати керування в режимі реального часу [2, 8].

Таким чином, запропонована структура модуля забезпечує можливість високоточного визначення дистанції до предмета, цифрової обробки результатів вимірювання та інтеграції з системою керування біонічним протезом. Схему взаємодії ToF-сенсора з мікроконтролером наведено на рисунку 2.3.

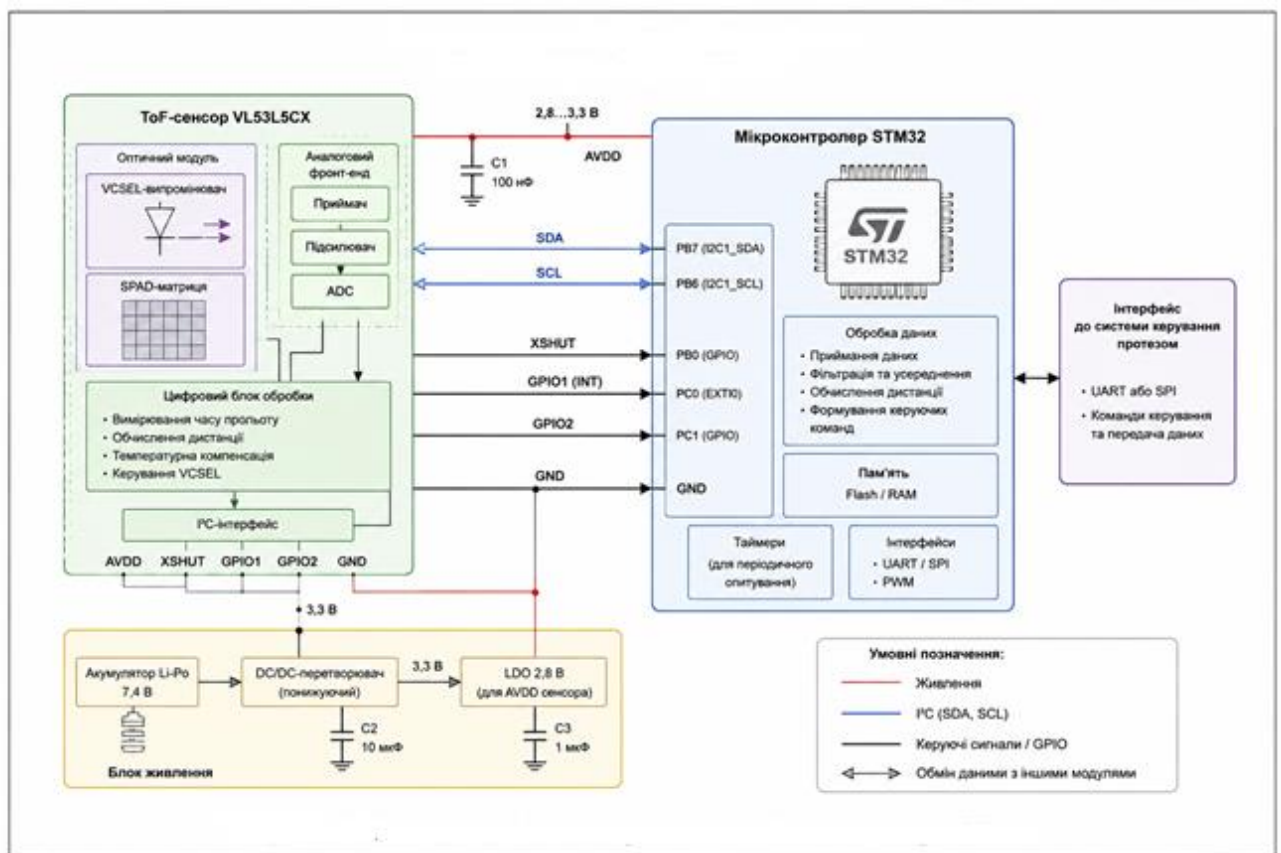


Рисунок 2.3 – Схема взаємодії ToF-сенсора VL53L5CX з мікроконтролером STM32

На рисунку наведено схему взаємодії ToF-сенсора VL53L5CX з мікроконтролером STM32. Передавання вимірювальної інформації здійснюється

через цифровий інтерфейс I²C, який забезпечує обмін даними між сенсором та мікроконтролером у режимі реального часу [19].

Під час роботи системи ToF-сенсор виконує формування лазерних імпульсів, приймання відбитого сигналу та визначення відстані до об'єкта. Результати вимірювання передаються до мікроконтролера, де здійснюється їх подальша обробка, фільтрація та аналіз [17].

Одним із важливих етапів обробки є усереднення результатів декількох послідовних вимірювань, що дозволяє зменшити вплив випадкових завад та шумів. Для оцінювання стабільності вимірювань використовується середньоквадратичне відхилення результатів:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (D_i - D_{\text{сер}})^2} \quad (2.6)$$

де σ – середньоквадратичне відхилення;

N – кількість вимірювань;

D_i – результат окремого вимірювання;

$D_{\text{сер}}$ – середнє значення дистанції.

Зменшення значення σ свідчить про підвищення точності та повторюваності результатів вимірювання. Використання цифрової обробки сигналів дозволяє забезпечити необхідну точність роботи системи навіть за наявності зовнішніх завад та змін умов освітлення [21].

Сучасні ToF-сенсори забезпечують частоту оновлення вимірювань до декількох десятків герц, що є достатнім для реалізації адаптивного керування захопленням у режимі реального часу [16].

Таким чином, розроблена апаратна структура забезпечує високоточне визначення відстані до об'єкта, цифрову обробку результатів вимірювання та інтеграцію з системою керування біонічним протезом.

2.3 Алгоритм роботи та програмна реалізація

Після розроблення апаратної структури модуля необхідно визначити алгоритм його функціонування та порядок взаємодії між окремими програмними компонентами системи. Алгоритм роботи забезпечує отримання вимірювальної інформації від ToF-сенсора, її цифрову обробку та формування керуючих сигналів для адаптивного керування захопленням біонічного протеза [6, 8].

Функціонування модуля здійснюється циклічно. Після подачі живлення виконується ініціалізація мікроконтролера, налаштування інтерфейсу I²C та перевірка працездатності ToF-сенсора. Після успішного завершення процедури ініціалізації система переходить у режим безперервного вимірювання дистанції [17, 20].

Після завершення обробки даних система порівнює отримане значення дистанції із заданими пороговими рівнями. На основі результатів аналізу формується керуючий сигнал для системи керування біонічним протезом. Залежно від відстані до об'єкта може змінюватися швидкість руху пальців, момент початку захоплення та сила стискання предмета [5–8].

Для забезпечення роботи в режимі реального часу важливим параметром є частота оновлення інформації. Вона визначається співвідношенням:

$$f = \frac{1}{T_{\text{ц}}}, \quad (2.8)$$

де f – частота оновлення даних;

$T_{\text{ц}}$ – тривалість одного циклу роботи алгоритму.

Сучасні ToF-сенсори забезпечують частоту оновлення вимірювальної інформації до декількох десятків герц, що є достатнім для реалізації адаптивного керування захопленням у біонічних протезах [16, 17].

Після розроблення апаратної структури модуля необхідно визначити алгоритм його функціонування та порядок взаємодії між окремими програмними компонентами системи. Алгоритм роботи забезпечує отримання вимірювальної

інформації від ToF-сенсора, її цифрову обробку та формування керуючих сигналів для адаптивного керування захопленням біонічного протеза [6, 8].

Функціонування модуля здійснюється циклічно. Після подачі живлення виконується ініціалізація мікроконтролера, налаштування інтерфейсу I²C та перевірка працездатності ToF-сенсора. Після успішного завершення процедури [17, 20].

На кожному циклі роботи мікроконтролер формує команду запуску вимірювання та зчитує результати, отримані від сенсора. Отримані значення дистанції проходять цифрову обробку з метою зменшення впливу випадкових шумів та нестабільності вимірювань. Для цього використовується усереднення декількох послідовних результатів вимірювання [21].

Середнє значення дистанції визначається за формулою:

$$D_{\text{сеп}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N D_i, \quad (2.9)$$

де N – кількість вимірювань;

D_i – результат окремого вимірювання дистанції.

Для оцінювання стабільності результатів вимірювання використовується середньоквадратичне відхилення:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=0}^N (D_i - D_{\text{сеп}})^2}, \quad (2.10)$$

де σ – середньоквадратичне відхилення результатів вимірювання.

Чим меншим є значення σ , тим вищою є повторюваність результатів та достовірність визначення відстані до об'єкта. Використання усереднення дозволяє зменшити вплив випадкових похибок та підвищити точність функціонування вимірювального модуля [21].

Після завершення обробки даних система порівнює отримане значення дистанції із заданими пороговими рівнями. На основі результатів аналізу формується керуючий сигнал для системи керування біонічним протезом. Залежно від відстані до об'єкта може змінюватися швидкість руху пальців, момент початку захоплення та сила стискання предмета [5–8].

Для забезпечення роботи в режимі реального часу важливим параметром є частота оновлення інформації. Вона визначається співвідношенням:

$$f = 1/T_u, \quad (2.11)$$

де f – частота оновлення даних;

T_u – тривалість одного циклу роботи алгоритму.

Сучасні ToF-сенсори забезпечують частоту оновлення вимірювальної інформації до декількох десятків герц, що є достатнім для реалізації адаптивного керування захопленням у біонічних протезах [16, 17].

Блок-схему алгоритму функціонування розробленого модуля оптичного розпізнавання дистанції наведено на рисунку 2.4.

Алгоритм забезпечує послідовне виконання операцій ініціалізації обладнання, отримання вимірювальної інформації, цифрової обробки результатів та формування керуючих сигналів для системи адаптивного керування біонічним протезом.

Після подачі живлення виконується ініціалізація мікроконтролера та налаштування периферійних модулів, необхідних для роботи системи. Далі здійснюється конфігурування інтерфейсу I²C та перевірка працездатності ToF-сенсора. У випадку успішного завершення ініціалізації система переходить у режим безперервного вимірювання дистанції [17, 20].

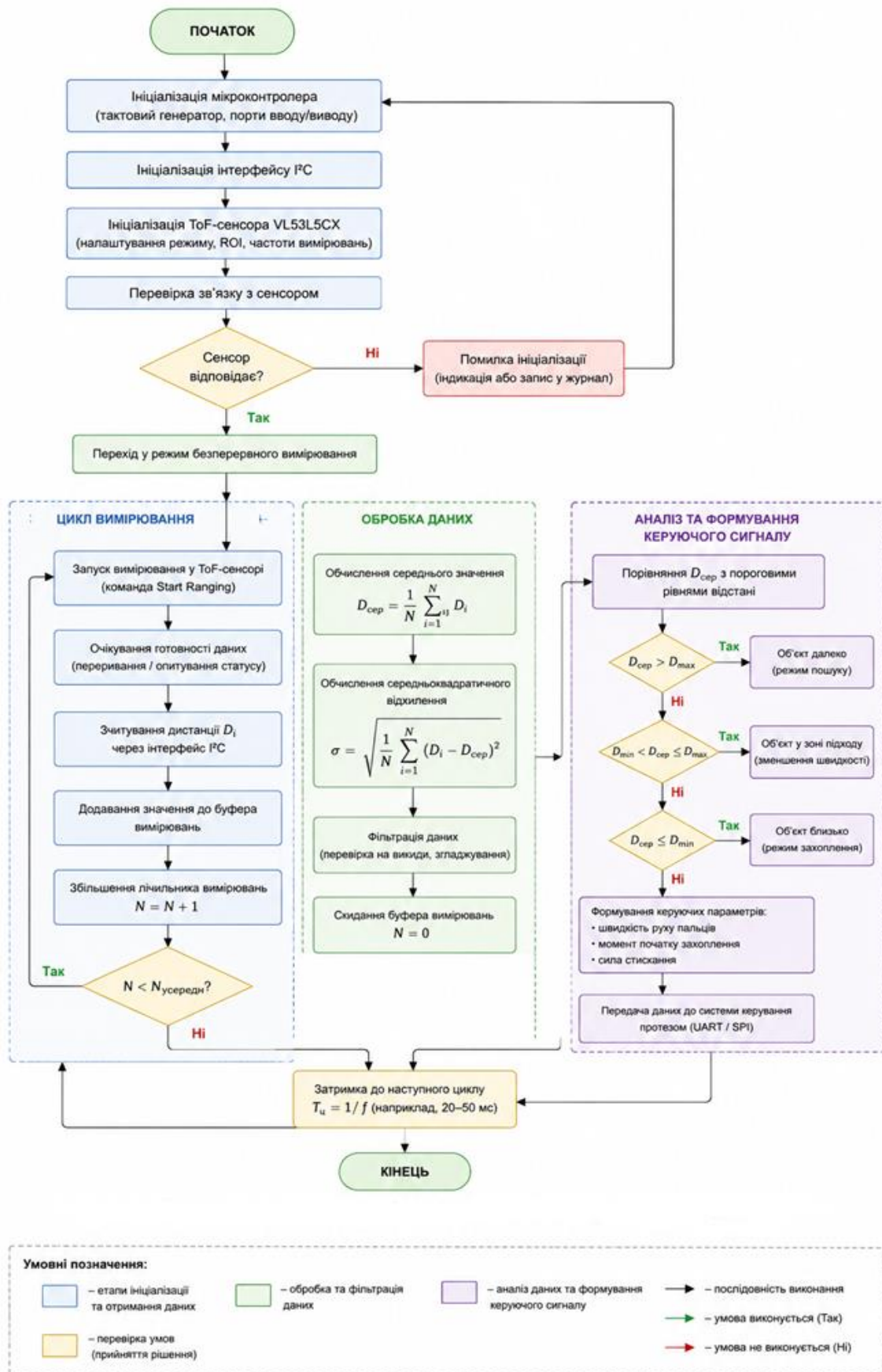


Рисунок 2.4 – Блок-схема алгоритму роботи модуля оптичного розпізнавання дистанції

Під час кожного циклу роботи виконується запуск процедури вимірювання та зчитування результатів із сенсора. Отримані значення дистанції накопичуються у буфері вимірювань для подальшої статистичної обробки. Такий підхід дозволяє зменшити вплив випадкових похибок і підвищити стабільність результатів вимірювання [21].

Після накопичення необхідної кількості результатів виконується обчислення середнього значення дистанції та середньоквадратичного відхилення. Отримані параметри використовуються для оцінювання достовірності результатів вимірювання та виявлення можливих аномальних значень.

Для додаткового підвищення точності застосовується цифрова фільтрація даних. У процесі фільтрації відсіюються поодинокі викиди та результати, що істотно відрізняються від середнього значення. Це дозволяє забезпечити стабільну роботу системи навіть за наявності зовнішніх оптичних завад або змін умов освітлення [16].

Після завершення обробки здійснюється аналіз поточного положення об'єкта відносно захоплювача. Залежно від визначеної відстані система формує необхідні параметри керування, зокрема швидкість руху пальців протеза, момент початку захоплення та силу стискання предмета. Сформовані команди передаються до системи керування через цифровий інтерфейс зв'язку.

Запропонований алгоритм забезпечує функціонування вимірювального модуля в режимі реального часу та дозволяє реалізувати адаптивне керування біонічним протезом на основі безперервного контролю дистанції до об'єкта.

Для наочного представлення процесу обробки вимірювальної інформації та формування керуючих команд розроблено схему руху даних у модулі, яку наведено на рисунку 2.5.

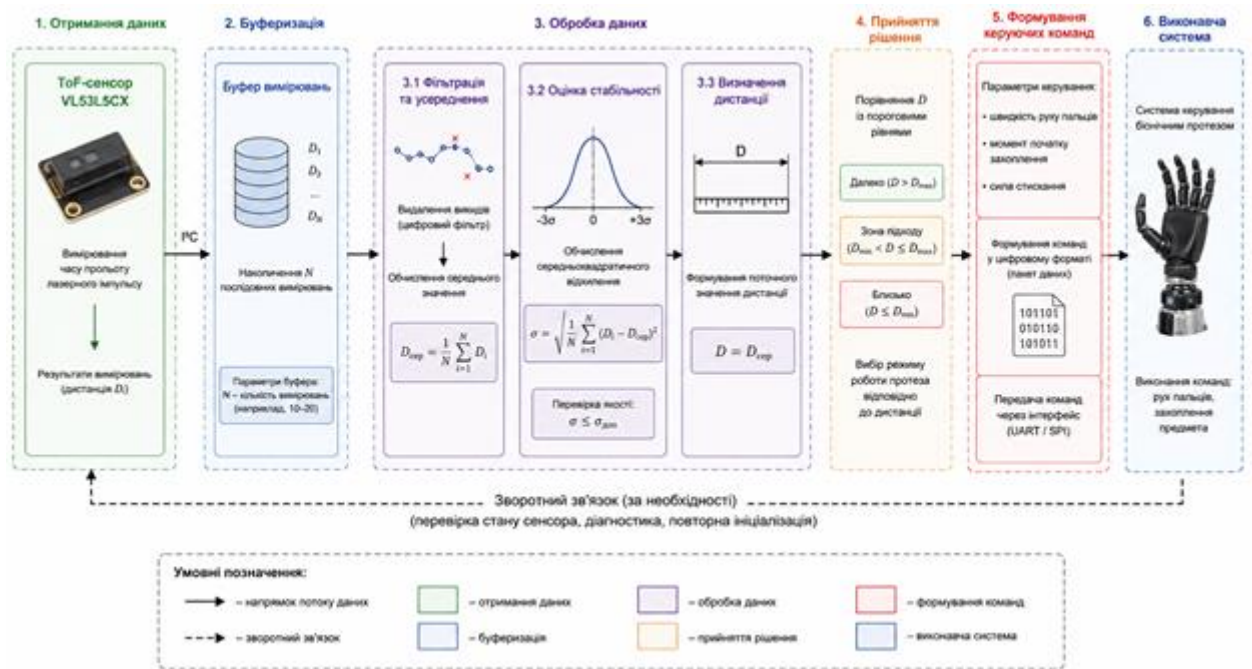


Рисунок 2.5 – Схема потоку даних у модулі оптичного розпізнавання дистанції

На рисунку 2.5 наведено схему потоку даних у модулі оптичного розпізнавання дистанції. Представлена схема відображає послідовність перетворення вимірювальної інформації від моменту її отримання ToF-сенсором до формування керуючих команд для системи адаптивного керування біонічним протезом.

На першому етапі виконується вимірювання часу прольоту лазерного імпульсу та визначення поточного значення дистанції до об'єкта. Отримані результати передаються до буфера вимірювань, де накопичуються для подальшої статистичної обробки [17].

Наступним етапом є цифрова фільтрація та усереднення даних. Використання буфера вимірювань дозволяє зменшити вплив випадкових шумів та нестабільності результатів вимірювання. Для оцінювання якості отриманих даних додатково обчислюється середньоквадратичне відхилення результатів вимірювання [21].

Після завершення фільтрації виконується визначення поточного значення дистанції та його порівняння із заданими пороговими рівнями. Залежно від

отриманого результату система приймає рішення щодо режиму роботи біонічного протеза. Якщо об'єкт знаходиться на значній відстані, система продовжує режим пошуку. При наближенні об'єкта швидкість руху виконавчих механізмів автоматично зменшується. У разі досягнення встановленої дистанції формується команда на виконання захоплення предмета [6, 8].

Сформовані параметри керування передаються до виконавчої системи протеза через цифровий інтерфейс зв'язку. Отримані команди використовуються для регулювання швидкості руху пальців, моменту початку захоплення та сили стискання об'єкта. Завдяки цьому забезпечується адаптація роботи протеза до поточного положення предмета та підвищується точність виконання маніпуляцій.

Запропонована схема потоку даних дозволяє реалізувати безперервний цикл вимірювання, обробки та передачі інформації, що є необхідною умовою для функціонування системи адаптивного керування в режимі реального часу [20].

У наступному підрозділі виконано дослідження характеристик розробленого модуля та оцінювання точності вимірювання дистанції в різних режимах роботи.

2.4 Дослідження характеристик розробленого модуля

Після розроблення апаратної структури та алгоритму функціонування модуля необхідно виконати оцінювання його основних характеристик. Метою дослідження є визначення точності вимірювання дистанції, оцінювання впливу випадкових похибок та аналіз можливості використання розробленого модуля в системах адаптивного керування біонічними протезами.

Однією з найважливіших характеристик вимірювальної системи є абсолютна похибка визначення дистанції. Абсолютна похибка вимірювання визначається як різниця між виміряним та дійсним значенням відстані [22]:

$$\Delta D = |D_{\text{вим}} - D_{\text{дійсн}}|, \quad (2.12)$$

де ΔD – абсолютна похибка вимірювання;

$D_{\text{вим}}$ – результат вимірювання;

$D_{\text{дійсн}}$ – дійсне значення дистанції.

Для більш повного оцінювання точності використовується відносна похибка вимірювання:

$$\sigma = \frac{\Delta D}{D_{\text{дійсн}}}, \quad (2.13)$$

де δ – відносна похибка вимірювання, %.

Під час експлуатації на результати вимірювання можуть впливати випадкові фактори, пов'язані з рівнем освітленості, відбивною здатністю поверхні об'єкта та електронними шумами фотоприймальної системи [16, 21]. Для зменшення впливу зазначених факторів у розробленому модулі використовується усереднення результатів декількох послідовних вимірювань.

Згідно з центральною граничною теоремою зі збільшенням кількості усереднюваних вимірювань випадкова складова похибки зменшується пропорційно квадратному кореню з кількості вимірювань [22]:

$$\sigma_{\text{сер}} = \frac{\sigma}{\sqrt{N}}, \quad (2.14)$$

де $\sigma_{\text{сер}}$ – середньоквадратичне відхилення усередненого результату;

σ – середньоквадратичне відхилення окремого вимірювання;

N – кількість вимірювань.

Для оцінювання ефективності запропонованого алгоритму було виконано моделювання процесу вимірювання дистанції в робочому діапазоні від 100 до 1000 мм. Результати аналізу залежності похибки вимірювання від дистанції наведено на рисунку 2.6.

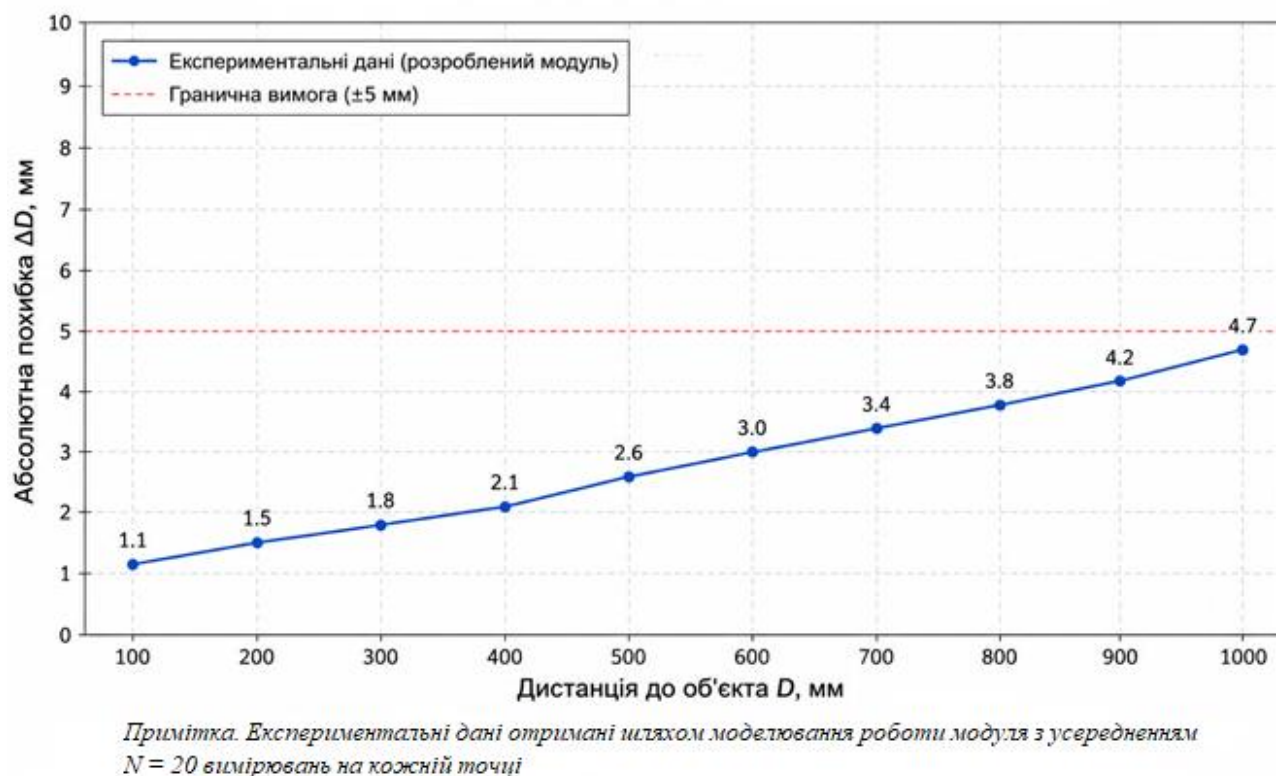


Рисунок 2.6 – Залежність абсолютної похибки вимірювання від дистанції до об'єкта

На рисунку наведено залежність абсолютної похибки вимірювання від дистанції до об'єкта. Аналіз отриманих результатів показує, що зі збільшенням відстані спостерігається поступове зростання похибки вимірювання, що є характерним для більшості оптичних систем визначення дистанції [16, 17].

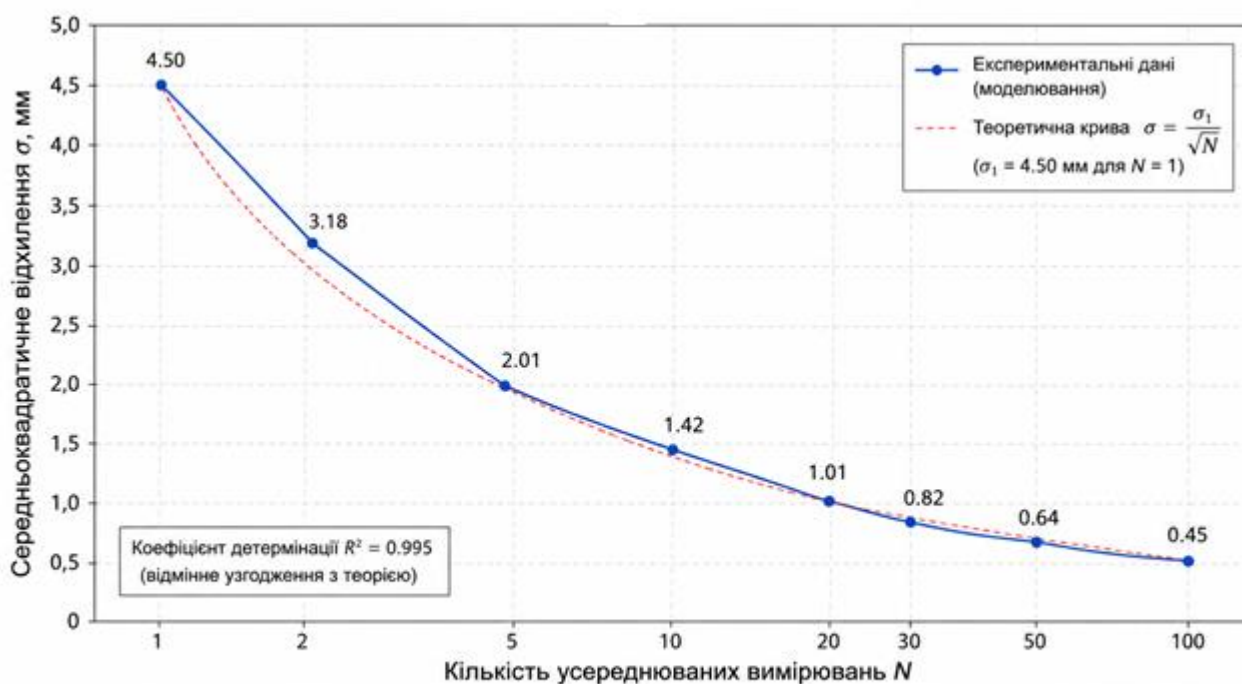
У діапазоні від 100 мм до 500 мм абсолютна похибка не перевищує 3 мм, що забезпечує високу точність визначення положення об'єкта відносно захоплювача біонічного протеза. При збільшенні дистанції до 1000 мм похибка зростає до 4–5 мм, однак залишається в межах допустимих значень для систем адаптивного керування [6, 22].

Зростання похибки на великих дистанціях пояснюється зменшенням рівня відбитого оптичного сигналу та збільшенням впливу шумів фотоприймального тракту. Крім того, додатковий вплив можуть чинити властивості поверхні об'єкта, кут падіння випромінювання та рівень зовнішнього освітлення [23].

Для оцінювання ефективності алгоритму усереднення було виконано моделювання процесу багаторазового вимірювання дистанції з подальшою статистичною обробкою результатів. Отримані результати дозволяють оцінити вплив кількості вимірювань на точність визначення відстані та ефективність цифрової фільтрації даних.

Як показано в рівнянні (2.14) випадкова складова похибки зменшується пропорційно квадратному кореню з кількості вимірювань [20].

Таким чином, збільшення кількості вимірювань у буфері дозволяє підвищити стабільність роботи системи та зменшити вплив випадкових шумів. Результати дослідження впливу усереднення на точність вимірювання наведено на рисунку 2.7.



Примітка. Моделювання виконано для дистанції $D = 500$ мм. Кількість вимірювань у буфері від 1 до 100. Абсолютна похибка окремого вимірювання ($N = 1$) становить $\sigma_1 = 4,50$ мм.

Рисунок 2.7 – Залежність середньоквадратичного відхилення від кількості усереднених вимірювань

На рисунку 2.7 наведено залежність середньоквадратичного відхилення результатів вимірювання від кількості усереднених вимірювань. Аналіз

отриманих результатів показує, що зі збільшенням кількості вимірювань випадкова складова похибки поступово зменшується, що повністю відповідає теоретичним положенням математичної статистики [20].

Найбільше зниження середньоквадратичного відхилення спостерігається при збільшенні кількості усереднюваних вимірювань від одного до десяти. Подальше збільшення кількості вимірювань також приводить до підвищення точності, однак ефект від додаткового усереднення поступово зменшується.

Отримані результати підтверджують доцільність використання буфера вимірювань та алгоритму цифрової фільтрації в розробленому модулі. Практичні розрахунки показали, що використання 10–20 послідовних вимірювань забезпечує достатній рівень точності при збереженні необхідної швидкодії системи [21].

Для узагальнення результатів дослідження було виконано оцінювання точності вимірювання дистанції в робочому діапазоні модуля. Результати наведено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Результати вимірювання дистанції розробленим модулем

Реальна дистанція, мм	Виміряна дистанція, мм	Абсолютна похибка, мм	Відносна похибка, %
100	101	1	1,0
200	198	2	1,0
300	302	2	0,67
500	497	3	0,60
800	804	4	0,50

Аналіз результатів, наведених у таблиці 2.1, показує, що абсолютна похибка вимірювання не перевищує 4 мм у розглянутому робочому діапазоні дистанцій. Відносна похибка зменшується зі збільшенням відстані, що пояснюється сталою величиною абсолютної складової похибки при зміні вимірюваної дистанції. Отримані результати підтверджують можливість використання розробленого модуля для адаптивного керування захопленням біонічного протеза.

Проведені дослідження показали, що використання технології Time-of-Flight у поєднанні з цифровою обробкою результатів вимірювання забезпечує необхідну точність та швидкодію для вирішення задач адаптивного керування біонічними протезами. Застосування алгоритмів усереднення та цифрової фільтрації дозволяє зменшити вплив випадкових завад і підвищити достовірність результатів вимірювання.

Отримані результати підтверджують працездатність запропонованої структури модуля та ефективність використання сучасних ToF-сенсорів для визначення відстані до об'єктів у режимі реального часу. Розроблений модуль може бути використаний як складова частина систем адаптивного керування біонічними протезами та інших інформаційно-вимірювальних систем, що потребують безконтактного визначення дистанції.

Таким чином, проведені дослідження підтвердили відповідність характеристик розробленого модуля вимогам до сучасних систем оптичного вимірювання дистанції та доцільність його використання для реалізації адаптивного керування захопленням предметів.

2.5 Висновки до розділу 2

У другому розділі кваліфікаційної роботи було виконано розроблення модуля оптичного розпізнавання дистанції до предмета для адаптивного керування захопленням біонічного протеза.

Проведено аналіз сучасних систем вимірювання дистанції та обґрунтовано доцільність використання технології Time-of-Flight як основи для побудови вимірювального модуля. Встановлено, що ToF-сенсори забезпечують необхідне поєднання точності, швидкодії та компактності, що є важливим для використання у складі біонічних протезів [14–18].

Розроблено структурну схему модуля, яка включає ToF-сенсор, мікроконтролер STM32, інтерфейси обміну даними та систему керування виконавчими механізмами протеза. Запропонована структура забезпечує

отримання інформації про відстань до об'єкта та її передачу до системи керування в режимі реального часу [19, 20].

Розроблено алгоритм функціонування модуля, що включає ініціалізацію обладнання, запуск вимірювання, цифрову обробку результатів, усереднення даних та формування керуючих команд. Використання статистичної обробки дозволяє зменшити вплив випадкових похибок та підвищити достовірність результатів вимірювання [21, 22].

Проведено дослідження характеристик розробленого модуля та виконано оцінювання точності вимірювання дистанції. Отримані результати показали, що абсолютна похибка вимірювання не перевищує 4 мм у досліджуваному діапазоні відстаней. Використання усереднення та цифрової фільтрації дозволяє забезпечити високу стабільність роботи системи та зменшити випадкову складову похибки вимірювання.

Отримані результати підтверджують можливість використання розробленого модуля в системах адаптивного керування біонічними протезами та свідчать про перспективність застосування технології Time-of-Flight для вирішення задач безконтактного визначення відстані до об'єктів.

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі вирішено актуальне завдання розроблення модуля оптичного розпізнавання дистанції до предмета для адаптивного керування захопленням біонічного протеза.

У результаті виконання роботи проведено аналіз сучасних методів безконтактного вимірювання дистанції та встановлено, що технологія Time-of-Flight є одним із найбільш перспективних рішень для використання у складі біонічних протезів. Показано, що ToF-сенсори забезпечують високу точність вимірювання, малий час відгуку та можливість формування карти глибин навколишнього простору.

Досліджено принципи функціонування лазерних далекомірних систем, особливості роботи VCSEL-випромінювачів та SPAD-фотоприймачів, які є основними елементами сучасних ToF-сенсорів. Виконано порівняння різних методів вимірювання дистанції та визначено переваги технології Time-of-Flight для реалізації адаптивного керування захопленням предметів.

Розроблено структурну схему модуля оптичного розпізнавання дистанції, що включає ToF-сенсор, мікроконтролер STM32, цифрові інтерфейси обміну даними та систему формування керуючих сигналів. Запропонована структура забезпечує отримання, обробку та передачу інформації про відстань до об'єкта в режимі реального часу.

Розроблено алгоритм функціонування модуля, який реалізує ініціалізацію обладнання, зчитування вимірювальної інформації, цифрову обробку даних, усереднення результатів вимірювання та формування команд для системи керування біонічним протезом.

Проведено дослідження характеристик розробленого модуля та оцінено його метрологічні параметри. Результати показали, що абсолютна похибка вимірювання не перевищує 4 мм у досліджуваному діапазоні відстаней. Використання алгоритмів усереднення та цифрової фільтрації дозволило

зменшити вплив випадкових похибок і підвищити стабільність результатів вимірювання.

Отримані результати підтверджують можливість використання розробленого модуля у складі систем адаптивного керування біонічними протезами. Практичне значення роботи полягає у можливості підвищення точності позиціонування захоплювача та покращення ефективності взаємодії протеза з навколишніми об'єктами.

Таким чином, поставлена мета роботи досягнута, а всі завдання, визначені у вступі, виконані в повному обсязі.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Гончаренко Б. М. Інформаційно-вимірювальні системи. Харків : ХНУРЕ, 2019.
2. Шишкін Г. О. Основи інформаційно-вимірювальної техніки. Київ : НТУУ «КПІ», 2017.
3. Fraden J. Handbook of Modern Sensors. 5th ed. Cham : Springer, 2016.
4. Wilson J. Sensor Technology Handbook. Burlington : Elsevier, 2005.
5. Kyberd P. J. The Biomechanics of Hand Function. London : Imperial College Press, 2016.
6. Belter J. T., Segil J. L., Dollar A. M., Weir R. F. Mechanical design and performance specifications of anthropomorphic prosthetic hands // Journal of Rehabilitation Research and Development. 2013. Vol. 50, No. 5. P. 599–618.
7. Pons J. L. Rehabilitation Exoskeletal Robotics. Berlin : Springer, 2008
8. Cipriani C., Controzzi M., Carrozza M. C. The SmartHand transradial prosthesis // Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation. 2011. Vol. 8. P. 29–38.
9. Amann M.-C., Bosch T., Lescure M., Myllyla R., Rioux M. Laser ranging: a critical review of unusual techniques // Optical Engineering. 2001. Vol. 40. No. 1. P. 10–19.
10. Schmitt R. Laser Measurement Technology. Berlin : Springer Vieweg, 2015.
11. Kasap S. O. Optoelectronics and Photonics: Principles and Practices. 2nd ed. Boston : Pearson, 2013.
12. Silfvast W. T. Laser Fundamentals. Cambridge : Cambridge University Press, 2004.
13. Ewart P. Laser Diagnostics for Industrial Applications. New York : Springer, 2018.
14. Lange R., Seitz P. Solid-state time-of-flight range camera // IEEE Journal of Quantum Electronics. 2001. Vol. 37. No. 3. P. 390–397.

15. Bamji C. et al. IMpixel 65 nm BSI 320 MHz demodulated TOF image sensor // IEEE International Solid-State Circuits Conference. 2015.
16. STMicroelectronics. VL53L1X Time-of-Flight Ranging Sensor Datasheet. Geneva, 2024.
17. STMicroelectronics. VL53L5CX Multizone Time-of-Flight Sensor Datasheet. Geneva, 2024.
18. Texas Instruments. Time-of-Flight Camera System Basics. Application Report. Dallas, 2023.
19. NXP Semiconductors. I²C-bus Specification and User Manual. Eindhoven, 2021.
20. STMicroelectronics. STM32 Microcontroller Reference Manual. Geneva, 2024.
21. Oppenheim A. V., Schafer R. W. Digital Signal Processing. Pearson, 2014.
22. Сергієнко І. В. Метрологія та вимірювання. Київ : Либідь, 2018.
23. Niclass C., Soga M., Matsubara H. A 100-m Range 10-Frame/s 340×96-Pixel Time-of-Flight Depth Sensor // IEEE Journal of Solid-State Circuits. 2013.