

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ

«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Приладобудівний факультет Кафедра інформаційно-вимірювальних технологій

«На правах рукопису»
УДК 681.2.088

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

_____ Володимир ЄРЕМЕНКО

«__» _____ 2025 р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

за освітньо-професійною програмою «Інформаційні вимірювальні технології» зі спеціальності 175 «Інформаційно-вимірювальні технології»
на тему: «Оптимізація обробки сигналів безконтактного акустичного вимірювача відстані»

Виконав:

студент II курсу, групи ПІ-41мп
Данілов Микита Валерійович _____

Керівник:

професор, д.т.н., професор
Здоренко Валерій Георгійович _____

Консультант з розділу «Розробка СТАРТАП-проектів»:

Професор, д.е.н., професор
Вовк Ольга Миколаївна _____

Рецензент:

к.т.н. доцент,
Богдан Галина Анатоліївна _____

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації
немає запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань.

Студент _____

Київ – 2025 року

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

Приладобудівний факультет

Кафедра інформаційно-вимірювальних технологій

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність – 175 Інформаційно-вимірювальні технології

Освітньо-професійна програма Інформаційні вимірювальні технології

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Володимир ЄРЕМЕНКО

«__» _____ 2025 р.

**ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту**

Данілову Микиті Валерійовичу

1. Тема дисертації «Оптимізація обробки сигналів безконтактного акустичного вимірювача відстані», науковий керівник дисертації Здоренко Валерій Георгійович, д.т.н., професор, затверджені наказом по університету від «04» листопада 2025 р. № 4793-с
2. Термін подання студентом дисертації 9 грудня 2025 р.
3. Об'єкт дослідження – процес ультразвукового вимірювання відстані в повітряному середовищі.
4. Предмет досліджень – підвищення точності вимірювання відстані за рахунок виключення впливу зміни параметрів повітряного середовища на похибку вимірювання відстані та завадостійкості за рахунок застосування алгоритмів цифрової обробки результатів вимірювань
5. Вихідні дані: діапазон вимірювання відстані до перешкоди – 0,20 – 4,00 м; робоча частота ультразвукового сигналу – 40 кГц; основна відносна похибка вимірювання відстані – не більше $\pm 3,5\%$; швидкість переміщення об'єкту, відстань до якого вимірюється – не більше 1 м/с; параметри повітряного середовища, що враховуються при компенсації швидкості звуку – температура, відносна вологість, атмосферний тиск та концентрація CO₂.

6. Перелік завдань, які потрібно розробити – Огляд методів і відомих технічних рішень для вимірювання відстані, Дослідження методів завадозахищеності ультразвукового пристрою, Експериментальні дослідження, розробка старпат проекту «Оптимізація обробки сигналів безконтактного акустичного вимірювача відстані»

7. Орієнтовний перелік публікацій – 2 тез конференцій, стаття в фаховому науковому виданні

8. Консультанти розділів дисертації

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розробка стартап-проектів	Вовк О. М., д.е.н., професор, професор кафедри економічної кібернетики КПІ ім. Ігоря Сікорського		

9. Дата видачі завдання 10 жовтня 2024р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1.	Вибір та затвердження теми	01.09.2025	
2.	Формулювання та затвердження завдання	07.10.2025	
3.	Виконання першого розділу, перевірка керівником	25.10.2025	
4.	Виконання другого розділу, перевірка керівником	09.11.2025	
5.	Виконання 3 розділу, перевірка керівником	27.11.2025	
6.	Виконання 4 розділу, перевірка керівником	07.12.2025	
7.	Оформлення та завершення Надання на розгляд керівнику	08.12.2025	
8.	Надання (електронний варіант) відповідальному на кафедрі для перевірки наявності запозичень (плагіату)	15.12.2025	

9.	Остаточна перевірка керівником, надання відгуку	15.12.2025	
10.	Попередній захист дисертації	15.12.2025	
11.	Рецензування	16.12.2015	
12.	Надання роботи секретарю ЕК	17.12.2025	
13.	Захист	23.12.2025	

Здобувач

Микита ДАНИЛОВ

Науковий керівник

Валерій ЗДОРЕНКО

Реферат

Дипломна робота на тему "Оптимізація обробки сигналів безконтактного акустичного вимірювача відстані " присвячена розробленню та дослідженню ультразвукового вимірювального каналу, призначеного для визначення відстані методом вимірювання часу проходження акустичної хвилі. Основною метою роботи є підвищення точності та завадостійкості вимірювання в умовах змінних параметрів повітряного середовища шляхом поєднання компенсації швидкості ультразвуку та сучасних алгоритмів цифрової обробки вимірювань.

Актуальність теми зумовлена зростанням вимог до стабільності та повторюваності вбудованих сенсорних систем у робототехніці, автоматизації та моніторингових комплексах, де на результат вимірювання істотно впливають температура, відносна вологість, атмосферний тиск, концентрація CO₂, а також акустичні й електромагнітні завади.

Обсяг текстової частини роботи складає 132 сторінок, робота містить 33 рисунків, 22 таблиць та 6 додатків. Список використаних джерел налічує 31 найменувань.

Дослідження та моделювання підтвердили, що запропонований алгоритм забезпечує зменшення похибок та підвищення стійкості оцінювання відстані порівняно з базовим підходом без компенсації та без фільтрації, особливо в умовах наявності викидів і змінних параметрів середовища. Розроблене рішення може бути рекомендоване для застосування в задачах робототехніки, промислової автоматизації та системах безпеки, де потрібне точне та стабільне безконтактне вимірювання відстані.

Abstract

The thesis on “Optimization of signal processing in a non-contact acoustic distance meter” is devoted to the development and research of an ultrasonic measuring channel designed to determine distance by measuring the time of passage of an acoustic wave. The main objective of the work is to improve the accuracy and noise immunity of measurements in conditions of variable air parameters by combining sound velocity compensation and modern digital measurement processing algorithms. The relevance of the topic is due to the growing demands for stability and repeatability of embedded sensor systems in robotics, automation, and monitoring complexes, where the measurement result is significantly affected by temperature, relative humidity, atmospheric pressure, CO₂ concentration, as well as acoustic and electromagnetic interference.

The text part of the work consists of 132 pages, the work contains 33 figures, 22 tables and 6 appendices. The list of references includes 31 titles.

Research and modeling have confirmed that the proposed algorithm reduces errors and increases the stability of distance estimation compared to the baseline approach without compensation and without filtering, especially in the presence of emissions and variable environmental parameters. The developed solution can be recommended for use in robotics, industrial automation, and security systems where accurate and stable non-contact distance measurement is required.

ЗМІСТ

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ	1
Національний технічний університет України	2
ВСТУП	9
1 ОГЛЯД МЕТОДІВ І ВІДОМИХ ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ВІДСТАНІ.....	11
1.1 Вимірювання відстані за допомогою ультразвукового датчика	11
1.2 Залежність відбиття ультразвуку від розміру об'єкта та довжини хвилі	12
1.3 Вплив температури на розповсюдження ультразвуку в повітрі	14
1.4 Технічні та фізичні основи роботи ультразвукового перетворювача	17
1.5 Ультразвуковий датчик URM37 v5.....	19
1.6 Ультразвуковий датчик HC-SR04.....	21
1.7 Структура та функціонування вимірювального каналу ультразвукових сенсорів	23
1.8 Методи вимірювання відстані.....	28
Висновки до розділу 1.....	30
2 ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ ЗАВАДОЗАХИЩЕНОСТІ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ПРИСТРОЮ	31
2.1 Використання методів оптимальної обробки сигналу для підвищення точності вимірювання відстані.....	31
2.2 Адаптивний фільтр Калмана.....	42
Висновки до розділу 2.....	54
3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	55
3.1 Опис експериментальної установки	55
3.2 Обґрунтування вибору ультразвукового датчика	59
3.3 Алгоритм роботи експериментальної установки	60
3.4 Експериментальні дослідження, обчислення похибок та візуалізація результатів	67
3.5 Побудова графіків і демонстрація переваг запропонованого алгоритму.....	70
3.6 Теоретичне та експериментальне визначення похибки вимірювання відстані.....	74
Висновок до розділу 3.....	79

4 РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЕКТУ «ОПТИМІЗАЦІЯ ОБРОБКИ СИГНАЛІВ БЕЗКОНТАКТНОГО АКУСТИЧНОГО ВИМІРЮВАЧА ВІДСТАНІ»	80
4.1 Опис та технологічний аудит ідеї стартап-проєкту.....	80
4.2 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проєкту	87
4.3 Розроблення ринкової стратегії та маркетингової програми проєкту	92
4.4 Бізнес-модель реалізації стартап-проєкту та оцінювання його економічної ефективності	97
Висновки до розділу 4.....	106
ВИСНОВКИ	107
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	110
ДОДАТОК А	114
ДОДАТОК Б	117
ДОДАТОК В	120
ДОДАТОК Г	123
ДОДАТОК І	126
ДОДАТОК Д	128

ВСТУП

Метою магістерської роботи є підвищення точності та завадостійкості безконтактного ультразвукового вимірювання відстані за умов, коли параметри повітря постійно змінюються. Для цього в роботі поєднано дві ідеї: по-перше, корекцію швидкості ультразвуку з урахуванням температури, відносної вологості, атмосферного тиску та концентрації CO₂, а по-друге, цифрову фільтрацію вимірювань на основі фільтра Калмана, яку можна реалізувати на доступній мікроконтролерній платформі. У межах роботи проаналізовано основні джерела похибок ультразвукових датчиків, обґрунтовано використання моделі ($c(T, RH, p, CO_2)$) для перетворення часу проходження імпульсу у відстань, а також розроблено алгоритм оцінювання, який відстежує не тільки саму відстань, але й її зміну в часі (стан “відстань—швидкість”). Окремо враховано, що реальні вимірювання можуть містити різкі помилки через мульти-ехо, імпульсні завади або нестабільне відбиття сигналу, тому в алгоритм закладено механізми, які послаблюють вплив таких “поганих” вимірів. Реалізацію виконано як програмне забезпечення для мікроконтролера ESP32 і доповнено режимом емуляції, у якому параметри мікроклімату задаються вручну з ПК, що дозволяє багаторазово перевіряти роботу компенсації та фільтрації без зміни апаратної частини установки.

Об’єктом дослідження є процес ультразвукового вимірювання відстані в повітряному середовищі.

Предметом дослідження є підвищення точності вимірювання відстані за рахунок виключення впливу зміни параметрів повітряного середовища на похибку вимірювання відстані та завадостійкості за рахунок застосування алгоритмів цифрової обробки результатів вимірювань

Наукова новизна роботи полягає в тому, що:

- запропоновано спосіб оцінювання відстані, який одночасно враховує вплив температури, вологості, тиску та CO_2 на швидкість ультразвуку і використовує фільтр Калмана зі станом “відстань–швидкість”;

- запропоновано робити дисперсію вимірювання (R_k) не сталою, а змінною: тобто фільтр по-різному “довіряє” вимірам залежно від умов та якості поточного вимірювання часу проходження сигналу;

- застосовано новий підхід до виявлення та пригнічення аномальних вимірів за інновацією, що підвищує стійкість алгоритму при мульти-ехо та імпульсних перешкодах.

Практична цінність роботи полягає в тому, що розроблене рішення можна безпосередньо використовувати в недорогих ультразвукових вимірювальних пристроях на базі мікроконтролера ESP32 для робототехніки, автоматизації, охоронних і моніторингових систем. Компенсація швидкості ультразвуку зменшує випадкову складову похибки вимірювання відстані через зміну властивостей повітря, а адаптивна фільтрація підвищує стабільність показів і знижує вплив шумів та одиничних помилок вимірювання. Режим емуляції спрощує перевірку й налаштування, оскільки дозволяє відтворювати різні умови середовища та оцінювати роботу алгоритмів ще на етапі тестування.

1 ОГЛЯД МЕТОДІВ І ВІДОМИХ ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ВІДСТАНІ

1.1 Вимірювання відстані за допомогою ультразвукового датчика

Ультразвукові хвилі — це звук з частотою понад 20 кГц, які не чутні для людини. Звукові хвилі проходять подвійну відстань (d) між джерелом і об'єктом, тому загальна відстань, яку проходять звукові хвилі, обчислюється за формулою, наведеною в рівнянні 1.1. Швидкість ультразвуку в повітрі становить v , а виміряний час проходження звукових хвиль від джерела до об'єкта і назад становить t секунд.

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



Рисунок 1.1. Вимірювання часу проходження

Для безконтактного ультразвукового вимірювання відстані система повинна покладатися на те, що об'єкт відбиває імпульс назад до системи у вигляді ехо-сигналу. Амплітуда ехо-сигналу залежить від матеріалу та поверхні, що відбивають, відстані, розміру та орієнтації об'єкта.

Характер поверхні впливає на кількість відбитої або поглиненої звукової енергії. Ультразвукові датчики здатні виявляти більшість об'єктів,

таких як металеві або неметалеві, прозорі або непрозорі, рідкі, тверді або гранульовані, що мають достатню акустичну відбивну здатність, сухі або вологі, шорсткі або гладкі. Недоліком ультразвукового датчика є те, що звукопоглинаючі об'єкти, такі як тканини, бавовна, вовна, килими, м'яка гума та пінопласт, погано відбивають звук. Тому максимальний діапазон вимірювання для таких об'єктів є меншим. Виявлення об'єктів з великими нерівностями поверхні може бути складним через нерівномірне відбиття.

1.2 Залежність відбиття ультразвуку від розміру об'єкта та довжини хвилі

Характер поверхні впливає на кількість відбитої або поглиненої звукової енергії. Ультразвукові датчики здатні виявляти більшість об'єктів, таких як металеві або неметалеві, прозорі або непрозорі, рідкі, тверді або гранульовані, що мають достатню акустичну відбивну здатність, сухі або вологі, шорсткі або гладкі. Недоліком ультразвукового датчика є те, що звукопоглинаючі об'єкти, такі як тканини, бавовна, вовна, килими, м'яка гума та пінопласт, погано відбивають звук. Тому максимальний діапазон вимірювання для таких об'єктів є меншим. Виявлення об'єктів з великими нерівностями поверхні може бути складним через нерівномірне відбиття.

Амплітуда ультразвукових хвиль, що поширюються в повітрі, швидко слабшає з відстанню (обернено пропорційно квадрату відстані). Це зниження викликане дифузійними втратами на сферичній поверхні внаслідок дифракційного явища та втратами на поглинання, коли середовище поглинає енергію. Як показано на рисунку 1.2 [1], чим вища частота ультразвукової хвилі, тим більший коефіцієнт загасання і тим менша відстань, яку досягає хвиля. Отже, чим менша відстань від об'єкта до датчика, тим сильніше відбиття. Зі збільшенням ультразвукової частоти збільшується і ослаблення

звукових хвиль у повітрі. Тому датчики дальнього діапазону працюють на низьких частотах, а датчики ближнього діапазону — на високих.

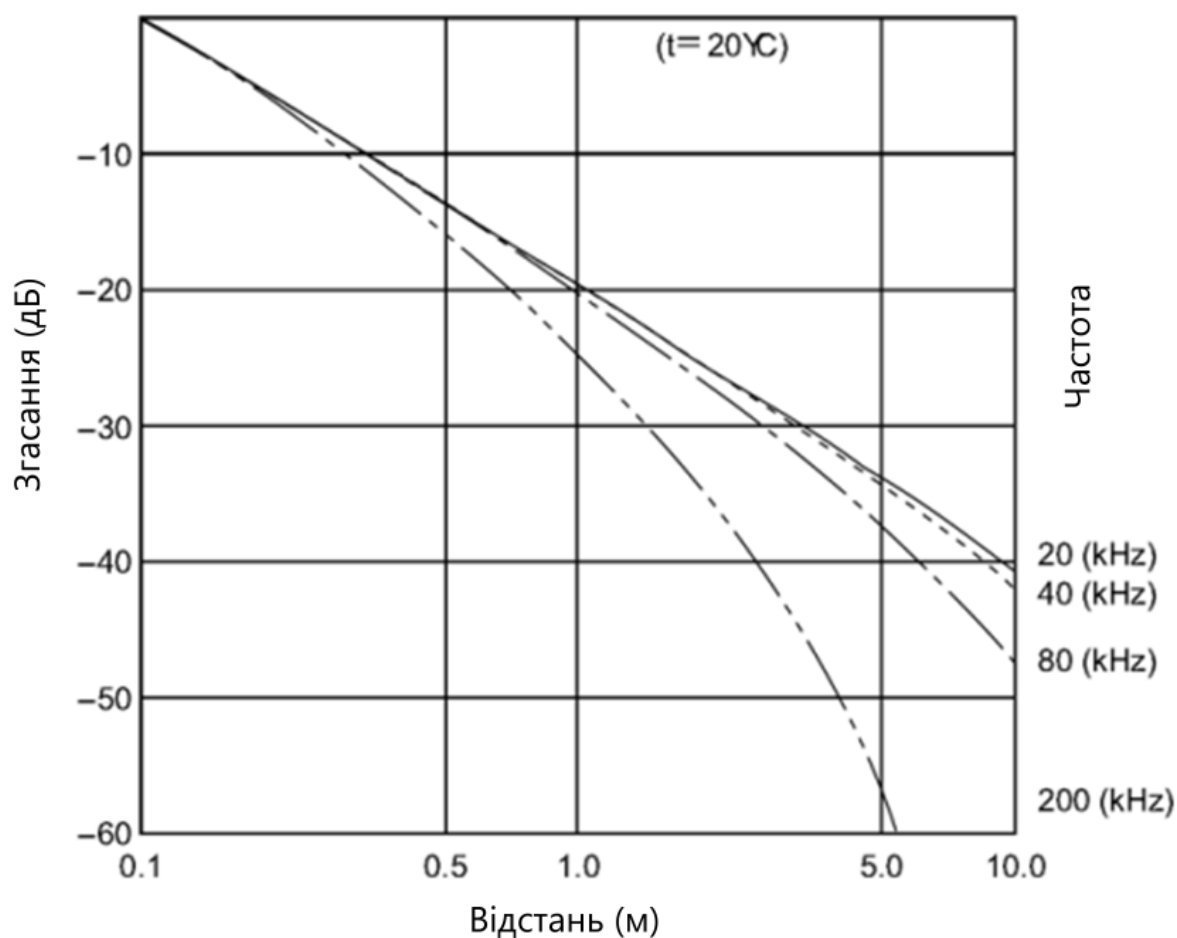


Рисунок 1.2. Затухання ультразвукових хвиль із відстанню

Відбиття ультразвуку залежить від розміру об'єктів відносно довжини хвилі переданого ультразвуку. Об'єкти, розміри яких перевищують довжину хвилі падаючих звукових хвиль, відбивають їх. Тому більші об'єкти відбивають більше сигналу, ніж менші об'єкти. Сила сигналу відбитого ехосигналу зменшується із зменшенням розміру об'єкта.

Амплітуда відбитого сигналу залежить не тільки від коефіцієнта відбиття об'єкта, але й від його орієнтації. Більша частина звукової енергії відбивається назад до датчика, що призводить до виникнення ехосигналу високої амплітуди, коли поверхня перпендикулярна до ультразвукового

променя. Однак, якщо поверхня цього об'єкта нахилена під кутом 45° , майже вся енергія буде відбиватися від поверхні, що призведе до виникнення ехосигналу дуже низької амплітуди, який повертається до датчика.



Рисунок 1.3. Відбиття від поверхонь з різною кутом нахилу

1.3 Вплив температури на розповсюдження ультразвуку в повітрі

Швидкість ультразвуку залежить від різних факторів навколишнього середовища, таких як температура повітря, відносна вологість, тиск, щільність, склад повітря, висота над рівнем моря, швидкість вітру та його напрямок. Якщо на шляху від датчика до об'єкта є турбулентність повітря, середня швидкість ультразвуку буде випадково змінюватися, що призведе до випадкових коливань дальності об'єкта, обчисленої датчиком, від імпульсу до імпульсу. Температура повітря має максимальний вплив на швидкість ультразвуку. Швидкість ультразвуку є функцією температури повітря, яку можна приблизно визначити за допомогою рівняння 1.2:

$$v = 331.3 \times \sqrt{1 + \frac{t}{273.15}}, \quad (1.2)$$

де:

v - Швидкість ультразвуку в сухому повітрі як функція температури в м/с

t - температура повітря в градусах

Приблизна швидкість ультразвуку в сухому повітрі при температурі близько 0 °C може бути розрахована за формулою:

$$v = (331.3 + 0.606 \times t) \quad (1.3)$$

На рисунку 1.4 показано, що більш високі температури збільшують швидкість ультразвуку, оскільки більш теплі частинки, як правило, рухаються швидше. Лінійна апроксимація майже дорівнює фактичному значенню в діапазоні, позначеному двома чорними лініями, від $T \approx -23^\circ\text{C}$ до $T \approx 77^\circ\text{C}$.

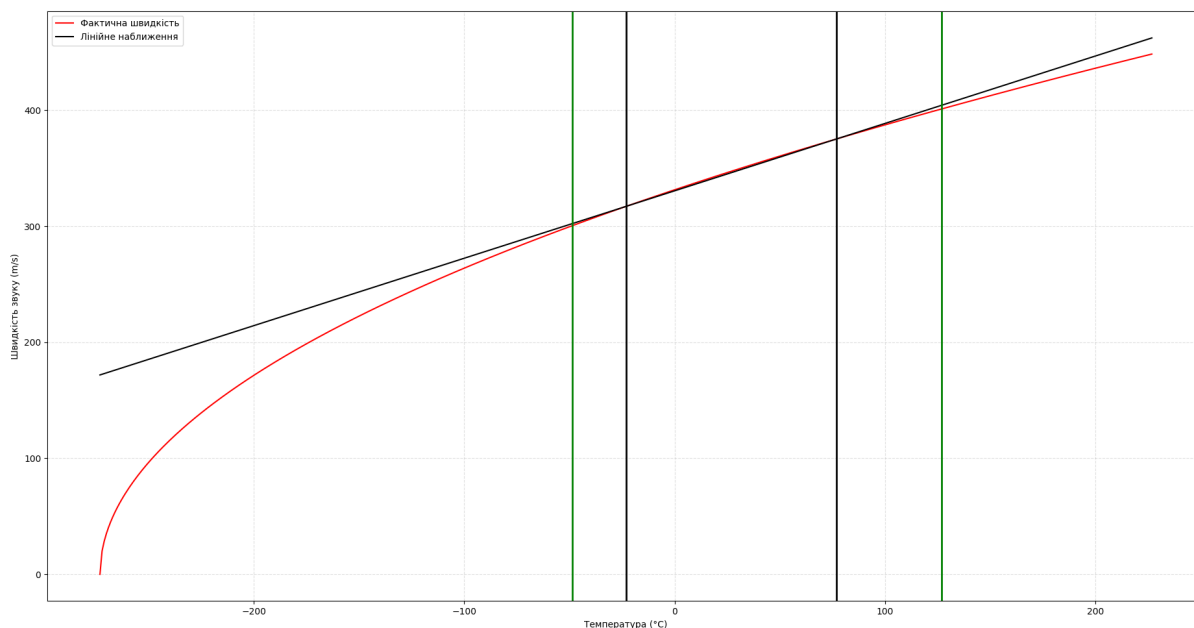


Рисунок 1.4. Швидкість ультразвуку в залежності від температури

Якщо точність не є пріоритетом, то ми побачимо на точках T від -48°C до 127°C , як показано зеленими лініями. Похибка становить:

- $\approx 0.80\%$ при $T = -48^{\circ}\text{C}$
- $\approx 0.93\%$ при $T = 127^{\circ}\text{C}$

На рисунку 1.5 показано відсоткову похибку після лінійної апроксимації в діапазоні температур від -125°C до 200°C .

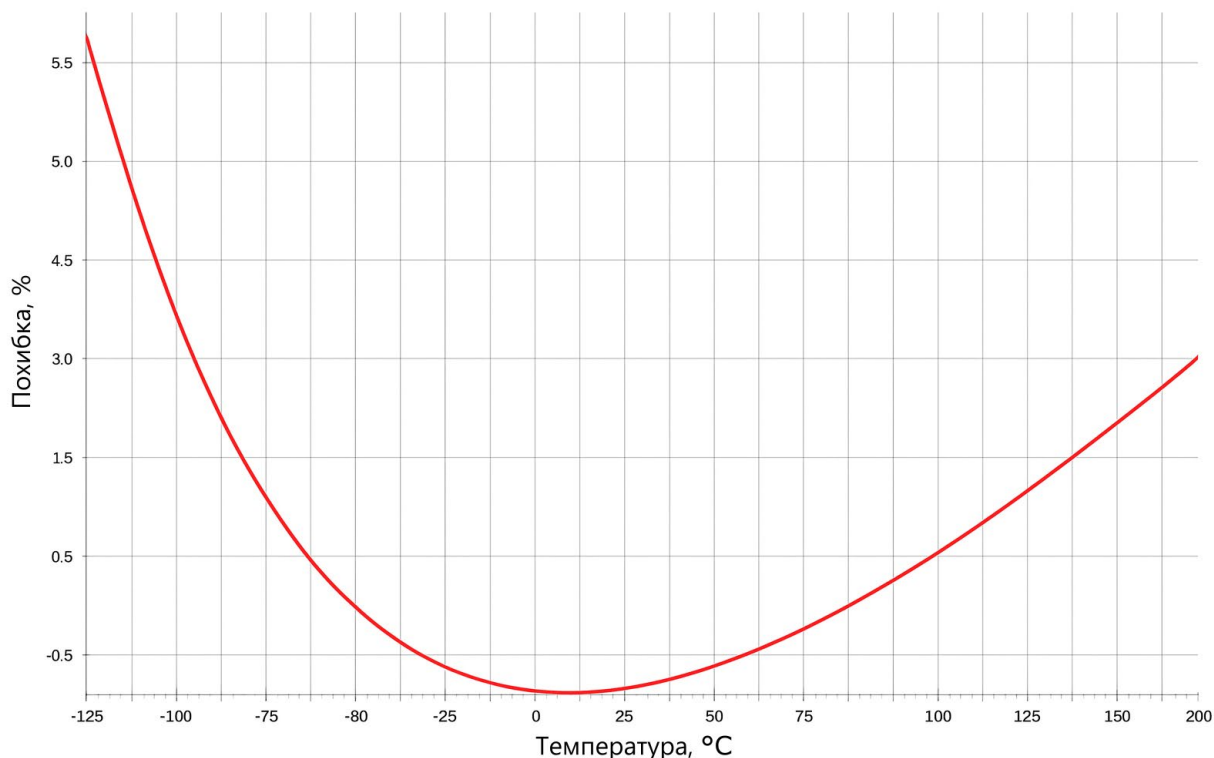


Рисунок 1.5. Відсоток похибки після лінійної апроксимації

Оскільки точність ультразвукової технології залежить від знання швидкості ультразвуку в середовищі, кожна непередбачена зміна цієї швидкості безпосередньо впливає на точність вимірювання. При температурі 25°C швидкість ультразвуку становить $346,13 \text{ м/с}$ і змінюється на $\sim 0,167\%$ на кожну зміну температури повітря на 1°C . З підвищенням температури повітря стає щільнішим, а звукові хвилі поширюються швидше. В результаті виміряні відстані здаються коротшими, якщо не застосовується якась форма температурної компенсації. Для досягнення вищої точності вимірювати температуру повітря за допомогою датчика температури, який визначає

поточне значення температури, або використати додаткові компенсаційні схеми, які вимірюють інші фактори навколишнього середовища (наприклад, вологість), що впливають на швидкість ультразвуку.

1.4 Технічні та фізичні основи роботи ультразвукового перетворювача

Ультразвуковий перетворювач перетворює змінну напругу в ультразвук, а ультразвук — у змінну напругу. В ультразвуковій техніці цей термін зазвичай стосується п'єзоелектричних перетворювачів. Ультразвукові перетворювачі відрізняються від п'єзоелектричних керамічних аудіоперетворювачів тим, що ультразвукові перетворювачі генерують звукові хвилі частотою понад 20 кГц, які є нечутними для людини. Коли до п'єзоелектричної кераміки підводиться напруга, відповідно до напруги збудження та її частоти виникає механічне спотворення. Коли на п'єзоелектричну кераміку подається вібрація, утворюється електричний заряд. П'єзоелектрична кераміка має природну резонансну частоту, як дзвін, тобто вона продовжує вібрувати протягом деякого часу після удару. Якщо частота напруги, що подається на п'єзоелектричну кераміку, дорівнює її природній частоті, кристал переходить у стабільні коливання з великою амплітудою, що генерують звукові хвилі високої інтенсивності. Застосовуючи цей принцип, коли до вібратора, побудованого з двох листів п'єзоелектричної кераміки або одного листа п'єзоелектричної кераміки і одного металевого листа, додається електричний сигнал частотою 40 кГц, електричний сигнал випромінюється за допомогою згинальних коливань. Як зворотний ефект, коли до вібратора додається ультразвукова вібрація, генерується електричний сигнал. Завдяки цим ефектам п'єзоелектрична кераміка використовується як ультразвуковий датчик.

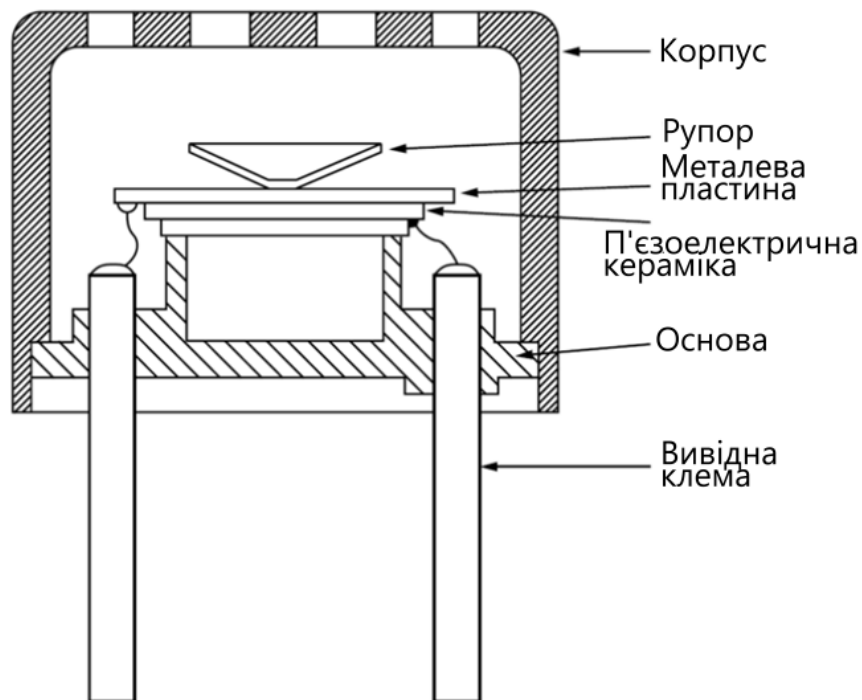


Рисунок 1.6. Конструкція ультразвукового перетворювача

Цей пристрій використовує окремі передавач і приймач ультразвукового датчика відкритого типу, як показано на рисунку 1.7. Такий багаторезонаторний вібратор є комбінацією резонатора та вібратора, що складається з металевої пластини та п'єзoeлектричної керамічної пластини. Резонатор має конічну форму, щоб ефективно випромінювати ультразвукові хвилі, створені вібрацією, і концентрувати їх у центральній частині вібратора. Чутливість перетворювача є максимальною на резонансній частоті п'єзoeлемента. Діаграма спрямованості променю перетворювача дозволяє визначати положення об'єкта в просторі. Коли об'єкт входить у пелюстку випромінювання перетворювача, приймається відбитий сигнал.

Ультразвуковий передавач налаштовано на резонансну частоту 40 кГц для максимального вихідного сигналу, тоді як ультразвуковий приймач має максимальну чутливість до сигналів на частоті 40 кГц, забезпечуючи найбільшу вихідну напругу [1].

1.5 Ультразвуковий датчик URM37 v5

Модуль використовує покращений метод вимірювання відстані, що забезпечує збільшену дальність та вищу стабільність результатів. За потреби можливе індивідуальне налаштування — для цього слід звернутися до виробника. Для підвищення надійності модуль оснащений інтерфейсом RS232. Дані вимірювань можуть зчитуватися через послідовний порт комп'ютера, що робить написання програм для обміну даними зручним і простим.

Користувач може обрати рівень вихідного сигналу — RS232 або TTL — за допомогою кнопки налаштувань (після перезавантаження модуль переходить на вибраний рівень). Також модуль підтримує вихід даних через PWM, де ширина імпульсу відповідає виміряній відстані, що полегшує інтеграцію в різні проєкти. У режимі автоматичного вимірювання можна задати порогове значення. Якщо фактична відстань менша за встановлену, вихід COMP/Trig переходить у низький рівень. Завдяки цьому модуль може працювати як ультразвуковий датчик наближення.

Модуль має функцію керування сервоприводом. У неавтоматичному режимі він може працювати разом із сервоприводом як 180-градусний сканувальний датчик, що дозволяє виконувати огляд перешкод у секторі від 0° до 180°. Пристрій оснащений 123 байтами EEPROM-пам'яті, яка зберігає свої дані навіть після вимкнення живлення. Вбудована схема температурної компенсації підвищує точність вимірювань, а додатковий температурний сенсор дозволяє визначати температуру навколишнього середовища з роздільною здатністю 0.1°C. Модуль має захист від переполюсовки живлення. Інтервал автоматичного вимірювання може бути змінений користувачем відповідно до потреб. Крім того, є аналоговий вихід, де рівень напруги пропорційний виміряній відстані[2].

Рисунок 1.7. Ультразвуковий датчик URM37 v5

Таблиця 1.1– Характеристики URM37 v5

Параметр	Значення
Робоча напруга	3.3V ~ 5.5V
Робочий струм	20 mA
Робоча температура	-10°C ~ 70°C
Діапазон вимірювання	2 см – 800 см (максимальний — 1000 см)
Роздільна здатність	1 см
Точність	1%
Період вимірювання	< 100 мс (макс.)
Габарити	22 мм × 51 мм
Вага	~25 г

1.6 Ультразвуковий датчик HC-SR04

HC-SR04 має чотири виводи: VCC, GND, TRIG та ECHO, які виконують різні функції. Виводи VCC та GND є найпростішими, вони забезпечують живлення HC-SR04.

Ці виводи потрібно підключити відповідно до джерела напруги +5 В та заземлення. Є один контрольний контакт: контакт TRIG. Контакт TRIG відповідає за надсилення ультразвукового імпульсу. Цей контакт повинен бути встановлений на HIGH протягом 10 мкс, після чого HC-SR04 надішле восьмицикловий ультразвуковий імпульс на частоті 40 кГц. Після надсилення ультразвукового імпульсу контакт ECHO перейде в стан HIGH. Контакт ECHO є контактом даних, який використовується для вимірювання відстані. Після відправлення ультразвукового імпульсу контакт перейде в стан HIGH і залишиться в ньому до тих пір, поки не буде виявлено зворотний ультразвуковий імпульс, після чого він перейде в стан LOW.



Рисунок 1.8. Ультразвуковий датчик HC-SR04

HC-SR04 (рисунок 1.8) можна запустити для відправлення ультразвукового імпульсу, встановивши контакт TRIG в стан HIGH. Після

відправлення імпульсу контакт ЕСНО автоматично перейде в стан HIGH. Цей контакт залишиться в стані HIGH до тих пір, поки імпульс знову не потрапить на датчик. Ви можете обчислити відстань до об'єкта, відстежуючи, як довго контакт ЕСНО залишається у високому стані. Час, протягом якого ЕСНО залишається у високому стані, є часом, який імпульс витратив на переміщення. Використання цього вимірювання в рівнянні 1.4 разом зі швидкістю ультразвуку дасть відстань, яку проїхав імпульс. Підсумок цього наведено нижче, а також наочне зображення на рисунку 1.10.

$$d = v \times t \quad (1.4)$$

де v - це швидкість ультразвуку в м/с, t - це час в секундах, d – пройдена відстань.

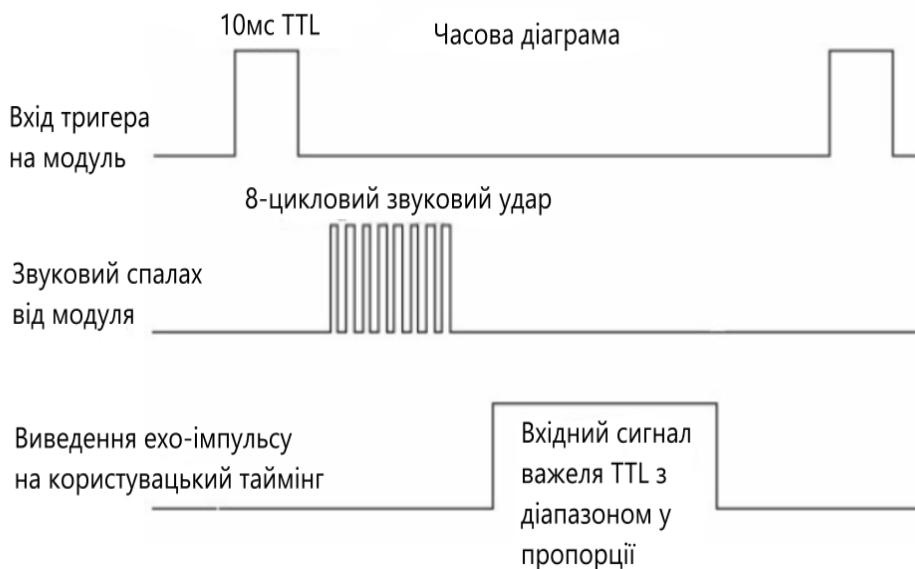


Рисунок 1.9. Часова діаграма

Щоб перетворити показання часу в відстань, потрібно змінити рівняння 1.4. Годинник на пристрої, відраховує мікросекунди або ще менші одиниці часу. Щоб використовувати рівняння 1.4, потрібно визначити швидкість ультразвуку, яка становить 343 метри за секунду при стандартній температурі та тиску. [3].

Таблиця 1.2 – Характеристики HC-SR04

Параметр	Значення
Живлення	+5 В DC
Струм спокою	< 2 мА
Робочий струм	15 мА
Ефективний кут	< 15°
Дальність дії	240 см
Роздільна здатність	0.3 см
Кут вимірювання	30°
Ширина імпульсу на вході тригера	10 мкс
Розмір	45 мм × 20 мм × 15 мм
Вага	близько 10 г

1.7 Структура та функціонування вимірювального каналу ультразвукових сенсорів

Для забезпечення максимальної ефективності роботи перетворювача доцільно використовувати сигнали синусоїдальної або прямокутної форми на його центральній частоті. Сучасні інтегровані рішення часто включають вихідний драйвер, який може бути реалізований у вигляді низькочастотних керуючих елементів для трансформаторного приводу або польових транзисторів, з'єднаних за схемою Н-моста, у випадку безпосереднього приводу.

Після випромінювання сигналу на резонансній частоті датчика система переходить у режим реєстрації зворотних відбиттів, що виникають через наявність об'єкта в зоні дії датчика. Для підвищення точності вимірювань

ультразвукові системи зазвичай застосовують фільтрацію та підсилення сигналу перед його подальшим аналого-цифровим перетворенням. Серед методів підсилення можна виділити такі:

1. Статичне (фіксоване) підсилення – однаковий коефіцієнт посилення застосовується до всього сигналу.
2. Динамічне (часово-залежне) підсилення – коефіцієнт підсилення змінюється в залежності від часу затримки відбиття, що дозволяє компенсувати загасання сигналу з відстанню. Цей підхід запобігає перевантаженню системи від близьких об'єктів і забезпечує чутливість до слабких сигналів від віддалених цілей.
3. Автоматичне регулювання підсилення (АРП) на основі логарифмічного підсилювача – даний метод передбачає нелінійне підсилення вхідного сигналу за логарифмічною залежністю, що дозволяє ефективно обробляти як слабкі, так і сильні сигнали без ризику їхнього насичення. На відміну від часово-залежного підсилення, АРП реагує на амплітуду сигналу без явної прив'язки до часу його надходження.

Для верифікації дійсності зворотного відбиття може використовуватися аналіз частотних характеристик, зокрема перетину нуля, що також дозволяє виявляти доплерівські зсуви для оцінки руху об'єкта. Після відповідної фільтрації та підсилення сигнал надходить на АЦП для подальшої цифрової обробки. Приклад отриманого сигналу після аналого-цифрового перетворення представлений на рисунку 1.10.

Після завершення процедури аналого-цифрового перетворення (АЦП) отриманий цифровий сигнал надходить до спеціалізованого обчислювального модуля – цифрового сигнального процесора (DSP) або мікроконтролера (MCU) – для виконання наступних етапів обробки. Первинним кроком у цьому процесі є фільтрація сигналу за допомогою смугового фільтра,

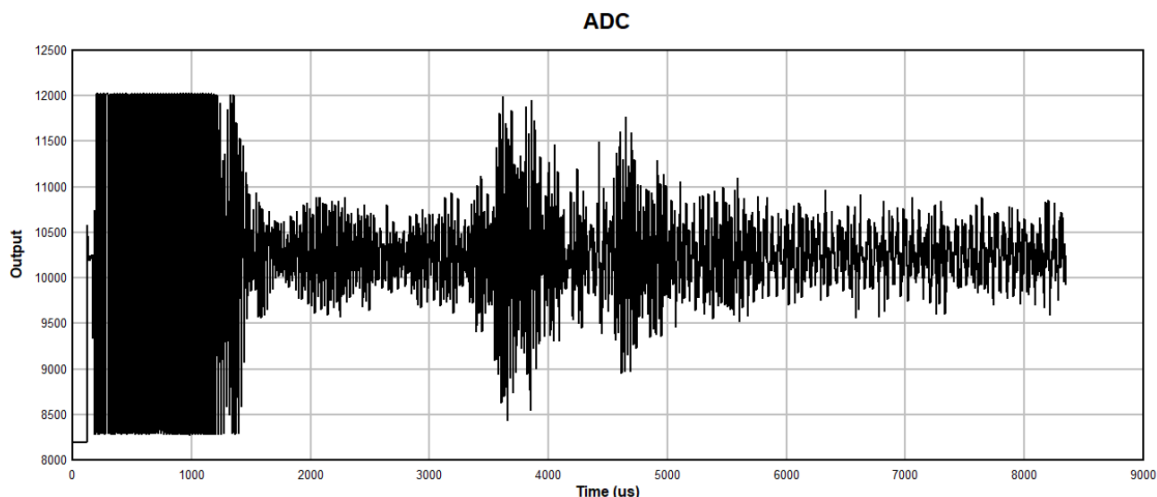


Рисунок 1.10— Вихід з АЦП

основним призначенням якого є придушення позасмугових шумових компонентів та виділення корисного сигналу в робочому частотному діапазоні.

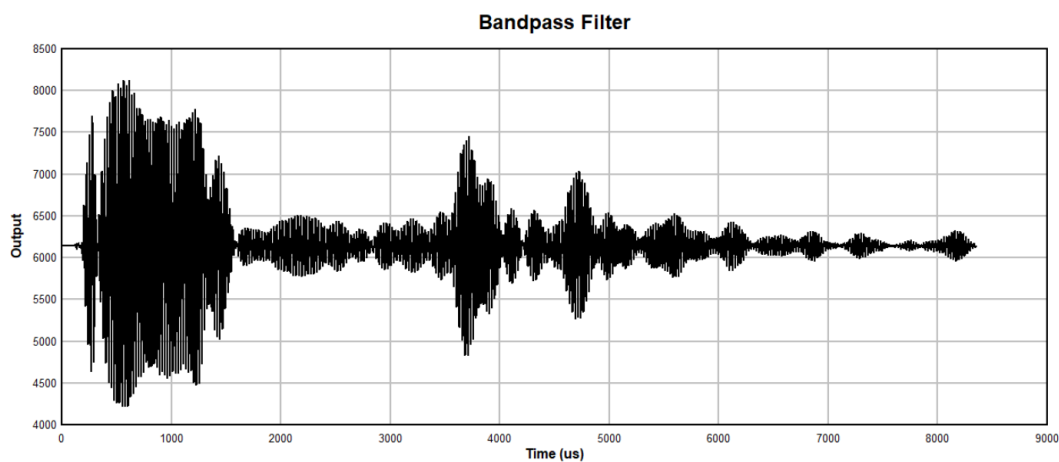


Рисунок 1.11 — Вихід смугового фільтра.

Після фільтрації сигнал проходить етап детектування, де здійснюється його випрямлення з метою отримання огинаючої кривої. Ця процедура передбачає взяття модуля сигналу (абсолютного значення), що дозволяє перейти до подальшого аналізу амплітудних характеристик. Візуалізація результату цієї операції представлена на рисунку 1.12.

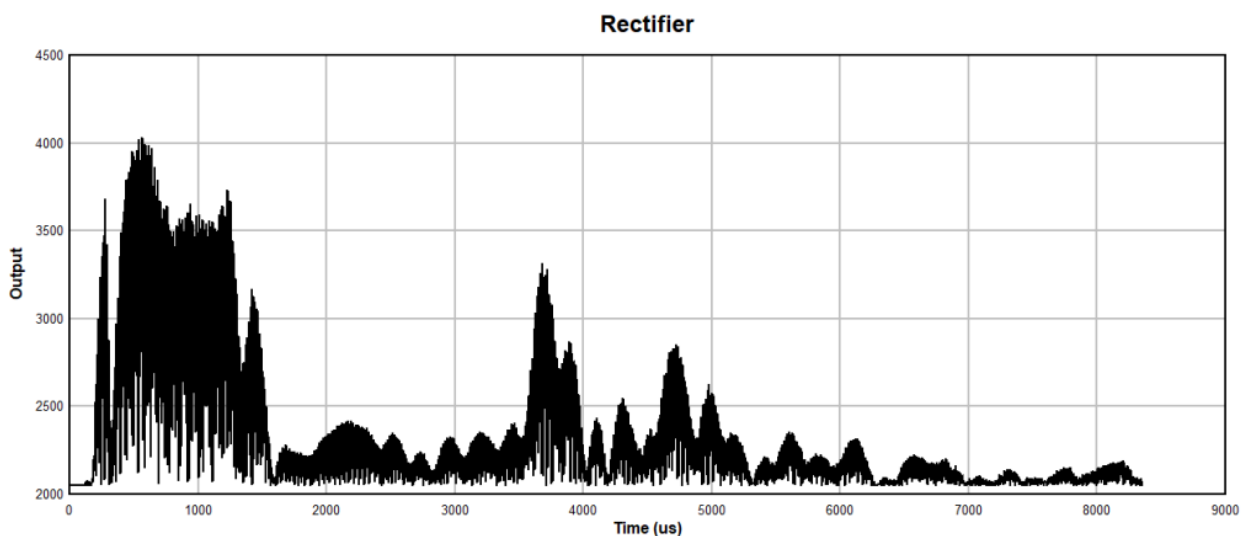


Рисунок 1.12 — Вихід з випрямляча.

На етапі після детектування сигналу перед процедурою фільтрації нижніх частот (ФНЧ) зазвичай застосовується спеціальний метод збереження пікових значень. Ця техніка запобігає втраті максимальних амплітудних характеристик сигналу під час фільтрації. Комбінація алгоритму збереження піків з фільтром нижніх частот дозволяє отримати демодульований сигнал (рисунку 1.13), який є оптимальним для подальшої обробки.

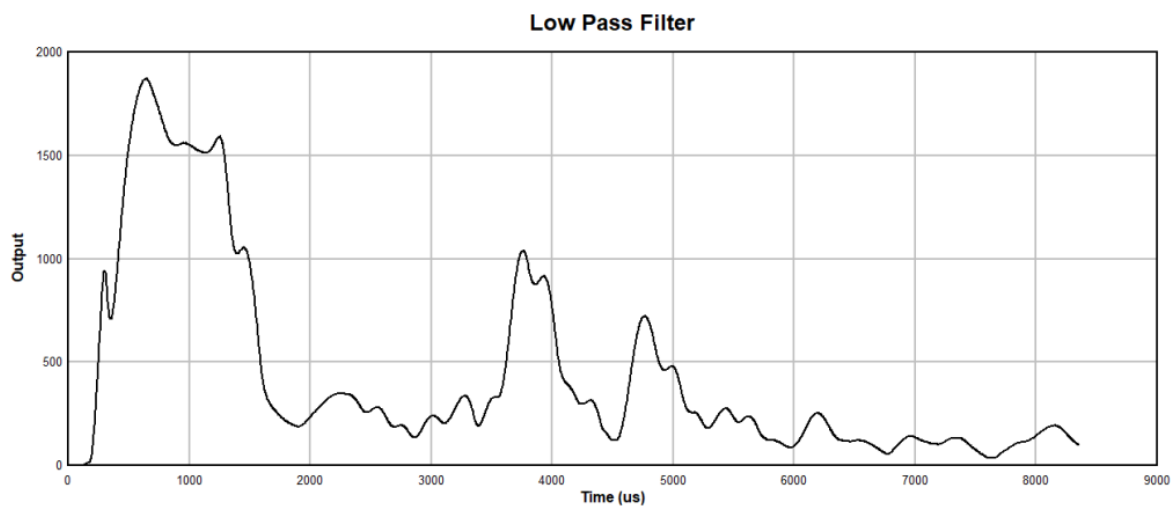


Рисунок 1.13 — Вихід фільтра нижніх частот.

Ультразвукові датчики працюють на частотах в діапазоні 30-500 кГц для застосувань з повітряним зв'язком. Зі збільшенням частота ультразвуку збільшується, швидкість загасання зростає. Таким чином, низькочастотні датчики (30-80 кГц) є більш ефективні на великих відстанях, тоді як високочастотні датчики ефективніші на малих відстанях. Високочастотні датчики (80-500 кГц) також зменшують згасання сигналу, що дозволяє зменшити мінімальну дальність виявлення.

Чим вища частота, тим вужче поле огляду. Вузького поля зору при використанні низькочастотного датчика можна також досягти, додавши «рупор» навколо датчика, щоб спрямувати його ехосигнали в більш вузьку діаграму спрямованості.

Мінімальна дистанція виявлення ультразвукових датчиків залежить від їх конструктивних особливостей та способу генерації імпульсів. Основне обмеження пов'язане з так званою "мертвою зоною" – періодом, коли датчик неспроможний реєструвати сигнал через власні резонансні коливання після випромінювання. Це особливо помітно в моностатичних системах, де один і той же елемент виконує функції передавача та приймача.

Дослідження показують, що використання високочастотних датчиків дозволяє скоротити тривалість затухання резонансу, що позитивно впливає на мінімальну дальність виявлення. Однак такий підхід має і зворотний бік – зменшення максимальної дистанції зондування. Альтернативним рішенням є схема з розділеними передавачем і приймачем, яка повністю усуває проблему взаємного впливу, проте суттєво збільшує вартість системи.

Для суміщеного перетворювача конфігурацій існують додаткові методи корекції. Зокрема, регулювання кількості імпульсів та обмеження пікового струму може зменшити мертву зону, але це часто призводить до послаблення

корисного сигналу. Ефективним компромісним рішенням є введення демпфуючих елементів. [4]

1.8 Методи вимірювання відстані

Часовий метод. Цей спосіб вимірювання відстані ґрунтується на вимірюванні інтервалу часу між моментом, коли датчик випромінює сигнал, та моментом, коли відбитий сигнал повертається назад. По суті, датчик працює як «годинник»: він фіксує, скільки часу потрібно хвилі, щоб дістатися до об'єкта і повернутися. Такий принцип, znаний як Time-of-Flight, може застосовуватися з різними типами хвиль — найчастіше це звук або світло. Завдяки цьому метод залишається одним із найпоширеніших, оскільки він інтуїтивно зрозумілий і досить простий у реалізації.

Амплітудний метод. В основі цього підходу лежить властивість ультразвукових хвиль слабшати з відстанню. Коли ультразвук поширюється в повітрі, його інтенсивність зменшується через розширення променя та часткове поглинання енергії середовищем. Отже, чим далі розміщено приймач від передавача, тим меншою буде амплітуда отриманого сигналу. Вимірюючи цю зміну амплітуди, можна орієнтовно оцінити відстань. Метод досить простий, але чутливий до умов середовища, тому його не завжди можна застосувати з високою точністю.

Частотний метод. У цьому випадку відстань визначається шляхом аналізу зміни частоти сигналу, що відбувається під час його проходження до об'єкта і назад. Для цього використовують частотну модуляцію, зазвичай лінійну, що дозволяє створити різницю між частотами переданого і прийнятого сигналів. Після змішування цих двох коливань виникають так звані «біття» — сигнал із власною частотою, яку можна виміряти.

Метод має низку переваг: він забезпечує високу точність і дає змогу працювати з низькою піковою потужністю сигналу, що важливо для енергоощадності. Також він здатний вимірювати дуже малі відстані. Втім, є й істотні недоліки: апаратура стає складною, особливо коли потрібно визначати відстань до багатьох об'єктів одночасно, до того ж важко розв'язувати передавальний і приймальний тракти та забезпечити високу лінійність зміни частоти.

Фазовий метод. У фазовому способі застосовуються безперервні сигнали — вони можуть бути як монохроматичними, так і модульованими. Суть полягає у вимірюванні різниці фаз між коливаннями, виділеними з переданого та прийнятого сигналів. Оскільки хвиля, проходячи певну відстань, «запізнюється», ця затримка проявляється у фазовому зсуві. Знаючи масштабну частоту та різницю фаз, можна визначити час запізнення, а отже й відстань.

Головна перевага фазового методу — можливість досягти дуже високої точності, просто підібравши відповідну частоту модуляції. Однак метод має і недоліки: він не дозволяє точно вимірювати відстані до кількох об'єктів одночасно та потребує ефективного приглушення власного випромінюваного сигналу в приймальному каналі. До того ж, технічна реалізація є досить складною, адже потрібно використовувати декілька фазових шкал [5].

Висновки до розділу 1

Проведено комплексний огляд методів та технічних рішень, що застосовуються для вимірювання відстані, а також розглянуто фізичні основи роботи ультразвукових датчиків. Аналіз показав, що ультразвукова технологія залишається одним із найефективніших способів безконтактного визначення відстані у промислових та побутових системах. Її переваги обумовлені високою чутливістю, достатньою точністю, невисокою вартістю та можливістю роботи з об'єктами різних матеріалів і геометрії.

У ході огляду було встановлено, що якість вимірювання істотно залежить від фізичних характеристик об'єкта, довжини хвилі та амплітуди ультразвукового сигналу, а також від умов навколишнього середовища. Також було показано, що орієнтація та поверхня об'єкта визначають амплітуду відбитого імпульсу, що впливає на надійність детектування.

2 ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ ЗАВАДОЗАХИЩЕНОСТІ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ПРИСТРОЮ

2.1 Використання методів оптимальної обробки сигналу для підвищення точності вимірювання відстані

Ультразвуковий метод вимірювання відстані на основі принципу часу проходження (ToF) є привабливим завдяки простоті реалізації та можливості роботи в умовах пилу, туману, диму та змінної освітленості. Однак така система істотно чутлива до шумів та завад, що обмежує досяжну точність та відтворюваність результатів.

При вимірюванні відстані ультразвуковий датчик формує короткий акустичний імпульс, який після відбиття від об'єкта повертається на приймач. Час двостороннього проходження хвилі визначається як

$$t_k = t_{\text{echo},k} - t_{\text{trig},k}, \quad (2.1)$$

де $t_{\text{trig},k}$ – момент випромінювання імпульсу на k -му такті вимірювання, $t_{\text{echo},k}$ – момент реєстрації ехо-сигналу.

Відстань обчислюється за відомою формулою

$$d_k = \frac{v(T_k, \varphi_k)}{2} t_k, \quad (2.2)$$

де d_k – оцінка відстані до об'єкта, $v(T_k, \varphi_k)$ – швидкість ультразвуку в повітрі, що залежить від температури T_k та відносної вологості φ_k .

Для сухого повітря часто використовують лінійну апроксимацію.

$$v(T) \approx 331,3 + 0,6T, [\text{м/с}], \quad (2.3)$$

де T – температура в $^{\circ}\text{C}$ [6]. Для підвищення точності, особливо у вологому повітрі, швидкість ультразвуку уточнюють з урахуванням вмісту водяної пари [7].

На практиці на отримані значення d_k впливають такі групи факторів:

- параметри середовища – зміни температури, вологості, тиску, турбулентність повітря;
- властивості об'єкта – коефіцієнт відбиття, шорсткість, нахил поверхні;
- апаратні обмеження – шум підсилювачів, джитер таймера, квантування АЦП;
- взаємні завади – сторонні акустичні джерела, міжсенсорні перешкоди.

У результаті послідовність вимірювань $\{d_k\}$ не є сталою навіть при нерухомому об'єкті: спостерігаються випадкові флуктуації навколо істинного значення, а також можливі повільні дрейфи [8]. Це обумовлює необхідність застосування оптимальних методів цифрової фільтрації, здатних:

- придушувати високочастотний шум;
- компенсувати частину систематичних складових;
- забезпечувати швидке реагування на зміну відстані.

Одним з найпоширеніших інструментів для таких задач є дискретний фільтр Калмана, який дозволяє в оптимальному (в середньоквадратичному сенсі) вигляді оцінювати прихований стан системи за зашумленими вимірюваннями.

Розглянемо одновимірну задачу вимірювання відстані до об'єкта вздовж осі випромінювання ультразвукового датчика. Введемо вектор стану:

$$x_k = \begin{bmatrix} d_k \\ v_k \end{bmatrix}, \quad (2.4)$$

де d_k – істинна відстань до об'єкта на k -му кроці, v_k – проєкція швидкості об'єкта на напрямок променя.

Припустимо, що [9] між двома вимірюваннями об'єкт рухається рівномірно-прискорено, але прискорення є випадковою величиною, яка не вимірюється безпосередньо. Тоді еволюція стану може бути описана лінійною дискретною моделлю:

$$x_k = Fx_{k-1} + w_k, \quad (2.5)$$

де F – матриця переходу стану,

w_k – випадковий процесний шум, що моделює невідомі збурення (нерівномірний рух, вібрації тощо).

Для фіксованого інтервалу дискретизації Δt матрицю F зазвичай задають як [8–11]:

$$F = \begin{bmatrix} 1 & \Delta t \\ 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (2.6)$$

Вектор процесного шуму w_k вважається гаусівським білим шумом з нульовим середнім та коваріаційною матрицею

$$Q = E\{w_k w_k^T\} = \begin{bmatrix} q_{11} & q_{12} \\ q_{12} & q_{22} \end{bmatrix}. \quad (2.7)$$

У спрощеній моделі, коли випадковість зведена переважно до невизначеності прискорення, Q пов'язують з дисперсією «шуму прискорення» σ_a^2 :

$$Q = \sigma_a^2 \left[\frac{\frac{\Delta t^4}{4}}{\frac{\Delta t^3}{2}} \quad \frac{\frac{\Delta t^3}{2}}{\Delta t^2} \right]. \quad (2.8)$$

Параметр σ_a^2 інтерпретується як інтенсивність непередбачуваних змін швидкості, і саме він визначає, наскільки «гнучко» фільтр буде відстежувати швидкі зміни відстані [10]. Ультразвуковий перетворювач безпосередньо вимірює відстань, перераховуючи час проходження імпульсу згідно з (2.2). Отже, рівняння вимірювання має вигляд

$$z_k = Hx_k + n_k, \quad (2.9)$$

де z_k – скалярний результат вимірювання (обчислена відстань),

H – матриця вимірювання, n_k – шум вимірювання.

Для нашого випадку

$$H = [1 \quad 0], \quad (2.10)$$

тобто вимірюється лише перша компонента вектора стану. Шум вимірювання n_k вважається гаусівським з нульовим середнім і дисперсією σ_n^2 :

$$R = E\{n_k^2\} = \sigma_n^2. \quad (2.11)$$

Дисперсію σ_n^2 можна оцінити експериментально, виконуючи серію вимірювань нерухомого об'єкта на фіксованій відстані та обчислюючи

$$\hat{\sigma}_n^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{k=1}^N (z_k - \bar{z})^2, \quad \bar{z} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N z_k. \quad (2.12)$$

Отримані значення $\hat{\sigma}_n^2$ для датчиків HC-SR04 та URM37 v5 надалі використовуються для початкової настройки матриці R [12, 13].

Фільтр Калмана реалізується у вигляді двох послідовних етапів: прогноз та оновлення [11, 12].

Апріорна (прогнозована) оцінка вектора стану:

$$\hat{x}_{k|k-1} = F\hat{x}_{k-1|k-1}, \quad (2.13)$$

апріорна коваріація похибки оцінки:

$$P_{k|k-1} = FP_{k-1|k-1}F^T + Q. \quad (2.14)$$

Тут

$\hat{x}_{k-1|k-1}$ – апостеріорна оцінка стану на попередньому кроці,
 $P_{k-1|k-1}$ – відповідна коваріаційна матриця похибки.

Спочатку обчислюється інновація тобто фільтр на кожному кроці порівнює прогноз та вимір z_k , а різниця між ними називають інновацією або помилкою прогнозу вимірювання:

$$\tilde{y}_k = z_k - H\hat{x}_{k|k-1}, \quad (2.15)$$

та її дисперсія

$$S_k = HP_{k|k-1}H^T + R. \quad (2.16)$$

Після цього обчислюється коефіцієнт Калмана:

$$K_k = P_{k|k-1}H^TS_k^{-1}. \quad (2.17)$$

Оновлена (апостеріорна) оцінка стану:

$$\hat{x}_{k|k} = \hat{x}_{k|k-1} + K_k\tilde{y}_k, \quad (2.18)$$

та коваріаційна матриця похибки:

$$P_{k|k} = (I - K_k H) P_{k|k-1}. \quad (2.19)$$

На рисунку 2.1 зображено блок-схему роботи фільтра Калмана для ультразвукового вимірювача [13]: на вхід надходить послідовність z_k , формуються оцінки $\hat{d}_k$ та $\hat{v}_k$, а також відображається зворотний зв'язок через матриці Q та R .

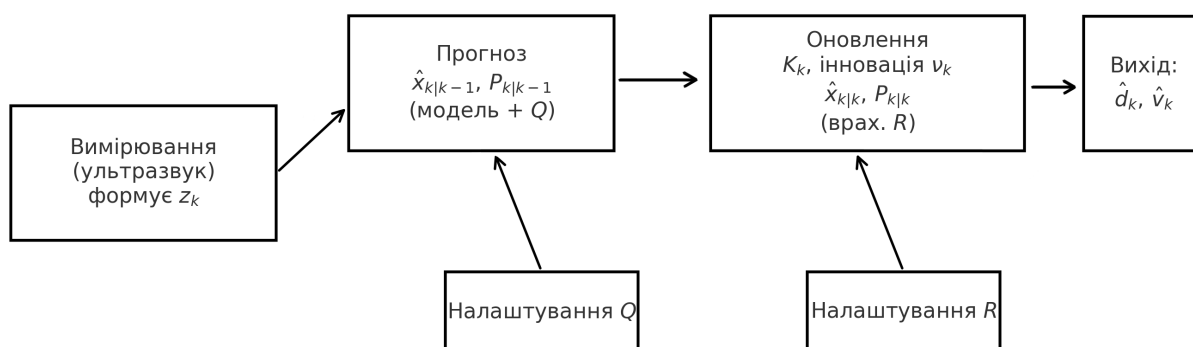


Рисунок 2.1 - Блок-схема роботи фільтра Калмана для ультразвукового вимірювача

Практична ефективність фільтра Калмана визначається правильним вибором коваріаційних матриць шумів Q та R . Для ультразвукових вимірювачів ці параметри задають компроміс між:

- ступенем придушення шуму;
- швидкістю зміни вихідного параметру фільтру при зміні відстані;
- стійкістю до аномальних вимірювань.

На рисунку 2.2 зображено графік, на якому одночасно відображені:

- істинна відстань (еталонна траєкторія руху відбивача);
- «сирі» вимірювання датчика;
- відфільтровані дані для кількох наборів Q та R .

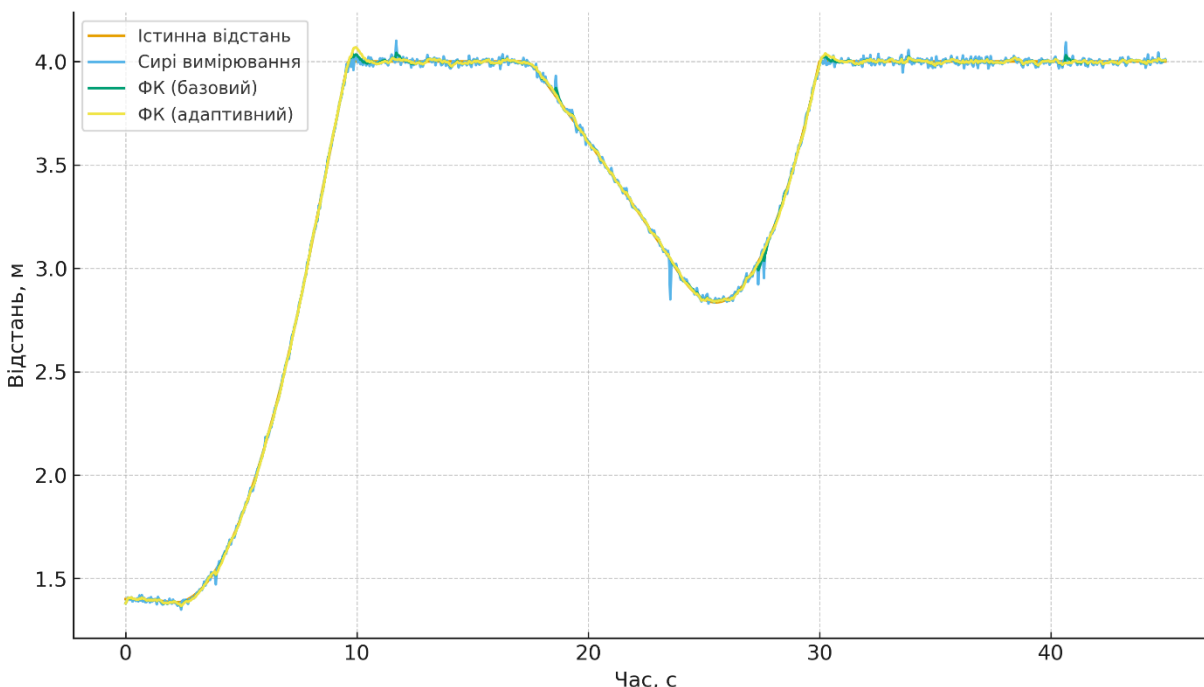


Рисунок 2.2 - Відстань: сирі дані та оцінки фільтра Калмана

При малих значеннях Q (тобто мала σ_a^2) фільтр вважає модель руху дуже точною. Відфільтрована крива стає гладкою, але починає запізнюватися при різких змінах відстані. При [14] збільшенні Q фільтр допускає більші випадкові зміни швидкості, швидше адаптується до руху об'єкта, проте стає чутливішим до шуму.

Матриця R визначає ступінь довіри до вимірювань. При великому R (малій довірі) фільтр більше покладається на модель, що зменшує вплив шумових вимірювань, але збільшує інерційність. При малому R фільтр тісніше «йде за

вимірюваннями», що [15] забезпечує швидку реакцію на реальні зміни, проте збільшує варіації оцінки.

На рисунку 2.3 зображено початкову фазу роботи фільтра (перші 50–100 тактів): інтенсивне зменшення елементів $P_{k|k}$, суттєві коливання коефіцієнта Калмана K_k та швидке згладжування вимірювань, коли фільтр переходить від «незнання» до усталеного режиму.

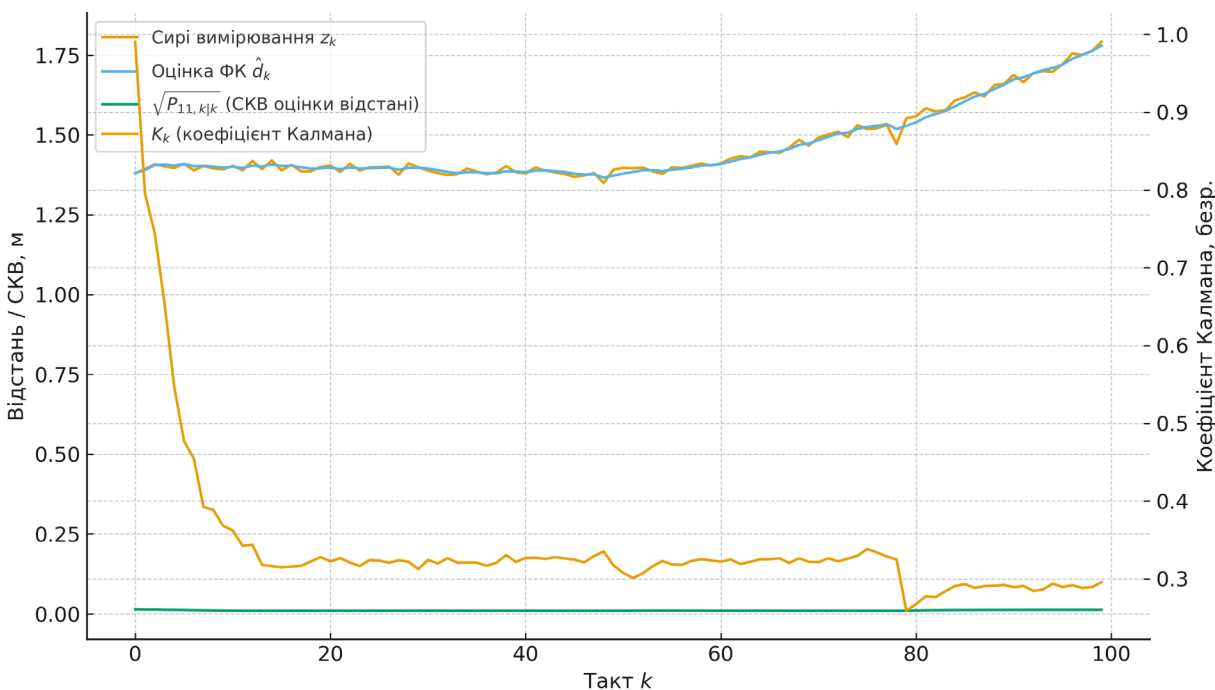


Рисунок 2.3 - Початкова фаза роботи фільтра Калмана (перші 100 тактів)

Для оцінки доцільності [16] використання фільтра Калмана його результати порівнюють із класичними методами згладження:

- ковзне середнє;
- експоненційне згладжування;
- цифрові фільтри низьких частот (наприклад, ФНЧ першого чи другого порядку).

Нехай ковзне середнє обчислюється у вікні довжиною M :

$$\hat{d}_k^{\text{MA}} = \frac{1}{M} \sum_{i=0}^{M-1} z_{k-i}. \quad (2.20)$$

Цей метод добре зменшує дисперсію шуму, але вводить фазову затримку приблизно $(M - 1)/2$ тактів, тобто оцінка [17] «запізнюється» відносно реальної траєкторії. Для систем реального часу це суттєвий недолік.

У випадку експоненційного згладжування

$$\hat{d}_k^{\text{ES}} = \alpha z_k + (1 - \alpha) \hat{d}_{k-1}^{\text{ES}}, \quad (2.21)$$

де $0 < \alpha < 1$ – коефіцієнт згладжування. При малих α фільтр сильно згладжує шум, але стає інерційним; при великих α реагує швидко, але гірше придушує флуктуації.

На рисунку 2.4 порівнюємо три криві:

1. «Сирі» вимірювання;
2. Вихід ковзного середнього;
3. Вихід фільтра Калмана.

Видно, що фільтр Калмана забезпечує суттєве зменшення шуму без помітного фазового зсуву, що обумовлено [18] використанням моделі динаміки стану. На рисунку 2.5 зображено істинне значення:

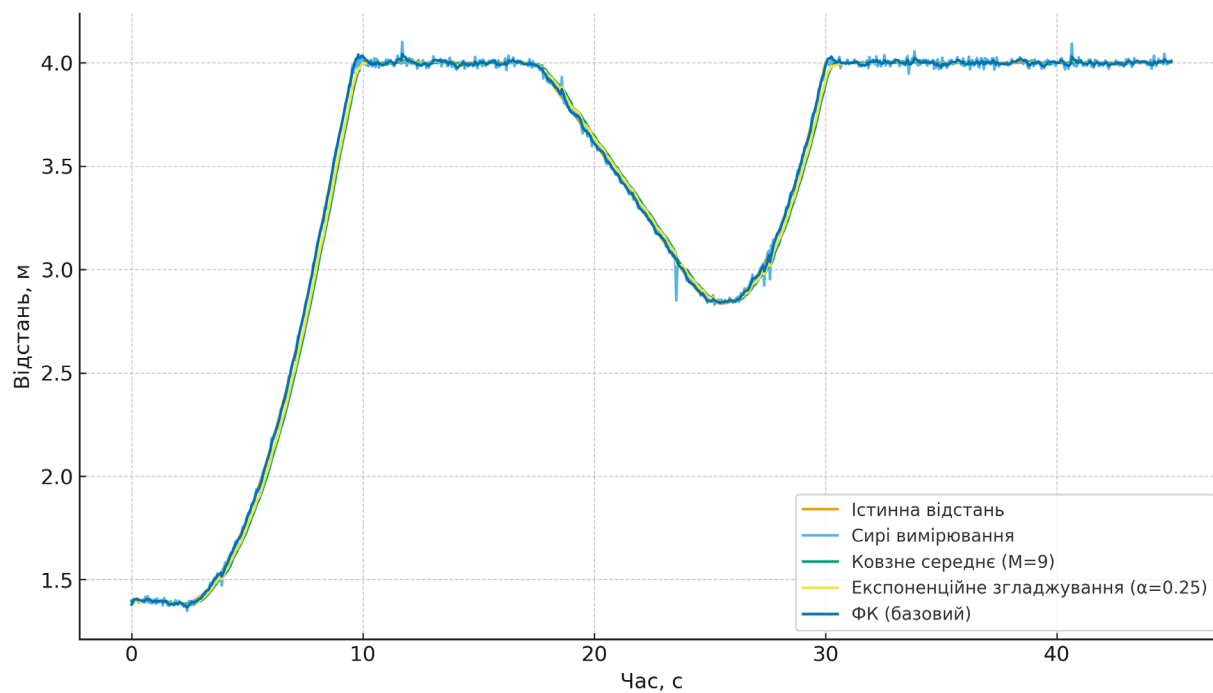


Рисунок 2.4 – Порівняння фільтрації (КС / ЕЗ / ФК)

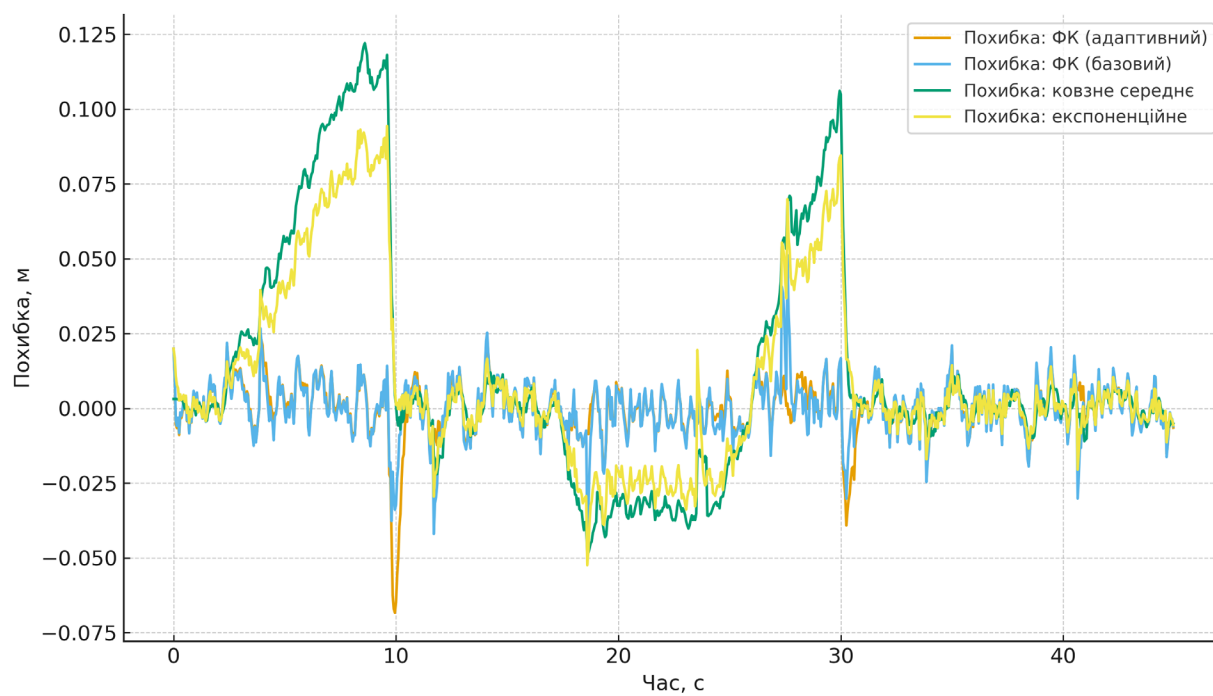


Рисунок 2.5 - Істине значення

$$e_k^{\text{KF}} = d_k^{\text{true}} - \hat{d}_k^{\text{KF}}, e_k^{\text{MA}} = d_k^{\text{true}} - \hat{d}_k^{\text{MA}}, \quad (2.22)$$

Можна також подати їх у вигляді гістограм або графіків середньоквадратичної похибки. Зазвичай після застосування фільтра Калмана СКП стає меншою, а залишки мають розподіл, який більше схожий на нормальний і коливається навколо нуля [19–21].

Важливим інструментом оцінювання коректності налаштування фільтра є аналіз інновацій $\tilde{y}_k$, визначених у (2.15). Якщо модель системи та шумів адекватна, послідовність $\tilde{y}_k$:

- має нульове середнє;
- є некорельованою у часі;
- має дисперсію, близьку до теоретичної S_k .

На рисунку 2.6 зображено часовий ряд інновацій та границі $\pm 3\sqrt{S_k}$. Переважна більшість точок повинна знаходитися в межах цих границь. Систематичний зміщений тренд або великі «хвости» свідчать про:

- недооцінену або переоцінену дисперсію шуму вимірювань R ;
- некоректну модель руху (наприклад, ігнорування прискорення);
- наявність неврахованих систематичних впливів (температурні дрейфи, нелінійність датчика).

Додатково інновації використовуються як база для адаптивної зміни параметрів фільтра, що й становить основу запропонованої в роботі інновації.

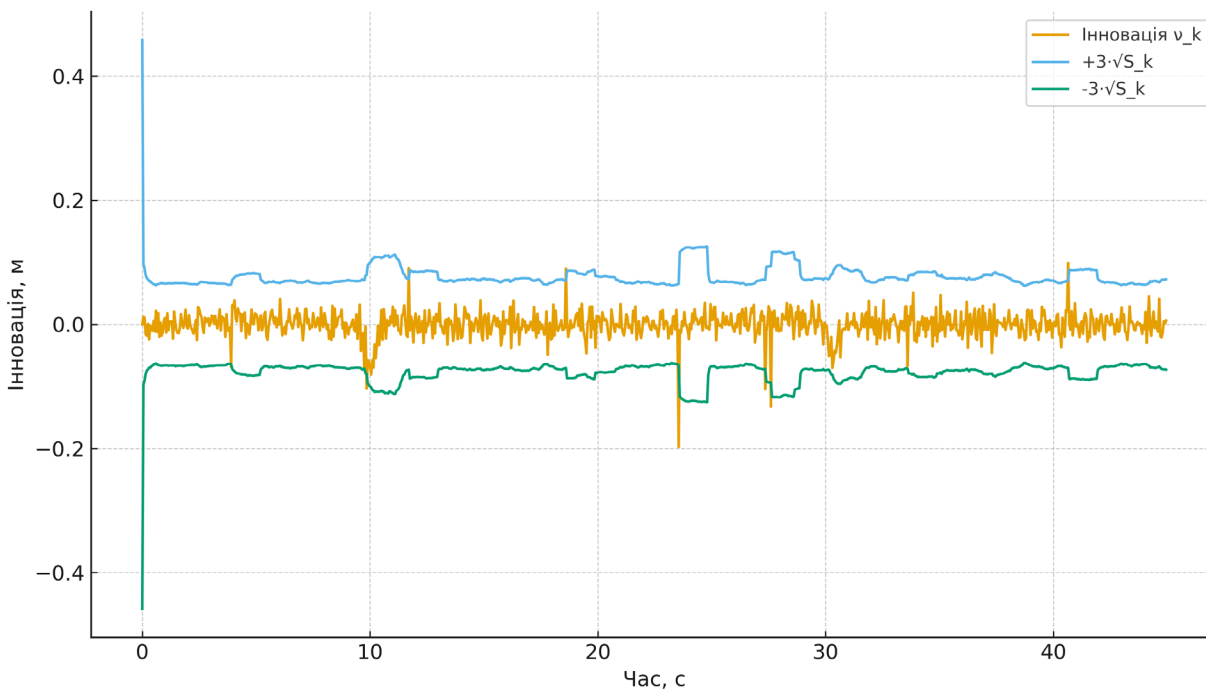


Рисунок 2.6 - Інновації адаптивного ФК

2.2 Адаптивний фільтр Калмана

Ультразвукові вимірювання відстані базуються на вимірюванні часу проходження акустичної хвилі (ToF), тому навіть за якісної електроніки точність суттєво залежить від параметрів повітря. Температура, відносна вологість, статичний тиск і вміст CO_2 змінюють швидкість ультразвуку, а отже — масштаб перетворення $\tau \mapsto d$. Це [22, 23] призводить до систематичної похибки (дрейфу) у «сирих» вимірюваннях та до зростання дисперсії помилки у нестабільному середовищі. Для одночасного підвищення точності й завадозахищеності пропонується поєднати:

компенсацію швидкості ультразвуку $c(T, RH, p, CO_2)$ за наближеною формулою Крамера, яка враховує T, p, RH, CO_2 ; адаптивний фільтр Калмана, в якому коваріація вимірювань R_k змінюється автоматично залежно від невизначеності середовища та якості ToF; через контроль інновацій (NIS-критерій) для відсіювання викидів (мульти-ехо, “зрив” детекції, паразитні відбиття).

Для ультразвукового каналу з вимірюванням часу проходження τ_k (двохходовий ToF) відстань оцінюють як

$$z_k = \frac{c_k}{2} \tau_k, c_k = c(T_k, RH_k, p_k, CO_{2,k}), \quad (2.23)$$

де T_k — температура ($^{\circ}C$), RH_k — відносна вологість (%), p_k — статичний тиск (Па), $CO_{2,k}$ — концентрація CO_2 (ppm).

Якщо датчик повертає вже “готову” дистанцію $z_k^{(ref)}$, отриману з припущенням фіксованої швидкості c_{ref} (наприклад, 343 м/с), тоді її можна швидко перекалібрувати на поточне середовище:

$$z_k \approx z_k^{(ref)} \cdot \frac{c_k}{c_{ref}} \quad (2.24)$$

Наближення Крамера описує нуль-частотну швидкість ультразвуку в повітрі як функцію температури, тиску, вологості та CO_2 . Практична форма реалізації часто подається як поліном від $t(^{\circ}C)$, статичного тиску p_s (Па), мольної частки водяної пари X_w і мольної частки CO_2 X_c .

$$X_c = \frac{CO_2 [ppm]}{10^6}. \quad (2.25)$$

Введемо $T = 273.15 + t(K)$, $rh = RH/100$. Тоді (в одній з поширених реалізацій) мольна частка водяної пари:

$$X_w = \frac{rh \cdot E_f \cdot p_{sv}(T)}{p_s}, \quad (2.26)$$

де $p_{sv}(T)$ — тиск насиченої пари, E_f — поправка-підсилювач (enhancement factor), що враховує відхилення від ідеального газу при кінцевому тиску.

Типова форма для $p_{sv}(T)$ задається експоненціальною апроксимацією:

$$p_{sv}(T) = \exp(\alpha_0 T^2 + \alpha_1 T + \alpha_2 + \frac{\alpha_3}{T}), \quad (2.27)$$

а для E_f — як близька до 1 поправка:

$$E_f \approx 1.00062 + 3.14 \cdot 10^{-8} p_s + 5.6 \cdot 10^{-7} T^2, \quad (2.28)$$

(конкретні коефіцієнти беруться з реалізації наближення Крамера)

Швидкість ультразвуку c_0 (м/с) подається у вигляді:

$$c_0 = A_0 + A_1 t + A_2 t^2 + (A_3 + A_4 t + A_5 t^2) X_w + (A_6 + A_7 t + A_8 + (A_9 + A_{10} t + A_{11} t^2) X_c + A_{12} X_w^2 + A_{13} p_s^2 + A_{14} X_c^2 + A_{15} X_w \quad (2.29)$$

де коефіцієнти A_i наведені нижче для наближення Крамера [24].

$$\begin{aligned} A_0 &= 331.5024, A_1 = 0.603055, A_2 = -0.000528, \\ A_3 &= 51.471935, A_4 = 0.1495874, A_5 = -0.000782, \\ A_6 &= -1.82 \cdot 10^{-7}, A_7 = 3.73 \cdot 10^{-8}, A_8 = -2.93 \cdot 10^{-10}, \\ A_9 &= -85.20931, A_{10} = -0.228525, A_{11} = 5.91 \cdot 10^{-5}, \\ A_{12} &= -2.835149, A_{13} = -2.15 \cdot 10^{-13}, \\ A_{14} &= 29.179762, A_{15} = 0.000486. \end{aligned} \quad (2.30)$$

Для згладжування [25] послідовності вимірювань z_k і оцінювання не лише відстані, а й її “швидкості зміни”, застосуємо дискретну модель зі сталою швидкістю:

$$x_k = \begin{bmatrix} d_k \\ v_k \end{bmatrix}, x_k = F x_{k-1} + w_k, F = \begin{bmatrix} 1 & \Delta t \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2.31)$$

$$z_k = Hx_k + n_k, H = [1 \ 0]. \quad (2.32)$$

Рекурсивні кроки фільтра Калмана: прогноз

$$\hat{x}_{k|k-1} = F\hat{x}_{k-1|k-1}, P_{k|k-1} = FP_{k-1|k-1}F^T + Q_k, \quad (2.33)$$

оновлення за вимірюванням

$$y_k = z_k - H\hat{x}_{k|k-1}, S_k = HP_{k|k-1}H^T + R_k, \quad (2.34)$$

$$K_k = P_{k|k-1}H^TS_k^{-1}, \hat{x}_{k|k} = \hat{x}_{k|k-1} + K_k y_k, \quad (2.35)$$

$$P_{k|k} = (I - K_k H)P_{k|k-1}. \quad (2.36)$$

Тут y_k — інновація, S_k — коваріація інновації, R_k — дисперсія вимірювання (може бути адаптивною).

На практиці похибка вимірювання відстані змінюється від виміру до виміру:

- у разі коливань температури/вологості/тиску змінюється c_k ;
- датчики середовища мають власну похибку, яка переноситься в похибку c_k ;
- ToF-канал має похибку квантування, що переноситься в похибку z_k .

Тому фіксоване R часто є компромісом: або фільтр стає “занадто довірливим” (пропускає шум/викиди), або “занадто інерційним”.

Для $z_k = \frac{c_k}{2}\tau_k$ дисперсію можна апроксимувати лінійним поширенням похибок:

$$\sigma_{z,k}^2 \approx \left(\frac{\partial z}{\partial c}\right)^2 \sigma_{c,k}^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial \tau}\right)^2 \sigma_{\tau}^2 = \left(\frac{\tau_k}{2}\right)^2 \sigma_{c,k}^2 + \left(\frac{c_k}{2}\right)^2 \sigma_{\tau}^2. \quad (2.37)$$

Тоді адаптивну коваріацію вимірювання задаємо як

$$R_k = \sigma_{z,k}^2 + R_{\min}, \quad (2.38)$$

де $R_{\min}$ — “підлога” для уникнення надмірної довіри (наприклад, кілька мм).

Невизначеність $c_k = c(T, p, RH, CO_2)$ оцінюємо як

$$\sigma_{c,k}^2 \approx \left(\frac{\partial c}{\partial T}\right)^2 \sigma_T^2 + \left(\frac{\partial c}{\partial p}\right)^2 \sigma_p^2 + \left(\frac{\partial c}{\partial RH}\right)^2 \sigma_{RH}^2 + \left(\frac{\partial c}{\partial CO_2}\right)^2 \sigma_{CO_2}^2. \quad (2.39)$$

Похідні $\partial c / \partial (\cdot)$ доцільно обчислювати чисельно (кінцевими різницями), що робить алгоритм [26] переносним на будь-яку реалізацію формули швидкості ультразвуку (включно з наближенням Крамера).

У підсумку R_k автоматично зростає, якщо:

- сенсори середовища мають велику похибку;
- середовище нестабільне (збільшується $\sigma_{c,k}$);
- ToF-канал “шумить” (зростає σ_τ).

Практичний зміст: у “поганих” умовах фільтр Калмана зменшує довіру до z_k і згладжує сильніше; у стабільних умовах — реагує швидше.

Ультразвукові дані часто містять викиди через мульти-ехо, відбиття під кутом або втрату корисного еха. Для автоматичного виявлення таких вимірювань застосовується нормалізований квадрат інновації (Normalized Innovation Squared). Він показує, наскільки “дивним” є поточний вимір відносно того, що прогнозує фільтр Калмана, з урахуванням очікуваної дисперсії:

$$NIS_k = v_k^T S_k^{-1} v_k. \quad (2.40)$$

Для скалярного z_k :

$$NIS_k = \frac{v_k^2}{S_k}. \quad (2.41)$$

Якщо NIS_k перевищує критичне значення χ^2 для 1 ступеня вільності, вимірювання вважається аномальним. Наприклад, для рівня 0.99: $\chi_{1,0.99}^2 \approx 6.63$.

Варіанти дій при викиді:

1. пропустити оновлення (залишити прогноз);
2. тимчасово збільшити $R_k \leftarrow \lambda R_k$ (наприклад, $\lambda = 50..200$) і виконати оновлення зі зменшеною вагою вимірювання.

Після введення моделі перетворення $z_k = \frac{c_k}{2} \tau_k$ та вибору адаптивної схеми оцінювання (R_k через невизначеність середовища і ToF, а також за NIS), доцільно перейти до ілюстративної частини, яка пояснює фізичний зміст компенсації та показує, як параметри середовища впливають на роботу фільтра. Для цього спочатку демонструються розрахункові залежності швидкості ультразвуку $c_0(T, RH, p, CO_2)$ за наближенням Крамера, а далі — порівняння траєкторій відстані до та після компенсації і фільтрації.

На рисунку 2.7 зображено залежність $c_0(T)$ при фіксованих p та CO_2 і для кількох значень відносної вологості RH. Такий графік наочно обґрунтовує, чому температурна [27] компенсація є обов'язковою: швидкість ультразвуку зростає з температурою майже лінійно в робочому діапазоні, а відносна вологість дає додаткову, хоч і меншу, поправку. З практичної точки зору це означає, що навіть при однаковому ToF τ_k відновлена відстань змінюватиметься, якщо зміниться T або RH, тобто виникатиме систематичний дрейф без компенсації.

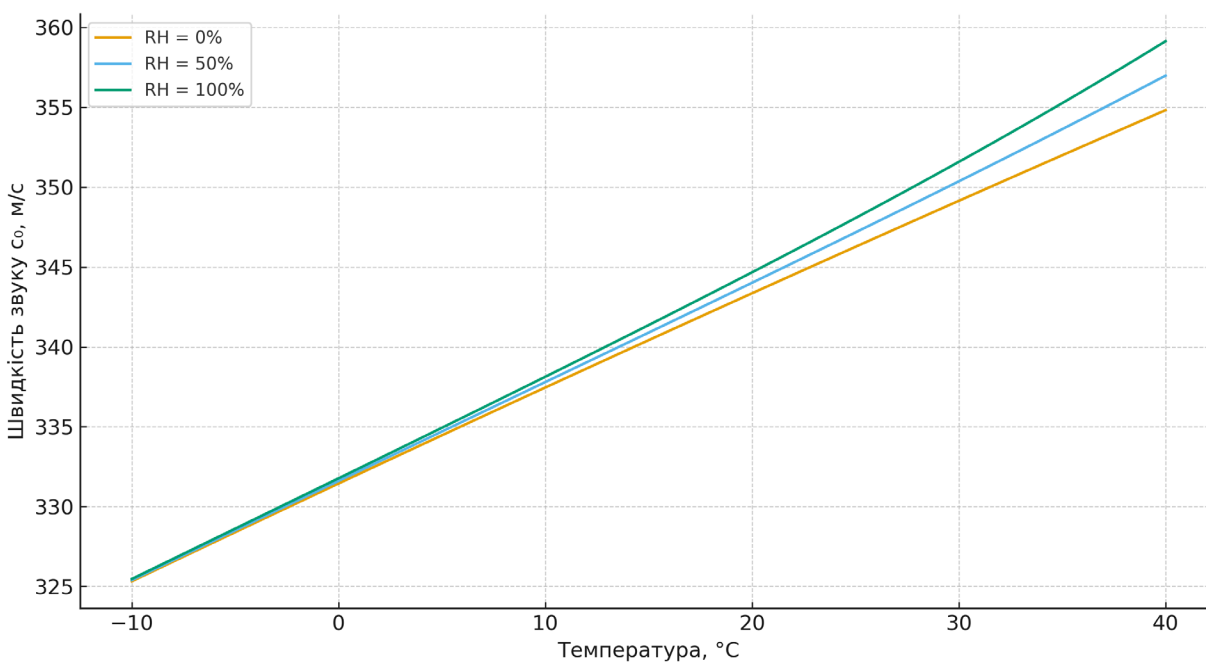


Рисунок 2.7 - Залежність $c_0(T)$ при фіксованих p та CO_2

На рисунку 2.8 зображено вплив статичного тиску $c_0(p)$ за фіксованих T , RH і CO_2 . У простій ідеалізованій моделі швидкість ультразвуку майже не залежить від тиску, однак у точніших наближеннях (включно з формулою Крамера) з'являється невелика [28-30] залежність, що має значення для задач підвищеної точності або при суттєвих коливаннях атмосферного тиску. Цей графік потрібен, щоб показати: в моделі компенсації тиск не «зайвий», а дає вимірювану поправку, яка може накопичувати внесок у похибку на довгих дистанціях.

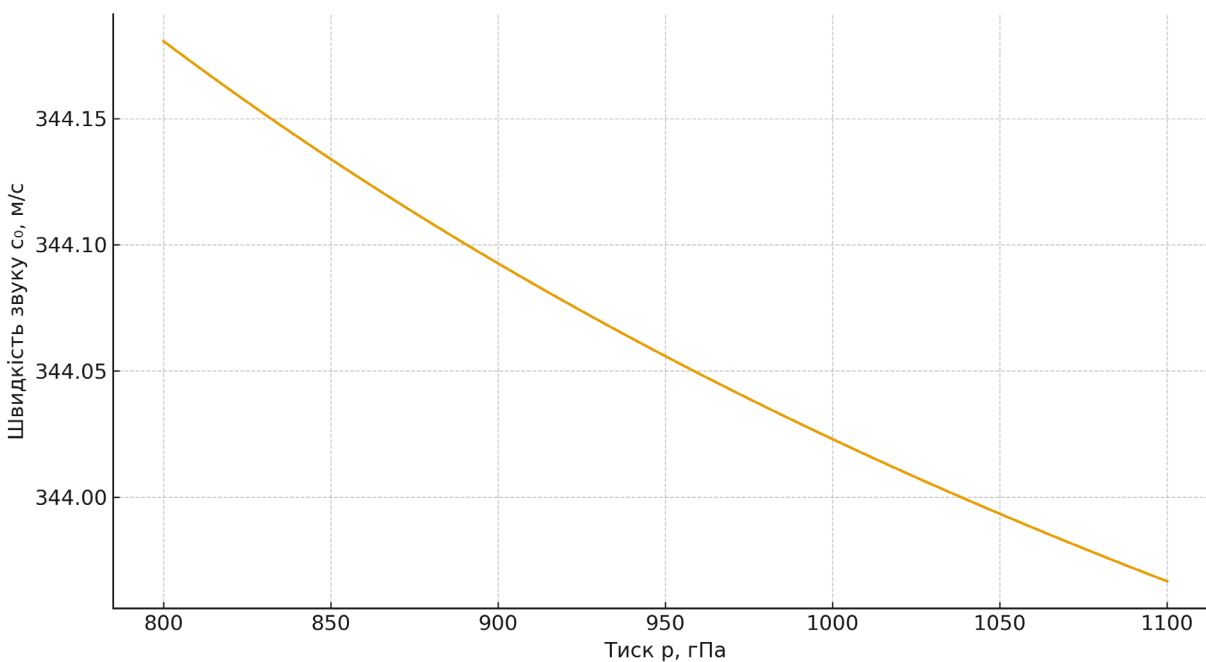


Рисунок 2.8 - Вплив статичного тиску $c_0(p)$ за фіксованих T , RH і CO_2

На рисунку 2.9 доцільно показати залежність $c_0(CO_2)$ (за фіксованих T , RH, p). Зростання концентрації CO_2 змінює ефективну молярну масу газової суміші й, відповідно, масштаб перетворення $ToF \rightarrow$ відстань. Хоча вплив CO_2 зазвичай менший, ніж температурний, у закритих приміщеннях (лабораторія/аудиторія) CO_2 може змінюватися суттєво, і тоді його облік стає виправданим елементом «адаптивної» компенсації.

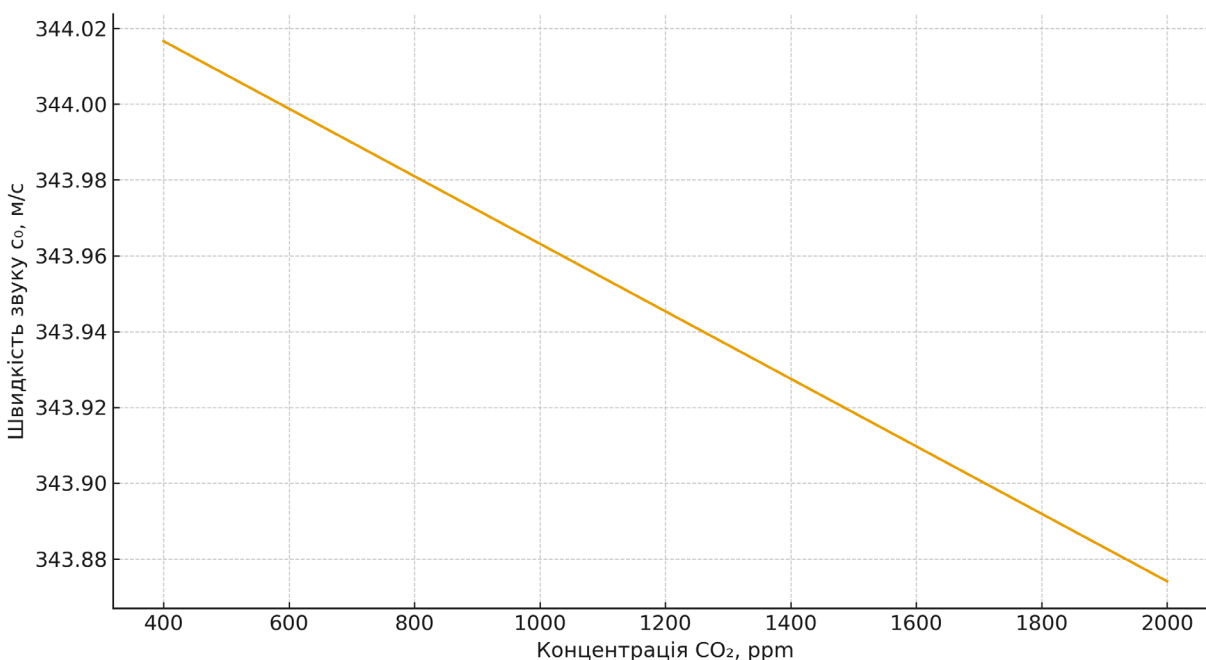


Рисунок 2.9 - Залежність $c_0(CO_2)$ за фіксованих T , RH , p .

Після обґрунтування фізичного механізму переходять до демонстрації того, як саме компенсація впливає на результати дистанціювання. На рисунку 2.10 ми порівнюємо: (1) “сирі” оцінки відстані без компенсації (з фіксованим c_{ref} , наприклад 343 м/с), (2) “сирі” оцінки після компенсації за Крамером $c_k = c(T_k, RH_k, p_k, CO_{2,k})$, (3) фінальну оцінку $\hat{d}_k$ після фільтра Калмана. Такий графік зазвичай демонструє два ефекти: компенсація прибирає повільний дрейф (масштабну помилку), а фільтр Калмана прибирає високочастотний шум і частково пригнічує одиничні “стрибки”.

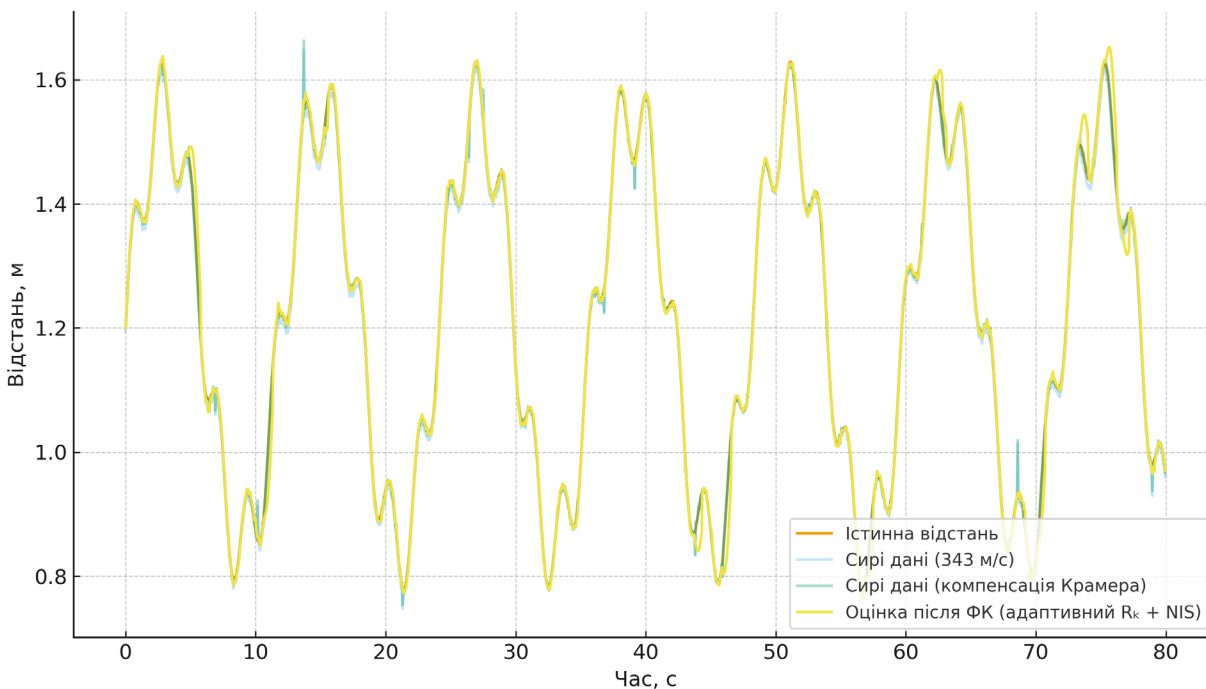


Рисунок 2.10 - Порівняння: без компенсації, компенсація Крамера та фільтр Калмана

Далі важливо пояснити, що запропонована адаптивність полягає не лише в перерахунку c_k , а й у зміні довіри до вимірювання. На рисунку 2.11 доцільно зображено складові $\sqrt{R_k}$: внесок від ToF-шуму та внесок від невизначеності середовища (через σ_c і чутливості $\partial c / \partial T$, $\partial c / \partial RH$, $\partial c / \partial p$, $\partial c / \partial CO_2$). Це пояснює поведінку коефіцієнта Калмана: коли $\sqrt{R_k}$ зростає, фільтр автоматично зменшує вагу вимірювань (зменшується K_k), тобто згладжує сильніше; коли $\sqrt{R_k}$ мала — фільтр швидше “довіряє” z_k і краще відстежує динаміку.

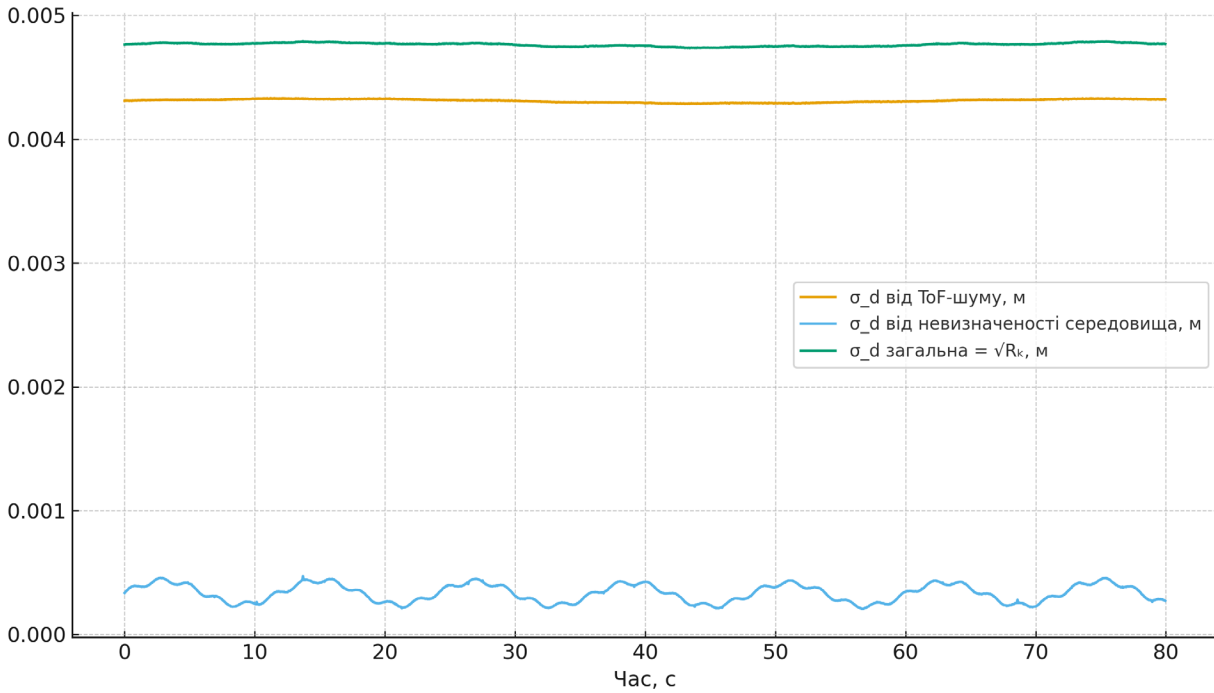


Рисунок 2.11 - Складові адаптивної коваріації вимірювання

Для роботи в реальних умовах необхідно відсікати викиди. На рисунку 2.12 зображено графік критерію

$$NIS_k = \frac{v_k^2}{S_k}, v_k = z_k - H\hat{x}_{k|k-1}, S_k = HP_{k|k-1}H^T + R_k, \quad (2.42)$$

разом із порогом χ^2 для 1 ступеня вільності (наприклад, для рівня 0.99). Піки NIS_k , що перевищують поріг, інтерпретуються як аномальні вимірювання (мульти-ехо/паразитні відбиття), після [31] чого застосовується правило: або пропуск оновлення, або тимчасове збільшення R_k . Це дає пояснення, чому оцінка $\hat{d}_k$ лишається стабільною навіть за наявності разових “зривів” даних.

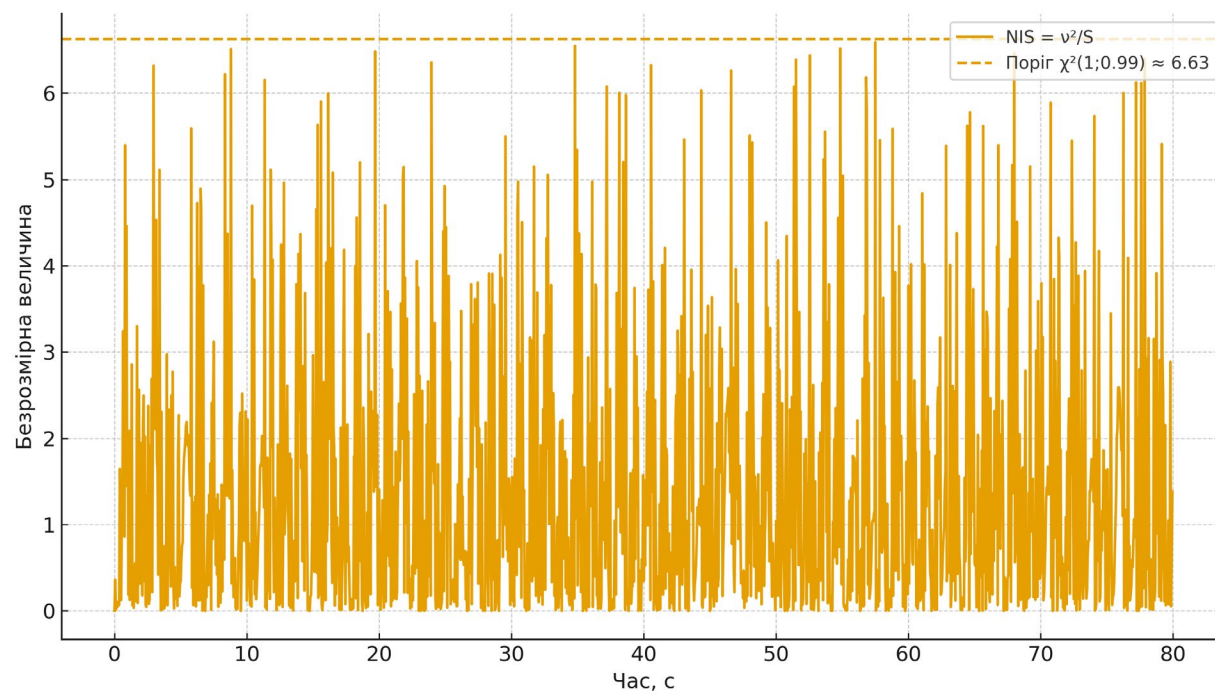


Рисунок 2.12 - Виявлення викидів за NIS-критерієм

Висновки до розділу 2

У другому розділі проведено дослідження методів підвищення завадостійкості ультразвукових вимірювальних систем та оптимізації обробки сигналів у вимірювальному каналі. Розглянуто математичні основи дискретного фільтра Калмана, який дає змогу зменшити вплив випадкових шумів і систематичних похибок при вимірюванні часу проходження ультразвукового імпульсу.

Було обґрунтовано доцільність використання адаптивного підходу, коли дисперсія вимірювання R_k формується динамічно на основі оцінки поточного рівня невизначеності параметрів середовища (температури, вологості, тиску, концентрації CO_2) та стабільності ехо-сигналу. Такий підхід дозволяє фільтру Калмана змінювати ступінь «довіри» до поточних вимірювань залежно від умов, зменшуючи ризик помилкових оновлень при мульти-ехо або викидах. Порівняльний аналіз із традиційними методами фільтрації — ковзним середнім, експоненційним згладжуванням і фільтрами нижніх частот — показав, що фільтр Калмана забезпечує кращий компроміс між точністю, швидкістю та стійкістю до завад.

Також було доведено, що поєднання компенсації швидкості ультразвуку за формулою Крамера з адаптивно-стійкою фільтрацією дозволяє істотно зменшити середньоквадратичну похибку та стабілізувати результати вимірювань у змінному мікрокліматі.

3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

3.1 Опис експериментальної установки

На основі обраних датчиків та обчислювальної платформи була реалізована апаратна частина експериментальної вимірювальної системи. На рисунку 3.1 та 3.2 наведено схему підключення основних елементів: ультразвукового далекоміра, датчиків температури та вологості, а також індикаторного модуля до мікроконтролера.

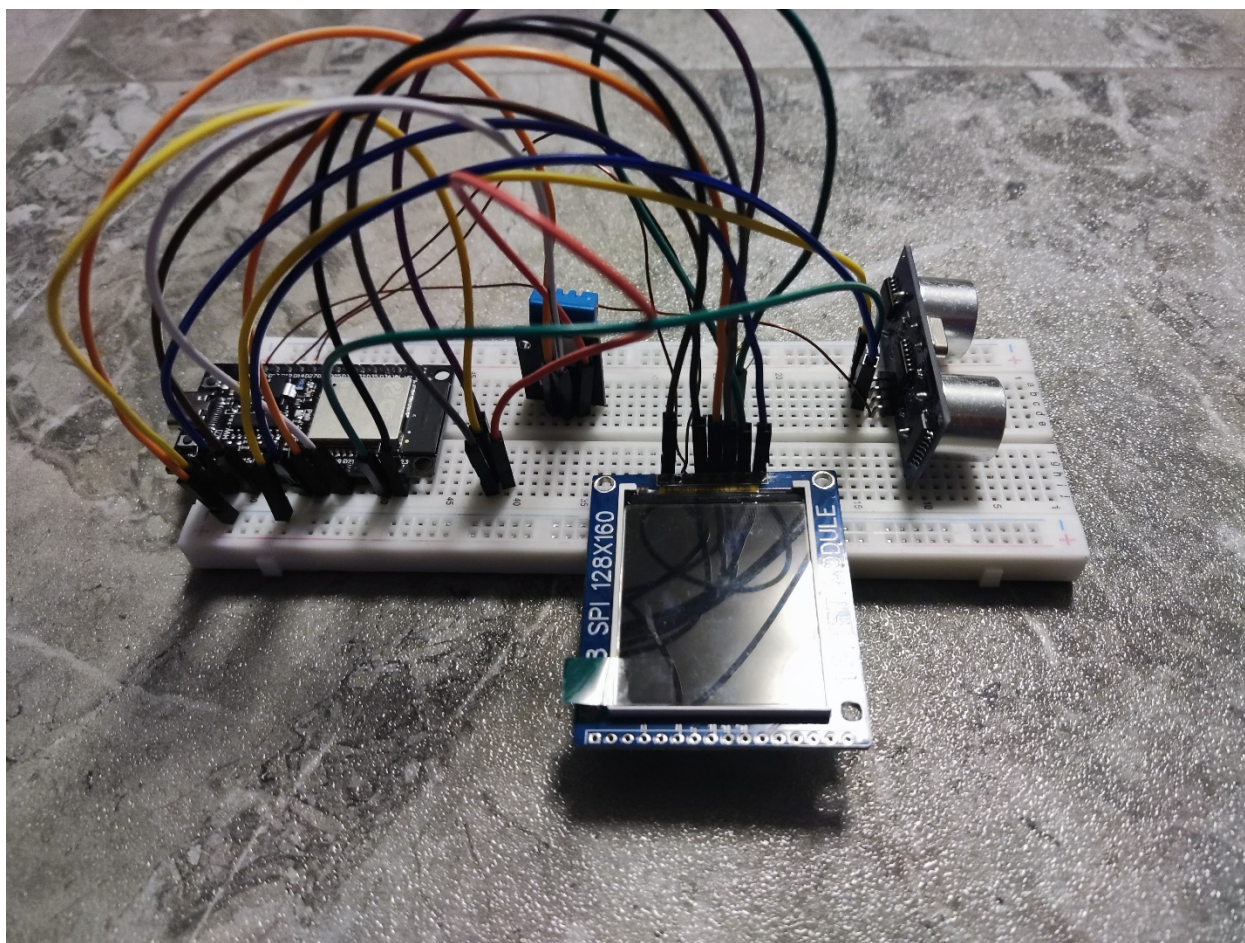


Рисунок 3.1 — Зібраний стенд на ESP32 WROOM

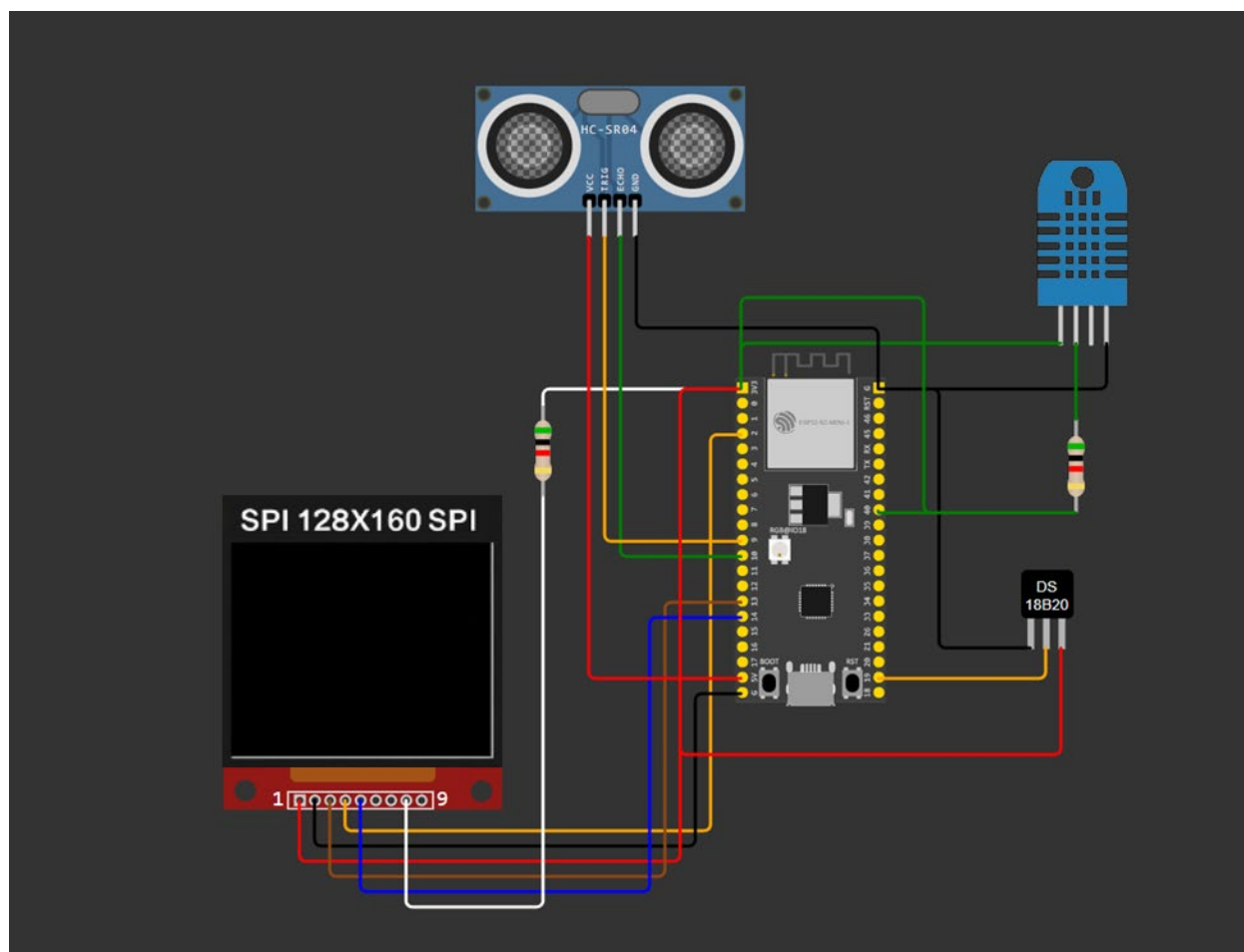


Рисунок 3.2 — Візуальна частина підключення основних елементів

У якості керуючого обчислювального вузла використано плату на базі мікроконтролера ESP32, яка забезпечує:

- формування керуючих сигналів для ультразвукового датчика відстані;
- опитування цифрових датчиків температури та вологості;
- обробку та фільтрацію виміряних даних;
- відображення результатів на графічному дисплеї та, за потреби, передачу даних по інтерфейсу UART / Wi-Fi на ПК.

До ESP32 підключено такі периферійні модулі:

- Ультразвуковий датчик HC-SR04 – здійснює формування ультразвукового імпульсу та прийом ехо-сигналу. Висновок TRIG з'єднано з одним із цифрових GPIO-портів ESP32, який формує керуючий імпульс тривалістю близько 10 мкс. Висновок ECHO підключено до іншого GPIO, що працює в режимі вимірювання тривалості імпульсу. Живлення датчика здійснюється від шини 5 В, загальна «земля» об'єднує всі елементи схеми.
- Датчик температури й вологості DHT11 використовується для оцінки мікроклімату навколишнього середовища. Його цифровий вихід підключений до окремого GPIO мікроконтролера через лінію даних з підтягувальним резистором до шини живлення. Це дозволяє реалізувати однодротовий протокол обміну, визначений виробником, та отримувати миттєві значення температури й відносної вологості повітря.
- Цифровий датчик температури DS18B20 додатково вимірює температуру в точці розміщення ультразвукового датчика або в іншій характерній точці простору. Він підключений до ESP32 за протоколом 1-Wire: сигнальний вивід датчика з'єднаний із GPIO мікроконтролера, на шині даних встановлений підтягувальний резистор. Це дає змогу отримувати більш точну інформацію про температуру повітря поблизу шляху проходження ультразвукової хвилі та використовувати її в алгоритмах температурної компенсації швидкості ультразвуку.
- Графічний TFT-дисплей SPI 128x160 виконує функцію локального індикатора. Він підключений до ESP32 по інтерфейсу SPI (лінії SCK, MOSI, CS, DC та ін.) з окремими лініями живлення та «землею». На дисплеї в реальному часі відображаються виміряна відстань, поточні

значення температури/вологості, а також додаткова службова інформація (статус з'єднання, повідомлення про помилки тощо).

Живлення всієї схеми здійснюється від спільного джерела постійної напруги, при цьому для ESP32 та логічних входів/виходів використовується рівень 3,3 В, а для окремих модулів (зокрема, HC-SR04) – 5 В з урахуванням допустимих рівнів напруги на їхніх входах. Саме ESP32 виступає центральною ланкою, яка об'єднує всі елементи вимірювальної системи в єдиний комплекс: збирає дані від датчиків, виконує попередню обробку (усереднення, фільтрацію, температурну компенсацію) та передає результати далі – на дисплей або в комп'ютерну систему збору даних для подальшого аналізу.

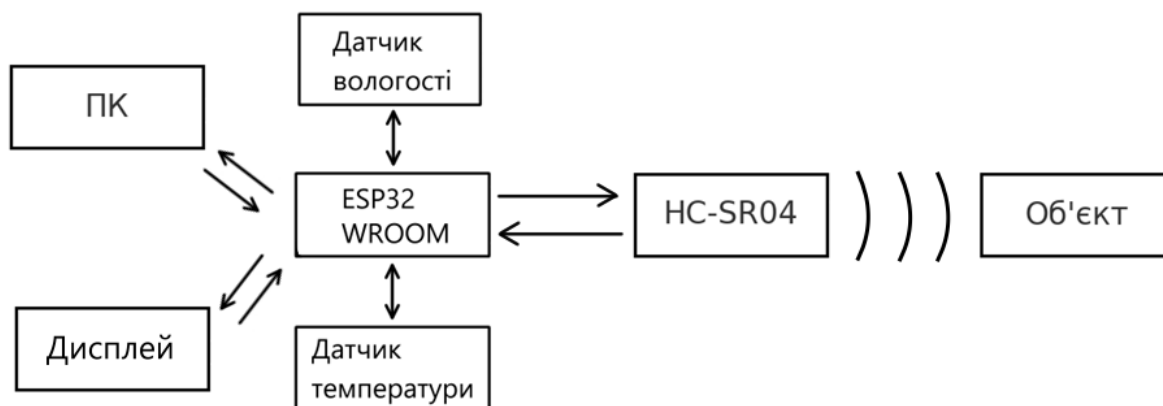


Рисунок 3.3 — Структурна схема підключення основних елементів

На структурній схемі (рисунок 3.3) мікроконтролер керує ультразвуковим датчиком HC-SR04 та одночасно зчитує температуру повітря. Дані оброблює сам мікроконтролер або передаються на ПК для подальшої обробки в середовищі Python або інших середовищах які підтримують роботу з даною мовою. Сам мікроконтролер керується мовою програмування MicroPython, що дозволяє нам, написати всі необхідні алгоритми для роботи з

датчиками. Також був прописаний алгоритми емуляції сенсорів для калібрування самого контролера й перевірки алгоритмів.

3.2 Обґрунтування вибору ультразвукового датчика

Для реалізації експериментальної установки ключовим було обрати такий ультразвуковий датчик, який (1) дає доступ до «сирого» вимірювання часу польоту (ToF), (2) легко інтегрується з ESP32, (3) є масово доступним і відтворюваним у лабораторних умовах, та (4) дозволяє коректно перевірити підхід розділу 2 (адаптивний температурно-вологісний фільтр Калмана з відсіканням викидів).

У якості базового датчика для стенду обрано HC-SR04, оскільки він має простий інтерфейс керування (TRIG/ECHO), що на пряму відповідає задачі вимірювання ToF та дає можливість будувати статистичні моделі шуму вимірювання без «прихованої» внутрішньої фільтрації датчика. Принцип роботи HC-SR04 — формування ультразвукового імпульсу після короткого керуючого сигналу TRIG та видача імпульсу ECHO, тривалість якого відповідає часу проходження сигналу до цілі та назад.

Разом із тим, для коректності інженерного вибору було розглянуто альтернативу — URM37 v5. Цей модуль, на відміну від HC-SR04, підтримує розширені режими обміну даними (зокрема RS232/TTL), може передавати відстань через PWM та містить вбудовані засоби температурної компенсації й додаткові сервісні функції.

Перевагами URM37 v5 є вища стабільність та зручні інтерфейси для прикладної інтеграції, однак у контексті даної роботи це частково «закриває» досліджувану проблему: при наявності внутрішньої компенсації та/або обробки складніше відокремити внесок алгоритму від внеску самого датчика.

Крім того, для частини режимів необхідні інші схеми підключення/узгодження, що підвищує залежність експерименту від конкретної реалізації модуля.

Недоліки обраного HC-SR04:

- підвищена чутливість до умов розповсюдження ультразвуку (температура/вологість/тиск/CO₂), що прямо мотивує використання адаптивної моделі швидкості ультразвуку та адаптивних коваріацій R_k ;
- зростання похибки на великих відстанях і за несприятливої відбивної геометрії (нахили, шорсткість, «м'які» матеріали);
- потреба у стабільному живленні та коректному узгодженні рівнів сигналів під час підключення до ESP32.

Таким чином, HC-SR04 є більш доцільним саме для дослідження алгоритмічної складової (компенсація середовища + Калман + контроль викидів), тоді як URM37 v5 доцільніший у задачах, де пріоритетом є готовий прикладний «блок вимірювання» з сервісними інтерфейсами та вбудованою компенсацією.

3.3 Алгоритм роботи експериментальної установки

Програмне забезпечення експериментальної установки реалізовано у вигляді модульної прошивки MicroPython для мікроконтролера ESP32 та забезпечує два взаємопов'язані режими: KF — робота з реальним ультразвуковим вимірюванням і адаптивною фільтрацією, та EMU — керована емуляція параметрів середовища (і, за потреби, відстані) для відтворюваних експериментів без залежності від реальних сенсорів. Структурно програма складається з модулів ініціалізації та індикації, роботи з ультразвуковим сенсором (hcsr04.py), розрахунку акустичних параметрів

середовища (Додаток В), реалізації фільтра Калмана для стану $[d, v]^T$ (Додаток Г), обробки команд емуляції (Додаток Г) та керування сценаріями запуску (Додаток А), що відповідає загальній логіці, обґрунтованій у розділі 2.

У режимі KF реалізовано повний цикл вимірювання відстані за часом польоту ультразвукового імпульсу (ToF), компенсацію швидкості ультразвуку за параметрами середовища та адаптивну фільтрацію результатів. Після подачі живлення мікроконтролер виконує сценарій запуску, у межах якого ініціалізує дисплей ST7735, відображає стартовий екран та переходить до основного циклу вимірювання. На кожній ітерації циклу виконується послідовність дій.

По-перше, формується ультразвуковий запит до датчика: на виводі TRIG генерується імпульс заданої тривалості, після чого вимірюється тривалість високого рівня на виводі ЕСНО, що відповідає часу польоту t_k . У випадку відсутності коректного ЕСНО (тайм-аут, обрив, некоректне живлення) програма фіксує помилку, повідомляє про це на дисплеї та переходить до наступної ітерації без оновлення оцінок фільтра.

По-друге, час проходження перетворюється у секунди та разом із поточними параметрами середовища $\{T_k, RH_k, p_k, CO_{2,k}\}$ використовується для розрахунку швидкості ультразвуку c_k . Обчислення c_k виконується за апроксимацією Крамера, де враховано температурну складову, вплив вологості через мольну частку водяної пари та поправки, пов'язані з тиском і вмістом CO_2 . Таким чином забезпечується перехід від “геометричного” ToF-вимірювання до фізично коректної інтерпретації в умовах змінного середовища.

По-третє, формується вимірювання відстані z_k як спостереження для фільтра:

$$z_k = \frac{c_k t_k}{2}, \quad (3.1)$$

де множник $1/2$ враховує двонапрямний шлях ультразвуку (до об'єкта та назад). Це значення є “сирим” виміром, на який впливають як шум ToF, так і похибка визначення c_k .

По-четверте, на кожному такті адаптивно оцінюється дисперсія вимірювання R_k . На відміну від фіксованого R , у цій роботі використовується змінна оцінка, що враховує дві основні складові невизначеності: (i) джитер/шум ToF та (ii) невизначеність швидкості ультразвуку через похибки $\{T, RH, p, CO_2\}$. У програмі ці внески об'єднуються за правилом поширення похибок у наближеному вигляді:

$$R_k \approx \left(\frac{c_k}{2}\right)^2 \sigma_t^2 + \left(\frac{t_k}{2}\right)^2 \sigma_c^2 + \sigma_{\text{misc}}^2, \quad (3.2)$$

де σ_t — СКВ шуму вимірювання часу, σ_c — СКВ оцінки c_k , а σ_{misc} описує додаткові дрібні фактори (квантування, нестабільності фронтів, локальні акустичні перешкоди). У програмній реалізації σ_c визначається чисельно на основі локальних чутливостей $c(T, RH, p, CO_2)$ (через малі прирости аргументів), що дозволяє автоматично підлаштовувати довіру до вимірювання залежно від поточного стану середовища.

По-п'яте, виконується крок фільтра Калмана для двовимірного стану

$$\mathbf{x}_k = \begin{bmatrix} d_k \\ v_k \end{bmatrix}, \quad (3.3)$$

де d_k — відстань, v_k — швидкість її зміни. Прогноз стану формується за моделлю рівномірного руху з дискретизацією Δt :

$$\mathbf{x}_{k|k-1} = F \mathbf{x}_{k-1|k-1}, F = \begin{bmatrix} 1 & \Delta t \\ 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (3.4)$$

Коваріація прогнозу $P_{k|k-1}$ обчислюється з урахуванням матриці процесного шуму Q , сформованої через параметр σ_a (еквівалент “шуму прискорення”), що відповідає можливим неврахованим змінам руху або перешкодам. Далі формується інновація $v_k = z_k - \hat{d}_{k|k-1}$ та дисперсія інновації $S_k = P_{00} + R_k$, після чого оцінюється показник узгодженості вимірювання (NIS):

$$NIS_k = \frac{v_k^2}{S_k}. \quad (3.5)$$

Якщо NIS_k перевищує заданий поріг (на практиці — поріг χ^2 для одного ступеня свободи), вимірювання інтерпретується як потенційний викид (мульти-ехо, паразитне відбиття, «зрив» фронту). У цьому випадку програма не “відкидає” вимірювання повністю, а застосовує м’яку стійкість — тимчасово збільшує R_k кілька разів, зменшуючи коефіцієнт Калмана і, відповідно, вплив аномального вимірювання на фінальну оцінку $\hat{d}_k$. Після цього виконується стандартне коригування фільтра з отриманням оцінок $\hat{d}_k$ та $\hat{v}_k$.

По-шосте, результати відображаються на дисплеї: “сире” значення z_k , оцінка відстані $\hat{d}_k$, оцінка швидкості $\hat{v}_k$, розрахована швидкість ультразвуку c_k , параметри середовища та показник NIS_k . Додатково формується рядок телеметрії в консоль у форматі CSV, що дозволяє збирати дані на ПК для побудови графіків і подальшого аналізу точності та збіжності.

Таким чином у режимі KF забезпечується замкнений цикл “вимірювання → компенсація середовища → оцінка довіри → стійка фільтрація → індикація/логування”.

Режим EMU призначений для відтворюваного експерименту та налагодження алгоритмів без залежності від реальних датчиків мікроклімату (а за потреби

— і без самого ультразвукового сенсора). Після запуску мікроконтролер визначає активний режим (або за станом входу, або за умовою “завжди EMU”) та переходить у діалог взаємодії через консоль REPL/USB-UART. На дисплеї відображається індикатор активного режиму та підказка формату введення.

Користувач у консоль задає значення температури T , відносної вологості RH, тиску p , концентрації CO_2 (у повній емуляції) відстані D . Команда може задаватися як позиційно (наприклад, set 22 45 101325 600 1.20), так і у вигляді “ключ=значення” рисунок 3.4. Програма інтерпретує введення, валідовує значення та зберігає їх як поточний стан середовища для наступного циклу моделювання. Після цього запускається обчислювальний цикл [32].

```
MPY: soft reboot

=== EMU MODE (FULL) ===
Format: set T RH P CO2 D
Example: set 22 45 101325 600 1.20
Or: T=22 RH=45 P=101325 CO2=600 D=1.20
help, q

env>
Exit EMU.

=== EMU MODE (FULL) ===
Format: set T RH P CO2 D
Example: set 22 45 101325 600 1.20
Or: T=22 RH=45 P=101325 CO2=600 D=1.20
help, q

env> T=22 RH=45 P=101325 CO2=600 D=1.20
OK: T=22.00 RH=45.00 P=101325 CO2=600 D=1.200
Running... Ctrl+C to change env
```

Рисунок 3.4 — Задані значення через консоль для EMU

На кожній ітерації циклу програма, по-перше, зчитує поточні “емуляційні” значення $\{T, RH, p, CO_2\}$ та задану відстань D . По-друге, обчислює швидкість ультразвуку $c(T, RH, p, CO_2)$ за Крамером (тобто в точності тим самим

методом, що й у KF-режимі). По-третє, формує вимірювання z_k . У повній емуляції приймається, що $z_k = D$, тобто вимірювання дорівнює заданій оператором “істинній” відстані. Щоб зберегти коректність адаптивного R_k , додатково визначається еквівалентний час проходження

$$t_k^{(eq)} = \frac{2D}{c_k}, \quad (3.6)$$

який використовується лише для оцінки внеску σ_c у R_k (через член $(\frac{t}{2})^2 \sigma_c^2$). Далі R_k обчислюється тим самим способом, що й у KF-режимі, а потім виконується крок фільтра Калмана: прогноз $\rightarrow$ інновація $\rightarrow$ розрахунок NIS $\rightarrow$ стійкість (за потреби) $\rightarrow$ корекція. На виході отримуються оцінки $\hat{d}_k$ і $\hat{v}_k$, які відображаються на дисплеї паралельно з поточними параметрами середовища, c_k , R_k та NIS_k .

Перевагою режиму EMU є можливість керування зміною параметри середовища та відстань, спостерігаючи реакцію адаптивного фільтра в однакових умовах між різними серіями експериментів. Зміна параметрів виконується оператором шляхом зупинки циклу комбінацією клавіш (наприклад, Ctrl+C), введення нових значень у консоль та повторного запуску циклу. Це дозволяє проводити серії тестів на збіжність, стійкість до викидів або чутливість до $\{T, RH, p, CO_2\}$ без додаткових апаратних засобів.



Рисунок 3.5 — Емуляція вимірювання

У підсумку, обидва режими реалізують єдину концепцію обробки: середовище визначає c_k , далі формується спостереження z_k , оцінюється адаптивне R_k , після чого застосовується стійкий фільтр Калмана для оцінювання відстані та її динаміки. Різниця між режимами полягає лише в походженні z_k : у KF — з реального ToF, у EMU — з керованого введення, що робить режим емуляції зручним інструментом калібрування та валідації алгоритму. (Додаток А).

3.4 Експериментальні дослідження, обчислення похибок та візуалізація результатів

У цьому підрозділі виконується обробка експериментальних даних, оцінювання похибок вимірювання відстані та побудова графіків, що демонструють переваги запропонованого підходу (компенсація швидкості ультразвуку за T – RH – p – CO_2 + адаптивна матриця R_k + стійкість за NIS + оцінювання стану $[d, v]^T$ фільтром Калмана) порівняно зі «звичайним» методом вимірювання.

Для аналізу використовуються часові ряди, що формуються програмою установки та записуються у вигляді телеметрії (CSV-лог у консоль ПК). Мінімальний набір полів для одного такту k :

$$t_k, z_k, \hat{d}_k, \hat{v}_k, c_k, T_k, RH_k, p_k, CO_{2,k}, R_k, NIS_k. \quad (3.7)$$

Експеримент доцільно проводити у кількох типових сценаріях:

- S1 (статичні відстані): фіксований об'єкт на декількох відстанях (наприклад 0.5 / 1.0 / 1.5 м), збір даних упродовж 1–3 хв.
- S2 (зміна середовища): фіксований об'єкт, але істотно змінюються T, RH, p, CO_2 (реально або в режимі EMU), щоб показати вплив компенсації c_k .
- S3 (динаміка): об'єкт плавно переміщується (приближення/віддалення), щоб оцінити якість відстеження та оцінку швидкості $\hat{v}_k$.
- S4 (викиди/перешкоди): навмисно створюються умови багатопроменевості або короточасні збої (наприклад, сторонній предмет у зоні виміру), щоб перевірити стійкість (NIS).

Як еталонну відстань d_{ref} у сценаріях S1–S2 доцільно задавати рулеткою/лінійкою або механічним упором. У режимі EMU еталоном природно виступає введене значення D .

Щоб коректно показати перевагу, бажано порівнювати щонайменше 2 підходи:

(А) Звичайний метод (базова лінія):

- швидкість ультразвуку приймається сталою $c_0 = 343$ м/с (або коригується тільки за зміною температури повітря);
- відстань обчислюється як

$$d_k^{(A)} = \frac{c_0 t_k}{2}; \quad (3.8)$$

- додатково може застосовуватись просте згладжування: ковзне середнє / медіана / ЕМА (без адаптації до середовища і без NIS).

(В) Модифікований метод:

- швидкість ультразвуку обчислюється як $c_k = c(T_k, RH_k, p_k, CO_{2,k})$ (Крамер);
- вимірювання: $z_k = \frac{c_k t_k}{2}$;
- адаптивна дисперсія вимірювання R_k формується з урахуванням невизначеності t_k та c_k ;
- стійкість: при великому NIS_k ефективне R_k збільшується, зменшуючи вплив викиду;

- оцінюються $\hat{d}_k$ та $\hat{v}_k$ фільтром Калмана з моделлю $[d, v]^T$.

Саме різниця між (А) та (В) на графіках і метриках і є демонстрацією науково-практичного внеску: адаптація до середовища + адаптивна довіра до вимірювання + стійкість.

Для кожного такту k визначається абсолютна і відносна похибка оцінки відстані:

$$e_k = \hat{d}_k - d_{\text{ref}}, \delta_k = \frac{e_k}{d_{\text{ref}}} \cdot 100\%. \quad (3.9)$$

Для порівняння алгоритмів (А) та (В) по вибірці з N тактів обчислюються:

- середня похибка (зміщення):

$$\text{Bias} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N e_k; \quad (3.10)$$

- MAE (середня абсолютна похибка):

$$\text{MAE} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N |e_k|; \quad (3.11)$$

- RMSE (середньоквадратична похибка):

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N e_k^2}; \quad (3.12)$$

- стандартне відхилення похибки (стабільність):

$$\sigma_e = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{k=1}^N (e_k - \bar{e})^2}. \quad (3.13)$$

Для формалізації “виграшу” запропонованого підходу відносно базового вводиться показник поліпшення, наприклад за RMSE:

$$G_{\text{RMSE}} = \frac{\text{RMSE}_A - \text{RMSE}_B}{\text{RMSE}_A} \cdot 100\%. \quad (3.14)$$

Окремо для аналізу стійкості доцільно оцінювати частку викидів:

$$\eta = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \mathbf{1}\{NIS_k > \gamma\}, \quad (3.15)$$

де γ — поріг (з практики — поріг χ^2 для 1 ступеня свободи). Менший вплив викидів у методі (B) проявляється як менші “сплески” e_k та кращі MAE/RMSE при однакових умовах.

3.5 Побудова графіків і демонстрація переваг запропонованого алгоритму

Візуалізація експерименту виконується з українськими підписами осей та легендою. Нижче наведено рекомендований набір рисунків (нумерацію можна узгодити з фактичною структурою диплома).

На рисунку 3.4 зображено часові ряди відстані для сценарію S1/S2:

- “Сире вимірювання” z_k ;
- “Звичайний метод” $d_k^{(A)}$ (зі сталою c_0 , за потреби зі згладжуванням);

- “Запропонований метод” $\hat{d}_k$.

Очікуваний ефект: у методі (В) помітно менші коливання, стабільніша оцінка та відсутність довготривалого дрейфу при зміні середовища.

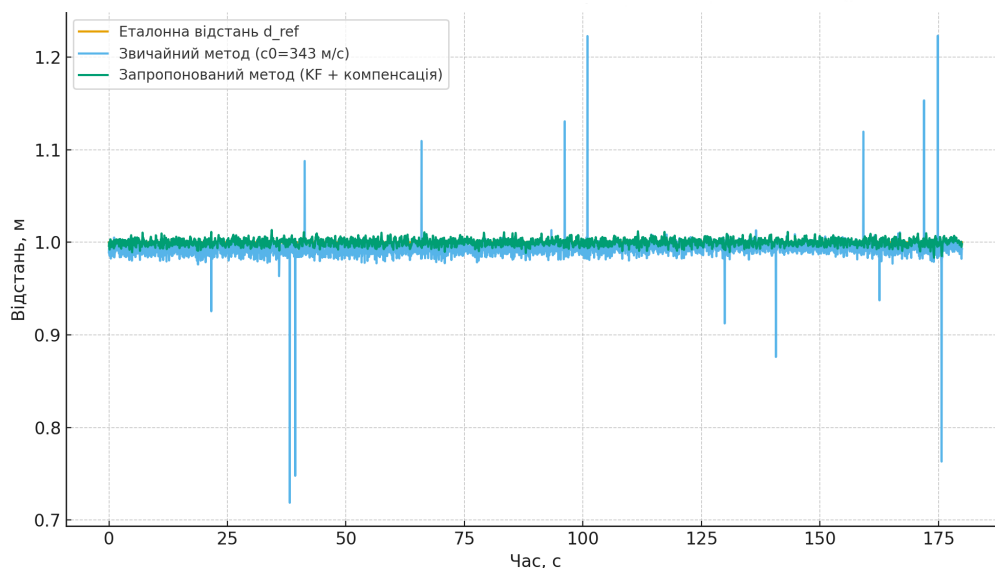


Рисунок 3.4 – Порівняння оцінок відстані

На рисунку 3.5 зображено графік похибки e_k у часі для методів (А) і (В) відносно d_{ref} . Саме цей графік найнаочніше демонструє виграш: для (В) амплітуда помилок менша, а у випадках викидів спостерігаються коротші та нижчі “піки” завдяки NIS-стійкості.

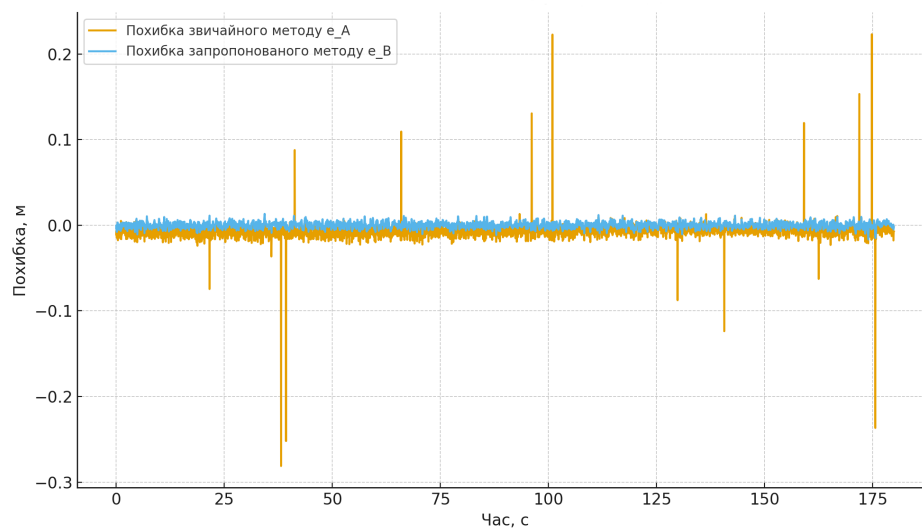


Рисунок 3.5 - Похибка у часі

На рисунку 3.6 зображено NIS_k у часі та позначення моменти, коли $NIS_k > \gamma$.

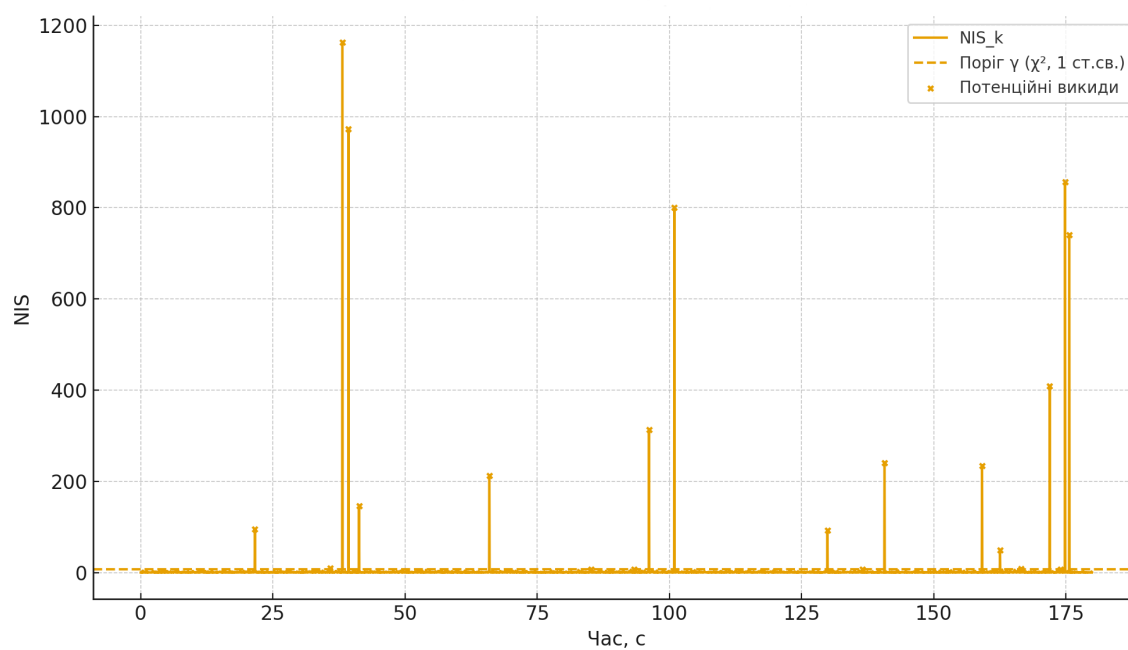


Рисунок 3.6 - Показник NIS та виявлення викидів

На рисунку 3.7 зображено залежність швидкості ультразвуку c_k від параметрів середовища: графік $c_k(t)$ разом із $T(t), RH(t)$ (а також $p(t), CO_2(t)$ — за наявності).

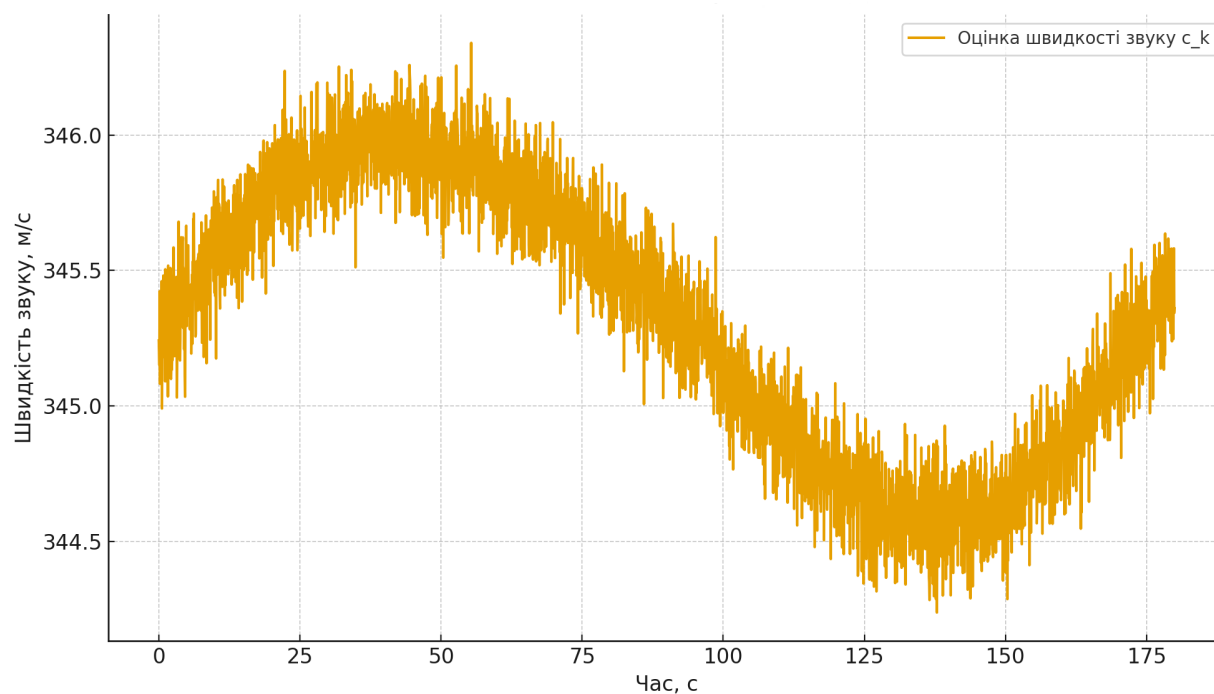


Рисунок 3.7 - Зміна швидкості ультразвуку c_k

На рисунку 3.8 зображено $\hat{v}_k$ у часі. Це демонструє додатковий функціонал методу (B), якого немає у простому розрахунку відстані.

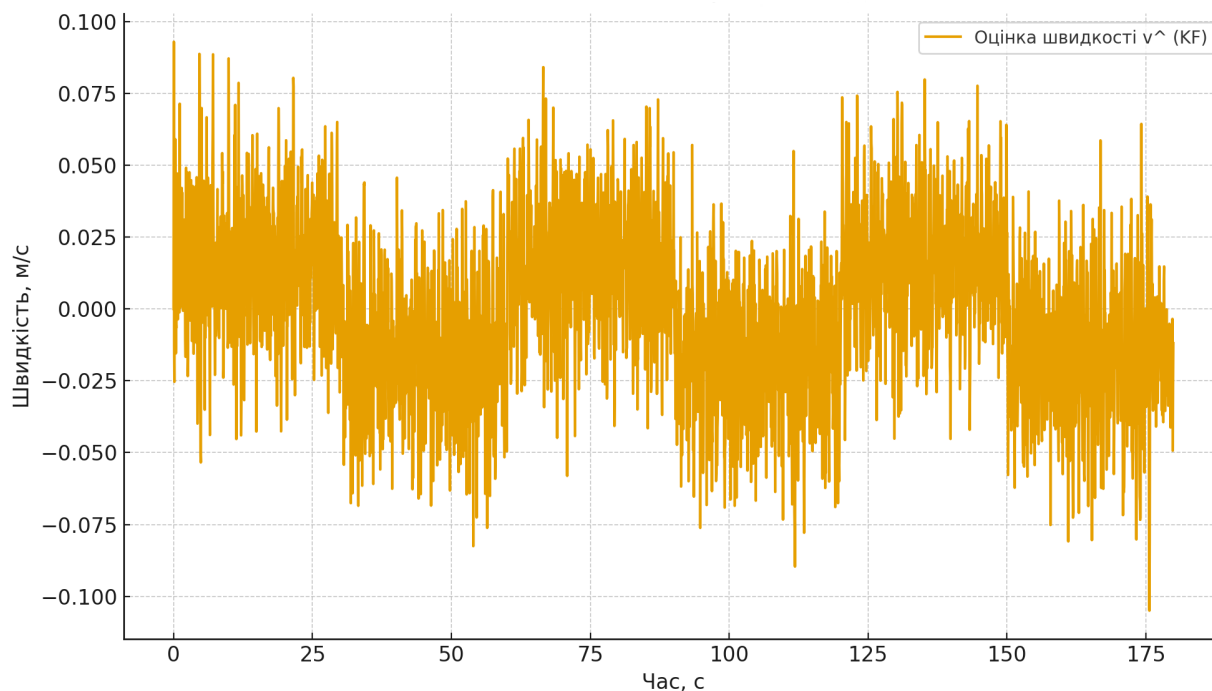


Рисунок 3.8 - Оцінка швидкості зміни відстані

3.6 Теоретичне та експериментальне визначення похибки вимірювання відстані

Похибку вимірювання відстані в ультразвуковому каналі доцільно визначати як різницю між оціненою відстанню $\hat{d}$ та еталонною (істинною) відстанню d_0 , виміряною незалежним способом (наприклад, рулеткою або лазерним дальноміром):

$$e = \hat{d} - d_0, \delta = \frac{\hat{d} - d_0}{d_0} \cdot 100\%, \quad (3.16)$$

де e — абсолютна похибка (м), δ — відносна похибка (%). Для ультразвукового вимірювання на основі часу проходження імпульсу використовується залежність

$$\hat{d} = \frac{c t}{2}, \quad (3.17)$$

де t — оцінений час проходження (ToF), c — швидкість звуку в повітрі. У реальних умовах і t , і c визначаються з похибками, а отже похибка $\hat{d}$ формується як результат сумарного впливу похибки часу Δt та похибки швидкості звуку Δc . Для малих відхилень лінеаризоване співвідношення для абсолютної похибки відстані можна записати у вигляді диференціала:

$$\Delta d \approx \frac{\partial d}{\partial t} \Delta t + \frac{\partial d}{\partial c} \Delta c = \frac{c}{2} \Delta t + \frac{t}{2} \Delta c. \quad (3.18)$$

Оскільки $t = \frac{2d}{c}$, другий доданок можна переписати як $\frac{t}{2} \Delta c = \frac{d}{c} \Delta c$. Тоді зручно бачити фізичний зміст: перша складова пов'язана з точністю вимірювання часу, а друга — із коректністю моделі швидкості звуку. Для відносної похибки отримуємо наближений вираз:

$$\frac{\Delta d}{d} \approx \frac{\Delta t}{t} + \frac{\Delta c}{c}. \quad (3.19)$$

Це означає, що навіть ідеально точний вимір часу не гарантує точність відстані, якщо швидкість звуку взята неточно або не враховано зміну параметрів повітряного середовища.

У задачах метрологічного аналізу доцільно переходити від «похибок» до стандартних невизначеностей (стандартних відхилень) і застосувати закон поширення невизначеності. Якщо вважати t і c некорельованими, стандартна невизначеність оцінки відстані визначається як

$$u_d^2 = \left(\frac{\partial d}{\partial t}\right)^2 u_t^2 + \left(\frac{\partial d}{\partial c}\right)^2 u_c^2 = \left(\frac{c}{2}\right)^2 u_t^2 + \left(\frac{t}{2}\right)^2 u_c^2. \quad (3.20)$$

У відносному вигляді це дає зручну інтерпретацію:

$$\left(\frac{u_d}{d}\right)^2 \approx \left(\frac{u_t}{t}\right)^2 + \left(\frac{u_c}{c}\right)^2. \quad (3.21)$$

Ключовою особливістю є те, що c не приймається константою, а визначається як функція параметрів середовища:

$$c = c(T, RH, p, CO_2). \quad (3.22)$$

Тоді невизначеність швидкості звуку u_c формується з невизначеностей вимірювання/задання температури, вологості, тиску й CO_2 . За законом поширення невизначеності:

$$u_c^2 = \left(\frac{\partial c}{\partial T}\right)^2 u_T^2 + \left(\frac{\partial c}{\partial RH}\right)^2 u_{RH}^2 + \left(\frac{\partial c}{\partial p}\right)^2 u_p^2 + \left(\frac{\partial c}{\partial CO_2}\right)^2 u_{CO_2}^2, \quad (3.23)$$

де коефіцієнти чутливості $\frac{\partial c}{\partial(\cdot)}$ доцільно отримувати чисельно (скінченними різницями) без ускладнення аналітичними похідними. Такий підхід дозволяє теоретично оцінити внесок кожного фактора та пояснити, чому компенсація за T, RH, p, CO_2 зменшує систематичну складову похибки відстані, особливо на метрах діапазону вимірювання.

Для представлення результатів у вигляді довірчого інтервалу вводять розширену невизначеність:

$$U = k u_d, \quad (3.24)$$

де зазвичай $k \approx 2$ відповідає рівню довіри близько 95%. У контексті вимоги до основної відносної похибки (наприклад, не більше $\pm 3,5\%$) цей апарат дозволяє коректно аргументувати, чи виконує система вимоги з заданою довірчою ймовірністю.

Експериментальне визначення похибки виконується шляхом порівняння результатів ультразвукового вимірювання з еталонними значеннями відстані $d_{0,j}$, заданими або виміряними незалежним засобом (рулетка, штангенрейсмас, лазерний дальномір). Для кожного контрольного значення відстані $d_{0,j}$ реєструють послідовність вимірювань $\hat{d}_{j,1}, \hat{d}_{j,2}, \dots, \hat{d}_{j,N}$. Далі обчислюють середнє значення та оцінюють випадкову складову розкиду:

$$\bar{d}_j = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \hat{d}_{j,i}, s_j = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\hat{d}_{j,i} - \bar{d}_j)^2}. \quad (3.25)$$

Систематичну складову (зміщення) на цій відстані задає різниця між середнім та еталоном:

$$b_j = \bar{d}_j - d_{0,j}. \quad (3.26)$$

Величина b_j характеризує систематичну похибку конкретного режиму обробки. Саме тут добре проявляється користь компенсації швидкості звуку: без компенсації b_j змінюється разом із температурою/вологістю, тоді як при використанні $c(T, RH, p, CO_2)$ зміщення зменшується.

Для оцінювання випадкової складової, що зменшується зі збільшенням кількості вимірювань, обчислюють стандартну невизначеність типу А:

$$u_{A,j} = \frac{s_j}{\sqrt{N}}. \quad (3.27)$$

До неї додають невизначеність типу В, пов'язану з еталонним засобом та методикою встановлення відстані, а також з квантуванням часу/відстані у вимірювальному тракті. Об'єднана стандартна невизначеність:

$$u_{c,j} = \sqrt{u_{A,j}^2 + u_{B,j}^2}, \quad (3.28)$$

а розширена невизначеність для інтервального подання:

$$U_j = k u_{c,j}. \quad (3.29)$$

На практиці під час порівняння алгоритмів зручніше доповнювати метрологічні оцінки статистичними метриками якості для часових рядів. Для послідовності похибок $e_i = \hat{d}_i - d_{0,i}$ використовують MAE та RMSE:

$$\text{MAE} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |e_i|, \text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N e_i^2}. \quad (3.30)$$

MAE показує середню абсолютну помилку і менш чутлива до поодиноких викидів, тоді як RMSE сильніше «штрафує» великі відхилення, тому добре відображає завадостійкість і вплив мульти-ехо. У роботі доцільно порівнювати щонайменше три режими: вимірювання без компенсації та без фільтрації, вимірювання з компенсацією швидкості звуку та вимірювання з компенсацією і фільтром Калмана. У такому порівнянні компенсація переважно зменшує систематичну складову похибки (зміщення b), тоді як фільтрація знижує розкид і величину RMSE за рахунок придушення шумів та викидів: у режимі «компенсація + адаптивно-стійкий фільтр Калмана» середнє значення RMSE становить близько 0,4% (типовий діапазон 0,23–0,70%), тоді як без компенсації RMSE в середньому було близько 1,3%. Це наочно підтверджують графіки часових залежностей відстані та похибки, а також діаграми розподілу похибок.

Висновок до розділу 3

У третьому розділі було побудовано та досліджено стенду на базі мікроконтролера ESP32, ультразвукового датчика HC-SR04 та цифрових сенсорів температури і вологості. Створена апаратна платформа дала можливість отримати «сирі» дані часу польоту ультразвукової хвилі, цифрові значення мікрокліматичних параметрів та здійснювати їх подальшу цифрову обробку в реальному часі.

Ретельний опис структурної схеми, способу підключення та принципів взаємодії між компонентами підтвердив правильність вибору саме цієї конфігурації, оскільки вона забезпечує простоту інтеграції, низьку собівартість та високу повторюваність експериментів. Додаткове застосування двох температурних сенсорів дозволило отримати більш точну й локалізовану інформацію щодо температурних умов поблизу тракту поширення ультразвуку, що є критично важливим для коректної температурної компенсації швидкості ультразвуку.

Побудований стенд довів свою ефективність для подальших досліджень, а отримані вимірювання стали базою для аналізу впливу метеорологічних факторів та для перевірки роботи адаптивного фільтра Калмана, розробленого у попередньому розділі.

4 РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЕКТУ «ОПТИМІЗАЦІЯ ОБРОБКИ СИГНАЛІВ БЕЗКОНТАКТНОГО АКУСТИЧНОГО ВИМІРЮВАЧА ВІДСТАНІ»

4.1 Опис та технологічний аудит ідеї стартап-проєкту

Стартап-проєкт ґрунтується на результатах магістерської роботи з теми «Оптимізація обробки сигналів безконтактного акустичного вимірювача відстані», у якій було досліджено вплив температури, вологості, характеристик відбивальної поверхні та шумів вимірювального тракту на точність ультразвукових вимірювань, а також розроблено алгоритми цифрової фільтрації та компенсації похибок на базі мікроконтролера ESP32.

Ідея стартапу полягає у створенні серії інтелектуальних безконтактних акустичних датчиків відстані, орієнтованих на застосування в системах промислової автоматизації, робототехніці, будівельних та інфраструктурних проєктах, а також у складі IoT-рішень. Ключова відмінність продукту від існуючих аналогів – покращена цифрова обробка сигналів, що забезпечує вищу точність та завадостійкість у складних умовах експлуатації (пил, шум, перепади температури), а також гнучкі цифрові інтерфейси та можливість інтеграції в хмарну аналітику.

Таблиця 4.1 – Опис стартап-продукту «Безконтактний акустичний вимірювач відстані»

№ з/п	Параметр	Зміст
1	Назва продукту	Безконтактний акустичний (ультразвуковий) датчик вимірювання відстані

№ з/п	Параметр	Зміст
2	Тип продукту	Технічний прилад / смарт-сенсор / IoT-сумісний вимірювальний модуль
3	Основна функція	Точне безконтактне вимірювання відстані в повітрі з цифровою компенсацією похибок
4	Цінність для клієнта	Підвищення точності, надійності та швидкодії вимірювань; зменшення простоїв обладнання; підвищення безпеки
5	Цільові користувачі	Виробники промислового та робототехнічного обладнання, будівельні компанії, аграрні підприємства, наукові лабораторії
6	Технологічна основа	Ультразвукові перетворювачі 40 кГц, мікроконтролер ESP32, інтерфейси UART/I ² C, датчики температури/вологості, алгоритми фільтра Калмана та цифрової фільтрації
7	Інноваційність	Поєднання температурно-вологісної компенсації та оптимізованих алгоритмів обробки сигналів; IoT-інтеграція; можливість віддаленого моніторингу та оновлення ПЗ

Узагальнюючи, стартап-продукт спрямований на нішу професійних B2B-рішень, де ключовими критеріями вибору є точність, надійність, простота інтеграції в існуючу електроніку та відповідність вимогам галузевих

стандартів. За рахунок програмної оптимізації вимірювального каналу та розширених цифрових інтерфейсів продукт може використовуватися як у вигляді окремого датчика, так і як елемент складніших кіберфізичних систем.

Технологічний аудит ідеї

Технологічний аудит стартап-проекту базується на аналізі існуючих технічних рішень (URM37 v5, HC-SR04 та інші ультразвукові сенсори), а також на врахуванні обмежень, пов'язаних із швидкістю ультразвуку, загасанням ультразвукових хвиль, характеристиками відбивальних поверхонь та впливом умов навколишнього середовища.

У межах роботи було продемонстровано можливість підвищення точності вимірювання відстані шляхом використання температурного сенсора, корекції швидкості ультразвуку за температурою й вологістю, а також впровадження адаптивних методів цифрової фільтрації та оцінювання відстані на основі статистичних алгоритмів (зокрема, фільтра Калмана).

З огляду на це запропонована базова конфігурація продукту, наведена в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Технічний опис стартап-продукту

№ з/п	Характеристика	Значення
1	Діапазон вимірювання	0,02–4,0 м (базова версія); модифікації до 6–8 м
2	Точність вимірювання	до $\pm 0,1$ см у робочому діапазоні за умови корекції температури й вологості

№ з/п	Характеристика	Значення
3	Роздільна здатність	не гірше 1 мм
4	Робоча частота ультразвукового перетворювача	40 кГц
5	Інтерфейси обміну даними	UART, I ² C, опційно RS-485 / Modbus RTU та бездротові інтерфейси (Wi-Fi, BLE)
6	Живлення	3,3–5,5 В постійного струму
7	Робочий температурний діапазон	від –20 до +70 °C
8	Мікроконтролер	ESP32 або еквівалент із вбудованими засобами обробки сигналів і бездротовим зв'язком
9	Вбудовані датчики	Датчик температури та вологості повітря, опційно датчик тиску
10	Алгоритми обробки	Фільтр Калмана, ковзне усереднення, адаптивна фільтрація, температурно- вологісна компенсація
11	Формати даних	Цифровий вихід (числове значення відстані), можливість передачі сирих часових відліків TOF

Проведений аудит підтверджує, що всі ключові компоненти – ультразвукові перетворювачі, мікроконтролери, датчики мікроклімату, програмні стеки – є доступними на ринку й добре відпрацьованими технологічно. Основна додана вартість стартапу формується за рахунок власних алгоритмів обробки сигналів, оптимізації архітектури вимірювального каналу та інтеграції в промислові IoT-системи, що створює потенціал для подання патентних заявок і формування захищеної інтелектуальної власності.

Морфологічний аналіз технічних рішень

Для систематизації можливих технічних конфігурацій було виконано морфологічний аналіз, який дозволив виділити ключові функції майбутнього продукту та альтернативи їх реалізації. Структура морфологічної таблиці відповідає підходу, використаному в прикладі для інформаційно-вимірювальної системи перевірки лічильників.

Таблиця 4.3 – Морфологічна таблиця технічних рішень для стартап-продукту

№	Функція	Варіанти рішень
1	Тип перетворювача	Ультразвуковий 40 кГц; широкосмуговий акустичний перетворювач; комбінований модуль з декількома частотами
2	Мікроконтролер / обчислювальний модуль	ESP32; STM32; спеціалізований DSP-модуль
3	Формування зонduючого сигналу	ШІМ-генерація прямокутних імпульсів; синусоїдальний сигнал; кодовані послідовності (ЧМ/ПСП)

№	Функція	Варіанти рішень
4	Обробка вимірювального сигналу	Просте усереднення; фільтр Калмана; адаптивні фільтри; кореляційний аналіз
5	Компенсація впливу середовища	Лінійна температурна компенсація; температурно-вологісна модель; розширений прогноз за станом повітря
6	Інтерфейси передачі даних	UART/I ² C; RS-485 (Modbus); Wi-Fi/BLE; Ethernet/PoE
7	Інтеграція в IoT	Локальний обмін із ПЛК; MQTT-клієнт; REST-API через шлюз; підключення до хмарної платформи
8	Конструктивне виконання	Циліндричний герметичний корпус IP65; плоский модуль для вбудови в обладнання; модифікація з додатковим екрануванням
9	Підходи до калібрування	Одноточкове калібрування; багатоточкові еталонні відстані; автоматизована калібрувальна процедура з протоколюванням

Аналіз альтернатив показав, що для стартової версії продукту доцільно обрати конфігурацію, яка поєднує ультразвуковий перетворювач 40 кГц, мікроконтролер ESP32, алгоритми фільтра Калмана та температурно-вологісної компенсації, а також UART/I²C та MQTT-інтеграцію для підключення до промислових контролерів і IoT-платформ. Така комбінація

забезпечує баланс між собівартістю, точністю, швидкістю впровадження та масштабованістю рішення на різні галузеві застосування.

Мінімально життєздатний продукт (MVP)

Мінімально життєздатний продукт (MVP) у межах даного стартапу визначається як функціональний модуль безконтактного акустичного датчика, який реалізує повний цикл вимірювання відстані з урахуванням температурно-вологісної компенсації та базових алгоритмів цифрової фільтрації, має стандартні цифрові інтерфейси та може бути інтегрований у дослідні зразки промислового обладнання чи робототехнічних систем.

MVP включає:

- ультразвуковий перетворювач 40 кГц у герметичному корпусі;
- мікроконтролер ESP32 з прошивкою для вимірювання часу проходження, обробки сигналу та компенсації похибок;
- датчик температури й вологості повітря;
- інтерфейси UART та I²C для підключення до контролерів, опційно – Wi-Fi для передачі даних у локальну мережу;
- базовий програмний API та приклади інтеграції для розробників.

Вибір повноцінного MVP із реалізованими алгоритмами оптимізації обробки сигналів є стратегічно доцільним, оскільки цільові сегменти ринку (виробники обладнання, IoT-інтегратори) очікують отримати одразу готовий до вбудови модуль, а не «сирий» датчик, який потребує значних доопрацювань на стороні клієнта. Це скорочує цикл впровадження, підвищує сприйняття ціннісної пропозиції та дозволяє швидше розпочати пілотні проекти з ключовими партнерами.

4.2 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проєкту

Загальна характеристика ринку

Ринок характеризується наявністю 3–5 провідних міжнародних виробників (зокрема MaxBotix, Bosch), значним обсягом продажів та тенденцією зростання завдяки поширенню IoT-рішень і автоматизації виробництв.

Водночас вхід на ринок пов'язаний з вимогами до патентного захисту, сертифікації продукції (ISO 9001, CE, FCC) та дотриманням галузевих стандартів. Середня норма рентабельності в даному сегменті оцінюється на рівні 15 %, що робить ринок привабливим за умови правильно обраної ніші та конкурентної стратегії.

Узагальнені показники стану ринку наведено в таблиці 4.2.1.

Таблиця 4.1 – Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проєкту

№ з/п	Показники стану ринку	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од	5 (провідні виробники, зокрема MaxBotix, Bosch)
2	Загальний обсяг продаж, грн/ум. од.	≈ 120 млн грн/рік на цільових сегментах
3	Динаміка ринку	Зростає (через підвищення попиту на IoT-рішення та автоматизацію)
4	Наявність обмежень для	Патенти на технології, вимоги сертифікації

№ з/п	Показники стану ринку	Характеристика
	входу	ISO, CE, FCC
5	Специфічні вимоги до стандартизації	Відповідність ISO 9001, галузевим стандартам безпеки й електромагнітної сумісності
6	Середня норма рентабельності, %	Близько 15 %

З наведених даних видно, що ринок має стійкий системний попит, пов'язаний із впровадженням автоматизованих систем та смарт-сенсорів, а також достатньо високий рівень конкуренції, який потребує чітко сформованої ціннісної пропозиції та стратегії диференціації.

Сегментація ринку та цільові групи споживачів

У межах вправи з дослідження ринку було проведено сегментацію за географічними, соціально-демографічними та поведінковими критеріями.

Цільовими сегментами визначено:

- IoT-виробники та розробники електроніки;
- будівельні компанії та інтегратори систем безпеки;
- аграрний сектор (контроль рівня заповнення силосів, резервуарів);
- наукові лабораторії та освітні заклади, що потребують доступних сенсорних модулів.

Узагальнені результати сегментації наведено в таблиці 4.2.2.

Таблиця 4.2 – Сегментація цільового ринку стартап-проєкту

Параметр	Зміст параметру
Цільова аудиторія	IoT-виробники, будівельні компанії, аграрний сектор, наукові лабораторії
Географічні критерії	Україна, країни ЄС, США
Соціально-демографічні	Компанії від малого бізнесу до великих корпорацій
Поведінкові критерії	Орієнтація на надійність, точність, можливість інтеграції в існуючі системи
Психологічні критерії	Сприйняття інновацій, екологічність, готовність інвестувати в «розумні» сенсорні технології

Для поглиблення розуміння поведінки споживачів було побудовано таблицю «Що / хто / коли / де / навіщо купує», що наведена нижче.

Таблиця 4.3 – Характеристика поведінки цільових споживачів

Параметр	Зміст
Що хочуть купити	Точний, надійний і відносно недорогий безконтактний акустичний датчик відстані
Хто покупець	Компанії з сектору IoT, будівництва, сільського господарства, наукові лабораторії
Мета купівлі	Автоматизація процесів, зниження витрат, підвищення точності й безпеки

Параметр	Зміст
Коли купують	При розробці нових продуктів, модернізації парку обладнання, впровадженні систем безпеки
Де бажають придбати	Через офіційний сайт виробника, дистриб'юторів, інтернет-магазини техніки
Мета стартапера	Надати інноваційний продукт і сформувати стійку конкурентну перевагу

Отримані результати підтверджують орієнтацію стартапу на B2B-ринок із високим рівнем сприйняття інновацій, що дозволяє застосувати стратегії диференціації та фокусування на технологічно вимогливих сегментах.

Аналіз конкурентного середовища

Конкурентне середовище характеризується поєднанням глобальних виробників ультразвукових датчиків, локальних постачальників електронних модулів і потенційних нових гравців із сфери IoT. На основі заповненої форми аналізу ринку було виділено прямі конкуренти, постачальників, клієнтів і товари-замінники (лазерні датчики відстані).

Таблиця 4.4 – Складові конкурентного середовища стартапу

Складові аналізу	Прямі конкуренти	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
Перелік/ характеристика	MaxBotix, Bosch	Нові IoT-компанії	Локальні виробники електроніки	Малі та середні компанії	Лазерні датчики відстані

Складові аналізу	Прямі конкуренти	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
				B2B	

Ринок має риси олігополії з 3–5 великими гравцями, що формують основні технічні стандарти та рівень цін, водночас для нішевих спеціалізованих рішень з'являються нові IoT-компанії, які прагнуть запропонувати більш гнучкі та інтегровані продукти.

Позиціонування стартап-проекту як «інтелектуального сенсора з оптимізованою обробкою сигналів та IoT-інтеграцією» дозволяє запропонувати ринку продукт із вищою цінністю при конкурентоспроможній ціні, що відповідає обраній стратегії диференціації.

Попит на продукт

У рамках маркетингового плану було здійснено попередню оцінку попиту на продукт, визначено TAM/SAM/SOM для сегментів промислового обладнання, систем безпеки та IoT-рішень.

З урахуванням прогнозованого зростання ринку та високого рівня автоматизації в цільових галузях попит на безконтактні датчики відстані очікується стабільно зростаючим.

Таблиця 4.5 – Оцінка попиту на стартап-продукт

№ з/п	Показник	Характеристика
1	Системний попит	Формується за рахунок постійного оновлення та

№ з/п	Показник	Характеристика
		модернізації парку обладнання в промисловості й будівництві
2	Основні сегменти попиту	Виробники промислового обладнання, інтегратори систем безпеки, розробники IoT-рішень
3	Динаміка попиту	Зростаюча, зумовлена трендами Industry 4.0 та Смарт-фабрик
4	Больові точки клієнтів	Недостатня точність дешевих датчиків, складність інтеграції, відсутність компенсації умов середовища
5	Очікувана вигода від продукту	Підвищення точності, зменшення простоїв, спрощення інтеграції, можливість віддаленого моніторингу

Таким чином, ринок демонструє достатню місткість і динаміку для виходу нового гравця за умови, що продукт забезпечує відчутне покращення точності вимірювань і сумісний із сучасними IoT-платформами.

4.3 Розроблення ринкової стратегії та маркетингової програми проєкту

SWOT-аналіз стартап-проєкту

Було систематизовано внутрішні та зовнішні фактори, що впливають на розвиток стартапу.

Таблиця 4.1 – SWOT-аналіз стартап-проєкту

Сильні сторони		Як вони підвищують конкурентоспроможність
Висока точність вимірювань		Дозволяє працювати в точних галузях (робототехніка, авто)
Простота інтеграції в різні системи		Збільшує привабливість для розробників та інтеграторів
Слабкі сторони		Як вони знижують конкурентоспроможність
Обмежена відомість бренду на ринку		Зменшує довіру потенційних клієнтів
Можливості		Як реалізувати через сильні сторони
Зростання попиту на безконтактні технології		Використати високу точність і просту інтеграцію для виходу на нові проекти
Розширення використання в нових галузях		Позиціонувати продукт для автомобільної й робототехнічної промисловості
Загрози		Як нейтралізувати через сильні сторони
Нестабільність економічної ситуації		Формувати довгострокові контракти й сервісні договори
Конкуренція з боку глобальних брендів		Робити акцент на гнучкості, сервісній підтримці та локальній адаптації

SWOT-аналіз показує, що стратегія стартапу має спиратися на диференціацію за рахунок точності та інтегрованості, водночас критично важливо

посилювати бренд та формувати довгострокові відносини з ключовими клієнтами для зменшення чутливості до коливань ринку.

Вибір базової стратегії розвитку та конкурентної поведінки

Згідно з методикою розроблення стартап-проєкту, на основі SWOT-аналізу визначається базова стратегія розвитку та стратегія конкурентної поведінки. Для даного проєкту доцільно обрати стратегію диференціації із фокусом на високоточні сегменти ринку та стратегію активного виходу на нові ринки із залученням ранніх послідовників.

Таблиця 4.2 – Визначення базової стратегії розвитку стартап-проєкту

№ з/п	Обрана альтернатива розвитку проєкту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції	Базова стратегія розвитку
1	Підсилення сильних сторін за рахунок ринкових можливостей	Диференційований маркетинг	Висока точність, IoT-інтеграція, сервісна підтримка	Стратегія диференціації

Обрана стратегія передбачає орієнтацію на B2B-клієнтів із високими вимогами до точності та надійності, готових платити за додаткову цінність у вигляді сервісу, підтримки інтеграції та можливості кастомізації продукту під конкретні проєкти.

Стратегія позиціонування

Стратегія позиціонування визначає, як саме споживачі мають сприймати продукт і бренд стартапу відносно конкурентів. На основі вимог цільової аудиторії та обраної базової стратегії позиціонування формуються ключові асоціації, з якими має асоціюватися продукт.

Таблиця 4.3 – Визначення стратегії позиціонування стартап-проєкту

№ з/п	Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції стартапу	Обрані асоціації (ключові)
1	Висока точність, стабільність, простота інтеграції	Диференціація	Інтелектуальна обробка сигналів, IoT-готовність, технічна підтримка	«Точність», «Надійність», «Розумний сенсор для IoT»

У межах цієї стратегії комунікаційні матеріали, дизайн продукту та ключові повідомлення мають підкреслювати точність, технологічність та зручність інтеграції, а також фокус на партнерстві з інженерними командами клієнтів.

Маркетингова програма стартап-проєкту

Маркетингова програма включає формування маркетингової концепції товару, побудову трирівневої моделі товару та визначення комплексу маркетингу для виходу на ринок.

1. Маркетингова концепція товару.

Продукт розглядається як інтелектуальний модуль вимірювання

відстані, що вирішує потребу клієнтів у точних, стабільних і легко інтегрованих сенсорах для автоматизованих систем. Ключові переваги – підвищена точність, зменшення потреби в додатковій обробці сигналів на стороні клієнта, швидке впровадження та сервісна підтримка.

2. Три рівні моделі товару:

- Товар за задумом – надійний інструмент для підвищення точності, безпеки та ефективності автоматизованих систем.
- Товар у реальному виконанні – модуль у герметичному корпусі із заданими технічними характеристиками, інтерфейсами та прошивкою.
- Товар з підкріпленням – технічна документація, приклади коду, консультації з інтеграції, оновлення ПЗ, гарантійне й післягарантійне обслуговування.

3. Канали збуту та комунікацій.

Основними каналами збуту визначено прямі продажі виробникам обладнання та інтеграторам, а також інтернет-канали (офіційний сайт, профільні платформи, технічні форуми). У сфері комунікацій планується використання технічних виставок, професійних соцмереж (LinkedIn) та таргетованого контент-маркетингу, що відповідає попередньому маркетинговому плану.

4. Бюджет маркетингу.

У рамках справи було попередньо оцінено витрати на брендинг, створення сайту, участь у виставках та онлайн-просування.

4.4 Бізнес-модель реалізації стартап-проєкту та оцінювання його економічної ефективності

Команда стартап-проєкту та розподіл ролей

На цьому етапі формалізуємо команду стартапу під продукт «безконтактний акустичний вимірювач відстані» через прив'язку ролей до стадій розвитку (від генерації ідеї до масштабування). Це потрібно, щоб показати: хто саме створює цінність продукту, ким забезпечується технічна та ринкова частина, і які орієнтовні витрати закладаються на людський ресурс.

Таблиця 4.1 – Склад команди, компетенції та витрати за стадіями стартапу

Стадія	Завдання учасників	Учасники команди	Освіта	Досвід	Спеціалізовані знання	Витрати, тис. грн
Pre-seed	Генерація ідеї, модель прототипу на основі акустичних датчиків	Стартапер	Вища технічна	2 роки	Інженерні	15
Seed	Бізнес-план, аналіз ринку, потреби клієнтів	Бізнес-аналітик	Вища економічна	3 роки	Аналітика ринку	20
Prototy	ТЗ,	Інженер/розробник	Вища	5	Програмува	30

Стадія	Завдання учасників	Учасники команди	Освіта	Досвід	Спеціалізовані знання	Витрати, тис. грн
pre	проектування базової версії, тестування прототипу		технічна	років	ння, електроніка	
Alpha	MVP, підготовка до запуску, первинний аналіз результатів	Розробник	Вища технічна	4 роки	Прототипування	25
Private beta	Просування продукту, управління клієнтами, оптимізація	Маркетолог/тестувальник	Вища (маркетинг)	3 роки	Діджитал-маркетинг	40
Public beta	Маркетингова стратегія, пошук ринків, масштабування	Маркетолог/менеджер	Вища економічна	5 років	Стратегія, масштабування	50

Стадія	Завдання учасників	Учасники команди	Освіта	Досвід	Спеціалізовані знання	Витрати, тис. грн
	ння виробництва					

Після узгодження ролей важливо зафіксувати, що технологічна конкурентна перевага продукту підтримується саме інженерним блоком команди: для підвищення точності та стабільності вимірювань у дипломній частині запропоновані підходи фільтрації (зокрема порівняння класичних методів із фільтром Калмана), що дозволяє зменшувати шум без суттєвої фазової затримки — критично для систем реального часу.

Окремо доцільно показати мотивацію засновників через частки, визначені методом балів (як виконувалось у практичних роботах).

Таблиця 4.2 – Розподіл часток між засновниками (за результатами оцінювання внеску)

Засновник	Сума балів	Частка, %
Засновник 1 (інженер)	37	40,7
Засновник 2 (бізнес-аналітик)	32	35,2
Засновник 3 (маркетолог)	22	24,1
Разом	91	100

Висновок за двома таблицями: команда покриває весь цикл створення цінності (R&D → MVP → вихід на ринок → масштабування), а розподіл

часток прив'язаний до внеску та ризиків участі засновників, що знижує ймовірність організаційних конфліктів на ранніх етапах.

Календарний план-графік реалізації

Далі фіксуємо стислий план-графік, який демонструє послідовність етапів і загальний бюджет етапів. Такий графік є обов'язковим елементом організаційної частини стартап-проєкту.

Таблиця 4.3 – Календарний план-графік реалізації стартапу (укрупнено)

Стадія стартапу	Період 1	Період 2	Період 3	Період 4	Вартість стадії*
Передпосівна	X	X			50
Посівна		X	X		100
Прототипування			X	X	150
Ведення бізнесу				X	200
Разом					500

Логіка графіка відповідає типовому розвитку hardware/IoT-продукту — спочатку концепція й підтвердження гіпотез, потім прототипування та підготовка до продажів, після чого — операційне ведення бізнесу й масштабування.

Виробничий план (матеріали та постачання)

Оскільки продукт передбачає апаратну складову, у підрозділі важливо коротко показати, з яких базових елементів формується виріб та як планується забезпечити постачання. Нижче наведено мінімальний виробничий план за ключовими комплектуючими.

Таблиця 4.4 – Виробничий план: матеріали/комплектуючі та умови постачання

Найменування	Постачальники	Ціна за одиницю	Умови постачання
Корпус	Постачальник А	200	EXW
Сенсор	Постачальник В	500	CIF
Мікроконтролер	Постачальник С	300	FOB
Разом		1000	

Виробничий план у базовій версії спирається на стандартні комплектуючі з чіткими умовами поставки, що дає змогу зменшити ризик зривів по термінах і відпрацьовувати якість продукту через контрольні закупівлі та тестування партій.

Бізнес-модель (Business Model Canvas)

Побудова бізнес-моделі узгоджує «що саме продаємо», «кому», «як доводимо цінність» та «за рахунок чого заробляємо». Для акустичного датчика вимірювання відстані бізнес-модель сформульована так:

Таблиця 4.5 – Бізнес-модель стартапу (Business Model Canvas)

КЛЮЧОВІ ПАРТНЕРИ - Постачальники ультразвукових перетворювачів - Постачальники мікроконтролерів, датчиків Т/ф, плат - Виробники корпусів (3D-друк/лиття) - Дистриб'ютори електроніки - Інтегратори PLC/ІoT - Партнери з сертифікації (CE/FCC/ISO) - Контрактне виробництво (за потреби)	КЛЮЧОВІ ВИДИ ДІЯЛЬНОСТІ - R&D (оптимізація обробки сигналів, компенсація впливу середовища) - Розробка прошивки та тестування - Калібрування, контроль якості партій - Сертифікація/патентування - Маркетинг і продаж	ЦІННІСНА ПРОПОЗИЦІЯ - Точне безконтактне вимірювання відстані - Стабільність у складних умовах (шум, пил, перепади температури) - Простота інтеграції (UART/І2C, опц. RS-485/Modbus, Wi-Fi/BLE) - ІoT-готовність (віддалений моніторинг/оновлення ПЗ) - Зниження простоїв та ризиків експлуатації	ВІДНОСИНИ З КЛІЄНТАМИ - Техпідтримка інтеграції (інженерний супровід) - Пілотні проекти (PoC) з B2B-клієнтами - Персональний менеджер для ключових клієнтів - Гарантійне/післягарантійне обслуговування	СПОЖИВЧІ СЕГМЕНТИ - Виробники промислового обладнання та автоматики - ІoT-розробники/інтегратори - Робототехніка/AGV/склади - Автомобільні системи - Будівельні та інфраструктурні компанії - Лабораторії/освіта (окремий сегмент)
СТРУКТУРА ВИТРАТ - R&D, прототипування, тестування, калібрування - Закупівля комплектуючих, корпусів, складання - Сертифікація, патентування/ІВ, документація - Маркетинг/виставки/контент, продажі - Підтримка клієнтів	ПОТОКИ ДОХОДІВ - Продаж датчиків/модулів (B2B-партії, контракти) - Продаж dev-kit/оцінювальних наборів - Ліцензування алгоритмів/прошивки (за потреби) - Сервіс/супровід/оновлення ПЗ			

Бізнес-модель комбінує B2B-продажі (прямі контракти та дистриб'ютори) з можливістю довгострокової монетизації через ліцензування та сервіс, а ключова конкурентна опора — технічна якість і точність вимірювання.

Витрати, інвестиції та показники ефективності

Для попереднього оцінювання економічної ефективності фіксуємо структуру витрат і загальний обсяг стартових інвестицій.

Таблиця 4.6 – Фінансова модель стартапу (структура витрат)

Види витрат	Вартість, тис. грн
НДДКР	50

Види витрат	Вартість, тис. грн
Захист прав на об'єкти ІВ	20
Закупівля сировини та матеріалів	200
Створення прототипу, дослід	150
Оренда приміщення	50
Просування	30
Витрати на команду	200
Закупівля обладнання	300
Створення сайту стартапу	10
РАЗОМ	1010

Далі розрахуємо індикативні показники ефективності через середньорічну рентабельність/ROI, як це пояснюється у ваших методичних примітках (прибуток за період / інвестиції / час експлуатації).

Оскільки у виконаних таблицях зафіксовано обсяг ринку та середню норму рентабельності в галузі, можна зробити сценарну оцінку (частка ринку 0,5% / 1% / 2% у рік).

Таблиця 4.7 – Сценарна оцінка ефективності (за часткою ринку)

Сценарій (частка ринку)	Дохід, грн/рік	Прибуток (15%), грн/рік	ROI, %/рік	Орієнтовний період окупності, років
0,5%	600 000	90 000	8,9	11,2

Сценарій (частка ринку)	Дохід, грн/рік	Прибуток (15%), грн/рік	ROI, %/рік	Орієнтовний період окупності, років
1,0%	1 200 000	180 000	17,8	5,6
2,0%	2 400 000	360 000	35,6	2,8

Навіть за консервативної частки ринку 1% отримуємо прийнятну окупність на рівні ~5–6 років, а збільшення частки до 2% зменшує період окупності до ~3 років. Для покращення показників у реальному бізнес-плані критично деталізувати ціну продукту, собівартість одиниці та план продажів (обсяг збуту), як це вимагають методичні вказівки для фінансово-економічного аналізу.

Ризики реалізації та заходи реагування

Оцінювання ризиків узгоджується з організаційною та фінансовою частиною, оскільки ризики прямо впливають на строки й витрати. У вашому заповненому бізнес-плані вже наведено базові технічні та логістичні ризики; нижче їх структуровано та доповнено ризиками ринку збуту (конкуренція/замінники/довіра).

Таблиця 4.8 – Реєстр ключових ризиків та дії з мінімізації

№	Ризик	Джерело	Наслідки	Дії з мінімізації
1	Затримка постачання	Логістика	Зрив термінів	Диверсифікація постачальників, запас комплектуючих
2	Технічні	Обладнання/виріб	Зупинка	Сервісне

№	Ризик	Джерело	Наслідки	Дії з мінімізації
	несправності		виробництва	обслуговування, вхідний/вихідний контроль якості
3	Висока конкуренція та тиск брендів	Прямі конкуренти	Повільні продажі	Фокус на точності/інтеграції, пілотні проєкти з B2B-клієнтами
4	Товари-замінники (лазерні сенсори)	Ринок	Втрата частини попиту	Позиціонування за перевагами УЗ- методу, підбір ніш із вимогами до безконтактності
5	Низька впізнаваність/довіра	Маркетинг	Довший цикл угоди	Демонстрації, техпідтримка, контент/кейси, довгострокові контракти

Найбільш критичними для стартапу є ризики строків (постачання/прототипування) та ринкові ризики довіри й замінників; вони мають бути постійно відстежувані через КРІ (терміни поставок, відсоток браку, конверсія лідів у пілоти тощо).

Висновки до розділу 4

У розділі було виконано комплексне опрацювання стартап-проєкту, по тематиці магістерської роботи «Оптимізація обробки сигналів безконтактного акустичного вимірювача відстані», та поєднує технологічну і бізнесову складові в єдину логіку комерціалізації. Опис ідеї стартапу та його бізнес-орієнтації було узгоджено з базовою ціннісною пропозицією: точне безконтактне вимірювання відстані, доступність рішення та можливість інтеграції у промислові й IoT-системи, при цьому технічна конкурентна перевага підсилюється оптимізацією обробки сигналів і застосуванням методів фільтрації, орієнтованих на роботу в реальному часі.

Виробничу частину стартапу описано через базові комплектуючі та умови постачання, що дозволяє заздалегідь врахувати ризики логістики та забезпечити можливість контролю якості на вході. У межах бізнес-моделі визначено ключові сегменти клієнтів, канали збуту (прямі B2B-продажі та дистрибуція), логіку взаємодії з клієнтом, а також джерела доходів. У сукупності це формує зрозумілу «карту монетизації» та пояснює, за рахунок яких процесів створюється й доставляється цінність.

Економічну складову оцінено на основі структури витрат стартапу та орієнтовного обсягу інвестицій, необхідних для запуску. Додатково виконано сценарну оцінку ефективності, яка демонструє залежність окупності від частки ринку та галузевої рентабельності: у консервативному сценарії отримуються прийнятні строки повернення вкладень, а в базовому й оптимістичному — суттєве скорочення періоду окупності. Отримані результати підтверджують інвестиційну логіку проєкту, але також підкреслюють необхідність поглиблення фінансової моделі на наступному кроці (деталізація ціни, собівартості одиниці та плану продажів).

ВИСНОВКИ

У магістерській дисертації розв'язано актуальну науково-прикладну задачу підвищення точності та завадостійкості безконтактного ультразвукового вимірювання відстані в умовах змінних параметрів повітряного середовища. Встановлено, що основні складові похибки формуються як систематичними відхиленнями, зумовленими зміною швидкості ультразвуку в повітрі, так і випадковими збуреннями (шумами та викидами), які виникають через мульти-ехо, паразитні відбиття, електронні наведення та нестабільність детекції ехо-імпульсу. Саме тому базовий підхід із використанням сталої швидкості ультразвуку та простих методів згладжування не забезпечує стабільної якості вимірювань при зміні мікроклімату та появі імпульсних завад.

У роботі обґрунтовано та реалізовано комбінований алгоритмічний підхід, який поєднує компенсацію швидкості ультразвуку за параметрами середовища T , RH , p , CO_2 та оптимальне стохастичне оцінювання на основі фільтра Калмана зі станом типу «відстань–швидкість». Показано, що така постановка задачі дозволяє одночасно розв'язувати дві ключові проблеми: зменшувати систематичну складову похибки завдяки корекції швидкості ультразвуку $c(T, RH, p, CO_2)$ і пригнічувати випадкові коливання вимірювань завдяки фільтрації, яка враховує статистичну природу похибок та інерційність фізичного процесу зміни відстані.

Важливим результатом є запропонований механізм адаптивного формування дисперсії вимірювання R_k , за якого «довіра» фільтра до поточного виміру змінюється залежно від поточної невизначеності часу проходження та параметрів середовища. Це забезпечує коректну поведінку оцінювача як у сприятливих умовах (коли вимір надійний і фільтр швидко

підлаштовується), так і в складних режимах (коли зростає невизначеність і потрібне сильніше згладжування). Додатково реалізовано стійкість через контроль узгодженості інновації (зокрема, використання NIS/нормалізованої інновації), що дозволяє автоматично послаблювати вплив викидів і запобігати «зриву» оцінювання при мульти-ехо та імпульсних перешкодах.

Практичну реалізацію алгоритмів виконано на доступній мікроконтролерній платформі із демонстрацією того, що навіть у ресурсно обмеженому середовищі можливе застосування сучасних методів оптимального оцінювання без надмірного ускладнення апаратної частини. Розроблене програмне забезпечення організовано у вигляді логічно розділених модулів і доповнено режимом емуляції, що дозволяє задавати параметри T , RH , p , CO_2 та повторювано перевіряти роботу компенсаційного й фільтраційного блоків, не змінюючи фізичну конфігурацію стенду. Такий підхід підвищує відтворюваність експериментів, спрощує налагодження та дає можливість проводити серії порівняльних випробувань за однакових сценаріїв.

Експериментальна частина та моделювання підтвердили, що запропонований алгоритм забезпечує більш стабільні результати вимірювань у часі, зменшує розкид похибок і покращує інтегральні метрики точності (зокрема MAE та RMSE) порівняно з базовим методом без компенсації та без оптимальної фільтрації, особливо в умовах наявності викидів. Показано, що найбільший ефект досягається саме при поєднанні двох складових — коректного обліку мікроклімату (через $s(T, RH, p, CO_2)$) та статистичного оцінювання із стійкість пригніченням аномалій; кожна з цих складових окремо також покращує результат, але в комплексі забезпечує максимальну стійкість.

Отримані наукові та прикладні результати мають практичну цінність для задач робототехніки, промислової автоматизації, систем безпеки та моніторингу, де потрібні недорогі, прості в реалізації та водночас точні безконтактні вимірювальні засоби. Запропонований підхід може бути використаний як базовий модуль для подальшого розвитку «інтелектуальних» ультразвукових сенсорів із функціями самоналаштування та самодіагностики.

Перспективними напрямками подальших досліджень є розширення моделі стану (наприклад, врахування прискорення або параметризації мульти-ехо), автоматична оцінка параметрів Q та R_k за даними експлуатації (самоадаптація), а також інтеграція оцінки якості ехо-сигналу (амплітуда/енергія/кореляційний критерій) як додаткової ознаки для більш точного виявлення викидів. Також доцільним є проведення розширених натурних випробувань на різних типах поверхонь і в ширшому діапазоні мікрокліматичних умов для формування рекомендацій з калібрування та експлуатації вимірювача.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. [Електронний ресурс] // – 2025. – Режим доступу до ресурсу:
https://www.ti.com/lit/ug/tiduai8a/tiduai8a.pdf?ts=1762079156385&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F
2. [Електронний ресурс] // – 2025. – Режим доступу до ресурсу:
<https://docs.rs-online.com/f172/A7000000007238458.pdf>
3. [Електронний ресурс] // – 2025. – Режим доступу до ресурсу:
<https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/1132204/ETC2/HCSR04.html>
4. Данілов М. Оптимізація обробки сигналів ультразвукових датчиків для підвищення точності безконтактних вимірювань // Проблеми та інновації у розвитку інженерії, технологій та транспорту : збірник наукових праць Міжнар. наук. конф. студентів і молодих вчених. — Хмельницький : ХНУ, 2025. — с. 907
5. [Електронний ресурс] // – 2025. – Режим доступу до ресурсу:
<http://conf.vntu.edu.ua/allvntu/2015/inrtzp/txt/oliynik.pdf>
6. Cramer O. The variation of the specific heat ratio and the speed of sound in air with temperature, pressure, humidity, and CO₂ concentration // The Journal of the Acoustical Society of America. — 1993. p.19
7. Morfey C. L., Howell G. P. The speed of sound in air as a function of frequency and humidity // The Journal of the Acoustical Society of America. — 1980. p.23
8. Harris C. M. Effects of humidity on the velocity of sound in air // The Journal of the Acoustical Society of America. — 1971. p.12
9. Терещенко М. Ф., Тимчик Г. С., Чухраєв М. В., Кравченко А. Ю. Ультразвукові фізіотерапевтичні апарати та пристрої: монографія. — Харків: Мачулін, 2018. – 272 с.

10. Davis R. S. Equation for the determination of the density of moist air (1981/91) // Metrologia. — 1992, p.31
11. ANSI/ASA S1.26-2014 (R2024). Methods for Calculation of the Absorption of Sound by the Atmosphere. Acoustical Society of America / ANSI, 2014/2024, p.3
12. Цапенко, В. К. Куц, Ю. В. Основи ультразвукового неруйнівного контролю: Підручник. Київ: НТУУ «КПІ», 2009, с.65
13. Kalman R. E. A new approach to linear filtering and prediction problems. Journal of Basic Engineering (ASME), 1960, p.22
14. Шпилька, О. О. Порівняльний аналіз алгоритмів адаптивного оцінювання параметрів радіоканалів зв'язку / О. О. Шпилька, С. Я. Жук // Вісник НТУУ «КПІ». Радіотехніка, радіоапаратобудування : збірник наукових праць. — 2008. — № 36. — С. 30–33. — Бібліогр.: 4 назви.
15. Kalman R. E., Bucy R. S. New results in linear filtering and prediction theory // Journal of Basic Engineering (ASME). — 1961, p. 67
16. Gelb A. (ed.). Applied optimal estimation. — Cambridge, MA : MIT Press, 1974, p. 32
17. Jazwinski A. H. Stochastic processes and filtering theory. — New York : Academic Press, 1970., p.43
18. Anderson B. D. O., Moore J. B. Optimal filtering. — Englewood Cliffs : Prentice-Hall, 1979. p32
19. Терещенко М. Ф., Тимчик Г. С., Чухраєв М. В., Кравченко А. Ю. Ультразвукові фізіотерапевтичні апарати та пристрої : монографія. — 2018, с.5
20. Довбиш, І. О. Залежність архітектури рою від рівня автономності БпЛА / І. О. Довбиш, О. В. Муравйов // XVI Всеукраїнська науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених

- «Погляд у майбутнє приладобудування», 16-17 травня 2023 р., м. Київ, Україна : збірник праць конференції. – Київ : КПП ім. Ігоря Сікорського, 2023. – С. 158–161. – Бібліогр.: 5 назв.
21. Simon D. Optimal state estimation: Kalman, H_∞ , and nonlinear approaches. — Hoboken : Wiley, 2006., p.23
 22. Сідлецький В. М., Ельперін І. В. Технології конструювання сучасних автоматизованих систем: монографія. — Київ : Ліра-К, 2022, с. 111
 23. Mehra R. K. On the identification of variances and adaptive Kalman filtering // IEEE Transactions on Automatic Control. — 1970, p.45
 24. Sage A. P., Husa G. W. Adaptive filtering with unknown prior statistics // Proceedings of the Joint Automatic Control Conference (JACC). — 1969, p 23
 25. Masreliez C. J., Martin R. D. Robust Bayesian estimation for the linear model and robustifying the Kalman filter // IEEE Transactions on Automatic Control. — 1977, p 43
 26. Терещенко М. Ф., Тимчик Г. С., Чухраєв М. В., Кравченко А. Ю. Ультразвукові фізіотерапевтичні апарати та пристрої : монографія. — 2018. с.9
 27. Костюк А. Ю. Застосування розширеного фільтра Калмана для калібрування інерційних датчиків / Костюк А. Ю., Лакоза С. Л. // Вісник НТУУ «КПІ». Приладобудування : збірник наукових праць. — 2012. – Вип. 43. – С. 10–17. – Бібліогр.: 5 назв.
 28. Julier S. J., Uhlmann J. K. A new extension of the Kalman filter to nonlinear systems // Proceedings of AeroSense Symposium. — 1997, p.44
 29. Лепіх Я. І. Прикладна акустика в медицині (ультразвук та інфразвук): підручник. – Одеса: ОНУ ім. І. І. Мечникова, 2005. – 292 с

- 30.Васильченко Є. В., Шевченко В. В. Проєктування системи контролю мікроклімату приміщень // Погляд у майбутнє приладобудування: матеріали конференції. – 2023. – С. 97–100.
- 31.[Електронний ресурс] // – 2025. – Режим доступу до ресурсу:
<https://docs.micropython.org/en/latest/esp8266/tutorial/repl.html>

ДОДАТОК А

```
# boot.py — основна логіка запуску
# NORMAL: HC-SR04 + (номінальні/датчики) T,RH,P,CO2 -> app.run()
# EMU:   ввід з REPL T,RH,P,CO2,D           -> app.run_emu()

import time
from machine import Pin
import config
from display_st7735 import TFTDisplay
import app
import emu

def main():
    disp = TFTDisplay()
    disp.splash()
    time.sleep_ms(800)

    mode_pin = Pin(config.MODE_PIN, Pin.IN, Pin.PULL_UP)
    time.sleep_ms(800)

    env = dict(config.ENV_DEFAULT)
    env["D"] = 1.00
```

```

def env_provider():
    return env["T"], env["RH"], env["P"], env["CO2"]

def dist_provider():
    return env["D"]

# GPIO0 (BOOT): 0 -> EMU, 1 -> NORMAL
if mode_pin.value() == 0:
    # ===== EMU MODE =====
    disp.show_lines("EMU MODE", ["SET T RH P CO2 D", "CTRL+C EDIT"])
    print("\n=== EMU MODE (FULL) ===")
    print("Format: set T RH P CO2 D")
    print("Example: set 22 45 101325 600 1.20")
    print("Or: T=22 RH=45 P=101325 CO2=600 D=1.20")
    print("help, q\n")

    while True:
        try:
            line = input("env> ")
            T, RH, P, CO2, D = emu.parse_env_line(
                line,
                env["T"], env["RH"], env["P"], env["CO2"], env["D"]
            )
            env["T"], env["RH"], env["P"], env["CO2"], env["D"] = T, RH, P, CO2,

```

D

```
print("OK: T=%.2f RH=%.2f P=%.0f CO2=%.0f D=%.3f" % (T, RH, P,
CO2, D))
```

```
print("Running... Ctrl+C to change env\n")
```

```
try:
```

```
    app.run_emu(env_provider, dist_provider, disp)
```

```
except KeyboardInterrupt:
```

```
    print("\nPaused. Set new env.")
```

```
    continue
```

```
except KeyboardInterrupt:
```

```
    print("\nExit EMU.")
```

```
    disp.show_lines("EMU", ["EXIT"])
```

```
    break
```

```
else:
```

```
    # ===== NORMAL MODE =====
```

```
    disp.show_lines("NORMAL", ["START"])
```

```
    app.run(env_provider, disp)
```

```
main()
```

ДОДАТОК Б

config.py — всі налаштування в одному місці

SPI_ID = 1

PIN_SCK = 18

PIN_MOSI = 23

PIN_DC = 14

PIN_RST = 2

PIN_CS = 13

===== HC-SR04 =====

PIN_TRIG = 5

PIN_ECHO = 19 # !!! 18 зайнятий SCK дисплея

===== Режим емуляції =====

MODE_PIN = 0 # BOOT: якщо притиснути до GND під час старту -> EMU

===== Частота оновлення =====

DT = 0.05 # 20 Гц

===== Невизначеності =====

SIGMA_T_C = 0.20

SIGMA_RH_PCT = 2.0

SIGMA_P_PA = 100.0

SIGMA_CO2_PPM = 50.0

SIGMA_TOF_S = 30e-6

SIGMA_MISC_M = 0.002

USE_NUMERICAL_DERIVS = True

SIGMA_C_FIXED = 0.15

R_FALLBACK = (0.02 ** 2)

===== Стійкість (NIS) =====

NIS_THRESHOLD = 6.63

OUTLIER_R_MULT = 200.0

===== Калман (процесний шум) =====

SIGMA_A = 0.6

===== Номінальні параметри середовища для NORMAL =====

ENV_DEFAULT = {

 "T": 22.0,

 "RH": 45.0,

 "P": 101325.0,

 "CO2": 420.0

}

===== Коефіцієнти Cramer =====

$$A0 = 331.5024$$

$$A1 = 0.603055$$

$$A2 = -0.000528$$

$$A3 = 51.471935$$

$$A4 = 0.1495874$$

$$A5 = -0.000782$$

$$A6 = -1.82e-7$$

$$A7 = 3.73e-8$$

$$A8 = -2.93e-10$$

$$A9 = -85.20931$$

$$A10 = -0.228525$$

$$A11 = 5.91e-5$$

$$A12 = -2.835149$$

$$A13 = -2.15e-13$$

$$A14 = 29.179762$$

$$A15 = 0.000486$$

ДОДАТОК В

acoustics.py — Cramer (1993) + Rk

import math

import config

def _water_vapor_mole_fraction(T_C, P_Pa, RH_percent):

 T_K = T_C + 273.15

 rh = RH_percent / 100.0

 Ef = 1.00062 + (3.14e-8) * P_Pa + (5.6e-7) * (T_K * T_K)

 psv = math.exp(

 (1.2811805e-5) * (T_K * T_K) - (1.9509874e-2) * T_K

 + 34.04926034 - (6.3536311e3) / T_K

)

 Xw = rh * Ef * psv / P_Pa

 if Xw < 0.0:

 Xw = 0.0

 return Xw

def speed_of_sound_cramer(T_C, P_Pa, RH_percent, CO2_ppm):

 Xc = CO2_ppm / 1e6

 Xw = _water_vapor_mole_fraction(T_C, P_Pa, RH_percent)


```

c = (
    config.A0 + config.A1*T_C + config.A2*(T_C*T_C)
    + (config.A3 + config.A4*T_C + config.A5*(T_C*T_C))*Xw
    + (config.A6 + config.A7*T_C + config.A8*(T_C*T_C))*P_Pa
    + (config.A9 + config.A10*T_C + config.A11*(T_C*T_C))*Xc
    + config.A12*(Xw*Xw)
    + config.A13*(P_Pa*P_Pa)
    + config.A14*(Xc*Xc)
    + config.A15*Xw*P_Pa*Xc
)
return c

```

```

def _sigma_c_numeric(T, RH, P, CO2):
    dT, dRH, dP, dC = 0.05, 0.05, 10.0, 1.0
    c0 = speed_of_sound_cramer(T, P, RH, CO2)
    cT = speed_of_sound_cramer(T + dT, P, RH, CO2)
    cRH = speed_of_sound_cramer(T, P, RH + dRH, CO2)
    cP = speed_of_sound_cramer(T, P + dP, RH, CO2)
    cC = speed_of_sound_cramer(T, P, RH, CO2 + dC)

    dc_dT = (cT - c0) / dT
    dc_dRH = (cRH - c0) / dRH
    dc_dp = (cP - c0) / dP
    dc_dC = (cC - c0) / dC

```

```

var_c = (
    (dc_dT * config.SIGMA_T_C) ** 2 +
    (dc_dRH * config.SIGMA_RH_PCT) ** 2 +
    (dc_dp * config.SIGMA_P_PA) ** 2 +
    (dc_dC * config.SIGMA_CO2_PPM) ** 2
)
return math.sqrt(var_c)

```

```

def compute_Rk(tof_s, c, T, RH, P, CO2):
    if config.USE_NUMERICAL_DERIVS:
        sigma_c = _sigma_c_numeric(T, RH, P, CO2)
    else:
        sigma_c = config.SIGMA_C_FIXED

    var_t = ((0.5 * c) ** 2) * (config.SIGMA_TOF_S ** 2)
    var_c = ((0.5 * tof_s) ** 2) * (sigma_c ** 2)
    var_m = (config.SIGMA_MISC_M ** 2)

    Rk = var_t + var_c + var_m
    if (Rk <= 0.0) or math.isnan(Rk) or math.isinf(Rk):
        return config.R_FALLBACK
    return Rk

```

ДОДАТОК Г

```
# kalman.py — 2D Kalman: [d, v]
```

```
import config
```

```
class KalmanDV:
```

```
    def __init__(self, dt=config.DT, sigma_a=config.SIGMA_A):
```

```
        self.dt = dt
```

```
        self.x0 = 0.0
```

```
        self.x1 = 0.0
```

```
        self.P00 = 0.15**2
```

```
        self.P01 = 0.0
```

```
        self.P10 = 0.0
```

```
        self.P11 = 0.50**2
```

```
        sa2 = sigma_a * sigma_a
```

```
        dt2 = dt*dt
```

```
        dt3 = dt2*dt
```

```
        dt4 = dt2*dt2
```

```
        self.Q00 = sa2 * (dt4 / 4.0)
```

```
        self.Q01 = sa2 * (dt3 / 2.0)
```

```
        self.Q10 = sa2 * (dt3 / 2.0)
```

```
        self.Q11 = sa2 * (dt2)
```

```

def reset(self, d0, v0=0.0):
    self.x0, self.x1 = d0, v0

def step(self, z, R):
    dt = self.dt

    # predict
    x0p = self.x0 + dt*self.x1
    x1p = self.x1

    P00p = self.P00 + dt*(self.P10 + self.P01) + (dt*dt)*self.P11 + self.Q00
    P01p = self.P01 + dt*self.P11 + self.Q01
    P10p = self.P10 + dt*self.P11 + self.Q10
    P11p = self.P11 + self.Q11

    # update (H=[1,0])
    nu = z - x0p
    S = P00p + R
    if S <= 1e-12:
        self.x0, self.x1 = x0p, x1p
        self.P00, self.P01, self.P10, self.P11 = P00p, P01p, P10p, P11p
    return nu, S, 0.0

nis = (nu*nu)/S

```

```
if nis > config.NIS_THRESHOLD:
    S = P00p + (R * config.OUTLIER_R_MULT)

    K0 = P00p / S
    K1 = P10p / S

    self.x0 = x0p + K0*nu
    self.x1 = x1p + K1*nu

    self.P00 = (1.0 - K0)*P00p
    self.P01 = (1.0 - K0)*P01p
    self.P10 = P10p - K1*P00p
    self.P11 = P11p - K1*P01p

    return nu, S, nis
```

ДОДАТОК Г

```

# emu.py

def parse_env_line(line, T, RH, P, CO2, D):
    s = line.strip()
    if not s:
        return T, RH, P, CO2, D

    ls = s.lower()
    if ls in ("q", "quit", "exit"):
        raise KeyboardInterrupt
    if ls in ("h", "help", "?"):
        print("Format: set T RH P CO2 D")
        print("Example: set 22 45 101325 600 1.20")
        print("Or: T=22 RH=45 P=101325 CO2=600 D=1.20")
        return T, RH, P, CO2, D

    if "=" in s:
        for part in s.replace(",", " ").split():
            if "=" not in part:
                continue
            k, v = part.split("=", 1)
            k = k.strip().lower()
            try:
                fv = float(v)

```

```

except:
    continue

    if k in ("t", "temp", "temperature"): T = fv
    elif k in ("rh", "hum", "humidity"): RH = fv
    elif k in ("p", "press", "pressure"): P = fv
    elif k in ("co2",): CO2 = fv
    elif k in ("d", "dist", "distance"): D = fv
return T, RH, P, CO2, D

tokens = s.split()
if tokens and tokens[0].lower() == "set":
    tokens = tokens[1:]
    if len(tokens) >= 5:
        return float(tokens[0]), float(tokens[1]), float(tokens[2]), float(tokens[3]),
float(tokens[4])

print("Unknown command. Type 'help'.")
return T, RH, P, CO2, D

```

ДОДАТОК Д

```

# app.py — основний цикл
import time
import config
import math

from hcsr04 import HCSR04
from kalman import KalmanDV
from acoustics import speed_of_sound_cramer, compute_Rk

DRAW_MS = 3000 # оновлення екрана раз на 3 секунди

def sf(x, n=3): # safe float
    if x is None or math.isnan(x) or math.isinf(x):
        return "---"
    return ("%%.%df" % n) % x

def run(env_provider, disp):
    """
    NORMAL MODE:
    - реальний ToF з HC-SR04
    - середовище з env_provider(): T, RH, P, CO2
    """

```



```

sonar = HCSR04()
kf = KalmanDV(config.DT, config.SIGMA_A)
initd = False

last_draw = time.ticks_ms()
while True:
    tof_us = sonar.read_tof_us()
    if tof_us is None or tof_us < 0:
        disp.show_lines("ULTRA KF", ["HC-SR04 TIMEOUT", "CHECK
WIRING"])
        time.sleep_ms(200)
        continue

    tof_s = tof_us * 1e-6

    T, RH, P, CO2 = env_provider()
    c = speed_of_sound_cramer(T, P, RH, CO2)

    z = 0.5 * c * tof_s
    Rk = compute_Rk(tof_s, c, T, RH, P, CO2)

    if not initd:
        kf.reset(z, 0.0)
        initd = True

```

```
nu, S, nis = kf.step(z, Rk)
```

```
if time.ticks_diff(time.ticks_ms(), last_draw) >= DRAW_MS:
```

```
    lines = [
```

```
        "Z=" + sf(z, 3) + " M",
```

```
        "D^=" + sf(kf.x0, 3) + " M",
```

```
        "V^=" + sf(kf.x1, 3) + " M/S",
```

```
        "C=" + sf(c, 1) + " M/S",
```

```
        "T=" + sf(T, 1) + "C RH=" + sf(RH, 0) + "%",
```

```
        "P=" + sf(P, 0) + "PA CO2=" + sf(CO2, 0),
```

```
        "R=" + sf(Rk, 6),
```

```
        "NIS=" + sf(nis, 2),
```

```
    ]
```

```
    disp.show_lines("ULTRA KF", lines) # або "EMU FULL" у run_emu
```

```
    last_draw = time.ticks_ms()
```

```
# CSV лог у консоль (зручно для ПК)
```

```
print("%d,%.6f,%.6f,%.6f,%.2f,%.2f,%.2f,%.0f,%.0f,%.6g,%.3f" %
```

```
    (time.ticks_ms(), z, kf.x0, kf.x1, c, T, RH, P, CO2, Rk, nis))
```

```
time.sleep_ms(int(config.DT * 1000))
```

```

def run_emu(env_provider, dist_provider, disp):
    """
    EMU FULL MODE:
    - середовище з env_provider(): T, RH, P, CO2
    - "вимір" відстані D (метри) береться з dist_provider()
    - ToF не потрібен -> HC-SR04 не заважає
    """

    kf = KalmanDV(config.DT, config.SIGMA_A)
    initied = False

    last_draw = time.ticks_ms()

    while True:
        T, RH, P, CO2 = env_provider()
        D = dist_provider()

        c = speed_of_sound_cramer(T, P, RH, CO2)

        z = D # у повній емуляції вважаємо z = D
        tof_s = (2.0 * D) / c if c > 1e-6 else 0.0 # еквівалентний ToF для Rk
        Rk = compute_Rk(tof_s, c, T, RH, P, CO2)

        if not initied:
            kf.reset(z, 0.0)
            initied = True

```

```
nu, S, nis = kf.step(z, Rk)
```

```
if time.ticks_diff(time.ticks_ms(), last_draw) >= DRAW_MS:
```

```
    lines = [
```

```
        "Z=" + sf(z, 3) + " M",
```

```
        "D^=" + sf(kf.x0, 3) + " M",
```

```
        "V^=" + sf(kf.x1, 3) + " M/S",
```

```
        "C=" + sf(c, 1) + " M/S",
```

```
        "T=" + sf(T, 1) + "C RH=" + sf(RH, 0) + "%",
```

```
        "P=" + sf(P, 0) + "PA CO2=" + sf(CO2, 0),
```

```
        "R=" + sf(Rk, 6),
```

```
        "NIS=" + sf(nis, 2),
```

```
    ]
```

```
    disp.show_lines("ULTRA EMU", lines) # aŕo "EMU FULL" y run_emu
```

```
    last_draw = time.ticks_ms()
```

```
time.sleep_ms(int(config.DT * 1000))
```