

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»
(повне найменування вищого навчального закладу)

Навчально-науковий інститут інформаційних технологій та робототехніки
(повне найменування інституту, назва факультету)

Кафедра автоматичної, електроніки та телекомунікацій
(повна назва кафедри (предметної, циклової комісії))

Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи

бакалавр

(ступінь вищої освіти)

на тему «Розробка системи автоматичного контролю глибини занурення
STD-зонда для вимірювання параметрів морської води в акваторії
Балтійського моря»

Виконав: студент 4 курсу, групи 401-МЕ
спеціальності 141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»
(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

Станкевич Г.В.

(прізвище та ініціали)

Керівник Єрмілова Н.В.

(прізвище та ініціали)


Рецензент Захарченко Р.В.

(прізвище та ініціали)

Полтава - 2025 рік

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»
Інститут Навчально-науковий інститут інформаційних технологій та
робототехніки
Кафедра Автоматики, електроніки та телекомунікацій
Ступінь вищої освіти Бакалавр
Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри автоматичної,
електроніки та телекомунікацій

О.В. Шефер
«01» квітня 2025 р.

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ БАКАЛАВРУ СТУДЕНТУ
Станкевичу Глібу Валентиновичу

1. Тема роботи «Розробка системи автоматичного контролю глибини занурення STD-зонда для вимірювання параметрів морської води в акваторії Балтійського моря»
керівник роботи Єрмілова Наталя Василівна, к.т.н., доцент
затверджена наказом вищого навчального закладу від 03.03.2025 року № 306/1-фа.
2. Строк подання студентом проєкту (роботи) 10.06.2025 р.
3. Вихідні дані до проєкту (роботи) Технічна документація на STD-зонд. Необхідно забезпечити роботу датчиків STD-зонда на глибині до 50 метрів при тиску до 5 бар, забезпечити виявлення дна в діапазоні 0,5–3 метри та автоматичну зупинку при виявленні, передачу даних через інтерфейс RS-232. Мінімізувати ризики механічного пошкодження датчиків під час занурення. Передбачити адаптивну зміну роботи системи залежно від зміни морських умов.
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Опис принципу роботи STD-зонда і проблеми пошкодження сенсорів при контакті з мулом. Постановка задач на кваліфікаційну роботу. Аналіз існуючих технологій розпізнавання морського дна. Вибір типу сенсора та обґрунтування рішення. Розробка структурної (функціональної) схеми системи контролю глибини морського дна. Алгоритм роботи системи. Розрахунок точності та допустимої похибки спрацювання. Перевірка працездатності системи шляхом моделювання або експериментальних випробувань.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових плакатів):

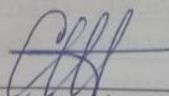
- 1) Актуальність, мета та задачі розроблення.
- 2) Загальний вигляд СТД-зонда з системою захисту.
- 3) Схематичне розташування ультразвукового сенсора відносно зонда.
- 4) Функціональна схема підключення сенсора та обробки сигналу.
- 5) Принципова електрична схема роботи системи.
- 6) Структурна схема алгоритму виявлення морського дна.
- 7) Діаграма роботи системи в режимі реального часу.
- 8) Аналіз надійності та час спрацювання системи.
- 9) Висновки.

6. Дата видачі завдання 01.04.2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

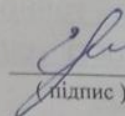
Пор. №	Назва етапів кваліфікаційної роботи бакалавра	Термін виконання етапів роботи			Примітка (плакати)
		Дата	Категорія	Відсоток	
1	Опис принципу роботи СТД-зонда і проблеми пошкодження сенсорів при контакті з мулом. Постановка задач на кваліфікаційну роботу.	22.04.25	I	20%	Пл. 1
2	Аналіз існуючих технологій розпізнавання морського дна. Вибір типу сенсора та обґрунтування рішення.	08.05.25		40%	Пл. 2,3
3	Розробка структурної (функціональної) схеми системи контролю глибини морського дна. Алгоритм роботи системи.	22.05.25	II	60%	Пл. 4,5
4	Розрахунок точності та допустимої похибки спрацювання. Перевірка працездатності системи шляхом моделювання або експериментальних випробувань.	30.05.25		80 %	Пл. 6,7
5	Оформлення кваліфікаційної роботи бакалавра	10.06.25	III	100%	Пл. 8,9

Студент


(підпис)

Станкевич Г.В.
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи


(підпис)

Єрмілова Н.В.
(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

кваліфікаційної роботи бакалавра " Розробка системи автоматичного контролю глибини занурення STD-зонда для вимірювання параметрів морської води в акваторії Балтійського моря"

Робота містить 59 сторінок, 37 рисунків і 10 таблиць, 18 використаних джерел.

Ключові слова: STD-зонд, солоність, датчик відстані, морське дно, система захисту.

Об'єктом дослідження кваліфікаційної роботи є розроблення системи автоматичного виявлення морського дна та керування зупинкою зонда. Предметом дослідження є система захисту STD-зонда під час занурення.

Розроблена система дозволяє вчасно виявляти морське дно на відстані близько 50 см і 3м та автоматично зупинити спуск STD-зонда, запобігаючи його падінню в мул. Такий захист є критично важливим, оскільки потрапляння зонда в мул може призвести до забруднення або пошкодження сенсора провідності, що негативно вплине на точність вимірювання солоності.

Система використовує ультразвуковий сенсор, здатний працювати на глибині до 50 метрів, і передає сигнали про відстань до морського дна на ПК через інтерфейс RS-232. Використання доступних та широко застосовуваних компонентів полегшує обслуговування, скорочує час ремонтів у разі несправностей і підвищує загальну надійність роботи STD-зонда. Робота має практичну цінність, результати розробки після доопрацювання можуть бути впроваджені для моніторингових досліджень у Балтійському морі або інших водних об'єктах.

ABSTRACT

Bachelor's Qualification Work "Development of an Automatic Depth Control System for CTD Probe Deployment for Measuring Seawater Parameters in the Baltic Sea Region"

This work consists of 59 pages, 37 illustrations and 10 tables, and references 18 sources.

Keywords: CTD probe, salinity, distance sensor, seafloor, protection system.

The object of the research is the development of a system for automatic seafloor detection and probe stop control. The subject of the study is the protection system of the CTD probe during submersion.

The developed system enables timely detection of the seafloor at distances of approximately 50 cm and 3 m, and automatically stops the descent of the CTD probe to prevent it from sinking into the seabed mud. Such protection is critically important, as contact with the mud can lead to contamination or damage of the conductivity sensor, which in turn negatively affects salinity measurement accuracy.

The system utilizes an ultrasonic sensor capable of operating at depths up to 50 meters and transmits distance data to a PC via the RS-232 interface. The use of accessible and widely available components facilitates maintenance, reduces repair time in case of malfunction, and enhances the overall reliability of the CTD probe system.

The work has practical value — the developed solution, after refinement, can be implemented for environmental monitoring in the Baltic Sea or other water bodies.

ЗМІСТ

Вступ	7
1 Формулювання переліку вимог та розроблення системи	10
1.1 Опис приладу Sea-Bird SBE 19plus	13
1.2 Вибір сенсорної системи	18
1.3 3D-друк та вибір матеріалів системи	21
1.4 Пористість у 3D-друці	23
1.5 Бюджетний аудит	24
2 Розробка макету та опис комунікації системи	27
2.1 Розроблення корпусу та ізоляції	30
2.2 Вибір елементів системи та їх комунікація	33
2.3 Зв'язок ультразвукового датчика з Arduino	33
2.4 Комунікація з приводом двигуна	35
2.5 Розрахунок та вибір двигуна	37
3 Розроблення електричної схеми, програмування та тестування	40
3.1 Розробка системи керування	42
3.2 Програмування та опис роботи системи	43
3.3 Тестування сенсора	47
Висновки	56
Список використаної літератури	58
Додатки	60

Вступ

Розвиток океанографічних досліджень та моніторингу морських акваторій вимагає створення високоточних і надійних систем для збору гідрофізичних даних. Одним із найважливіших параметрів при дослідженні морських вод є температура, оскільки вона прямо впливає на щільність води, біологічні процеси та циркуляцію мас води. Для забезпечення високої точності вимірювання температури води в умовах змінного середовища необхідне використання комплексних автоматизованих систем збору даних.

Метою кваліфікаційної роботи є розробка інтелектуальної системи виявлення морського дна для інтеграції у склад CTD-зонда типу Seabird 19plus, яка дозволить забезпечити захист чутливих сенсорів під час занурення зонда в акваторії Балтійського моря.

Система повинна своєчасно визначати відстань до морського дна, приймати рішення про зупинку занурення при досягненні критичної межі (50 см або 3 м залежно від умов моря), передавати отримані дані на персональний комп'ютер через інтерфейс RS-232, а також адаптувати свою роботу до змін навколишнього середовища.

Реалізація поставленої мети дозволить підвищити надійність роботи CTD-зонда, зменшити ризики виходу з ладу дорогих сенсорів провідності та температури, а також забезпечити безперервний процес збору наукових даних для моніторингових досліджень у Балтійському морі.

Для досягнення поставленої мети **необхідно вирішити комплекс таких задач:**

1. Аналіз предметної області: провести огляд існуючих систем виявлення морського дна, методів захисту океанографічних приладів та вимог до проведення досліджень у морському середовищі. Особливу увагу приділити специфіці вимірювань у Балтійському морі, де відзначається висока мінливість турбулентності та замулення дна.

2. Вибір технічних засобів: підібрати відповідні ультразвукові сенсори, здатні працювати на глибинах до 50 метрів під тиском 5 бар, а також резервний сенсор тиску для дублювання вимірювань. Забезпечити відповідність вимогам щодо стійкості до агресивного морського середовища.
3. Розробка алгоритму роботи системи: створити алгоритм виявлення морського дна з можливістю перемикання порогових відстаней в залежності від стану моря: 50 см при спокійному морі та 3 метри при підвищеній турбулентності. Передбачити аналіз стану водного середовища на основі даних з ПК.
4. Проектування апаратної частини системи: розробити функціональну та принципову електричну схему підключення сенсора до мікроконтролера Arduino з організацією обміну даними з зондом.
5. Програмування контролера: створити програмне забезпечення для Arduino, яке буде відповідати за обробку сигналів сенсорів, прийняття рішень щодо зупинки зонда та передачу інформації до ПК.
6. Розробка системи зв'язку: реалізувати надійний обмін даними між мікроконтролером та персональним комп'ютером.
7. Проектування захисного кейсу: спроектувати корпус для захисту електроніки та сенсорів, розрахований на роботу під тиском до 5 бар, з урахуванням корозійної активності морської води та механічних навантажень.
8. Випробування: провести тестування окремих вузлів системи в лабораторних умовах, а також створити моделі функціонування системи у різних сценаріях роботи для підтвердження працездатності розробленої системи.

Об'єктом дослідження кваліфікаційної роботи є розроблення системи автоматичного виявлення морського дна та керування зупинкою зонда.

CTD-зонд є основним інструментом для вимірювання електропровідності, температури і тиску води, а отже, забезпечення його цілісності і точності даних є критично важливим для проведення якісних досліджень.

Предметом дослідження є система захисту CTD-зонда під час занурення від пошкодження, включаючи:

- використання ультразвукових сенсорів для безконтактного вимірювання відстані до морського дна,
- застосування сенсорів тиску як резервного джерела даних,
- розробку алгоритмів прийняття рішень на основі отриманих даних,
- побудову інтелектуальної системи управління зануренням CTD-зонда,
- проектування та реалізацію обміну інформацією між зондом та комп'ютером для оперативного прийняття рішень у реальному часі.

Результати дослідження можуть бути використані для підвищення надійності проведення моніторингових програм у Балтійському морі, а також адаптовані для використання в інших морських і океанічних дослідженнях.

1 Формулювання переліку вимог та розроблення системи

Таблиця 1.1 - Перелік вимог

Перелік вимог Виявлення дна Балтійського моря					
№р.	Тип (M, W)	Опис вимоги (квалітативний)	Вимірник (кількісний)	Джерело	Ста- тус
Геометрія					
1	M	Геометричні розміри	Менше 80 см	Клієнт	
2	M	Забезпечення монтажу	Надійне кріплення до рами ПТТ за допомогою кронштейнів або хомутів	Дослідження	
Сили					
3	M	Вага	До 12 кг	Клієнт	
4	M	Водонепроникність	щонайменше 5 бар тиску	Клієнт	
5	M	Питомий опір солоності	Мінімум 22 PSU на 40+ метрів	Дослідження	
Енергія					
6	M	Зовнішнє джерело живлення	9–28 VDC	Клієнт	
7	M	Температура	від 35°C до -5 °C	Клієнт	
8	M	Енергоспоживання	Найменше енергоспоживання(TBD)	Клієнт	
Матеріал					
9	M	Матеріал сенсорної системи морського класу	Морський клас, стійкий до іржі	Дослідження	
Сигнал					
10	M	Порт підключення	З'єднання датчика (J1 або J2 або J4)	Дослідження	
11	M	Комунікація	Послідовний протокол RS-232C як аналоговий сигнал (0 – 5 В постійного струму)	Клієнт	
12	W	Вихід датчика	1 порт для аналогового сигналу 0-5 VDC	Дослідження	
13	W	Вхід датчика	1 порт для 9-28 VDC	Дослідження	
14	M	Сумісність зі швидкістю передачі даних	9600 за замовчуванням або (600,1200,2400,4800,19200,38400,57600,115200)	Дослідження	
15	M	Швидкість збору даних	Мінімум 4 Гц	Дослідження	
Підтримка					
16	M	Стійкість до біобростання	Максимальний інтервал технічного обслуговування – 3 місяці	Клієнт	

Функціональність					
17	M	Поріг виявлення морського дна	0.5m +- 5cm	Клієнт	
18	M	Аварійне виявлення морського дна	3m	Клієнт	
19	W	Інтервал оновлення відстані	Періодичне оновлення відстані	Дослідження	
Використання					
20	M	Місце дислокації	Arkona Sea 54° 53.0' N, 13° 52.0' E	Клієнт	
Витрати					
21	M	Бюджет	€200.00	Клієнт	
Дедлайн					
22	M	Кінцевий дедлайн	08.05.25	Клієнт	

M- MUST (має бути)

W- WISHES (побажання)

1) Як створювався список вимог:

- Спочатку було проаналізовано технічну документацію CTD-зонда Seabird 19plus.
- Вивчено вимоги до роботи сенсорів у морському середовищі, особливо в умовах Балтійського моря.
- Проведений огляд типових ризиків (наприклад, забруднення сенсора при контакті з мулом) і сучасних методів їх запобігання.
- Враховано специфіку використання сенсорів і RS-232 комунікацій в системах збору даних.

2) Яка мета була поставлена при формуванні вимог:

- Забезпечити надійну роботу системи в реальних морських умовах.
- Мінімізувати ризики механічного пошкодження датчиків під час занурення.
- Забезпечити своєчасне виявлення дна і автоматичну зупинку занурення зонда.

- Передбачити адаптивну зміну поведінки системи залежно від морських умов (спокійне море / турбулентне море).

3) Основні категорії вимог:

- Функціональні вимоги:
Виявлення морського дна, обробка сигналів від сенсорів, зупинка занурення на визначеній відстані.
- Технічні вимоги:
Робота сенсорів на глибині до 50 метрів при тиску до 5 бар, передача даних через RS-232 інтерфейс.
- Конструктивні вимоги:
Наявність захисного кейсу для сенсорів та електроніки, стійкість до корозії в морській воді.
- Експлуатаційні вимоги:
Стабільна робота в умовах турбулентності, можливість адаптивного налаштування порогових відстаней (50 см або 3 метри).
- Програмні вимоги:
Реалізація обробки даних на базі платформи Arduino, забезпечення простого обміну з ПК через RS-232.

4) Список даних вимог є важливим, тому що:

- Він дозволяє чітко зрозуміти технічні завдання перед початком проектування.
- Дає змогу систематизувати розробку апаратної частини та програмного забезпечення.
- Допомагає заздалегідь врахувати ризики і забезпечити високу надійність системи в реальних умовах.

1.1 Опис приладу Sea-Bird SBE 19plus

Загальна характеристика:

Sea-Bird SBE 19plus SEACAT Profiler — це автономний океанографічний прилад, призначений для високоточного вимірювання провідності, температури та тиску морської або прісної води. Його використовують для вертикального профілювання водних мас або для стаціонарних спостережень у різних акваторіях, зокрема у Балтійському морі.



Рисунок 1.1 – Загальний вигляд приладу Sea-Bird SBE 19plus SEACAT Profiler

Основні функції і принцип роботи

Прилад SBE 19plus виконує такі основні функції:

- Вимірювання температури води з високою точністю ($\pm 0,005$ °C).
- Вимірювання електропровідності води для подальшого обчислення солоності.
- Вимірювання тиску водяного стовпа для визначення глибини.
- Передача даних у реальному часі через інтерфейс RS-232.

- Автономна робота з можливістю зберігання даних у вбудованій пам'яті (8 МБ Flash).

SBE 19plus працює в двох режимах:

- **Profiling mode** — режим профілювання при зануренні з постійною частотою сканування (4 Hz).
- **Moored mode** — режим стаціонарного моніторингу з налаштованим інтервалом збору даних (від 10 секунд до 4 годин).

Основні сенсори:

Таблиця 1.2 - SBE 19plus інтегровані сенсори

Сенсор	Параметр вимірювання	Діапазон вимірювань	Точність
Сенсор температури	Температура води	від -5°C до +35°C	±0,005°C
Сенсор провідності	Електропровідність води (S/m)	0 – 9 S/m	±0,0005 S/m
Сенсор тиску	Тиск води (strain-gauge датчик)	До 7000 м глибини	±0,1% шкали

Додатково до приладу можна підключити:

- Сенсори розчиненого кисню.
- Сенсори рН.
- Сенсори флуоресценції.
- Сенсори освітленості (PAR).
- Сенсори каламутності води.

Технічні характеристики

- **Інтерфейс зв'язку:** трипровідний RS-232 (9600 бод, стандартна конфігурація).
- **Живлення:** 9 батарей типу D або зовнішнє живлення 9–28 В постійного струму.
- **Пам'ять:** 8 МБ Flash, що дозволяє зберегти понад 700 000 вимірювань.
- **Автономність:** до 60 годин безперервної роботи на батареях.
- **Корпус:** пластик для глибин до 600 м або титан для глибин до 7000 м.
- **Вага:** ~7,3 кг із пластиковим корпусом, ~13,7 кг із титановим.

Спеціальні особливості

- **Підтримка реального часу:** можна отримувати дані безпосередньо на ПК під час місії.
- **Потужний насос SBE 5M:** забезпечує стабільний потік через сенсор провідності, що мінімізує спотворення даних (особливо під час руху зонда).
- **Гнучкість налаштувань:**
 - затримка увімкнення насоса,
 - мінімальна частота провідності для увімкнення насоса,
 - режими роботи насоса у стаціонарних вимірюваннях.
- **Захист даних:** при розряді основних батарей внутрішні літєві елементи зберігають пам'ять і час.

Робота із зовнішніми пристроями

Прилад SBE 19plus сумісний із:

- **SBE 32 Carousel Water Sampler** — синхронізований відбір проб води.
- **SBE 33/36 Deck Units** — для живлення та збору даних у реальному часі через довгі троси (до 10 000 м).

Дані можуть передаватися або через реальний час (RS-232), або записуватися у внутрішню пам'ять для подальшого зчитування.

Програмне забезпечення

У комплект постачання входять:

- **SEATERM** — комунікація і базові команди.
- **SEASAVE** — збір даних у реальному часі і візуалізація.
- **SBE Data Processing** — обробка даних і розрахунок похідних величин (солоність, швидкість звуку тощо).

Програми працюють на Windows 95/98/NT/2000/XP і мають зручні графічні інтерфейси.

Практичне застосування

Завдяки високій точності і автономності, SBE 19plus активно використовується для:

- Дослідження термохалінної структури води.
- Вивчення циркуляції водних мас.
- Оцінки процесів змішування вод.
- Екологічного моніторингу якості води в морях і океанах.

Особливо корисний при дослідженні акваторій із великою мінливістю солоності, таких як Балтійське море.

Можна зробити висновок, що **Sea-Bird SBE 19plus** — це надійний, точний і гнучкий океанографічний прилад для вимірювання провідності, температури та тиску води.

Завдяки підтримці реального часу, великій автономності та можливості підключення зовнішніх сенсорів, він ідеально підходить для тривалих дослідницьких місій в океанічних і прибережних акваторіях.

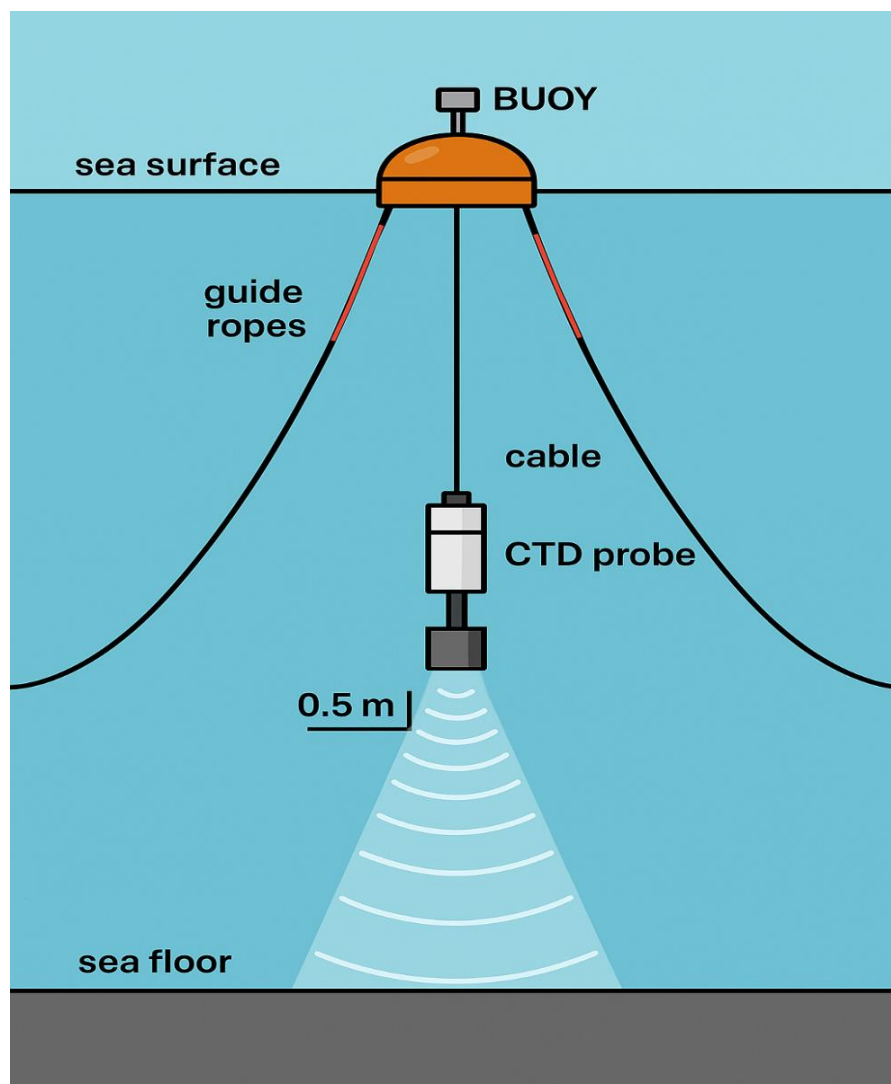


Рисунок 1.2 – Приблизний вигляд проектованої системи

На зображенні показано схему занурення CTD-зонда з буя. Зонд опускається на тросі вертикально вниз і зупиняється на висоті 0,5 м над морським дном, використовуючи ультразвуковий сенсор для визначення відстані. Буй утримується на місці за допомогою напрямних тросів.

1.2 Вибір сенсорної системи

Пошук найбільш підходящого підходу є вирішальною частиною для наступних кроків розроблення проекту.

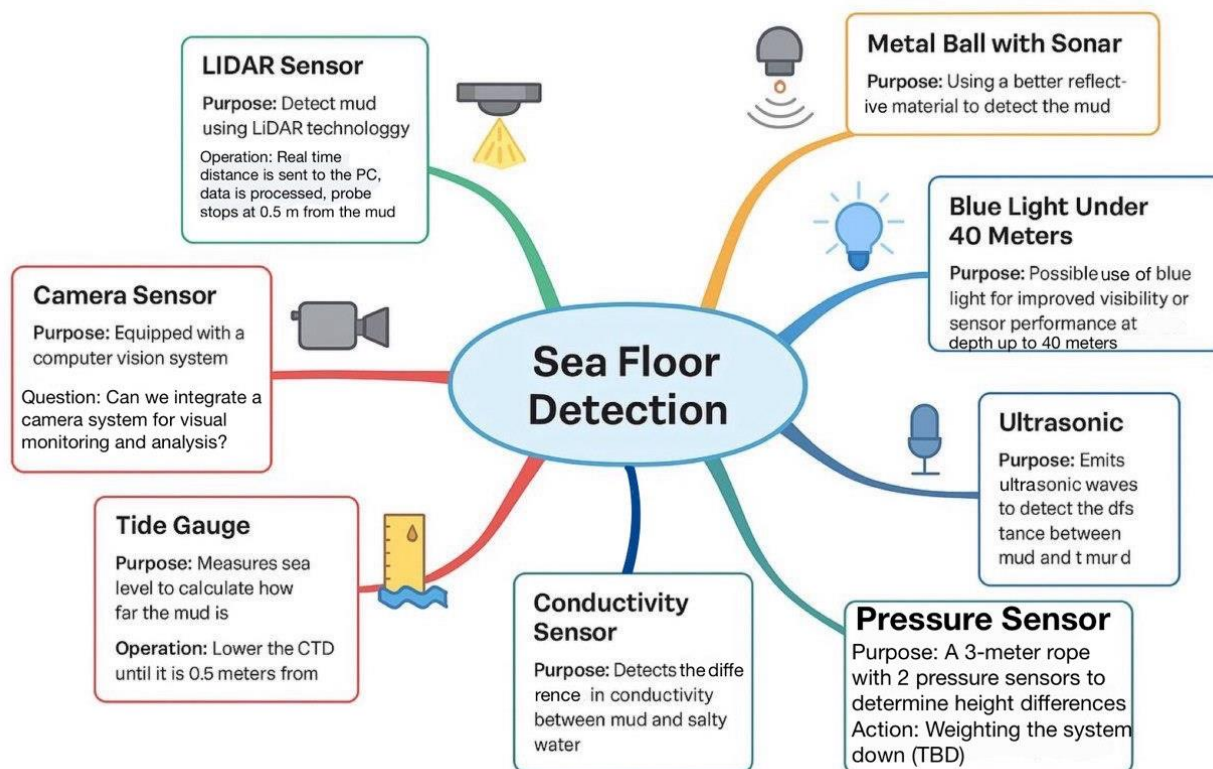


Рисунок 1.3 – Типові системи сенсорних систем для дослідження моря

Спочатку було відомо 9 потенційних ідей сенсорних систем. Після базової перевірки реальності, зосередженої на технічній здійсненності та початковій оцінці витрат, 4 ідеї були виключені перед тим, як перейти до формальної оцінки.

Щоб вирішити, який варіант сенсорної системи найкраще підходить для даної роботи, були визначені важливі критерії. Як видно з таблиці 1.3, при попарному порівнянні всі критерії порівнювалися між собою, щоб визначити, який з них є більш пріоритетним. Загальна кількість балів, отримана в результаті порівняння, була нормалізована за шкалою від 0 до 4, і ці значення були використані як ваги в оціночній матриці таблиці: Pairwise Matrix.

Таблиця 1.3 – Оціночна таблиця порівняння критеріїв

Criteria	Accuracy	Power Cons.	Cost	Ease of Imp.	Envir. Suitability	Reliability	Perf. Under Water	Detection Mud	Weight	Dimension, Size	Com. Channel	Biofouling Res.	Total	Normalized to 0 - 4
Accuracy	0	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	7	3
Power Consumption	1	0	1	1	0	1	0	1	1	0	0	0	6	3
Cost	0	1	0	1	0	1	0	1	1	1	1	1	7	3
Ease of Implementation	0	0	1	0	1	0	1	0	1	1	1	1	7	3
Environmental Suitability	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	0	0	4	2
Reliability	1	1	1	1	1	0	1	0	1	1	1	1	10	3
Performance Under Water	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	5	2
Detection Mud	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	11	4
Weight	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	3	1
Dimension, Size	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0
Communication Channel	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
Biofouling Resistance	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	4	2

Точно оцінивши кожен датчик, в роботі було проведене достовірне порівняння між 5 найкращими підходами. Оскільки ультразвуковий датчик отримав найвищий бал, можна було остаточно визначитися з вибором підходу.

Таблиця 1.4 – Порівняльна таблиця 5-ти найкращих підходів

Criteria	Weight	Conductivity + Pressure	Ultrasonic	Turbidity Sensor	OBS - Sensor	LIDAR Sensor	MAX Score
Accuracy	3	3	3	2	4	4	4
Power Consumption	3	3	4	4	3	3	4
Cost	3	0	3	4	1	0	4
Ease of Implementation	3	3	3	3	2	1	4
Environmental Suitability	2	4	3	2	4	3	4
Reliability	3	3	3	2	3	1	4
Performance Under Water	2	3	3	2	3	4	4
Detection Mud	4	3	3	2	3	3	4
Weight	1	4	4	3	3	3	4
Dimension, Size	0	4	4	3	3	3	4
Communication Channel	0	4	4	2	2	1	4
Biofouling Resistance	2	3	4	2	2	2	4
Total Score		72	84	68	72	60	104

Таблиця 1.5 – Умовні позначення вагового коефіцієнта та критерію виконання

Legend for weighting factor:	GF	Legend for Fulfillment:	EFG
No influence	0	Criterion not met	0
Little influence	1	Met to a limited extent	1
Medium influence	2	Met to medium extent	2
Mediocre influence	3	Well met	3
Great influence	4	Fully met	4

Таким чином, було вирішено для вибору сенсорів системи в подальшому базуватися на наступних підходах.

Датчик провідності:

Підхід ґрунтується на різниці провідності між солоною водою та брудом. Це дуже надійний метод виявлення зміни опору між 2 провідними стрижнями. Це можна зробити навіть безконтактно, використовуючи чутливе магнітне поле.

Ультразвуковий датчик:

Ультразвуковий датчик був запропонований для цього проекту через його здатність проводити вимірювання під водою та в каламутному середовищі. Ультразвукові датчики є енергоефективними, механічно простими і виводять аналоговий сигнал, що відповідає всім вимогам проекту. Окрім цих специфікацій, інформація, надана місцевою рятувальною службою, свідчить про те, що датчики, які використовуються в рятувальних човнах для виявлення дна річок та озер, є ультразвуковими.

Як видно з таблиці оцінки змінних, ультразвуковий датчик був обраний через його перевагу за всіма параметрами над іншими датчиками.

OBS (Optical Backscatter Sensor) – це оптичний сенсор, що вимірює каламутність води, фіксуючи розсіювання світла на зважених частках.

Для детекції морського дна OBS-сенсор працює непрямо: коли прилад наближається до дна, кількість завислих часток різко збільшується (внаслідок

наявності мулу чи осаду біля поверхні дна), що проявляється у зростанні каламутності води. Таким чином, різке збільшення показань OBS може сигналізувати про наближення до морського дна. Проте слід пам'ятати, що OBS-сенсор не визначає пряму відстань, а лише зміну концентрації завислих часток. Тому зазвичай його використовують як додатковий або допоміжний пристрій разом з іншими датчиками (наприклад, ультразвуковими або тисковими сенсорами).

Датчик каламутності:

Турбідиметр вимірює каламутність води, спричинену зваженими частинками, шляхом розсіювання світла від інфрачервоного світлодіода (IR-LED). Датчики каламутності, які можна зробити своїми руками, відрізняються доступністю і можливістю моніторингу в реальному часі. Однак вихідні дані мають нелінійну залежність від каламутності і потребують частого калібрування в морських умовах. Він непогано виявляє каламутні місця, але не може виміряти відстань між зондом і морським дном.

LIDAR:

Датчик забезпечує точні вимірювання і може охоплювати великі площі. Використовуючи належний датчик LIDAR для підводного виявлення, він може добре працювати в темряві і зможе виявити мулистий шар Балтійського моря. Однак датчик LIDAR дуже дорогий і вимагає високої обчислювальної потужності для обробки великих обсягів даних, що надходять з нього.

1.3 3D-друк і вибір матеріалів сенсорної системи

При проектуванні занурюваного корпусу необхідно враховувати кілька важливих факторів. Це величезний підводний тиск, корозійна природа морської води та шкідливе сонячне ультрафіолетове випромінювання.

Крім того, сенсорна система знаходиться у віддаленому місці, це запобігає частому технічному обслуговуванню, і система не повинна втратити свою довговічність. Корпус повинен витримувати корозійний вплив морської води.

Через ці виклики вибір матеріалу стає ключовим кроком у процесі проектування. Пластмаси, такі як полівінілхлорид (ПВХ) або полікарбонат, мають кращу корозійну стійкість і є легкими, але можуть не витримувати високого тиску на великій глибині. Нещодавні досягнення в галузі 3D-друку відкрили нові можливості, дозволяючи створювати нестандартні форми і швидко створювати прототипи з таких матеріалів, як поліетилентерефталатгліколь (ПЕТГ) або акрилонітрил-бутадієн-стирол (АБС).

Тематичне дослідження та аналіз.

Аддитивне виробництво (АМ) широко використовується сьогодні, пропонуючи покращену роздільну здатність і точність 3D-друкованих деталей за допомогою різних технологій друку і широкого спектру матеріалів. Хоча АМ не є новим для підводного співтовариства, воно часто використовується для виробництва невеликих деталей конструкцій.

Дослідники з інженерного факультету Університету Уейк Форест і компанії Carbon, Inc. провели тематичне дослідження 3D-друкованого підводного корпусу. Використовуючи цифровий світловий синтез (DLS) з полімерною смолою EPX 82, вони досягли глибини приблизно 33 метри (100 футів) без потрапляння води під час тестування. Подальші випробування в місцевому озері підтвердили водонепроникність на глибині до 30 метрів. [1] На додаток до тематичного дослідження, Forerunner 3D також провела масштабні випробування 3D-друкованих посудин під тиском, щоб визначити їх максимальний тиск. Сюди входять циліндричні трубки, надруковані на різних принтерах і з різних матеріалів. Наприклад, нейлонова (MJF) частина циліндра, надрукована за допомогою системи Multi-Jet Fusion від HP, досягла максимального тиску 662 PSI (45,64 бар) при товщині стінки 2,5 мм. [2]

Через бюджетні обмеження та обмежену доступність матеріалів для цього дослідження було доступно лише кілька варіантів. Доступними принтерами

були Bambulab X1 Carbon, Prusa XL та Raise 3D Pro2. Доступними матеріалами були PLA NX2 MATT [3] та GREENTEC PRO [4], обидва матеріали з екструдера. Після ретельного порівняння їх властивостей було обрано GREENTEC PRO, оскільки він має кращі характеристики.

1.4 Пористість у 3D-друку

У процесі друку можуть утворюватися мікроскопічні тріщини або порожнечі. Вони називаються порами, а незаповнений об'єм, який вони створюють, називається пористістю. Ці порожнечі виникають через те, що розплавлена нитка застигає швидше, ніж матеріал може з'єднатися, а також через термічну усадку і недосконале осадження. Як наслідок, 3D-друк виходить слабшим за оптимальну якість.

Вирішенням цієї проблеми є оптимальна температура сопла. В опублікованій науковій статті [5] було досліджено, як температура сопла впливає на міцність 3D-друкованих деталей з ПЛА, виготовлених за допомогою моделювання плавленого осадження. Метою було знайти найкращу температуру друку для цих деталей, щоб вони добре працювали під різними типами навантажень. Дослідники протестували деталі на розтягнення, згинання та стиснення.

Щоб зрозуміти поведінку при стисненні, зразки стискали у випробувальній машині зі швидкістю 1 мм/хв. Вимірювали прикладену силу і те, наскільки матеріал змінив форму. На основі цих вимірювань дослідники визначили міцність матеріалу на стиск і жорсткість. Результати показали, що міцність і жорсткість матеріалу на стиск зростали з підвищенням температури приблизно до 220 °C. Вище цієї температури, до 260 °C, міцність залишалася приблизно такою самою. Це означає, що друк при температурі від 220°C до 260°C дає найкращі результати для деталей, які повинні витримувати тиск

води. На рисунку 1.5 показано один з результатів тесту на стиск з дослідницької роботи [5].

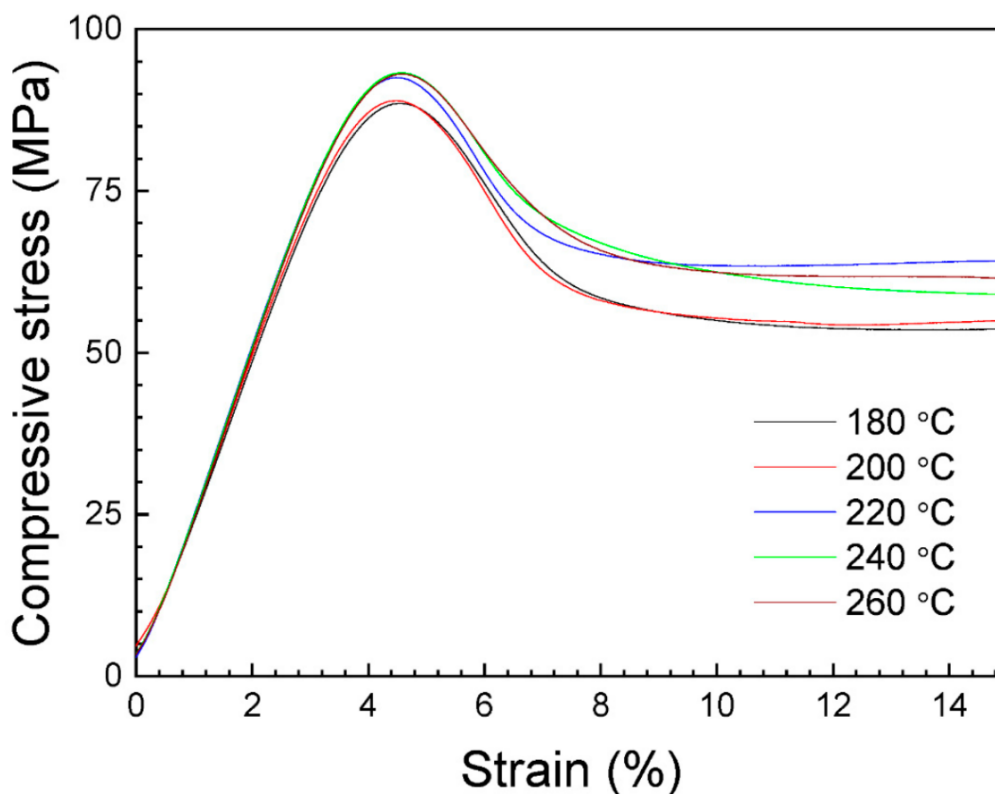




Рисунок 1.5 – Репрезентативні криві напружено-деформованого стану за результатами випробування на стиск

1.5 Бюджетний аудит

Кожен прототип має ліміт бюджету, це допомагає дотримуватися реалістичних заходів та обмежень для прототипів і оцінювати їхню здійсненність. Проект системи виявлення дна Балтійського моря мав ліміт у 200 євро. Це включає, але не обмежується датчиком, корпусом, утримуючим механізмом, ардуїно, варіантом ізоляції та з'єднанням з STD-зондом. Короткий опис елементів системи приведений в таблиці 1.6.

Таблиця 1.6 – Перелік, вигляд та вартість використаних матеріалів

Вигляд продукту	Назва	Ціна Inc. VAT
	GreenTec Pro	17,5€
	2.5x100mm Застібки	1.03€
	PCB Prototype Board	3.45€
	22µf Конденсатор	0.25€
	1kΩ Резистор	0.99€
	SKU:SEN0599	43.94€
	Arduino Nano Every	16.00€

	West System Epoxy Resin Junior Pack 105-206	48.96€
Усього	-/-	132.12€

З таблиці можна побачити, що всі витрати були в межах бюджетного ліміту, що відповідає загальному Переліку вимог.

Висновок до розділу

У цьому розділі було сформульовано чіткий перелік вимог до розробки системи автоматичного контролю глибини занурення STD-зонда з урахуванням умов експлуатації в Балтійському морі. На основі аналізу технічної документації, специфіки середовища, конструкційних і експлуатаційних факторів сформовано вимоги до геометрії, енергоживлення, функціональності, типу сигналу та матеріалів. Проведено порівняльну оцінку різних типів сенсорів, що дозволило обґрунтовано обрати ультразвуковий датчик як основний елемент системи виявлення морського дна. Крім того, були розглянуті альтернативні технології, зокрема OBS та LIDAR, які можуть бути використані як допоміжні засоби в майбутніх версіях системи. Окрема увага була приділена вибору матеріалів та технології 3D-друку з урахуванням водонепроникності, стійкості до тиску та корозії. Бюджетний аналіз показав, що всі основні компоненти були закуплені в межах встановленого ліміту, що підтверджує техніко-економічну доцільність обраного підходу. Отже, на цьому етапі було закладено фундамент для успішної реалізації подальших етапів проєкту.

2 Розробка макету та опис комунікації системи

Для того, щоб візуалізувати різні підходи на кожному етапі розробки проекту, зазвичай дуже корисно мати візуальне представлення всієї системи.

Перше завдання полягало в підготовці опису системи, який узагальнював весь проект. Паралельно з цим було розроблено креслення системи, щоб зробити її більш доступною для всіх інтеграторів [10].

Опис системи був визначений наступним чином:

– Система складається з буя, закріпленого на морському дні, спроектованого таким чином, щоб залишатися стабільним, незважаючи на течії та хвилі. Буй оснащений сонячними панелями і промисловим ПК для живлення та обробки даних.

– Зонд CTD, зазвичай розміщений у захисній оболонці, використовується для вимірювання провідності, температури та глибини. Дані передаються через з'єднання RS-232 для моніторингу в режимі реального часу. Система призначена для тривалої автономної роботи, стійка до біобростання і тиску води.

Опис завдання було поширено таким чином:

Здатність виявляти дно Балтійського моря і зупинятися в 0,5 метрах від нього. З точністю ± 5 см. Необхідно, щоб енергоспоживання системи було мінімальним, а міжсервісний цикл становив до 3 місяців. Бажано мати можливість також зупинятися на відстані 3 метрів під час «аварійного» протоколу.

У цьому ж документі з кресленням відображені розміри та роз'єми торцевих заглушок, щоб візуально краще зрозуміти величину зонда і мати під рукою з'єднання, які будуть використовуватися для підключення датчика до зонда CTD.

Drawing of the system:

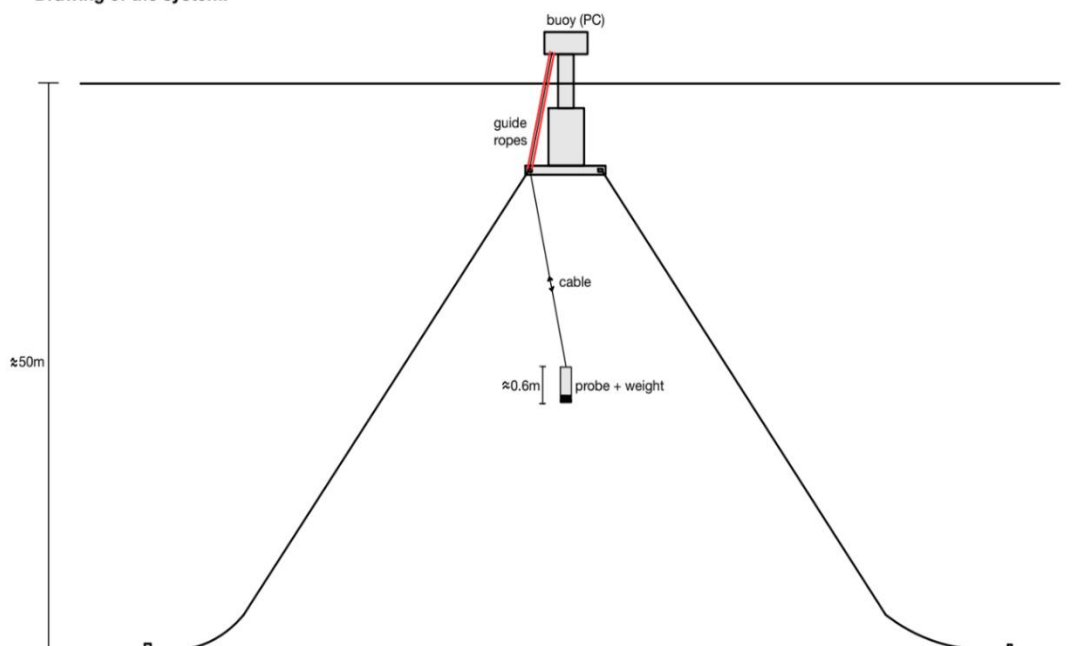


Рисунок 2.1 – Схематика системи

Dimensions in millimeters (inches)

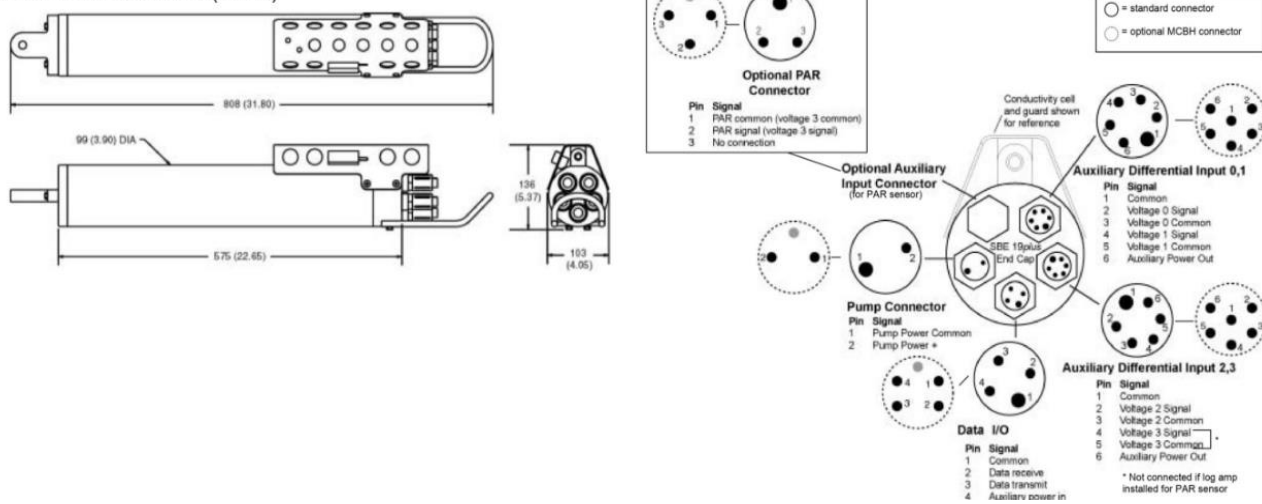


Рисунок 2.2 – Розміри та роз'єми торцевих заглушок зонда CTD

Після того, як було розроблено креслення та опис системи і правильно визначено завдання, побудову схем було призупинено до розробки першої концепції продукту.

Third solution approach sketch:

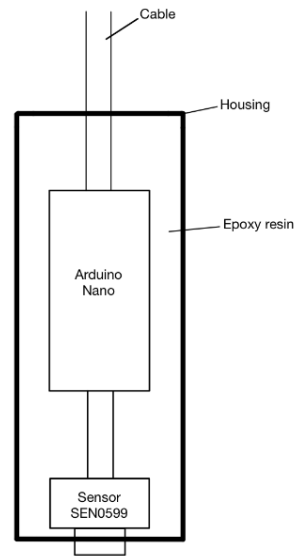


Рисунок 2.3 – Схема макету

В результаті проведених досліджень було вирішено прийняти таку схематику (рис. 2.3). Було намальовано достатньо просту схему, вона є дешевою та легкою у відтворенні.

Після того, як було зроблено креслення остаточного ескізу, потрібно було знайти найраційний спосіб прикріплення датчика до зонда ГНКТ. Було знайдене достатньо дешеве, але надійне рішення, використовуючи застібки-блискавки для закріплення датчику на захисному кожусі комірці провідності через їхні отвори.

Схема кінцевого продукту, прикріпленого до зонда STD, приведена на рис. 2.4 (червоним намальовано запропоноване рішення).

Final drawing with the solution attached to the side
(In the conductivity cell guard) of the CTD Probe:

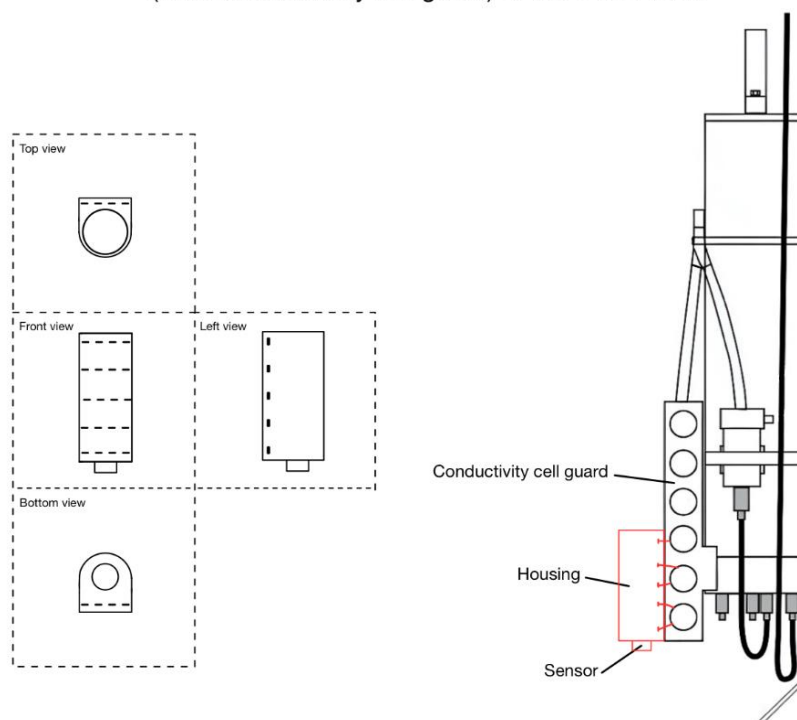


Рисунок 2.4 – Кінцевий продукт (сенсор), прикріплений до зонда CTD

2.1 Розроблення корпусу та ізоляції

При розробленні корпусу необхідно було враховувати його ключову особливість - ремонтпридатність.

Ідея полягає в тому, щоб розмістити всі компоненти всередині корпусу, а дроти вивести назовні. Це забезпечує надзвичайно високий захист від зовнішніх умов, а відсутність повітряної кишені всередині зменшує вплив циклічних перепадів тиску.

Ремонтпридатність показує, що клієнт не може замінити дефектні компоненти у разі несправності. Це змусить його замінити всю систему в разі виходу з ладу, але ключовим моментом тут є те, що компоненти будуть повністю ізольовані від зовнішнього середовища і не матимуть жодних проблем з роботою протягом їхнього передбачуваного життєвого циклу.



Рисунок 2.5 – Нейтральний до тиску корпус

Крім того, цей дизайн надає нам простий і дешевий спосіб монтажу. Використовуючи застібки-блискавки шириною 2,5 мм, встановлені перед нанесенням шарів епоксидної смоли. Цей метод кріплення забезпечує дуже гнучкий і багатофункціональний спосіб монтажу. Він може з'єднуватися за допомогою 5 застібок-блискавок, які можуть бути будь-якої довжини і легко підтримувати вагу прототипу, а також не є обтяжливим для STD-зонда.



Рисунок 2.6 – Застібки 2.5x100mm з

Розроблення ізоляції

Задача розроблення ізоляції була введена в процесі розробки дизайну корпусу. По мірі розробки основна увага приділялася ізоляційним властивостям використовуваної суміші. Було необхідно знайти гнучкий матеріал, який пропонує розумну деформацію без розтріскування і впливу на компоненти всередині нього. При цьому необхідно було переконатися, що це не вплине на електричні ланцюги елементів і не призведе до непотрібних

коротких замикань, які зроблять даний прототип непрацездатним. В результаті перегляду матеріалів та їх аналізу було вирішено, що морська смола/епоксидна смола є підходящим ізоляційним матеріалом. Обрано епоксидну смолу West System Epoxy.



Рисунок 2.7 – Епоксидна суміш West System Junior Package

Ця епоксидна смола є відомою торговою маркою і добре відома в ізоляційних роботах на човнах і в простих підводних роботах. Наявність дуже надійної і добре перевіреної епоксидної смоли стала важливою для фінального дизайну корпусу.



Рисунок 2.8 – Завершений прототип

Висновок до підрозділу. Підхід до розроблення корпусу пройшов кілька ітерацій, щоб знайти найбільш підходящий варіант. В результаті ми отримали корпус з дуже маленькими габаритами. Використання простих і легкодоступних 3D-принтерів та матеріалів дозволяє друкувати конструкції з низькою роздільною здатністю, оскільки виконує функцію «форми» для епоксидної смоли. Форма також забезпечує неінвазивний і гнучкий підхід до монтажу. Нарешті, головним фактором є використана морська епоксидна смола West System, яка забезпечить структурну підтримку та водонепроникність прототипу, водночас захищаючи електричний ланцюг від несправностей.

2.2 Вибір елементів системи та їх комунікація

Комунікація - важливий аспект будь-якого технічного проекту. Це те, як системи спілкуються між собою. Для скоординованої роботи дані та сигнали надсилаються між різним обладнанням за допомогою відповідного протоколу зв'язку. Цей протокол гарантує, що всі системи синхронізовані, а обмін даними між датчиками надійний.

2.3 Зв'язок ультразвукового датчика з Arduino

Зв'язок датчика з програмним комплексом Arduino встановлюється за допомогою послідовного зв'язку UART з використанням Tx/Rx. І датчик, і Arduino працюють на напрузі 5 В, що робить їх електрично сумісними.

Зв'язок відбувається зі швидкістю 115200 біт/с. Arduino передає байт запуску, а датчик відповідає 4-байтовим сигналом, що містить виміряну відстань і контрольну суму, як показано на рис. 2.9.

Interface	Baud rate	Data bit	Stop bit	Check bit
UART	115200bps	8	1	None

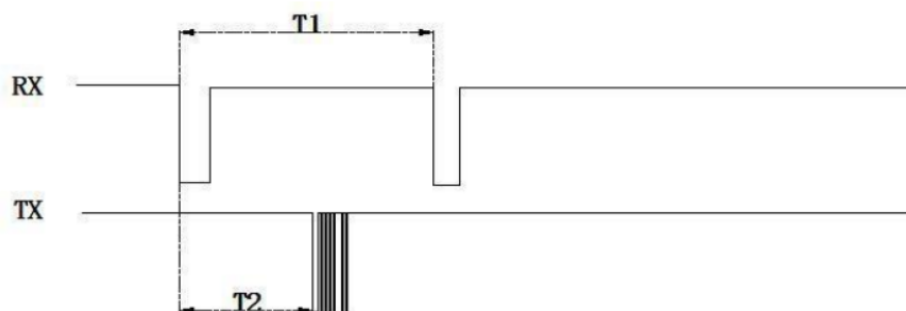


Рисунок 2.9 – Часова діаграма UART-зв'язку ультразвукового датчика

Після глибокого дослідження входів і виходів зонда було виявлено, що використовуються не тільки входні порти RS232, але й те, що зонд здатен приймати аналоговий входний сигнал. Отримавши підтвердження від замовника, було вирішено змінити підхід до аналогового виходу. Це може спростити систему і зробити її ще більш компактною, ніж вона була.

У цьому підході вихід безпосередньо береться з одного з аналогових виводів плати Arduino. До Arduino підключається кабель з 4-ма проводами.

Таблиця 2.1 – Підключення Arduino

Підключення	Колір кабеля	Напруга	Опис
GND	Чорний	-	заземлення
VCC	Червоний	12V	Джерело живлення
Output1	Білий	0V-5V	Вихід: 5V - 0.5m 3.3V - 3m
Output2	Жовтий	-	Не використовувалось

2.4 Зв'язок системи з приводом двигуна

Розглянемо основні елементи розробленої системи та їх призначення.

Комп'ютер (підключається через DB9 роз'єм)

Надсилає команди 'U' (Up), 'D' (Down), 'S' (Stop) по RS-232. Ці сигнали йдуть через роз'єм DB9 на мікросхему MAX232.

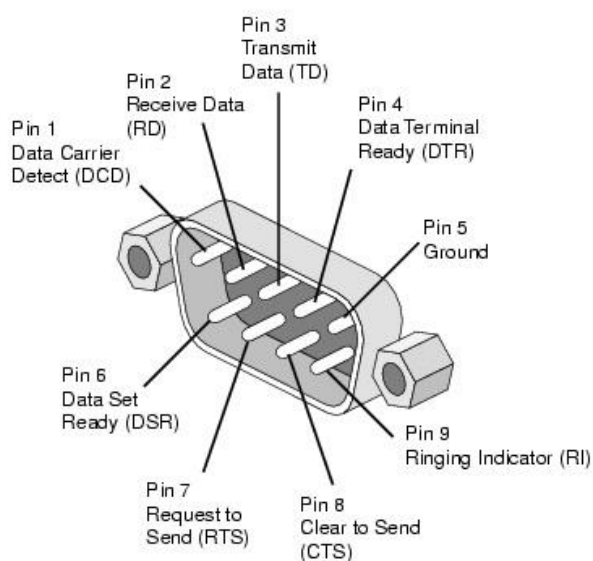


Рисунок 2.10 – 9-контактний роз'єм DB9 для підключення двигуна

U- 01100011 вниз

D- 00011101 вгору

S- 01000000 стоп

Таблиця 2.2 – Опис команд

Команда (десятковий код)	Двійковий код (8 біт)	Напрямок	Швидкість
99	01100011	Вниз	Оптимальна
64	01000000	Стоп	0
29	00011101	Вгору	Оптимальна

Мікросхема MAX232

Це мікросхема (рис. 2.11), яка конвертує RS-232 сигнали ($\pm 12\text{V}$) у сигнали TTL-рівня (0–5 В), які зрозумілі для Arduino. Використовує 4 конденсатори для зарядного насосу (charge pump). Вихідний сигнал з R1OUT надходить на RX (D0) Arduino Uno.

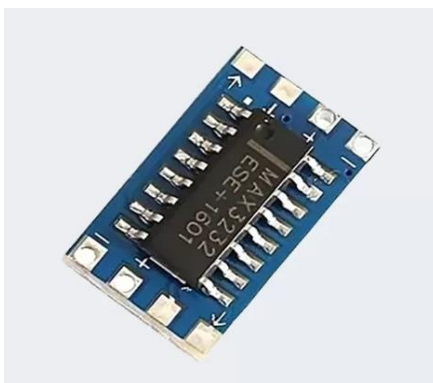


Рисунок 2.11 – Мікросхема MAX232

Arduino Uno

Приймає команду з комп'ютера через RX (D0).

Обробляє команду: 'U' — рух вгору 'D' — рух вниз 'S' — зупинка

Через пін D6 (SoftwareSerial TX) надсилає керуючий сигнал у форматі Simplified Serial до S1 на Sabertooth.

LM2596S-12 (Step-down buck converter)

Ця мікросхема є понижуючим регулятором напруги (рис. 2.12).

- Приймає живлення від загального джерела 9–28 VDC;
- Знижує його до 12 V та подає на VIN Arduino Uno;
- Забезпечує стабільне живлення Arduino.



Рисунок 2.12 – Понижувальний регулятор напруги LM2596S-12

Блок Sabertooth 2x60 - Привод двигуна або модуль керування двигуном

- Отримує живлення напругу з того ж джерела (9–28 VDC) через V+ і V–;
- Приймає серійну команду з Arduino на пін S1;
- Керує двигуном через порти M1A і M1B . Напрямок та швидкість руху залежить від прийнятої команди;
- Пін 0V з'єднаний з GND Arduino — обов'язкова спільна «земля».



Рисунок 2.12 – Блок Sabertooth 2x60

2.5 Розрахунок та вибір двигуна і системи опускання зонда

Проведемо вибір двигуна.

Вихідні дані для розрахунку:

- Маса зонда з конструкцією: 14 кг
- Глибина занурення: 50 м
- Живлення двигуна: 24 V DC
- Потужність двигуна: 80 Вт
- Тип двигуна: Makermotor з редуктором (DC Worm Gear Motor)
- Передача: редуктор інтегрований

Проведемо розрахунок необхідної потужності двигуна, для чого спочатку визначаємо силу тяжіння:

$$G = m \cdot g = 14 \text{ кг} \cdot 9.81 \text{ м/с}^2 = 137.34 \text{ (Н)} . \quad (2.1)$$

Крутний момент на барабані (тут $r = 0,05 \text{ м}$ – радіус барабана):

$$M = F \cdot r = 137.34 \cdot 0.05 \text{ м} = 6.87 \text{ (Н} \cdot \text{м)} . \quad (2.2)$$

Беремо коефіцієнт запасу K_z рівним 1.5. З урахуванням цього, маємо:

$$M_{\text{ном}} = M \cdot K_z = 6.87 \cdot 1.5 = 10.3 \text{ (Н} \cdot \text{м)} . \quad (2.3)$$

Розраховуємо потрібну потужність двигуна (припустимо бажану швидкість підйому V рівною 0.3 м/с):

$$P_{\text{потр}} = F \cdot V = 137.34 \cdot 0.3 = 41.2 \text{ (Вт)} . \quad (2.4)$$

Вибираємо двигун типу **MakerMotor PN01007-100 (24 V DC)** потужністю з запасом — 80 Вт, що значно перевищує необхідне, отже:

- двигун не буде працювати на межі;
- буде достатній момент при будь-якому можливому в морських умовах навантаженні;
- конструкція буде стійкою до перевантаження.

Вибір редуктора не потрібний, тому що характеристики двигуна задовольняють нашу задачу.

- Висота підйому: 50 м,
- На 1 оберт барабана ($\varnothing 10 \text{ см}$) піднімається $\sim 0.314 \text{ м}$ кабелю.

Потрібно:

$$N = H / r_i \cdot D = 50 \text{ м} / 0.314 \text{ м/об} \approx 159 \text{ обертів барабана}$$

Тобто, для підйому на 50 м:

- при швидкості обертання 60 об/хв — потрібно часу $\sim 2.6 \text{ хв}$ ($\approx 156 \text{ с}$).

Це прийнятно для практичного занурення/підйому.

Таким чином, обраний двигун MakerMotor 24V, 80Вт із вбудованим черв'ячним редуктором повністю відповідає задачі опускання зонда:

- Створює достатній момент з запасом (понад 10 Н·м)
- Має низькі оберти, що дозволяє без додаткового редуктора
- Потужність у кілька разів вища, ніж необхідна.

Двигун підключаємо до виходів M1A і M1B. Він реагує на команди Arduino через Sabertooth. Здатний до реверсування (піднімає вантаж вгору, вниз, або зупиняється).



Рисунок 2.13 – Двигун типу MakerMotor, 24 V DC

Типовий цикл роботи системи:

1. Користувач натискає кнопку або надсилає 'U' з ПК.
2. Команда передається по каналу «RS-232 → MAX232 → Arduino».
3. Arduino розпізнає 'U' і надсилає `Serial.write(64 + 50)` на блок Sabertooth.
4. Sabertooth починає обертати мотор в напрямку "вгору".
5. 'S' з ПК — Arduino надсилає `Serial.write(64)` — двигун зупиняється.

3 Розроблення електричної схеми, програмування та тестування

Усі компоненти розміщені в корпусі (описане вище). Було розроблено електричну схему, яка показує компоненти та взаємозв'язки схеми. Ця схема використовується для побудови обладнання і може бути використана для обслуговування електричного та електронного обладнання.

Двома основними компонентами є Arduino та Sensor, які на кресленні показані в корпусі (рис. 2.4). Входи і виходи позначені, а з'єднання показані різними кольорами.

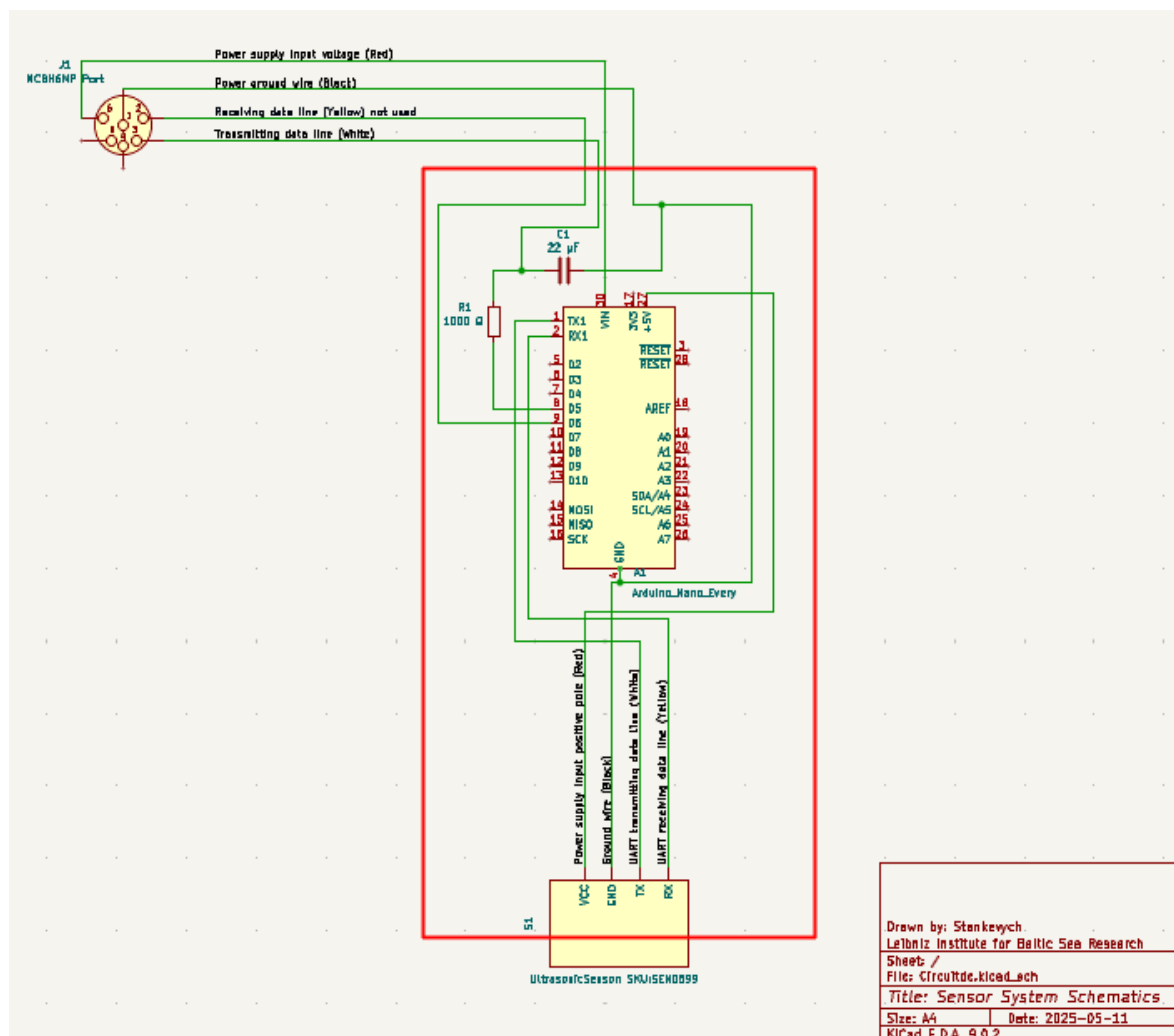


Рисунок 3.1 – Схема підключення основних елементів системи

Блок Arduino Nano Every був обраний для даної розробки з сімейства Arduino Nano через його компактний дизайн. Мікроконтролер може сприймати напругу до 21 В, але в нашому випадку датчик може забезпечити напругу близько 10,5–11 В, і Arduino працює з ефективністю понад 85% при такій напрузі.

Жовтий кабель прийому даних від датчика до зонду присутній, проте він не запрограмований на будь-який вхід. Тим не менш, майбутні прототипи можуть використовувати і цю лінію.

Кабель датчика при підключення виявився занадто довгим, щоб поміститися в корпусі, тому його було обрізано. Решта кабелю була перероблена і знову використана для з'єднання між сенсорною системою і зондом. Кабель залишили відкритим, оскільки порт підключення датчика J1 використовує фірмове з'єднання, а саме MСВН6МР. Це дороге з'єднання, і кінець дроту потрібно було залишити відкритим.

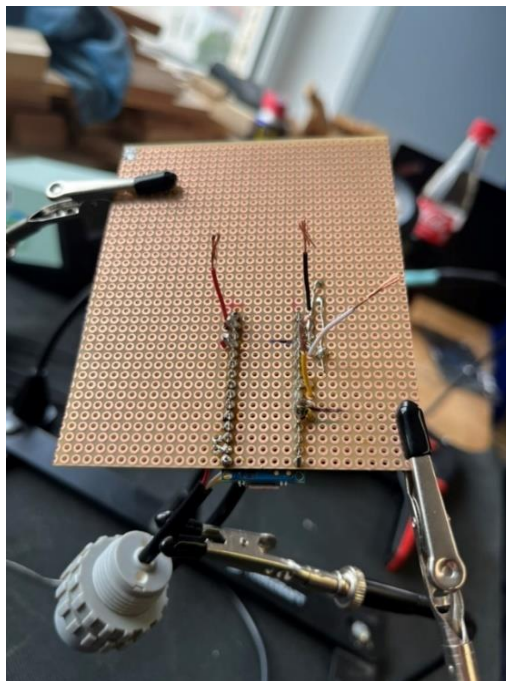
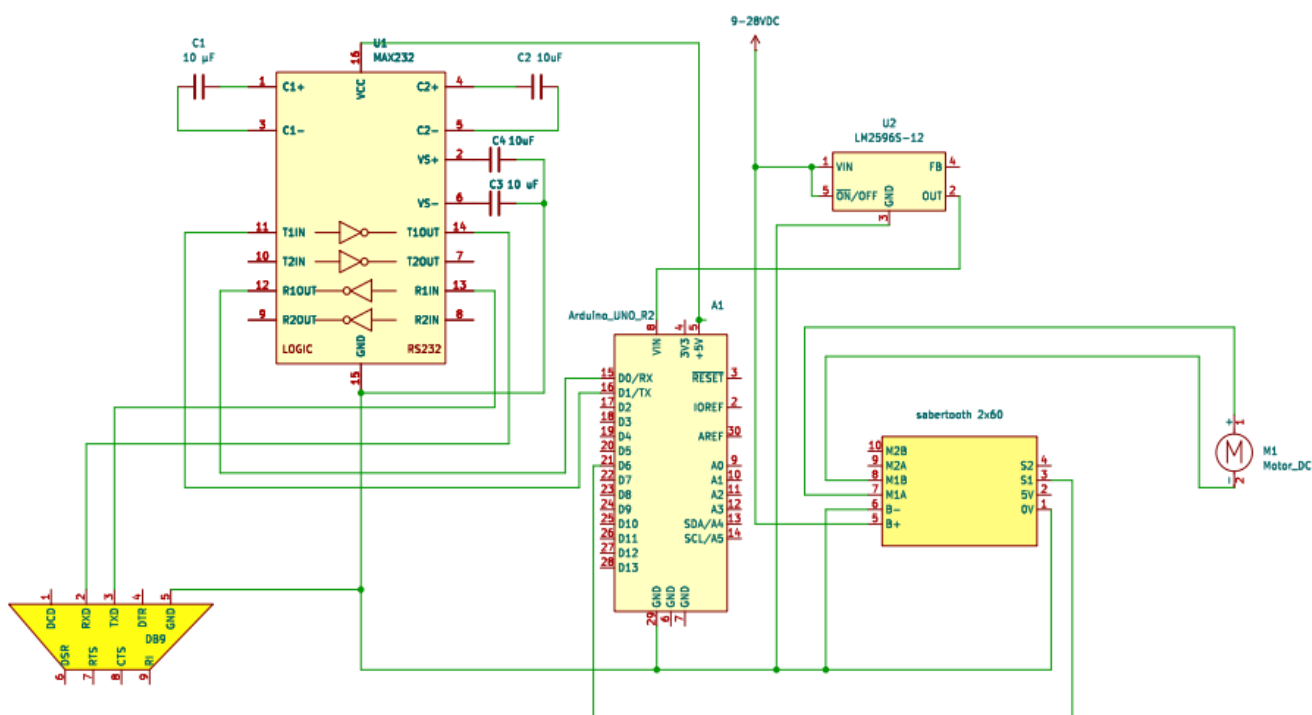


Рисунок 3.2 – Процес паяння системи

3.1 Розроблення системи керування

Одним із завдань роботи було розроблення системи керування двигуном для опускання зонда, що включала створення програми для Arduino, реалізацію зв'язку з комп'ютером через протокол RS-232, розробку електричної схеми та налаштування передавання команд у форматі Simplified Serial до драйвера Sabertooth.

Система керування повинна забезпечувати надійне керування напрямком і швидкістю обертання двигуна на основі команд «вгору», «вниз» та «стоп», отриманих з комп'ютера.



Sheet: /
 File: motor_connection.kicad_sch
 Title: Stankevych motor control

Рисунок 3.3 – Схема керування електродвигуном

3.2 Програмування та опис роботи системи

Flowchart:

Щоб отримати чітке уявлення про логіку та робочий процес системи, було почато зі створення блок-схеми. Було ретельно розписано кожен крок, починаючи з того, як датчик збирає дані, і закінчуючи тим, як сигнал фільтрується і надсилається на комп'ютер. Схема ілюструє, як має поводитися система (надсилати 0,5 м чи 3 м), і які дії вона запускає, надсилаючи/приймаючи/перевіряючи. Створення блок-схеми допомогло виявити потенційні проблеми на ранній стадії і визначило структуру коду, який було написано пізніше.

Для забезпечення надійності аналогового сигналу, що надсилається з Arduino на ПК, реалізовано фільтр низьких частот. Оскільки сигнал генерується за допомогою ШІМ (широтно-імпульсної модуляції), він містить високочастотний шум, який може призвести до неточних або нестабільних показань.

Фільтр низьких частот був введений для згладжування цих коливань, відфільтровуючи високочастотні компоненти і залишаючи тільки стабільний, усереднений сигнал. Таким чином, комп'ютер отримує чисту і стабільну аналогову напругу, яка точно відображає виміряну відстань. Без фільтра аналоговий вхід міг би бути занадто зашумленим, щоб задовольнити вимоги системи до точного контролю глибини занурення зонда [6].

Маємо такі вхідні параметри: $R = 1 \text{ k}\Omega$, $C = 22 \text{ }\mu\text{F}$, тоді частота

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{2\pi \cdot 1000 \cdot 22 \times 10^{-6}} \approx 7.23 \text{ Hz} \quad (3.6)$$

Він дуже легко згладжує ШІМ 62,5 кГц у постійний струм.

Ultrasonic sensor FLOWCHART MODEL

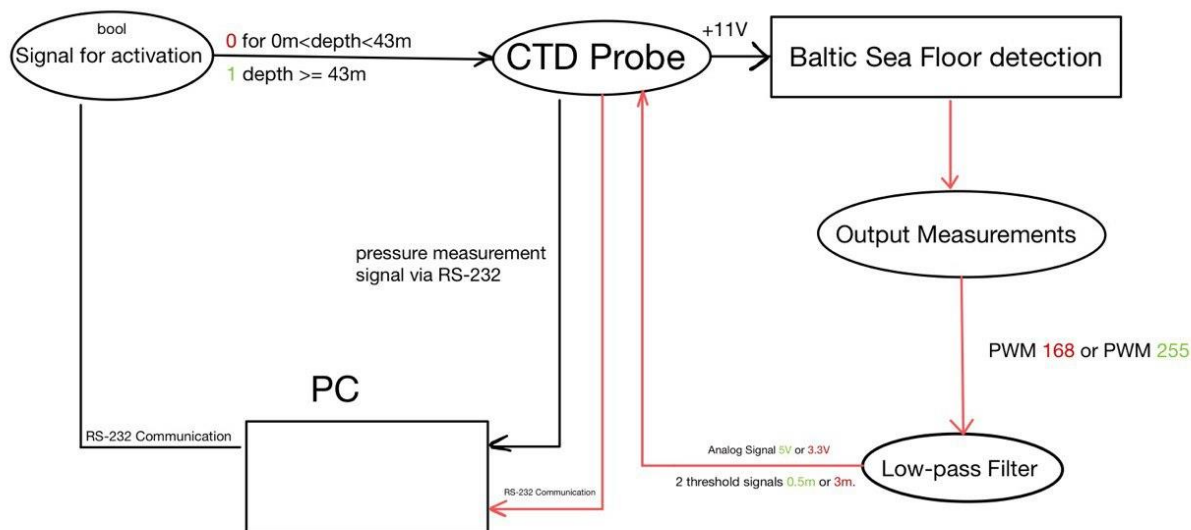


Рисунок 3.4 - Блок-схема

Під час роботи над блок-схемою було додано новий етап, який пов'язаний з використанням датчика тиску, вже інтегрованого в зонд СТД. Ідея полягала в тому, щоб використовувати сигнал датчика тиску як тригер для активації ультразвукового датчика. Оскільки датчик тиску постійно контролює глибину залягання зонда, можна встановити порогове значення в 43 метри. Після досягнення цієї глибини активується ультразвуковий датчик, який починає виявляти морське дно.

Такий підхід гарантує, що ультразвуковий датчик спрацьовує тільки тоді, коли він знаходиться досить близько до дна, щоб бути релевантним, що допомагає зменшити кількість непотрібних вимірювань і підвищити енергоефективність. Включення цієї логіки в блок-схему допомогло візуалізувати, як обидва датчики працюють разом і як система приймає рішення на основі даних у реальному часі.

Пояснення коду - PWM-сигнал з фільтрацією.

У центрі цього проекту — спеціально написаний скетч для Arduino Nano Every, який здійснює зв'язок із датчиком відстані через інтерфейс Serial1, обробляє отримані дані, застосовує фільтрацію для зменшення шумів і викидів, а також керує аналоговим (PWM) виходом на піні D5 (OUT_PIN) відповідно до певних порогових значень відстані. На ранніх етапах розробки система була організована із використанням бібліотеки EveryTimer [7].

Це дозволяє уникнути блокування головного циклу та опитувати датчик через рівні інтервали часу (кожні 100 мс), що забезпечує оперативність у режимі реального часу.

Після тестування датчика було виявлено проблему — поява зашумлених вихідних даних. Тому було запропоновано та реалізовано медіанний фільтр на 3 значення. Кожне нове вимірювання порівнюється з медіаною попередніх трьох, і якщо значення відрізняється більше ніж на 300 мм, воно вважається викидом і відкидається. Це забезпечує стабільність вимірювань навіть у разі поодиноких збоїв.

Система керує коефіцієнтом заповнення PWM-сигналу на піні D5 залежно від того, наскільки відфільтрована відстань наближається до заданих цільових значень:

- Якщо відстань близька до 500 мм (± 50 мм), на виході формується еквівалент 5 В (PWM = 255).
- Якщо відстань наближається до 3000 мм (± 300 мм), вихід становить приблизно 3.3 В (PWM = 168).
- У всіх інших випадках вихід дорівнює 0 В (PWM = 0).

В роботі було проведене тестування коду (рис. 3.5).



Рисунок 3.5 – Тестування коду

```
#define THRESH_3000 160
#define RANGE_3000 16
// Output logic based on updated thresholds

else if (abs(int(filt - THRESH_3000)) <= RANGE_3000) {
    analogWrite(OUT_PIN, 168);
    Serial.println("OUTPUT = 3.3V");
}
```

Перед тим, як запечатати датчик у водонепроникний корпус епоксидною смолою, було протестовано код разом з датчиком, щоб переконатися в правильності передачі даних і перевірити логіку виходу на основі визначених порогів ($THRESH_3000 = 160$, $RANGE_3000 = 16$). Це дозволило підтвердити, що система коректно видає 3,3 В (ШИМ = 168), коли виміряна відстань потрапляє в заданий діапазон.



Рисунок 3.6 – Flowchart контроль двигуна

3.3 Тестування сенсора

Точне визначення чистоти дна має важливе значення для безпечного розгортання зондів провідності-температури-глибини (CTD) у каламутних прибережних водах.

У цій тестовій програмі оцінюється ультразвуковий далекомір IP-68 (DFRobot SEN0599), інтегрований з платою Arduino Uno. Цілями були: (i) кількісна оцінка точності визначення дальності в контрольованих лабораторних умовах, (ii) характеристика поведінки в реальних зразках мулу різної каламутності і (iii) перевірка ефективності легкого цифрового фільтруючого ланцюга, призначеного для польового використання.

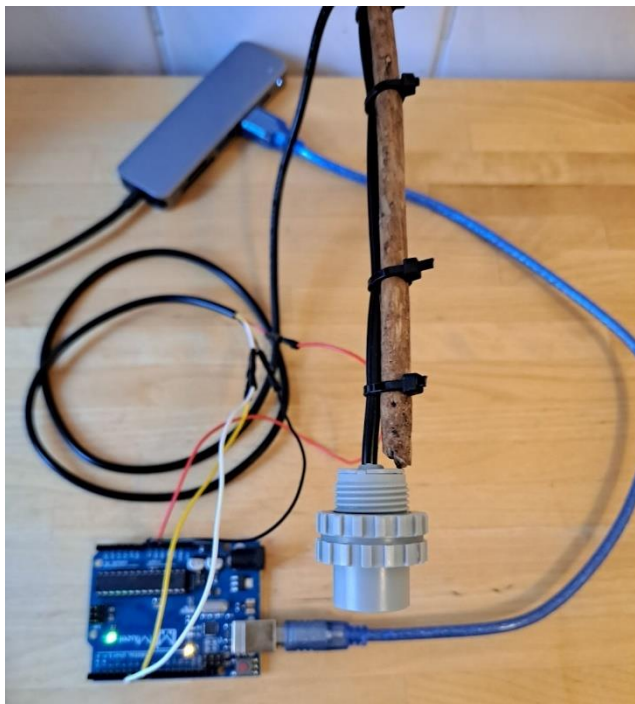


Рисунок 3.7 – Тестування сенсора

Тестування датчика в різних середовищах

Експериментальне налаштування:

Було зібрано прозору колонку висотою 65 см із трьох ПЕТ-пляшок об'ємом 1,75 л, закріплених у вертикальній рамі. Датчик, встановлений на дерев'яному стрижні, можна було занурювати з відносною повторюваністю. Дані записувалися з частотою 10 Гц (швидкість 115200 бод) через USB. Було досліджено три середовища:

Таблиця 3.1 – Тести в різних середовищах

<i>Середовище</i>	<i>Конфігурація глибини</i>	<i>Мета тесту</i>
<i>Сухе повітря</i>	Датчик на висоті 100 мм над столом	Перевірка помилкових відбиттів
<i>Чиста вода</i>	Колонка води 600 мм, датчик на 580 мм	Лінійність вимірювання на 0,5 м
<i>Мутна вода</i>	35 мм шар дрібного ґрунту + 565 мм води зверху	Реакція на забруднене середовище

Стійкість у сухому повітрі

Коди нульового діапазону (0 мм) реєструвалися протягом 20 с без відхилень, що підтверджує правильну «суху» поведінку.

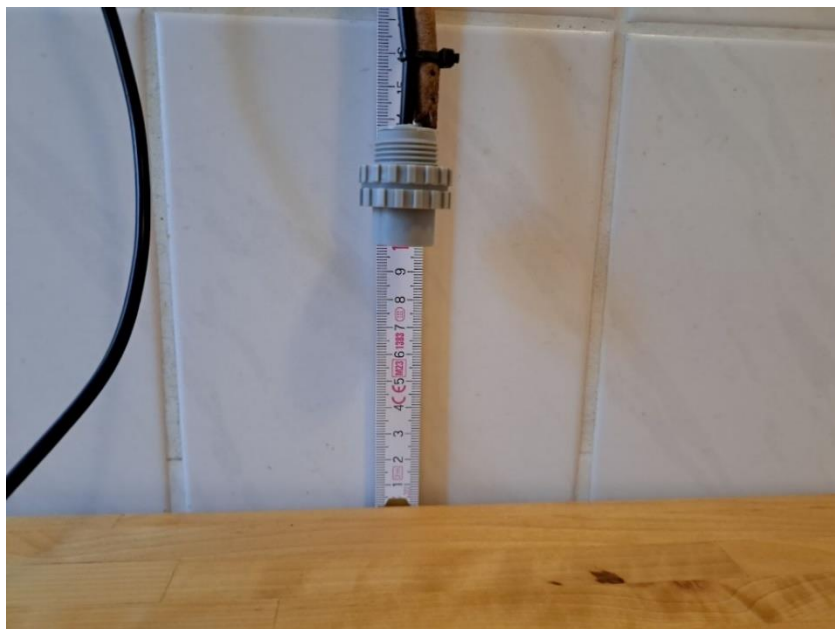


Рисунок 3.8 – Тест у повітрі

```
COM8
19:18:30.513 -> Distance:0mm
19:18:30.609 -> Distance:0mm
19:18:30.704 -> Distance:0mm
19:18:30.800 -> Distance:0mm
19:18:30.895 -> Distance:0mm
19:18:31.038 -> Distance:0mm
19:18:31.133 -> Distance:0mm
19:18:31.228 -> Distance:0mm
19:18:31.324 -> Distance:0mm
19:18:31.419 -> Distance:0mm
19:18:31.561 -> Distance:0mm
19:18:31.656 -> Distance:0mm
19:18:31.750 -> Distance:0mm
19:18:31.844 -> Distance:0mm
19:18:31.939 -> Distance:0mm
19:18:32.071 -> Distance:0mm
```

Рисунок 3.9 – Консоль при тесті сенсора у повітрі

На геометричній відстані 580 мм датчик показав 580 ± 5 мм за 10 с; подальші розрахунки на основі стандартного відхилення будуть недостатньо точними, щоб бути корисними через елементарну настройку.



Рисунок 3.10 – Сетап з чистою водою



Рисунок 3.11 – Тест чистої води

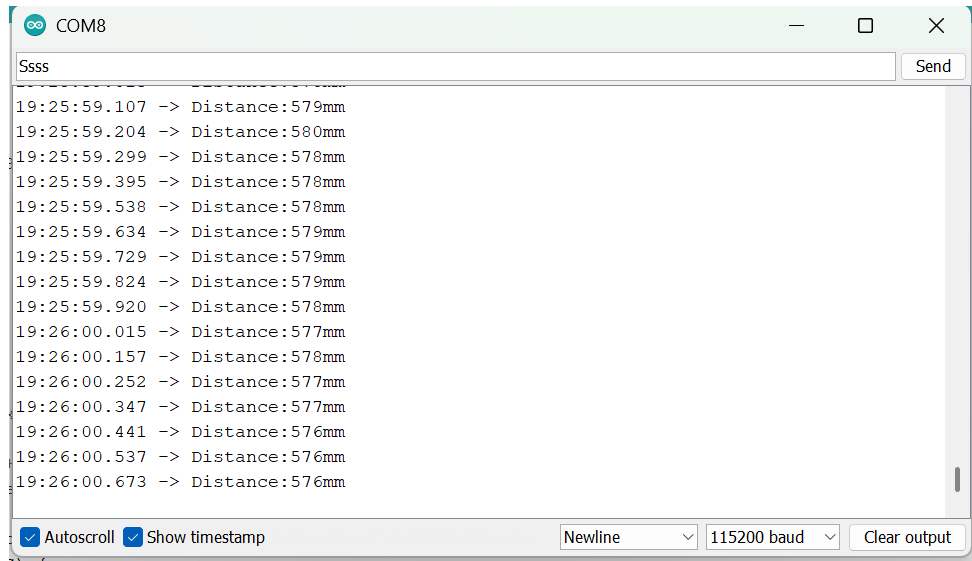


Рисунок 3.12 – Консоль з чистою водою

Випробування на стійкість до бруду

В роботі було проведене випробування на стійкість до бруду (рис. 3.13).



Рисунок 3.13 – Доданий ґрунт

Виявлено, що одразу після додавання бруду суспендовані тверді частинки спричинили безперервне повернення 0 мм.



Рисунок 3.13 - Сетап мутної води



Рисунок 3.14 - Тест мутної води

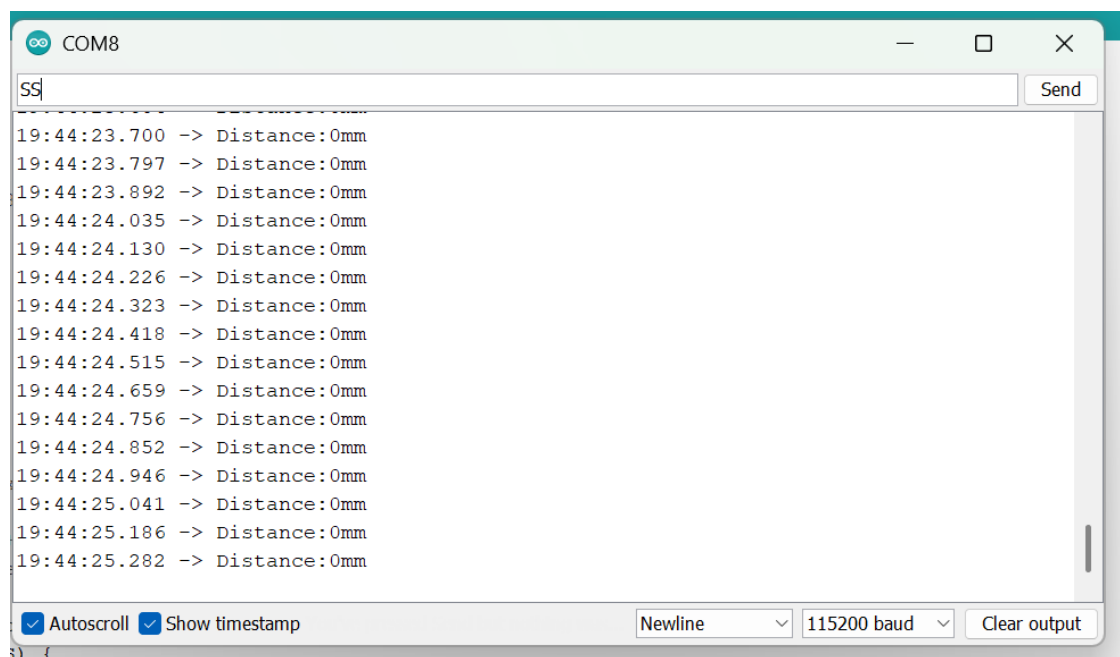


Рисунок 3.15 – Консоль при тесті мутної води

Після двогодинного відстоювання очікувана висота була 505 мм. Зі 160 зразків 142 потрапили в межах ± 10 мм (коефіцієнт влучання = 88,75 %); решта 18 були поодинокими піками, що пояснюються вихорами залишкової каламуті.

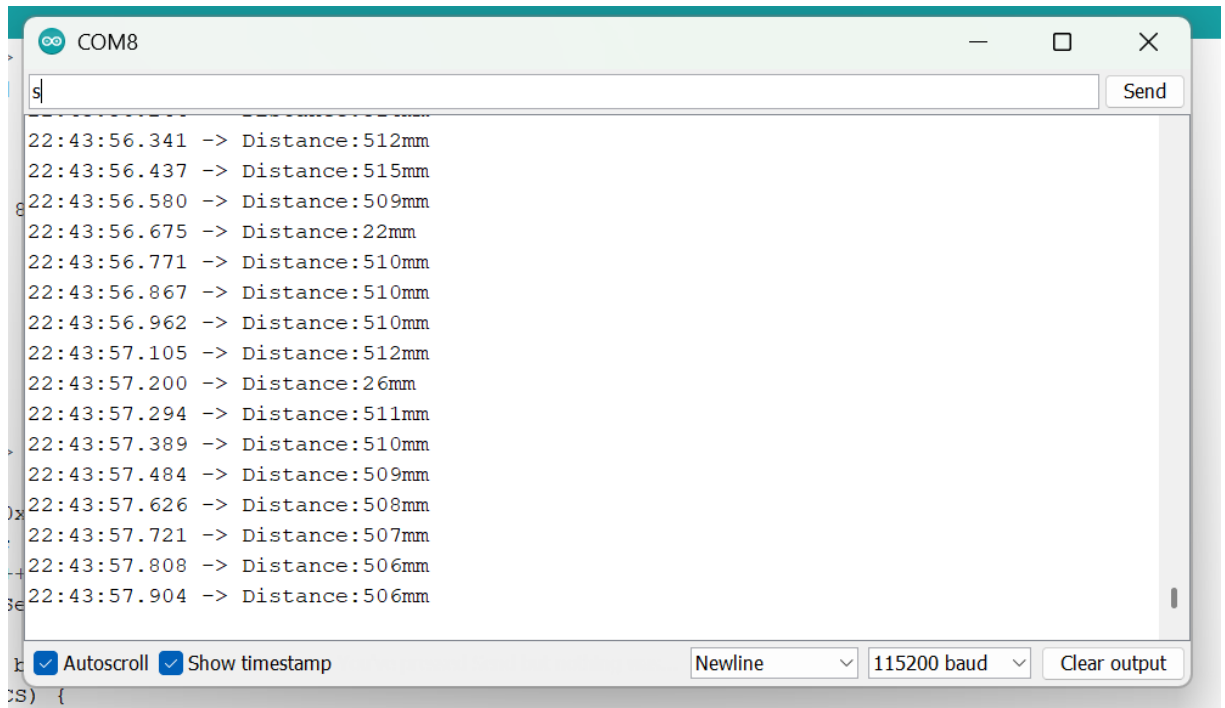


Рисунок 3.16 – Консоль при тесті відстояної грязної води

Тестування на реальних зразках та оцінка фільтрації
Був реалізований медіанний фільтр на три значення та порогом відбраковки викидів ± 50 мм для сирих вимірів відстані. При застосуванні до даних із мутної води з 160 загальних вимірів:

- 3 виміри з нульовим значенням були пропущені,
- 2 виміри були відкинуті як викиди.

Відфільтрована серія залишалася стабільною, зі змінами лише на кілька міліметрів — що можна порівняти з результатами у чистій воді.



Рисунок 3.17 – Сетап з реальним образцем Рисунок 3.18 – морська вода

Також досліджувалася ефективність сенсора при різному рівні забрудненості (табл. 3.2).

Таблиця 3.2– Ефективність сенсора при різному рівні забрудненості

Умова	Орієнтовна каламутність (нефелометрично)*	Частка «влучань» (сирі дані)	Після фільтрації	Коментар
Сухе повітря	–	100 % нульових значень	–	Правильне виявлення «немає води»
Чиста вода	< 1 NTU	100 %	100 %	Лінійна робота та низький рівень шуму
Легка каламуть (осаджена)	≈ 300 NTU	88.75 %	–	Менша частка «влучань» через частинки
Сильна каламуть (свіжий мул)	> 500 NTU	0 % (усі значення = 0 мм)	–	Датчик насичується (перевантажується)
Реальні зразки мулу (осаджені)	< 50 NTU	96.86 %	100 %	Лінійна робота та низький рівень шуму

* Значення каламутності (NTU) були оцінені візуально, а не виміряні за допомогою датчика каламутності, оскільки такого датчика не було в наявності для проведення вимірювань. Для візуального порівняння було використано зображення, отримане від Департаменту транспорту штату Вашингтон, на якому порівнюються різні якості води. На зображенні можна побачити три виміри: 5, 50 і 500 NTU зразків.



Рисунок 3.19 – Зображення для візуальної апроксимації значення NTU

Висновки тестування

Результати тестування виявилися дуже задовільними. Датчик продемонстрував здатність ефективно працювати в умовах високої каламутності, забезпечуючи точні вимірювання. Після випробувань у багатьох різних сценаріях замовник повідомив, що датчик працюватиме в діапазоні каламутності від 10 до 125 NTU. Цей діапазон ідеально відповідає результатам інтенсивного тестування ультразвукового далекоміра DFRobot SEN0599, який показав частку успішних вимірювань від щонайменше 88.75 % (≈ 300 NTU) до 96.86 % (< 50 NTU) на сирих даних, які програмно фільтруються з високою надійністю. Підсумовуючи, датчик DFRobot SEN0599 повністю відповідає вимогам замовника, і результати цього розділу тестування підтверджують цю відповідність.

Висновки

Метою кваліфікаційної роботи було розробити надійний, компактний та енергоефективний датчик виявлення морського дна, спеціально призначений для інтеграції з зондом Sea-Bird 19plus V2 CTD в умовах складного середовища Балтійського моря. Обраний ультразвуковий датчик продемонстрував виняткову ефективність у каламутній воді, низьке енергоспоживання та механічну простоту, повністю відповідаючи визначеним вимогам проекту.

У процесі розробки були застосовані ретельні аналітичні методи й систематична оцінка, включно з детальним аналізом варіантів і аналізом видів і наслідків відмов (FMEA), що суттєво підвищило надійність та стійкість фінального дизайну. Підбір матеріалів і 3D-друк відіграли ключову роль у створенні герметичного та тискостійкого корпусу, а проведене дослідження дозволило обрати оптимальні матеріали та методи виготовлення.

Електрична схема еволюціонувала від складної початкової концепції до спрощеного й водночас ефективного рішення. Перехід від планованого інтерфейсу RS232 до прямого аналогового виходу не лише спростив інтеграцію системи, а й підвищив її надійність і зменшив кількість можливих точок відмови.

Програмне забезпечення було реалізовано з урахуванням багатоетапного тестування та оптимізації, включно з удосконаленою фільтрацією — медіанним фільтром із трьох значень у поєднанні з алгоритмом відкидання викидів. Ці методи суттєво покращили точність вимірювань і забезпечили стабільну роботу в різних умовах — від чистої до сильно каламутної води.

Тестування підтвердило, що датчик стабільно підтримує цільову висоту зупинки в 0.5 метра над морським дном, із точністю в межах ± 4 см у лабораторних умовах. Водночас рекомендується провести додаткові випробування у відкритій воді, щоб повною мірою оцінити поведінку датчика

в реальних умовах Балтійського моря, зокрема вплив солоності, обростання біоорганізмами та коливань через хвилі.

У перспективі можливі поліпшення — додаткова надмірність за допомогою тискових сенсорів CTD, реалізація обслуговуваного корпусу для підвищення зручності експлуатації та впровадження більш складних предиктивних алгоритмів фільтрації для покращення швидкодії й точності. Повна документація — включно з CAD-файлами, електросхемами та прошивкою — має зберігатися й бути доступною для подальшого вдосконалення.

Можна зробити висновок, що розроблений сенсорний модуль не лише виконав, а й перевищив початкові цілі проєкту, забезпечивши надійну роботу, легкість інтеграції та великий потенціал для подальших удосконалень. Ця розробка є значним внеском у безпечніше та ефективніше підводне дослідження, демонструючи практичний прогрес у технологіях океанографічних досліджень.

Окрім основного модуля сенсора, додатково була розроблена електрична схема керування електродвигуном, що забезпечує автоматичне або ручне опускання зонда на задану глибину. Система включає приймання команд з комп'ютера через інтерфейс RS-232, обробку сигналів за допомогою мікроконтролера Arduino, а також передачу керуючих імпульсів до потужного драйвера Sabertooth, який керує двигуном постійного струму. Це рішення дозволяють надійно піднімати та опускати зонд навіть при значних навантаженнях, забезпечуючи безперервну роботу всієї вимірювальної системи.

Список використаної літератури

1. Luthy K., Miller D. Case Study of a 3D Printed Underwater Housing [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9705928>
2. HP MJF PA12 3D printed pressure vessel testing – 600PSI result! [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://forerunner3d.com/hp-mjf-3d-printed-pressure-vessel/>
3. Extrudr PLA NX2 Matt – Продуктова сторінка [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.extrudr.com/en/gb/products/pla-nx2-matt/>
4. Extrudr GreenTec Pro – Продуктова сторінка [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://extrudr.com/en/gb/products/greentec-pro/>
5. Rivera-López F. та ін. Effects of Nozzle Temperature on Mechanical Properties of Polylactic Acid... // Polymers, 2024, 16(13), 1867. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://doi.org/10.3390/polym16131867>
6. Analog Devices. Practical Guide to Filtering [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.analog.com/en/technical-articles/practical-guide-to-filtering.html>
7. EveryTimer Library – Non-blocking periodic task scheduler [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://github.com/RobTillaart/EveryTimer>
8. Margolis M. Arduino Cookbook: Recipes to Begin, Expand, and Enhance Your Projects. 3rd Ed. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.oreilly.com/library/view/arduino-cookbook-3rd/9781491903520/>
9. Banzi M., Shiloh M. Getting Started with Arduino. 3rd Ed. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.oreilly.com/library/view/getting-started-with/9781449363338/>

10. Sea-Bird Electronics. SBE 19plus V2 SeaCAT Profiler CTD User Manual [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.seabird.com/asset-get.download.jsa?id=69833854347>
11. Arduino ABX00028 Nano Every Datasheet [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://docs.arduino.cc/resources/datasheets/ABX00028-datasheet.pdf>
12. Horowitz P., Hill W. The Art of Electronics. 3rd Ed. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://artofelectronics.net/>
13. Шефер О.В., Єрмілова Н.В. Методичні рекомендації до виконання кваліфікаційної роботи бакалавра для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня зі спеціальності G3 «Електрична інженерія» (141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»). – Полтава: Національний університет імені Юрія Кондратюка, 2025. – 18 с.
14. Dimension Engineering. Sabertooth 2x60 User Guide [Електронний ресурс] – Режим доступу:
<https://www.dimensionengineering.com/datasheets/Sabertooth2x60.pdf>
15. DFRobot. URM09 Ultrasonic Sensor Manual [Електронний ресурс] – Режим доступу:
https://wiki.dfrobot.com/URM09_Ultrasonic_Sensor_Serial_and_PWM_Readout_SKU_SEN0304
16. Texas Instruments. MAX232 Datasheet [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.ti.com/product/MAX232>
17. Autodesk. Tinkercad Circuits [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.tinkercad.com/>
18. Specht C., Colwell R. Oceanographic Instrumentation and Measurements [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-030-41620-3>

3 Development of electrical diagrams, programming, and testing

Components are placed in the Housing. An electrical diagram was created which shows the components and the interconnections of the circuit. This diagram is used to construct the equipment and can be used for maintenance of electrical and electronic equipment. Two main components are Arduino and Sensor which are shown in Housing in the drawing (рис 2.4). Inputs and outputs are labeled and connections are shown in different colours.

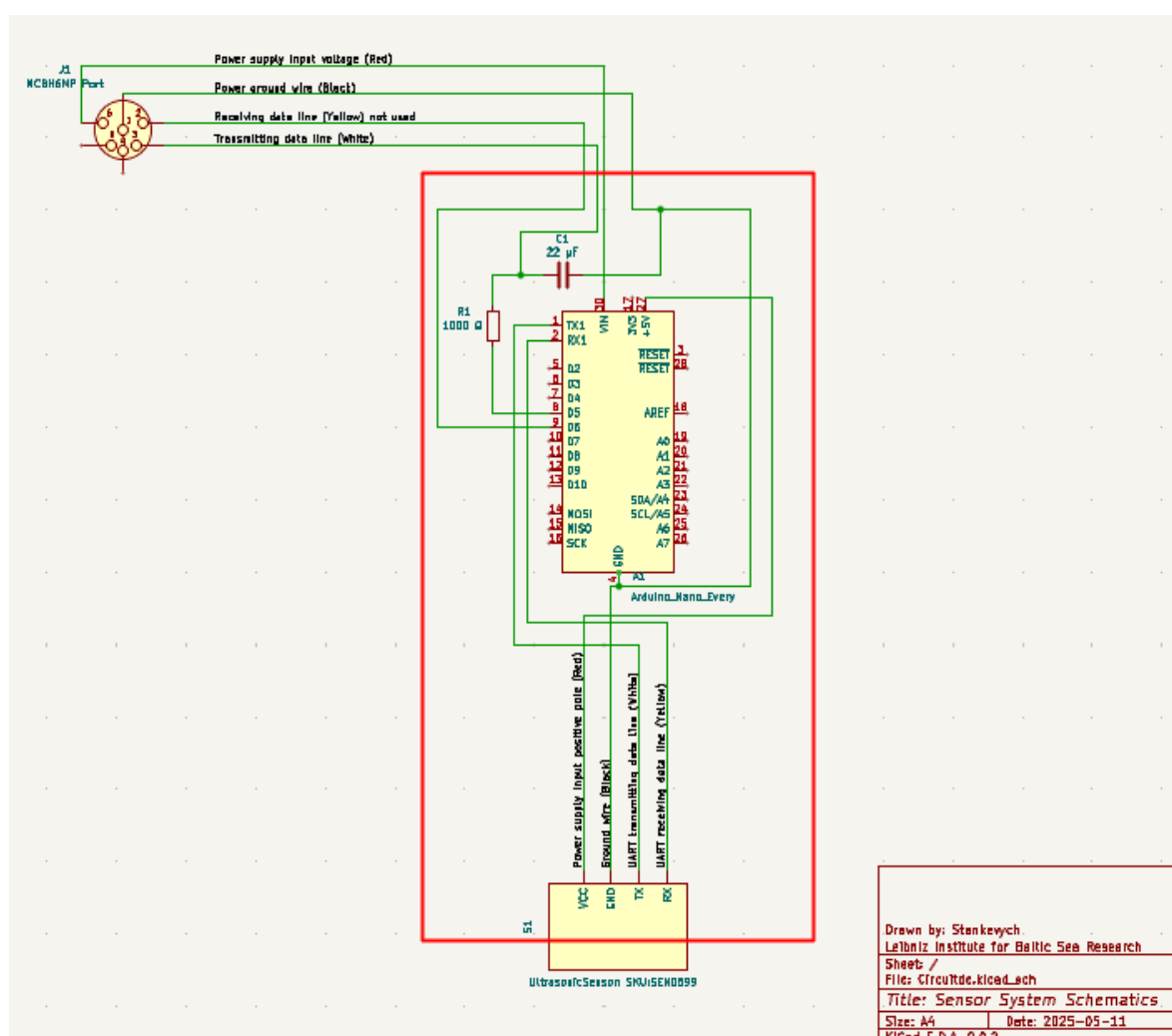


Figure 3.1 – Connection diagram of the main system components.

The Arduino Nano Every was chosen for this development from the Arduino Nano family because of its compact design. The microcontroller can handle voltages up to 21 V, but in our case, the sensor can provide a voltage of about 10.5–11 V, and Arduino operates at over 85% efficiency at this voltage.

The yellow data reception cable from the sensor to the probe is present, but it is not programmed for any input. However, future prototypes may use this line as well.

The sensor cable turned out to be too long to fit in the case when connected, so it was cut. The rest of the cable was reworked and reused for the connection between the sensor system and the probe. The cable was left open because the J1 sensor connection port uses a proprietary connection, namely MCBH6MP. This is an expensive connection, and the end of the wire had to be left open.

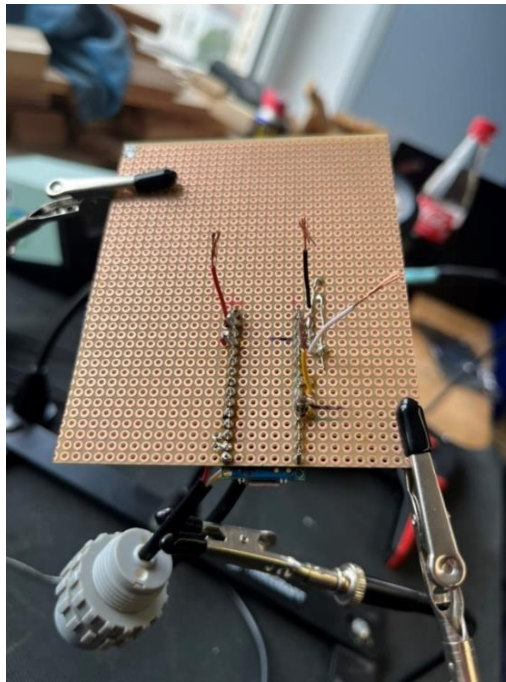


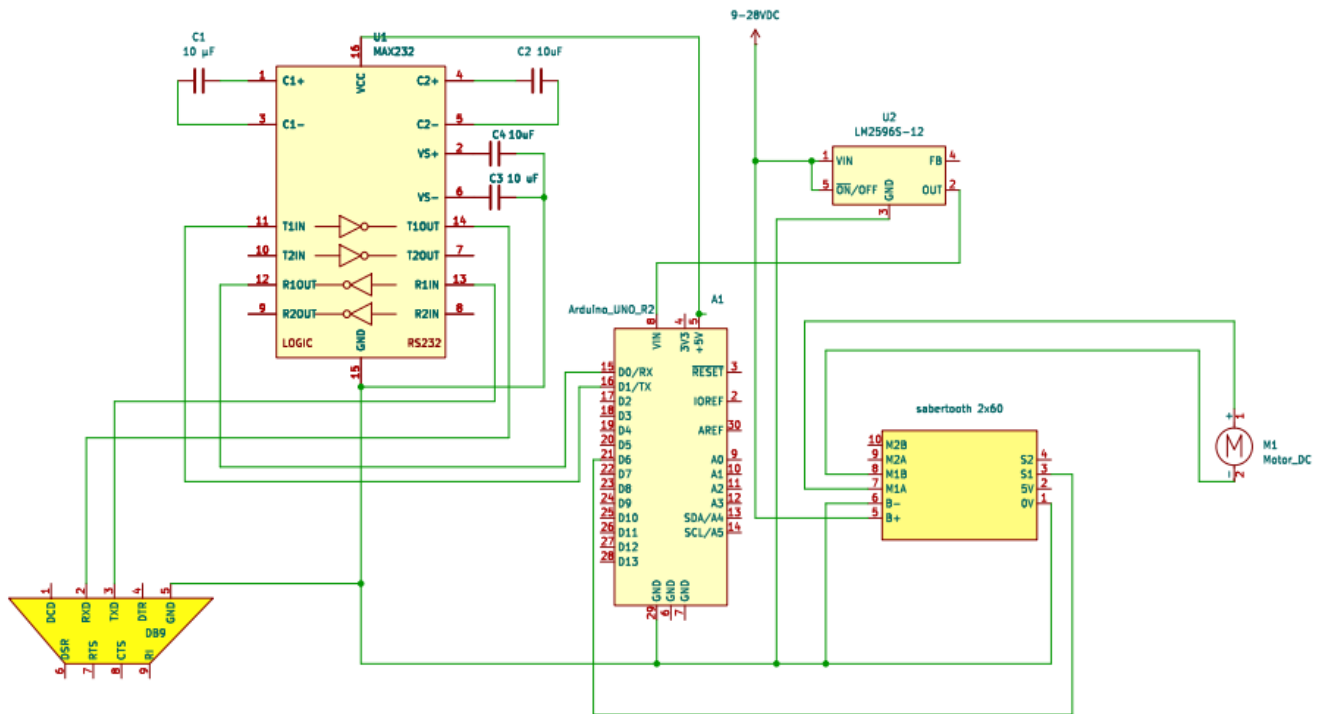
Figure 3.2 – System soldering process.

3.1 Development of a management system

One of the tasks was to develop an engine control system for lowering the probe, which included creating a program for Arduino, implementing communication with a computer via the RS-232 protocol, developing an electrical diagram, and

configuring command transmission in Simplified Serial format to the Sabertooth driver.

The control system must ensure reliable control of the direction and speed of motor rotation based on “up”, ‘down’ and “stop” commands received from the computer.



Sheet: /
 File: motor_connection.kicad_sch
 Title: Stankevych motor control

Figure 3.3 – Electric motor control diagram.

3.2 Programming and description of the system operation

Flowchart:

To get a clear idea of the logic and workflow of the system, we started by creating a flowchart. Each step was carefully outlined, starting with how the sensor collects data and ending with how the signal is filtered and sent to the computer. The diagram illustrates how the system should behave (send 0.5 m or 3 m) and what actions it triggers when sending/receiving/checking. Creating a flowchart helped identify potential problems at an early stage and determined the structure of the code that was written later.

To ensure the reliability of the analog signal sent from the Arduino to the PC, a low-pass filter was implemented. Since the signal is generated using PWM (pulse width modulation), it contains high-frequency noise that can lead to inaccurate or unstable readings.

A low-pass filter was introduced to smooth out these fluctuations by filtering out the high-frequency components and leaving only a stable, averaged signal. This way, the computer receives a clean and stable analog voltage that accurately reflects the measured distance. Without the filter, the analog input could be too noisy to meet the system's requirements for accurate control of the probe's immersion depth [6].

We have the following input parameters: $R = 1 \text{ k}\Omega$, $C = 22 \text{ }\mu\text{F}$, then the frequency is equal to:

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{2\pi \cdot 1000 \cdot 22 \times 10^{-6}} \approx 7.23 \text{ Hz}$$

it very easily smoothes out the 62.5 PWM into direct current.

Ultrasonic sensor FLOWCHART MODEL

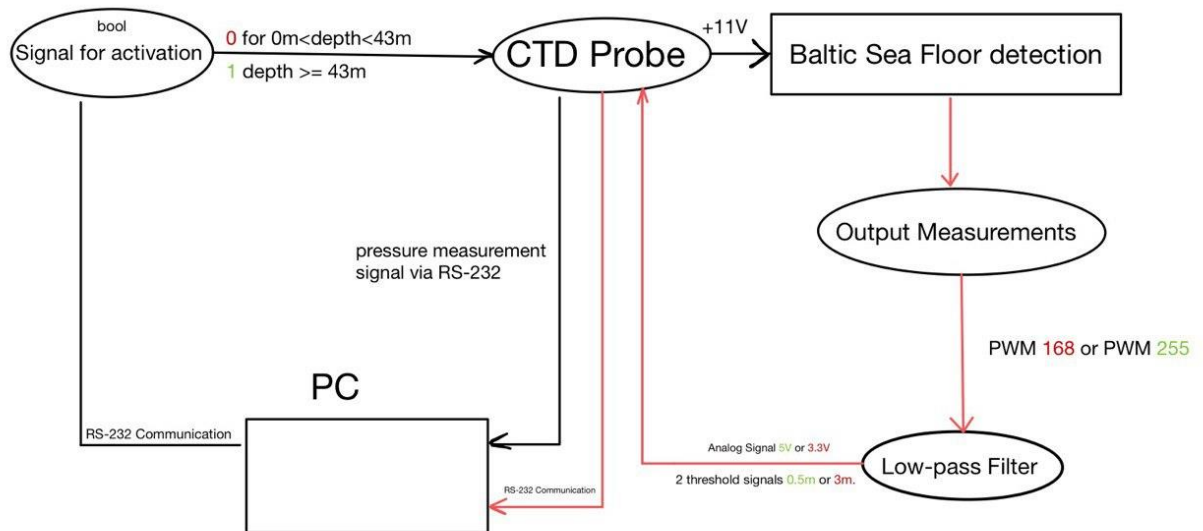


Figure 3.4 - Flowchart

While working on the block diagram, a new stage was added, which involves the use of a pressure sensor already integrated into the CTD probe. The idea was to use the pressure sensor signal as a trigger to activate the ultrasonic sensor. Since the pressure sensor constantly monitors the depth of the probe, a threshold value of 43 meters can be set. Once this depth is reached, the ultrasonic sensor is activated and begins to detect the seabed.

This approach ensures that the ultrasonic sensor only fires when it is close enough to the bottom to be relevant, helping to reduce unnecessary measurements and improve energy efficiency. Including this logic in the block diagram helped visualize how both sensors work together and how the system makes decisions based on real-time data.

Code explanation - Filtered PWM signal.

At the heart of this project is a sketch written specifically for Arduino Nano Every, which communicates with the distance sensor via the Serial1 interface, processes the received data, applies filtering to reduce noise and emissions, and controls the analog (PWM) output on pin D5 (OUT_PIN) according to certain distance thresholds.

In the early stages of development, the system was organized using the EveryTimer library [7].

This avoids blocking the main cycle and polls the sensor at regular intervals (every 100 ms), ensuring real-time responsiveness.

After testing the sensor, a problem was discovered—the appearance of noisy output data. Therefore, a median filter with 3 values was proposed and implemented. Each new measurement is compared with the median of the previous three, and if the value differs by more than 300 mm, it is considered an outlier and is rejected. This ensures measurement stability even in the event of isolated failures.

The system controls the PWM signal duty cycle on pin D5 depending on how close the filtered distance is to the specified target values:

- If the distance is close to 500 mm (± 50 mm), the output is equivalent to 5 V (PWM = 255).
- If the distance is close to 3000 mm (± 300 mm), the output is approximately 3.3 V (PWM = 168).
- In all other cases, the output is 0 V (PWM = 0).

The code was tested in the work (Fig. 3.5)

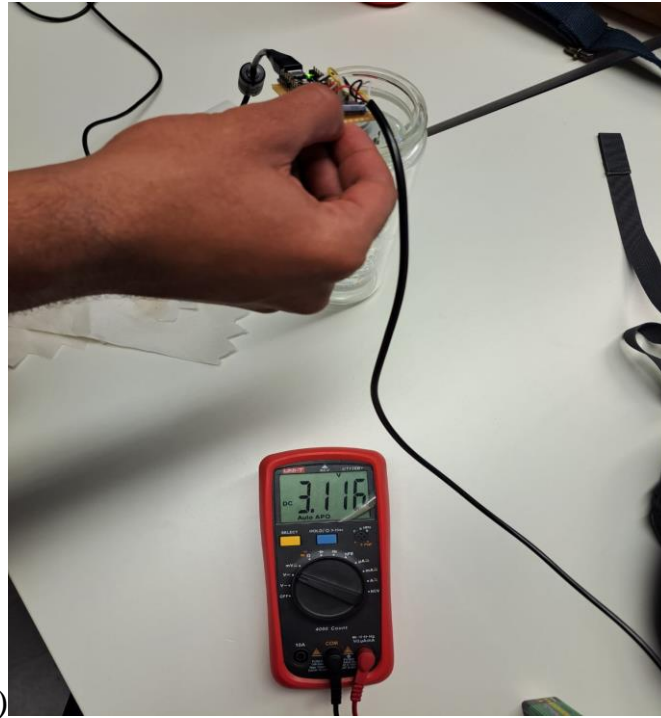


Figure 3.5 – Code Testing

```
#define THRESH_3000 160
#define RANGE_3000 16
// Output logic based on updated thresholds

else if (abs(int(filt - THRESH_3000)) <= RANGE_3000) {
    analogWrite(OUT_PIN, 168);
    Serial.println("OUTPUT = 3.3V");
}
```

Before sealing the sensor in a waterproof epoxy resin case, the code was tested together with the sensor to ensure correct data transmission and to check the output logic based on the defined thresholds ($\text{THRESH_3000} = 160$, $\text{RANGE_3000} = 16$). This confirmed that the system correctly outputs 3.3 V (PWM = 168) when the measured distance falls within the specified range.



Figure 3.6 – Flowchart drive control

3.3 Sensor testing

Accurate determination of bottom clarity is important for the safe deployment of conductivity-temperature-depth (CTD) probes in turbid coastal waters.

This test program evaluates the IP-68 ultrasonic rangefinder (DFRobot SEN0599) integrated with the Arduino Uno board. The objectives were: (i) to quantitatively assess the accuracy of range determination under controlled laboratory conditions, (ii) to characterize the behavior in real samples of silt of varying turbidity, and (iii) to verify the effectiveness of a lightweight digital filter circuit designed for field use.

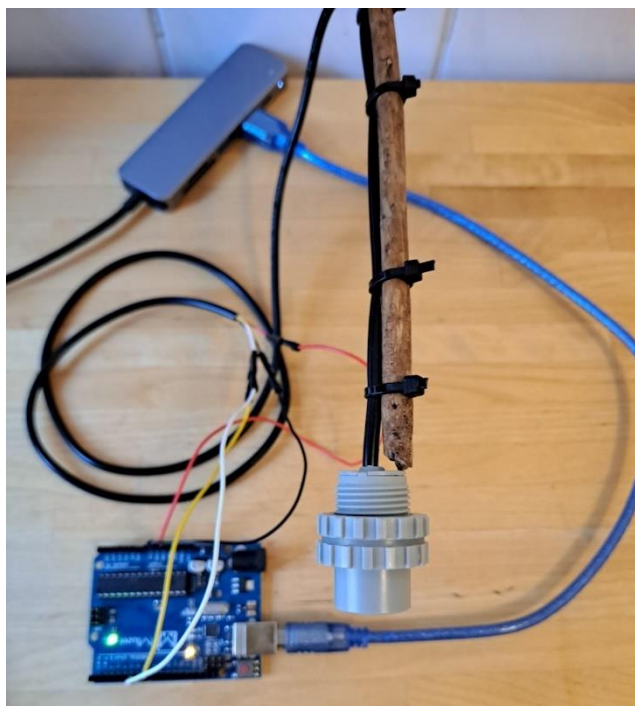


Figure 3.7 – Sensor testing

Sensor testing in different conditions

Experimental setup:

A transparent column 65 cm high was assembled from three 1.75-liter PET bottles fixed in a vertical frame. The sensor, mounted on a wooden rod, could be immersed with relative repeatability. Data was recorded at a frequency of 10 Hz (speed 115200 baud) via USB. Three environments were investigated:

Table 3.1 – Testing in different conditions

<i>Середовище</i>	<i>Конфігурація глибини</i>	<i>Мета тесту</i>
<i>Сухе повітря</i>	Датчик на висоті 100 мм над столом	Перевірка помилкових відбиттів
<i>Чиста вода</i>	Колонка води 600 мм, датчик на 580 мм	Лінійність вимірювання на 0,5 м
<i>Мутна вода</i>	35 мм шар дрібного ґрунту + 565 мм води зверху	Реакція на забруднене середовище

Stability in dry air

Zero range codes (0 mm) were recorded for 20 seconds without deviations, confirming correct “dry” behavior.



Figure 3.8 – Test in dry air

```
COM8
19:18:30.513 -> Distance:0mm
19:18:30.609 -> Distance:0mm
19:18:30.704 -> Distance:0mm
19:18:30.800 -> Distance:0mm
19:18:30.895 -> Distance:0mm
19:18:31.038 -> Distance:0mm
19:18:31.133 -> Distance:0mm
19:18:31.228 -> Distance:0mm
19:18:31.324 -> Distance:0mm
19:18:31.419 -> Distance:0mm
19:18:31.561 -> Distance:0mm
19:18:31.656 -> Distance:0mm
19:18:31.750 -> Distance:0mm
19:18:31.844 -> Distance:0mm
19:18:31.939 -> Distance:0mm
19:18:32.071 -> Distance:0mm
```

Figure 3.9 – Consol dry air test

At a geometric distance of 580 mm, the sensor showed 580 ± 5 mm in 10 seconds; further calculations based on standard deviation will not be accurate enough to be useful due to elementary adjustment.



Figure 3.10 – Setup with clean water



Figure 3.11 – Test clean water

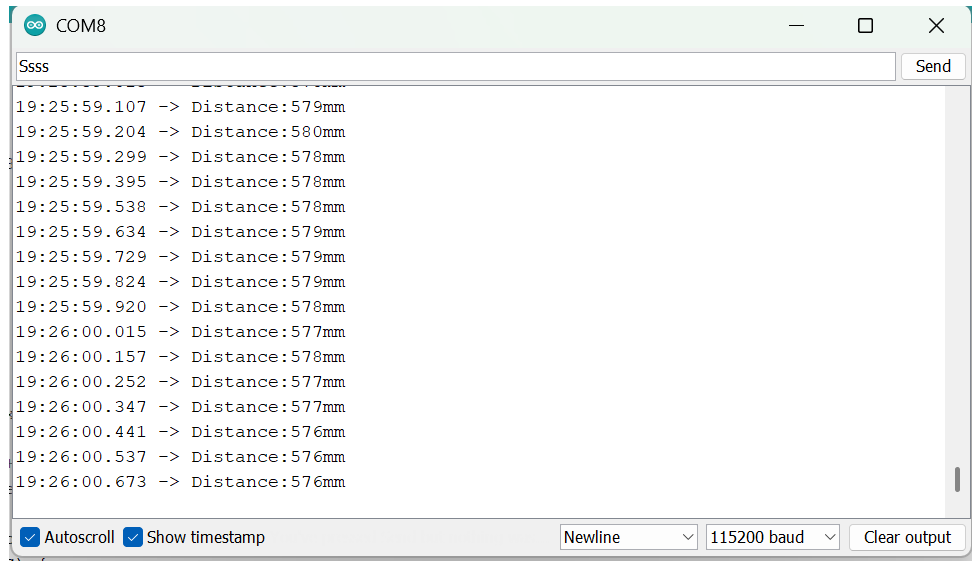


Figure 3.12 – Consol clean water test

Dirt resistance test

The work included testing for resistance to dirt. (Figure. 3.13).



Figure 3.13 – Added dirt

It was found that immediately after adding dirt, suspended solid particles caused a continuous return of 0 mm.



Figure 3.13 – Setup turbid water



Figure 3.14 - Test turbid water

```

COM8
ssj
19:44:23.700 -> Distance:0mm
19:44:23.797 -> Distance:0mm
19:44:23.892 -> Distance:0mm
19:44:24.035 -> Distance:0mm
19:44:24.130 -> Distance:0mm
19:44:24.226 -> Distance:0mm
19:44:24.323 -> Distance:0mm
19:44:24.418 -> Distance:0mm
19:44:24.515 -> Distance:0mm
19:44:24.659 -> Distance:0mm
19:44:24.756 -> Distance:0mm
19:44:24.852 -> Distance:0mm
19:44:24.946 -> Distance:0mm
19:44:25.041 -> Distance:0mm
19:44:25.186 -> Distance:0mm
19:44:25.282 -> Distance:0mm
Autoscroll Show timestamp
Newline 115200 baud Clear output
) {

```

Figure 3.15 – Console turbid water test

After two hours of settling, the expected height was 505 mm. Of the 160 samples, 142 fell within ± 10 mm (hit rate = 88.75%); the remaining 18 were isolated peaks, explained by residual turbidity vortices.

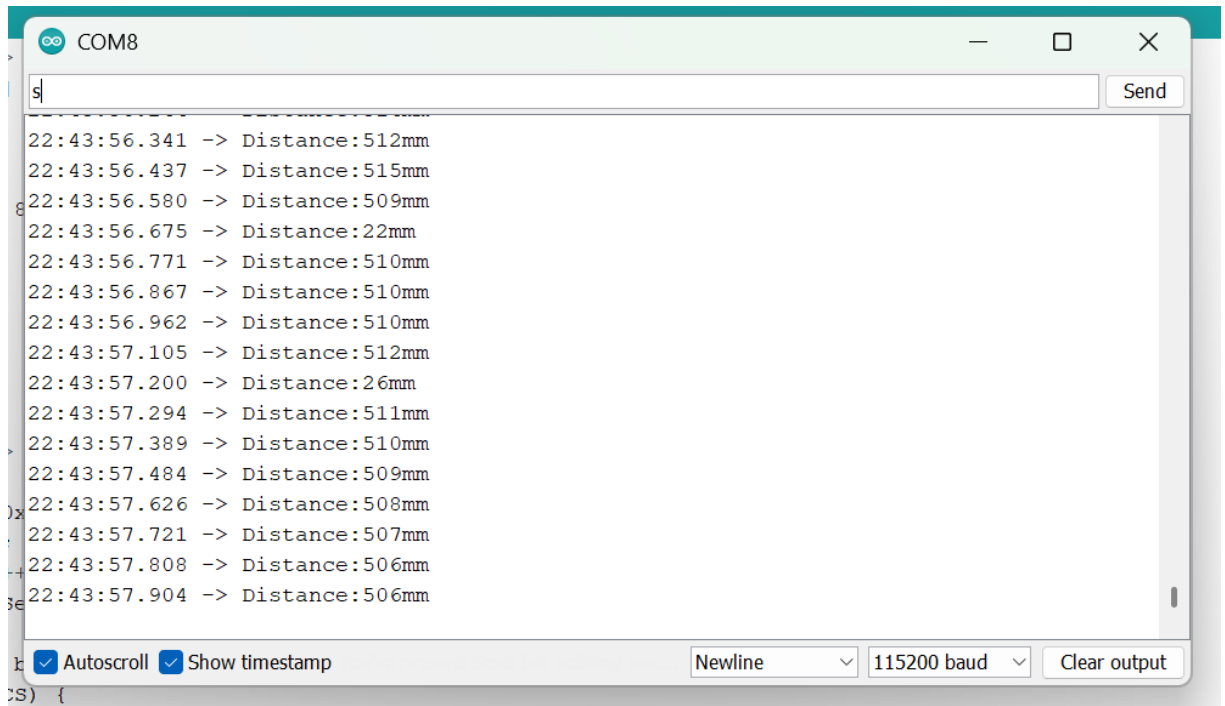


Figure 3.16 – Consol turbid water test after 3 hours

Testing on real samples and filtration evaluation

A median filter with three values and a rejection threshold of ± 50 mm for raw distance measurements was implemented. When applied to data from turbid water with 160 total measurements:

- 3 measurements with zero values were omitted,
- 2 measurements were rejected as outliers.

The filtered series remained stable, with changes of only a few millimeters — comparable to the results in clear water.



Figure 3.17 – Setup with real mud exsample Figure 3.18 – sea water

The effectiveness of the sensor at different levels of contamination was also investigated (Table. 3.2).

Table 3.2– Sensor efficiency at different turbidity levels

Умова	Орієнтовна каламутність (нефелометрично)*	Частка «влучань» (сирі дані)	Після фільтрації	Коментар
Сухе повітря	–	100 % нульових значень	–	Правильне виявлення «немає води»
Чиста вода	< 1 NTU	100 %	100 %	Лінійна робота та низький рівень шуму
Легка каламуть (осаджена)	≈ 300 NTU	88.75 %	–	Менша частка «влучань» через частинки
Сильна каламуть (свіжий мул)	> 500 NTU	0 % (усі значення = 0 мм)	–	Датчик насичується (перевантажується)
Реальні зразки мулу (осаджені)	< 50 NTU	96.86 %	100 %	Лінійна робота та низький рівень шуму

* Turbidity values (NTU) were assessed visually rather than measured with a turbidity sensor, as no such sensor was available for measurements. For visual comparison, an image obtained from the Washington State Department of Transportation was used, which compares different water qualities. The image shows three measurements: 5, 50, and 500 NTU samples.



Figure 3.19 – Image for visual approximation of NTU pollution value

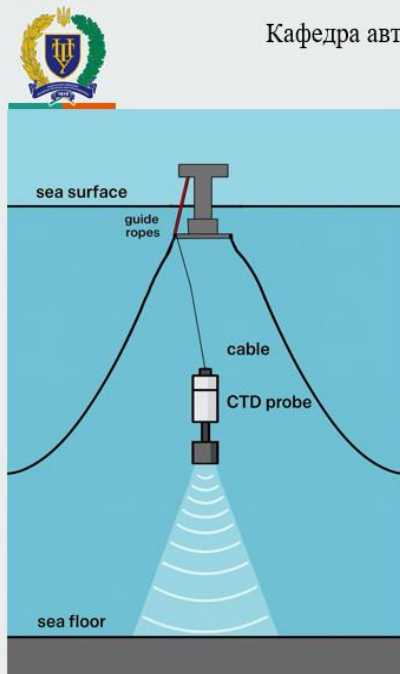
Testing conclusions

The test results were very satisfactory. The sensor demonstrated its ability to operate effectively in high turbidity conditions, providing accurate measurements. After testing in many different scenarios, the customer reported that the sensor would operate in a turbidity range of 10 to 125 NTU. This range perfectly matches the results of intensive testing of the DFRobot SEN0599 ultrasonic rangefinder, which showed a success rate of at least 88%. 75% (≈ 300 NTU) to 96.86% (< 50 NTU) on raw data, which is filtered by software with high reliability. In summary, the DFRobot SEN0599 sensor fully meets the customer's requirements, and the results of this test section confirm this compliance.

Додаток Б

Міністерство освіти та науки України
Національний університет «Полтавська Політехніка імені Юрія Кондратюка»

Кафедра автоматики, електроніки та телекомунікації



Розробка системи автоматичного контролю глибини занурення CTD-зонда для вимірювання параметрів морської води в акваторії Балтійського моря

Кваліфікаційна робота бакалавра

Виконав:
Студент групи 401 МЕ

Станкевич Г.В

Керівник:
Доцент, канд. техн. наук

Єрмілова Н.В

1

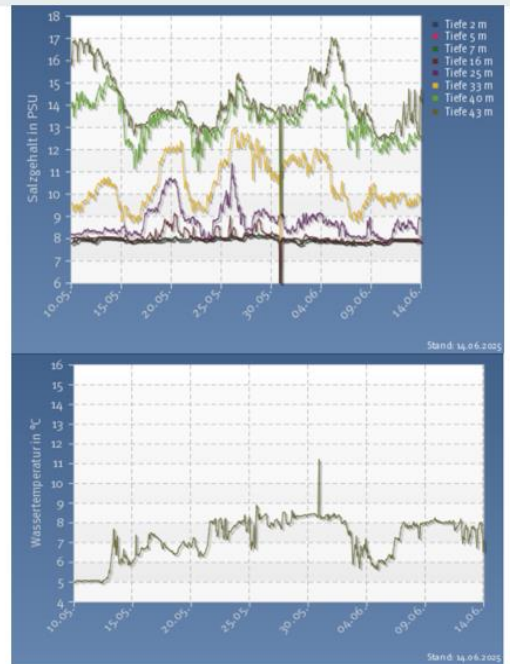
Актуальність дослідження: Сучасні екологічні виклики, що постають перед морськими екосистемами, потребують точного та безпечного інструментального моніторингу фізико-хімічних параметрів морської води. Одним з основних пристроїв у гідрологічних дослідженнях є CTD-зонд, проте під час опускання зонда існує загроза контакту з морським дном і потрапляння в мул, тому актуальним є створення інтелектуальної системи, здатної автоматично виявляти морське дно та зупиняти зонд на безпечній відстані.

Мета роботи: Метою кваліфікаційної роботи є розроблення системи автоматичного контролю глибини занурення CTD-зонда з виявленням морського дна на основі ультразвукового сенсора і сенсора тиску, що дозволить запобігти пошкодженню вимірювальних елементів під час досліджень у Балтійському морі.

Завдання: Для досягнення мети роботи необхідно проаналізувати прилад Sea-Bird SBE 19plus та розробити систему автоматичного виявлення морського дна з використанням ультразвукового і тискового сенсорів. Реалізувати взаємодію з Arduino Nano Every через RS-232, створити захисний корпус та програмне забезпечення з перемиканням режимів залежно від умов. Провести лабораторне тестування для перевірки надійності й точності системи.

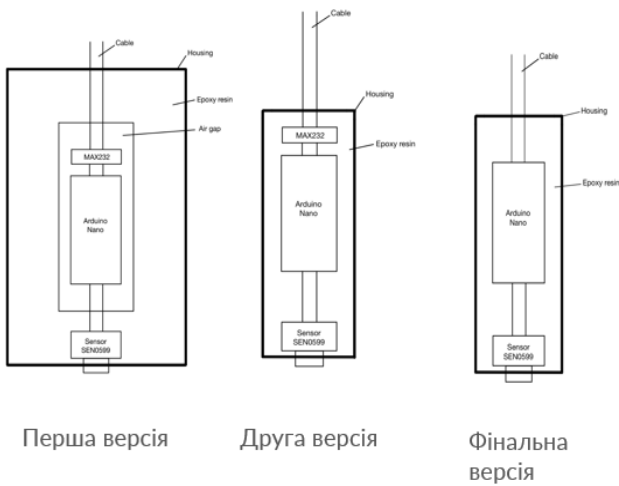
2

CTD-зонд

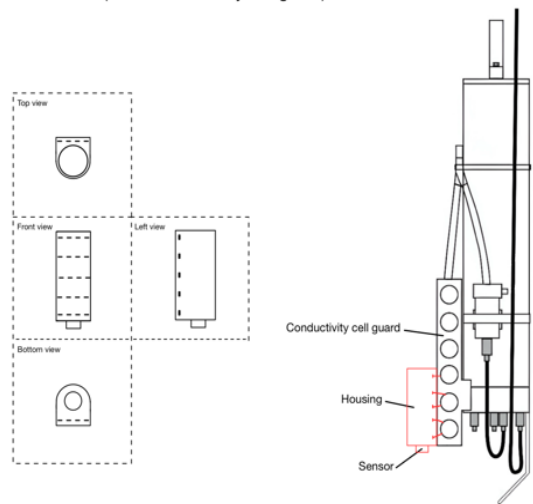


3

Еволюція схематики



Final drawing with the solution attached to the side (In the conductivity cell guard) of the CTD Probe:



4

Корпус

Герметичність і відсутність повітря

Весь внутрішній простір модуля залито повністю, без повітряних кишень.

Завдяки цьому немає внутрішнього тиску, який міг би деформувати корпус при зануренні.



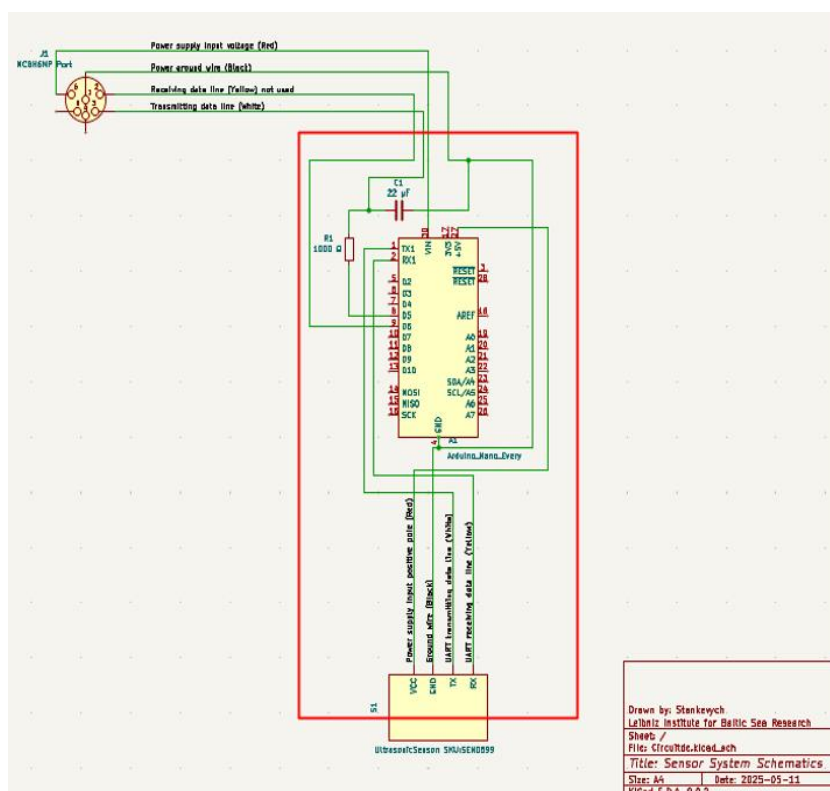
Тестування матеріалу корпусу

GreenTec Pro, з якого надруковано корпус, має високу щільність і добру адгезію до епоксидки.

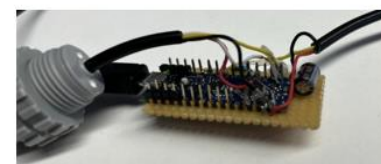
Проведено випробування в умовах занурення де корпус перебував у воді понад 12 годин — жодних слідів протікання або деформації не було.



5



Інтеграція системи & комунікація



6

Комунікація сенсора

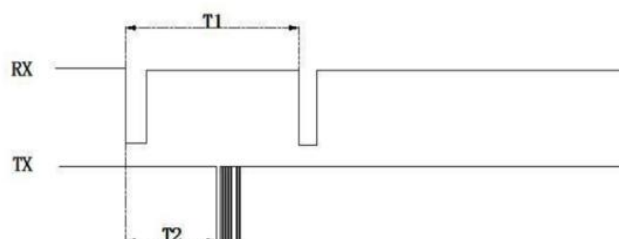
SKU:SEN0599 Sensor Output:

Зв'язок датчика з програмним комплексом Arduino встановлюється за допомогою послідовного зв'язку UART з використанням Tx/Rx.

Зв'язок відбувається зі швидкістю 115200 біт/с.



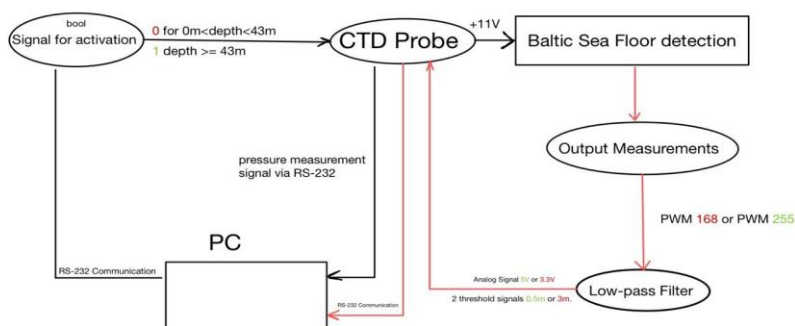
Interface	Baud rate	Data bit	Stop bit	Check bit
UART	115200bps	8	1	None



Підключення	Колір кабеля	Напруга	Опис
GND	Чорний	-	заземлення
VCC	Червоний	12V	Джерело живлення
Output1	Білий	0V-5V	Вихід: 5V - 0.5m 3.3V - 3m
Output2	Жовтий	-	Не використовується

7

Ultrasonic sensor FLOWCHART MODEL



3. Фільтрація:

- Використовує 3-значний медіанний фільтр для нових значень
- Ігнорує значення 0 та те, що знаходиться в ± 300 mm від медіанного значення.

4. Output:

- Якщо дистанція в межах 450–550 mm \rightarrow 5V (`analogWrite = 255`)
- Якщо дистанція в межах 2700–3300 mm \rightarrow 3.3V (`analogWrite = 168`)
- Else \rightarrow відправляє 0V

Як працює код

1. Сетап:

- Ініціалізація Serial and Serial1 (для сенсора).
- Налаштування таймеру `sensorTask()` every 100 ms.
- Підготовка pin D5 (`OUT_PIN`) для output (PWM).

2. Комунікація сенсора:

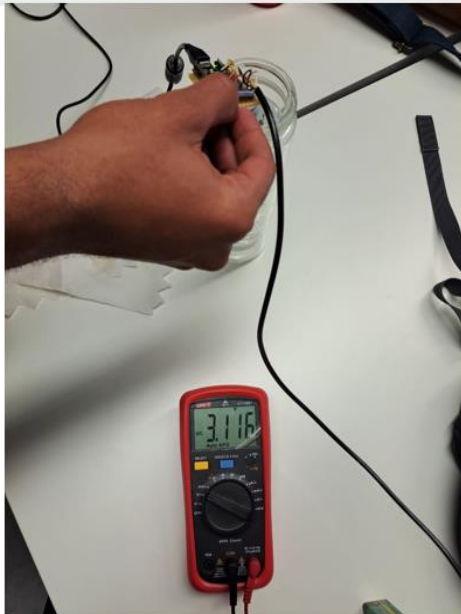
- Відправляє `0x55` сенсору як "ping" command.
- Чекає на 4 bytes від сенсора (header + distance + checksum).
- Перевіряє дані використовуючи checksum.

5. Loop:

- `loop()` повторює операцію `sensorTask()` periodically.

8

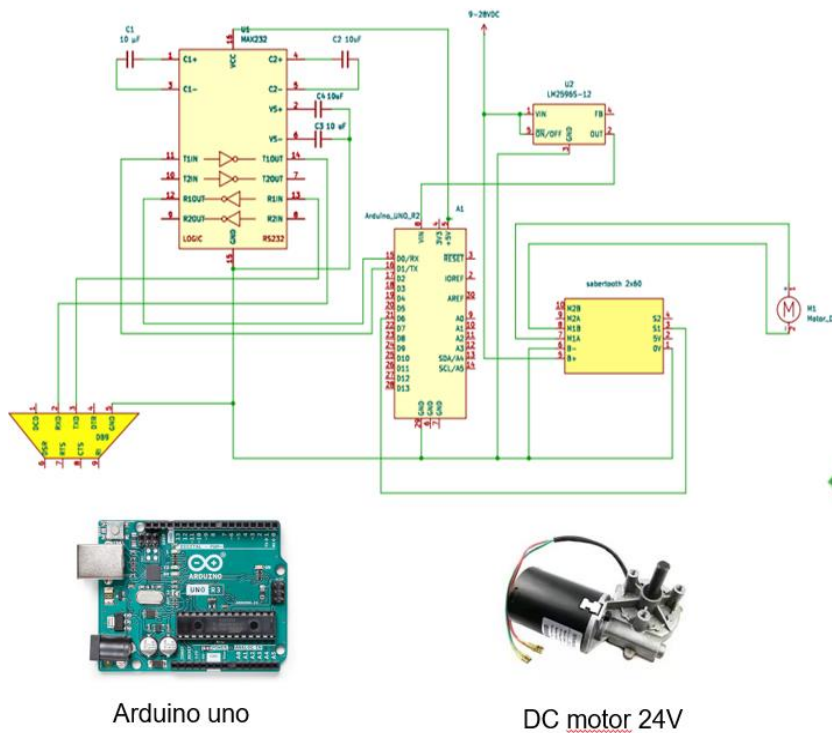
Тестування коду



```
#define THRESH_3000 160
#define RANGE_3000 16

// Output logic based on updated thresholds
if (abs(int(filt) - THRESH_500) <= RANGE_500) {
    analogWrite(OUT_PIN, 255);
    Serial.println("OUTPUT = 5V");
}
else if (abs(int(filt) - THRESH_3000) <=
RANGE_3000) {
    analogWrite(OUT_PIN, 168);
    Serial.println("OUTPUT = 3.3V");
}
else {
    analogWrite(OUT_PIN, 0);
    Serial.println("OUTPUT = 0V");
}
} else {
    Serial.println("not detecting");
}
}
```

9

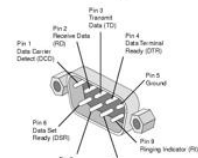


Arduino uno



DC motor 24V

Контроль двигуна & Комунікація



DB9 - конектор



Max232



Sabertooth



Понижующий регулятор
напряги LM2596S-12

10



U- 01100011 вниз
D- 00011101 вгору
S- 01000000 стоп

Команда (десятковий код)	Двійковий код (8 біт)	Напрямок	Швидкість
99	01100011	Вниз	Оптимальна
64	01000000	Стоп	0
29	00011101	Вгору	Оптимальна

конвертує RS-232 сигнали ($\pm 12V$) у сигнали TTL-рівня (0–5 V), які зрозумілі для Arduino.

Обробляє команду: 'U' — рух вгору

'D' — рух вниз 'S' — зупинка

Команда передається по каналу «RS-232 → MAX232 → Arduino».

Arduino розпізнає 'U' і надсилає Serial.write(64 + 50) на блок Sabertooth.

Sabertooth починає обертати мотор в напрямку "вгору".

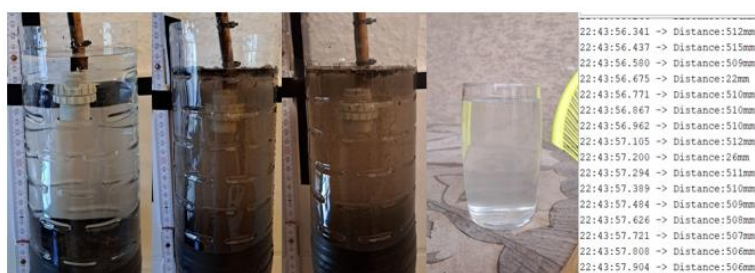
'S' з ПК — Arduino надсилає Serial.write(64) — двигун зупиняється.

11

Порівняння каламутності



5, 50 і 500 NTU (Nephelometric Turbidity Units) зразки



Чиста вода Дуже мутна вода Дуже мутна вода після 3 годин Морська вода Консоль дуже мутна вода після 3 годин

12



Завершений прототип
сенсора для контролю глибини занурення

13

Висновки

У рамках проєкту було створено надійну, компактну та енергоефективну систему виявлення морського дна, адаптовану до умов Балтійського моря. Основу системи складає ультразвуковий сенсор, здатний точно визначати відстань навіть у сильно каламутній воді. Після комплексного тестування він показав стабільну роботу при рівні каламутності до 300 NTU, що повністю задовольняє вимоги замовника. Корпус пристрою було надруковано на 3D-принтері з біорозкладного матеріалу [GreenTec Pro](#), що забезпечив герметичність і стійкість до тиску до 5 бар. Такий підхід дозволив досягти високої точності виготовлення та швидкого прототипування.

Програмне забезпечення на базі Arduino Nano Every реалізує фільтрацію даних за допомогою медіанного алгоритму, що дозволяє зменшити шум та відкидати викиди при зчитуванні. Датчик надає аналоговий вихід, що значно спростило інтеграцію з основною системою зонда.

Окремо була реалізована система керування двигуном для автоматичного опускання зонда. Сигнали з ПК передаються через інтерфейс RS-232, обробляються Arduino, і далі команда надсилається на драйвер [Sabertooth](#), який керує двигуном [Makermotor 24 V/80 Вт](#). Це дозволяє безпечно та точно опускати зонд на задану глибину, навіть при значних навантаженнях.

Рішення повністю відповідає початковим технічним вимогам і готове до використання в реальних умовах із перспективою подальшої модернізації.

14

Програмування

Код від виробника сенсора

```
#include <SoftwareSerial.h>
unsigned char buffer_RTT[4] = {0};
uint8_t CS;
#define COM 0x55
int Distance = 0;
SoftwareSerial mySerial(7, 8);
void setup() {
  Serial.begin(115200);
  mySerial.begin(115200);
}
void loop() {
  mySerial.write(COM);
  delay(100);
  if(mySerial.available() > 0){
    delay(4);
    if(mySerial.read() == 0xff){
      buffer_RTT[0] = 0xff;
      for (int i=1; i<4; i++){
        buffer_RTT[i] = mySerial.read();
      }
      CS = buffer_RTT[0] + buffer_RTT[1]+ buffer_RTT[2];
      if(buffer_RTT[3] == CS) {
        Distance = (buffer_RTT[1] << 8) + buffer_RTT[2];
        Serial.print("Distance:");
```

```

Serial.print(Distance);
Serial.println("mm");
}
}
}
}

```

Код для прототипу на базі ARDUINO NANO EVERY

```

#include <EveryTimer.h>
#define COM 0x55
#define OUT_PIN 5
#define PERIOD_MS 100
#define OUTLIER_DELTA 300
// New thresholds
#define THRESH_500 500
#define RANGE_500 50
#define THRESH_3000 3000
#define RANGE_3000 300
EveryTimer timer;
uint8_t buf[4];
uint8_t CS;
uint16_t rawDistance = 0;
uint16_t recentReadings[3] = {0};
uint8_t idx = 0;
uint8_t countValid = 0;
uint16_t median3(uint16_t a, uint16_t b, uint16_t c) {
if ((a >= b && a <= c) || (a <= b && a >= c)) return a;

```

```
if ((b >= a && b <= c) || (b <= a && b >= c)) return b;
return c;
}

void setup() {
  Serial.begin(115200);
  while (!Serial);
  Serial1.begin(115200);
  pinMode(OUT_PIN, OUTPUT);
  analogWrite(OUT_PIN, 0);
  timer.Every(PERIOD_MS, sensorTask);
}

void loop() {
  timer.Update();
}

void sensorTask() {
  Serial1.write(COM);
  unsigned long start = millis();
  while (millis() - start < 200) {
    if (Serial1.available() >= 4) {
      if (Serial1.read() == 0xFF) {
        buf[0] = 0xFF;
        for (int i = 1; i < 4; i++) {
          buf[i] = Serial1.read();
        }
        CS = buf[0] + buf[1] + buf[2];
        if (buf[3] == CS) {
```

```

rawDistance = (uint16_t(buf[1]) << 8) | buf[2];
Serial.print("Raw: ");
Serial.print(rawDistance);
Serial.println(" mm");
if (rawDistance == 0) {
Serial.println("Skipped zero reading");
return;
}
if (countValid >= 3) {
uint16_t med = median3(recentReadings[0], recentReadings[1],
recentReadings[2]);
if (abs((int)rawDistance - (int)med) > OUTLIER_DELTA) {
Serial.println("Discarded outlier");
return;
}
}
recentReadings[idx] = rawDistance;
idx = (idx + 1) % 3;

if (countValid < 3) countValid++;
if (countValid < 3) {
Serial.print("Collecting samples: ");
Serial.print(countValid);
Serial.println("/3");
return;
}
uint16_t filt = median3(recentReadings[0], recentReadings[1],

```

```
recentReadings[2]);
Serial.print("Filtered Distance: ");
Serial.print(filt);
Serial.println(" mm");
// Output logic based on updated thresholds
if (abs(int(filt - THRESH_500)) <= RANGE_500) {
  analogWrite(OUT_PIN, 255);
  Serial.println("OUTPUT = 5V");
}
else if (abs(int(filt - THRESH_3000)) <= RANGE_3000) {
  analogWrite(OUT_PIN, 168);
  Serial.println("OUTPUT = 3.3V");
}
else {
  analogWrite(OUT_PIN, 0);
  Serial.println("OUTPUT = 0V");
}
} else {
  Serial.println("not detecting");
}
}
break;
}
}
}
```

Код для контролю мотора

```
#include <SoftwareSerial.h>

#define SABER_TX 6 // Pin for sending commands to Sabertooth

#define SPEED 35 // Speed value (range: 1–63)

SoftwareSerial sabertoothSerial(-1, SABER_TX); // TX only; RX is not used

void setup() {
  Serial.begin(9600); // Communication with PC via MAX232 (RS-232)
  sabertoothSerial.begin(9600); // Communication with Sabertooth
}

void loop() {
  if (Serial.available()) {
    char command = Serial.read(); // Read 'U', 'D', or 'S'
    switch (command) {
      case 'U': // Move up
        sabertoothSerial.write(64 + SPEED);
        break;
      case 'D': // Move down
        sabertoothSerial.write(64 - SPEED);
        break;
      case 'S': // Stop
        sabertoothSerial.write(64);
        break;
      default:
        // Optional: handle unknown commands
        break; } } }
```