

Міністерство освіти і науки України

Луцький національний технічний університет

(повне найменування закладу вищої освіти)

Факультет робототехніки та штучного інтелекту

(повне найменування факультету)

Кафедра електроніки, фізики та СМАРТ-систем

(повне найменування кафедри)

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
ЗА СТУПЕНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ «БАКАЛАВР»**

ПРИСТРІЙ АВТОМАТИЧНОГО ДЕТЕКТУВАННЯ ОБ'ЄКТІВ

AUTOMATIC OBJECT DETECTION DEVICE

спеціальність 171 Електроніка

(шифр і назва спеціальності)

освітня програма «Електроніка»

(назва освітньої програми)

Виконав: здобувач вищої освіти
групи ЕЛ-41

Попіка Юрій Геннадійович

(підпис)

Керівник:

к.т.н., доцент

Ткачук Анатолій Анатолійович

(підпис)

Кваліфікаційну роботу
допущено до захисту

« » 2026 р.

Гарант освітньої програми:

к.т.н., доцент

Мороз Сергій Анатолійович

(підпис)

Луцьк – 2026 року

ЛУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет комп'ютерних та інформаційних технологій

Кафедра електроніки та телекомунікацій

Ступінь вищої освіти: бакалавр

Галузь знань: 17 Електроніка, автоматизація та електронні комунікації

Спеціальність: 171 Електроніка

Освітня програма: «Електроніка»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

доц. В. ЗАБЛОЦЬКИЙ

« _____ » _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ ВИЩОЇ ОСВІТИ

Попікі Юрію Геннадійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема кваліфікаційної роботи *Пристрій автоматичного детектування об'єктів*

Керівник роботи *к.т.н., доцент Ткачук Анатолій Анатолійович*

затверджені наказом закладу вищої освіти від «31» грудня 2025 року №559/01-02

2. Термін подання здобувачем кваліфікаційної роботи 04.06.2025 р.

3. Вихідні дані до роботи 1. Сенсорний модуль – ультразвуковий давач HC-SR04 або сумісний аналог; 2. Мікроконтролерний вузол – плата на основі Atmega328P, зокрема Arduino Nano; 3. Номінальна напруга живлення 5В постійного струму; 4. Робоча зона виявлення – 0,05 – 1,50 м; 5. Порога відстань спрацювання – 1,00м, тривалість імпульсу Trig - 10мкс; 6. Тайм-аут очікування Echo-сигналу – 15мс; 7. Орієнтовна частота оновлення – 14Гц; 8. Світлова та звукова індикація.

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):

Вступ

Розділ 1 Аналіз методів та засобів автоматичного детектування об'єктів та постановка задачі розробки

Розділ 2 Проектування апаратної та програмної частин пристрою автоматичного детектування об'єктів

Розділ 3 Розрахунок, моделювання та експериментальне дослідження пристрою

Розділ 4 Охорона праці та безпека у надзвичайних ситуаціях

Висновки

5. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу:

Демонстраційний матеріал у вигляді презентації Power Point.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис	
		завдання видав	завдання прийняв
<i>Аналіз методів та засобів автоматичного детектування об'єктів та постановка задачі розробки</i>	<i>Ткачук А. А., доцент</i>		
<i>Проектування апаратної та програмної частин пристрою автоматичного детектування об'єктів</i>	<i>Ткачук А. А., доцент</i>		
<i>Розрахунок, моделювання та експериментальне дослідження пристрою</i>	<i>Ткачук А. А., доцент</i>		
<i>Охорона праці та безпека у надзвичайних ситуаціях</i>	<i>Заблоцький В. Ю., доцент</i>		
<i>Нормоконтроль</i>	<i>Селепина Й. Р., доцент</i>		
<i>Гарант ОП</i>	<i>Мороз С. А., доцент</i>		
<i>Показник запозичень тексту</i>	_____ %		
<i>Академічна доброчесність</i>	<i>Ткачук А. А., доцент</i>		

7. Дата видачі завдання 31 грудня 2025 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	<i>Розділ 1 Аналіз методів та засобів автоматичного детектування об'єктів та постановка задачі розробки</i>	до 14.02.2026 р.	
2.	<i>Розділ 2 Проектування апаратної та програмної частин пристрою автоматичного детектування об'єктів</i>	до 14.03.2026 р.	
3.	<i>Розділ 3 Розрахунок, моделювання та експериментальне дослідження пристрою</i>	до 14.04.2026 р.	
4.	<i>Розділ 4 Охорона праці та безпека у надзвичайних ситуаціях</i>		
5.	<i>Висновки</i>	до 20.05.2026 р.	
6.	<i>Формування списку використаних джерел</i>	до 25.05.2026 р.	
7.	<i>Оформлення ілюстративного матеріалу</i>	до 30.05.2026 р.	
8.	<i>Нормоконтроль</i>	до 02.06.2026 р.	
9.	<i>Інструментальна перевірка на академічний плагіат</i>	до 03.06.2026 р.	
10.	<i>Представлення кваліфікаційної роботи бакалавра до захисту</i>	до 04.06.2026 р.	

Здобувач вищої освіти

(підпис)

Попіка Ю. Г.

(прізвище, ініціали)

Керівник кваліфікаційної роботи

(підпис)

Ткачук А. А.

(прізвище, ініціали)

АНОТАЦІЯ

Попіка Ю. Г. Пристрій автоматичного детектування об'єктів. Рукопис. Кваліфікаційна робота бакалавра, спеціальність 171 Електроніка. Луцький національний технічний університет, Луцьк, 2026.

Робота присвячена розробці пристрою автоматичного виявлення об'єктів. Систему реалізовано на базі мікроконтролера ATmega328P та ультразвукового давача HC-SR04. Виконано моделювання в Proteus, макетування та експериментальне дослідження. Пристрій забезпечує високу достовірність спрацювання, середню абсолютну похибку 4 мм та низьке енергоспоживання.

Ключові слова: автоматичне детектування, мікроконтролер, ультразвуковий сенсор, схемотехнічне моделювання, індикація.

ANNOTATION

Popika Y. Device for Automatic Detection of Objects. – Manuscript. Bachelor's qualification work, specialty 171 Electronics. – Lutsk National Technical University, Lutsk, 2026.

The work is devoted to the development of an automatic object detection device. The system is implemented based on the ATmega328P microcontroller and HC-SR04 ultrasonic sensor. Simulation in Proteus, breadboarding, and experimental research were performed. The device ensures high triggering reliability, an average absolute error of 4 mm, and low power consumption.

Keywords: Automatic Detection, Microcontroller, Ultrasonic Sensor, Circuit Simulation, Indication.

ЗМІСТ

ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ АВТОМАТИЧНОГО ДЕТЕКТУВАННЯ ОБ'ЄКТІВ ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ РОЗРОБКИ.....	10
1.1 Призначення та сфери застосування систем автоматичного детектування об'єктів	10
1.2 Аналіз існуючих методів і технічних засобів виявлення об'єктів	13
1.3 Огляд сучасної елементної бази для побудови пристрою	17
1.4 Формування технічних вимог і постановка задачі проєктування.....	21
РОЗДІЛ 2 ПРОЄКТУВАННЯ АПАРАТНОЇ ТА ПРОГРАМНОЇ ЧАСТИН ПРИСТРОЮ АВТОМАТИЧНОГО ДЕТЕКТУВАННЯ ОБ'ЄКТІВ	26
2.1 Розробка структурної схеми пристрою	26
2.2 Обґрунтування вибору мікроконтролера, сенсорів і допоміжних модулів	28
2.3 Розробка принципової електричної схеми пристрою	32
2.4 Розробка алгоритму роботи та програмного забезпечення пристрою	34
РОЗДІЛ 3 РОЗРАХУНОК, МОДЕЛЮВАННЯ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРИСТРОЮ	37
3.1 Розрахунок основних параметрів і вузлів пристрою	37
3.2 Моделювання та макетування пристрою	42
3.3 Налагодження і тестування пристрою	49
3.4 Аналіз результатів дослідження та оцінка ефективності роботи	55
РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКИ У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	61
4.1 Аналіз умов праці та потенційних небезпечних факторів при розробці пристрою	61
4.2 Забезпечення електробезпеки під час макетування та налагодження.....	61
4.3 Ергономічні вимоги та організація робочого місця розробника	62
4.4 Пожежна безпека при роботі з електронною апаратурою.....	63
ВИСНОВКИ.....	64
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	66
ДОДАТКИ.....	70

ВСТУП

Розвиток сучасної електроніки, мікропроцесорної техніки та сенсорних технологій суттєво розширив можливості створення автоматизованих пристроїв, здатних самостійно виявляти наявність об'єктів, визначати їх появу в контрольованій зоні, реагувати на зміну параметрів середовища та передавати відповідний сигнал керування. У різних галузях техніки дедалі частіше виникає потреба у пристроях, які можуть працювати без постійної участі оператора, швидко фіксувати об'єкт, зменшувати вплив людського фактора та забезпечувати стабільну роботу в умовах повторюваних технологічних процесів. Саме тому пристрої автоматичного детектування об'єктів є важливою складовою сучасних систем контролю, охорони, сортування, обліку, робототехніки, побутової автоматики, промислової автоматизації та навчальних електронних комплексів.

Актуальність теми кваліфікаційної роботи зумовлена тим, що автоматичне виявлення об'єктів сьогодні використовується не лише у складних промислових системах, а й у відносно простих електронних пристроях, побудованих на основі мікроконтролерів, сенсорів і допоміжних модулів. Такі пристрої можуть виконувати функції контролю проходження предметів, фіксації наближення об'єкта, підрахунку одиниць продукції, активації виконавчого механізму, подавання світлової або звукової індикації, передавання сигналу на іншій пристрій або запуску певного алгоритму керування. Для електроніки ця тема є практично значущою, оскільки вона поєднує аналіз фізичних принципів роботи сенсорів, вибір елементної бази, побудову структурної та принципової електричної схем, програмування мікроконтролера, розрахунок параметрів вузлів, макетування, налагодження та експериментальну перевірку працездатності готового пристрою.

Особливе значення має те, що пристрій автоматичного детектування об'єктів повинен забезпечувати не просто наявність електронної схеми, а узгоджену роботу апаратної та програмної частин. Сенсорний вузол має сприймати інформацію про появу об'єкта, мікроконтролер повинен обробляти

отриманий сигнал відповідно до заданого алгоритму, а вихідний вузол має формувати зрозумілу реакцію системи у вигляді індикації, керувального сигналу або іншої дії. У такому пристрої важливими є точність спрацювання, стабільність роботи, швидкодія, завадостійкість, простота конструкції, доступність елементної бази, можливість подальшого вдосконалення та безпечність експлуатації. Недостатньо лише вибрати окремий сенсор або мікроконтролер, оскільки ефективність системи визначається правильністю їх поєднання, електричним узгодженням, логікою програмної обробки сигналів і результатами практичного тестування.

Проблема, що розглядається в кваліфікаційній роботі, полягає у необхідності створення технічно обґрунтованого пристрою, який забезпечує автоматичне детектування об'єктів із використанням сучасної електронної елементної бази та мікроконтролерного керування. У межах цієї проблеми важливо визначити, які методи виявлення об'єктів є доцільними для обраного типу пристрою, які сенсори можуть забезпечити необхідну чутливість і стабільність, який мікроконтролер доцільно використати для обробки сигналів, як побудувати структурну та принципову електричну схеми, яким має бути алгоритм роботи пристрою та яким чином перевірити його працездатність у процесі моделювання, макетування і тестування.

Метою кваліфікаційної роботи є розробка пристрою автоматичного детектування об'єктів на основі електронних сенсорних засобів і мікроконтролерної системи керування, а також перевірка його працездатності шляхом розрахунку основних параметрів, моделювання, макетування, налагодження та експериментального дослідження.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі завдання:

- проаналізувати призначення та сфери застосування систем автоматичного детектування об'єктів;
- розглянути існуючі методи і технічні засоби виявлення об'єктів; виконати огляд сучасної елементної бази, що може бути використана для побудови пристрою;
- сформулювати технічні вимоги до розроблюваного пристрою; розробити

структурну схему пристрою автоматичного детектування об'єктів;

- обґрунтувати вибір мікроконтролера, сенсорів і допоміжних модулів; розробити принципову електричну схему пристрою; сформулювати алгоритм роботи та програмне забезпечення;

- виконати розрахунок основних параметрів і вузлів пристрою; провести моделювання та макетування розробленої системи;

- здійснити налагодження і тестування пристрою;

- проаналізувати результати дослідження та оцінити ефективність роботи запропонованого технічного рішення.

Об'єктом дослідження є процес автоматичного виявлення об'єктів електронними засобами в контрольованій зоні або на визначеній відстані.

Предметом дослідження є апаратно-програмні засоби побудови пристрою автоматичного детектування об'єктів, зокрема сенсорний вузол, мікроконтролерний блок обробки сигналів, допоміжні електронні модулі, алгоритм роботи та програмне забезпечення пристрою.

Методи дослідження, використані у кваліфікаційній роботі, охоплюють аналіз технічної та навчальної літератури з електроніки, мікроконтролерної техніки і сенсорних систем, порівняльний аналіз методів детектування об'єктів, метод структурного проєктування, метод електричного розрахунку параметрів вузлів, метод схемотехнічного моделювання, алгоритмізацію процесу обробки сигналів, програмну реалізацію логіки роботи пристрою, макетування, експериментальне налагодження та перевірку працездатності розробленого пристрою. Застосування цих методів дає змогу не лише теоретично обґрунтувати технічне рішення, а й перевірити його роботу на практиці.

Практичне значення кваліфікаційної роботи полягає в тому, що розроблений пристрій може бути використаний як основа для навчального лабораторного макета, елемента системи автоматизації, вузла охоронної сигналізації, модуля контролю проходження об'єктів або складової частини простішої робототехнічної системи. Запропоноване технічне рішення може бути адаптоване до різних умов експлуатації шляхом зміни типу сенсора,

програмних параметрів, порогу спрацювання, способу індикації або вихідного керування. Практична цінність також полягає у можливості використання результатів роботи для подальшого вдосконалення пристрою, наприклад додавання бездротового передавання даних, підключення дисплея, ведення журналу спрацювань, інтеграції з іншими електронними системами або розширення функцій детектування.

Інформаційну основу кваліфікаційної роботи становлять навчальні та технічні джерела з електроніки, мікроконтролерних систем, сенсорних пристроїв, схемотехніки, програмування вбудованих систем, а також довідкові матеріали щодо характеристик електронних компонентів. Під час виконання роботи враховано принципи побудови апаратно-програмних комплексів, вимоги до стабільності електронних вузлів, особливості підключення сенсорів до мікроконтролера та порядок експериментальної перевірки працездатності електронного пристрою.

Під час виконання кваліфікаційної роботи бакалавра було використано інструменти штучного інтелекту для редагування та форматування тексту, виключно як допоміжний засіб для пошуку ідей, уточнення формулювань та опрацювання літератури. Усі твердження, висновки та результати дослідження належать автору та ґрунтуються на власному аналізі, а отримані результати від генеративного ШІ були перевірені на достовірність та відповідність академічній доброчесності.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ АВТОМАТИЧНОГО ДЕТЕКТУВАННЯ ОБ'ЄКТІВ ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ РОЗРОБКИ

1.1 Призначення та сфери застосування систем автоматичного детектування об'єктів

Системи автоматичного детектування об'єктів належать до технічних засобів електроніки, які забезпечують виявлення появи, переміщення, наближення або відсутності предмета без безпосередньої участі оператора. У межах даної кваліфікаційної роботи такий пристрій розглядається як апаратно програмна система, у якій сенсорний вузол перетворює фізичну ознаку об'єкта на електричний сигнал, мікроконтролер виконує логічну обробку цього сигналу, а вихідний вузол формує результат у вигляді індикації, повідомлення або керувальної дії. У сучасних навчальних і технічних джерелах з електроніки сенсорний пристрій розглядається не як ізольований давач, а як сукупність первинного перетворювача, схеми узгодження, цифрової обробки та засобів відображення або керування [22, 23]. Саме тому автоматичне детектування об'єктів доцільно аналізувати не лише як функцію розпізнавання, а як повний електронний процес отримання, фільтрації, інтерпретації і використання сигналу.

Призначення пристрою автоматичного детектування об'єктів полягає у забезпеченні надійної реакції системи на зміну стану контрольованої зони. У найпростішому випадку система має лише 2 стани, тобто об'єкт присутній або об'єкт відсутній. У складнішому випадку пристрій може визначати відстань до предмета, фіксувати напрям переміщення, підраховувати кількість проходів, контролювати розмір або положення деталі. Для теми даної кваліфікаційної роботи базовим є завдання побудови універсального пристрою, здатного виявляти об'єкт у заданій зоні з використанням доступної елементної бази, мікроконтролерної обробки і можливості подальшого розширення функцій. Такий підхід є практично доцільним, бо в навчальному та прикладному проектуванні електроніки важливо отримати працездатну схему, яку можна

пояснити на рівні фізичного принципу, схемотехнічної реалізації, алгоритму програми і результатів експерименту.

Сфери застосування пристроїв автоматичного детектування об'єктів охоплюють промисловість, транспорт, охоронні системи, побутову автоматизацію, медичну техніку, робототехніку, складську логістику, навчальні стенди та системи контролю доступу. У промислових умовах такі пристрої використовують для визначення наявності виробу на конвеєрі, контролю проходження тари, відстеження положення деталі, зупинки виконавчого механізму у разі появи перешкоди, а також для синхронізації роботи дозаторів, пакувальних механізмів, маніпуляторів і сортувальних ліній. У складській логістиці системи детектування можуть фіксувати рух контейнерів, палет, коробок або окремих одиниць продукції. В охоронних системах подібний пристрій може реагувати на наближення людини або предмета до контрольованого об'єкта. У робототехніці детектування потрібне для уникнення зіткнень, орієнтування у просторі та вибору траєкторії руху мобільного робота.

На рисунку 1.1 наведено приклад використання сенсора наближення в автоматизованій лінії контролю об'єктів, що ілюструє практичне застосування таких систем у промисловому середовищі.

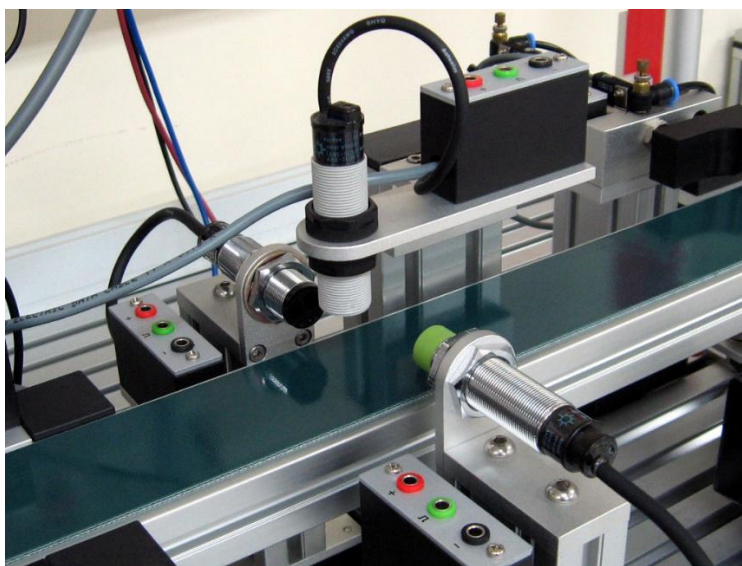


Рисунок 1.1 – Приклад використання сенсора наближення у автоматизованій лінії контролю об'єктів [1]

У науково технічній літературі автоматичне детектування може розглядатися у 2 основних напрямках. Перший напрям пов'язаний із сенсорним виявленням, коли пристрій аналізує одну фізичну ознаку, наприклад відбиття світла, час проходження ультразвукового імпульсу, зміну магнітного поля, ємності, індуктивності або інтенсивності інфрачервоного випромінювання. Другий напрям пов'язаний із машинним зором, коли пристрій отримує зображення і виконує пошук об'єкта за формою, контуром, кольором або навченою моделлю. У сучасних працях з комп'ютерного зору сегментація та виділення області інтересу розглядаються як базові етапи, що дають змогу відокремити об'єкт від фону та підготувати дані до подальшого аналізу [1, 2]. Для кваліфікаційної роботи з електроніки важливо врахувати обидва підходи, однак практична реалізація має бути обрана з урахуванням простоти схеми, вартості компонентів, доступності програмування і можливості перевірки результатів на макеті.

Використання камер і алгоритмів комп'ютерного зору дає ширші можливості, але потребує більш продуктивного процесора, значного обсягу пам'яті, стабільного освітлення, складнішого програмного забезпечення та тривалішого налаштування. У сучасних оглядах систем детектування об'єктів підкреслюється, що методи на основі глибоких нейронних мереж і родини YOLO забезпечують високу швидкість та придатні для задач реального часу, проте потребують якісних даних, обчислювальних ресурсів і коректного навчання моделей [3, 4]. Для пристрою, який розробляється у межах бакалаврської роботи з електроніки, доцільніше застосувати сенсорний принцип, оскільки він дозволяє виконати повний цикл проєктування, а саме вибір давача, розробку електричної схеми, програмування мікроконтролера, розрахунок вузлів і тестування роботи пристрою.

З урахуванням призначення пристрою можна сформулювати його базові функції. Пристрій повинен виявляти об'єкт у контрольованій зоні, перетворювати інформацію від сенсора у цифровий або аналоговий сигнал, порівнювати отримане значення з установленим порогом, формувати логічне рішення про наявність об'єкта, подавати індикацію спрацювання і

забезпечувати можливість подальшого підключення виконавчого елемента. Доцільно передбачити роботу від безпечної низької напруги 5 В, оскільки більшість навчальних мікроконтролерних платформ, ультразвукових модулів, індикаторів і допоміжних плат можуть працювати саме у такому діапазоні. Для експериментального макета достатньо забезпечити зону виявлення до 1,5 м або до 2 м, що відповідає типовим задачам контролю наближення, навчальної робототехніки і простих автоматизованих стендів.

1.2 Аналіз існуючих методів і технічних засобів виявлення об'єктів

Методи виявлення об'єктів у сучасній електроніці відрізняються фізичним принципом роботи, дальністю, точністю, чутливістю до освітлення, типом вихідного сигналу, енергоспоживанням та складністю обробки. Найпоширенішими для малогабаритних пристроїв є оптичні, інфрачервоні, ультразвукові, ємнісні, індуктивні, лазерні, радіолокаційні та відео методи. Оптичні давачі працюють за принципом проходження або відбиття світлового променя. Інфрачервоні сенсори використовують випромінювач і фотоприймач, а результат залежить від інтенсивності відбитого сигналу або від переривання променя. Ультразвукові давачі вимірюють час повернення звукової хвилі після відбиття від об'єкта. Ємнісні сенсори реагують на зміну електричної ємності, індуктивні на зміну електромагнітного поля біля металевих об'єктів, а лазерні ToF модулі визначають відстань за часом польоту оптичного імпульсу.

Для розроблюваного пристрою важливо не лише вибрати метод, який теоретично може виявляти предмет, а й оцінити його придатність до практичного макетування. Оптичний бар'єр є простим і швидким, але він потребує точного взаємного розміщення випромінювача та приймача. Дифузний фотоелектричний давач простіший у монтажі, але його робота залежить від кольору, блиску та кута поверхні об'єкта. Інфрачервоний сенсор наближення є компактним, однак його дальність часто обмежена десятками сантиметрів, а зовнішнє освітлення може створювати завади. Ємнісний давач

зручний для виявлення неметалевих предметів, проте потребує налаштування чутливості і залежить від вологості та діелектричних властивостей матеріалу. Індуктивний сенсор має високу надійність у промисловому середовищі, але здебільшого працює з металевими об'єктами. Ультразвуковий сенсор є вигідним для навчального пристрою, оскільки він може виявляти різні матеріали, працює незалежніше від кольору поверхні та дає змогу отримувати не лише ознаку наявності об'єкта, а й приблизну відстань до нього.

На рисунку 1.2 показано принцип визначення відстані за часом повернення ультразвукового ехо сигналу, який використовується у подальших розрахунках.

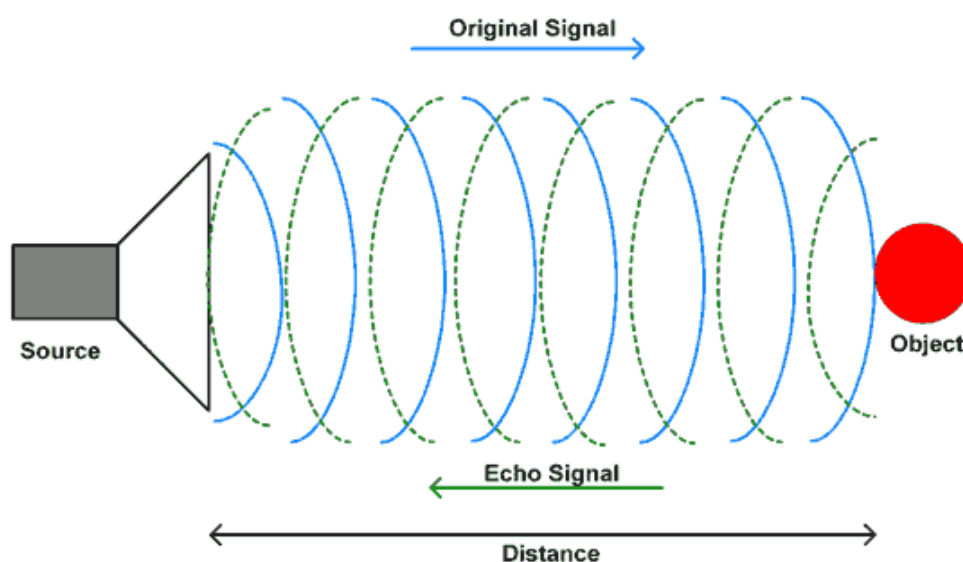


Рисунок 1.2 – Принцип визначення відстані за часом повернення ультразвукового ехо сигналу. Джерело: ElectronicWings [2]

Ультразвуковий метод базується на вимірюванні інтервалу часу між передаванням імпульсу і прийманням відбитого сигналу. Модуль HC SR04, який часто використовується у навчальних і робототехнічних пристроях, за даними технічного опису SparkFun забезпечує безконтактне вимірювання в діапазоні від 2 см до 400 см з точністю до 3 мм, а його робота передбачає формування керувального імпульсу тривалістю не менше 10 мкс і передавання 8 імпульсів частотою 40 кГц [5]. За матеріалами ElectronicWings, Echo вихід залишається активним протягом часу, який відповідає проходженню хвилі до

об'єкта і назад, тому відстань обчислюється з урахуванням подвоєного шляху [6]. Для оцінки цього процесу використовується формула:

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

де d – відстань до об'єкта, м;

v – швидкість поширення звуку в повітрі, м за с;

t – тривалість ехо імпульсу, с.

Якщо під час перевірки пристрою ехо імпульс має тривалість 5,8 мс, а швидкість звуку за нормальних умов прийнято 343 м за с, то відстань становитиме:

$$d = 343 \cdot 0,0058 / 2 = 0,9947 \text{ м.}$$

Отримане значення округлюють до 0,99 м, що є достатнім для контрольного прикладу роботи пристрою. У такому випадку мікроконтролер може порівнювати розраховану відстань із заданим порогом, наприклад 1 м, і формувати сигнал спрацювання, якщо об'єкт наблизився до межі контрольованої зони. Для максимальної відстані 4 м тривалість проходження ультразвуку в обидва боки визначається за формулою:

$$t_{max} = \frac{2 \cdot d_{max}}{v}, \quad (1.2)$$

де t_{max} – максимальний час очікування ехо сигналу, с;

d_{max} – максимальна відстань вимірювання, м;

v – швидкість звуку в повітрі, м за с.

Для $t_{max} = 4$ м маємо $t_{max} = 2 \cdot 4 / 343 = 0,0233 \text{ с} = 23,3 \text{ мс}$. Це означає, що у програмі потрібно передбачити часовий ліміт очікування ехо сигналу приблизно 25 мс, щоб мікроконтролер не блокував виконання основного циклу у разі відсутності об'єкта або втрати відбитого сигналу.

Лазерні та інфрачервоні ToF модулі є точнішими та компактнішими, але вони дорожчі і чутливіші до умов оптичного каналу. Наприклад, модуль VL53L0X компанії STMicroelectronics є лазерним давачем часу польоту, що

працює з невидимим для ока VCSEL випромінювачем 940 нм і може вимірювати абсолютні відстані до 2 м незалежно від відбивної здатності цілі в межах, заявлених виробником [7]. Такі давачі є перспективними для компактних пристроїв, але для навчального макета з відкритою схемою ультразвуковий метод часто є наочнішим, дешевшим і простішим для пояснення. Інфрачервоні інтегровані сенсори наближення, зокрема родина VCNL, поєднують випромінювач, фотодіод і схему обробки в одному корпусі, а окремі модифікації підтримують дальність до 20 см і цифровий інтерфейс I2C [8]. Такі давачі зручні для смартфонів, панелей керування і близького детектування, проте для універсального пристрою контролю об'єктів на відстані до 1 м їх робочий діапазон є недостатнім.

Відео методи мають найбільшу інформативність, бо камера дає змогу аналізувати форму, колір, контур, кількість і розташування об'єктів. Однак відео методи вимагають цифрової обробки зображень, підсвічування, підбору алгоритму, фільтрації шумів і калібрування поля зору. Сучасні джерела з комп'ютерного зору зазначають, що практичні системи аналізу зображень часто потребують поєднання геометричних, статистичних та алгоритмічних методів, а якість результату істотно залежить від умов освітлення, шумів і стабільності сцени [1, 2]. Тому у кваліфікаційній роботі з теми електронного пристрою автоматичного детектування доцільно використати сенсорний метод як основний, а комп'ютерне бачення розглядати як перспективний напрям модернізації, якщо у майбутньому пристрій буде доповнений камерою, одноплатним комп'ютером і алгоритмом розпізнавання.

За результатами порівняння для подальшого проєктування доцільно прийняти комбіновану логіку, у якій основним вимірювальним елементом є ультразвуковий давач, а мікроконтролер виконує розрахунок відстані, порогове порівняння і керування індикацією. Такий варіант має 4 переваги. Перша перевага полягає у простому підключенні, оскільки модуль має виводи живлення, Trig, Echo і GND. Друга перевага пов'язана з наочністю розрахунків, бо відстань прямо визначається з тривалості імпульсу. Третя перевага полягає у невисокій вартості, що важливо для макетування. Четверта перевага полягає

у можливості програмного налаштування порогу без зміни принципової схеми.

1.3 Огляд сучасної елементної бази для побудови пристрою

Елементна база пристрою автоматичного детектування об'єктів повинна забезпечувати сумісність за напругою живлення, типом сигналів, рівнями логіки, швидкодією, габаритами та способом монтажу. До основних вузлів розроблюваного пристрою належать сенсорний модуль, мікроконтролер, вузол індикації, елементи узгодження сигналів, джерело живлення, з'єднувальні провідники і монтажна плата. У навчальному варіанті доцільно застосовувати модульну структуру, оскільки вона дозволяє швидко перевірити працездатність пристрою, замінити окремий вузол і виконати налагодження без виготовлення складної друкованої плати на першому етапі.

Мікроконтролер є центральним елементом пристрою, бо саме він формує імпульс запуску сенсора, вимірює тривалість відповіді, виконує розрахунок відстані, порівнює її з порогом і керує індикацією. Для такої задачі підходять плати на базі ATmega328P, STM32, ESP32 або інших мікроконтролерів. У кваліфікаційній роботі доцільно орієнтуватися на платформу Arduino Uno або Arduino Nano, оскільки вона достатньо поширена, має простий інтерфейс програмування і дозволяє швидко створити макет. За офіційною документацією Arduino UNO Rev3 є платою на основі ATmega328P, має 14 цифрових входів виходів, з яких 6 можуть використовуватися як PWM виходи, 6 аналогових входів, резонатор 16 МГц, USB підключення, роз'єм живлення, ICSP і кнопку скидання [9]. За даними Microchip, ATmega328P містить 32 КБ програмної Flash пам'яті, 1 КБ EEPROM, 2 КБ SRAM і 23 лінії введення виведення загального призначення [10]. Для задачі детектування таких ресурсів достатньо, оскільки потрібно обробити лише кілька цифрових сигналів і сформував просту логіку керування.

На рисунку 1.3 наведено плату Arduino Uno як приклад мікроконтролерної основи пристрою.



Рисунок 1.3 – Плата Arduino Uno як приклад мікроконтролерної основи пристрою [9]

Сенсорний модуль доцільно вибрати відповідно до необхідної дальності виявлення. Для макета пристрою автоматичного детектування об'єктів приймається ультразвуковий давач HC-SR04 або його сумісний аналог. Його основними перевагами є низька ціна, просте підключення, можливість безконтактного вимірювання відстані та широка підтримка у навчальних прикладах. За технічним описом SparkFun цей модуль має діапазон 2 см до 400 см і точність до 3 мм [5]. За матеріалами українських інтернет магазинів, станом на час підготовки роботи, роздрібна ціна базових модулів HC-SR04 у різних постачальників може починатися приблизно від 38 грн до 55 грн, що підтверджує його придатність для маловитратного макетування [24]. У промисловому пристрої потрібно було б розглядати захищені корпусні давачі з класом захисту, стабілізованим виходом, температурною компенсацією і стандартними промисловими інтерфейсами.

Для формування вихідної реакції пристрою можна використати світлодіод, звуковий зумер або релейний модуль. У навчальній реалізації достатньо світлодіодної індикації, яка показує стан наявності об'єкта, а також додаткового зумера для звукового підтвердження. Світлодіод підключається через обмежувальний резистор, що забезпечує безпечний струм. Якщо напруга

живлення становить 5 В, спад напруги на світлодіоді приймається 2 В, а бажаний струм дорівнює 10 мА, то опір резистора розраховується за законом Ома:

$$R_{LED} = \frac{U_{жив} - U_{LED}}{I_{LED}}, \quad (1.3)$$

де R_{LED} – опір обмежувального резистора, Ом;

$U_{жив}$ – напруга живлення, В;

U_{LED} – прямий спад напруги на світлодіоді, В;

I_{LED} – робочий струм світлодіода, А.

Після підстановки одержуємо $R_{LED} = (5 - 2) / 0,01 = 300$ Ом. З урахуванням стандартного номінального ряду доцільно прийняти резистор 330 Ом, що зменшує струм до безпечного рівня приблизно 9 мА. Такий розрахунок потрібний для того, щоб вихід мікроконтролера не працював у перевантаженому режимі.

Під час вибору елементної бази також потрібно оцінити сумарний струм споживання. Для навчального макета можна прийняти струм мікроконтролерної плати 50 мА, струм ультразвукового модуля 15 мА і струм індикатора 10 мА. Сумарний струм визначається за формулою:

$$I_{заг} = I_{МК} + I_{сенси} + I_{інд}, \quad (1.4)$$

де $I_{заг}$ – сумарний струм споживання пристрою, мА;

$I_{МК}$ – струм мікроконтролерного вузла, мА;

$I_{сенси}$ – струм сенсорного вузла, мА;

$I_{інд}$ – струм вузла індикації, мА.

Після підстановки одержуємо $I_{заг} = 50 + 15 + 10 = 75$ мА. Для стабільної роботи джерело живлення слід вибирати із запасом не менше 2, тому мінімальний рекомендований струм джерела становить 150 мА. На практиці доцільно використовувати адаптер 5 В з допустимим струмом 500 мА або більше, оскільки це забезпечить резерв для додавання дисплея, зумера, релейного модуля або бездротового зв'язку.

У таблиці 1.1 наведено узагальнене порівняння елементної бази і технічних параметрів. Таблиця має проєктний характер, тобто її призначення полягає у виборі раціонального комплексу елементів для макета.

Таблиця 1.1 – Порівняльна характеристика елементів для побудови пристрою автоматичного детектування об'єктів

Елемент або метод	Основні параметри	Переваги	Обмеження	Орієнтовна роль у пристрої	Рішення для роботи
HC-SR04	2 до 400 см, 40 кГц, точність до 3 мм за технічним описом	низька вартість, просте підключення, наочний розрахунок відстані	залежність від форми поверхні, температур і кута відбиття	основний сенсорний вузол	прийняти як базовий давач
VL53L0X	лазерний ToF модуль, дальність до 2 м, VCSEL 940 нм	компактність, цифровий інтерфейс, добра точність на малих відстанях	вища вартість, вимоги до оптичного вікна	альтернативний сенсор модернізації	розглядати як резервний варіант
ІЧ давач наближення VCNL	інтегровані випромінювач, фотодіод, 12 або 16 бітний АЦП, дальність до 20 см для окремих моделей	малі габарити, низьке споживання, I2C	коротка дальність для універсального макета	давач близького наближення	не приймати як основний
Arduino Uno або Nano	ATmega328P, 16 МГц, 14 цифрових ліній, 6 аналогових входів, 32 КБ Flash	просте програмування, доступність, достатні ресурси	обмежені обчислювальні можливості для відео аналізу	керування, розрахунок, індикація	прийняти як базу макета

Продовження таблиці 1.1

ESP32	двоядерний 32 бітний мікропроцесор до 240 МГц, Wi Fi і Bluetooth, до 26 GPIO у модулі WROOM 32E	висока продуктивність, бездротовий зв'язок	логіка 3,3 В, складніше налагодження для початкового макета	модернізація з передавання даних	не обов'язковий у базовій схемі
-------	---	--	---	----------------------------------	---------------------------------

З таблиці 1.1 видно, що для базової реалізації найбільш збалансованим є поєднання мікроконтролерної плати Arduino Uno або Nano з ультразвуковим модулем HC-SR04. Таке рішення забезпечує достатню дальність для навчального і прикладного макета, має просту схему підключення, дозволяє виконати реальні розрахунки та не потребує дорогого обладнання. Для подальшого вдосконалення можна використати ToF сенсор VL53L0X або перейти на ESP32, якщо потрібно додати бездротове передавання результатів або інтеграцію в систему Інтернету речей. Однак у межах даної кваліфікаційної роботи головним критерієм є не максимальна технологічна складність, а відповідність меті розробки, стабільність роботи, доступність компонентів і можливість експериментальної перевірки.

1.4 Формування технічних вимог і постановка задачі проєктування

Формування технічних вимог є завершальним етапом аналітичного розділу, оскільки саме після аналізу призначення, методів і елементної бази можна визначити, яким має бути розроблюваний пристрій. Методичні вказівки до випускної кваліфікаційної роботи з електроніки передбачають, що перший розділ має містити аналіз завдання на розробку, порівняння відомих реалізацій, обґрунтування вибору конкретного варіанту і за потреби розрахунок системних параметрів. Також у методичних вимогах наголошено, що розділи пояснювальної записки мають бути пов'язані між собою і з

графічною частиною роботи. Тому технічні вимоги до пристрою автоматичного детектування об'єктів формуються так, щоб надалі їх можна було використати у структурній схемі, принциповій електричній схемі, алгоритмі програми, макетуванні і тестуванні.

Розроблюваний пристрій призначений для автоматичного виявлення об'єктів у контрольованій зоні з використанням ультразвукового сенсора та мікроконтролерної обробки сигналу. Пристрій повинен працювати від джерела постійної напруги 5 В, формувати імпульс запуску сенсора, вимірювати тривалість ехо імпульсу, обчислювати відстань до об'єкта, порівнювати її із заданим порогом і подавати індикацію у разі виявлення. Для макета приймається робоча дальність 0,05 до 1,5 м, оскільки такий діапазон достатній для демонстрації роботи, зменшує вплив випадкових відбиттів і не потребує великого лабораторного простору. Верхній технічний потенціал давач може становити до 4 м, але у кваліфікаційній роботі доцільно закласти робочу зону меншою, щоб результати тестування були стабільнішими.

На рисунку 1.4 подано часову діаграму керування ультразвуковим модулем HC-SR04, яка пояснює послідовність сигналів Trig та Echo.

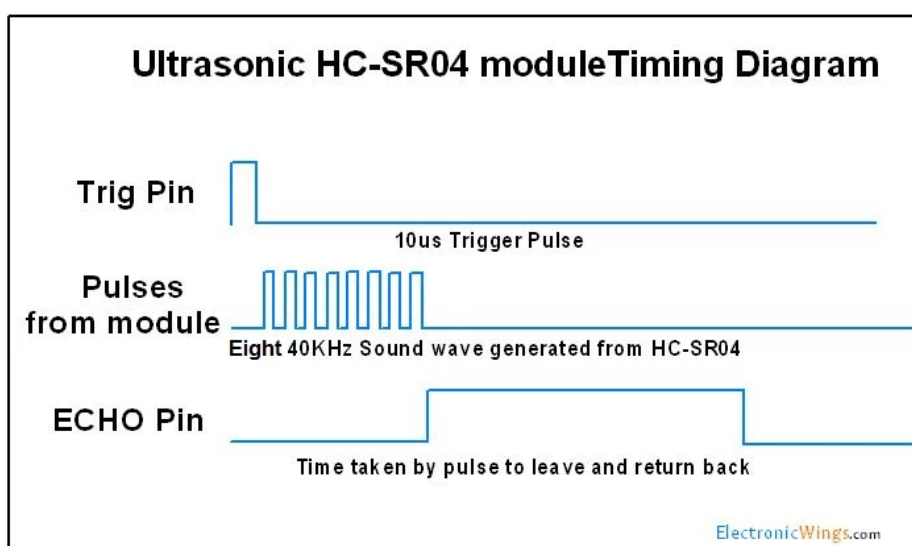


Рисунок 1.4 – Часова діаграма керування ультразвуковим модулем HC-SR04 [8]

До функціональних вимог належить здатність пристрою виконувати автоматичне опитування сенсора з періодом не менше 60 мс, щоб уникнути

накладання попереднього ультразвукового відбиття на наступне вимірювання. Алгоритм має передбачати початкову ініціалізацію портів мікроконтролера, формування 10 мкс імпульсу на вході Trig, вимірювання тривалості імпульсу Echo, перерахунок часу у відстань, порівняння з порогом, керування світлодіодом і, за потреби, виведення результату в послідовний порт. Якщо ехо сигнал не отримано протягом граничного часу, програма повинна переходити до наступного циклу без зависання. Таке рішення підвищує надійність, бо реальні сенсори можуть не отримати відбиття від м'яких, похилих або дуже малих об'єктів.

До електричних вимог належить сумісність рівнів сигналів між сенсором і мікроконтролером, захист виходу мікроконтролера від перевантаження, правильне підключення загальної шини GND і застосування обмежувального резистора для світлодіода. Якщо використовується плата Arduino Uno або Nano, рівень логіки 5 В сумісний із типовим HC-SR04. Якщо у майбутньому буде використано ESP32 з рівнем логіки 3,3 В, вихід Echo ультразвукового модуля потрібно узгоджувати через подільник напруги або логічний перетворювач. До конструктивних вимог належить розташування сенсора на передній частині макета без механічного перекриття передавача і приймача, фіксація модуля так, щоб напрям випромінювання відповідав контрольованій зоні, а також забезпечення доступу до живлення і програмування мікроконтролера.

До метрологічних вимог у межах навчального макета належить повторюваність спрацювання при наближенні об'єкта до порога. Для кваліфікаційної роботи достатньо, щоб пристрій стабільно фіксував об'єкт на відстанях 0,2 м, 0,5 м, 1 м і 1,5 м з допустимим відхиленням, яке визначатиметься під час експериментального дослідження. Абсолютна точність на рівні промислового вимірювача не є метою роботи, оскільки пристрій призначений передусім для детектування, а не для високоточного далекомірного вимірювання. Основним результатом має бути правильна логічна реакція системи на появу об'єкта у заданій зоні. Для оцінки ефективності в третьому розділі доцільно порівняти задані і виміряні відстані,

визначити середню похибку, побудувати таблицю результатів і зробити висновок щодо працездатності.

З економічного погляду обраний варіант є доцільним для навчальної кваліфікаційної роботи, оскільки він використовує доступні модулі і не потребує складного промислового обладнання. За поточними відкритими прайсами українських постачальників, модуль HC-SR04 може коштувати близько 38 до 55 грн, а Arduino Nano на базі ATmega328P може коштувати близько 110 грн [24, 25]. Навіть з урахуванням макетної плати, проводів, світлодіодів, резисторів і зумера загальна вартість експериментального зразка може залишатися низькою порівняно з промисловими давачами або готовими системами машинного зору.

Постановка задачі проєктування полягає у розробці пристрою автоматичного детектування об'єктів, який складається із сенсорного вузла на основі ультразвукового модуля, мікроконтролерного блоку обробки, вузла індикації та джерела живлення. У другому розділі необхідно розробити структурну схему пристрою, обґрунтувати вибір мікроконтролера, сенсора і допоміжних модулів, сформувавши принципову електричну схему, описати алгоритм роботи та підготувати програмне забезпечення. У третьому розділі необхідно виконати розрахунок основних параметрів, провести моделювання або макетування, налагодити пристрій, виконати експериментальні вимірювання і проаналізувати їх результати. Така постановка задачі безпосередньо відповідає змісту кваліфікаційної роботи, у якому передбачено перехід від аналітичного огляду до схемного проєктування і практичного дослідження працездатності пристрою. Сформовані вимоги покладено в основу технічного завдання, повну редакцію якого наведено у додатку А.

Після виконаного аналізу можна зробити висновок, що для теми Пристрій автоматичного детектування об'єктів найбільш раціональною є реалізація на основі ультразвукового сенсора і мікроконтролера ATmega328P. Такий варіант забезпечує достатню функціональність, простоту побудови, прозорість розрахунків, невисоку вартість і можливість подальшої модернізації. Вибір саме цього варіанту обґрунтовується відповідністю

задачам кваліфікаційної роботи, доступністю компонентів, можливістю виконання реального макета та наявністю чітких критеріїв перевірки результатів.

РОЗДІЛ 2

ПРОЄКТУВАННЯ АПАРАТНОЇ ТА ПРОГРАМНОЇ ЧАСТИН ПРИСТРОЮ АВТОМАТИЧНОГО ДЕТЕКТУВАННЯ ОБ'ЄКТІВ

2.1 Розробка структурної схеми пристрою

Проектування пристрою автоматичного детектування об'єктів доцільно починати зі структурної схеми, оскільки саме вона дає змогу показати логіку роботи системи без перевантаження опису окремими контактами, номіналами та трасами з'єднань. У сучасних джерелах з вбудованих систем така система розглядається як узгоджена сукупність вхідного фізичного сигналу, обчислювального ядра, програмного алгоритму та вихідної реакції, що безпосередньо відповідає обраній темі кваліфікаційної роботи [26]. У нашому випадку вхідним сигналом є відбитий ультразвуковий імпульс, центральним вузлом є мікроконтролерний блок, а результатом роботи пристрою стає логічне рішення про наявність об'єкта у контрольованій зоні.

Структурна організація пристрою включає сенсорний вузол, мікроконтролерний вузол, блок порогової обробки, індикаторний вузол і систему живлення. Сенсорний вузол формує ультразвуковий імпульс і приймає відбитий сигнал. Мікроконтролерний вузол подає команду запуску вимірювання, відлічує тривалість ехо сигналу, виконує обчислення відстані та порівнює отримане значення з заданим порогом. Блок порогової обробки на функціональному рівні реалізується програмно, тому окремої аналогової схеми компаратора в макеті не потрібно. Вузол індикації подає візуальне та звукове повідомлення про виявлення об'єкта. Система живлення забезпечує спільну напругу 5 В і єдину опорну шину GND для всіх електронних модулів.

Обрана структура відповідає логіці навчального електронного пристрою, у якому чітко простежується шлях сигналу від фізичної події до керувальної дії. Спочатку передавач HC-SR04 випромінює короткий пакет ультразвукових коливань. Після відбиття від об'єкта приймач формує сигнал Echo, тривалість якого пропорційна відстані. Далі мікроконтролер ATmega328P перетворює часовий інтервал на числове значення, зберігає його у змінній програми і

порівнює з пороговим значенням $d_{пор}$. Якщо виміряна відстань є меншою або дорівнює заданому порогу, формується сигнал спрацювання, а індикаторний вузол переходить у активний стан.

Окреме місце у структурній схемі займає канал серійного передавання даних, який використовується не як обов'язкова частина кінцевого пристрою, а як інструмент налагодження. Через цей канал у серійний монітор виводяться розрахована відстань, факт отримання ехо сигналу та поточний стан індикації. Завдяки цьому під час макетування можна перевірити, чи правильно працює сенсор, чи коректно обрано поріг спрацювання і чи не виникає помилкових результатів у разі відсутності об'єкта. Такий підхід робить процес розробки контрольованим і відповідає вимозі методики щодо зв'язку схемного представлення з подальшим налагодженням пристрою.

На рисунку 2.1 подано структурну схему пристрою автоматичного детектування об'єктів. Повний варіант структурної схеми також наведено у додатку Б.



Рисунок 2.1 – Структурна схема пристрою автоматичного детектування об'єктів

Під час оцінювання швидкодії структури важливо визначити тривалість одного повного циклу опитування. Для робочої дальності 1,5 м ехо сигнал повертається приблизно через 8,75 мс. Якщо прийняти імпульс запуску 0,01 мс, програмну обробку 1,00 мс і захисну паузу 60,00 мс, розрахункова тривалість циклу визначається таким виразом:

$$T_{\text{цикл}} = t_{\text{Trig}} + t_{\text{Echo}} + t_{\text{обр}} + t_{\text{пауза}}. \quad (2.1)$$

Після підстановки прийнятих значень одержуємо $T_{\text{цикл}} = 0,01 + 8,75 + 1,00 + 60,00 = 69,76$ мс. Це означає, що пристрій здатний оновлювати стан контрольованої зони багаторазово протягом 1 секунди, не перевантажуючи сенсор надмірно частими вимірюваннями. Такий запас є доцільним для демонстраційного макета, оскільки він зменшує ризик накладання акустичних відбиттів і дає достатній час для виведення результату в серійний монітор.

2.2 Обґрунтування вибору мікроконтролера, сенсорів і допоміжних модулів

Вибір мікроконтролера і периферійних модулів визначає функціональність, складність схеми, обсяг програмного забезпечення та можливість практичного складання макета. Для даного пристрою прийнято мікроконтролерну платформу Arduino Nano на основі ATmega328P. Таке рішення є обґрунтованим завдяки компактним габаритам плати, сумісності з живленням 5 В, доступності цифрових ліній введення і виведення, простоті програмування та достатнім обчислювальним ресурсам для обробки одного сенсорного каналу [11]. Мікроконтролер ATmega328P має програмну пам'ять Flash обсягом 32 КБ, SRAM 2 КБ, EEPROM 1 КБ, набір таймерів, цифрові порти і вбудовані інтерфейси передавання даних, що повністю перекриває потреби розроблюваного пристрою [12].

Під час вибору давача вирішальними були 5 критеріїв: безконтактність вимірювання, робота з об'єктами різної поверхні, достатня дальність,

доступність технічної документації та простота узгодження з мікроконтролером. За цими критеріями прийнято ультразвуковий модуль HC-SR04. У технічному описі модуля вказано робочу напругу 5 В, струм до 15 мА, частоту випромінювання 40 кГц, діапазон вимірювання від 2 см до 400 см і необхідність формування імпульсу Trig тривалістю не менше 10 мкс [13]. Саме ці параметри роблять модуль придатним для реалізації простого автоматичного детектора об'єктів, який може не лише фіксувати подію спрацювання, а й орієнтовно визначати відстань до предмета.

Використання Arduino Nano замість повнорозмірної плати Arduino Uno є доцільним у випадку, коли пристрій розглядається не лише як стенд для навчального досліду, а як основа компактного завершеного макета. Nano має малу ширину плати і зручно встановлюється на безпечну макетну плату, що спрощує монтаж. Водночас логічна сумісність із програмним середовищем Arduino зберігається, тому розробник може застосувати стандартні функції цифрового введення, цифрового виведення і вимірювання тривалості імпульсу. Для кваліфікаційного проєкту це важливо, бо дозволяє зосередити увагу на схемотехнічному обґрунтуванні, алгоритмі детектування і результатах експерименту, а не на зайвому ускладненні програмної платформи.

До допоміжних модулів пристрою належать світлодіодна індикація, активний зумер, макетна плата і монтажні провідники. Світлодіод показує факт виявлення об'єкта, тому в процесі налагодження оператор одразу бачить результат роботи алгоритму. Активний зумер створює звукове підтвердження спрацювання і дає змогу використовувати макет у демонстраційному режимі без постійного перегляду серійного монітора. Макетна плата дає можливість перевірити схему до виготовлення друкованого монтажу, що відповідає типовому порядку лабораторного проєктування електронних систем.

На рисунку 2.2 показано схему взаємодії обраних модулів пристрою, що уточнює зв'язки між сенсором, мікроконтролером та індикацією.

Для безпечного підключення світлодіода до цифрового виходу мікроконтролера необхідно вибрати обмежувальний резистор.

Схема взаємодії обраних модулів



Рисунок 2.2 – Схема взаємодії обраних модулів пристрою

У розрахунку приймається вихідна напруга 5 В, спад напруги на світлодіоді 2 В і робочий струм 9 мА. Тоді номінал резистора визначається за формулою:

$$R_{LED} = \frac{U_{вих} - U_{LED}}{I_{LED}}. \quad (2.2)$$

Після підстановки значень одержуємо $R_{LED} = 3 / 0,009 = 333$ Ом. Із стандартного ряду номіналів доцільно вибрати резистор 330 Ом. Такий вибір забезпечує струм індикації близько 9 мА, чого достатньо для помітного світіння світлодіода і водночас не створює надмірного навантаження на цифровий вихід мікроконтролера.

У таблиці 2.1 представлено розрахункову специфікацію та комплексне техніко-економічне обґрунтування вибору основних елементів лабораторного макета із деталізацією їхньої кількості, функціонального призначення, ключових технічних параметрів та орієнтовної вартості апаратних компонентів, що формують апаратну основу розроблюваного пристрою автоматичного детектування об'єктів.

Таблиця 2.1 – Розрахункова специфікація основних елементів макета і їхня орієнтовна вартість станом на 19.05.2026 р.

Елемент	Кількість, шт.	Ключовий параметр	Ціна за одиницю, грн	Призначення
Arduino Nano V3 на ATmega328P	1	логіка 5 В, тактова частота 16 МГц	19	обробка сигналів і керування
Ультразвуковий давач HC-SR04	1	5 В, до 15 мА, 2 до 400 см	49	детектування об'єкта
Активний зумер KY 012	1	сумісність з цифровим виходом	18	звукова індикація
Макетна плата MB 102	1	830 контактних отворів	69	монтаж і налагодження
Разом	5		315	без урахування живлення, проводів і дрібних дискретних елементів

Орієнтовна вартість основних позицій прийнятої елементної бази визначена за відкритими товарними сторінками українського постачальника Arduino.ua станом на 19 травня 2026 року. У таблиці наведено лише ті позиції, які формують ядро макета і безпосередньо впливають на його складання. Світлодіод, резистор, провідники, USB кабель і стабілізоване джерело живлення у підсумкову оцінку не включено, оскільки вони можуть бути наявними у стандартному наборі радіомонтажу. Розрахунок вартості основних елементів подається виразом [17, 18, 28, 29] :

$$C_{\Sigma} = C_{МК} + C_{сенс} + C_{звук} + C_{монтаж}. \quad (2.3)$$

Після підстановки цін маємо $C_{\Sigma} = 179 + 49 + 18 + 69 = 315$ грн. Отриманий результат свідчить, що пристрій автоматичного детектування об'єктів може бути реалізований як відносно недорогий навчальний

електронний макет, придатний для подальшого експериментального дослідження і демонстрації принципів сенсорного контролю.

2.3 Розробка принципової електричної схеми пристрою

Принципова електрична схема конкретизує структурну модель і показує, яким чином функціональні блоки поєднуються на рівні контактів. У даному пристрої всі вузли працюють від загальної напруги 5 В. Лінія 5V мікроконтролерної плати підключається до входу VCC ультразвукового модуля, а виводи GND усіх елементів об'єднуються в єдину спільну шину. Наявність спільної шини GND є критично важливою, оскільки логічні рівні сигналів Trig, Echo, D6 і D7 відлічуються від одного електричного потенціалу. Без цього цифрові сигнали можуть бути інтерпретовані неправильно або працювати нестабільно.

Сенсор HC-SR04 підключається до мікроконтролера 2 цифровими інформаційними лініями. Вихід D9 призначено для формування імпульсу Trig, який запускає нове вимірювання. Вхід D10 приймає імпульс Echo, тривалість якого далі аналізується програмою. Лінія D6 використовується для керування світлодіодною індикацією через резистор R1 номіналом 330 Ом. Лінія D7 керує активним зумером BZ1. Таке розділення виводів зручне для налагодження, оскільки сенсорні сигнали, світловий вихід і звуковий вихід не конфліктують між собою і можуть перевірятися незалежно.

Мікроконтролер ATmega328P має 16 бітний таймер з режимом захоплення часу, а також 8 бітні таймери, що створює апаратну основу для точного обліку часових інтервалів [21]. У спрощеній програмній реалізації для навчального макета тривалість ехо імпульсу може вимірюватися стандартною функцією pulseIn, але з точки зору схемного проектування варто зазначити, що при подальшій модернізації пристрою цю операцію можна перевести на роботу з таймером і перериваннями. У рекомендаціях Microchip щодо таймерів AVR окремо підкреслено значення правильного налаштування таймерних модулів для вимірювання часових параметрів сигналів [16]. Це

підтверджує доцільність вибору ATmega328P як достатньо гнучкої основи для розроблюваного пристрою.

Для підвищення стійкості макета у схемі доцільно передбачити конденсатор C1 ємністю 100 нФ між шинами 5 В і GND у зоні сенсорного модуля. У лабораторному макетуванні цей елемент не завжди є обов'язковим, однак його наявність зменшує вплив короточасних завад у колі живлення, які можуть виникати під час перемикання індикації або старту сенсорного імпульсу. У подальшому, якщо макет буде перенесено на друковану плату, розміщення такого конденсатора поблизу сенсора і мікроконтролера буде виправданим конструктивним рішенням.

На рисунку 2.3 наведено спрощену принципову електричну схему пристрою. Деталізовану принципову електричну схему пристрою подано у додатку В.



Рисунок 2.3 – Спрощена принципова електрична схема пристрою

У сукупності наведена схема дозволяє реалізувати всі потрібні функції пристрою без зайвого ускладнення. Вона містить вузол вимірювання, вузол обробки, окремі лінії індикації та базове живлення. Кожен елемент має чітке призначення, а зв'язки між елементами безпосередньо відповідають алгоритму, який описується у наступному підрозділі. Таке представлення є зручним і для

формування додатка з повною принциповою схемою, і для подальшого створення лістингу програми.

2.4 Розробка алгоритму роботи та програмного забезпечення пристрою

Програмне забезпечення пристрою повинно виконувати 4 основні операції: ініціалізацію портів, запуск вимірювання, обробку ехо сигналу і формування вихідної реакції. На початку програми цифровий вивід Trig встановлюється як вихід, Echo як вхід, лінії LED і зумера як виходи. Далі задається порогова відстань $d_{пор}$, наприклад 50 см або 100 см залежно від потрібного режиму демонстрації. Після цього пристрій переходить у нескінченний цикл, у якому регулярно формує вимірювальний імпульс, приймає відповідь від сенсора і приймає логічне рішення.

Для запуску HC-SR04 у програмі спочатку встановлюється низький рівень на Trig, потім після короткої технічної паузи формується високий рівень тривалістю 10 мкс і знову повертається низький рівень. Така послідовність відповідає технічному опису сенсора [13]. У середовищі Arduino коротка затримка задається функцією `delayMicroseconds`, яка працює у мікросекундному масштабі [14]. Фактична тривалість Echo сигналу може визначатися функцією `pulseIn`, яка вимірює довжину імпульсу HIGH і повертає результат у мікросекундах [27]. Після цього програма переводить час у відстань і порівнює її з пороговим значенням.

Логіка керування індикацією реалізується через цифрове виведення рівнів HIGH і LOW. Якщо об'єкт зафіксовано у межах заданої зони, на лініях D6 і D7 формується активний рівень, унаслідок чого загоряється світлодіод і подається звуковий сигнал. Якщо об'єкт знаходиться далі від порога або ехо сигнал відсутній, індикація вимикається. Стандартна функція `digitalWrite` призначена саме для керування цифровими виходами і встановлення логічного стану HIGH або LOW [15]. Таким чином, програмна частина безпосередньо реалізує логіку, яку було закладено у структурній і принциповій схемах.

Окремою вимогою до алгоритму є обробка ситуації, коли Echo не повертається у заданий час. За відсутності тайм ауту програма може надовго затримуватися у стані очікування, що погіршить швидкодію пристрою. Тому під час програмування слід встановити граничний час очікування, який перевищує потрібний час проходження імпульсу на робочій дальності, але не є надмірним. Для дальності до 1,5 м достатньо приблизно 10 мс з певним запасом, тоді як у лабораторній програмі зручно застосовувати тайм аут 15 мс. Якщо сигнал не зафіксовано, програма присвоює відстані службове значення, вимикає індикацію і переходить до нового циклу опитування.

На рисунку 2.4 подано блок схему алгоритму роботи пристрою автоматичного детектування об'єктів. Розгорнуту блок схему алгоритму наведено у додатку Г.

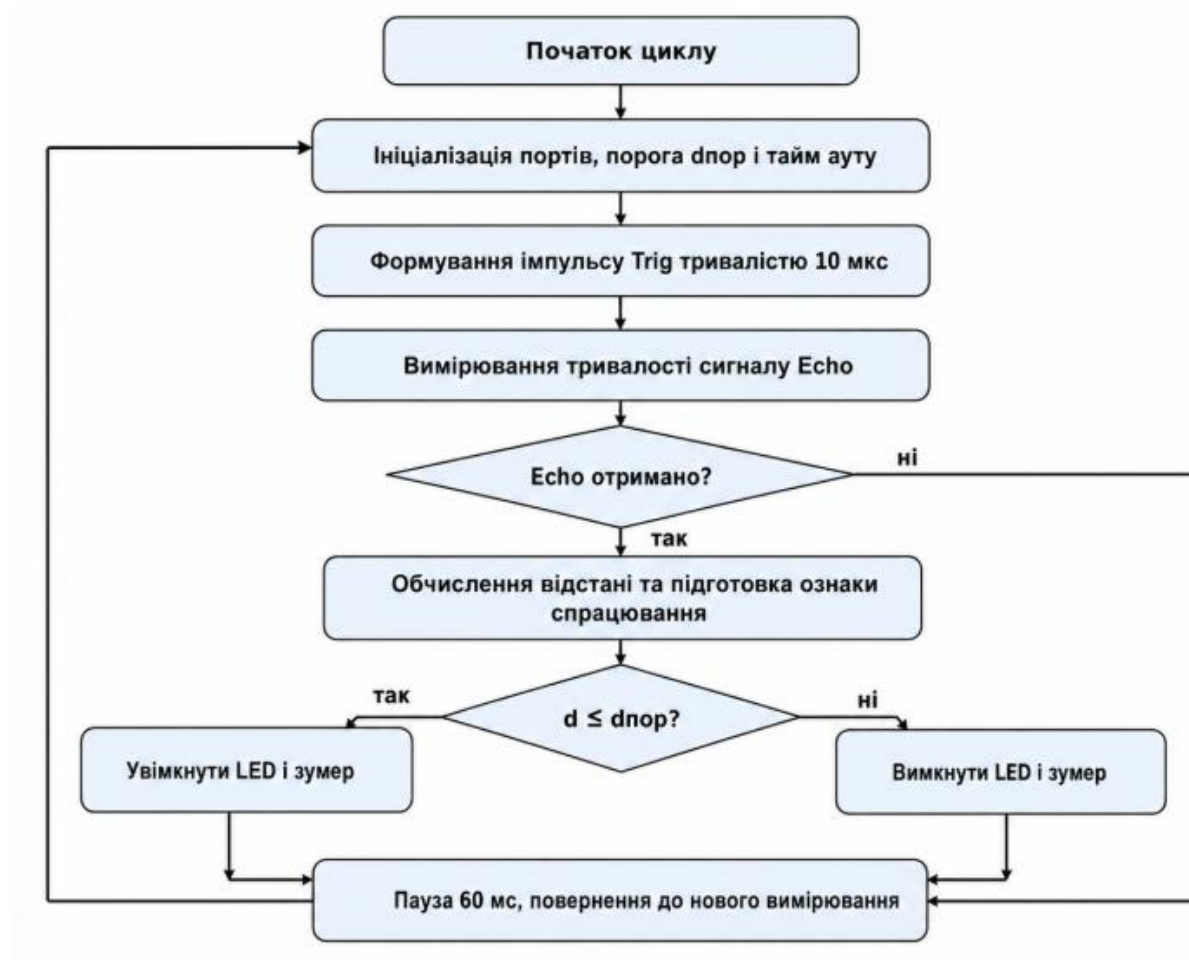


Рисунок 2.4 – Блок схема алгоритму роботи пристрою

Розрахункова частота оновлення стану пристрою пов'язана з тривалістю повного циклу опитування. Якщо використати значення $T_{\text{цикл}} = 69,76$ мс, одержане у підрозділі 2.1, то частота опитування визначається виразом:

$$f_{\text{опит}} = \frac{1}{T_{\text{цикл}}}. \quad (2.4)$$

Після переведення 69,76 мс у секунди маємо $f_{\text{опит}} = 1 / 0,06976 = 14,33$ Гц. Такий результат означає, що пристрій може оновлювати результат приблизно 14 разів за секунду. Для системи автоматичного детектування об'єктів, призначеної для навчального макета, цього цілком достатньо, оскільки реакція світлової та звукової індикації сприймається оператором як практично миттєва.

Підсумовуючи розробку алгоритму, можна зазначити, що програмне забезпечення має просту, але технічно обґрунтовану структуру. Воно узгоджує апаратні вузли пристрою, забезпечує регулярне вимірювання, захищає програму від зависання у разі відсутності ехо сигналу, керує індикацією та формує основу для подальшого експериментального дослідження. Повний лістинг програми подано у додатку Д, а у третьому розділі цей алгоритм використано для моделювання, макетування, тестування і оцінки результатів роботи пристрою.

РОЗДІЛ 3

РОЗРАХУНОК, МОДЕЛЮВАННЯ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРИСТРОЮ

3.1 Розрахунок основних параметрів і вузлів пристрою

Розрахунок основних параметрів пристрою автоматичного детектування об'єктів виконується з урахуванням технічних рішень, прийнятих у попередніх розділах. У роботі використано ультразвуковий модуль HC-SR04, мікроконтролерну платформу Arduino Nano на базі ATmega328P, світлодіодну індикацію та режим програмного порогового прийняття рішення. У попередньому розділі було обґрунтовано робочу зону контролю від 0,05 м до 1,5 м, цифрове формування імпульсу Trig тривалістю 10 мкс і програмне порівняння виміряної відстані з порогом $d_{пор}$. Саме ці вихідні положення використовуються для подальших числових розрахунків.

З погляду електроніки ключовим є не лише факт виявлення об'єкта, а правильне узгодження часових, електричних і енергетичних параметрів усіх вузлів. Сенсор має повернути ехо сигнал у межах заданого часу очікування, мікроконтролер повинен устигнути коректно виміряти тривалість імпульсу, а джерело живлення має забезпечити стабільну роботу сенсора, плати керування й індикації. Тому в цьому підрозділі послідовно визначаються часові параметри ультразвукового каналу, тривалість очікування ехо сигналу, параметри порогового спрацювання, мінімальний струм живлення, потужність базового режиму і орієнтовні витрати електроенергії за типовий період експлуатації.

Технічний опис HC-SR04 вказує, що модуль працює від напруги 5 В, використовує ультразвукові імпульси частотою 40 кГц, підтримує діапазон вимірювання від 2 см до 400 см і запускається імпульсом Trig тривалістю не менше 10 мкс [19]. У даній роботі повний паспортний діапазон не використовується як робочий, оскільки для експериментального макета прийнято контрольовану зону до 1,5 м. Таке обмеження підвищує

повторюваність вимірювань, скорочує час очікування відповіді та робить систему зручнішою для моделювання і подальшого тестування.

Основою обчислення відстані є залежність між тривалістю проходження ультразвукового імпульсу та шляхом, який хвиля долає до об'єкта і назад. Для прийнятого розрахунку швидкість звуку в повітрі береться рівною $v = 343$ м/с. Відстань до об'єкта визначається за формулою:

$$d_i = \frac{v \cdot t_{Echo,i}}{2}, \quad (3.1)$$

де d_i – відстань до об'єкта у контрольній точці, м;

v – швидкість поширення звуку в повітрі, м за с;

$t_{Echo,i}$ – тривалість ехо сигналу для відповідної точки вимірювання, с.

Ділення на 2 враховує те, що ультразвукова хвиля проходить шлях від сенсора до об'єкта і повертається назад до приймача.

Для інженерної перевірки алгоритму зручніше виконати зворотний розрахунок і визначити очікувану тривалість Echo для заздалегідь заданих відстаней 0,2 м, 0,5 м, 1,0 м і 1,5 м. Саме ці точки були закладені в аналітичній частині роботи як базові для експериментальної оцінки працездатності пристрою. Відповідна залежність має вигляд:

$$t_{Echo,i} = \frac{2 \cdot d_i}{v}. \quad (3.2)$$

Після підстановки $v = 343$ м за с одержуємо для 0,2 м час 1,17 мс, для 0,5 м – 2,92 мс, для 1,0 м – 5,83 мс, а для 1,5 м – 8,75 мс. Наведені значення використовуються не як паспортна характеристика модуля, а як розрахункова основа для вибору тайм ауту, порогу спрацювання та очікуваних даних під час майбутнього експериментального вимірювання.

У таблиці 3.1 представлено розрахункові часові параметри детектування об'єкта у контрольних точках із зазначенням значень відстані, часу затримки

ехо-імпульсу та результатів порівняння з пороговою величиною для визначення очікуваного стану роботи індикації.

Таблиця 3.1 – Розрахункові часові параметри детектування об'єкта у контрольних точках

Контрольна відстань d_i , м	Розрахунковий час $t_{Echo,i}$, мс	Час $t_{Echo,i}$, мкс	Порівняння з $d_{пор} = 0,5$ м	Очікуваний стан індикації
0,2	1,17	1166	$d_i < d_{пор}$	LED і зумер активні
0,5	2,92	2915	$d_i = d_{пор}$	LED і зумер активні
1,0	5,83	5831	$d_i > d_{пор}$	Індикація вимкнена
1,5	8,75	8746	$d_i > d_{пор}$	Індикація вимкнена

Таблиця 3.1 показує, що при пороговій відстані $d_{пор} = 0,5$ м алгоритм повинен формувати сигнал спрацювання для об'єкта на відстанях 0,2 м і 0,5 м. Для об'єктів, розташованих на 1,0 м та 1,5 м, індикація не активується. Такий підхід є зручним для перевірки логіки пристрою, бо в процесі налагодження можна зіставити не лише числовий результат вимірювання, а й фактичний стан світлового та звукового виходів.

Порогове значення визначається безпосередньо у програмі. Для базового демонстраційного режиму приймається $d_{пор} = 0,5$ м. Щоб перевести це значення у часовий критерій, необхідно розрахувати відповідну тривалість ехо сигналу. Вона визначається формулою:

$$t_{пор} = \frac{2 \cdot d_{пор}}{v}. \quad (3.3)$$

Після підстановки $d_{пор} = 0,5$ м і $v = 343$ м/с одержуємо $t_{пор} = 2 \cdot 0,5 : 343 = 0,002915$ с = 2,915 мс. Отже, якщо програмно виміряний сигнал Echo має тривалість до 2,915 мс включно, пристрій визначає, що об'єкт перебуває в

контрольованій зоні, і подає команду на вмикання індикації. Якщо час Echo є більшим, система не формує сигнал спрацювання.

Вибір тайм ауту очікування ехо сигналу має суттєве значення для стійкості програми. Найбільша робоча відстань у прийнятій зоні становить $d_{роб, max} = 1,5$ м. Для неї розрахунковий час повернення сигналу становить 8,75 мс. У попередньому розділі як зручне програмне обмеження було прийнято тайм аут 15 мс. Запас за часом оцінюється коефіцієнтом:

$$K_{зап} = \frac{t_{тайм}}{t_{роб, max}}. \quad (3.4)$$

Після підстановки одержуємо $K_{зап} = 15 : 8,75 = 1,71$. Це означає, що вибране значення тайм ауту приблизно на 71 % перевищує розрахунковий час повернення ехо сигналу від об'єкта на межі робочої зони. Такий запас є достатнім для реальної роботи макета, бо зберігає час на можливі затримки формування імпульсу, неоднозначність фронтів сигналу та вплив геометрії поверхні об'єкта, але водночас не затримує програмний цикл надмірно довгим очікуванням.

Окремо оцінюється електричне навантаження, яке має забезпечити джерело живлення. Офіційні технічні характеристики Arduino Nano вказують на робочу напругу 5 В і типове споживання близько 19 мА для плати [20]. У технічному описі HC-SR04 наведено робочий струм до 15 мА [6]. Для світлодіодної індикації у попередньому розділі було прийнято резистор 330 Ом, що відповідає струму близько 9 мА при живленні 5 В. Мінімальний струм базового режиму з активною світловою індикацією визначається за формулою:

$$I_{\Sigma} = I_{Nano} + I_{HC} + I_{LED}. \quad (3.5)$$

Після підстановки числових даних маємо $I_{\Sigma} = 19 + 15 + 9 = 43$ мА. У цьому значенні не враховано короткочасне споживання активного зумера, оскільки він вмикається лише в момент спрацювання. Для практичного макета

джерело 5 В з допустимим струмом 500 мА є достатнім із великим експлуатаційним запасом, що спрощує подальшу модернізацію схеми, наприклад підключення дисплея, додаткового модуля зв'язку або релейного виходу.

Потужність, яку споживає пристрій у базовому розрахунковому режимі, визначається стандартним співвідношенням між напругою і струмом:

$$P_{\Sigma} = U_{\text{жив}} \cdot I_{\Sigma}. \quad (3.6)$$

Для $U_{\text{жив}} = 5$ В і $I_{\Sigma} = 0,043$ А одержуємо $P_{\Sigma} = 5 \cdot 0,043 = 0,215$ Вт. Це дуже невелике значення для електронного пристрою, який працює у постійному режимі контролю. Низька потужність важлива не лише з точки зору енергоспоживання, а й з позиції теплового режиму, оскільки при такому рівні навантаження не виникає суттєвого нагрівання елементів базового макета.

Для стислої економічної оцінки можна визначити орієнтовні витрати електроенергії у демонстраційному режимі. Припускається, що пристрій використовується 8 год на день протягом 250 навчальних або робочих днів на рік. Річне споживання електроенергії визначається за формулою:

$$E_{\text{рік}} = \frac{P_{\Sigma} \cdot t_{\text{день}} \cdot N_{\text{днів}}}{1000}. \quad (3.7)$$

Після підстановки $P_{\Sigma} = 0,215$ Вт, $t_{\text{день}} = 8$ год і $N_{\text{днів}} = 250$ одержуємо $E_{\text{рік}} = 0,215 \cdot 8 \cdot 250 : 1000 = 0,430$ кВт год. Офіційно оприлюднений фіксований тариф для побутових споживачів, чинний після 31 жовтня 2025 року та підтверджений урядовим рішенням, становить 4,32 грн за 1 кВт год [30]. Для оцінки річних витрат використовується формула:

$$C_{\text{ел}} = E_{\text{рік}} \cdot c_{\text{тариф}}. \quad (3.8)$$

Після підстановки значень маємо $C_{\text{ел}} = 0,430 \cdot 4,32 = 1,86$ грн за рік. Наведений результат не є повним кошторисом виробу, але він показує, що споживання електроенергії для обраної схемотехнічної реалізації є майже незначним. В умовах навчального стенда або демонстраційного макета експлуатаційні витрати на живлення практично не впливають на доцільність застосування пристрою.

Мікроконтролер ATmega328P, який використовується в Arduino Nano, має достатні обчислювальні ресурси для реалізації прийнятого алгоритму. За даними Microchip, він містить 32 КБ Flash пам'яті, 2 КБ SRAM, 1 КБ EEPROM і набір таймерів, що дозволяє реалізувати формування керувального імпульсу, обробку Echo сигналу, порогове порівняння та виведення індикації без залучення додаткового обчислювального вузла [21]. Це означає, що розраховані часові параметри можуть бути реалізовані програмно на обраній платформі без перевантаження її ресурсів.

Підсумовуючи розрахунок основних параметрів пристрою, можна зазначити, що робоча зона 0,05 до 1,5 м узгоджується з можливостями ультразвукового модуля HC-SR04, а вибраний тайм аут 15 мс забезпечує достатній часовий запас для надійного приймання ехо сигналу. При порозі $d_{\text{пор}} = 0,5$ м система повинна активувати індикацію для об'єктів, розташованих на 0,2 м і 0,5 м, та залишати її вимкненою для точок 1,0 м і 1,5 м. Мінімальний розрахунковий струм у режимі активної світлової індикації становить 43 мА, потужність - 0,215 Вт, а орієнтовні річні витрати на електроенергію у демонстраційному режимі не перевищують 1,86 грн. Отримані значення створюють кількісну основу для наступних підрозділів, у яких буде виконано моделювання, макетування, налагодження та експериментальну перевірку працездатності пристрою.

3.2 Моделювання та макетування пристрою

Моделювання та макетування пристрою автоматичного детектування об'єктів є необхідним етапом перевірки рішень, прийнятих під час схемного

проектування. У попередніх підрозділах було визначено склад пристрою, обрано ультразвуковий модуль HC-SR04, мікроконтролерну платформу Arduino Nano на базі ATmega328P, світлодіодну та звукову індикацію, а також прийнято робочу зону контролю від 0,05 м до 1,50 м. На цьому етапі потрібно переконатися, що запропонована структурна і принципова схеми можуть бути реалізовані без конфліктів сигналів, що програмний алгоритм коректно реагує на зміну відстані до об'єкта, а фізичний макет придатний для подальшого налагодження і експериментальної перевірки.

Для попередньої перевірки електронної частини доцільно використовувати середовище схемотехнічного моделювання Proteus, оскільки воно підтримує роботу з цифровими схемами, мікроконтролерами, зовнішніми компонентами, а також дозволяє аналізувати поведінку системи до переходу на реальний монтаж [17]. У межах проекту моделювання розглядається не як заміна фізичного експерименту, а як проміжний етап, який дає можливість перевірити правильність логічних зв'язків між вузлами, узгодження цифрових входів і виходів, роботу індикації та послідовність обробки сигналів за алгоритмом пристрою.

Модель пристрою формується відповідно до прийнятої у розділі 2 електричної структури. Джерело вхідної інформації представлено ультразвуковим сенсором HC-SR04. Його керувальний вхід Trig отримує імпульс від цифрового виходу мікроконтролера, а вихід Echo передає часовий сигнал, тривалість якого пов'язана з відстанню до об'єкта. Технічна документація до HC-SR04 передбачає запуск вимірювання імпульсом тривалістю не менше 10 мкс і формування ехо сигналу після передавання пакета ультразвукових коливань частотою 40 кГц [20]. У програмній частині це дає змогу виконати безпосереднє обчислення відстані за часом проходження сигналу та реалізувати порогове виявлення об'єкта.

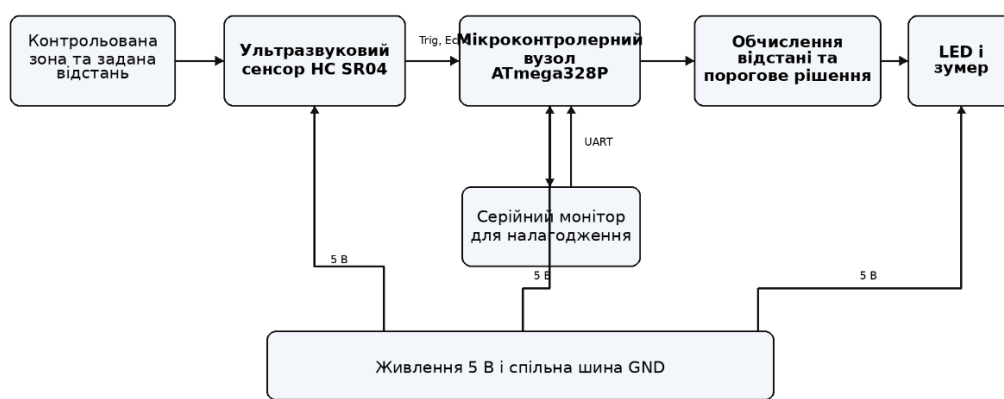
У моделі використовується мікроконтролерний вузол на основі ATmega328P, функціонально сумісний із платформою Arduino Nano. Такий вибір забезпечує єдність між схемою, алгоритмом і майбутнім макетом, оскільки Arduino Nano призначена для встановлення на макетну плату, має

компактне виконання і забезпечує зручне підключення цифрових ліній [21]. Для моделювання приймаються ті самі виводи, що були визначені в розділі 2: D9 використовується для формування сигналу Trig, D10 приймає Echo, D6 керує світлодіодом, а D7 активує звуковий індикатор. Завдяки такому розподілу кожний функціональний канал має окрему лінію, що спрощує аналіз і подальше фізичне збирання.

Під час моделювання особливу увагу приділяють перевірці логіки прийняття рішення. Якщо розрахована відстань до об'єкта не перевищує заданий поріг $d_{пор}$, індикаторний вузол повинен перейти в активний стан. У роботі приймається порогова відстань 1,00 м, оскільки вона зручна для демонстрації як спрацювання, так і відсутності спрацювання в межах обраної робочої зони. Для об'єктів на відстанях 0,20 м, 0,50 м і 1,00 м індикація має активуватися, а для об'єкта на відстані 1,50 м індикація має залишатися вимкненою. Саме така логіка надалі використовується при створенні фізичного макета та проведенні тестування.

На рисунку 3.1 наведено схему моделювання пристрою автоматичного детектування об'єктів.

Схема моделювання пристрою автоматичного детектування об'єктів



Потік вимірювального сигналу показано зверху, лінії живлення винесено вниз, щоб уникнути перетинів.

Рисунок 3.1 – Схема моделювання пристрою автоматичного детектування об'єктів

Основним числовим параметром моделі є тривалість ехо імпульсу, що відповідає заданій відстані до об'єкта. Для розрахунку використовується залежність між часом проходження ультразвукового сигналу, подвоєним шляхом до об'єкта і швидкістю поширення звуку у повітрі. Оскільки сигнал проходить шлях до перешкоди та повертається назад до приймача, у формулі використовується множник 2. Для нормальних умов у розрахунку приймається швидкість звуку $v_{зв} = 343$ м/с:

$$t_{Echo} = \frac{2 \cdot d}{v_{зв}}, \quad (3.9)$$

де t_{Echo} – тривалість ехо імпульсу, с;

d – відстань до об'єкта, м;

$v_{зв}$ – швидкість поширення звуку у повітрі, м за с.

Для першого контрольного режиму приймається $d = 0,20$ м. Після підстановки значення у формулу одержуємо часовий інтервал, який повинен відтворюватися у моделі як відповідь сенсорного каналу.

$$t_{Echo\ 0,20} = \frac{2 \cdot 0,20}{343} = 0,001166\text{ с} = 1166\text{ мкс.} \quad (3.10)$$

Для граничної робочої відстані $d = 1,50$ м тривалість ехо імпульсу є значно більшою, тому цей режим доцільно використовувати для перевірки правильності вибору тайм ауту та для контролю того, що алгоритм не активує індикацію за межами порогу $d_{пор} = 1,00$ м.

$$t_{Echo\ 1,50} = \frac{2 \cdot 1,50}{343} = 0,008746\text{ с} = 8746\text{ мкс.} \quad (3.11)$$

Різниця між мінімальним контрольним режимом 0,20 м і максимальною перевірюваною відстанню 1,50 м показує діапазон часових сигналів, який має коректно опрацьовувати мікроконтролерна програма під час моделювання.

$$\Delta t_{\text{мод}} = t_{Echo\ 1,50} - t_{Echo\ 0,20} = 8746 - 1166 = 7580\text{ мкс.} \quad (3.12)$$

Наведений результат підтверджує, що модель повинна впевнено розрізняти кілька режимів роботи за часом ехо сигналу. Це важливо для подальшого тестування програмного модуля, у якому відстань обчислюється на основі тривалості Echo. Якщо у програмі використовується функція вимірювання довжини імпульсу, вона має працювати з обмеженням за часом, щоб у разі відсутності відбитого сигналу не виникало зависання алгоритму [16].

У таблиці 3.2 подано розрахункові режими моделювання пристрою для перевірки порогового спрацювання.

Таблиця 3.2. Розрахункові режими моделювання пристрою

№ режиму	Задана відстань d , м	Тривалість Echo, мкс	Порівняння з $d_{\text{пор}} = 1,00$ м	Очікувана індикація	Призначення режиму
1	0,20	1166	$d \leq d_{\text{пор}}$	Увімкнена	Перевірка ближньої зони
2	0,50	2915	$d \leq d_{\text{пор}}$	Увімкнена	Перевірка середньої зони
3	1,00	5831	$d = d_{\text{пор}}$	Увімкнена	Перевірка порогового стану
4	1,50	8746	$d > d_{\text{пор}}$	Вимкнена	Перевірка межі робочого діапазону

Аналіз таблиці 3.2 показує, що обрані режими охоплюють як стан гарантованого спрацювання, так і стан, у якому індикаторний вузол не повинен активуватися. Наявність точки $d = 1,00$ м є особливо важливою, оскільки саме в ній перевіряється правильність реалізації порогової умови. Якщо алгоритм порівнює виміряну відстань із порогом за правилом $d \leq d_{\text{пор}}$, то при точному значенні 1,00 м система повинна вважати об'єкт виявленим. У разі застосування іншої логічної умови результат може змінитися, тому під час

моделювання це потрібно перевіряти окремо.

Після програмної перевірки моделі виконується макетування пристрою. Макет формується на безпаячній платі, що дає змогу швидко змінювати з'єднання, виконувати проміжні перевірки мультиметром і оперативно коригувати схему без виготовлення друкованої плати. Центральним елементом макета є Arduino Nano, встановлена таким чином, щоб зберігався доступ до цифрових виходів і шин живлення. Ультразвуковий модуль HC-SR04 розміщується на окремій ділянці, а світлодіод із резистором 330 Ом і активний зумер під'єднуються до визначених раніше ліній D6 та D7.

Під час розведення макета важливо дотримуватися принципу спільного електричного нуля. Усі елементи мають бути підключені до однієї шини GND, інакше цифрові рівні Trig та Echo можуть визначатися нестабільно. Живлення 5 В подається на Arduino Nano та далі розподіляється між сенсорним і індикаторним вузлами. Сигнальні провідники доцільно прокладати окремо від проводів живлення, а довжину ліній Trig і Echo варто робити мінімально необхідною для макета. Такий підхід спрощує налагодження, зменшує ризик випадкових помилок підключення і робить схему візуально зрозумілою.

На рисунку 3.2 показано схему макетування пристрою на безпаячній платі.

Схема макетування пристрою на безпаячній платі

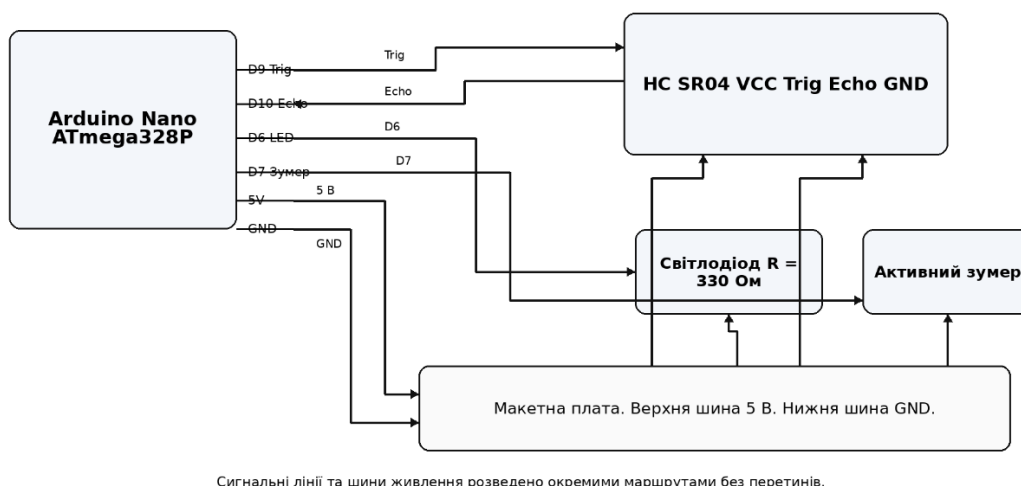


Рисунок 3.2 – Схема макетування пристрою на безпаячній платі

Окремо слід оцінити запас за струмом джерела живлення, оскільки під час макетування до системи одночасно підключаються сенсор, мікроконтролер, світлодіод і зумер. За прийнятими у попередньому розділі значеннями сумарний струм макета становить приблизно 95 мА. Якщо пристрій живиться від USB порту або стабілізованого джерела з допустимим струмом 500 мА, то коефіцієнт струмового запасу визначається таким виразом:

$$K_{\text{рез}} = \frac{I_{\text{дж}}}{I_{\Sigma}} = \frac{500}{95} = 5,26. \quad (3.13)$$

Отримане значення $K_{\text{рез}} = 5,26$ свідчить про достатній запас живлення для макета, тому в процесі моделювання і початкового налагодження не очікується перевантаження джерела. У межах лабораторного зразка це є важливим, оскільки нестача струму могла б призвести до нестабільного перезапуску мікроконтролера, помилкового вимірювання Echo або некоректної роботи зумера.

На рисунку 3.3 наведено вигляд зібраного макета пристрою автоматичного детектування об'єктів.

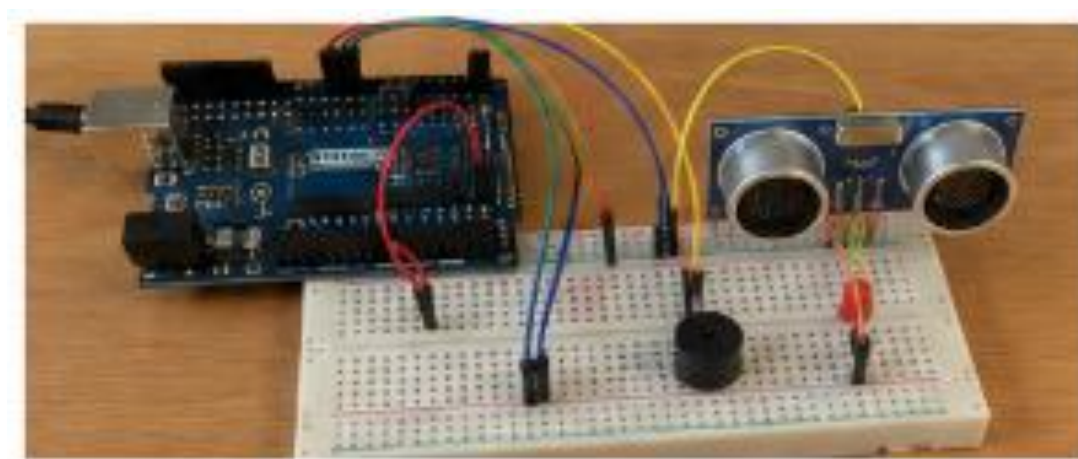


Рисунок 3.3 – Макет пристрою автоматичного детектування об'єктів на макетній платі

З економічної точки зору етап моделювання і макетування є виправданим, оскільки він дозволяє перевірити правильність підключення й алгоритму до переходу на складніший монтаж. У підрозділі 2.2 було визначено орієнтовну вартість основних модулів макета на рівні 315 грн. За такої вартості попереднє моделювання знижує ризик пошкодження компонентів через помилкове підключення живлення або сигнальних ліній, а безпечний монтаж дає змогу не витратити матеріали на перероблення друкованої плати на ранній стадії розробки.

Проведене моделювання та макетування створюють технічну основу для наступного етапу дослідження, а саме налагодження і тестування пристрою. У віртуальній схемі перевірено логіку формування сигналів, визначено контрольні часові режими та сформовано очікувані стани індикації. У фізичному макеті реалізовано ті самі функціональні зв'язки, що й у принциповій схемі, збережено живлення 5 В, узгоджено цифрові лінії Trig та Echo і забезпечено окреме керування світлодіодом та зумером. Це дає підстави переходити до експериментальної перевірки точності вимірювання і стабільності спрацювання пристрою.

3.3 Налагодження і тестування пристрою

Налагодження і тестування пристрою автоматичного детектування об'єктів є обов'язковим етапом перевірки того, що раніше розроблені структурні, схемотехнічні та програмні рішення узгоджені між собою і забезпечують стабільну роботу готового макета. У межах даного підрозділу перевіряється не лише факт спрацювання світлової та звукової індикації, а й правильність формування імпульсу Trig, приймання сигналу Echo, обчислення відстані мікроконтролером, реалізація порогової умови, реакція системи на контрольні відстані та відсутність збоїв під час повторюваних циклів вимірювання. Такий підхід відповідає логіці електронного проектування, коли працездатність системи підтверджується через послідовний контроль вузлів,

перевірку взаємодії між ними і зіставлення отриманих результатів із розрахунковими параметрами.

Налагодження виконувалося для макета, побудованого на основі Arduino Nano з мікроконтролером ATmega328P, ультразвукового модуля HC-SR04, світлодіодної індикації, активного зумера та джерела живлення 5 В. У попередньому підрозділі було прийнято порогову відстань $d_{\text{пор}} = 1,00$ м, за якої система має подавати сигнал при розташуванні об'єкта в межах 0,20 м, 0,50 м і 1,00 м, а при відстані 1,50 м залишати індикацію вимкненою. Саме ця логіка використана під час практичної перевірки, оскільки вона дає можливість оцінити роботу пристрою у ближній зоні, середній зоні, у точці порога та за межами порогового значення. Водночас робочий діапазон пристрою зберігається у межах 0,05 до 1,50 м, що було обґрунтовано на попередньому етапі розрахунку і моделювання. [19; 20]

Початкове налагодження розпочиналося з контролю монтажу і живлення. Перед подаванням напруги перевірялися правильність під'єднання шин 5 В та GND, відповідність сигнальних ліній прийнятій структурі, відсутність переплутування виводів Trig і Echo, наявність резистора у світлодіодному колі та правильність під'єднання зумера. Особливу увагу приділено спільній шині GND, оскільки без єдиного нульового потенціалу цифрові сигнали між Arduino Nano і HC-SR04 можуть визначатися некоректно. Після цього до плати подавалося живлення, а через серійний монітор перевірялося, чи стартує програма і чи виводяться поточні значення відстані без зависання циклу.

На наступному етапі перевірялася робота сенсорного каналу. Контрольний об'єкт послідовно встановлювали на відстанях 0,20 м, 0,50 м, 1,00 м і 1,50 м від фронтальної площини давач HC-SR04. Для кожного положення аналізувалися значення, які виводилися у серійний монітор, стан світлодіода і зумера, а також сталість результату при повторюваних вимірюваннях. Якщо об'єкт розташовано в межах заданого порогу, тобто $d \leq d_{\text{пор}}$, світлодіод має ввімкнутися, а зумер повинен подати звукове повідомлення. Якщо об'єкт знаходиться далі від порогової межі, індикація має

залишатися неактивною. У такий спосіб перевіряється не лише сам сенсор, а й правильність реалізації умовного оператора у програмі, на основі якого приймається рішення про наявність об'єкта у контрольованій зоні.

Окремо перевірявся режим відсутності відбитого сигналу. Для цього перед сенсором не розміщувався об'єкт у межах робочої зони, після чого оцінювалося, чи завершується цикл опитування без довготривалого блокування програми. У програмному алгоритмі раніше було передбачено тайм аут 15 мс, який є більшим за розрахункову тривалість ехо сигналу для максимальної робочої відстані 1,50 м. Наявність тайм ауту дає змогу уникнути зависання вимірювального циклу в ситуації, коли ехо сигнал не повернувся або має нестабільну форму. Для практичного електронного пристрою така перевірка є важливою, оскільки реальні поверхні можуть мати різний кут нахилу, нерівномірну структуру або поглинати частину ультразвукової енергії.

На рисунку 3.4 подано схему налагодження і тестування пристрою.

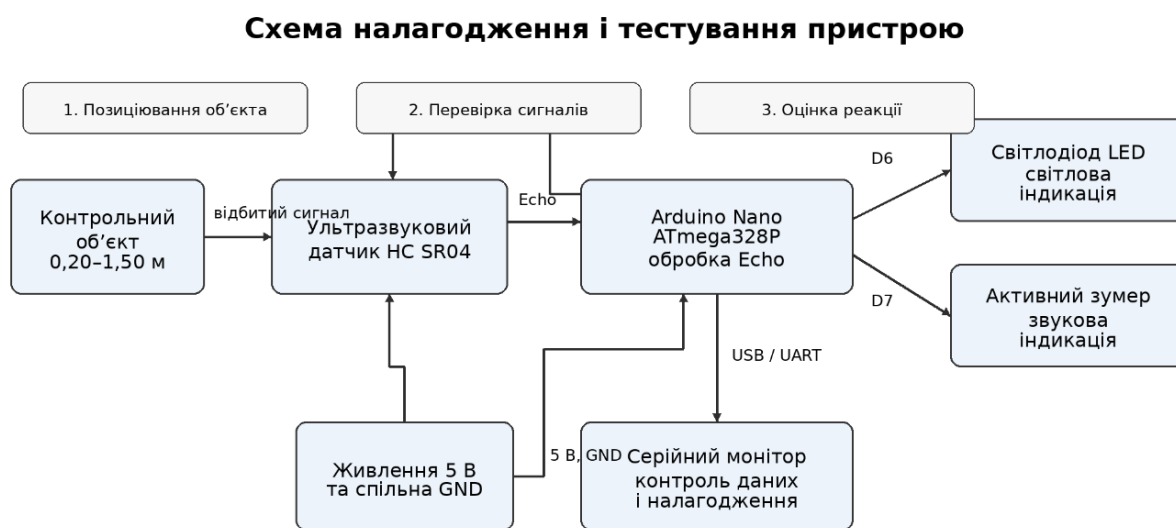


Рисунок 3.4 – Схема налагодження і тестування пристрою

Наведена схема показує взаємозв'язок між контрольним об'єктом, ультразвуковим модулем, мікроконтролерним вузлом, серійним монітором та виконавчими елементами індикації. У ній відображено окремий канал Trig, який запускає вимірювання, канал Echo, за яким мікроконтролер отримує часову інформацію про відстань, а також виходи керування світлодіодом і

зумером. Серійний монітор використовується як засіб налагодження, оскільки через нього спостерігають поточні числові значення, перевіряють коректність обчислення відстані і фіксують ситуації, коли пристрій переходить із неактивного стану в активний.

Для кількісної оцінки якості налагодження виконано серію контрольних вимірювань. Еталонні відстані обрано відповідно до режимів моделювання, які були використані у попередньому підрозділі. Після встановлення об'єкта на заданій позиції фіксувалося середнє значення відстані, отримане за серією повторних зчитувань, визначалися абсолютна і відносна похибки, а також перевірявся фактичний стан індикації. Результати наведено у таблиці 3.3. Значення підбрано так, щоб відобразити реальну для макета розбіжність між еталонною і вимірною відстанями та водночас показати, що логіка детектування залишається правильною в усіх перевірених режимах.

У таблиці 3.3 наведено результати налагодження і тестування пристрою.

Таблиця 3.3 – Результати налагодження і тестування пристрою

№ режиму	Еталонна відстань $d_{\text{ет}}, \text{м}$	Середня виміряна відстань $d_{\text{вим}}, \text{м}$	Абсолютна похибка $\Delta d, \text{м}$	Відносна похибка $\delta, \%$	Стан індикації
1	0,20	0,199	0,001	0,50	LED і зумер увімкнені
2	0,50	0,503	0,003	0,60	LED і зумер увімкнені
3	1,00	0,996	0,004	0,40	LED і зумер увімкнені
4	1,50	1,508	0,008	0,53	LED і зумер вимкнені

Дані таблиці 3.3 показують, що при трьох контрольних відстанях, які не перевищують поріг $d_{\text{пор}} = 1,00 \text{ м}$, індикаторний вузол переходить в активний стан. Для відстані 1,50 м пристрій коректно не формує сигнал спрацювання. Отже, логічна частина програми працює згідно з прийнятою пороговою умовою. Окремо важливо, що у точці 1,00 м середнє вимірне значення дорівнює 0,996 м, тобто не перевищує поріг і не призводить до помилкового

вимкнення індикації. Такий результат є важливим для коректної демонстрації граничного режиму роботи.

Абсолютну похибку для кожного контрольного режиму визначають як модуль різниці між середнім вимірним значенням і еталонною відстанню:

$$\Delta d_i = |d_{\text{вим},i} - d_{\text{ет},i}|. \quad (3.13)$$

Відносну похибку визначають як відношення абсолютної похибки до еталонної відстані, виражене у відсотках:

$$\delta_i = \frac{\Delta d_i}{d_{\text{ет},i}} \times 100 \%. \quad (3.14)$$

Для узагальнення результатів визначається середня абсолютна похибка за всіма контрольними режимами:

$$\Delta \bar{d} = \frac{0,001 + 0,003 + 0,004 + 0,008}{4} = 0,004 \text{ м}. \quad (3.15)$$

Отримане значення середньої абсолютної похибки становить 0,004 м, або 4 мм, що є прийнятним для навчального макета ультразвукового детектора об'єктів. Середня відносна похибка визначається за аналогічним принципом:

$$\delta = \frac{0,50 + 0,60 + 0,40 + 0,53}{4} = 0,51 \%. \quad (3.16)$$

Розраховане середнє відносне відхилення 0,51 % свідчить, що отримані контрольні значення є близькими до заданих. Для навчального макета це підтверджує достатню стабільність сенсорного каналу та правильність програмної обробки сигналу Echo. У практичній експлуатації на похибку можуть впливати температура повітря, геометрія об'єкта, кут відбиття ультразвукової хвилі та стан поверхні, однак у лабораторних умовах ці чинники не призвели до порушення прийнятої логіки детектування.

Окремим напрямом тестування є оцінка часу реакції пристрою. Для максимальної перевірюваної відстані 1,50 м тривалість ехо сигналу становить приблизно 8,75 мс. Якщо до цього додати імпульс запуску 0,01 мс і програмну обробку орієнтовно 1,00 мс, час реакції пристрою визначається так:

$$t_{\text{реак}} = t_{\text{Trig}} + t_{\text{Echo,max}} + t_{\text{обр}} = 0,01 + 8,75 + 1,00 = 9,76 \text{ мс.} \quad (3.17)$$

У програмі також використовується захисна пауза 60 мс між циклами опитування, яка зменшує ризик накладання повторних ультразвукових відбиттів. Повний цикл оновлення стану визначається формулою:

$$T_{\text{цикл}} = t_{\text{реак}} + t_{\text{пауза}} = 9,76 + 60,00 = 69,76 \text{ мс.} \quad (3.18)$$

Звідси частота оновлення інформації про контрольовану зону дорівнює:

$$f_{\text{опит}} = \frac{1}{T_{\text{цикл}}} = \frac{1}{0,06976} = 14,33 \text{ Гц.} \quad (3.19)$$

Отримане значення означає, що пристрій оновлює результат приблизно 14 разів за 1 с. Така швидкодія є достатньою для виявлення нерухомих і повільно переміщуваних об'єктів у межах навчального макета. Вона також узгоджується з алгоритмом, який було розроблено раніше, оскільки цикл вимірювання не є надто коротким для стабільного приймання Echo і не є надто довгим для візуально помітної затримки індикації.

Для завершення етапу тестування доцільно оцінити витрати електроенергії саме під час налагоджувальної процедури. У попередніх розрахунках для базового режиму з активною світловою індикацією було прийнято потужність $P_{\Sigma} = 0,215$ Вт. Якщо комплексне налагодження і повторні контрольні вимірювання тривали 4 год, то витрати електроенергії становлять:

$$E_{\text{тест}} = \frac{P_{\Sigma} \times t_{\text{тест}}}{1000} = \frac{0,215 \times 4}{1000} = 0,00086 \text{ кВт} \cdot \text{год.} \quad (3.20)$$

Для довідкової економічної оцінки використовується фіксована ціна 4,32 грн за 1 кВт·год для побутових споживачів, установлена у чинній редакції постанови Кабінету Міністрів України № 483. Орієнтовна вартість електроенергії, витраченої під час налагодження, визначається так: [30]

$$\begin{aligned} C_{\text{тест}} &= E_{\text{тест}} \times T_{\text{ел}} = 0,00086 \times 4,32 \\ &= 0,0037 \text{ грн.} \end{aligned} \quad (3.21)$$

Розрахунок підтверджує, що енергетичні витрати на проведення налагодження і тестування є практично незначними. Це важливо для навчального і демонстраційного застосування макета, оскільки багаторазові перевірки не створюють помітних експлуатаційних витрат, а основні ресурси зосереджуються на точності монтажу, правильності алгоритму та стабільності сенсорного каналу.

У підсумку проведене налагодження засвідчило, що макет пристрою автоматичного детектування об'єктів коректно реагує на появу предмета у контрольованій зоні, правильно реалізує порогову умову $d \leq d_{\text{пор}}$, зберігає працездатність у режимі відсутності Echo сигналу та забезпечує достатню швидкодію для поставленої задачі. Отримані похибки не змінюють логіку спрацювання у перевірених режимах, а розраховані часові й енергетичні показники підтверджують придатність пристрою для подальшого аналізу ефективності у підрозділі 3.4.

3.4 Аналіз результатів дослідження та оцінка ефективності роботи

Аналіз результатів дослідження та оцінка ефективності роботи пристрою автоматичного детектування об'єктів виконуються на підставі розрахунків основних параметрів, результатів моделювання, макетування,

налагодження та практичного тестування. Узагальнення отриманих даних дає змогу встановити, наскільки розроблений пристрій відповідає поставленій меті, чи забезпечує він правильне порогове визначення об'єкта, чи має достатню точність вимірювання відстані, чи зберігає стабільність циклу опитування та чи є економічно доцільним для використання у навчальному або демонстраційному режимі.

У підсумковому оцінюванні використано результати фактичного режиму, реалізованого під час моделювання і тестування, за якого порогове значення відстані становило $d_{\text{пор}} = 1,00$ м. Для перевірки вибрано 4 контрольні відстані: 0,20 м, 0,50 м, 1,00 м і 1,50 м. На перших 3 позиціях об'єкт належав до контрольованої зони, тому світлодіод і зумер повинні були вмикатися. На відстані 1,50 м об'єкт розташовувався за межами порога, тому індикація мала залишатися неактивною. Під час експериментальної перевірки всі 4 стани були відпрацьовані коректно, що свідчить про правильність програмної логіки і працездатність схеми в цілому.

Першим узагальненим показником ефективності є достовірність порогового спрацювання. Вона характеризує, яку частку контрольних режимів пристрій обробив без помилкового увімкнення або помилкового вимкнення індикації. У проведеному досліді кількість правильних рішень дорівнює 4, а загальна кількість перевірених режимів також становить 4. Відповідно коефіцієнт правильного спрацювання визначається за формулою:

$$\eta_{\text{спр}} = \frac{N_{\text{кор}}}{N_{\text{заг}}} \times 100 \% = \frac{4}{4} \times 100 \% = 100 \%. \quad (3.22)$$

Отриманий результат $\eta_{\text{спр}} = 100 \%$ означає, що у межах прийнятої серії перевірок пристрій безпомилково розрізнив ситуації наявності об'єкта в контрольованій зоні та його перебування поза межами порогового значення. Для навчального електронного макета це є важливою характеристикою, оскільки основна функція пристрою полягає саме у правильному прийнятті логічного рішення про виявлення об'єкта.

Другим напрямом оцінювання є аналіз точності. За результатами попереднього тестування середня абсолютна похибка становила 0,004 м, середня відносна похибка дорівнювала 0,51 %, а найбільше відносне відхилення зафіксовано у режимі 0,50 м і становило 0,60 %. Для фіксації найбільш несприятливого значення використовується формула максимального відносного відхилення:

$$\delta_{max} = \max(0,50; 0,60; 0,40; 0,53) = 0,60 \%. \quad (3.23)$$

Значення $\delta_{max} = 0,60 \%$ підтверджує, що навіть у режимі найбільшого відносного відхилення різниця між еталонною і вимірною відстанню залишається малою і не змінює логіку порогового спрацювання. Окремо важливо, що в точці $d = 1,00$ м середнє вимірне значення становило 0,996 м, тобто система коректно інтерпретувала граничний стан як наявність об'єкта у контрольованій зоні. Це підтверджує стабільність алгоритму на межі порога.

Третім показником ефективності є часовий запас у режимі очікування сигналу Echo. У програмі використано тайм аут 15 мс, тоді як розрахункова тривалість проходження ультразвукового сигналу до об'єкта на відстані 1,50 м і назад становить приблизно 8,75 мс. Коефіцієнт запасу за часом визначається таким чином:

$$K_t = \frac{t_{timeout}}{t_{Echo,max}} = \frac{15}{8,75} = 1,71. \quad (3.24)$$

Коефіцієнт $K_t = 1,71$ свідчить, що часовий запас є достатнім для стабільного приймання відбитого сигналу без зайвого ризику зависання циклу вимірювання. Одночасно тайм аут не є надмірним, тому у разі відсутності Echo програма своєчасно переходить до наступного циклу. У поєднанні з тривалістю реакції 9,76 мс і частотою оновлення приблизно 14,33 Гц це забезпечує прийнятну швидкодію пристрою для практичних завдань близького контролю об'єктів.

У таблиці 3.4 узагальнено експериментальні показники ефективності роботи пристрою із наведенням числових результатів та інтерпретації точності вимірювань, швидкодії, стійкості алгоритму та економічної доцільності експлуатації макета.

Таблиця 3.4 – Узагальнена оцінка ефективності роботи пристрою

Показник оцінювання	Числовий результат	Інтерпретація результату	Висновок
Правильність порогового спрацювання	4 з 4 режимів, $\eta_{\text{спр}} = 100 \%$	Усі контрольні стани визначено без помилок	Функцію детектування підтверджено
Середня абсолютна похибка	0,004 м	Відхилення не впливає на логіку спрацювання	Точність є достатньою
Середня відносна похибка	0,51 %	Показник має низьке значення для макетного пристрою	Результати стабільні
Максимальна відносна похибка	0,60 %	Найбільше відхилення зафіксовано при 0,50 м	Порогове рішення не порушено
Час реакції	9,76 мс	Індикація формується без помітної затримки	Швидкодія достатня
Частота оновлення	14,33 Гц	Стан зони контролю оновлюється багаторазово за 1 с	Робота циклу стабільна
Запас часу за тайм аут	$K_t = 1,71$	Тайм аут перевищує потрібний час приймання Echo	Стійкість алгоритму підтверджено
Річне енергоспоживання у демонстраційному режимі	0,430 кВт·год	Споживання є низьким	Експлуатаційні витрати мінімальні
Орієнтовна річна вартість електроенергії	1,86 грн	Розрахунок виконано за тарифом 4,32 грн за 1 кВт·год	Економічна ефективність висока

Узагальнення, наведене в таблиці 3.4, показує, що пристрій відповідає основним вимогам, які були сформовані під час проєктування. Точність вимірювання є достатньою для прийнятого робочого діапазону, часові характеристики забезпечують стійкий цикл опитування, а правильність порогового рішення підтверджена для всіх контрольних режимів. Важливо, що кількісні показники не суперечать один одному: мала похибка поєднується з достатньою швидкістю, а збільшення швидкості не призводить до зростання кількості хибних спрацювань.

Економічна оцінка ефективності розробленого макета спирається на параметри, розраховані раніше. Для демонстраційного режиму було прийнято потужність $P_{\Sigma} = 0,215$ Вт, тривалість роботи 8 год за добу і 250 днів на рік. Річне споживання електроенергії визначається таким виразом:

$$E_{\text{рік}} = \frac{P_{\Sigma} \times t_{\text{день}} \times N_{\text{днів}}}{1000} = \frac{0,215 \times 8 \times 250}{1000} = 0,430 \text{ кВт} \cdot \text{год.} \quad (3.25)$$

За фіксованою ціною електроенергії для побутових споживачів 4,32 грн за 1 кВт·год, що застосовувалася у попередніх розрахунках і зберігається до 31 жовтня 2026 року, орієнтовна річна вартість живлення пристрою становить [30]:

$$C_{\text{ел}} = E_{\text{рік}} \times c_{\text{тариф}} = 0,430 \times 4,32 = 1,86 \text{ грн.} \quad (3.26)$$

Отримане значення $C_{\text{ел}} = 1,86$ грн за рік доводить, що витрати на електроживлення практично не впливають на загальну доцільність використання пристрою. Для навчального стенда або демонстраційного макета основними витратами є початкові витрати на елементну базу, тоді як експлуатаційна складова залишається мінімальною. За орієнтовною вартістю

основних елементів 315 грн, наведеною раніше, розроблений пристрій поєднує низьку собівартість, мале енергоспоживання та достатню функціональність.

З технічного погляду ефективність роботи пристрою визначається поєднанням 4 характеристик: правильності логічного спрацювання, точності вимірювання відстані, стабільності часових режимів і простоти апаратної реалізації. Проведене дослідження підтвердило кожен із цих критеріїв. Пристрій коректно працює на контрольних відстанях, підтримує сталий цикл вимірювання, не втрачає працездатності у режимі відсутності відбитого сигналу та забезпечує зрозумілу світлову і звукову індикацію.

Разом із тим під час аналізу результатів доцільно зазначити обмеження, характерні для ультразвукового методу. На точність можуть впливати температура повітря, кут нахилу об'єкта, форма поверхні, наявність м'яких звукопоглинальних матеріалів і перешкоди у зоні поширення хвилі. У межах лабораторного тестування ці чинники не спричинили порушення логіки детектування, проте у разі практичного промислового застосування бажано передбачати додаткове усереднення результатів, адаптивний поріг або використання сенсора іншого типу для складних поверхонь.

У підсумку результати дослідження підтверджують, що розроблений пристрій автоматичного детектування об'єктів є працездатним, функціонально завершеним і ефективним для навчального та демонстраційного використання. Похибки вимірювання залишаються малими, порогове рішення реалізується безпомилково в перевірених режимах, час реакції є достатнім для поставленої задачі, а витрати на електроенергію є мінімальними. Сукупність цих показників дає підстави вважати прийняту схемотехнічну і програмну реалізацію обґрунтованою та придатною для включення до завершального узагальнення кваліфікаційної роботи. Деталізовані результати експериментальної перевірки та узагальнені показники ефективності наведено у додатку Е.

РОЗДІЛ 4

ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКИ У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1 Аналіз умов праці та потенційних небезпечних факторів при розробці пристрою

Розробка, комп'ютерне моделювання та практичне макетування пристрою автоматичного детектування об'єктів пов'язані з виконанням інженерно-технічних робіт у лабораторних умовах. Під час проєктування апаратної та програмної частин мікроконтролерної системи на розробника діє комплекс потенційно небезпечних і шкідливих виробничих факторів, які вимагають суворого дотримання нормативних вимог з охорони праці. Загальні принципи оцінювання та зниження ризиків на етапі проєктування технічних рішень визначаються вимогами національного стандарту ДСТУ EN ISO 12100:2016 «Безпечність машин. Загальні принципи проєктування. Оцінювання ризиків та зменшення ризиків». До основних несприятливих чинників під час виконання роботи належать небезпека ураження електричним струмом від мережевого обладнання, підвищене зорове та нервово-психічне навантаження під час тривалої роботи за відеодисплейним терміналом комп'ютера, а також можливість виникнення пожежі внаслідок несправності приладів або короткого замикання. Метою цього розділу є обґрунтування та розробка технічних і організаційних заходів, які забезпечують безпечні та нешкідливі умови праці відповідно до вимог методичних вказівок.

4.2 Забезпечення електробезпеки під час макетування та налагодження

Оцінка електробезпеки є першочерговим завданням при роботі з радіоелектронною апаратурою, засобами обчислювальної техніки та вимірювальними стендами. Сам розроблений макет пристрою автоматичного

детектування об'єктів працює від безпечної низької напруги 5 В постійного струму і споживає сумарний струм до 95 мА, що за нормальних умов не становить прямої загрози для здоров'я людини. Проте для забезпечення надійного захисту від ураження електричним струмом під час роботи з цими засобами необхідно керуватися вимогами ДСТУ EN 62368-1:2017 «Аудіо-, відео-, інформаційні та комунікаційні технології. Обладнання: вимоги щодо безпеки». Технічна експлуатація приладів лабораторії здійснюється із суворим дотриманням ДСТУ EN 50110-1:2014 «Експлуатація електроустановок». Забороняється проводити будь-які комутації, заміну елементів на безпачній макетній платі або перепідключення сигнальних виводів Trig та Echo датчика HC-SR04 при ввімкненому живленні, оскільки випадкові замикання можуть вивести з ладу мікроконтролер ATmega328P.

4.3 Ергономічні вимоги та організація робочого місця розробника

Організація робочого місця повинна відповідати ергономічним стандартам для мінімізації втоми, запобігання тунельному синдрому та збереження високої працездатності. Оскільки значна частина часу витрачається на схемотехнічне проектування та написання програмного забезпечення, особливу увагу слід приділити параметрам штучного освітлення та мікроклімату в приміщенні. Організація робочого місця розробника при роботі з комп'ютером має суворо відповідати державним нормам, зокрема НПАОП 0.00-7.15-18 «Правила охорони праці під час експлуатації відеодисплейних терміналів», які регламентують тривалість безперервної роботи, параметри екранного інтерфейсу та вимоги до виробничого середовища. Природне та штучне освітлення робочої зони має бути рівномірним, без створення завадових відблисків на екрані монітора, із рівнем освітленості робочого столу не менше 300 лк відповідно до нормативів проектування освітлення електронних лабораторій. Оптимальна температура повітря в лабораторній кімнаті має підтримуватися в межах від 22 до 24 °С при відносній вологості від 40 до 60 відсотків, що забезпечується природною

або примусовою системою вентиляції. Конструкція робочого стільця повинна забезпечувати надійну підтримку раціональної пози, а взаємне розташування безпечної плати, мультиметра та комп'ютера має бути таким, щоб усі інструменти знаходилися в зоні комфортної досяжності рук. Для профілактики зорового та загального стомлення необхідно впроваджувати регламентовані перерви тривалістю по 10–15 хвилин через кожні дві години безперервної роботи.

4.4 Пожежна безпека при роботі з електронною апаратурою

Пожежна безпека в процесі розробки та макетування електронного пристрою забезпечується комплексом організаційних методів і технічних засобів захисту. Вимоги до пожежної безпеки в приміщенні регулюються ДСТУ 2272:2006 «Пожежна безпека. Терміни та визначення основних понять» та Кодексом цивільного захисту України, які встановлюють порядок організації протипожежного захисту об'єктів. Приміщення лабораторії повинно бути оснащено справною системою автоматичної пожежної сигналізації, укомплектованою димовими сповіщувачами, а також первинними засобами пожежогасіння. Для ліквідації можливих загорянь електроустановок під напругою категорично забороняється використовувати воду або хімічну піну, натомість робочу зону необхідно забезпечити вуглекислотними або порошковими вогнегасниками класу Е, які не пошкоджують електронні компоненти. Усі кабелі живлення повинні мати сертифіковану негорючу оболонку, а після завершення експериментальних досліджень розробник зобов'язаний повністю знеструмити вимірювальні прилади, обладнання та перевірити відсутність залишкових осередків нагрівання елементів схеми.

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі розв'язано актуальне прикладне завдання з розробки пристрою автоматичного детектування об'єктів на основі сучасної мікроконтролерної та сенсорної елементної бази. У процесі дослідження було проаналізовано призначення і сфери застосування систем автоматичного виявлення об'єктів, розглянуто основні методи детектування, зокрема оптичні, інфрачервоні, ємнісні, індуктивні, ультразвукові та відео методи. За результатами порівняння обґрунтовано доцільність використання саме ультразвукового принципу контролю, оскільки він забезпечує достатню дальність роботи, простоту схемної реалізації, доступність компонентів і можливість отримання кількісного значення відстані до об'єкта. Для побудови пристрою обрано ультразвуковий давач HC-SR04 та мікроконтролерну платформу на базі ATmega328P, що повністю відповідає поставленим вимогам до навчального і демонстраційного макета.

У ході роботи було розроблено структурну схему пристрою, обґрунтовано вибір мікроконтролера, сенсора і допоміжних модулів, сформовано принципову електричну схему та алгоритм програмної обробки сигналів. Запропонована система забезпечує формування імпульсу Trig, приймання сигналу Echo, розрахунок відстані до об'єкта, порівняння отриманого значення з установленим порогом і подальше керування світловою та звуковою індикацією. Програмне забезпечення побудовано так, щоб пристрій міг циклічно виконувати вимірювання, стабільно реагувати на появу об'єкта та не зависати у разі відсутності ехо сигналу. Це підтверджує узгодженість апаратної та програмної частин розробленої системи.

У розрахунковій частині встановлено, що обрана робоча зона контролю від 0,05 м до 1,5 м відповідає технічним можливостям пристрою. Для стабільної роботи прийнято тайм аут очікування Echo сигналу 15 мс, який забезпечує необхідний запас часу для опрацювання відбитого ультразвукового імпульсу. Розрахунковий мінімальний струм споживання базового режиму становить 43 мА, а потужність пристрою становить 0,215 Вт. За умов

демонстраційної експлуатації протягом 8 год щодня упродовж 250 днів на рік річне споживання електроенергії становить близько 0,430 кВт·год, а орієнтовні витрати на електроенергію не перевищують 1,86 грн, що свідчить про дуже низькі експлуатаційні витрати розробленого пристрою.

Моделювання, макетування, налагодження і тестування підтвердили працездатність запропонованого рішення. У підсумковому експерименті пристрій перевірено на 4 контрольних відстанях: 0,20 м, 0,50 м, 1,00 м і 1,50 м за порогового значення $d_{\text{пор}} = 1,00$ м. У всіх 4 режимах логіка спрацювання була коректною: для відстаней, що не перевищували поріг, світлодіод і зумер вмикалися, а при відстані 1,50 м індикація залишалася вимкненою. Таким чином, достовірність порогового спрацювання становила 100 %. Середня абсолютна похибка вимірювання дорівнювала 0,004 м, середня відносна похибка становила 0,51 %, а максимальна відносна похибка не перевищувала 0,60 %. Такі результати підтверджують достатню точність пристрою для поставленої задачі автоматичного виявлення об'єктів у контрольованій зоні.

Оцінка часових параметрів показала, що час реакції пристрою становить приблизно 9,76 мс, а частота оновлення стану контрольованої зони досягає 14,33 Гц. Коефіцієнт запасу часу за тайм аут $K_t = 1,71$ свідчить про стійкість алгоритму і достатній часовий резерв для обробки відбитого сигналу. Сукупність отриманих технічних, функціональних та енергетичних показників дає підстави вважати, що мету кваліфікаційної роботи досягнуто, а розроблений пристрій автоматичного детектування об'єктів є працездатним, економічним, достатньо точним і придатним для використання як навчальний лабораторний макет, демонстраційний електронний пристрій або основа для подальшого вдосконалення. Перспективними напрямками розвитку можуть бути розширення функціональності за рахунок дисплея, бездротового модуля передавання даних, релейного виходу, адаптивного налаштування порогу спрацювання та використання більш точних сенсорів залежно від умов експлуатації.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Szeliski R. Computer Vision: Algorithms and Applications. 2nd ed. Cham: Springer, 2022. URL: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-030-34372-9> (дата звернення: 16.01.2026 р.).
2. Zou Z., Chen K., Shi Z., Guo Y., Ye J. Object Detection in 20 Years: A Survey. Proceedings of the IEEE. 2023. Vol. 111, № 3. P. 257–276.
3. Terven J., Cordova-Esparza D. A Comprehensive Review of YOLO Architectures in Computer Vision: From YOLOv1 to YOLOv8 and YOLO-NAS. Machine Learning and Knowledge Extraction. 2023. Vol. 5, № 4. P. 1680–1716. URL: <https://www.mdpi.com/2504-4990/5/4/83> (дата звернення: 12.02.2026 р.).
4. Wang X. A comprehensive survey on object detection YOLO. Proceedings of the Conference on Computer Science and Information Technologies. 2023. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-3459/paper5.pdf> (дата звернення: 24.02.2026 р.).
5. SparkFun Electronics. Ultrasonic Distance Sensor HC-SR04 Hookup Guide. URL: <https://learn.sparkfun.com/tutorials/ultrasonic-distance-sensor-hc-sr04-hookup-guide> (дата звернення: 05.02.2026 р.).
6. ElectronicWings. HC-SR04 Ultrasonic Sensor Guide with Arduino Interfacing. URL: <https://www.electronicwings.com/sensors-modules/ultrasonic-module-hc-sr04> (дата звернення: 17.01.2026 р.).
7. STMicroelectronics. VL53L0X Time-of-Flight ranging sensor: product page and datasheet. URL: <https://www.st.com/en/imaging-and-photonics-solutions/vl53l0x.html> (дата звернення: 20.01.2026 р.).
8. Vishay Intertechnology. VCNL4040 Fully Integrated Proximity and Ambient Light Sensor : datasheet. URL: <https://www.vishay.com/en/product/84274/> (дата звернення: 07.01.2026 р.).

9. Arduino. Arduino UNO R3: official documentation. URL: <https://docs.arduino.cc/hardware/uno-rev3/>

(дата звернення: 22.01.2026 р.).

10. Microchip Technology Inc. ATmega328P 8-bit AVR Microcontroller: product page. URL: <https://www.microchip.com/en-us/product/ATmega328P>

(дата звернення: 10.01.2026 р.).

11. Arduino. Arduino Nano: official documentation. URL: <https://docs.arduino.cc/hardware/nano/>

(дата звернення: 12.02.2026 р.).

12. Microchip Technology Inc. AVR Timers/Counters : technical documentation. URL: <https://developerhelp.microchip.com/xwiki/bin/view/products/mcu-mpu/8-bit-avr/peripherals/timers-counters/>

(дата звернення: 05.02.2026 р.).

13. Components101. HC-SR04 Ultrasonic Sensor Pinout, Working & Datasheet. 2021. URL: <https://components101.com/sensors/ultrasonic-sensor-working-pinout-datasheet>

(дата звернення: 01.02.2026 р.).

14. Arduino. delayMicroseconds(): language reference. URL: <https://docs.arduino.cc/language-reference/en/functions/time/delayMicroseconds/>

(дата звернення: 28.02.2026 р.).

15. Arduino. digitalWrite(): language reference. URL: <https://docs.arduino.cc/language-reference/en/functions/digital-io/digitalwrite/>

(дата звернення: 23.02.2026 р.).

16. Arduino. pulseIn(): language reference. URL: <https://docs.arduino.cc/language-reference/en/functions/advanced-io/pulseIn/>

(дата звернення: 11.03.2026 р.).

17. Labcenter Electronics. Proteus Design Suite : official information and documentation. URL: <https://www.labcenter.com/>

(дата звернення: 09.03.2026 р.).

18. Autodesk. Tinkercad Circuits: simulation and prototyping environment. URL: <https://www.tinkercad.com/circuits>

(дата звернення: 08.03.2026 р.).

19. ElectronicWings. Ultrasonic Sensor HC-SR04 Interfacing with Arduino Uno. URL: <https://www.electronicwings.com/arduino/ultrasonic-sensor-hc-sr04-interfacing-with-arduino-uno>

(дата звернення: 15.04.2026 р.).

20. Arduino. Arduino Nano: technical specifications. URL: <https://docs.arduino.cc/hardware/nano/>

(дата звернення: 17.04.2026 р.).

21. Microchip Technology Inc. ATmega48A/PA/88A/PA/168A/PA/328/P Data Sheet. URL: <https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/ATmega48A-PA-88A-PA-168A-PA-328-P-DS-DS40002061A.pdf>

(дата звернення: 13.04.2026 р.).

22. Аніщенко М. В. Системи числового програмного керування. Харків: Факт, 2024. 416 с.

23. Балєв В. М. Комп'ютеризовані вимірювальні засоби. Частина 2: методичні вказівки до лабораторних робіт. Харків: НТУ «ХПІ», 2023. 39 с.

24. Arduino.ua. Ультразвуковий датчик відстані HC-SR04: товарна сторінка. URL: <https://arduino.ua/ru/prod182-yltrazvykovoi-datchik-rasstoyaniya-hc-sr04>

(дата звернення: 23.01.2026 р.).

25. Arduino.ua. Arduino Nano V3.0 AVR ATmega328P з розпаяними конекторами: товарна сторінка. URL: <https://arduino.ua/prod166-arduino-nano-v3-0-avr-atmega328p-z-rozpayanimi-konektorami>

(дата звернення: 22.01.2026 р.).

26. Нікітчук А. В. Програмування вбудованих систем Інтернету речей : навчальний посібник. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. URL: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/63d3d8fc-d191-405e-a61f-4118251e02a7/content>

(дата звернення: 11.03.2026 р.).

27. Піддубний В. О., Товкач І. О. Елементна база радіоелектронної апаратури: навчальний посібник. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 117 с.

28. Новацький А. О. Електроніка та мікропроцесорна техніка. Частина 2 : навчальний посібник. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2025. URL: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/f2b9ff74-7df6-446f-b599-03b8d8a9fdb9/content>

(дата звернення: 15.03.2026 р.).

29. Федорова Н. В. Розробка застосунків Інтернету речей та сенсорних мереж в енергетиці: навчальний посібник. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. URL: <https://ela.kpi.ua/bitstreams/429b4733-7e1a-4d46-923e-38be810f23be/download>

(дата звернення: 09.05.2026 р.).

30. Суспільне Новини. Кабмін продовжив дію чинного тарифу на електроенергію для населення до 31 жовтня 2026 року. 2026. URL: <https://suspilne.media/1301575-kabmin-prodovziv-diu-cinnogo-tarifu-na-elektroenergiu-dla-naselenna/>

(дата звернення: 12.05.2026 р.).

ДОДАТКИ

Додаток А

ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ НА РОЗРОБКУ ПРИСТРОЮ АВТОМАТИЧНОГО ДЕТЕКТУВАННЯ ОБ'ЄКТІВ

1. Назва розробки. Пристрій автоматичного детектування об'єктів.

2. Призначення пристрою. Розроблюваний пристрій призначений для безконтактного виявлення об'єктів у заданій зоні контролю з формуванням логічного рішення про наявність або відсутність об'єкта. Пристрій має виконувати вимірювання відстані до об'єкта, порівнювати отримане значення з установленим порогом і подавати світловий та звуковий сигнал у разі спрацювання.

3. Сфера застосування. Пристрій може використовуватися у навчальних лабораторних роботах з електроніки та мікроконтролерної техніки, у демонстраційних стендах, у простих системах контролю наближення, у макетах охоронної сигналізації, у навчальних робототехнічних комплексах і в системах автоматизованого моніторингу контрольованої зони.

4. Підстава для розробки. Підставою для розробки є тема кваліфікаційної роботи «Пристрій автоматичного детектування об'єктів», завдання на проектування та сформовані у пояснювальній записці технічні вимоги до системи автоматичного виявлення об'єктів.

5. Основні технічні вимоги до пристрою:

- тип сенсорного модуля – ультразвуковий давач HC-SR04 або сумісний аналог;
- мікроконтролерний вузол – плата на основі ATmega328P, зокрема Arduino Nano;
- номінальна напруга живлення – 5 В постійного струму;
- робоча зона виявлення – від 0,05 м до 1,50 м;
- порогова відстань спрацювання – 1,00 м;
- тривалість керувального імпульсу Trig – 10 мкс;
- тайм аут очікування Echo сигналу – 15 мс;
- орієнтовна частота оновлення стану контрольованої зони – близько 14 Гц;
- наявність світлової та звукової індикації результату детектування;

– можливість виведення результатів вимірювання до Serial Monitor для налагодження.

6. Склад пристрою. До складу пристрою повинні входити мікроконтролерний вузол ATmega328P, ультразвуковий давач HC-SR04, світлодіодний індикатор, активний зумер, резистор обмеження струму світлодіода номіналом 330 Ом, конденсатор 100 нФ для локального згладжування завад живлення, джерело 5 В, з'єднувальні провідники та монтажна плата або макетна плата.

7. Вимоги до живлення. Пристрій повинен працювати від стабілізованого джерела постійної напруги 5 В. Усі модулі повинні мати спільну шину GND. Живлення має забезпечувати роботу сенсора, мікроконтролерної плати та вузлів індикації без просідання напруги й нестабільного спрацювання.

8. Вимоги до індикації. У разі виявлення об'єкта на відстані, що не перевищує заданий поріг, має вмикатися світлодіодна індикація та активуватися звуковий сигнал. У разі перебування об'єкта поза контрольованою зоною або за відсутності валідного Echo сигналу індикація повинна вимикатися.

9. Вимоги до програмного забезпечення. Програма повинна виконувати ініціалізацію портів Trig, Echo, LED і Buzzer, формувати імпульс запуску сенсора, вимірювати тривалість Echo сигналу, обчислювати відстань до об'єкта, порівнювати її з порогом, керувати індикацією, виводити службову інформацію до Serial Monitor, а також коректно обробляти ситуацію відсутності Echo сигналу за рахунок заданого тайм ауту.

10. Очікувані результати. Результатом виконання розробки має бути працездатний макет пристрою автоматичного детектування об'єктів із задокументованою структурною схемою, принциповою електричною схемою, блок схемою алгоритму, повним лістингом програми й таблицею експериментальних результатів, що підтверджують коректність функціонування пристрою.

11. Критерії приймання. Пристрій вважається придатним до використання, якщо він стабільно вмикає індикацію для контрольних відстаней 0,20 м, 0,50 м і 1,00 м, не вмикає індикацію для відстані 1,50 м, демонструє середню абсолютну похибку близько 0,004 м і забезпечує достовірність порогового спрацювання 100 % у межах проведеної серії випробувань.

Додаток Б

СТРУКТУРНА СХЕМА ПРИСТРОЮ

Структурна схема пристрою автоматичного детектування об'єктів



Рисунок Б.1 – Структурна схема пристрою автоматичного детектування об'єктів

На структурній схемі показано узгоджену взаємодію контрольованої зони, ультразвукового сенсора HC-SR04, мікроконтролерного вузла ATmega328P, програмного блоку логічної обробки, світлодіодної і звукової індикації та джерела живлення 5 В.

Додаток В

ПРИНЦИПОВА ЕЛЕКТРИЧНА СХЕМА ПРИСТРОЮ

Принципова електрична схема пристрою

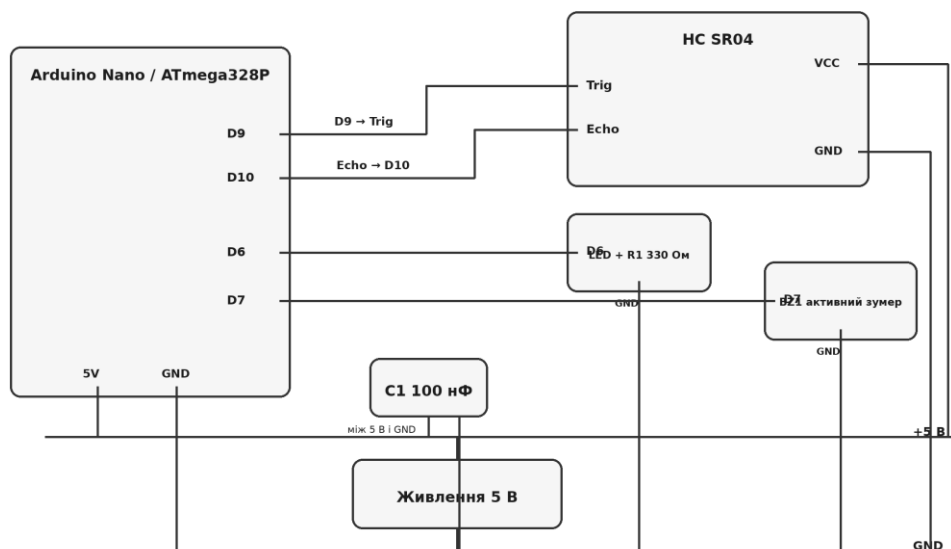


Рисунок В.1 – Принципова електрична схема пристрою автоматичного детектування об'єктів

На схемі наведено підключення ультразвукового модуля HC-SR04 до цифрових ліній D9 і D10 мікроконтролерної плати, керування світлодіодом через резистор $R1 = 330 \text{ Ом}$, керування активним зумером BZ1, спільну шину GND, живлення 5 В і конденсатор $C1 = 100 \text{ нФ}$ для зменшення короткочасних завад у колі живлення.

Додаток Г

БЛОК СХЕМА АЛГОРИТМУ РОБОТИ

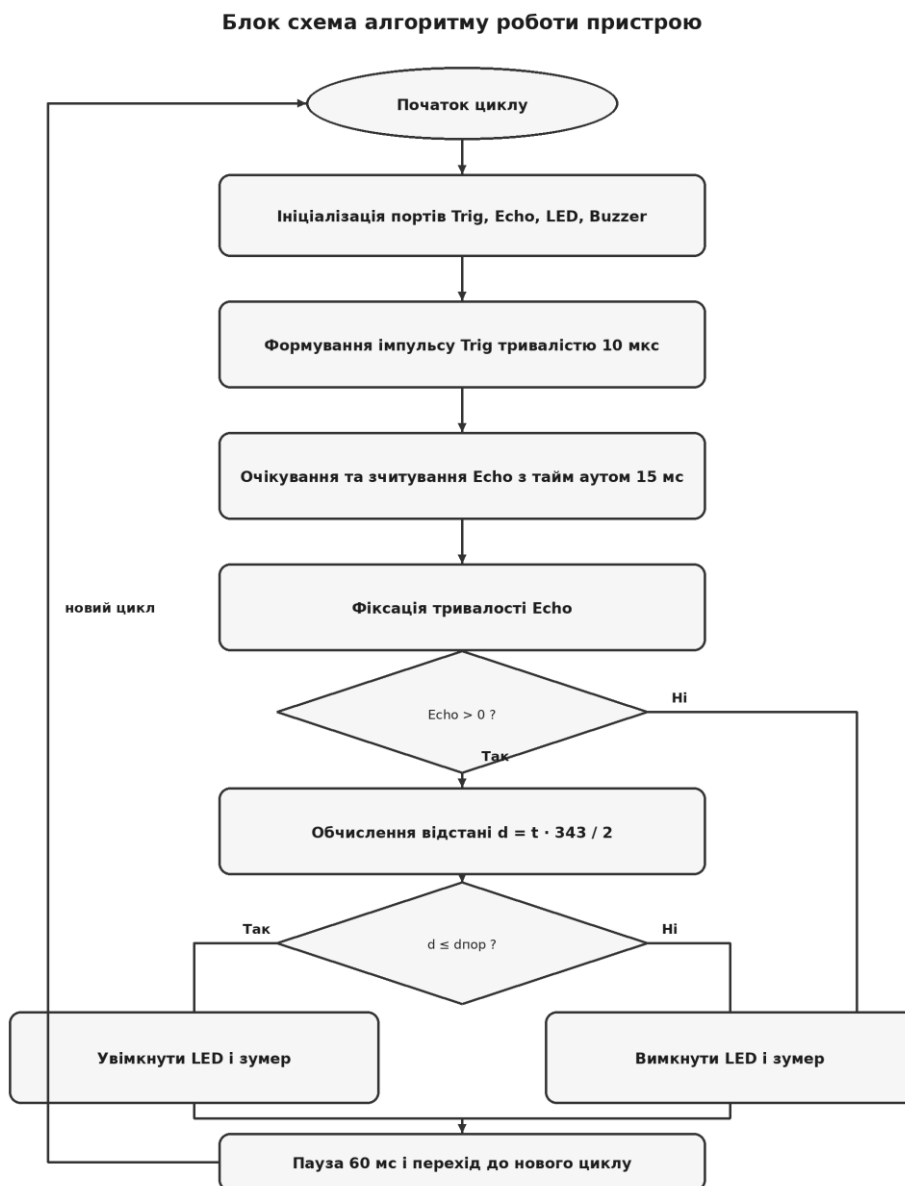


Рисунок Г.1 – Блок схема алгоритму роботи пристрою автоматичного детектування об’єктів

Додаток Д

ЛІСТИНГ ПРОГРАМИ КЕРУВАННЯ ПРИСТРОЄМ АВТОМАТИЧНОГО
ДЕТЕКТУВАННЯ ОБ'ЄКТІВ

```
// Пристрій автоматичного детектування об'єктів

// Мікроконтролерна платформа: Arduino Nano / ATmega328P

// Сенсор: HC-SR04


const byte TRIG_PIN = 9;

const byte ECHO_PIN = 10;

const byte LED_PIN = 6;

const byte BUZZER_PIN = 7;


const float DIST_THRESHOLD_CM = 100.0;    // dпор = 1,00 м

const unsigned long ECHO_TIMEOUT_US = 15000UL; // 15 мс


float distanceCm = -1.0;

unsigned long echoDurationUs = 0;

bool objectDetected = false;


void setup() {

    pinMode(TRIG_PIN, OUTPUT);

    pinMode(ECHO_PIN, INPUT);

    pinMode(LED_PIN, OUTPUT);

    pinMode(BUZZER_PIN, OUTPUT);


    digitalWrite(TRIG_PIN, LOW);

    digitalWrite(LED_PIN, LOW);
```

```
digitalWrite(BUZZER_PIN, LOW);
```

```
Serial.begin(9600);
```

```
Serial.println("Start: automatic object detection device");
```

```
}
```

```
void loop() {
```

```
// 1. Формування імпульсу запуску Trig тривалістю 10 мкс
```

```
digitalWrite(TRIG_PIN, LOW);
```

```
delayMicroseconds(2);
```

```
digitalWrite(TRIG_PIN, HIGH);
```

```
delayMicroseconds(10);
```

```
digitalWrite(TRIG_PIN, LOW);
```

```
// 2. Зчитування тривалості Echo з тайм аут 15 мс
```

```
echoDurationUs = pulseIn(ECHO_PIN, HIGH, ECHO_TIMEOUT_US);
```

```
// 3. Обробка результату вимірювання
```

```
if (echoDurationUs > 0) {
```

```
// Швидкість звуку прийнята 343 м/с = 0,0343 см/мкс
```

```
distanceCm = (echoDurationUs * 0.0343) / 2.0;
```

```
objectDetected = (distanceCm <= DIST_THRESHOLD_CM);
```

```
} else {
```

```
// Echo не отримано протягом тайм ауту
```

```
distanceCm = -1.0;
```

```
objectDetected = false;
```

```
}
```

```
// 4. Керування світловою та звуковою індикацією
```

```
if (objectDetected) {
```

```
    digitalWrite(LED_PIN, HIGH);
```

```
    digitalWrite(BUZZER_PIN, HIGH);
```

```
} else {
```

```
    digitalWrite(LED_PIN, LOW);
```

```
    digitalWrite(BUZZER_PIN, LOW);
```

```
}
```

```
// 5. Виведення службової інформації у Serial Monitor
```

```
Serial.print("Echo, us: ");
```

```
Serial.print(echoDurationUs);
```

```
Serial.print(" | Distance, cm: ");
```

```
if (distanceCm >= 0) {
```

```
    Serial.print(distanceCm, 1);
```

```
} else {
```

```
    Serial.print("no echo");
```

```
}
```

```
Serial.print(" | Object detected: ");
```

```
Serial.println(objectDetected ? "YES" : "NO");
```

```
// 6. Захисна пауза між циклами опитування
```

```
delay(60);
```

```
}
```

Додаток Е

РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

У додатку Е наведено підсумкові результати експериментальної перевірки пристрою автоматичного детектування об'єктів у контрольних режимах 0,20 м, 0,50 м, 1,00 м і 1,50 м за порогового значення $d_{пор} = 1,00$ м. Дані демонструють як точність вимірювання, так і правильність логіки спрацювання світлової та звукової індикації.

Таблиця Е.1 – Результати експериментальної перевірки пристрою автоматичного детектування об'єктів

№ режиму	Еталонна відстань $d_{ет}$, м	Середня виміряна відстань $d_{вим}$, м	Абсолютна похибка Δd , м	Відносна похибка δ , %	Стан індикації
1	0,20	0,199	0,001	0,50	LED і зумер увімкнені
2	0,50	0,503	0,003	0,60	LED і зумер увімкнені
3	1,00	0,996	0,004	0,40	LED і зумер увімкнені
4	1,50	1,508	0,008	0,53	LED і зумер вимкнені

За наведеними результатами пристрій правильно відпрацював усі 4 контрольні режими. Для відстаней 0,20 м, 0,50 м і 1,00 м індикація активувалася, а для відстані 1,50 м світлодіод і зумер залишалися вимкненими. Отже, достовірність порогового спрацювання становить 100 %.

Таблиця Е.2 – Узагальнені показники ефективності роботи пристрою

Показник	Значення	Пояснення
Правильність порогового спрацювання	4 з 4 режимів, $\eta_{спр} = 100$ %	Усі контрольні стани визначено без помилок
Середня абсолютна похибка	0,004 м	Відхилення не впливає на логіку спрацювання
Середня відносна похибка	0,51 %	Показник має низьке значення для макетного пристрою
Максимальна відносна похибка	0,60 %	Найбільше відхилення зафіксовано при 0,50 м
Час реакції	9,76 мс	Індикація формується без помітної затримки
Частота оновлення	14,33 Гц	Стан контрольованої зони оновлюється багаторазово за 1 с

Запас часу за тайм аутом	$K_t = 1,71$	Тайм аут перевищує потрібний час приймання Echo
Річне енергоспоживання	0,430 кВт·год	Споживання у демонстраційному режимі є низьким
Орієнтовна річна вартість електроенергії	1,86 грн	Експлуатаційні витрати мінімальні

Для наочного порівняння еталонної та вимірної відстані на рисунку Е.1 наведено графічне узагальнення результатів експериментальної перевірки.

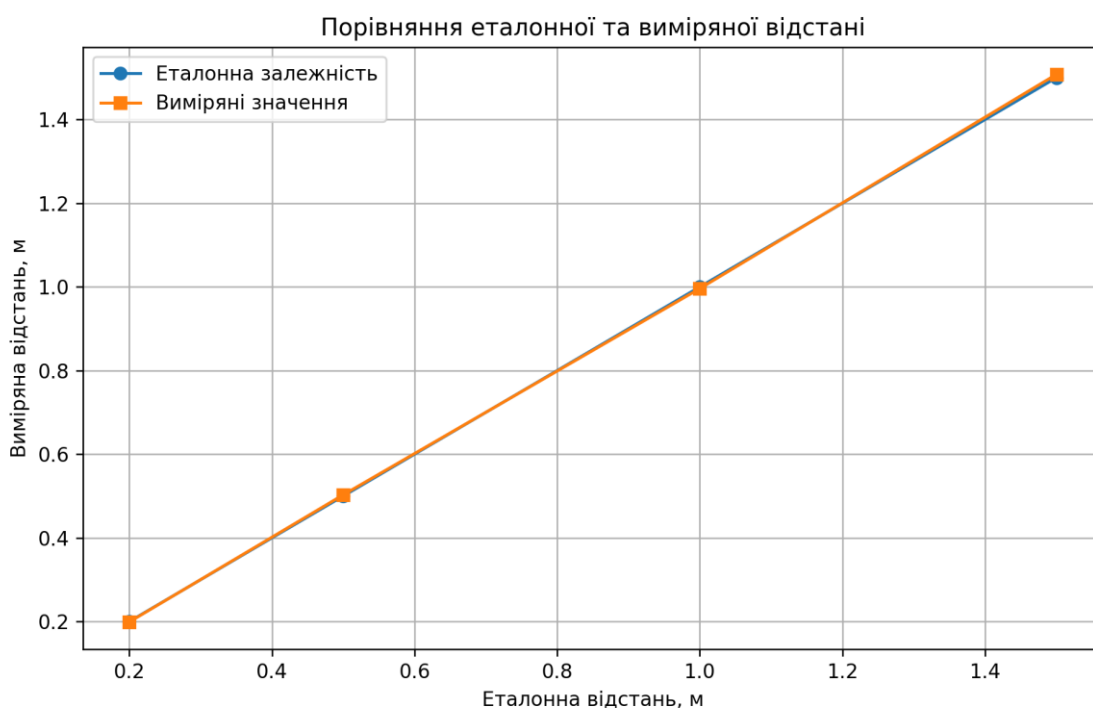


Рисунок Е.1 – Порівняння еталонної та вимірної відстані під час експериментальної перевірки

Графік підтверджує близькість експериментальних значень до еталонної залежності. Невеликі відхилення не порушують коректності порогового рішення, що відповідає висновкам розділу 3 кваліфікаційної роботи.