

Вінницький національний технічний університет
(повне найменування вищого навчального закладу)
Факультет інформаційних електронних систем
(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))
Кафедра інформаційних радіоелектронних технологій і систем
(повна назва кафедри (предметної, циклової комісії))

БАКАЛАВРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему:

«ЗАСІБ КОНТРОЛЮ ВІДСТАНІ МІЖ ОБ'ЄКТАМИ»

Виконав: студент 4-го курсу, групи КІВТ-216,
спеціальності 152 - Метрологія та інформа-
ційно-вимірювальна техніка, ОП Комп'ютеризо-
вані інформаційно-вимірювальні технології

(шифр і назва наряду підготовки, спеціальності)

Підлипний Я. С.
(прізвище та ініціали)

Керівник: к.т.н., доц., доцент каф. ІРТС

Дудатьєв І.А.
(прізвище та ініціали)

«12» 06 2025 р.

Рецензент: к.т.н., доц., доцент каф. ІКСТ

Семенова О. О.
(прізвище та ініціали)

«13» 06 2025 р.

Допущено до захисту

Завідувач кафедри ІРТС

д.т.н., проф. Осадчук О.В.
(прізвище та ініціали)

«10» 06 2025р

Вінницький національний технічний університет
Факультет Інформаційних електронних систем
Кафедра Інформаційних радіоелектронних технологій і систем
Рівень вищої освіти І-й (бакалаврський)
Галузь знань – 15 Автоматизація та приладобудування
Спеціальність – 152 Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка
Освітньо-професійна програма – Комп'ютеризовані інформаційно-вимірювальні технології

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ІРТС

д.т.н., проф. Осадчук О.В.

22.03. 2025 року

ЗАВДАННЯ НА БАКАЛАВРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Підлипньому Ярославу Сергійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Засіб контролю відстані між об'єктами.

Керівник роботи: Дудат'єв Ігор Андрійович, к.т.н., доц., доцент каф. ІРТС
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від 20.03.2025 року № 97

2. Строк подання студентом роботи «12» червня 2025 року

3. Вихідні дані до роботи: Фізичні сигнали від ультразвукового сенсора.

Відбиті сигнали на піні. Відстань в сантиметрах. Сигнал помилки. Дані подальшого аналізу.

4. Зміст текстової частини: Вступ. Особливості засобів контролю засобів відстані як об'єкта дослідження. Розробка сенсору контролю відстані між об'єктами. Фізико-математичне представлення розробленого пристрою. Аналіз метрологічних характеристик розробленого пристрою. Висновки. Список використаних джерел. Додатки.

5. Перелік ілюстративного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): Діаграма направленості HC-SR04. Розміри датчика HC-SR04. Блок-схема ультразвукового сенсора HC-SR04, що відображає взаємодію його основних компонентів. Проходження ультразвукової хвилі в часі. Діапазон функціонування вихідної та вхідної ультразвукової хвилі. Робота ультразвукового сенсора з вертикальною поверхнею. Блок-схема роботи ультразвукового засобу контролю відстані

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	виконання прийняв
Основна частина	к.т.н., доц., доцент каф. ІРТС Дудатьєв І. А.		

7. Дата видачі завдання: «25» березня 2025 року.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

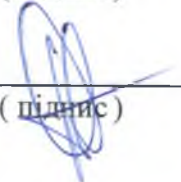
№ з/п	Назва етапів бакалаврської кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Приймка
1.	Вибір, узгодження та затвердження теми БКР	14.02.2025-28.02.2025	
2.	Огляд та аналіз літературних джерел.	01.03.2025-19.03.2025	
3.	Розробка завдання на БКР. Затвердження теми.	20.03.2025-25.03.2025	
4.	Попередня розробка основних розділів. Аналіз вирішення поставленої задачі. Розробка структурної схеми та технічних рішень.	26.03.2025-06.05.2025	
5.	Математичне моделювання та електричні розрахунки. Експериментальне дослідження.	07.05.2025-26.05.2025	
6.	Розробка ілюстративної частини БКР	27.05.2025-31.05.2025	
7.	Оформлення пояснювальної записки та ілюстративної частини.	02.06.2025-06.06.2025	
8.	Нормоконтроль	07.06.2025-10.06.2025	
9.	Попередній захист БКР, доопрацювання, рецензування БКР	11.06.2025-15.06.2025	
10.	Захист БДР ЕК	17.06.2025-18.06.2025	

Студент


(підпис)

Підліпній Я. С.

Керівник роботи


(підпис)

Дудатьєв І. А.

АНОТАЦІЯ

УДК 531.7.08

Підлипний Я.С. Засіб контролю відстані між об'єктами . Бакалаврська кваліфікаційна робота. – Вінниця: ВНТУ, 2025. – 84с. Українською мовою. Бібліогр.: 18 назв; рис.:32 ; табл.:5 .

У бакалаврській кваліфікаційній роботі досліджено принципи розробки та оптимізації засобу контролю відстані між об'єктами. Проаналізовано сучасні типи сенсорів (ультразвукові, інфрачервоні, лазерні), їхні конструктивні особливості, принципи роботи та метрологічні параметри. Особливу увагу приділено вибору оптимального сенсора HC-SR04 на основі порівняння діапазону, точності, стійкості до умов, вартості та енергоспоживання.

Розроблено структурну та функціональну схеми засобу на базі мікроконтролера Arduino Uno, реалізовано макет із виведенням результатів на семисегментний індикатор.

Проведено тестування макету в діапазоні 3–450 см, розроблено алгоритм обробки помилок вимірювань. Запропоновано рекомендації щодо калібрування та температурної компенсації для підвищення точності вимірювань у майбутніх системах.

Ключові слова: засіб вимірювання, відстань, метрологія, сенсор відстані, мікроконтролер, метрологічні характеристики.

ABSTRACTS

Pidlypnyi Y.S. Device of controlling the distance between objects. Bachelor's Thesis Vinnytsia. – VNTU, 2025. 84 p. In Ukrainian. Bibliography.: 18 titles; 3 fig; 5 tables;

The bachelor's thesis investigates the principles of development and optimization of a means of controlling the distance between objects. The modern types of sensors (ultrasonic, infrared, laser), their design features, operating principles, and metrological parameters are analyzed. Particular attention is paid to the selection of the optimal HC-SR04 sensor based on a comparison of range, accuracy, resistance to conditions, cost, and power consumption.

The structural and functional diagrams of the device based on the Arduino Uno microcontroller were developed, and the layout with the results displayed on a seven-segment indicator was implemented.

The model was tested in the range of 3-450 cm, an algorithm for processing measurement errors was developed. Recommendations for calibration and temperature compensation to improve the accuracy of measurements in future systems are proposed.

Keywords: measuring device, distance, metrology, distance sensor, microcontroller, metrological characteristics.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
1 ОСОБЛИВОСТІ ЗАСОБІВ КОНТРОЛЮ ВІДСТАНІ ЯК ОБ’ЄКТА ДОСЛІДЖЕННЯ.....	10
1.1 Фізичне представлення сенсорів контролю відстані між об’єктами	10
1.2 Принцип роботи сенсорів контролю відстані між об’єктами	11
1.3 Вибір оптимального сенсору контролю відстані.....	20
1.4 Висновки до розділу.....	25
2 РОЗРОБКА СЕНСОРУ КОНТРОЛЮ ВІДСТАНІ МІЖ ОБ’ЄКТАМИ...26	
2.1 Розробка структурної схеми засобу контролю відстані між об’єктами	26
2.2 Розробка функціональної схеми засобу контролю відстані між об’єктами ..	31
2.2 Реалізація макету ультразвукового сенсору на мікроконтролерній платформі Arduino Uno.....	33
2.4 Опис програмної частини.....	38
2.5 Висновки до розділу.....	40
3 ФІЗИКО-МАТЕМАТИЧНЕ ПРЕДСТАВЛЕННЯ РОЗРОБЛЕНОГО СЕНСОРУ	41
3.1 Фізичний принцип роботи розробленого пристрою.....	41
3.2 Розробка рівняння перетворення.....	48
3.3 Висновки до розділу	58
4 АНАЛІЗ МЕТРОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК РОЗРОБЛЕНОГО ЗАСОБУ КОНТРОЛЮ ВІДСТАНІ МІЖ ОБ’ЄКТАМИ	59
4.1 Теоретичні основи метрологічного аналізу	59
4.2 Аналіз метрологічних характеристик сенсора на базі HC-SR04 та Arduino Uno.....	63
4.3 Експериментальне дослідження точності пристрою.....	66
4.4 Апаратні та програмні методи для покращення приладу.....	70
4.5 Висновки до розділу.....	71
ВИСНОВКИ.....	72

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	73
Додаток А (обов'язковий) Ілюстративний матеріал.....	75
Додаток Б (обов'язковий). Протокол перевірки бакалаврської кваліфікаційної роботи	80
Додаток В (довідниковий). Лістинг програми	82

ВСТУП

Актуальність.

Далекомір – пристрій, що використовується для визначення відстані без вимірювання її прямо на місцевості чи у просторі. Щорічно у світі створюється велика кількість приладів для визначення відстані між об'єктами, що є ключовими в таких сферах, як будівництво, інженерія, геодезія, військова галузь, навігація, астрономія. Ефективне визначення відстані є критично важливим для забезпечення точності, безпеки та ефективності в зазначених галузях.

Зі зростанням вимог до точності, дальності, швидкості вимірювання, далекоміри зазнають постійного вдосконалення. Сучасні моделі характеризуються високою роздільною здатністю, частотою оновлення та функціональною гнучкістю. Еволюція далекомірів стала рушієм створення вузькоспеціалізованих приладів, адаптованих до конкретних завдань.

Сучасні прилади для вимірювання відстані потребують високої щільності електронних компонентів, таких як мікроконтролери, резистори, мікросхеми, датчики фізичних величин тощо. Підвищення вимог до компактності пристроїв вимагає зростання рівня інтеграції та ефективної організації внутрішньої електронної архітектури.

Кожен компонент у складі пристрою проходить тестування з метою підтвердження відповідності технічним характеристикам. Це дозволяє запобігти технічним несправностям під час експлуатації та забезпечити відповідність стандартам якості.

Сучасні напрями розвитку передбачають мініатюризацію далекомірів і їхню інтеграцію в інші пристрої. Удосконалюються алгоритми обробки даних та програмне забезпечення, що дозволяє ефективно аналізувати отриману інформацію і використовувати її в режимі реального часу.

Таким чином, розробка засобу для вимірювання відстані є надзвичайно актуальною темою, яка поєднує сучасні досягнення електроніки, сенсорних технологій і програмної інженерії для забезпечення точності, зручності й надійності вимірювань.

Метою роботи є розробка засобу для контролю відстані між об'єктами на базі логічного контролера Arduino та ультразвукового сенсору, з індикацією результатів.

Для досягнення поставленої мети в роботі сформульовані та вирішені такі задачі:

- Проаналізовано особливості засобів контролю відстані, включно з його фізичними представленням, принципом роботи та критерієм вибору оптимального сенсора.
- Розроблено структурну та функціональну схеми пристрою на базі Arduino Uno та ультразвукового сенсора HC-SR04.
- Сформовано фізико-математичне представлення роботи сенсора, включаючи рівняння перетворення для розрахунку відстані.
- Проведено експериментальний аналіз метрологічних характеристик пристрою.

Об'єктом дослідження в роботі є процес вимірювання відстані між об'єктами за допомогою ультразвукових сенсорних технологій у лабораторних і побутових умовах.

Предметом дослідження є ультразвукові методи вимірювання відстані та побудова пристрою, що реалізує вимірювання відстані та обробку сигналу з відображенням на індикаторі.

Методи дослідження. У роботі були використані методи теорії вимірювань, аналізу метрологічних характеристик, мікропроцесорної техніки, математичної статистики та комп'ютерного моделювання в середовищі Tinkercad. Теоретичні розрахунки, включаючи виведення рівняння для обчислення відстані та аналіз похибок, поєднувалися з практичною реалізацією структурної та функціональної схем, програмуванням мікроконтролера Arduino Uno та експериментальною перевіркою точності й стабільності результатів вимірювань.

Практичне значення одержаних результатів.

У роботі отримані такі практичні результати:

1. Розроблено структурну та функціональну схеми засобу контролю відстані на основі ультразвукового сенсора HC-SR04, які можуть бути використані як основа для створення реального пристрою для вимірювання відстані в лабораторних, побутових та промислових умовах.

2. Реалізовано програмне забезпечення для мікроконтролера Arduino Uno (ATmega328P), яке забезпечує зчитування сигналу з ультразвукового сенсора, його обробку, розрахунок відстані та виведення результатів на семисегментний індикатор TM1637. Це дозволяє використовувати прилад як автономний вимірювальний модуль.

3. Визначено основні метрологічні характеристики засобу: діапазон вимірювання (2–400 см), чутливість, абсолютну та відносну похибки, роздільну здатність (3 мм). Це дає змогу оцінити точність приладу та адаптувати його для специфічних завдань.

4. Проведено технічне обґрунтування вибору ультразвукового сенсора HC-SR04 та методів обробки сигналу, що дозволяє інтегрувати систему в системи автоматизації, робототехніки чи паркувальні системи для моніторингу відстані між об'єктами.

5. Розроблений засіб може бути використаний у навчальному процесі для демонстрації принципів ультразвукової ехолокації, а також у практичних курсах із електроніки, метрології, програмування мікроконтролерів та автоматизованих систем.

Особистий внесок здобувача.

Основні положення та результати, що представлені в роботі, одержані автором самостійно.

1 ОСОБЛИВОСТІ ЗАСОБІВ КОНТРОЛЮ ВІДСТАНІ ЯК ОБ'ЄКТА ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1 Фізичне представлення сенсорів контролю відстані між об'єктами

Вимірювання відстані між об'єктами має першорядне значення у різних сферах техніки. Це стосується як промислової автоматизації, так і робототехніки, транспорту та навіть звичайних побутових приладів. Усі ці системи потребують високоточних, стабільних та гнучких інструментів, що швидко реагують на зміни просторового розміщення об'єктів. Відтак, сенсори для вимірювання відстані – це не просто додатковий компонент, а ключовий елемент, навколо якого будується вся функціональність пристрою чи системи [1-2]

Фізичне представлення сенсорів для вимірювання відстані, базується на комплексному відображенні їхньої конструктивної архітектури, матеріалів, фізичних принципів взаємодії з навколишнім середовищем та інтегруванні апаратно-програмних складових, що дозволять проводити точний вимір відстані шляхом генерування, передачі, відбиття та прийому сигналів [1-3]. Типовий сенсор міститься в щільно-захищеному корпусі, що забезпечує стійкість до механічних пошкоджень та впливу зовнішніх чинників. При створенні корпусу беруть в увагу сферу застосування цього датчика: для промислових задач корпус виготовляють з металу або з термостійкого пластику, у побутових сенсорах – з легких полімерних матеріалів [1].

Щоб розмістити самий сенсор в корпусі або ж системі обумовлюється вимогами до поля зору, точності, дальності та кута виявлення об'єкта [2].



Рисунок 1.1 – Промисловий сенсор для вимірювання відстані

Сенсори можуть інтегровані у складні системи автоматичного керування, промислові контролери, роботизовані комплекси або мобільні пристрої.

Відповідно до вимог точності та дальності вимірювання, використовується різні фізичні принципи дії сенсорів, які визначають як їхню форму, так і спосіб монтажу.

1.2 Принцип роботи сенсорів контролю відстані між об'єктами

Дія більшості датчиків контролю відстані між об'єктами базується на фізичному явищі випромінювання та приймання сигналів [1-2].

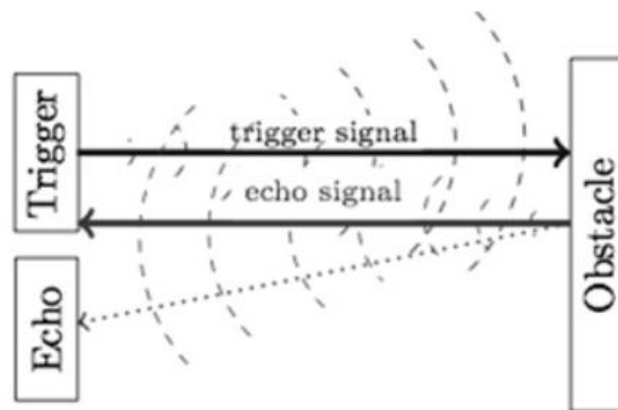


Рисунок 1.2 – Схема принципу дії вимірювальних датчиків

Основою цього процесу є генерування певного виду сигналу (акустичного, оптичного, електромагнітного тощо), що спрямовується до ймовірного цілі. Цей сигнал розповсюджуючись у просторі, реагує з об'єктом, який перебуває у зоні дії сенсора і, в результаті цієї взаємодії, частково або повністю відбивається назад до джерела випромінювання. Тобто вимірюється інтервал часу між моментом емісії та моментом фіксації відбитого сигналу [1]. Найпоширенішою технологією яка використовує цей метод є Time of Flight (ToF), яка стосується здебільшого тих датчиків які працюють зі світлом [1-2].

Формула для обчислення відстані:

$$d = \frac{v \cdot \Delta t}{2}, \quad (1.1)$$

де: d – відстань до об'єкта, v – швидкість поширення сигналу в середовищі (звук, світло тощо), Δt – вимірний час проходження сигналу в обидва боки.

Для реалізації цього принципу необхідні наступні компоненти:

- Емітер (випромінювач) – випромінює фізичний сигнал (ультразвук, інфрачервоне світло, лазер).
- Ресівер (приймач) – приймає сигнал після його відбиття від об'єкта.
- Обробник сигналу – аналізує час проходження сигналу та обчислення відстані, здебільшого це мікроконтролер [1-3].

Отримані дані інтерпретуються процесором або мікроконтролером, який передає інформацію у вигляді аналогового або цифрового сигналу до зовнішньої системи керування або відображення, через різні типи інтерфейсів: UART, I2C, SPI [3].

Електронні компоненти розміщуються на друкованій платі, яка з'єднує емітер, ресівер та мікроконтролер або інтерфейс обробки сигналів [1].

На Рисунку 1.3 зображено узагальнену конструкцію сенсора контролю відстані.

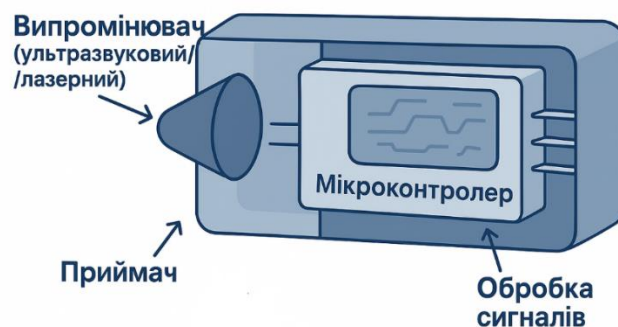


Рисунок 1.3 – Конструкція сенсора відстані

Таблиця 1.1 – Основні функції компонентів сенсору

Компонент	Основна функція
Випромінювач(емітер)	Створення або генерація сигналу, що використовується для вимірювання
Приймач(ресівер)	Приймає відбитий сигнал після його взаємодії з об'єктом
Мікроконтролер	Обробка даних та обчислень
Корпус	Захист від механічних пошкоджень

Цей метод забезпечує чітке визначення просторового положення об'єкта незалежно від кольору, текстури або матеріалу поверхні [1]. Сьогоденні прилади також містять функції компенсації зовнішніх факторів(температури, освітлення, шуму), що підвищує стабільність та точність вимірювання [5].

З огляду на це, сенсори розділяють на декілька основних типів, кожен з яких має свої переваги, обмеження та області застосування. Найбільш поширеними серед них є ультразвукові, інфрачервоні та лазерні(оптичні), всі вони реалізують той самий базовий принцип – передача сигналу, його відбиття від об'єкта та аналіз проходження - але на основі різних фізичних явищ [1-2].

1.2.1 Ультразвуковий сенсор

Ультразвукові сенсори відстані сконструйовані для безконтактного вимірювання відстані до об'єктів у різних середовищах. Їхній принцип дії базується на основі ефекту відлуння, аналогічного тому як це відбувається у природі – у кажанів та морських ссавців, таких як дельфіни [1-11]. Такі датчики генерують звукові хвилі, частота яких перевищує межу сприйняття людським вухом(понад 18 кГц), що дозволяє їм ефективно взаємодіяти з об'єктами без впливу на навколишнє середовище [4-13].

Принцип роботи.

Робота ультразвукових сенсорів ґрунтується на вимірюванні часу проходження звукової хвилі від датчика до об'єкта і назад.

Ультразвуковий передавач випускає звукову хвилю частотою більше 18 кГц яка рухається в повітрі зі швидкістю 344 м/с за температури 20°C. Після відбиття від об'єкта хвиля повертається до приймача, який фіксує час її повернення [1-4].

Відстань (d) до об'єкта обчислюється за формулою:

$$d = \frac{v \cdot \Delta t}{2}, \quad (1.2)$$

Де v – швидкість звуку, 344 м/с,

Δt – час проходження хвилі туди і назад.

Діапазон вимірювання таких датчиків зазвичай становить від кількох сантиметрів до кількох метрів залежно від моделі та умов експлуатації.

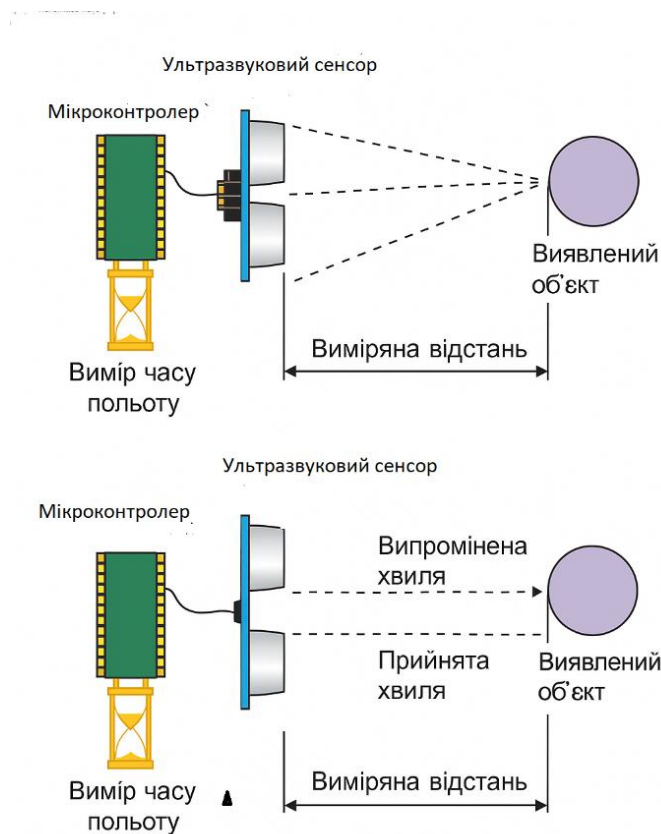


Рисунок 1.4 – Принцип роботи ультразвукового сенсору

Конструкція ультразвукових сенсорів.

Ультразвукові сенсори складаються з передавача та приймача, або трансивера, який може як надсилати, так і приймати ультразвукові хвилі. Передавач зазвичай базується на п'єзоелектричних кристалах, які генерують звукові хвилі при подачі електричного сигналу. Приймач, часто також п'єзоелектричний елемент, перетворює відбиті звукові хвилі назад в електричний сигнал для аналізу [1-3]. У деяких моделях передавач та приймач об'єднані в єдиний трансивер, що зменшує розміри датчика. Електронна схема, що включає мікроконтролер, є в свою чергу обробником сигналів та обчислює відстань [3-13].



Рисунок 1.5 – Структура ультразвукового сенсору



Рисунок 1.6 – Загальний вигляд ультразвукового сенсору HC-S04

1.2.2 Інфрачервоний сенсор

Інфрачервоний сенсор (ІЧ-датчик) – це безконтактний електронний пристрій, створений для визначення відстані до об'єкта за допомогою інфрачервоного випромінювання. У порівнянні зі звичайними механічними чи оптичними датчиками, ІЧ-датчик забезпечує точні та швидкі вимірювання відстані без потреби фізичного контакту [1-3]. Це значно зменшує знос деталей та підвищує довговічність обладнання.

ІЧ-сенсор є незамінною складовою сучасних автоматизованих систем. Вони використовуються в багатьох сферах: від побутової електроніки до робототехніки, охоронних сигналізацій, промислових ліній виробництва, транспортних систем та багато іншого [2].

Основним призначенням інфрачервоного датчика є виявляти наявність об'єкта та вимірювати відстань до нього. Пристрій може функціонувати як в аналоговому режимі (генеруючи сигнал, пропорційний відстані), так і в цифровому (видаючи логічний рівень при перевищенні/недосягненні певного значення). Це дозволяє інтегрувати датчики у різноманітні мікроконтролерні та логічні системи [3].

Принцип роботи.

Робота ІЧ-сенсору базується на оптичному методі триангуляції, тобто на геометричному аналізі трикутника, утвореного між емітером, об'єктом та приймачем.

ІЧ-промені відбиваються під певним кутом, і залежно від положення точки відбиття на приймачі, сенсор обчислює відстань. Цей метод є найбільш точним і менше залежить від властивостей поверхні, і робить його універсальним для різних застосувань [1-2].

Алгоритм виглядає наступним чином:

- Випромінювач (ІЧ-світлодіод) випромінює інфрачервоне світло в напрямку об'єкта.

- Світло, відбившись від поверхні об'єкта, повертається до сенсора.
- Приймач(фотодіод/фототранзистор) реєструє повернений сигнал
- Сигнал передається на блок обробки, який використовує геометрію трикутника(з кутом падіння/відбиття) для обрахування відстані(d) за формулою:

$$d = \frac{b \cdot f}{\Delta x}, \quad (1.3)$$

де b – відстань між емітером та приймачем(базова лінія), f - фокусна відстань лінзи приймача, Δx – зміщення точки відбиття на сенсорі приймача.

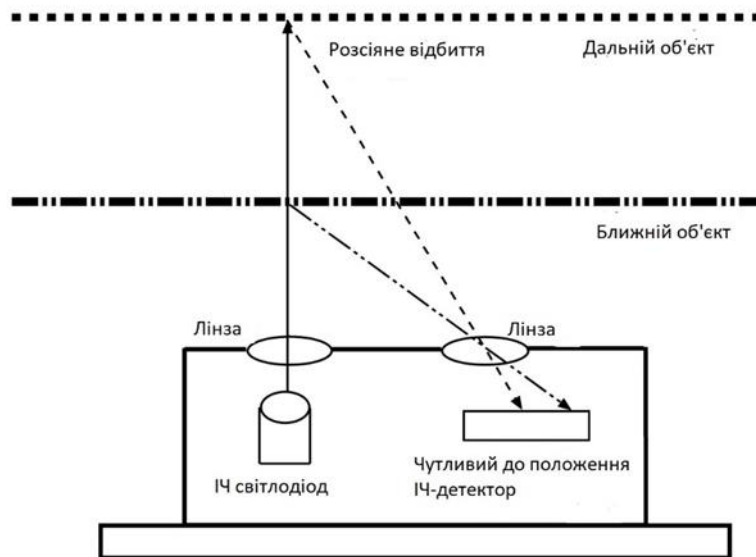


Рисунок 1.7 – Принцип роботи інфрачервоного датчика

Конструкція сенсора.

Випромінювач і приймач(фотодетектор) розташовані на деякій відстані один від одного, які утворюють базову лінію, що дозволяє створювати трикутник для геометричних обчислень[1-3].

. Для підвищення точності системи застосовуються:

- колімаційні лінзи – формують вузький пучок випромінювання, що зменшує розсіювання;
- інтерференційні фільтри – відсікають завадливі довжини хвиль, пропускаючи лише робочий діапазон (наприклад, 850–950 нм для ІЧ-датників);
- апертурні діафрагми – обмежують поле зору приймача, зменшуючи вплив розсіяного світла.



Рисунок 1.8 – Конструкція та загальний вигляд ІЧ-сенсора Sharp

1.2.3 Лазерний сенсор(LIDAR-сенсор)

LIDAR(Light Detection and Ranging) – це сучасна технологія для без контактного вимірювання відстані, яка використовується в різних сферах, таких як автономний транспорт, геодезія та робототехніка[2].

Даний сенсор використовує лазерне випромінювання для визначення відстані до предмета та створення тривимірних карт простору. Назва походить від поняття «Light Detection and Ranging», яка означає його можливість виявлення об'єкту за допомогою світла [1-2]. Ці сенсори відомі своєю точністю та досить широким діапазоном вимірювання.

Принцип роботи.

Робота LIDAR-сенсора базується на методі Time-of-Flight(ToF). Датчик випромінює короткі лазерні імпульси, які відбиваються від об'єкта і повертаються до приймача.

Час, за який імпульс проходить від випромінювача до об'єкта і назад, фіксується, а відстань(d) обчислюється за формулою:

$$d = \frac{c \cdot \Delta t}{2}, \quad (1.4)$$

де c – швидкість світла (приблизно 299 792 км/с), Δt – час проходження імпульсу

Діапазон вимірювання залежить від потужності лазера і може сягати від кількох метрів до кількох кілометрів, а точність сягає субміліметрового рівня [1-2].

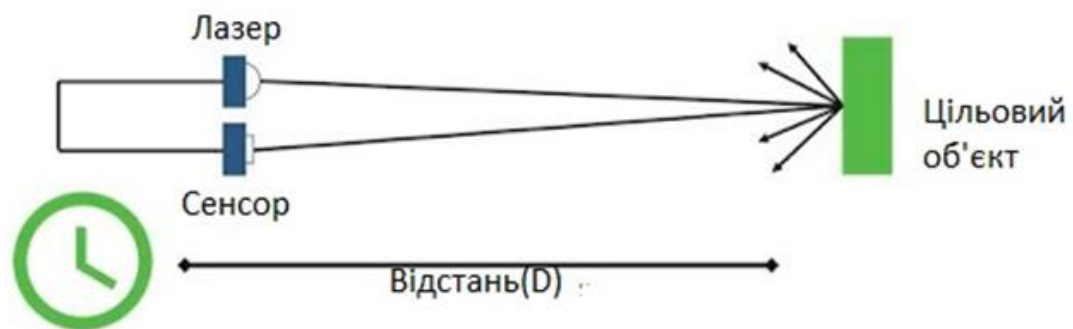


Рисунок 1.9 – Принцип роботи LIDAR-сенсора

Конструкція LIDAR-сенсора складається з кількох ключових елементів, які безпосередньо забезпечують його безперебійну роботу. Базовими елементами такого сенсора є лазерний емітер, приймач, система для сканування та мікроконтролер для обробки даних.

Лазерний емітер, частіше всього напівпровідниковий лазер, генерує імпульси світла в оптичному діапазоні(600 – 1000 нм). Він оснащений лінзами для

фокусування променя. Приймач, зазвичай лавинний фотодіод (APD), фіксує відбиті імпульси та здійснює перетворення їх в електричний сигнал [1-3]. Лавинний фотодіод – напівпровідниковий елемент, який надзвичайно чутливий до слабких променів. Він працює так, що ко фотон потрапляє в нього, він створює ланцюгову реакцію, яка здійснює підсилення сигналу. Система сканування, може включати в себе обертальні дзеркала або мікроелектромеханічні системи (MEMS), забезпечує поле зору до 360° , що дає змогу створити тривимірні карти [2]. Електронна схема з потужним мікропроцесором обробляє дані, обчислює відстані та формує 3D-модель [3].



Рисунок 1.10 – Загальний вигляд LIDAR – сенсору TF-Luna

1.3 Вибір оптимального сенсору контролю відстані

Щоб обрати оптимальний пристрій для нашого засобу, нам потрібно врахувати кілька важливих характеристик та умов для застосування, в яких він буде працювати.

В першу чергу, зосереджусь на таких ключових параметрах, як діапазон вимірювання, який визначає максимальну та мінімальну відстань, на які пристрій може точно працювати, що є особливо важливим для задач із різною геометрією простору, наприклад промислові зони чи паркувальні системи. Далі зверну увагу на точність вимірювання, яка показує мінімальну похибку сенсора і чи є вона критичною. Окрім того, потрібно врахувати стійкість до зовнішніх умов, вплив погодних факторів.

Важливим аспектом також є вартість даних сенсорів, що визначає їхню доступність для нашого засобу, а також енергоспоживання, яке дає вплив на автономність пристрою, коли є потреба застосування засобу в різних умовах, де немає постійного живлення.

Ідеальним варіантом для нашого пристрою буде бюджетний та універсальний датчик, на який мінімально впливають погодні умови.

1.3.1 Аналіз сенсорів

Розглянемо характеристики трьох датчиків, які базуються на різних типах вимірювання. Лазерний - TF-LUNA, інфрачервоний- Sharp GP2Y0A21YK, та ультразвуковий – HC-S04.



Рисунок 1.11 – Загальне фото сенсорів TF-Luna, Sharp GP2Y0A21YK, HC-SR04

Характеристики сенсорів.

TF-Luna(лазерний сенсор, метод Time-of-Flight).

- Діапазон вимірювання: Від 0.2 до 12м(20-1200 см),придатний для задач із великими відстанями, таких як дрони.

- Точність: ± 1 см при відстанях до 8 м, зі можливим відхиленнями до ± 2 см на більших відстанях, забезпечуючи високу точність.
- Стійкість до умов: Чутливий до погодних умов(туман, дощ, сніг) і до прозорих або темних поверхонь.
- Вартість: Висока через складність лазерної технології.
- Енергоспоживання: Низьке, приблизно 0,1 Вт (20мА при 5 В), але потребує додаткових ресурсів для обробки даних.

Sharp GP2Y0A21YK(іч-сенсор, триангуляційний метод).

- Діапазон вимірювання: від 10 до 80 см, обмежений для задач із малими відстанями.
- Точність: ± 2 -5 см, залежить від кольору й текстури поверхні об'єкта.
- Стійкість до умов: Чутливий до яскравого світла(сонячного), але не залежить від погоди
- Вартість: Середня, доступніша за TF-Luna, але дорожчий за HC-SR04.
- Енергоспоживання: Низьке, близько 30 мА при 5В.

HC-SR04 (ультразвуковий сенсор).

- Діапазон вимірювання: Від 2 до 400 см, достатній для паркування чи промислових систем
- Точність: $\pm 0,3$ - 1 см, із можливими похибками ± 3 см через температуру.
- Стійкість до умов: Стійкий до кольору, блиску та прозорості, але чутливий до температури й вологості
- Вартість: Низька, найдешевший серед трьох сенсорів.
- Енергоспоживання: Середнє близько,15 мА при 5В.

Ультразвуковий сенсор HC-SR04 забезпечує вимірювання відстані в діапазоні 2–400 см з точністю $\pm 0,3$ –1 см і середнім енергоспоживанням 15 мА при 5 В, але чутливий до температури та вологості; лазерний TF-Luna працює в діапазоні 20–1200 см з точністю ± 1 –2 см і низьким енергоспоживанням 0,1 Вт, однак має високу вартість і чутливість до погодних умов; інфрачервоний Sharp GP2Y0A21YK вимірює відстані 10–80 см з точністю ± 2 –5 см, низьким енергоспоживанням 30 мА, але залежить від освітлення.

Таблиця 1.2 – Порівняння характеристик сенсорів

Параметр	TF-Luna (Лазерний)	Sharp (Інфрачервоний)	HC-SR04 (Ультразвуковий)
Діапазон(см)	20-1200	10-80	2-400
Точність(см)	±1	±2-5	±0,3-1
Стійкість до умов	Чутливий до по- годи	Чутливий до сві- тла	Стійкий до ко- льору, залежить від температури
Вартість	Висока	Середня	Низька
Енергоспожи- вання	Низьке(0,1 Вт)	Низьке (30 мА)	Середнє (15мА)

1.3.2 Оцінка сенсорів.

Виставлені бали сенсорам ґрунтуються на оцінюванні за п'ятьма ключовими параметрами: діапазоном вимірювання, точністю, стійкістю до зовнішніх умов, вартістю та енергоспоживанням. Діапазон характеризує межі значень, які може фіксувати сенсор. Точність відображає ступінь наближення виміряного значення до реального. Стійкість до умов визначає здатність сенсора працювати в змінному або несприятливому середовищі. Вартість враховує економічну ефективність сенсора при порівнянні з аналогами. Енергоспоживання вказує на кількість електроенергії, яку споживає сенсор під час роботи. Оцінювання кожного з параметрів проводиться за трьохбальною шкалою: 3 бали відповідають найкращому показнику, 2 бали — середньому рівню, 1 бал — найгіршому показнику ефективності.

Таблиця 1.3 – Оцінка сенсорів

Параметри	TF-Luna	Sharp	HC-SR04
Діапазон вимірю- вання(см)	3	1	2
Точність(см)	3	1	2
Стійкість до умов	1	2	3
Вартість	1	2	3
Енергоспоживання	1	1	2

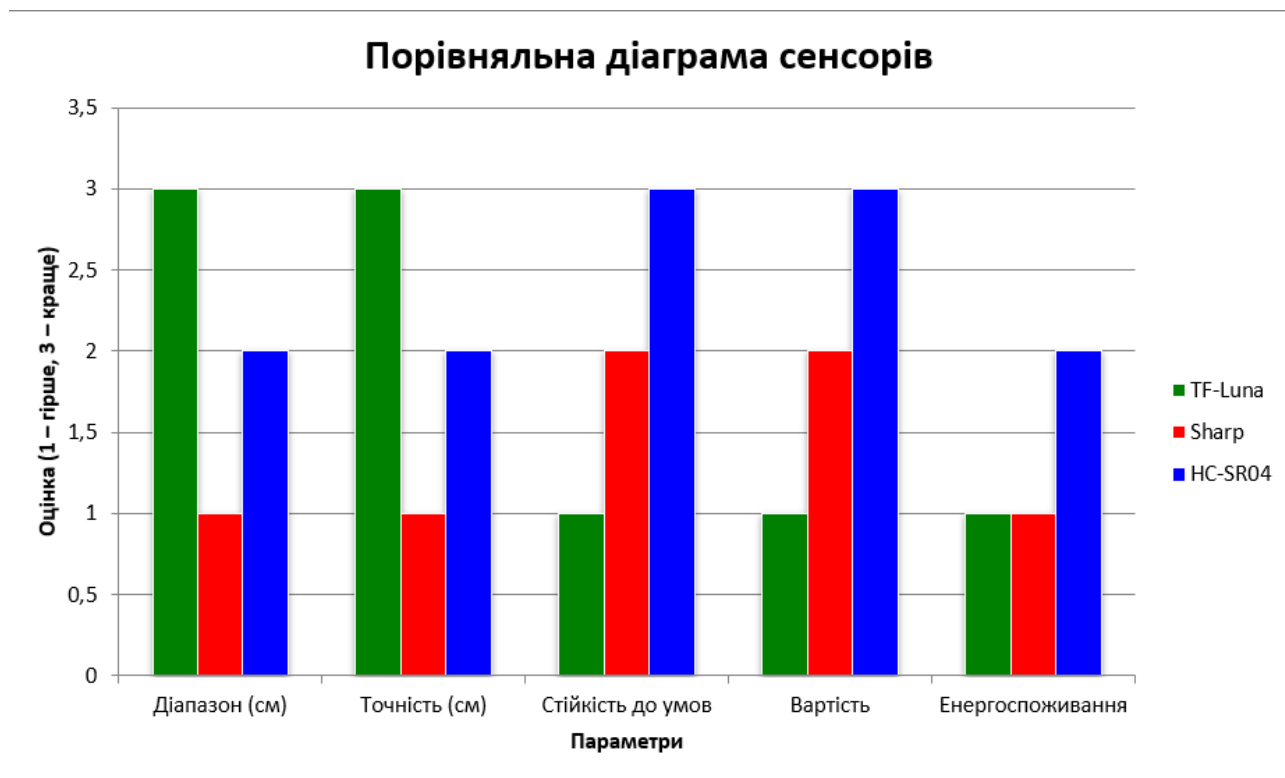


Рисунок 1.12 – Гістограма для візуального пояснення оцінок сенсорів

1.3.3 Аналіз оцінок сенсорів.

HC-SR04 отримав загальну оцінку яка робить його найкращим вибором для нашого засобу. Він має низьку ціну, що є великою перевагою для бюджетних проєктів. Є стійким до більшості умов, та має достатній діапазон для великої кількості задач. Енергоспоживання також є прийнятним.



Рисунок 1.13 – HC-SR04 , обрано як оптимальний сенсор

1.4 Висновки до розділу

У першому розділі проведено ґрунтовний аналіз засобів контролю відстані між об'єктами, що дозволило сформуванати цілісне уявлення про сучасні технології вимірювання відстані, їхні фізичні принципи, конструктивні особливості та метрологічні характеристики.

Дослідження охопило три основні типи сенсорів: ультразвукові, інфрачервоні та лазерні, кожен із яких має унікальні переваги, обмеження та сфери застосування.

Детально розглянуто фізичне представлення сенсорів, зокрема їхню конструктивну архітектуру, матеріали корпусу, принципи взаємодії з навколишнім середовищем та інтеграцію апаратно-програмних компонентів.

Особливу увагу приділено принципам роботи сенсорів, які базуються на вимірюванні часу проходження сигналу (ультразвукового, оптичного чи електромагнітного) від емітера до об'єкта і назад. Для кожного типу сенсорів наведено відповідні формули обчислення відстані, що враховують швидкість поширення сигналу в середовищі та час затримки.

Проведено порівняльний аналіз характеристик трьох сенсорів: HC-SR04 (ультразвуковий), Sharp GP2Y0A21YK (інфрачервоний) та TF-Luna (лазерний).

Для оцінки сенсорів використано п'ятибальну шкалу за параметрами діапазону, точності, стійкості до умов, вартості та енергоспоживання, що дозволило систематизувати їхні сильні та слабкі сторони.

Таким чином, у розділі сформовано теоретичну базу для подальшої розробки засобу контролю відстані. Отримані результати створюють основу для практичної реалізації пристрою, зокрема вибору оптимального сенсора та методів обробки сигналів у наступних етапах дослідження.

2 РОЗРОБКА СЕНСОРУ КОНТРОЛЮ ВІДСТАНІ МІЖ ОБ'ЄКТАМИ

2.1 Розробка структурної схеми засобу контролю відстані між об'єктами

Структурна схема, є графічним відображенням, яке відображає ключові аспекти організації та функціонування технічної системи. Вона виступає візуальним посібником для представлення архітектури пристрою, показуючи його базові функціональні частини та принципи їхньої взаємодії.

Основна перевага структурної схеми полягає в її здатності зосередитись на логіці роботи системи. Вона чітко відокремлює різні рівні функціонування пристрою, що дає змогу побачити як між собою взаємодіють різні модулі пристрою.

Кожен блок схеми представляє певний функціональний елемент, взаємозв'язки між ними демонструють потоки даних.

Важливою рисою структурної схеми є її масштабованість. Вона може бути як загальною, яка показує лише основні компоненти, так і детальною, яка розкриває внутрішню структуру окремих блоків, що робить її досить гнучкою на всіх етапах розробки.

2.1.1 Опис основних блоків системи

Мікроконтролер, це так званий «мозок» системи що займається отриманням інформації із сенсора, обробкою цих даних та ухваленням рішень про подальші дії(скажімо передавання сигналу, відображення на дисплеї, запуск виконавчих механізмів та інше) [4-10]. Найчастіше для проєктів використовують мікроконтролерну платформу Arduino(Uno, Nano, Mega). Їхня популярність застосування обумовлена простотою їх програмування, підтримкою різноманітних периферійних пристроїв.

Для нашого засобу ми обрали платформу Arduino Uno R3 на основі мікроконтролера Atmega328P.

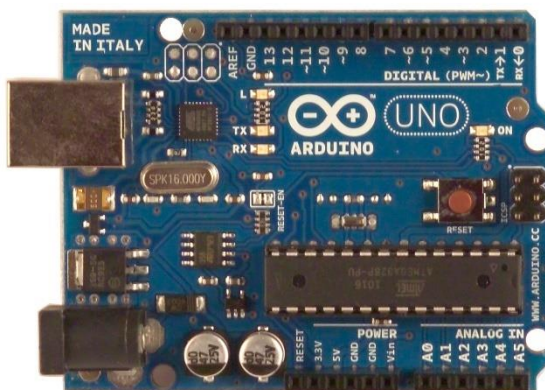


Рисунок 2.1 – Arduino Uno R3 - вигляд спереду

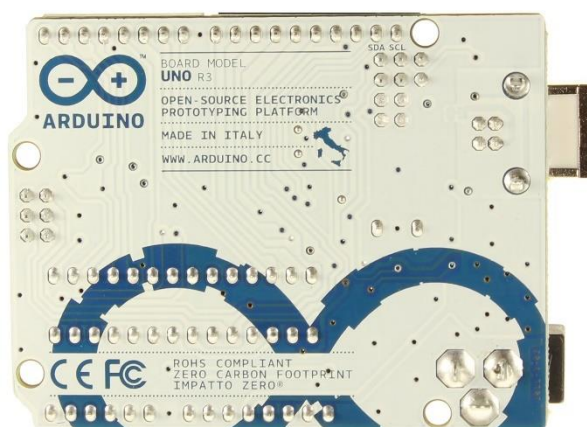


Рисунок 2.2 – Arduino Uno R3 - вигляд ззаду

Характеристики:

- Мікросхема: Atmega328P.
- Робоча напруга мікроконтролера:
- Вхід USB: 5В.
- Вхід VCC: 5В.
- Вхід Vin: 5 В.
- Цифрових входів/виходів: 14(6 з них ШІМ)
- Аналогові входи: 6.
- Інтерфейси:
- I2C/TWI
- SPI

- PWM
- Флеш-пам'ять програм : 32 КБ.
- Оперативна пам'ять: 2 КБ.
- Частота 16МГц

Датчик відстані.

Основна задача щодо визначення відстані в системі буде виконувати ультразвуковий HC-SR04. Має простий інтерфейс – два виводи живлення, один вхід та один вихід.

- VCC:+ живлення 5В
- TRIG(T): вивід вхідного сигналу.
- ECHO(R): вивід вихідного сигналу.
- GND: нульовий потенціал або заземлення.
-



Рисунок 2.3 – Розпіновка HC-SR04

Вивід інформації здійснюватиметься на семисегментний індикатор на базі драйвера TM1637. Це чотирьох розрядний семисегментний індикатор. Кількість розрядів – це по суті кількість цифр, які може вивести модуль. Для того щоб вивести символи або цифри, використовується сім світлодіодів, які мають індекси A, B, C, D, E, F, DP [3].



Рисунок 2.4 – Загальний вигляд індикатора TM1637



Рисунок 2.5 – Схема розташування контактів індикатора TM1637

CLK: тактовий сигнал.

DIO: вхід/вихід даних.

VCC: + живлення 5В.

GND: нульовий потенціал або заземлення.

2.1.2 Взаємодія між компонентами

Мікроконтролер здійснює генерацію імпульсного сигналу тривалістю 10 мкс, подається на вхід Trigger сенсора HC-SR04. Цей сигнал є початком для ініціалізації процесу вимірювання. Після того як було отримано Trigger – імпульс, далі активується передавальний модуль і генерується ультразвуковий пакет – 8 імпульсів на частоті 40 кГц, і в кінці переходить в режим очікування відгуку [4-11-13].

Приймальна частина нашої системи здійснює фіксацію відбитого сигналу через підсилювач з автоматичним регулюванням посилення. Оброблення Echo-сигналу включає :

- Фіксацію перешкод
- Компарацію з пороговим рівнем
- Формування цифрового імпульсу

Тривалість даного імпульсу прямо пропорційна відстані до об'єкта.

І далі вже мікроконтролер здійснює точне вимірювання Echo-імпульсу.

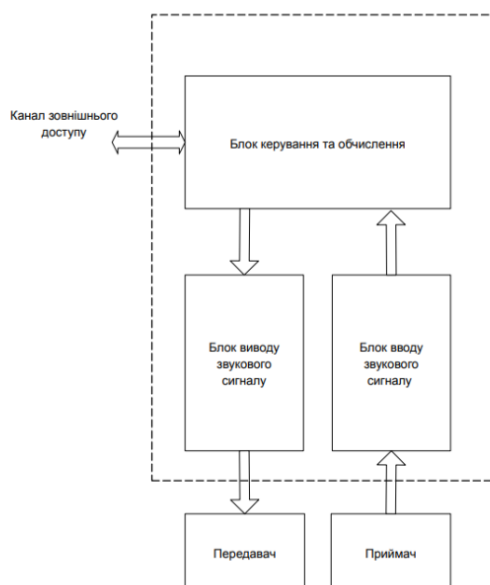


Рисунок 2.6 – Структурна схема ультразвукового далекоміра на базі мікроконтролера

2.2 Розробка функціональної схеми засобу контролю відстані між об'єктами

Функціональна схема, є графічним відображенням основних функціональних частин(вузли, блоки) системи або ж приладу та зв'язків між ними відповідно тих функцій, які виконуються [9]. Вона, показує структурованість системи на логічному рівні, а не на рівні конкретних елементів. Також відображає послідовність і взаємодію між частинами системи, а саме як передається сигнал, енергія або інформація.

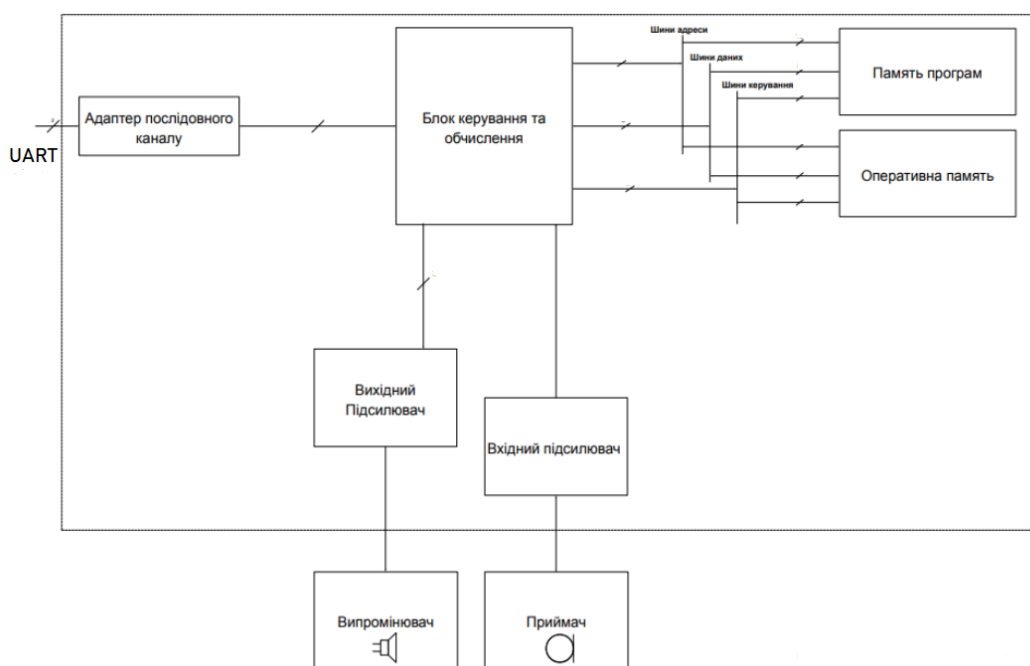


Рисунок 2.7 – Функціональна схема пристрою

2.2.1 Опис основних блоків системи

Функціональна схема охоплює ключові вузли, які виконують аналіз та обробку даних, зберігання та передачу даних, а також взаємодію між зовнішніми елементами.

Адаптер послідовного каналу.

Вхідним елементом пристрою є адаптер послідовного каналу, який підключається до через UART. Його основним завданням є прийом даних ззовні, їх перетворенні у відповідний внутрішній формат і передачі до обчислювального блоку [3].

Блок керування та обчислення.

Головною складовою приладу є блок керування та обчислення, який виконує всю основну логіку та операції обрахунку. Він здійснює керування роботою інших вузлів, реалізовує алгоритми обробки сигналів та взаємодіє з пам'яттю через шини:

- шина адреси (16 біт)
- шина даних (8 біт)
- шина керування

В функціональній схемі, архітектура пам'яті представлена як загальний логічний простір, яка розділена на області програмного коду та даних [3].

Основне завдання шини адреси полягає в забезпеченні доступу до конкретних комірок пам'яті, тоді як шина даних передає інформацію між процесором, пам'яттю та периферійним пристроями.

Пам'ять програм та оперативна пам'ять.

Обов'язковими складовим також є два типи пам'яті, кожна з яких виконує свої важливі функції. Це оперативна пам'ять та пам'ять програм.

Пам'ять програм використовується для збереження постійного машинного коду, який відповідає алгоритму роботи пристрою. З цієї пам'яті блок управління та обчислення зчитує команди, що виконуються в визначеному порядку. Реалізація виконується на ROM(Read-Only Memory)[3].

Оперативна пам'ять(RAM – Random Access Memory) має призначення для короткочасного зберігання проміжних даних, результатів обчислень, буферизації вхідних та вихідних сигналів [3]. Цей різновид пам'яті відзначається високою швидкістю доступу, проте є енергозалежним – всі дані зникають, коли живлення вимикається. Обсяг оперативної пам'яті звичайно обмежений через споживання енергії та апаратні обмеження, але його достатньо для виконання запланованих завдань системи.

Підсилювальні каскади.

Вихідний підсилювач – посилює сигнали, сформовані блоком керування, для подальшого передавання на випромінювач.

Вхідний підсилювач – приймає слабкий сигнал із приймача, підсилює до рівня, придатного для обробки, і передає до обчислювального блоку.

Випромінювач і приймач.

Випромінювач генерує активний сигнал, в нашому випадку ультразвуковий сигнал, що використовується для дослідження простору [1].

Приймач фіксує відбитий або ж прийнятий сигнал, що дає інформацію про стан або зміну навколишнього середовища[1].

2.3 Реалізація макету ультразвукового сенсору на мікроконтролерній платформі Arduino Uno

2.3.1 Огляд середовища розробки Arduino IDE

Arduino IDE(Integrated Development Environment) - офіційне середовище програмування для мікроконтролерів платформи Arduino.

Воно забезпечує користувачеві можливість створювати, компілювати та завантажувати програмний код – які ще називають скетч, безпосередньо на апаратне забезпечення [4]. Має простий інтерфейс та широкі функціональні можливості, що підходить як для початківців, так і для досвідчених розробників Arduino IDE використовує мову програмування, що базується на C/C++, але з внесеними спрощеннями, що знижують бар'єр для освоєння розробки мікроконтролерних систем [4]. Наявність численних бібліотек і готових прикладів значно полегшує взаємодія з різноманітними електронними компонентами та модулями.

Основні елементи інтерфейсу.

Редактор коду – місце, де користувач безпосередньо пише програму. Підтримується підсвідчування синтаксису, автодоповнення та форматування коду.

Панель керування – забезпечує швидкий доступ до функцій компіляції, завантаження компіляції, завантаження, відкриття проєктів, запуску серійного монітора тощо.

Консоль повідомлень – виводить результати, помилки та повідомлення про процес.

Меню налаштувань – дозволяє вибрати тип плати, порт підключення, налаштувати програматор, а також інші параметри, необхідні для роботи з конкретною.

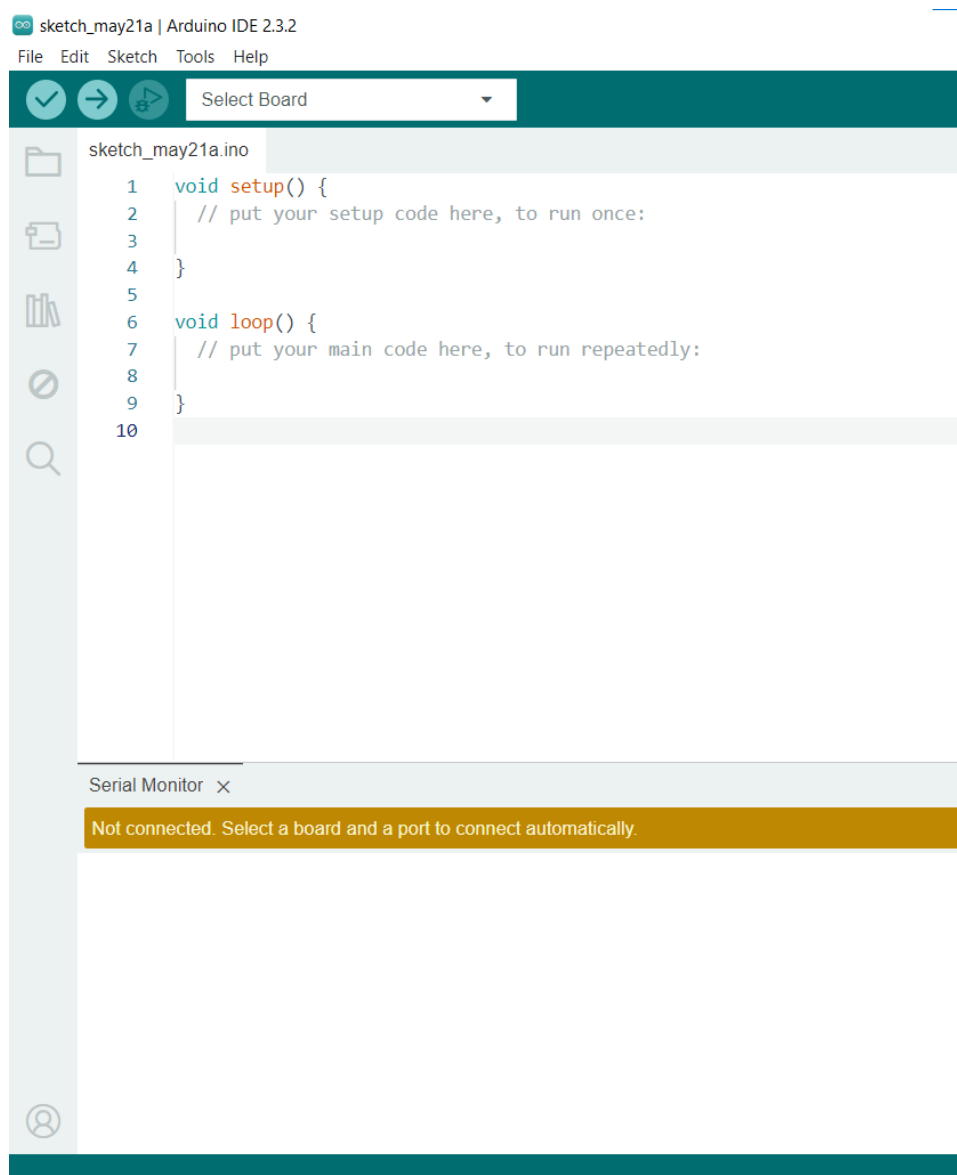


Рисунок 2.8 – Вигляд редактора коду Arduino IDE

Arduino IDE підтримує роботу з різноманітними платами та мікроконтролерами, наприклад AVR, SAM, ESP8266, ESP32, Atmega 328P та іншими.

За допомогою вбудованого менеджера плат, користувачі мають можливість додавати підтримку нових пристроїв та мікросхем. До того ж, доступна значна бібліотечна база, полегшує взаємодію з різними периферійними пристроями – сенсорами, дисплеями, двигунами та багатьма іншими.

Для налагодження корисними інструментами є серійний монітор, який дає змогу переглядати повідомлення, що передаються через UART, та серійний графік (Serial Plotter), який представляє змінні у вигляді графічного зображення у режимі реального часу [4].

2.3.2 Складання апаратної частини макету

На цьому етапі було розібрано апаратну складову макету, яка забезпечує взаємодію мікроконтролера з зовнішніми компонентами, необхідними для реалізації вимірювального пристрою. Система включає наступні ключові функціональні елементи: мікроконтролер Arduino Uno, ультразвуковий сенсор відстані HC-SR04, модуль живлення, сполучні дроти та семисегментний індикатор на базі TM1637.

Фізичне компонування системи виконано за допомогою сполучних дротів типу «тато-мама», що забезпечує простоту монтажу та можливість оперативного внесення змін до структури схеми [10]. Пристрій прикріплено до рівної платформи за допомогою стійок.

Використання такого типу з'єднань дозволяє швидко модифікувати конфігурацію пристрою, полегшує тестування та налагодження, а також забезпечує надійний контакт між компонентами, що є важливим для стабільної роботи системи вимірювання відстані.

За допомогою онлайн - платформи для моделювання та проектування - Tinkercad було створено схему підключення провідників до компонентів пристрою.

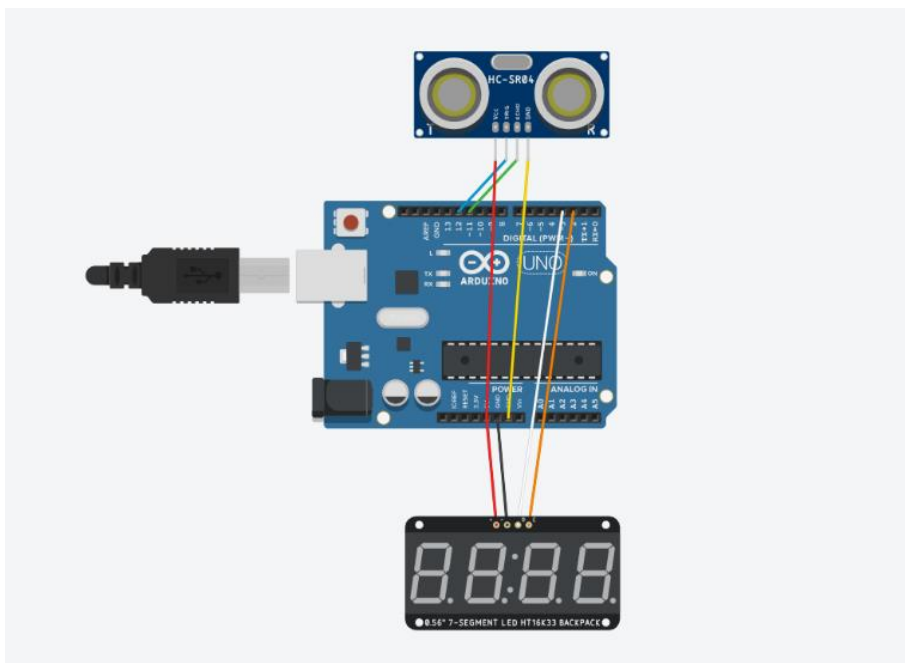


Рисунок 2.9 – Схема підключення компонентів

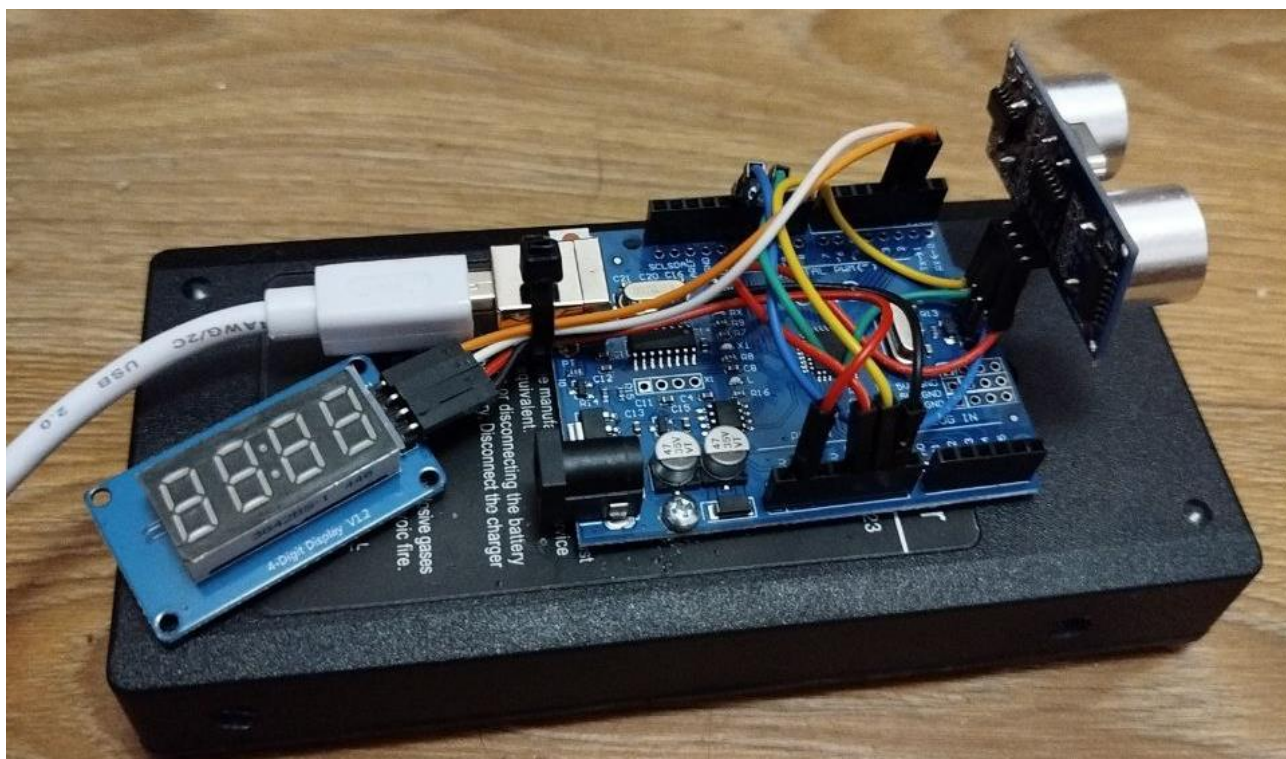


Рисунок 2.10 – Макет ультразвукового датчика

Щоб відтестувати наш макет перед випромінювачем було встановлено предмет для якого треба здійснити вимір певної відстані, для того аби впевнитись що пристрій працює потрібним чином.

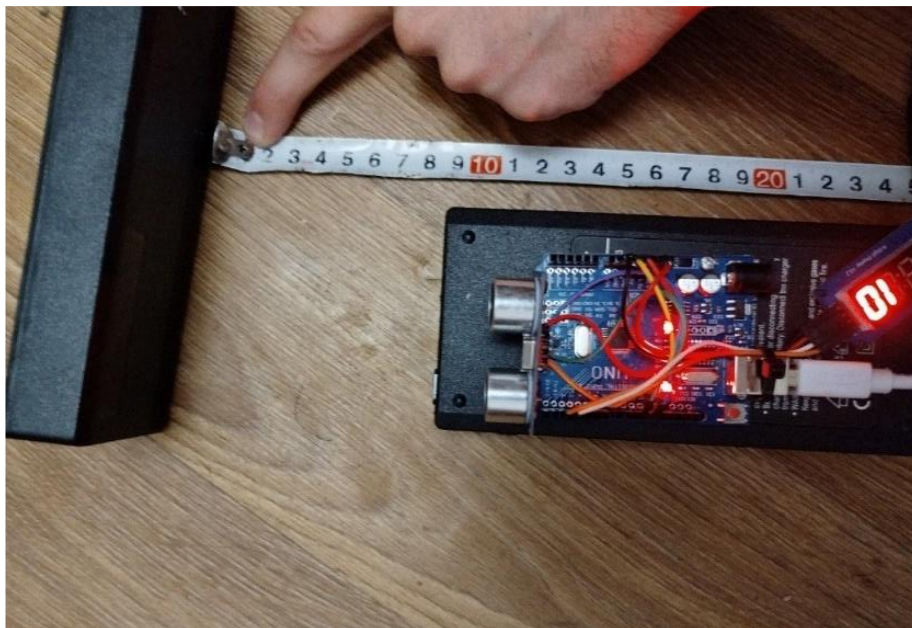


Рисунок 2.11 – Результат роботи макету на відстані 10 см

Також передбачено обробку помилок, пов'язаних з виходом вимірювання за межі робочого діапазону HC-SR04.

Датчик працює в межах від 3 см до 450 см. Якщо виміряне значення виходить за ці межі - воно вважається некоректним

В такому випадку на індикаторі виводиться спеціальний код, який сигналізує про помилку.



Рисунок 2.12 – Сигнал що сталась помилка в діапазоні виміру

2.4 Опис програмної частини

Ініціалізація пінів.

Піни 11 і 12 будуть призначені для виводів Trig(сигнал запуску) та Echo(прийом відбитого сигналу) відповідно.

Також ініціалізуємо виведення результатів на індикатор.

```
#include <TM1637Display.h>
```

```
#define TRIG_PIN 12
```

```
#define ECHO_PIN 11
```

```
#define CLK 2
```

```
#define DIO 3
```

Налаштування режимів пінів.

У функції void setup() , необхідно ініціалізувати режими роботи пінів для взаємодії з сенсором. Trig буде налаштовано як вихідний для надсилання запуску, а пін Echo – як вхідний для зчитування тривалості відбитого сигналу. Також ініціалізуємо послідовний зв'язок зі швидкістю 9600 бод для виведення результатів[4].

```
void setup() {
    Serial.begin(9600); // Ініціалізація послідовного порту
    pinMode(TRIG_PIN, OUTPUT); // Налаштування піна TRIG як вихід
    pinMode(ECHO_PIN, INPUT); // Налаштування піна ECHO як вхід
    display.setBrightness(0x0f); // Встановлення максимальної яскравості дисплея
}
```

Основний цикл виміру відстані .

Спочатку надсилається сигнал запуску через пін Trig, після цього вимірюється тривалість імпульсу на Echo за допомогою функції pulseIn(), і на основі цього вимірюється відстань в сантиметрах, враховуючи відстань звуку:

```
void loop() {
    digitalWrite(TRIG_PIN, LOW); // Очищення сигналу TRIG
```

```

delayMicroseconds(2); // Затримка 2 мікросекунди
digitalWrite(TRIG_PIN, HIGH); // Встановлення сигналу TRIG
delayMicroseconds(10); // Затримка 10 мікросекунд
digitalWrite(TRIG_PIN, LOW); // Вимкнення сигналу TRIG
long duration = pulseIn(ECHO_PIN, HIGH, 30000); // Вимірювання тривалості ім-
пульсу
long distance = duration / 58; // Перетворення тривалості в відстань (у см)
Serial.print("Відстань: ");
Serial.print(distance); // Виведення значення відстані
Serial.println(" см"); // Виведення одиниці вимірювання
// Перевірка, чи відстань у межах допустимого діапазону (2 см до 400 см)
if (distance >= 2 && distance <= 400) {
    display.showNumberDec(distance, false); // Відображення відстані на дисплеї
} else {
    // Відображення "----" для некоректних або позамежних значень
    const uint8_t dash[] = {
        SEG_G, // -
        SEG_G, // -
        SEG_G, // -
        SEG_G // -
    };
    display.setSegments(dash); // Встановлення символів "----" на дисплеї
}
delay(500); // Затримка 500 мс перед наступним вимірюванням

```

Затримка була зроблена для того, щоб уникнути перевантаження сенсора та мікроконтролера надто частими вимірюваннями, що можуть призвести до нестабільної роботи системи або спотворення результатів. Значення затримки в 500 мілісекунд дозволяє забезпечити достатній інтервал між вимірюваннями, завдяки чому система має час на завершення обробки попереднього сигналу, стабілізацію індикатора та передачу даних через послідовний порт.

2.5 Висновки до розділу

У другому розділі було здійснено розробку засобу контролю відстані між об'єктами на основі ультразвукового сенсора HC-SR04 та мікроконтролера Arduino Uno. Розробка охоплювала побудову структурної та функціональної схем пристрою, реалізацію фізичного макету та створення програмної логіки для обробки та виводу даних.

Структурна схема відобразила загальну архітектуру пристрою, виділивши основні функціональні блоки: сенсорний модуль, мікроконтролерний блок обробки, систему виводу інформації. Вона дозволила візуалізувати логіку взаємодії елементів системи, що стало основою для подальшої реалізації. Функціональна схема доповнила цей підхід, акцентуючи увагу на інформаційних зв'язках між окремими блоками та їх логічній послідовності.

Реалізований макет пристрою підтвердив працездатність системи в реальних умовах. Була виконана апаратна збірка із використанням компонування на макетній платі, забезпечено підключення ультразвукового сенсора, модуля індикації на базі TM1637 та живлення. Проведено тестування пристрою в реальних умовах для визначення відстані в межах 3–450 см, що відповідає технічним характеристикам сенсора HC-SR04.

Програмна частина реалізована в середовищі Arduino IDE. Було створено алгоритм взаємодії з сенсором, обробки тривалості сигналу та переведення її у значення відстані. Передбачено захист від помилок вимірювання, реалізовано виведення результатів на семисегментний індикатор, а також обробку ситуацій, коли об'єкт знаходиться поза допустимим діапазоном.

Таким чином, у межах цього розділу створено повнофункціональну систему первинного вимірювання відстані з індикацією результатів, яка є готовою до подальших етапів оптимізації, математичного опису та метрологічного аналізу. Отримані результати доводять доцільність використання обраної елементної бази для бюджетних систем контролю відстані в умовах обмежених ресурсів.

З ФІЗИКО-МАТЕМАТИЧНЕ ПРЕДСТАВЛЕННЯ РОЗРОБЛЕНОГО СЕНСОРУ

3.1 Фізичний принцип роботи розробленого пристрою

Наш пристрій який розроблений на основі ультразвукового сенсору HC-SR04, основою роботи датчика є те що він працює за принципом ехолокації. Ехолокація, являє собою спосіб отримання інформації про відстань об'єкта шляхом аналізу відбитої хвилі. Загалом цей принцип також використовується деякими видами тварин(кажан, дельфін), які дають цим видам можливість до навігації, полювання, та просторової орієнтації [1].

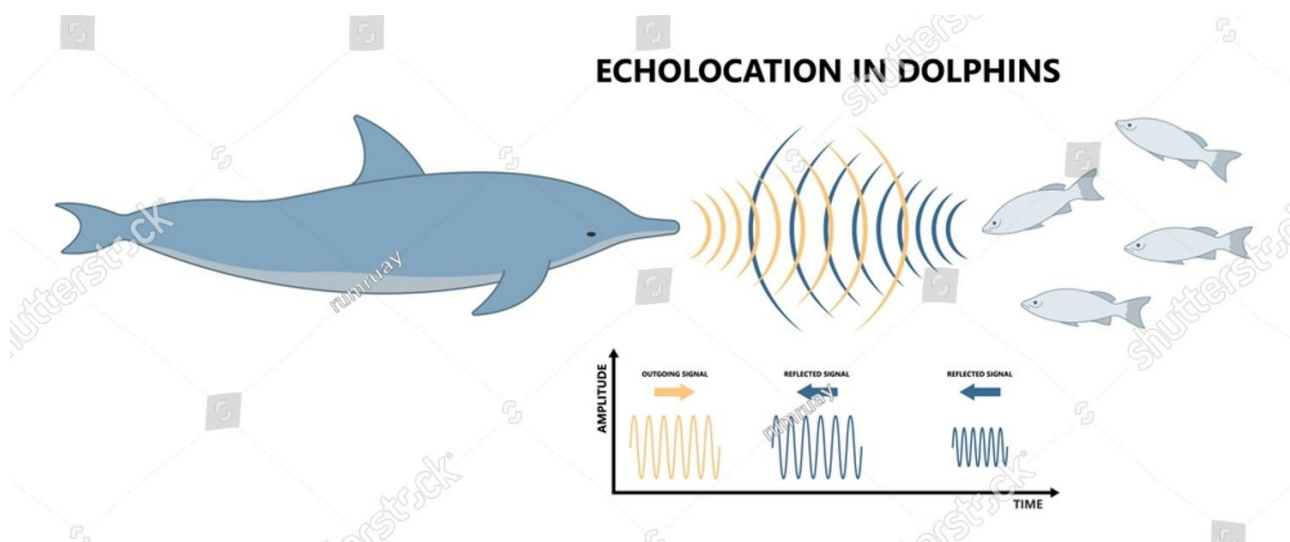


Рисунок 3.1 – Принцип ехолокації в природі, на прикладі дельфіна

HC-SR04 імітує цей природний процес, тільки він використовує звукові хвилі на досить значно вищих частот, що не можуть бути сприйняті людським вухом, тобто в ультразвуковому діапазоні [4].

Сенсор має дві функції: він є генератором(трансмітером) коротких ультразвукових імпульсів, так і одночасно приймачем(ресивером). Вимірювання відстані починається з того що HC-SR04 генерує короткий імпульс ультразвукової хвилі та

вимірює час необхідний для того, аби той імпульс досяг перешкоди, відбився від неї та повернувся назад до сенсора.

3.1.1 Поняття про ультразвук

Ультразвук – це механічні коливання, які поширюються у газах, рідинах, твердих тілах, але відрізняються від звичайного звуку своєю високою частотою: понад 20кГц [1]. Це той поріг, за яким людське вухо вже не здатне сприймати звук. Відповідно, ультразвук – це хвилі що залишаються невидимими для нашого слуху, хоча фізично вони цілком реальні та здатні нести значну енергію. Діапазон частот ультразвуку досить широкий – від 20кГц і аж до кількох гігагерц, а в окремих випадках і вище. Такий широкий діапазон пояснюється різноманіттям джерел і застосувань ультразвукових хвиль у сучасній науці та техніці [1].

Ультразвукові хвилі мають властивості, що визначають їхню унікальність і практичну цінність. Передусім, вони поширюються майже прямолінійно, особливо на високих частотах. Це означає що енергія хвилі зосереджується в вузькому промені, подібно до лазерного випромінювання у світловому діапазоні [1]. Така спрямованість дозволяє точно локалізувати об'єкти, що надзвичайно корисно в вимірювальних системах (наприклад, ультразвукових сенсорах відстані) та візуалізації внутрішніх структур (наприклад, медичне УЗД).

Іншою важливою властивістю є здатність до відбиття та заломлення на межі різних середовищ. Коли ультразвукова хвиля настовхується на межу між середовищами з різними акустичними імпедансами (характеристика, що описує «опір» середовища поширенню звуку), яка визначається як:

$$Z = p \cdot v, \quad (3.1)$$

де p – густина середовища, v – швидкість звуку.

Частина хвилі відбивається назад, а частина переходить у нове середовище, змінюючи напрямок згідно із законом Снелліуса [1-2].

Інтенсивність відбиття прямо залежить від різниці цих імпедансів.

Саме тому ультразвук широко використовується для діагностики внутрішніх дефектів у матеріалах чи дослідження будови органів.

Ще одна ключова властивість – поглинання.

Ультразвукові хвилі втрачають енергію під час поширення через внутрішнє тертя та перетворення механічної енергії хвилі в тепло. Ступінь поглинання суттєво залежить від частоти: чим вона вища, тим інтенсивніше поглинається хвиля [1]. Особливо сильно ультразвук поглинається в повітрі, що обмежує сферу його застосування в газах, тому дія сенсора HC-SR04 обмежується до приблизно 4 м [4]. Натомість у рідинах і твердих тілах хвиля може проходити значно далі. Це пояснює, чому ультразвукові сенсори для повітря зазвичай використовують низькі частоти.

Окрім цього, ультразвукові хвилі здатні переносити значну механічну енергію [1]. Завдяки цьому їх використовують не лише для досліджень, а й у технологічних процесах: для ультразвукового очищення (наприклад, ювелірних виробів чи лабораторного посуду), зварювання та різання матеріалів, а також в медицині для руйнування каменів у нирках чи фізіотерапії.

Ще не менш цікавою є поява кавітації під дією ультразвуку у рідинах. При достатній інтенсивності формуються й «схлопуються» мікроскопічні бульбашки, що супроводжується локальним підвищенням тиску й температури [1]. Це явище використовують для інтенсивного очищення, емульгування або навіть хімічних реакцій. Але це явище не застосовується в HC-SR04, тому що сенсор працює в повітрі [4].

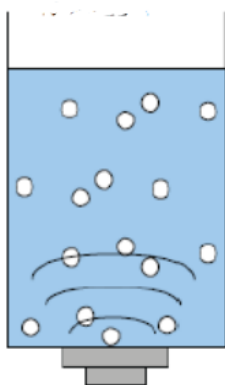


Рисунок 3.2 – Явище кавітації під дією ультразвуку

Характеристики ультразвукових хвиль

Для опису ультразвукових хвиль використовують такі основні характеристики.

Частота (f) – це кількість повних коливань за одиницю часу(секунду). Вимірюється в герцах (Гц). Для ультразвуку частота завжди перевищує 20 кГц. У різних галузях використовують різні діапазони частот: для медичної діагностики – зазвичай від кількох до десятків мегагерц; для сенсорів відстані – біля 40 кГц. Вища частота забезпечує більшу роздільну здатність, тобто можливість ідентифікувати дрібні деталі, проте сприяє більшому поглинанню хвиль у середовищі [1].

Довжина хвилі(λ) – це відстань між двома точками хвилі, що знаходяться в однаковій фазі (наприклад вершинами) [1]. Вона визначається як співвідношення швидкості поширення хвилі у середовищі до її частоти:

$$\lambda = \frac{v}{f}, \quad (3.2)$$

де v – швидкість звуку, f – частота. Наприклад довжина хвилі буде , для $v = 343\text{м/с}$ (при 20 °C) і $f = 40 \text{ кГц} = 40000 \text{ Гц}$ (частота хвилі яку випускає НС-SR04):

$$\lambda = \frac{343}{40000} = 0,00858 \text{ м} = 8,58 \text{ мм} \quad (3.3)$$

Для ультразвуку довжина хвилі значно менша, ніж для звукових хвиль чутного діапазону[1]. Менша довжина хвилі дає змогу отримувати вищу просторову роздільну здатність і точніше націлювати хвилю.

Амплітуда(A) – це максимальне відхилення величини, що коливається , від середнього значення[1]. Вона визначає інтенсивність ультразвукової хвилі, тобто «силу» її впливу. Чим більша амплітудна, тим більшу енергію несе хвиля. При високих амплітудних значення можуть виникати нелінійні ефекти, наприклад, як згадана вже кавітація.

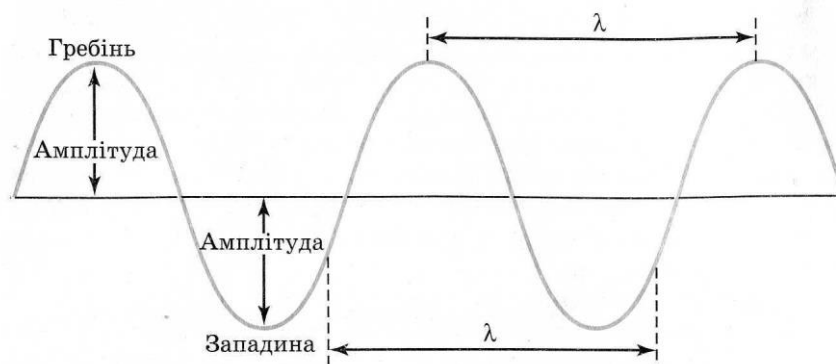


Рисунок 3.3 – Основні характеристики звуку

3.1.2 Швидкість поширення звукової хвилі

Швидкість звуку – це величина, яка визначає, з якою швидкістю поширюються поздовжні хвилі у пружному середовищі. Іншими словами, вона показує, яку відстань проходить звукова хвиля в певному середовищі за одиницю часу. Важливо зазначити, що ця швидкість залежить від властивостей самого середовища: наприклад, у повітрі при нормальних умовах швидкість звуку становить приблизно 343 метри на секунду, тоді як у воді чи металі вона значно більша через різницю в щільності [1-3].

Таблиця 3.1 – Швидкість звуку в різних середовищах

Середовище	Швидкість звуку(приблизно), м/с
Повітря(20 °C)	343
Вода	1480
Сталь	5100
Скло	4540
Гелій(0 °C)	972

Швидкість поширення звуку в повітряному середовищі справді є визначальним параметром для роботи ультразвукового сенсора HC-SR04, який лежить в основі розробленого пристрою [3-4]. Варто зазначити, що точність визначення відстані безпосередньо залежить від коректного врахування цієї швидкості, оскільки

обчислення відстані базується на вимірюванні часу проходження акустичного імпульсу до об'єкта та назад [5].

Цей параметр не є сталою величиною – він змінюється залежно від фізичних умов середовища, зокрема температури, вологості, атмосферного тиску та навіть висоти над рівнем моря. Наприклад, при температурі повітря 20 °C швидкість звуку становить приблизно 343 м/с, однак при зниженні температури до 0 °C вона зменшується до близько 331 м/с [1]. Така різниця на перший погляд здається незначною, проте вона може спричинити похибку в декілька сантиметрів.

З теоретичної точки зору, швидкість звуку в повітрі як в ідеальному газі описується рівнянням, яке враховує основні фізичні характеристики середовища [3-4].

Рівняння виглядає наступним чином :

$$v = \sqrt{\frac{\gamma \cdot R \cdot T_K}{M}}, \quad (3.4)$$

де $\gamma = 1,4$ – адіабати для двоатомного газу, $R = 8,314$ Дж/(моль·К) – універсальна газова стала, T_K – абсолютна температура в Кельвінах ($T_K = T + 273,15$), $M = 0,029$ кг/моль – молярна маса повітря.

Зазвичай, для практичних розрахунків у пристрої, який функціонує на основі сталої швидкості звуку, застосовують емпіричну формулу [1-5]. Такий підхід дозволяє отримати результати з достатньою точністю для більшості прикладних задач, спираючись на спрощення моделей і реальні експериментальні дані. Використання саме емпіричної формули обумовлено тим що в умовах експлуатації пристрою можуть існувати незначні відхилення фізичних параметрів які складно врахувати теоретично. Емпірична формула виглядає наступним чином :

$$v = 331 + 0,6 \cdot T \quad (3.5)$$

Де T – температура в Цельсія. Формула була отримана шляхом апроксимації теоретичного рівняння для типових умов (температура -20 °C до 50 °C, при тиску ~101,3 кПа).

Швидкість звуку при 0 °С становить приблизно 331м/с , а її залежність від температури є майже лінійною в цьому діапазоні.

Коефіцієнт 0,6 м/с/°С показує середнє значення швидкості звуку зі зміною температури, яке підтверджується експериментальними даними.

При $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$:

$$v = 331 + 0,6 \cdot 20 = 343 \text{ м/с} \quad (3.6)$$

При $T = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$:

$$v = 331 + 0,6 \cdot 40 = 355 \text{ м/с} \quad (3.7)$$

Ці розрахунки показують те що швидкість звуку залежить від температури повітря. На Рисунку 3.4 зображено графічне відображення такої залежності.

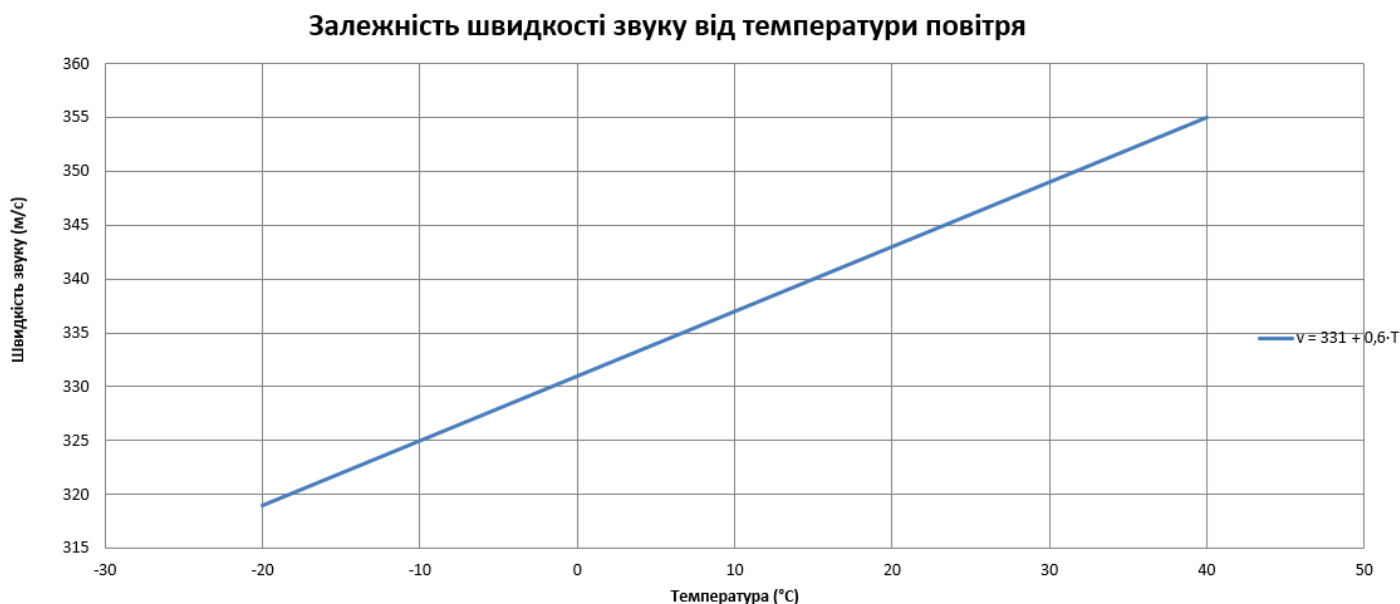


Рисунок 3.4 – Графік залежності швидкості звуку від температури повітря

3.2 Розробка рівняння перетворення

3.2.1 Визначення вхідного сигналу для перетворення

Ультразвуковий сенсор HC-SR04, насправді яскравий приклад застосування принципу ехолокації у сучасній техніці. В його основі лежить випромінювання ультразвукового імпульсу з частотою 40кГц, після чого сенсор фіксує час, за який цей імпульс повертається, відбившись від певного об'єкта [1-4]. Ключове тут – випромінювання саме часу проходження імпульсу(t): цей параметр відображає проміжок між відправленням та отриманням сигналу, і власне , саме на ньому будується подальше обчислення відстані до об'єкта (d).

З фізичної точки зору, час – інтервал, протягом якого ультразвуковий імпульс проходить відстань до об'єкта і повертається назад. Таким чином , загальна довжина шляху імпульсу становить $2d$. Визначальним чинником тут є швидкість поширення звуку у повітрі(температура 20 °C, нормальний атмосферний тиск, середня вологість) приймається рівною $v = 343$ м/с [1].

Слід зауважити, що ця швидкість може дещо змінюватись залежно від температури, вологості та складу повітря, що, у свою чергу, впливає на точність розрахунків відстані.

З математичної точки зору, взаємозв'язок між відстанню, часом і швидкістю описується формулою:

$$t = \frac{2d}{v}, \quad (3.8)$$

Якщо об'єкт розташований на відстані 1 м , час проходження імпульсу дорівнює:

$$t = \frac{2 \cdot 1}{343} \approx 0,00583c \text{ або } 5830 \text{ мкс} \quad (3.9)$$

Для мінімальної робочої відстані сенсора – 2 см(0,02 м):

$$t = \frac{2 \cdot 0,02}{343} \approx 0,0001166 \text{ с або } 117 \text{ мкс} \quad (3.10)$$

Максимальна відстань, яку може зафіксувати сенсор становить 4 метри :

$$t = \frac{2 \cdot 4}{343} = 0,02332 \text{ с або } 23320 \text{ мкс} \quad (3.11)$$

Ці приклади чітко демонструють часовий діапазон у якому працює HC-SR04.

3.2.2 Виведення базового рівняння перетворення

Отож, для формування рівняння перетворення спочатку слід врахувати, що ультразвуковий сенсор HC-SR04 не вимірює відстань безпосередньо. Його основна функція полягає у вимірюванні часу проходження ультразвукового імпульсу, тобто саме фіксується часовий інтервал (t), за який сигнал виходить із сенсора, доходить до об'єкта, відбивається від нього і повертається назад. Це і є вихідна первинна вимірювальна величина, на якій ґрунтується подальший розрахунок.

У фізичному сенсі цей процес ідеально відповідає руху хвилі зі сталою швидкістю через повітряне середовище. Важливо розуміти, що сам імпульс проходить шлях до об'єкта і назад, тобто фактично подолає подвійну відстань ($2d$), де d – це відстань від сенсора до об'єкта.

Відомо, що швидкість звуку в повітрі (v) є сталою для даних умов (хоча, насправді, вона може трохи коливатись залежно від температури, тиску, вологості тощо, проте для більшості практичних задач цим можна знехтувати або використати усереднене значення). Саме ця швидкість дозволяє зв'язати вимірний час із реальним фізичним шляхом, який проходить сигнал [1].

Використаємо класичне рівняння рівномірного прямолінійного руху має вигляд:

$$d = v \cdot t \quad (3.12)$$

У нашому випадку, як вже було зазначено, загальна відстань, яку проходить імпульс, складає $2d$. Відповідно, рівняння набуває наступного вигляду:

$$2d = v \cdot t \quad (3.13)$$

Таким чином, якщо відомі швидкість поширення звуку у повітрі (v) та час проходження імпульсу (t), ми можемо обчислити шукану відстань (d) шляхом перетворення цього рівняння [1]. Це співвідношення і є теоретичною основою для вимірювання відстані за допомогою ультразвукового сенсора.

Розглянемо поетапно, як отримати рівняння для визначення відстані d .

Початковий вираз виглядає так:

$$2d = v \cdot t \quad (3.14)$$

Тут d – шуканий шлях до об'єкта, v – швидкість розповсюдження звуку, t – час, за який імпульс проходить весь шлях туди й назад. Важливо підкреслити, що саме через двосторонній характер руху імпульсу й виникає множник 2 у рівнянні.

Далі, щоб d залишилось у лівій частині, обидві сторони ділимо на 2:

$$d = \frac{v \cdot t}{2} \quad (3.15)$$

Формула набуває лінійного вигляду щодо часу t , що значно полегшує її застосування для практичних розрахунків. Чому саме ділимо на 2?

Тому що t – це повний час туди й назад, а нас саме цікавить лише половина загальної відстані тобто шлях до об'єкта.

Тепер щодо значення швидкості звуку. Для більшості практичних задач у повітрі при кімнатній температурі 20 градусів Цельсія, вважаємо її сталою – 343 м/с. Це впливає з емпіричної залежності:

$$v = 331 + 0,6 \cdot T \quad (3.16)$$

де T – температура повітря у градусах Цельсія. Якщо підставити $T = 20$ °С, отримаємо :

$$v = 331 + 0,6 \cdot 20 = 343 \text{ м/с} \quad (3.17)$$

Також підставляємо це значення у формулу відстані :

$$d = \frac{343 \cdot t}{2} \quad (3.18)$$

Для зручності обчислень можна записати ще простіше :

$$d = 171,5 \cdot t \quad (3.19)$$

Тут t – час у секундах, d – відстань у метрах. Формула дає змогу безпосередньо перейти від виміряного часу до шуканої відстані якщо швидкість звуку приймається постійною.

Таким чином, це рівняння являє собою конкретну форму базової залежності, що дозволяє легко та ефективно розрахувати відстань до об'єкта за відомим часом поширення імпульсу у повітрі, тому ця формула є основою для подальших розрахунків і калібрувань [1].

Щоб продемонструвати практичну роботу базового рівняння, доцільно розглянути конкретні числові приклади обчислення відстані для заданих значень часу проходження сигналу. У цьому випадку ми не визначаємо t для конкретних відстаней, як це робили раніше, а навпаки – підставляємо різні значення часу, щоб

побачити, як рівняння перетворює t у d . Підхід дозволяє наочно простежити, наскільки коректно формула працює у практичних ситуаціях і як зміна часу впливає на результат.

Приклад 1 : час проходження 5830 мкс.

Припустимо, сенсор зафіксував час проходження $t = 5830$ мкс, що дорівнює 0,00583с. Підставляємо це значення у вихідне рівняння :

$$d = \frac{343 \cdot 0,00583}{2} = 0,99985 \text{ м} \quad (3.20)$$

Заокруглюючи, отримуємо приблизно 1 м або 100 см. Це свідчить, що при заданому часі проходження формула точно визначає відстань, підтверджуючи практичну коректність моделі

Приклад 2 : час проходження 120 мкс.

Тепер розглянемо значно менший час: $t = 120$ мкс, або 0,00012с.

Підставляємо в рівняння:

$$d = \frac{343 \cdot 0,00012}{2} = 0,02058 \text{ м або } 2,06 \text{ см} \quad (3.21)$$

Такий результат відповідає дуже малій відстані – фактично близькій до мінімального діапазону вимірювання. Це демонструє, що рівняння адекватно відображає залежність між часом проходження та відстанню навіть при малих значеннях.

Приклад 3 : час проходження 23000 мкс

У цьому випадку $t = 23000$ мкс, що дорівнює 0,023 с. Формула залишається незмінною:

$$d = \frac{343 \cdot 0,023}{2} = 3,9445 \text{ м} \quad (3.22)$$

Таким чином, результат становить майже 3,94 метра – це значна відстань, яка може бути актуальною для вимірювання до стіни у великому приміщенні або іншого далекого об'єкта.

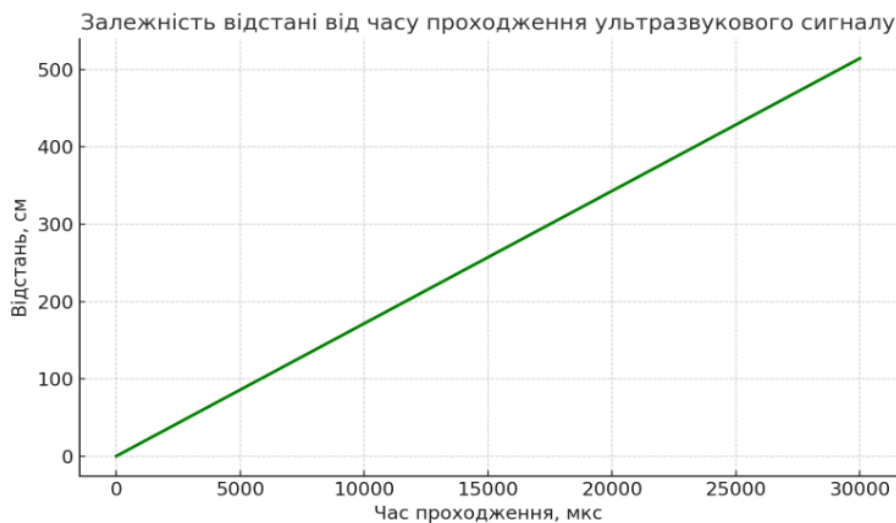


Рисунок 3.5 – Лінійний графік залежності відстані від часу проходження ультразвукового сигналу

Тому це рівняння буде основою для всіх подальших обчислень у пристрої, ми матимемо можливість перетворювати вимірювальний сигнал у відстань до об'єкта, його легкість забезпечить швидкий обрахунок, а лінійна залежність між відстанню та часом полегшує інтеграцію рівняння для програмного забезпечення.

3.2.3 Адаптація рівняння для програмної реалізації

Вивівши рівняння для обчислення відстані, нам потрібно його трансформувати, у таку форму, яка буде максимально зручною для реалізації на мікроконтролері з врахуванням специфічності одиниць вимірювання: зокрема часу в мікросекундах і відстані в сантиметрах [5]. Це важливо тим що, якщо буде робота з некоректними або незручними одиницями то це може привести до хибних результатів або ускладнити подальшу обробку даних у реальному часі.

Виведене рівняння має вигляд:

$$d = \frac{v \cdot t}{2} \quad (3.23)$$

де d – відстань у метрах, v – швидкість звуку, що приймається рівною 343м/с, t – час проходження імпульсу в секундах

Дане рівняння показує залежність відстані до об'єкта від часу, який вимірюється до об'єкта від часу, який вимірюється між передачею та прийомом ультразвукового імпульсу[1]. Також уточнення стосується того, що імпульс долає відстань до об'єкту і назад, тому вимірне значення часу потрібно ділити навпіл, щоб визначити відстань лише до об'єкта, а не весь двосторонній шлях.

В процесі програмної реалізації цього рівняння на мікроконтролері Arduino, з'являються декілька технічних нюансів, які слід взяти до уваги для отримання точних та коректних результатів.

В першу чергу, сенсор HC-SR04 здійснює вимір часу проходження імпульсу не в звичних секундах, а в мікросекундах [4] . Це дозволяє отримати значно вищу точність при вимірюванні малих відстаней, але для підстановки у форму потрібно здійснити відповідне перетворення одиниць виміру – перевести мікросекунди у секунди[5].

Також потрібно врахувати те що, в більшості прикладних задач , відстань більш доцільно подати не в метрах , а в сантиметрах. Це спростить сприйняття та інтерпретацію результатів, бо значення в сантиметрах будуть більш наочними та звичними для користувача.

Перший крок. Переведення часу у секунди.

Час проходження позначений як $t_{\mu s}$ та вимірний у мікросекундах слід перевести у секунди для коректності подальших обчислень. Виконується діленням на 10^6 , тобто:

$$t = \frac{t_{\mu s}}{10^6} \quad (3.24)$$

Наступне що зробимо , це підставимо даний вираз в базове рівняння:

$$d = \frac{v \cdot \frac{t_{\mu s}}{10^6}}{2} \quad (3.25)$$

Далі отримуємо ось такий вираз :

$$d = \frac{v \cdot t_{\mu s}}{2 \cdot 10^6} \quad (3.26)$$

Врахуємо що $v = 343$ м/с :

$$d = \frac{343 \cdot t_{\mu s}}{2 \cdot 10^6} \quad (3.27)$$

Виконаємо спрощення виразу:

$$d = \frac{343 \cdot t_{\mu s}}{2\,000\,000} \approx \frac{t_{\mu s}}{\frac{2\,000\,000}{343}} \approx \frac{t_{\mu s}}{5830,9} \text{ м} \quad (3.28)$$

Дане рівняння подає відстань у метрах, але воно не ідеальне з точки зору програмування. Причина цього – використання метричної системи і досить великий знаменник, яке може створити проблеми при реалізації обчислень у коді.

Другий крок. Переведення відстані в сантиметри

На цьому етапі ми здійснюємо перехід від початково отриманої відстані до зручної одиниці виміру – сантиметрів .

Щоб представити відстань у сантиметрах $d_{cm} = d \cdot 100$, множимо обидві сторони на 100:

$$d_{cm} = \frac{t_{\mu s}}{5830,9} \cdot 100 = \frac{t_{\mu s}}{\frac{5830,9}{100}} \approx \frac{t_{\mu s}}{58,3} \quad (3.29)$$

У результаті отримуємо спрощене рівняння:

$$d_{cm} = \frac{t_{\mu s}}{58,3} \quad (3.30)$$

Ця формула буде більш зручною, оскільки використовує мікросекунди для $t_{\mu s}$ і сантиметри для d_{cm} , а також має простіший знаменник, що зменшує операційне навантаження на мікроконтролер.

Приклад розрахунків за цією формулою

Приклад 1. Для першого прикладу маємо значення $t_{\mu s} = 5830$ мкс. Підставляючи його у формулу отримуємо:

$$d = \frac{5830}{58,3} = 100 \text{ см} \quad (3.31)$$

Результат становить 100 см, що відповідає одному метру. Це підтверджує коректність використаної формули, оскільки отримане значення співпадає із теоретичною відстанню, яку мав би фіксувати сенсор.

Приклад 2. У другому прикладі розглядається час $t_{\mu s} = 120$ мкс. Застосовуємо формулу:

$$d = \frac{120}{58,3} \approx 2,06 \text{ см} \quad (3.32)$$

Це значення є невеликим і знаходиться в межах мінімального діапазону вимірювань, що також демонструє отримання коректних результатів навіть при малих значеннях часу проходження сигналу.

Приклад 3. Для третього прикладу приймаємо $t_{\mu s} = 23000$ мкс. Провівши розрахунок, отримуємо:

$$d = \frac{23000}{58,3} \approx 394,5 \text{ см} \quad (3.33)$$

Або після округлення отримуємо 395 см. Це вже значна відстань , котра наближається до граничного діапазону сенсора. В цьому випадку бачимо що формула залишається ефективною навіть при великих відстанях.

Програмне застосування.

Програмний код який використовується на основі цієї формули для нашого пристрою, описаний мовою C:

```
long duration = pulseIn(ECHO_PIN, HIGH, 30000); // Вимірювання тривалості імпульсу

long distance = duration / 58; // Перетворення тривалості в відстань (у см)
Serial.print("Відстань: "); // Виведення тексту "Відстань: "
Serial.print(distance); // Виведення значення відстані
Serial.println(" см"); // Виведення одиниці вимірювання

// Перевірка, чи відстань у межах допустимого діапазону (2 см до 400 см)
if (distance >= 2 && distance <= 400) {
    display.showNumberDec(distance, false); // Відображення відстані на дисплеї
} else {
    // Відображення "----" для некоректних або позамежних значень
    const uint8_t dash[] = {
        SEG_G, // -
        SEG_G, // -
        SEG_G, // -
        SEG_G // -
    };
    display.setSegments(dash); // Встановлення символів "----" на дисплеї
}

delay(500); // Затримка 500 мс перед наступним вимірюванням
```

3.3 Висновки до розділу

У третьому розділі бакалаврської кваліфікаційної роботи проведено аналіз фізичного принципу роботи ультразвукового сенсора HC-SR04, який базується на методі ехолокації. Досліджено природу ультразвуку. Визначено основні властивості ультразвуку.

На основі принципів ехолокації, які полягають у вимірюванні часу проходження ультразвукового імпульсу частотою, розроблено теоретичну модель обчислення відстані. Ця модель адаптована для програмної реалізації на мікроконтролері Arduino Uno, що дозволяє ефективно обробляти дані від сенсора HC-SR04 і виводити результати на семисегментний індикатор TM1637.

Для підвищення надійності вимірювань запропоновано методи обробки сигналів, зокрема використання медіанного фільтра для усунення шумів і аномальних значень.

Отримані результати підтверджують можливість застосування фізичних принципів ехолокації для точного вимірювання відстані та створюють теоретичну основу для практичної реалізації засобу контролю відстані, його подальшого тестування та аналізу характеристик у реальних умовах.

4 АНАЛІЗ МЕТРОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК РОЗРОБЛЕНОГО ЗАСОБУ КОНТРОЛЮ ВІДСТАНІ МІЖ ОБ'ЄКТАМИ

4.1 Теоретичні основи метрологічного аналізу

4.1.1 Поняття метрологія

Метрологія є однією з ключових наукових дисциплін, що формує основу сучасних технічних, промислових процесів, забезпечуючи точність, достовірність і перевірку вимірювань [5]. Ця наука охоплює широкий спектр теоретичних і практичних засобів вимірювальної техніки. Вона відіграє ключову роль у підтримці єдності вимірювань, даючи змогу отримувати перевірені результати в різних умовах і регіонах, а також досягти потрібної точності для розв'язання складних технічних завдань [5-6].

Метрологія визначається як наука, що вивчає вимірювання, включно з розробкою, використанням та вдосконаленням методів і засобів заради забезпечення єдності вимірювань і високої точності результатів [5]. Згідно з міжнародним стандартом ISO/IEC Guide 99:2007, відомого як Міжнародний словник метрології, метрологію виокремлюють на три основні галузі: наукову, прикладну та законодавчу [5].

Наукова метрологія зосереджена на створенні еталонів і теоретичних основ, Вона дає поштовх для розвитку стандартизації і дає можливість відтворювати одиниці вимірювання з максимальною точністю [5].

Прикладна метрологія впроваджує практичне використання та застосування здобутків наукової метрології у конкретні реальні технічні і промислові процеси, таких як контроль якості, тестування обладнання чи моніторинг технічних параметрів [5-6].

Законодавча метрологія, у свою чергу, регулює вимірювання, результати яких мають юридичне значення, наприклад, у торгівлі, охороні здоров'я, екологічному контролі чи судово-медичних експертизах. Ці норми визначають,

перелік приладів що можна використовувати, повірку та калібрування, і хто несе відповідальність за достовірність вимірювань [5]. Ці три гілки метрології завжди існують разом, щоб забезпечити цілісну систему, яка поєднує всі сфери діяльності людини.

Точність вимірювання має визначальне значення для забезпечення якості продукції на всіх етапах виробництва – від сировини до готового продукту [6]. Наприклад, у машинобудуванні метрологія дозволяє не лише контролювати геометричні характеристики деталей, це дозволяє знизити кількість браку, збільшити точність складання та довговічність виробів. У таких критичних галузях, як авіація, енергетика чи медицина, точність вимірювань безпосередньо впливає на безпеку, навіть невелика похибка у вимірюванні будь яких величин може призвести до аварій, поломок обладнання чи помилкових діагнозів. Особливу роль метрологія відіграє у розвитку інноваційних галузей. Такі сфери, як мікроелектроніка, біотехнології чи нанотехнології, потребують високої точності вимірювання, бо тут йдеться про вимірювання на рівні нанометрів чи мікрограмів, щоб створити новий матеріал, або ж розробити нові пристрої та удосконалення технічних процесів.

Метрологія ще має особливу функцію, як уніфікація вимірювань, це дає нам змогу порівнювати результати в різних країнах і галузях, бо без єдиних стандартів не було б взаємодовіри між виробником, постачальником та споживачем [5]. Також метрологія чинить значний вплив на економічну складову у виготовленні продукції. Вона проявляється у зниженні витрат на сировину, енергію та час за рахунок оптимізації виробничих процесів, зменшення браку та підвищує конкурентоспроможність підприємств.

4.1.2 Засоби вимірювальної техніки

Засоби вимірювальної техніки (ЗВТ) є основним інструментом метрології, що дозволяє виконати вимір будь якої фізичної величини [5]. Вони охоплюють широку вибірку приладів, систем і еталонів, які дозволяють вирішувати різноманітні

завдання в техніці, промисловості та науці. Для впорядкованості та ефективного вибору ЗВТ їх класифікують за кількома ознаками.

Зокрема, за призначенням ЗВТ поділяють на кілька основних груп. Вимірювальні прилади призначені для безпосереднього визначення значення фізичної величини. Класичним прикладом є лінійка(для вимірювання довжини), вольтметр(для контролю електричної напруги) та термометр(для визначення температури) [5].

Окрему категорію становлять перетворювачі, зокрема термопари або тензодатчики. Їхня функціональність полягає в перетворенні однієї фізичної величини в іншу, яке спрощує процес вимірювання, особливо тоді коли пряме визначення певних параметрів є неможливим або неефективним [5]. Наприклад , термопара перетворює температуру на електричний сигнал, який вже можна з точністю виміряти електричним приладом

Вимірювальні системи, в свою чергу будуть слугувати комплексом, який складається з кількох засобів, які працюють взаємодіючи між собою щоб здійснити складні вимірювання [5]. Це може бути, як для автоматизованого моніторингу параметрів навколишнього середовища так і технологічних процесів.

Еталони посідають важливе місце серед ЗВТ, бо вони є фундаментом для відтворення одиниць вимірювання з максимально великою точністю [5]. До них відносять еталон метра, кілограма [5-7]. Вони використовуються для калібровки та перевірки точності інших засобів вимірювання.

Окрім цього, ЗВТ класифікують за способом вимірювання. Аналогові прилади, для прикладу стрілочні манометри чи амперметри, забезпечують для відображення результату у вигляді аналогового сигналу [3]. Цифрові прилади ж, відображають результат в цифровій формі, яке підвищує точність зчитування та зручність використання[3].

Вимірювання можуть бути прямими або непрямыми [5]. У випадку прямих вимірювань прилад безпосередньо визначає значення величини. Для непрямих – отримане значення розраховується на основі залежності між різними параметрами.

Для прикладу, електричну потужність визначають, множачи виміряне значення струму і напруги.

За метрологічними призначенням ЗВТ поділяють на робочі – для повсякденного використання у виробничих чи лабораторних умовах, контрольні – для перевірки калібрування інших приладів, а також еталонні – для збереження та відтворення одиниць вимірювання [5].

Щоб вибрати засіб вимірювальної техніки, звертають увагу на його метрологічні характеристики, щоб забезпечити ефективність і придатність приладу для конкретного використання. Основною характеристикою є діапазон вимірювання, який визначає межі значень, які може зафіксувати прилад [5]. Наприклад, -50°C до $+150^{\circ}\text{C}$ для термометра чи від 0 до 1000В для вольтметра.

Ще одним ключовим параметром слугує точність. Вона відображає ступінь відповідності виміряного значення істинному і характеризується похибкою, яка може бути систематичною, спричиненою конструктивними особливостями приладу, або випадковою, що залежить від зовнішніх умов, таких як температура чи вібрація [5].

Чутливість приладу дає можливість реагувати на мінімальні зміни вимірювальної величини [5]. Наприклад, виявлення змін напруги на рівні мілівольт. Роздільна здатність – це найменша зміна величини, яку може зафіксувати прилад [5]. Для лінійки це може бути 1мм, для термометра $0,1^{\circ}\text{C}$. Похибка вимірювань може бути абсолютною, вираженою в одиницях вимірюваної величини, або відносною, у відсотках від істинного значення.

Стабільність також є важливою характеристикою і показує здатність ЗВТ зберігати свої метрологічні характеристики протягом тривалого часу експлуатації, що є важливим для надійності вимірювань [5].

4.1.3 Відстань як фізична величина

У метрології відстань розглядається, як фундаментальна вимірювана величина, від точності визначення якої залежить якість багатьох інженерних, наукових

та прикладних задач [5]. Точність вимірювання відстані, в першу чергу, визначається характеристиками вимірювальних засобів та умовами їх використання. У міжнародній системі одиниць (СІ) відстань визначається як скалярна величина, що вимірюється у метрах [5]. Для нашого приладу для вимірювання відстані використовується сантиметр – $1\text{см}=0,01\text{м}$, який є похідною одиницею СІ [5]. Сантиметр широко застосовується у практиці завдяки своїй зручності для вимірювання малих відстаней особливо у сферах інженерних розрахунків, креслень, побутових задач та лабораторних досліджень. Вибір саме сантиметрами зумовлений тим що через його придатність для задач, де відстані не перевищують кількох метрів. Окрім того, сантиметр дозволяє подати результати у вигляді, що легко сприймається та інтерпретується, не втрачаючи при цьому достатньої точності для більшості завдань. Водночас використання сантиметра не змінює фізичної суті вимірювання, а лише адаптує його під специфіку конкретної задачі.

Принцип вимірювання відстані.

Вимірювання відстані виконується на основі часу проходження імпульсу, швидкістю розповсюдження сигналу та дистанцією [1]. В цьому випадку відстань визначається на базі уже відомої швидкості поширення імпульсу в середовищі, яка за певних умов може вважатись сталою. Це може бути як ультразвуковий (у нашому випадку), світловий або радіохвильовий сигнал. За умови правильного врахування параметрів середовища та характеристик вимірювальних приладів цей підхід дозволяє отримувати точні результати, та автоматизувати процес вимірювання .

4.2 Аналіз метрологічних характеристик сенсора на базі HC-SR04 та Arduino Uno

Ультразвуковий датчик відстані HC-SR04 на базі якого розроблено наш пристрій, є одним із поширених засобів для вимірювання відстані . Його популярність пояснюється тим що він має низьку вартість, просту інтеграцію в будь який проєкт, також має надійні метрологічні характеристики відносно своєї дешевизни, дані характеристики дозволяють реалізувати широкий спектр практичних застосувань.

Діапазон вимірювання.

За заявленими виробником діапазон HC-SR04 становить від 2 до 400 сантиметрів, що свідчить про чималу універсальність цього датчика різних сферах застосування [4].

Нижня межа діапазону вимірювання становить 2 см. Вона зумовлена конструктивними та фізичними особливостями пристрою. Тому що їй потрібен мінімальний час для того щоб, відправлений ультразвуковий сигнал повернувся у вигляді відбитого та не був сплутаний з початковим імпульсом.

Що стосується верхньої межі – 400 см . Вона обмежується затуханням ультразвукового сигналу в повітрі – на великих відстанях інтенсивність відбитого сигналу значно знижується , це ускладнює його виявлення приймачем датчика.

Враховуючи реальні умови експлуатації, максимальна дальність вимірювання може бути меншою ,ніж заявлено виробником. В першу чергу це зумовлюється різними зовнішніми чинниками, для прикладу, це акустичний шум довкілля , властивості поверхні об'єкта, температурні й атмосферні умови [3]. Об'єкт який складається з якогось м'якого або поглинаючого матеріалу зменшують ефективність відбиття сигналу, це зумовлено тим що звукова хвиля не може відбитись від м'якого матеріалу, бо буде або поглинута або розсіяна тим об'єктом.

Роздільна здатність.

Даний сенсор може фіксувати зміни відстані аж до 3 мм, що є досить високим показником для ультразвукових датчиків такого класу. Ця чутливість забезпечується роботою ультразвукових імпульсів із частотою 40 кГц та високою точністю вимірювання часу затримки сигналу мікроконтролером, а саме від точності таймера мікроконтролера Atmega328P [4]. Цей мікроконтролер працює на частоті 16МГц і забезпечує роздільну здатність вимірювання часу на рівні мікросекунд. Це дозволяє датчику ефективно реагувати навіть на невеликі зміни положення об'єкта.

Але в цьому випадку також потрібно врахувати, що реальна роздільна здатність буде залежати не тільки від характеристик датчика або контролера, але й від умов експлуатації.

Час відгуку.

Це параметр визначає, наскільки пристрій підходить для певних застосувань. Він залежить від відстані до об'єкта та швидкості обробки сигналу. В типових умовах вимірювання займає 10-50мс [4]. Це стандартний діапазон, який забезпечує цілком ефективну оперативність для більшості некритичних застосувань.

Зазвичай, за оптимальних умов, загальний час відгуку HC-SR04 в парі з Arduino Uno становить 10-20 мс. Однак потрібно врахувати, що частота роботи Arduino Uno обмежується 16 МГц, а це означає, що при одночасному виконанні кількох ресурсомістких процесів можуть виникнути додаткові затримки.

Абсолютна та відносна похибка.

Заявлена абсолютна похибка складає ± 3 мм за оптимальних умов експлуатації. Тобто, виміряна відстань буде відрізнятися від реальної максимум на три міліметри, що свідчить про доволі високу точність пристрою у лабораторних умовах чи побутових умовах [5]. Проте у випадку використання контролера Arduino Uno ця похибка може трохи збільшуватись через апаратні обмеження – зокрема, через неідеальну точність таймерів або затримки, які виникають під час опрацювання сигналу, особливо коли вимірювання виконуються з високою частотою

Відносна похибка ж показує, наскільки велика абсолютна похибка стосовно до самого виміряного значення. Вона розраховується як відношення абсолютної похибки до виміряної відстані і виражається у відсотках [7].

Формула виглядає так :

$$\delta = \frac{|\Delta|}{X_{\text{істинне}}}, \quad (4.1)$$

де: δ – відносна похибка %, $\Delta = X_{\text{виміряне}} - X_{\text{істинне}}$ - абсолютна похибка ,

$X_{\text{істинне}}$ – істинне значення, $X_{\text{виміряне}}$ – значення отримане в результаті вимірювання.

4.3 Експериментальне дослідження точності пристрою

Щоб здійснити оцінку метрологічних характеристик нашого пристрою, зокрема точності повторюваності та стабільності вимірювань системи, було проведено експериментальне дослідження. Дане дослідження проводилось в домашніх умовах, що дало нам змогу зрозуміти, як пристрій поводитиме себе в звичайному середовищі.

Умови були фактично контрольовані в можливостях домашнього простору, це дало змогу зменшити вплив зовнішніх чинників і забезпечити достовірність отримання результатів експерименту.

- Температура: Трималась на позначці в 21 градус Цельсія, була виміряна за допомогою спиртового термометра. Температура є основним чинником який може впливати на швидкість звуку, а швидкість безпосередньо впливає на точність обчислення відстані. В домашніх умовах температура була стабільною, що дало змогу уникнути значних коливань швидкості звуку.
- Вологість: була звичайна вологість як для побутових умов. Вологість має незначний вплив на швидкість звуку, але це всеодно забезпечили стабільність вимірювань
- Положення об'єкта : Об'єкт для дослідження був перпендикулярним до осі датчика HC-SR04, на відстанях від 10 до 220 см, крок 10 см. Датчик закріплювався на стабільній поверхні у вигляді столу, для того щоб не було зайвих вібрацій або ж зміщень.
- Тип поверхні об'єкта: Була використана гладка поверхня, у вигляді пластмасової коробки. Це забезпечило хороше відбиття сигналу. Для мінімізації поглинання ультразвукового сигналу було обрано саме пластмасову коробку з глянцевою покриттям.

Визначення реальної відстані проводилось за допомогою рулетки, яка була обрана як еталон в домашніх умовах.

На 22-ох фіксованих відстанях було проведено вимірювання відстані до об'єкта (від 10 до 220 см). Щоб зменшити вплив випадкових похибок, виконувалось по три вимірювання для кожної відстані, результати були усереднені.

Обробка даних на Arduino Uno відбувалась за виведеною формулою:

$$d_{cm} = \frac{t_{\mu s}}{58,3}, \quad (4.2)$$

де d_{cm} – відстань в сантиметрах, $t_{\mu s}$ – час за який проходить ультразвуковий сигнал в мікросекундах.

Формула була запрограмована в Arduino Uno. Результати виводились на дисплей TM1637 в сантиметрах.

Результати вимірювань зображені у вигляді таблиці. В таблиці міститься реальна відстань, яка вимірювалась за допомогою рулетки, результати 3-ох вимірювань які були зроблені за допомогою HC-SR04, усереднене значення(середнє значення), абсолютна похибка(Δ), відносна похибка(δ).

Таблиця 4.1 – Результати вимірювань

Рулетка (см)	Вимірювання №1 (см)	Вимірювання №2 (см)	Вимірювання №3 (см)	Сер. знач. (см)	Δ (см)	δ (%)
10	10,2	9,8	10,1	10,03	0,03	0,333
20	20,5	20,3	19,9	20,23	0,23	1,166
30	30,4	30,7	29,8	30,30	0,30	1,000
40	40,6	40,2	41	40,60	0,60	1,500
50	49,5	50,3	49,8	49,87	-0,13	0,266
60	60,2	59,7	60,5	60,13	0,13	0,222
70	69,4	70,3	69,8	69,83	-0,17	0,238
80	80,5	79,6	80,2	80,10	0,10	0,125
90	89,3	90,4	89,8	89,83	-0,17	0,185
100	99,7	100,5	99,4	99,87	-0,13	0,133
110	109,5	110,3	109,8	109,87	-0,13	0,121
120	119,4	120,6	119,8	119,93	-0,07	0,055
130	129,3	130,5	129,7	129,83	-0,17	0,128
140	139,2	140,4	139,8	139,80	-0,20	0,142

Продовження таблиці 4.1 – Результати вимірювань

150	149,5	150,6	149,3	149,80	-0,20	0,133
160	159,4	160,5	159,7	159,87	-0,13	0,083
170	169,2	170,4	169,8	169,80	-0,20	0,118
180	179,3	180,5	179,7	179,83	-0,17	0,093
190	189,4	190,6	189,8	189,93	-0,07	0,035
200	199,2	200,5	199,7	199,80	-0,20	0,100
210	209,3	210,4	209,8	209,83	-0,17	0,793
220	219,2	220,5	219,7	219,80	-0,20	0,091

Середнє значення знаходилось за формулою:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}, \quad (4.3)$$

Де $\bar{x}$ – середнє значення, x_i – окремі значення вимірювань (виміряні відстані в сантиметрах), n – кількість вимірювань, $\sum_{i=1}^n x_i$ – сума всіх значень.

Вона застосувалась для всіх відстаней в таблиці. Після отриманих обрахунків середнього значення, ми їх використали задля обчислення абсолютної похибки та відносної похибки.

Формула для абсолютної похибки[5]:

$$\Delta = \bar{x} - d_{\text{реальне}} \quad (4.4)$$

Формула для відносної похибки[5]:

$$\delta = \left| \frac{\Delta}{d_{\text{реальна}}} \right| \cdot 100\% \quad (4.5)$$

Щоб наочно оцінити точність роботи пристрою, доцільно побудувати графіки, які відображають залежність похибок від вимірюваної відстані. Зокрема, буде побудовано два окремі графіки: перший — для абсолютної похибки, другий — для

відносної похибки. На осі абсцис (X) у обох випадках відкладаються значення вимірюваних відстаней, а на осі ординат (Y) — відповідно значення абсолютної та відносної похибки.

Графік абсолютної похибки показує, як змінюється різниця між істинною та вимірюваною величиною залежно від відстані. Це дозволяє побачити, чи зростає похибка зі збільшенням дистанції, чи залишається на стабільному рівні.

Графік відносної похибки дає змогу оцінити, яку частку від самого значення становить похибка на різних відстанях. Це особливо важливо, коли потрібно визначити, наскільки точним є пристрій при вимірюванні як малих, так і великих значень.

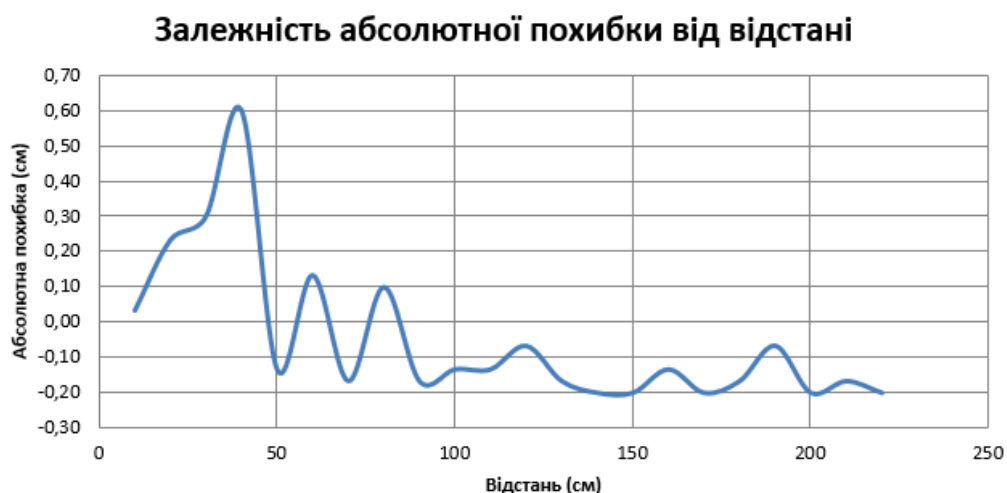


Рисунок 4.1 – Графік залежності абсолютної похибки від відстані

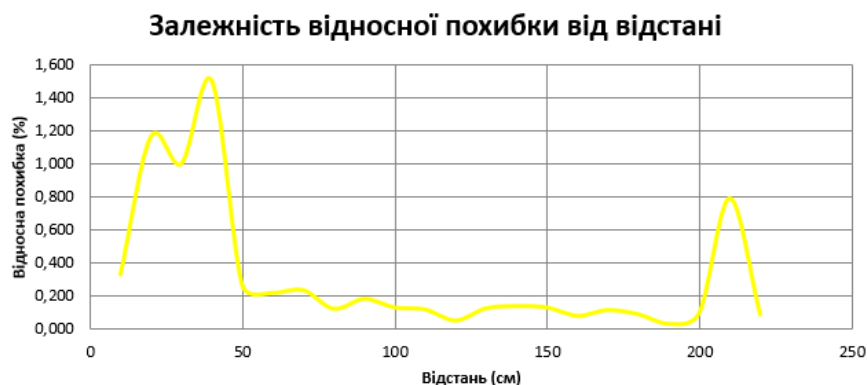


Рисунок 4.2 – Графік залежності відносної похибки від відстані

Проаналізувавши дані графіки можемо зробити наступні висновки щодо метрологічної складової нашого пристрою. З результатів видно, абсолютна похибка зростає, при збільшенні відстані, але на максимальних значеннях вона лишається в межах $\pm 0,6$ см, що є цілком прийнятною для цього виду сенсора.

Щодо динаміки відносної похибки, то вона на більших відстанях зменшується, це показує те що сенсор стабільно працює в діапазоні середніх і великих відстаней. Тому HC-SR04 є привабливим для застосувань, де важлива стабільність та передбачуваність результатів. Але при вимірюванні коротких відстаней навіть незначні відхилення абсолютної похибки можуть призвести до помітного зростання відносної похибки.

4.4 Апаратні та програмні методи для покращення приладу

Щоб зменшити похибку в пристрої, потрібно впровадити необхідно впровадити низку програмних та апаратних рішень. Ці рішення спрямовані для того аби зменшити вплив зовнішніх факторів: температура, вологість, акустичні перешкоди); підвищити якість обробки сигналу, і насамперед дати стабільність вимірювання.

Так як сенсор чутливий до температури, потрібно скомпенсувати цей ефект, декількома рішеннями:

- Встановити датчик температури.
- Врахувати швидкість звуку, при конкретній температурі.
- Оновити код для обчислення відстані, де швидкість звуку оновлюється на основі даних із температурного датчика.

Щоб зменшити випадкову похибку, на яку впливають якісь акустичні перешкоди або шуми сигналу, можна впровадити медіанний фільтр. Це програмний метод який обирає медіанне значення з певної вибірки послідовних вимірювань. Фільтр сортує їх і вибирає середнє значення(медіану), щоб позбутись аномалій і шумів.

Саме така комбінація з апаратно – програмних рішень може підвищити ефективність цього пристрою.

4.5 Висновки до розділу

У цьому розділі було здійснено аналіз метрологічних характеристик розробленого засобу контролю відстані між об'єктами, що базується на ультразвуковому сенсорі HC-SR04 та мікроконтролерній платформі Arduino Uno. Було розглянуто що таке метрологія та засоби вимірювальної техніки (ЗВТ), включаючи вимірювальні прилади, перетворювачі, системи та еталони, а також принципи вимірювання відстані як фундаментальної фізичної величини.

Практична частина розділу зосереджена на аналізі метрологічних характеристик розробленого пристрою, зокрема діапазону вимірювання (2–400 см), роздільної здатності (3 мм), часу відгуку (10–20 мс) та похибок. Здійснено експериментальне дослідження в контрольованих умовах. Вимірювання проводилися на відстанях від 10 до 220 см з кроком 10 см, з трьома вимірами на кожній відстані для усереднення результатів. Отримані дані показали, що абсолютна похибка не перевищувала $\pm 0,6$ см, а відносна похибка зменшується на більших відстанях, що свідчить про стабільну роботу сенсора в діапазоні середніх і великих відстаней.

Для підвищення точності та надійності пристрою запропоновано низку апаратно-програмних рішень. Зокрема, для компенсації впливу температури, що впливає на швидкість звуку, рекомендовано інтеграцію датчика температури та відповідне оновлення програмного коду для динамічного коригування швидкості звуку. Для зменшення випадкових похибок, спричинених акустичними перешкодами чи шумами сигналу, запропоновано впровадження медіанного фільтра, який обирає медіанне значення з вибірки послідовних вимірювань, усуваючи аномалії.

Таким чином, проведений аналіз підтвердив, що розроблений засіб є економічно ефективним рішенням для вимірювання відстані в діапазоні 2–400 см.

ВИСНОВКИ

У результаті виконання бакалаврської кваліфікаційної роботи було розроблено, реалізовано та протестовано засіб контролю відстані між об'єктами на основі ультразвукового сенсора HC-SR04 і мікроконтролерної платформи Arduino Uno. Система дозволяє здійснювати точне, стабільне та оперативне вимірювання відстані в межах 2–400 см з відображенням результатів на семисегментному індикаторі TM1637.

У теоретичній частині роботи було проведено аналіз сучасних типів сенсорів для вимірювання відстані, включаючи ультразвукові, інфрачервоні та лазерні, та обґрунтовано вибір ультразвукового датчика як оптимального з точки зору точності, вартості, енергоспоживання та стійкості до зовнішніх впливів.

У процесі розробки було створено структурну та функціональну схеми пристрою, розроблено алгоритм його роботи, а також написано програмне забезпечення для обробки сигналу, розрахунку відстані та виведення результатів у зручному форматі. Система включає обробку помилок та відображення некоректних вимірювань, що підвищує її надійність і зручність у використанні.

У ході метрологічного аналізу були визначені основні характеристики пристрою — похибка, чутливість, діапазон, і було підтверджено його відповідність вимогам до засобів первинного вимірювання. Проведені експериментальні дослідження засвідчили стабільність та точність роботи розробленого засобу, що робить його придатним для використання в освітніх, наукових і прикладних інженерних завданнях.

Отже, поставлену мету досягнуто повністю. Розроблений засіб контролю відстані є прикладом бюджетного, надійного і функціонального пристрою, який може бути легко адаптований до інших типів сенсорів або умов експлуатації.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Fraden J. Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs, and Applications. – 5th ed. – Cham : Springer, 2019. – 672 p.
2. Webster J. G., Eren H. Measurement, Instrumentation, and Sensors Handbook. – 2nd ed. – Boca Raton : CRC Press, 2018. – 1140 p.
3. Sinclair I. R. Sensors and Transducers. – 3rd ed. – Oxford : Newnes, 2017. – 512 p.
4. Arduino Official Documentation. Technical Specifications of the HC-SR04 Ultrasonic Sensor [Електронний ресурс].
5. Защепкіна Н. М. *Метрологія* : навч. посіб. – Харків : ХНУРЕ, 2020. – 348 с.
6. Бойко В. М., Герасимова О. П. Метрологія, стандартизація, сертифікація та акредитація : підручник. – Київ : Каравела, 2019. – 424 с.
7. Bureau International des Poids et Mesures. International System of Units (SI) [Електронний ресурс].
8. ДСТУ 2681-94. Метрологія. Терміни та визначення. – Київ : Держспоживстандарт України, 1994. – 68 с.
9. ДСТУ EN ISO/IEC 17025:2019. Загальні вимоги до компетентності випробувальних та калібрувальних лабораторій. – Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2019. – 36 с.
10. ДСТУ ГОСТ 8.207:2008. Прямі вимірювання з багаторазовими спостереженнями. Методи оброблення результатів спостережень. Основні положення. – Київ : Держспоживстандарт України, 2008. – 12 с.
11. Carpenter R. Ultrasonic Sensors for Automation and Robotics // Journal of Automation and Robotics. – 2020. – No. 3. – P. 45–52.
12. Arduino. Arduino Uno Rev3. Official Documentation [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://docs.arduino.cc/hardware/uno-rev3>
13. Dutta P. K. Ultrasonic Sensors: Principles and Applications // Sensors and Actuators. – 2018. – Vol. 275. – P. 123–130.

14. Technical Documentation for TM1637 Display [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://github.com/avishorp/TM1637> (дата звернения: 25.09.2024).
15. ISO. *ISO/IEC Guide 99:2007*. International Vocabulary of Metrology – Basic and General Concepts and Associated Terms (*VIM*) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.iso.org/standard/45321.html> (дата звернения: 12.09.2024).

Додаток А
(обов'язковий)

ІЛЮСТРАТИВНИЙ МАТЕРІАЛ
ЗАСІБ КОНТРОЛЮ ВІДСТАНИ МІЖ ОБ'ЄКТАМИ

Виконав: студент 4-го курсу, групи КІВТ-216
Спеціальності 152 Метрологія та інформаційно-ви-
мірювальна техніка

(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

 Підлипній Я. С.
(прізвище та ініціали)



Керівник: к.т.н., доц., доцент каф. ІРТС

Дудатьєв І. А.
(прізвище та ініціали)

«12» 06 2025 р.

Вінниця — 2025 рік

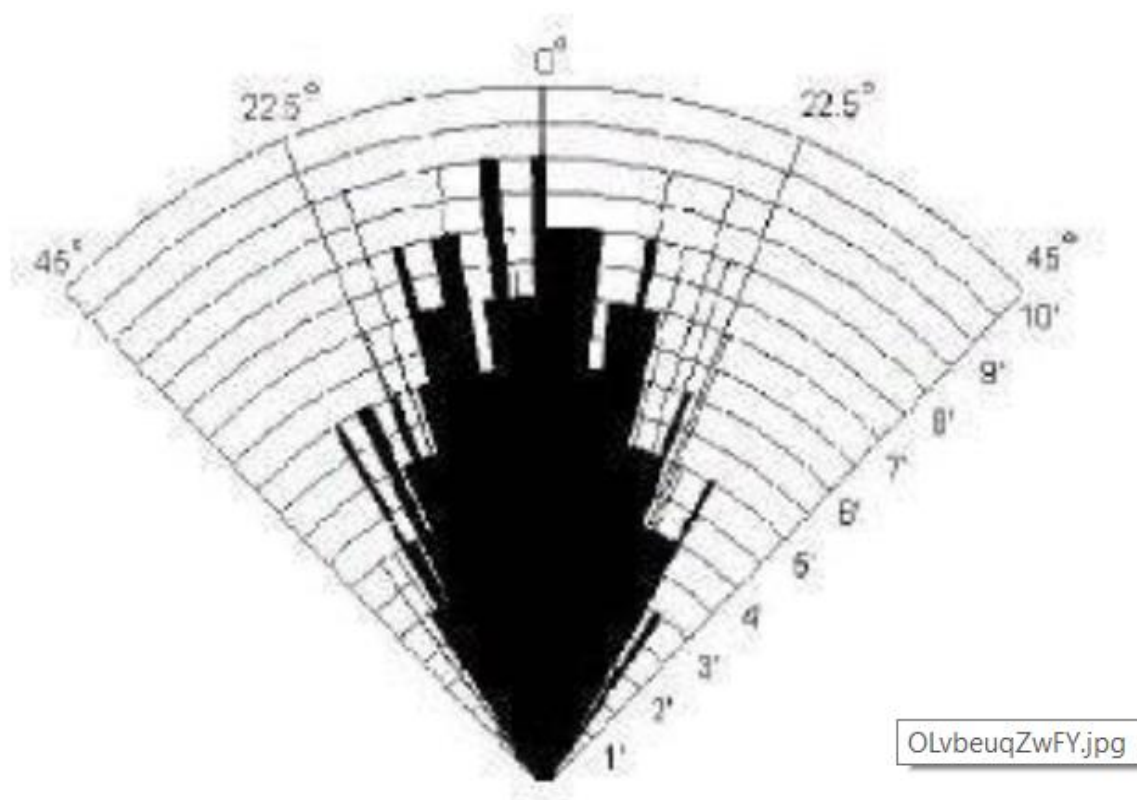


Рисунок 1 – Діаграма направленості HC-SR04

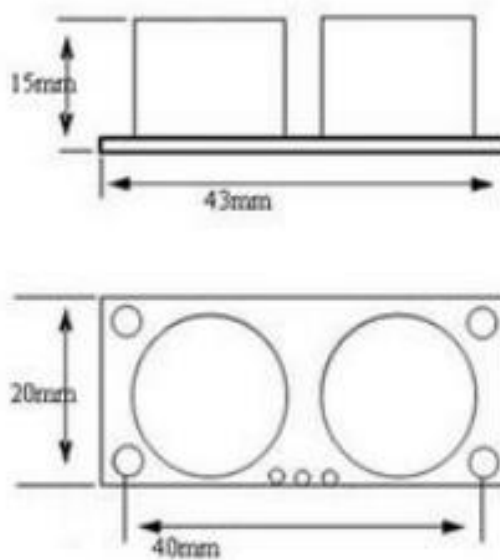


Рисунок 2 – Розміри датчика HC-SR04

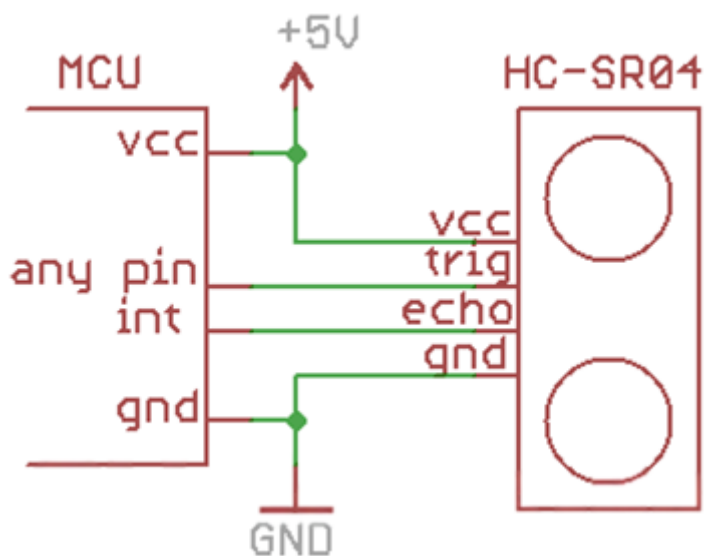


Рисунок 3 - Блок-схема ультразвукового сенсора HC-SR04, що відображає взаємодію його основних компонентів

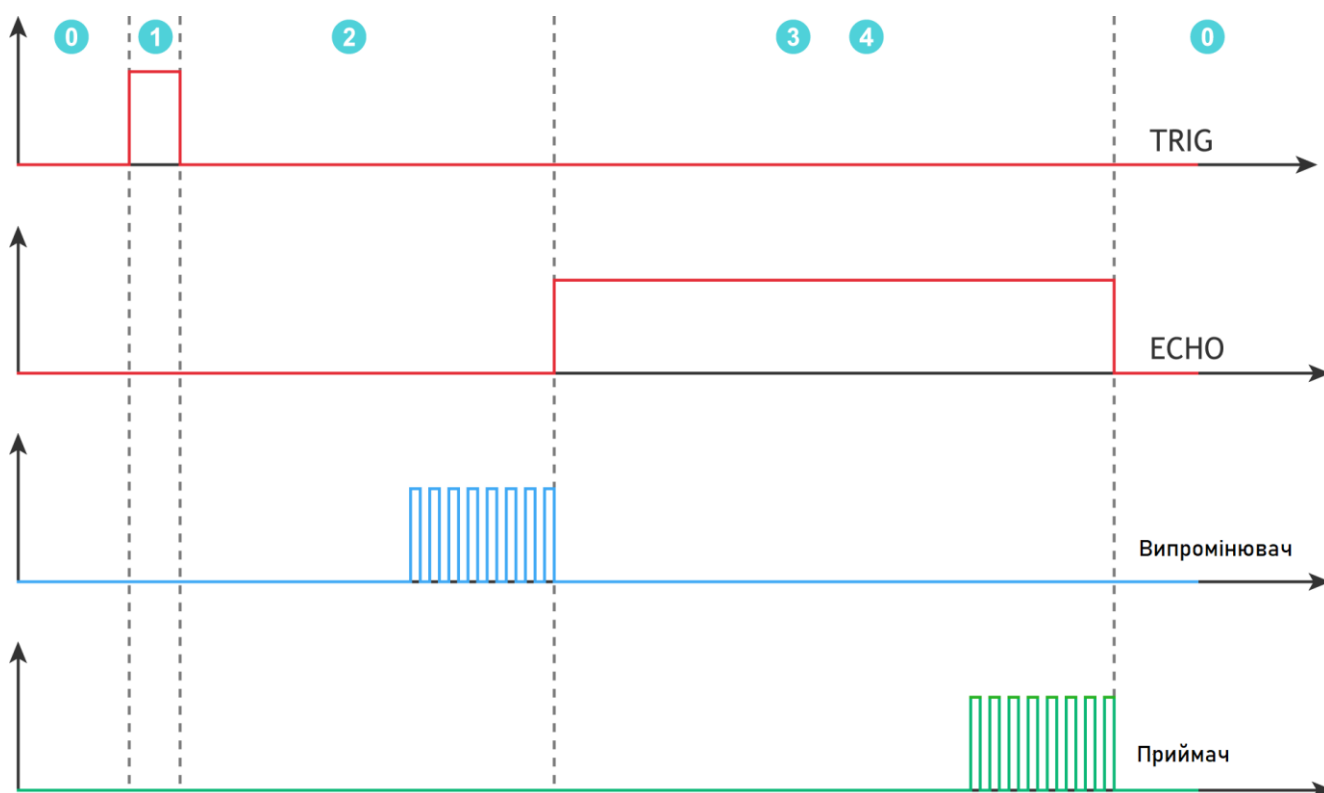


Рисунок 4 - Схема роботи ультразвукового далекоміра: 0 - початковий стан, 1 - відправка триггеру (TRIG), 2 - очікування відлуння (ECHO), 3 - прийом відлуння (приймач), 4 - вимірювання відстані

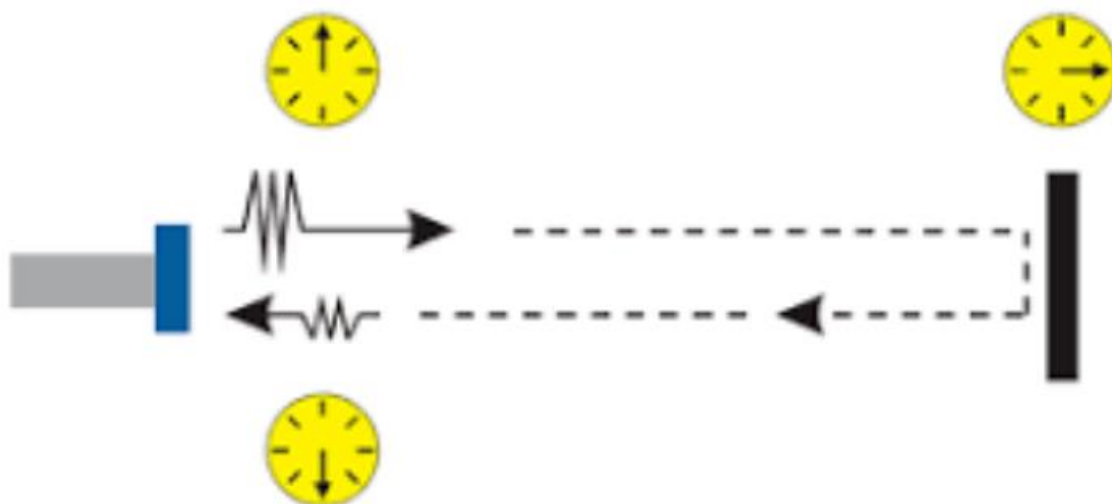


Рисунок 5 – Проходження ультразвукової хвилі в часі

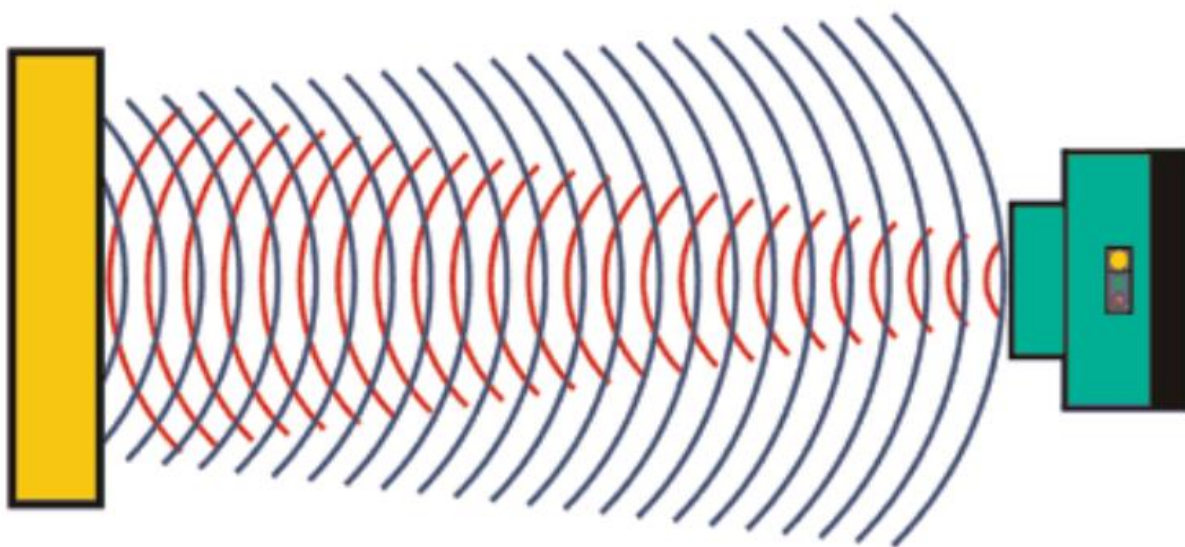
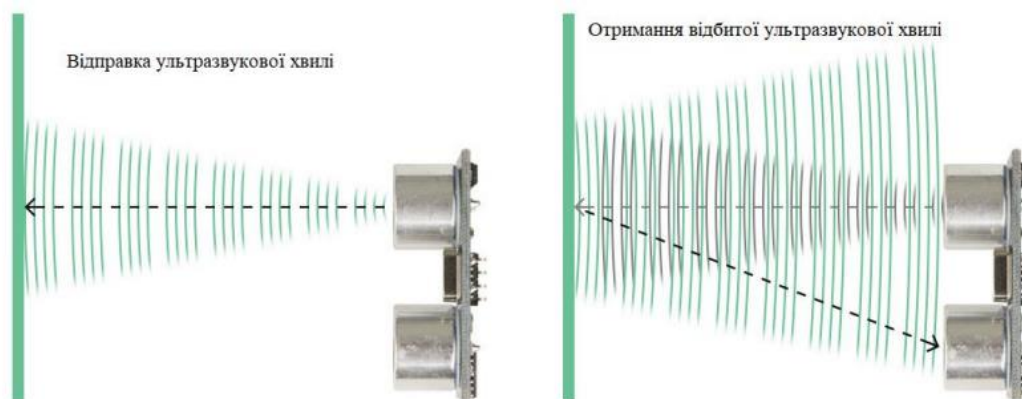


Рисунок 6 – Діапазон функціонування вихідної та входної ультразвукової хвилі



Рисунку 7 – Робота ультразвукового сенсора з вертикальною поверхнею



Рисунок 8 – Блок-схема роботи ультразвукового засобу контролю відстані

Додаток Б
(обов'язковий)

**ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ НАВЧАЛЬНОЇ (БАКАЛАВРСЬКОЇ) КВАЛІФІ-
КАЦІЙНОЇ РОБОТИ**

ЗАСІБ КОНТРОЛЮ ВІДСТАНІ МІЖ ОБ'ЄКТАМИ

ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Назва роботи: «Засіб контролю відстані між об'єктами»

Тип роботи: Бакалаврська кваліфікаційна робота
(бакалаврська кваліфікаційна робота / магістерська кваліфікаційна робота)

Підрозділ Кафедра ІРТС
(кафедра, факультет, навчальна група)

Коефіцієнт подібності текстових запозичень, виявлених у роботі
системою StrikePlagiarism 1,36%

Висновок щодо перевірки кваліфікаційної роботи (відмітити потрібне)

- ☒ 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:

Дудатьєв І.А. – к.т.н., доцент каф. ІРТС
(прізвище, ініціали, посада)

Осадчук О.В. – д.т.н., професор, зав. каф. ІРТС
(прізвище, ініціали, посада)

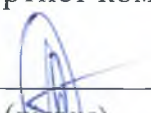

(підпис)

(підпис)

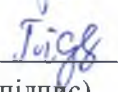
Особа, відповідальна за перевірку 
(підпис)

Семенов А.О.
(прізвище, ініціали)

З висновком експертної комісії ознайомлений(-на)

Керівник 
(підпис)

Дудатьєв І.А. – к.т.н., доцент, ІРТС
(прізвище, ініціали, посада)

Здобувач 
(підпис)

Підлипний Я.С.
(прізвище, ініціали)

Додаток В
(довідниковий)

ЛІСТИНГ ПРОГРАМИ

ЗАСІБ КОНТРОЛЮ ВІДСТАНІ МІЖ ОБ'ЄКТАМИ

Фрагмент код з файлу Ultrasonic.ino

```

#include <TM1637Display.h>

#define TRIG_PIN 12
#define ECHO_PIN 11

#define CLK 2
#define DIO 3

TM1637Display display(CLK, DIO);

void setup() {
  Serial.begin(9600); // Ініціалізація послідовного порту
  pinMode(TRIG_PIN, OUTPUT); // Налаштування піна TRIG як вихід
  pinMode(ECHO_PIN, INPUT); // Налаштування піна ECHO як вхід
  display.setBrightness(0x0f); // Встановлення максимальної яскравості дисплея
}

void loop() {
  digitalWrite(TRIG_PIN, LOW); // Очищення сигналу TRIG
  delayMicroseconds(2); // Затримка 2 мікросекунди
  digitalWrite(TRIG_PIN, HIGH); // Встановлення сигналу TRIG
  delayMicroseconds(10); // Затримка 10 мікросекунд
  digitalWrite(TRIG_PIN, LOW); // Вимкнення сигналу TRIG
  long duration = pulseIn(ECHO_PIN, HIGH, 30000); // Вимірювання тривалості ім-
пульсу
  long distance = duration / 58; // Перетворення тривалості в відстань (у см)
  Serial.print("Відстань: "); // Виведення тексту "Відстань: "
  Serial.print(distance); // Виведення значення відстані
  Serial.println(" см"); // Виведення одиниці вимірювання
  // Перевірка, чи відстань у межах допустимого діапазону (2 см до 400 см)
  if (distance >= 2 && distance <= 400) {
    display.showNumberDec(distance, false); // Відображення відстані на дисплеї
  } else {
    // Відображення "----" для некоректних або поза межних значень
    const uint8_t dash[] = {
      SEG_G, // -
      SEG_G, // -
      SEG_G, // -
      SEG_G // -
    };
    display.setSegments(dash); // Встановлення символів "----" на дисплеї
    delay(500); // Затримка 500 мс перед наступним вимірюванням
  }
}

```