

Вінницький національний технічний університет

(повне найменування закладу вищої освіти)

Факультет інформаційних електронних систем

(повна назва факультету)

Кафедра інформаційних радіоелектронних технологій і систем

(повна назва кафедри)

**МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

на тему:

**«Засіб контролю швидкості вітрового потоку з покращеними  
метрологічними характеристиками»**

Виконав: студент 2-го курсу, групи КІВТ-22м  
спеціальності 152 – Метрологія та  
інформаційно-вимірювальна техніка  
ОП Комп'ютеризовані інформаційно-  
вимірювальні технології

(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

Климчук О.О.

(прізвище та ініціали)

Керівник: доц. каф. ІРТС

Дудатьєв І.А.

(прізвище та ініціали)

«18» 12 2023 р.

Опонент: доц. каф. БМІ та ОЕС

Тужанський С.Є.

(прізвище та ініціали)

«19» 12 2023 р.

**Допущено до захисту**

Завідувач кафедри ІРТС

д.т.н. проф. Осадчук О.В.

(прізвище та ініціали)

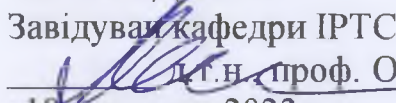
«20» 12 2023 р.

Вінниця ВНТУ – 2023 рік

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

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри ІРТС

  
Д.т.н. проф. Осадчук О.В.  
«18» вересня 2023 року

## **ЗАВДАННЯ** **НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

Климчуку Олександрю Олеговичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Засіб контролю швидкості вітрового потоку з покращеними метрологічними характеристиками;

керівник роботи: доц. каф. ІРТС, Дудатьєв І.А.

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом закладу вищої освіти від «18» 09.2023 року № 247.

2. Строк подання студентом роботи 16 грудня 2023 р.

3. Вихідні дані до роботи: перетворювач: модель 400EP18A від Prowave, працює на частоті 40 кГц, герметично закритий для зовнішнього використання, ланцюг збудження: мікроконтролер STM32F429, фільтр низьких частот: обмежує вихідну частоту 7 Гц, Зенерівський діод: обмежує напругу трансформатора до 13 В, приймальний ланцюг: має зміщення напруги 165 В, фільтр низьких частот: Butterworth, частота відсікання 86 кГц.


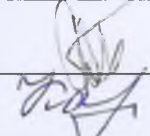
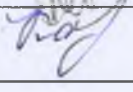
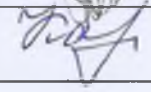
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): аналіз існуючих засобів та методів вимірювання швидкості вітрового потоку; методи побудови комп'ютеризованих систем моніторингу стану мікроклімату теплиць; розробка засобу вимірювання швидкості вітрового потоку з покращеними метрологічними характеристиками; підбір компонентів для розробки засобу вимірювання швидкості вітрового потоку з покращеними метрологічними характеристиками та розробка електричної схеми; моделювання та результат роботи розробленого засобу вимірювання; економічна частина; висновки; список використаних джерел; додатки.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): зображення змодельованого потоку вітру, коли він дме паралельно вимірюваній осі; зображення використання неортогональної позиційної геометрії у розробленому засобі вимірювання; зображення неортогональної позиційної геометрії розробленого засобу вимірювання по відношенню до декартової системи



координат; електрична схема розробленого засобу вимірювання; таблиця порівняльного випробовування в аеротрубі, таблиця порівняння розробленого прототипу з іншими існуючими засобами вимірювання; графік порівняння вимірних значень швидкості вітру з реальними значеннями до і після калібрування; графік порівняльного тесту між засобом вимірювання з ортогональною топологією та комерційним обладнанням з паралельним вітром для одноосьового вимірювання; графік порівняльного тесту із комерційним обладнанням і падаючим вітром паралельно на північ від засобу вимірювання з неортогональною геометрією.

#### 6. Консультанти розділів роботи

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

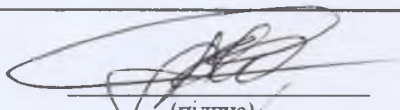
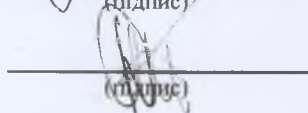
#### 7. Дата видачі завдання 18.09.2023 року

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Вибір, узгодження та затвердження тем МКР на випусковій кафедрі.	02.09.2023-07.09.2023	
2.	Огляд та аналіз літературних джерел.	08.09.2023-17.09.2023	
3.	Затвердження тем по ВНТУ. Розробка завдання на МКР.	18.09.2023-27.09.2023	
4.	Попередня розробка основних розділів. Аналіз вирішення поставленої задачі. Розробка структурної схеми та технічних рішень.	28.09.2023-15.10.2023	
5.	Математичне моделювання та електричні розрахунки. Експериментальне дослідження.	16.10.2023-09.11.2023	
6.	Розробка графічної частини МКР.	10.11.2022-20.11.2022	
7.	Економічна частина.	21.11.2023-30.11.2023	
8.	Оформлення пояснювальної записки та графічної частини.	01.12.2023-14.12.2023	
9.	Нормоконтроль.	15.12.2023-18.12.2023	
10.	Попередній захист МКР, доопрацювання, рецензування МКР.	19.12.2023-20.12.2023	
11.	Захист МКР ЕК.	21.12.2023-22.12.2023	

Студент

Керівник роботи

  
(підпис)  
  
(підпис)

Климчук О.О.

Дудатьєв І.А.

## АНОТАЦІЯ

УДК 004.457

Климчук О.О. Засіб контролю швидкості вітрового потоку з покращеними метрологічними характеристиками. Магістерська кваліфікаційна робота зі спеціальності 152 – Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка, освітня програма – Комп'ютеризовані інформаційно-вимірювальні технології. Вінниця: ВНТУ, 2023. 81 с.

На укр. мові. Бібліогр.: 35 назв; рис.: 27; табл.: 14.

Магістерська кваліфікаційна робота присвячена розробці засобу контролю швидкості вітрового потоку з покращеними метрологічними характеристиками. Досліджено проблеми точності та метрологічні характеристики існуючих анемометрів і розроблено новий пристрій, який може забезпечити високу точність та надійність вимірювань. У роботі детально вивчено теоретичні аспекти ультразвукових анемометрів та їх застосування для вимірювання вітрового потоку в умовах високої інтенсивності вітрів. Використання неортогональної геометрії дозволяє покращити точність та стійкість пристрою при вимірюванні вітру під різними кутами.

Графічна частина складається з 9 плакатів із результатами моделювання.

У економічній частині роботи проведено аналіз вартості виробництва та потенційної ринкової цінності розробленого анемометру. Результати дослідження свідчать про великий потенціал пристрою у вимірюванні вітрового потоку в різних галузях, таких як сільське господарство, вітроенергетика, авіація та інші.

Ключові слова: ультразвуковий анемометр, неортогональна геометрія, вимірювання швидкості вітру, метрологічні характеристики, точність, висока інтенсивність вітру, економічний аналіз.

## ABSTRACT

Klymchuk O.O. A means of controlling the speed of the wind flow with improved metrological characteristics. Master's qualification thesis on specialty 152 - Metrology and information and measurement technology, educational program - Computerized information and measurement technologies. Vinnytsia: VNTU, 2023. 81 p.

In Ukrainian language. Bibliography: 35 titles; fig.: 27; table.: 14.

The master's thesis is devoted to the development of a means of controlling the speed of the wind flow with improved metrological characteristics. The problems of accuracy and metrological characteristics of existing anemometers were investigated and a new device was developed that can provide high accuracy and reliability of measurements. Theoretical aspects of ultrasonic anemometers and their application for measuring wind flow in conditions of high wind intensity are studied in detail. The use of non-orthogonal geometry allows to improve the accuracy and stability of the device when measuring the wind at different angles.

The graphic part consists of 9 posters with simulation results.

In the economic part of the work, an analysis of the production cost and potential market value of the developed anemometer was carried out. The results of the study show the great potential of the device in measuring wind flow in various fields, such as agriculture, wind energy, aviation and others.

Key words: ultrasonic anemometer, non-orthogonal geometry, wind speed measurement, metrological characteristics, accuracy, high wind intensity, economic analysis.



## ЗМІСТ

<b>ВСТУП</b> .....	5
<b>1 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ЗАСОБІВ ТА МЕТОДІВ ВИМІРЮВАННЯ ШВИДКОСТІ ВІТРОВОГО ПОТОКУ</b> .....	6
1.1 Загальні відомості про анемометри.....	6
1.2 Чашкові анемометри.....	7
1.3 Лазерні анемометри (лідари).....	10
1.4 Теплові анемометри.....	13
1.5 Трубчасті анемометри.....	15
1.6 Анемометри нажимної пластини.....	17
1.7 Акустичні анемометри.....	19
1.8 Ультразвукові анемометри.....	22
1.9 Інші методи/засоби контролю швидкості вітрового потоку.....	24
1.9.1 Метеорологічні вежі .....	24
1.9.2 Контроль вітрового потоку за допомогою роторів та вітерцевих тунелів.....	26
1.9.3 Вітряки (керовані вентилятори).....	28
1.9.4 Вітроенергетичні системи управління турбінами .....	30
1.9.5 Аеродинамічні системи управління .....	31
1.10 Висновки до розділу .....	33
<b>2 РОЗРОБКА ЗАСОБУ ВИМІРЮВАННЯ ШВИДКОСТІ ВІТРОВОГО ПОТОКУ З ПОКРАЩЕНИМИ МЕТРОЛОГІЧНИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ</b> .....	34
2.1 Загальна інформація.....	34
2.2 Техніка вимірювання .....	36
2.3 Геометрія анемометра.....	38
2.4 Висновки до розділу .....	44

<b>3 ПІДБІР КОМПОНЕНТІВ ДЛЯ РОЗРОБКИ ЗАСОБУ ВИМІРЮВАННЯ ШВИДКОСТІ ВІТРОВОГО ПОТОКУ З ПОКРАЩЕНИМИ МЕТРОЛОГІЧНИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ТА РОЗРОБКА ЕЛЕКТРИЧНОЇ СХЕМИ .....</b>	<b>45</b>
3.1 Компонентно-програмна база та електрична схема .....	45
3.2 Процедура вимірювання.....	47
3.3 Висновки до розділу .....	48
<b>4 МОДЕЛЮВАННЯ ТА РЕЗУЛЬТАТ РОБОТИ РОЗРОБЛЕНОГО ЗАСОБУ ВИМІРЮВАННЯ ШВИДКОСТІ ВІТРОВОГО ПОТОКУ З ПОКРАЩЕНИМИ МЕТРОЛОГІЧНИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ.....</b>	<b>50</b>
4.1 Моделювання роботи.....	50
4.2 Результат роботи .....	52
4.3 Висновки до розділу .....	54
<b>5 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА .....</b>	<b>56</b>
5.1 Проведення комерційного та технологічного аудиту науково-технічної розробки ..	56
5.2 Розрахунок узагальненого коефіцієнта якості розробки.....	60
5.3 Розрахунок витрат на проведення науково-дослідної роботи.....	62
5.3.1 Витрати на оплату праці.....	62
5.3.2 Відрахування на соціальні заходи.....	65
5.3.3 Сировина та матеріали.....	65
5.3.4 Розрахунок витрат на комплектуючі.....	67
5.3.5 Спецустаткування для наукових (експериментальних) робіт .....	68
5.3.6 Програмне забезпечення для наукових (експериментальних) робіт .....	69
5.3.7 Амортизація обладнання, програмних засобів та приміщень .....	70
5.3.8 Паливо та енергія для науково-виробничих цілей .....	71
5.3.9 Службові відрядження.....	72
5.3.10 Витрати на роботи, які виконують сторонні підприємства, установи і організації.....	73
5.3.11 Інші витрати.....	74
5.3.12 Накладні (загальновиробничі) витрати.....	74

5.4 Розрахунок економічної ефективності науково-технічної розробки при її можливій комерціалізації потенційним інвестором .....	75
5.5 Висновки до розділу .....	80
<b>ВИСНОВОК</b> .....	81
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ</b> .....	82
Додаток А (обов'язковий) Ілюстративна частина .....	84
Додаток Б (обов'язковий) Протокол перевірки роботи .....	90



## ВСТУП

В сучасному світі ефективне використання вітроенергії є одним із ключових напрямів для забезпечення сталого розвитку та зменшення викидів вуглецю. Відповідно до цього, розробка точних та надійних засобів контролю швидкості вітрового потоку має велике значення для підвищення продуктивності вітроенергетичних установок та забезпечення безпеки в авіації та інших галузях.

**Актуальність теми** обумовлена необхідністю поліпшення метрологічних характеристик засобів контролю швидкості вітру, особливо в умовах високої інтенсивності вітрів. Існуючі засоби вимірювання можуть бути недостатньо точними та стійкими у таких умовах.

**Метою та завданням роботи є:** розробка засобу контролю швидкості вітрового потоку з покращеними метрологічними характеристиками, аналіз отриманих результатів та порівняння їх з існуючими рішеннями.

**Об'єктом дослідження є:** процеси вимірювання швидкості вітрового потоку високої інтенсивності та засіб контролю, який використовується для цих цілей.

**Предметом дослідження є:** розроблений та вдосконалений засіб контролю швидкості вітрового потоку з покращеними метрологічними характеристиками.

**Методи дослідження:** для досягнення поставлених цілей використовуються методи аналізу літературних джерел, моделювання, інженерного проектування, експериментальних вимірювань та обробки даних.

**Новизна одержаних результатів.** Наукова новизна даної магістерської кваліфікаційної дипломної роботи полягає в розробці та вдосконаленні засобу контролю швидкості вітрового потоку з покращеними метрологічними характеристиками. Це вдосконалення важливе, оскільки існуючі засоби вимірювання можуть бути недостатньо точними та стійкими у високоінтенсивних вітрах, що досить поширені в ряді регіонів.

# 1 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ЗАСОБІВ ТА МЕТОДІВ ВИМІРЮВАННЯ ШВИДКОСТІ ВІТРОВОГО ПОТОКУ

З початку XXI століття, вітрова енергія стала одним із найшвидше зростаючих джерел відновлюваної енергії у світі. Цей ріст обумовлений потребою зменшення викидів вуглекислого газу та залежності від викопного палива. Однак, ефективне використання вітрової енергії значною мірою залежить від точності та надійності вимірювання швидкості вітру. Традиційні методи, такі як механічні анемометри, часто обмежені у точності, особливо при високих швидкостях та змінних вітрових умовах.

Огляд літератури показує, що сучасні методи вимірювання швидкості вітру не завжди забезпечують достатню точність у складних метеорологічних умовах. Це створює значні виклики для вітрової індустрії, особливо у контексті збільшення потужності та ефективності вітрових турбін. Розробка нового типу ультразвукового анемометра з неортогональною геометрією, вирішує ці проблеми, забезпечуючи вищу точність та надійність вимірювань при високих швидкостях вітру.

## 1.1 Загальні відомості про анемометри

Анемометр – це прилад, який використовується для визначення швидкості, інтенсивності, амплітуди та напрямку вітру. Він також використовується фізиками для визначення курсу повітряного потоку. Сотні років тому перші анемометри були розроблені для приблизної кількісної оцінки вітру. Вони доступні в ручному та цифровому форматах і можуть використовуватися для розрахунку як швидкості газу, так і швидкості замкнутого потоку та потоку без обмеження, наприклад зовнішнього вітру. Анемометри бувають самих різних форм і розмірів. Деякі з них є портативними ручними анемометрами, а інші встановлюються в конструкції та підключаються до них як частина метеостанцій.

Багато людей винайшли свої моделі анемометра, слідуючи першим розробкам, деяким з них помилково приписували їхній винахід. Кажуть, що італійський винахідник Леон Баттіста Альберті винайшов перший анемометр у 1450 році, і цьому слід віддати належне. Крім того, Джон Томас Ромні Робінсон, вчений зі Сполученого Королівства, винайшов анемометр у 1846 році. Пізніше було зроблено багато модифікацій і винайдено різні типи анемометрів для більш точного вимірювання швидкості та тиску вітру [1].

До складу анемометра включають три-чотири чашки, з'єднані з горизонтальними плечами найпоширенішого типу анемометра. До рук кріпиться вертикальна штанга. Чашки обертаються під час вітру, завдяки чому вудилище обертається. Чим сильніший вітер, тим швидше обертається вудилище.

Анемометри можуть використовуватися штормовиками, щоб зрозуміти, наскільки сильний вітер. Щоб вирішити чи буде певна територія хорошим місцем для видобутку енергії вітру геодезист вітрових турбін може використовувати портативний анемометр. Ще одна мета анемометра – оцінити кліматичні умови та надати інформацію про швидкість і напрямок вітру. Тому його також називають інструментом для контролю температури.

Анемометри використовуються практично на всепогодних станціях. Для пілотів, інженерів і кліматологів швидкість вітру допомагає сигналізувати про зміну погодних умов, наприклад про наближення урагану. Оскільки прогнози погоди не містять поточних даних, ці пристрої допомагають відстежувати аеродроми та аеропорти, щоб мінімізувати небезпеку польотів літаків на низькій висоті під час зльоту та посадки.

## 1.2 Чашкові анемометри

Простий тип анемометра, винайдений (1846) доктором Джоном Томасом Ромні Робінсон з обсерваторії Арма. Він складався з чотирьох напівсферичні чашки, кожна з яких встановлена на одному кінці чотирьох горизонтальних плечей, які в свою чергу були встановлені під рівними кутами одна до одної по



вертикалі вал. Потік повітря повз чашки в будь-якому горизонтальному напрямку повертався чашок у спосіб, який був пропорційний швидкості вітру. Тому підрахунок оборотів чашок за встановлений період часу дає середня швидкість вітру для широкого діапазону швидкостей. На анемометрі з чотирма чашками це легко побачити, оскільки чашки розташовані симетрично на кінці рукавів, вітер завжди має западину однієї чашки, поданої йому, і дме на зворотну сторону чашки на протилежний кінець хреста. Коли Робінсон вперше створив свій анемометр, він стверджував, що чашки рухалися на одну третину швидкості вітру, не впливаючи на чашку розмір або довжина руки [2]. Це, очевидно, було підтверджено деякими ранніми незалежних експериментів, але це було невірно. Натомість співвідношення в швидкість вітру та чашок залежить від фактору анемометра від розмірів чашок і дужок і може мати значення від двох до трохи більше трьох. Кожен експеримент із залученням анемометра довелося повторити. Тричашковий анемометр, розроблений канадцем Джоном Паттерсоном у 1926 році, і подальші чашкові вдосконалення Компанія Brevoort & Joiner із США в 1935 році привела до дизайну чашкового колеса, який був лінійним і мав похибку менше 3% до 60 миль/год (97 км/год). Паттерсон виявив, що кожна чашка створює максимальний крутний момент, коли вона знаходиться під кутом 45 градусів потік вітру. Тричашковий анемометр також мав більш постійний крутний момент і швидше реагував на пориви, ніж чотиричашковий анемометр. Тричашковий анемометр був модифікований австралійцем Дерекком Вестоном у 1991 році для вимірювання напрямку і швидкості вітру. Вестон додав тег до однієї чашки, що призводить до збільшення та зменшення швидкості чашкового колеса коли тег рухається по черзі з вітром і проти нього. Напрямок вітру розраховується на основі цих циклічних змін швидкості вітру, а швидкість вітру, як зазвичай, визначається із середньої швидкості колеса. Тричашкові анемометри в даний час використовуються як промисловий стандарт для досліджень оцінки вітрових ресурсів. На рисунку 1.1 зображено узагальнену схему чашкового анемометра, а на рисунку 1.2 зображено приклад чашкового анемометра.

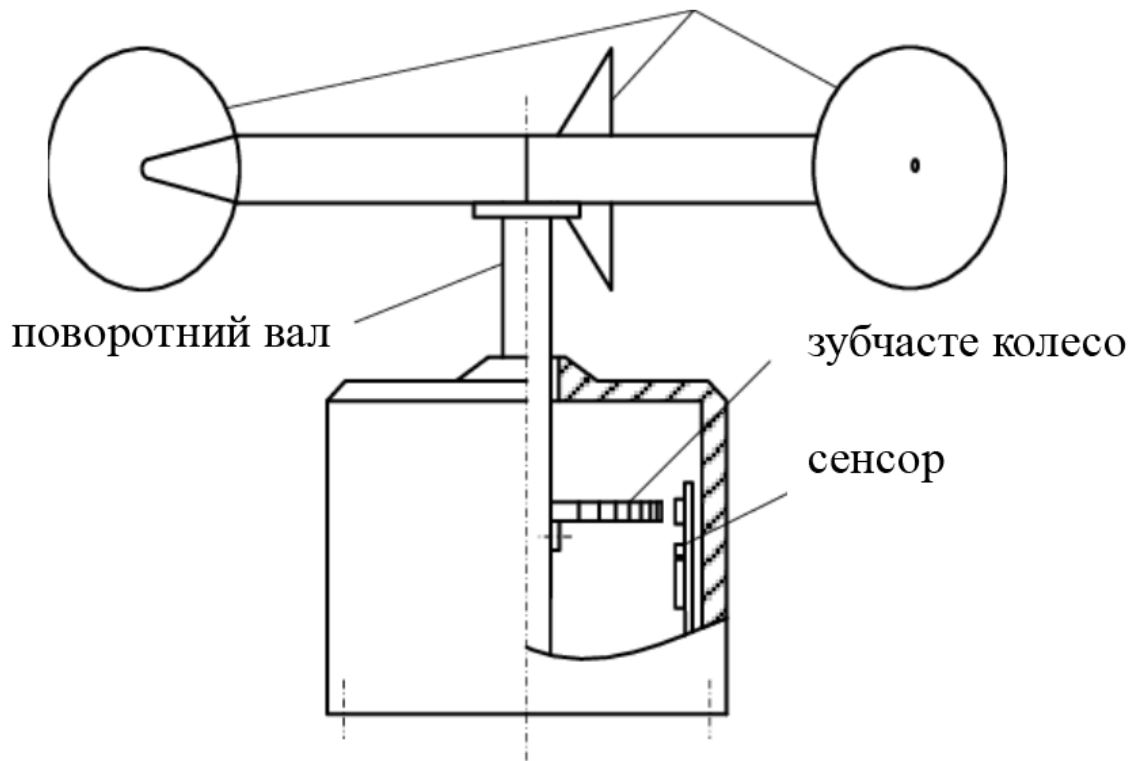


Рисунок 1.1 – Узагальнена схема чашкового анемометра



Рисунок 1.1 – Приклад чашкового анемометра

### 1.3 Лазерні анемометри (лідари)

Лазерні анемометри, лідарні системи, або лідари, являють собою активні лазерні локаційні та оптоелектронні пристрої, створені для дистанційного вивчення оточення за допомогою лазерного світла. Їх основна мета – збір даних для наукових, метеорологічних, виробничих і екологічних цілей. Лідари працюють на основі унікальних властивостей лазерного випромінювання, таких як висока потужність, квазімонохроматичність, направленість і короткі імпульси. Вони використовують такі фізичні процеси, як пружне розсіювання на молекулах та аерозолях, а також непружне резонансне та комбінаційне розсіювання, що взаємодіють з атомами, молекулами [3] і частинками речовини. Це дозволяє застосовувати різні методи лазерного дистанційного зондування, включаючи метод комбінаційного розсіювання та індуктивної флуоресценції. В якості досліджуваного середовища або об'єкта можуть бути:

- поверхня землі та місяця;
- поверхня океану та морське дно на невеликих глибинах (метри-десятки метрів);
- підповерхневий шар океану та шари на значних глибинах;
- атмосфера;
- поверхня та атмосфера інших планет та їх супутників.

При поширенні лазерного світла від передавального блоку лідара вивчене середовище створює «лазерний слід» через зазначені фізичні процеси, що призводить до появи вторинного оптичного випромінювання. Це випромінювання, як лазерний локаційний ехо-сигнал, потім приймається та реєструється високочутливим приймальним пристроєм і обробляється для отримання інформації про середовище.

Сучасне дистанційне зондування – це розвинена галузь, що включає розгалужену класифікацію методів та приладів за такими критеріями, як вплив на середовище, об'єкт дослідження, характер взаємодії з середовищем, місце розташування приладів і загальне призначення. Методи зондування діляться на



активні, що використовують лазерне світло, та пасивні, які залежать від сонячного світла, відображеного від об'єкта. Пасивні прилади формують зображення об'єктів з різною просторовою роздільною здатністю та аналізують спектр відбитого світла, використовуючи різні спектральні прилади.

Лідари є універсальними інструментами для вивчення оточуючого середовища, забезпечуючи високу швидкість досліджень і мінімальне збурення досліджуваного середовища, оскільки лазерне світло рухається зі швидкістю світла. Універсальність лідарів дозволяє використовувати їх для екологічного моніторингу за такими основними напрямками:

- визначення термічних і структурних складових атмосфери Землі і, отже, контроль забруднення атмосфери;
- визначення термічних, структурних та динамічних характеристик атмосфери, гідросфери та підстилаючої поверхні Землі;
- реєстрація порогових концентрацій певних складових, які потрібні в деяких системах аварійного попередження забруднень;
- отримання карт розсіювання шлейфів забруднення та їх еволюції у часі;
- розпізнавання спектральних образів нафтових плям за спектральними характеристиками їх випромінювання.

Лідарні системи можуть бути встановлені на стаціонарних майданчиках, а також на мобільних засобах, включаючи транспортні засоби, судна, вертольоти, літаки та супутники. Незважаючи на різноманітність систем та приладів для дистанційних вимірювань, їхні основні компоненти мають схожу структуру та принцип роботи. Загальний механізм роботи лідара включає передавальний пристрій, приймальний телескоп, спектроаналізатор, фотоприймач та обробку даних, що забезпечують точне і ефективно зондування середовища. На рисунку 1.3 зображено узагальнену схему лідара, а на рисунку 1.4 зображено приклад лідара.

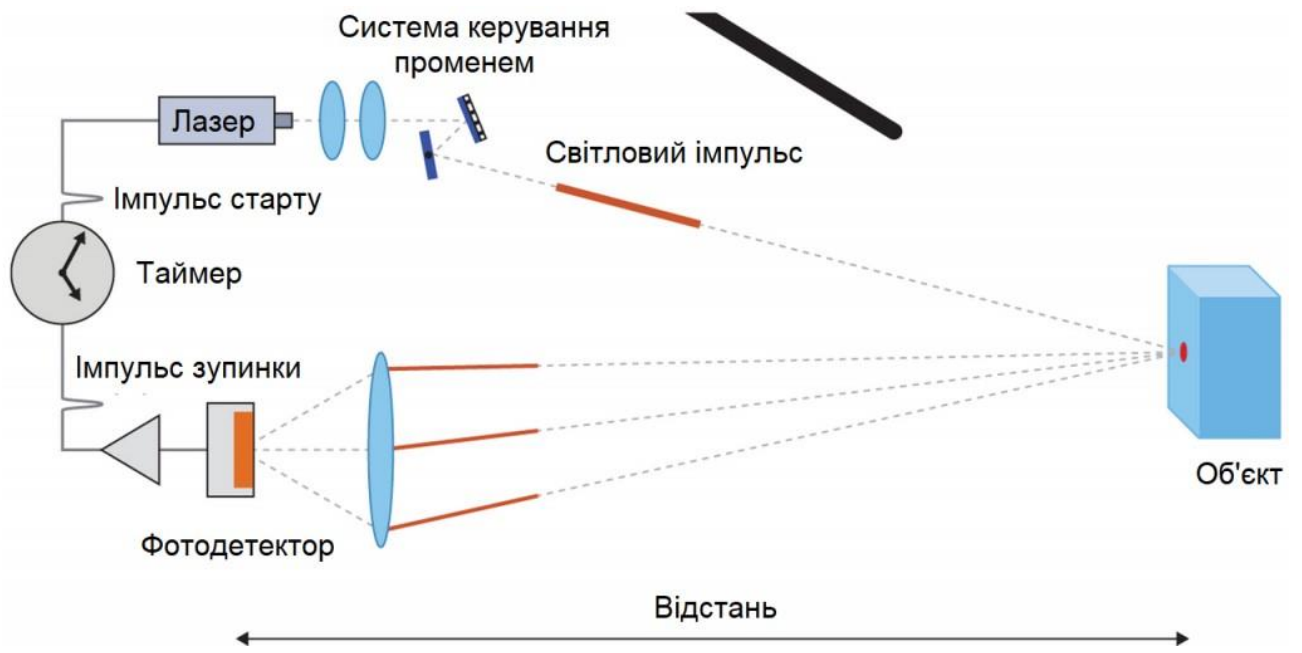


Рисунок 1.3 – Узагальнена схема лідару

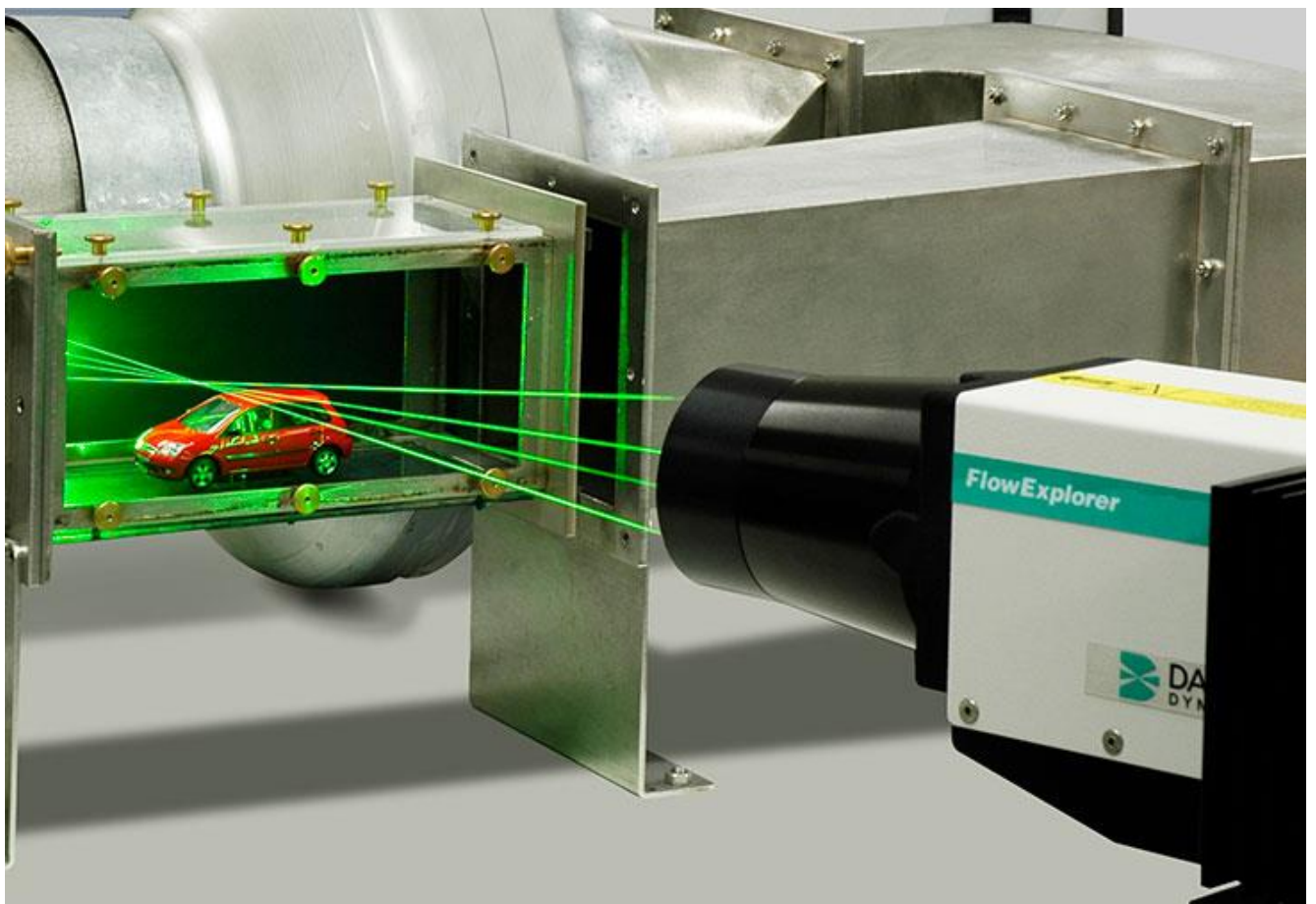


Рисунок 1.4 – Приклад лідару

#### 1.4 Теплові анемометри

Тепловий анемометр є спеціалізованим пристроєм для вимірювання швидкості та, іноді, напрямку вітрового потоку. Його принцип роботи заснований на охолодженні нагрітого елемента внаслідок впливу повітряного потоку. Далі розглянемо основні аспекти його конструкції та роботи.

Тепловий анемометр складається з одного або декількох нагрівних елементів, які можуть бути виготовлені у вигляді дроту, плівки або терморезистора. Ці елементи нагріваються до температури, яка є значно вищою за температуру навколишнього середовища. Коли повітря протікає повз ці нагріті елементи, воно відводить деяку кількість тепла, в результаті чого температура елемента знижується. Це зниження температури вимірюється і використовується для обчислення швидкості повітряного потоку [4].

Теплові анемометри поділяють на:

- струмовий тепловий анемометр: Тут використовується дріт або тонка плівка як нагрівний елемент. Швидкість вітру визначається за кількістю тепла, яке відводиться від дроту.
- константно-температурний анемометр: У цьому випадку система підтримує постійну температуру нагрівного елемента. Зміни в потужності, необхідні для підтримки цієї температури, використовуються для визначення швидкості вітру.
- константно-струмовий анемометр: Тут струм, що проходить через нагрівний елемент, утримується на сталому рівні, а швидкість вітру визначається за різницею температур між нагрітим елементом і навколишнім середовищем.

Перевагами даного типу анемометра буде висока точність та чутливість, особливо при низьких швидкостях вітру та здатність вимірювати швидкість вітру в різних напрямках. Невеликі розміри та легкість, що робить їх зручними для портативного використання.



Недоліками ж будуть чутливість до забруднення та вологи (що може впливати на точність вимірювань), необхідність регулярної калібрування та високі вимоги до догляду та обслуговування. На рисунку 1.5 зображено узагальнену схему теплового анемометра, а на рисунку 1.6 зображено приклад теплового анемометра.

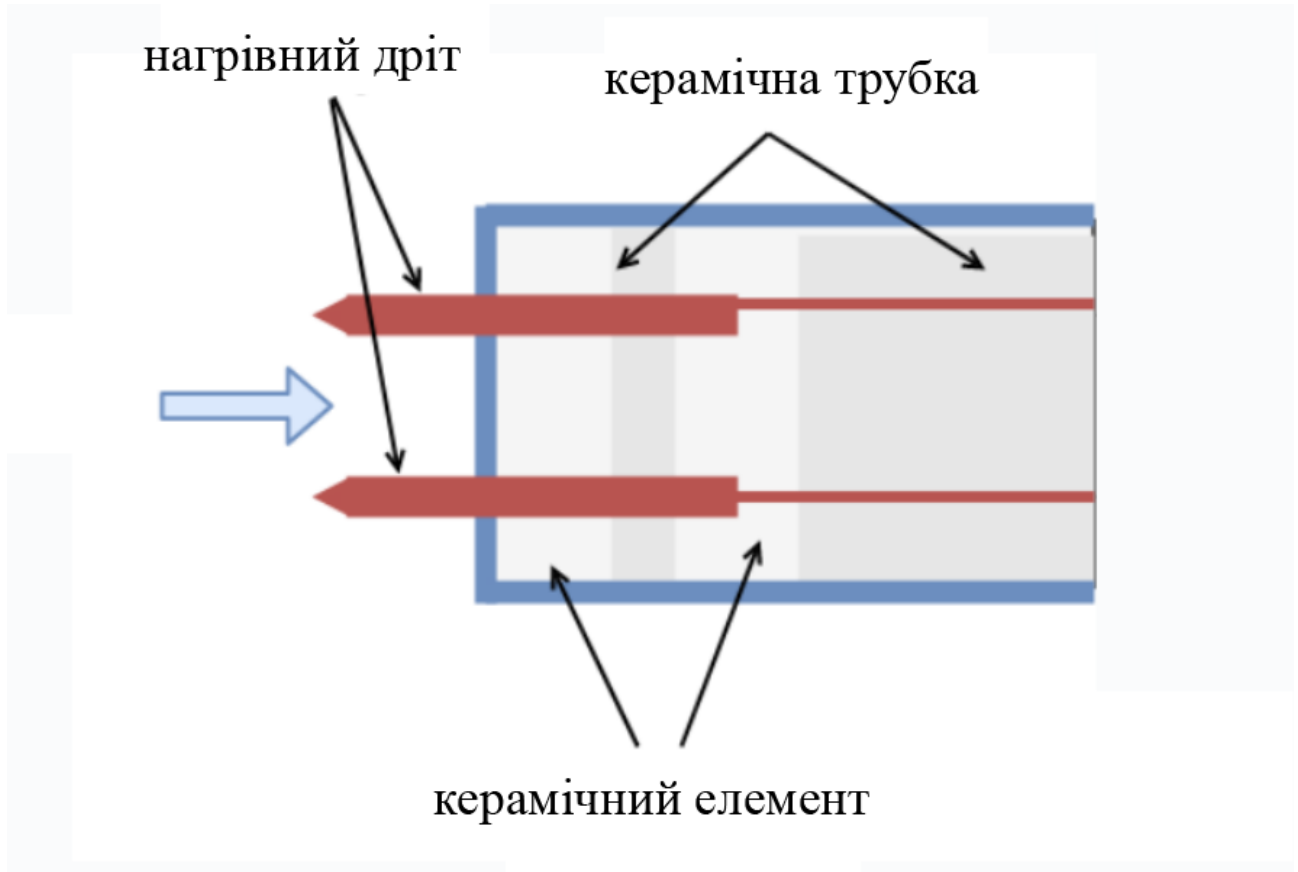


Рисунок 1.5 – Узагальнена схема теплового анемометра



Рисунок 1.6 – Приклад теплового анемометра

### 1.5 Трубчасті анемометри

Трубчастий анемометр складається із скляної трубки U, яка містить рідинний манометр. Один з її витоків вигнутий в горизонтальному напрямку, щоб витримувати вплив вітру, тоді як інший залишається паралельним вітровому потоку. Коли вітер вдуває в отвір трубки, це призводить до збільшення тиску на одному боці манометра, тоді як на іншому боці манометра, вище від відкритого кінця вертикальної трубки, це викликає невелику зміну тиску. Різниця в висоті обох кінців U-трубки є індикатором швидкості вітру.

Для більш точного вимірювання швидкості вітру в трубці з відкритим кінцем, навіть незначні відхилення від правильного напрямку вітру можуть призвести до значних змін в зчитуваннях. Тому, шляхом вимірювання різниці в тисках всередині двох таких трубок, можливо визначити швидкість вітру.

Основна перевага цього типу анемометра полягає в тому, що він не має жодних рухливих частин. Проте на відкритих місцях його точність обмежена через вплив вологи, пилу і комах [5].

Ще один прототип трубчастого анемометра має таку саму різницю в тисках між горлом прямої труби (відкритої), направленої на вітер, і має у вертикальній

трубі кільце з невеликими отворами. Труба закрита зверху. Обидва розташовані на одній і тій же висоті. Для вимірювання різниці в тисках потрібні спеціальні пристрої.

Реєстратор містить поплавок, який знаходиться в герметичній камері, частково заповненій водою. Верхній кінець герметичної камери пов'язаний з трубою. Труба з меншою діаметром направлена вниз всередині поплавка. Оскільки різниця тисків визначає положення поплавка по вертикалі, це є показником швидкості вітру.

Основна перевага трубчастого анемометра полягає в тому, що відкрита деталь навіть при встановленні на високому полюсі не потребує мастила або обслуговування протягом багатьох років роботи. Реєструючу частину можна розмістити в будь-якому положенні. Здається, що лише одне з'єднання може бути проблемним, проте різниця в тиску настільки мала, що для коригування тиску повітря в приміщенні, де знаходиться реєстратор, може бути необхідним. Таким чином, якщо інструмент залежить тільки від тиску або всмоктування, і вимірюється проти тиску повітря в закритому приміщенні з герметичними дверима і вікнами, ефект може бути еквівалентним вітру швидкістю 16 км/год, і навіть відчинення дверей або вікон може повністю змінити результат.

Хоча трубчастий анемометр має похибку близько 1% при швидкості 10 км/год, він недостатньо чутливий до низьких швидкостей вітру через невелику реакцію плоскої пластини, необхідної для повороту голівки у вітрі. На рисунку 1.7 зображено узагальнену схему трубчастого анемометру, а на рисунку 1.8 зображено приклад трубчастого анемометра.

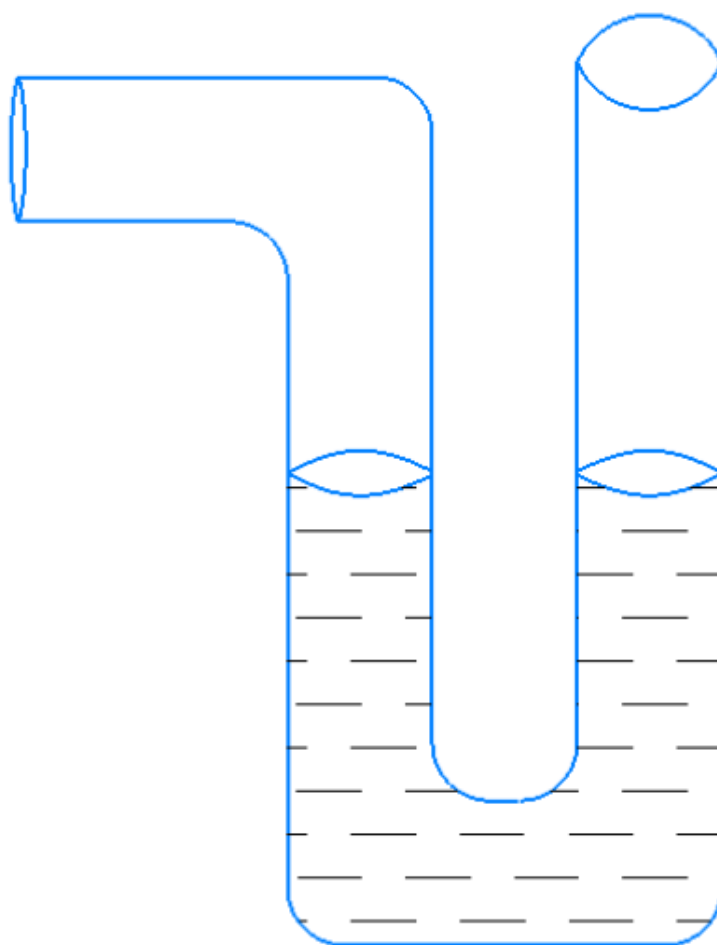


Рисунок 1.7 – Узагальнена схема трубчастого анемометра



Рисунок 1.8 – Приклад трубчастого анемометра

### 1.6 Анемометри нажимної пластини

Це перші сучасні анемометри. Вони складаються з плоскої пластини, підвішеної зверху так, що вітер відхиляє пластину. У 1450 році італійський архітектор Леон Баттіста Альберті винайшов перший механічний анемометр. Він був винайдений у 1664 році Робертом Гісом Хуком (його часто приймають за винахідника першого анемометра). Пізніші версії цієї форми склалися з квадратної або круглої плоскої пластини, яка трималася перпендикулярно до вітру флюгером. Тиск вітру на обличчя врівноважується пружиною [6]. Стиснення пружини визначає фактичну силу, яку вітер чинить на пластину, яка зчитується відповідним манометром або самописцем. Цей тип приладу не реагує на слабкий вітер, дає неточні показники під час сильного вітру та повільно реагує на змінний вітер. Пластинчасті анемометри використовувалися для активації попереджень про сильний вітер на мостах. На рисунку 1.9 зображено узагальнену



схему анемометра нажимної пластини, а на рисунку 1.10 зображено приклад анемометра нажимної пластини.

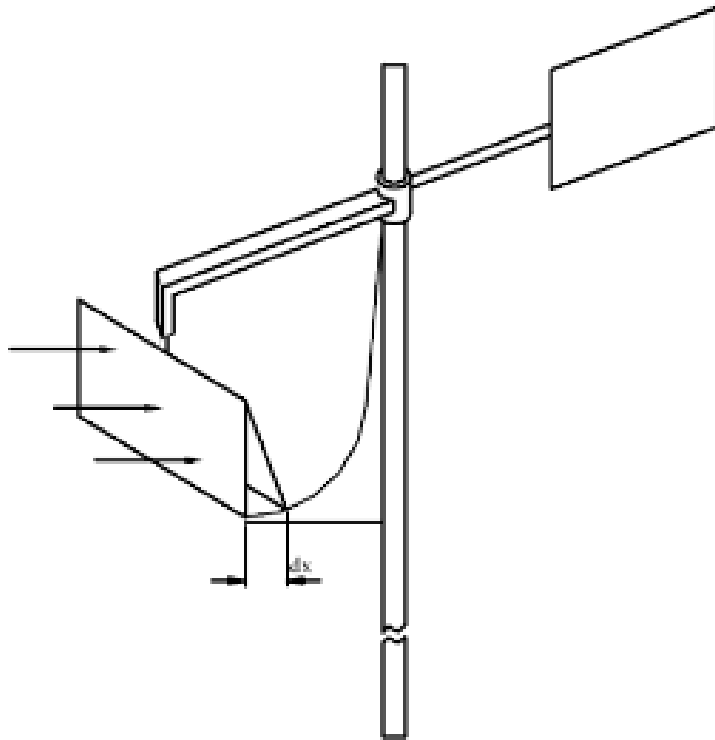


Рисунок 1.9 – Узагальнена схема анемометра нажимної пластини



Рисунок 1.10 – Приклад анемометра нажимної пластини

## 1.7 Акустичні анемометри

Акустичний анемометр – це прилад, призначений для вимірювання швидкості вітру з використанням звукових хвиль. Основним принципом роботи акустичного анемометра є вимірювання часу, який звукова хвиля потребує для переміщення від джерела до датчика, який встановлений на певній відстані. Ось основні кроки, які описують, як працює акустичний анемометр:

- випромінювання звуку: анемометр має вбудований звуковий джерело, яке генерує звукові імпульси або хвилі, ці звуки розповсюджуються в атмосфері у відповідь на рух повітря;
- приймання звуку: датчик, розташований на відомій відстані від джерела звуку, фіксує проходження звукових хвиль, час, який займає звуковій хвилі, щоб подолати цю відстань і дістатися до датчика, реєструється датчиком;
- обчислення швидкості вітру: анемометр використовує виміряний час та відому відстань між джерелом і датчиком, щоб обчислити швидкість.

Акустичні анемометри можуть бути точними та надійними приладами для вимірювання швидкості вітру в різних умовах. Вони застосовуються в метеорології, енергетиці, сільському господарстві та інших галузях, де важливо визначити швидкість вітру для безпеки та управління процесами [7].

Акустичні анемометри мають свої переваги і недоліки, а їх точність може бути різною в залежності від конкретної моделі та умов використання. Ось загальні переваги і недоліки акустичних анемометрів:

До переваг цього типу анемометру належать

- висока точність: акустичні анемометри можуть бути дуже точними, особливо при правильній калібруванні та дотриманні вимог до установки;
- широкий діапазон вимірювань: вони можуть вимірювати швидкості вітру в широкому діапазоні, від слабких до сильних вітрів;

- можливість роботи в ускладнених умовах: акустичні анемометри можуть працювати в умовах з великою кількістю викидів, аерозолів та інших заважаючих факторів;
- знижена підвищена витрати обслуговування: Вони зазвичай не вимагають постійного обслуговування та не потребують обслуговування під високим тиском;

Недоліками акустичних анемометрів будуть:

- висока вартість: акустичні анемометри можуть бути вартістю вищими порівняно з іншими типами анемометрів;
- залежність від умов: деякі умови, такі як дощ, сніг або сильні акустичні перешкоди, можуть впливати на точність вимірювань;
- складність установки: вони можуть вимагати складної установки і підтримки, що може збільшити витрати на обслуговування;
- обмежена доступність: акустичні анемометри можуть бути менш доступні для звичайних споживачів та менш поширеними порівняно з іншими типами анемометрів.

Точність акустичного анемометра може сильно залежати від якості приладу, умов встановлення та здатності користувача до належного калібрування і обслуговування. Важливо дотримуватися виробником вказаних інструкцій та рекомендацій для досягнення найкращих результатів при вимірюваннях швидкості вітру. На рисунку 1.11 зображено узагальнену схему акустичного анемометра, а на рисунку 1.12 зображено приклад акустичного анемометра.

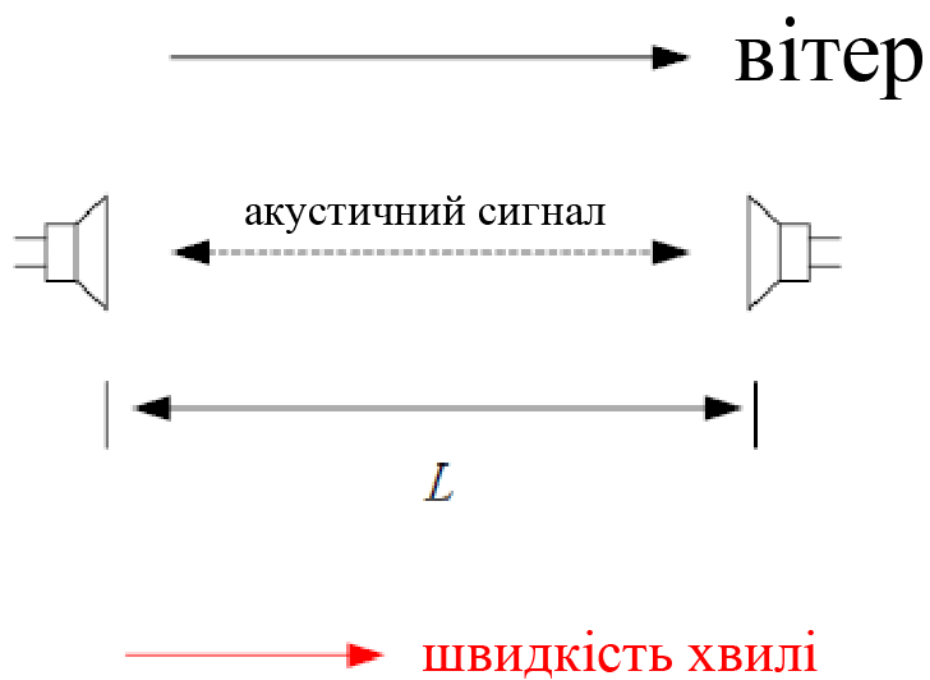


Рисунок 1.11 – Узагальнена схема акустичного анемометра



Рисунок 1.12 – Приклад акустичного анемометра

## 1.8 Ультразвукові анемометри

Принцип роботи ультразвукових анемометрів полягає в використанні ультразвукових хвиль для вимірювання швидкості вітру. Між декількома перетворювачами заміряється швидкість вітру яка залежить від часу польоту звукових імпульсів. Для того щоб проводити вимірювання швидкості в багатовимірному потоці можна об'єднати виміри з декількох датчиків. Роздільна здатність встановлюється за допомогою довжини шляху між перетворювачами, яка в більшості випадків становить 10-20 см. Тимчасовий дозвіл в ультразвукових анемометрів може бути від 20 Гц або вище, що робить їх чудовими пристроями для вимірювань турбулентності [8].

Відсутність будь-яких рухомих частин допомагає зменшити кількість сервісних обслуговувань на відкритих автоматичних метеорологічних станціях та на погодних буюх, де солоне повітря або пил несприятливо впливають на точність і надійність звичайних чашково-крильчатих анемометрів. Для підтримки виміру ультразвукові анемометри використовують кінетичну енергію вітру. Додаткове джерело для надання параметрів їм не потрібне. Також, є й інші типи анемометрів, які використовують додаткові джерела в якості параметрів швидкості вітру, як ось швидкість звуку. В повітрі, звук передається при зміні тиску повітря уздовж напрямку руху звуку. Швидкість звуку рівняється близько 330 м/с при температурі 15 °С. Звук передається у вигляді довгої хвилі. При збільшенні температури, швидкість звуку збільшиться. Так як швидкість звуку змінюється з температурою і майже статична при зміні тиску, ультразвукові анемометри можна використовувати в якості термометрів. У авіації, метеорологічних станціях, метеорологічних буюх, судноплавстві та вітряних турбінах, використовуються двовимірні (акустичні анемометри. Щоб провести моніторинг вітрових турбін знадобиться частота оновлення швидкості вітру від 3 Гц, досягається за допомогою акустичних анемометрів доволі легко. Звукові анемометри тривимірні, якщо використовувати з інфрачервоними газоаналізаторами які мають швидкий відгук або аналізаторами на основі лазера.



Двовимірні датчики вітру мають два типи. Перший тип має дві ультразвукові доріжки такий тип має 4 важеля. Його головний недолік – порушення вітрового потоку плечами при русі вітру в напрямку ультразвукового шляху, цим самим знижуючи точність отриманого вимірювання. Три ультразвукові доріжки мають 3 важеля. Цей тип має покращену точність датчика та набагато меншу аеродинамічну турбулентність через те, що дають одностороннє надмірне вимірювання. Головний недолік ультразвукових анемометрів - це викривлення самого потоку конструкцією, яка підтримує перетворювачі і вимагає корегування, заснованого на вимірах аеродинамічної труби, щоб зменшити вплив. На рисунку 1.13 зображено узагальнену схему ультразвукового анемометра, а на рисунку 1.14 зображено приклад ультразвукового анемометра [9].

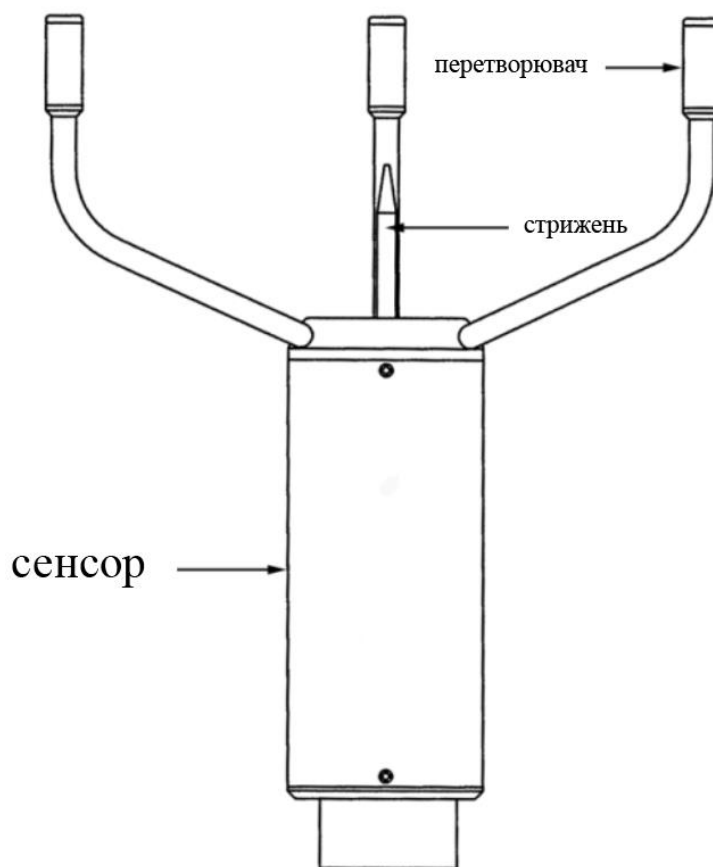


Рисунок 1.13 – Узагальнена схема ультразвукового анемометра



Рисунок 1.14 – Приклад ультразвукового анемометра

## 1.9 Інші методи/засоби контролю швидкості вітрового потоку

### 1.9.1 Метеорологічні вежі

Метеорологічні вежі є важливим елементом сучасних систем спостереження за атмосферою. З їхньою допомогою отримують цінні дані, які використовуються для наукових досліджень, прогнозів погоди, контролю навколишнього середовища та розробки нових технологій. Далі розглянемо структуру метеорологічних веж, принцип їхньої дії та різні аспекти їхнього застосування [10].

Метеорологічні вежі мають типову конструкцію, що включає металевий мачтоподібний каркас та платформу для розміщення приладів. Верхівка вежі оснащена анемометрами для вимірювання швидкості вітру та вантажами для визначення його напрямку. На платформі розташовані різні прилади для вимірювання температури, вологості повітря, атмосферного тиску та інших параметрів. Додатково можуть бути встановлені датчики для вимірювання рівня радіації та інших фізичних величин, які важливі для детального аналізу атмосферних умов.

Основна функція метеорологічних веж - забезпечити точні та надійні дані про атмосферні умови на певній території. Анемометри реєструють швидкість вітру, вантажі визначають його напрямок, а прилади для вимірювання температури, вологості та інших параметрів дозволяють отримати повну картину атмосферних явищ. Дані, отримані від метеорологічних веж, використовуються для аналізу кліматичних тенденцій, розробки прогнозів погоди, вивчення впливу людської діяльності на навколишнє середовище, а також для регулювання роботи вітроенергетичних установок.

Принцип дії метеорологічних веж базується на використанні різноманітних сенсорів та приладів, які реагують на зміни в атмосферних умовах. Сучасні технології дозволяють забезпечити високу точність та швидкість збору даних. Більше того, автоматизовані системи контролю та передачі інформації дозволяють отримувати дані в режимі реального часу, що має велике значення для ефективного використання цих даних у різних галузях.

Метеорологічні вежі мають широке застосування у різних галузях. Перш за все, вони є ключовим елементом системи погодознавства та кліматології, забезпечуючи важливі дані для наукових досліджень. За допомогою цих веж проводять спостереження за природними явищами, такими як урагани, грози та інші атмосферні події, що дозволяє розробляти ефективні заходи попередження небезпек. У сфері вітроенергетики метеорологічні вежі використовуються для вимірювання вітрових умов на висотах, де розташовані вітряні турбіни.

Загалом, метеорологічні вежі відіграють визначальну роль у науці та технології, сприяючи якісному аналізу атмосферних явищ і надаючи дані для різних галузей людської діяльності. Важливість їхньої функції важко переоцінити, адже вони не лише допомагають в забезпеченні точних погодних прогнозів, але й визначають стратегії для сталого розвитку та ефективного використання природних ресурсів. На рисунку 1.15 зображено приклад метеорологічної вежі.



Рисунок 1.15 – Приклад метеорологічної вежі

### 1.9.2 Контроль вітрового потоку за допомогою роторів та вітерцевих тунелів

Контроль вітрового потоку є ключовою складовою в різних технічних областях, включаючи аеродинаміку, вітроенергетику, авіацію та будівництво. Використання роторів і вітерцевих тунелів є важливим методом для вивчення та оптимізації впливу вітру на різні конструкції та пристрої. У цьому огляді ми розглянемо технології та застосування цих методів контролю вітрового потоку [11].

Ротори використовуються для вимірювання та контролю вітрового тиску на поверхнях об'єктів. Вони можуть бути стаціонарними або обертатися, а їхні

розміри можуть варіюватися від мікроскопічних до великих вентиляторів. Ротори мають датчики тиску, які вимірюють зміни в тиску повітря, що дозволяє аналізувати обтічні характеристики об'єктів.

Ротори використовуються в аеродинамічних дослідженнях, авіаційній промисловості, архітектурному дизайні та вітроенергетиці. У вітроенергетиці вони використовуються для тестування аеродинамічних характеристик вітряних турбін на різних швидкостях вітру та кутах атаки [10].

Вітерцеві тунелі створюють струмінь повітря, який симулює реальний вітровий потік. Вони можуть бути вертикальними або горизонтальними та обладнані різноманітними датчиками для вимірювання тиску, швидкості та інших параметрів аеродинаміки.

Вітерцеві тунелі використовуються для досліджень в області авіації, автомобільної техніки, спортивного обладнання, будівельної аеродинаміки та інших галузей. У вітроенергетиці вони дозволяють тестувати моделі вітряних турбін в умовах, що симулюють реальний вітровий потік, щоб визначити їхню ефективність та надійність.

Контроль вітрового потоку за допомогою роторів і вітерцевих тунелів грає ключову роль у розвитку нових технологій та удосконаленні конструкцій. У науці ці методи використовуються для дослідження обтічних характеристик аеродинамічних профілів та оптимізації форми об'єктів. У промисловості вони є важливим інструментом для тестування та покращення різноманітних технічних рішень.

Контроль вітрового потоку за допомогою роторів і вітерцевих тунелів є важливою галуззю аеродинаміки та технічних наук. Ці методи дозволяють вивчати та вдосконалювати характеристики об'єктів у вітрових умовах, що має велике значення для розробки нових технологій та оптимізації існуючих конструкцій. На рисунку 1.16 зображено приклад вітерцевого тунелю.





Рисунок 1.16 – Приклад вітерцевого тунелю

### 1.9.3 Вітряки/кервані вентилятори

Кервані вентилятори використовуються для вимірювання параметрів вітрового потоку і забезпечують точний контроль швидкості повітря. Основний принцип полягає в тому, що ротор вентилятора обертається або змінює свою швидкість, щоб створити вітровий потік. Сенсори, вбудовані в вентилятор, вимірюють різницю тиску чи інші параметри, що виникають внаслідок цього вітрового потоку. Система керування, опрацьовуючи ці дані, регулює роботу вентилятора для досягнення заданих параметрів швидкості вітру. Сучасні кервані вентилятори використовують різноманітні сенсори, такі як тискоміри, аеродинамічні сенсори та термодатчики. Ці сенсори дозволяють точно вимірювати параметри вітрового потоку. Вентилятори часто обладнані автоматичними системами керування, які аналізують зібрані дані та самостійно

налаштовують параметри роботи вентилятора для підтримки необхідних умов [12].

Деякі вентилятори мають вбудовані алгоритми, які враховують прогнозовані зміни у вітровому потоці. Це дозволяє вам попереджати та адаптувати роботу вентилятора до майбутніх змін у погодних умовах.

Застосування керованих вентиляторів:

- метеорологія: у метеорологічних станціях та дослідницьких центрах використовуються керовані вентилятори для вимірювання швидкості вітру, напрямку вітру, температури та інших показників;
- аеродинаміка: в авіаційній та аерокосмічній промисловості вентилятори застосовуються для тестування аеродинамічних характеристик апаратів, літаків та інших конструкцій;
- вітроенергетика: у вітроенергетичних дослідженнях використовуються керовані вентилятори для тестування та оптимізації аеродинамічних характеристик вітряних турбін;
- будівництво: в будівельній індустрії вентилятори використовуються для визначення навантажень вітру на будівельні конструкції та оптимізації їхнього проектування;

Керовані вентилятори забезпечують точне вимірювання параметрів вітрового потоку, дозволяють отримувати дані в режимі реального часу та автоматизувати процес вимірювань.

Висока вартість високоточного обладнання, необхідність регулярного обслуговування та калібрування, а також витрати енергії для тривалого використання.

Керовані вентилятори визначають новий стандарт в області вимірювань вітрового потоку, забезпечуючи високоточні дані для наукових досліджень та інженерних розробок. Їхнє використання в метеорології, аеродинаміці, вітроенергетиці та будівництві є вирішальним для розвитку сучасних технологій та забезпечення сталого розвитку. Необхідно постійно вдосконалювати технічні рішення та зменшувати енерговитрати для максимальної ефективності та сталості

використання керованих вентиляторів у різних галузях промисловості та науки. На рисунку 1.17 зображено приклад вітряка.



Рисунок 1.17 – Приклад вітряка

### 1.9.3 Ветроенергетичні системи управління турбінами

Вітроенергетика в сучасному світі займає провідні позиції серед джерел відновлюваної енергії, а системи управління турбінами відіграють ключову роль у максимізації ефективності та надійності електрогенерації. Інновації в області вітроенергетики спрямовані на оптимізацію роботи турбін, забезпечуючи їхню адаптацію до змінних умов вітру та покращення загальної продуктивності.

В сучасних вітроенергетичних системах використовуються високоточні сенсори для вимірювання параметрів вітру, тиску, температури та обертання турбін. Ці дані необхідні для аналізу умов вітрового потоку та оптимального керування турбінами.

Технології керованих вентиляторів використовуються для точного визначення швидкості вітру та його напрямку. Це дозволяє оптимізувати кут нахилу лопатей та обертовий момент для максимізації згенерованої енергії [13].

Вітроенергетичні системи включають в себе системи моніторингу стану обладнання, які аналізують роботу турбін та виявляють будь-які аномалії чи відхилення. Це дозволяє оперативно реагувати на можливі поломки та знижує час непрацездатності.

Використання алгоритмів штучного інтелекту та машинного навчання для розробки прогностичних моделей, які передбачають зміни у вітровому потоці та дозволяють налаштовувати турбіни в реальному часі.

Інтеграція вітроенергетичних систем управління з іншими джерелами енергії, такими як сонячна чи батарейні технології, для створення гібридних електроенергетичних систем.

Розвиток систем, які можуть адаптуватися до змінних умов вітру, враховуючи ефективність турбін в широкому діапазоні швидкостей та напрямків вітру.

Одним із викликів є потреба високофахових технічних рішень та програмного забезпечення для вирішення складних завдань оптимізації та управління. Також важливо враховувати потребу в ефективних системах моніторингу та обслуговування для забезпечення тривалого функціонування.

Вітроенергетичні системи управління турбінами дозволяють значно підвищити ефективність генерації електроенергії, зменшити витрати на обслуговування та ремонт, а також знизити вплив на довкілля.

Інтеграція інноваційних технологій та ефективних систем управління турбінами є ключовим чинником для подальшого розвитку вітроенергетики. Прогресивні підходи до використання даних, алгоритми штучного інтелекту та гібридні системи забезпечують високий рівень автоматизації та сталість генерації відновлюваної енергії.

#### 1.9.4 Аеродинамічні системи управління

Аеродинамічні системи управління використовуються для вимірювання швидкості вітрового потоку та отримання точних даних для подальшого

використання в різноманітних галузях. Основний принцип полягає в тому, що спеціально спроектовані аеродинамічні елементи, такі як анемометри та датчики обтічності, реагують на вітровий потік і генерують вимірювальний сигнал.

Анемометри є ключовими елементами аеродинамічних систем. Зазвичай вони використовуються для вимірювання швидкості вітру. В одному з їхніх видів, тепловий анемометр, використовується принцип охолодження нагрітого датчика вітром, що дозволяє визначати швидкість вітру.

Ці датчики виявляють зміни обтічності або тиску внаслідок вітрового потоку. Вони здатні реагувати на зміни швидкості вітру та напрямку.

Використовують принцип вимірювання часу, необхідного для проходження звуку від передавача до приймача в умовах вітру. Це дозволяє точно визначити швидкість вітру на великі відстані [14].

Використовують принцип Доплерівського ефекту для вимірювання швидкості частинок в повітрі, що рухаються під впливом вітру. Вони надають можливість вимірювати швидкість вітру на різних відстанях.

У метеорології аеродинамічні системи використовуються для вимірювання швидкості вітру, температури та інших атмосферних параметрів.

В вітроенергетичних дослідженнях аеродинамічні системи грають важливу роль у визначенні потенційної енергії вітру та оптимізації роботи вітряних турбін.

В аеродинамічних тунелях використовуються аеродинамічні системи для вимірювання характеристик повітряного потоку, що дозволяє вивчати обтічні властивості моделей та конструкцій.

Аеродинамічні системи дозволяють отримувати точні дані про швидкість вітру та інші параметри атмосфери, що є важливим для багатьох галузей.

Напередодні викликів стоїть завдання забезпечення високої точності вимірювань при різних умовах вітру та атмосферного тиску. Також важливо враховувати потребу у регулярному обслуговуванні та калібруванні для забезпечення надійності даних.

Аеродинамічні системи управління для визначення швидкості вітрового потоку відіграють ключову роль у сучасних наукових дослідженнях, метеорології

та вітроенергетиці. Їхні технології постійно вдосконалюються для забезпечення надійності та точності вимірювань у різних умовах.

### 1.10 Висновки до розділу

У цьому розділі було проведено глибокий аналіз існуючих типів анемометрів, включаючи механічні, крильчаті, термоелектричні та ультразвукові моделі. Кожен з цих типів анемометрів був розглянутий з точки зору його конструктивних особливостей, принципу роботи, а також метрологічних характеристик, таких як точність, діапазон вимірювань та стійкість до зовнішніх впливів. На основі проведеного аналізу було визначено, що ультразвукові анемометри мають низку переваг порівняно з іншими типами. Ці переваги включають вищу точність вимірювань, меншу чутливість до забруднень та зносу, а також можливість вимірювання швидкості вітру в широкому діапазоні без фізичного контакту з вітровим потоком. Ці характеристики роблять ультразвуковий анемометр оптимальним вибором для розробки засобу контролю швидкості вітрового потоку з покращеними метрологічними характеристиками. Отже, вибір ультразвукового анемометра як для подальшої розробки є обґрунтованим і відповідає сучасним тенденціям у сфері вимірювання швидкості вітру. У наступних розділах роботи буде зосереджено увагу на детальній розробці ультразвукового анемометра, з акцентом на підвищення його точності та надійності.



## 2 РОЗРОБКА ЗАСОБУ ВИМІРЮВАННЯ ШВИДКОСТІ ВІТРОВОГО ПОТОКУ З ПОКРАЩЕНИМИ МЕТРОЛОГІЧНИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

### 2.1 Загальна інформація

Вимірювання швидкості рідини на основі ультразвукових перетворювачів використовується в різних галузях знань. Наприклад, для відстеження та пошуку газових шлейфів; вимірювання витрати газу в димоходах; вимірювання потоку рідин і газів або інкрустації відходів у трубах. Зокрема, вивчення вітру для визначення його швидкості та напрямку є предметом кількох галузей знань, таких як сільське господарство, біологія, цивільне будівництво, виробництво електроенергії тощо. Серед різноманітних методів, що використовуються для вимірювання швидкості вітру, можна виділити той, що базується на ультразвукових перетворювачах. Це пов'язано з тим, що цей тип анемометра зазвичай більш надійний і не потребує технічного обслуговування. Крім того, вони дозволяють вимірювати швидкість вітру в трьох вимірах. Тому даний вид анемометра використовується в несприятливих умовах. Наприклад, ми можемо згадати дослідження Банфілда та Дісслі щодо вимірювання швидкості вітру в середовищі з концентраціями газів, відмінними від тих, які зазвичай зустрічаються на Землі, а також дослідження Ель-Мадані та ін. хто використовував ультразвуковий анемометр в умовах клімату з високою вологістю, де утворюється туман [15].

Крім інтенсивності, за допомогою ультразвукового анемометра також можна отримати напрямок і значення швидкості вітру. Априлезі та ін. описують обладнання, яке виконує вимірювання в трьох вимірах і з діапазоном вимірювання до 72 км/год, але вони не описують багато особливостей анемометра. Інші автори також розробили ультразвукові анемометри з різними діапазонами вимірювання, які можуть досягати 220 км/год. Проте всі ці прототипи виконують двовимірні вимірювання. У деяких випадках потік повітря

може мати значну вертикальну складову. Таким чином, вимірювання швидкості вітру лише у двох вимірах може бути суттєвим обмеженням.

Однак, загалом, для вимірювання швидкості вітру за допомогою ультразвуку можна використовувати два методи: або через час проходження, або через вихор [. У методі вимірювання через вихор важко визначити напрямок і значення вітру. Отже, коли хтось хоче отримати цю інформацію, використовується метод через час транзиту. Для цього вимірювання часу проходження може бути досягнуто шляхом подачі безперервного сигналу або серії імпульсів на перетворювач передавача. У разі безперервного сигналу оцінюється фазовий [16] зсув сигналу, що вимагає складного апаратного забезпечення та потребує більше одного перетворювача як приймача. Таким чином, найпростішим методом є той, у якому кілька імпульсів поширюватимуться по повітрю та потребуватимуть змінного часу, щоб досягти іншого перетворювача. Цей час буде залежати від інтенсивності та напрямку падаючого вітру. Це дозволяє лише одній парі перетворювачів утворювати вимірювальну вісь.

Відомо, що багато комерційних анемометрів мають проблеми, пов'язані з їх структурою, які заважають вимірюванням. Проте в літературі це втручання мало обговорюється.

У цій роботі буде розроблено ультразвуковий анемометр, здатний вимірювати інтенсивність і напрямок вітру в трьох вимірах. Прилад використовує техніку оцінки часу проходження послідовності ультразвукових імпульсів. Для цього буде використано шість ультразвукових перетворювачів у структурі, що утворює три неортогональні осі. Також показано аспекти його фізичної структури, які були розроблені з акцентом на механічну міцність і на зменшення перешкод вітру. Оцінено переваги використання неортогональної конструкції та випадки, коли запропонована механічна конструкція може заважати проходженню вітру. Крім того, була розроблена та представлена електроніка, яка використовується для збудження та кондиціонування сигналів перетворювачів. Обладнання було відкаліброване в аеродинамічній трубі на швидкості до 160

км/год і досягнуто коефіцієнта детермінації  $R^2 = 0,999994$ . Також були проведені польові випробування та порівняння запропонованого обладнання з іншими комерційними.

В якості основного внеску розглядаються всі практичні аспекти побудови 3D ультразвукового анемометра. Механічна структура анемометра має великий вплив на вимірювання. Як правило, цей параметр нехтується більшістю розробників.

## 2.2 Техніка вимірювання

У цьому дослідженні для вимірювання швидкості використовується методика розрахунку часу проходження серії ультразвукових імпульсів. У цій техніці опорний сигнал подається на перетворювач передавача (А), який випромінює ультразвуковий сигнал, як показано на рисунку 2.1. Цей сигнал поширюється по повітрю та піддається впливу вітру. Потім аналізується час, який потрібен випромінюваному сигналу, щоб досягти датчика приймача (В), як показано на рисунку 2.1. Цей час ( $T_t$ ), який називається часом проходження, змінюється залежно від швидкості поширення звуку та швидкості вітру та напрямку між перетворювачами. На жаль, зазвичай виникає затримка при виявленні прийнятого сигналу. Отже, зазвичай вимірюваний час є  $T_{AB}$ . Таким чином, як показано на рисунку 2.1, існує час, який називають  $t_{AB}$ , який є електронною затримкою, тобто різницею між  $T_{AB}$  і  $T_t$ , яку потрібно оцінити. Ця електронна затримка,  $t_{AB}$ , може бути отримана за допомогою калібрування. Таким чином, він стає постійним у розрахунку часу проходження, що полегшує отримання швидкості вітру [17].

Враховуючи падіння вітру з напрямком, паралельним осі, утвореній перетворювачами А і В, очевидно, що можна отримати швидкість вітру шляхом вимірювання часу проходження ультразвукової хвилі. З іншого боку, у випадку падіння вітру непаралельно осі, утвореній перетворювачами (передавачем і приймачем), його можна розкласти на два вектори: один паралельний (амплітуда

якого дорівнює  $V_{AB}$ ) і інший перпендикулярний до осі. Таким чином, можна розглядати рівняння, запропоноване Шотландом, тобто:

$$V_{AB} = \frac{d_{AB}}{2} \left( \frac{1}{T_{AB} - t_{AB}} - \frac{1}{T_{BA} - t_{BA}} \right) \quad (2.1)$$

де  $d_{AB}$  – відстань між перетворювачами.

З рівняння (2.1) зазначається, що для вимірювання  $V_{AB}$  необхідно щоб виміряти час, необхідний для надходження імпульсів в обидва напрями. Також, на щастя, необов'язково знати швидкість звуку. Крім того, визначення часів у рівнянні (2.1) безпосередньо пов'язаний з правильним вибором еталонного переходу через нуль отриманої ультразвукової хвилі. Це перехід через нуль буде визначати час, коли передана хвиля дійсно досягає приймача. Таким чином, у нашому дослідженні початкове калібрування є який визначає положення цього нульового переходу коли швидкість вітру дорівнює нулю, що дозволяє визначити електронна затримка. Таким чином, зі збільшенням швидкості вітру, цей еталонний перетин нуля зміщується і вказує на  $V_{AB}$ .

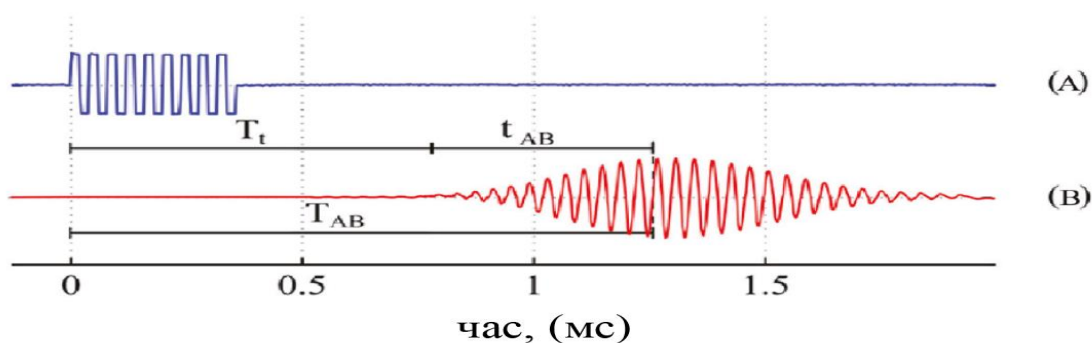


Рисунок 2.1 – Сигнали передавача (А) і приймача (В) ультразвукової хвилі

### 2.3 Геометрія анемометра

З дослідження Вайсера, відомо, що геометрія механічної структури, що підтримує перетворювачі в ультразвуковому анемометрі, має великий вплив на точність вимірювань. Це пояснюється тим, що, залежно від кута падіння, потік вітру може сильно заважати конструкції. Тому невизначеність зростає як функція

кута падіння вітру. Запропоновано таблиці поправок для деяких конкретних моделей комерційних анемометрів відповідно до кута падіння. Такий підхід у деяких випадках є задовільним. На рисунку 2.2 (та наведено у Додатку А рис. 1) показано змодельовану базову структуру анемометра з двома ультразвуковими перетворювачами в середовищі зі швидкістю вітру 162 км/год, що тече паралельно осі, утвореній двома перетворювачами. Для моделювання, було використано програмне забезпечення SolidWorks з пакетом Flow Simulation. Помічено, що механічна структура змінює швидкість вітру між двома перетворювачами, де швидкість впала вдвічі. З іншого боку, для вимірювання тривимірної швидкості вітру ультразвукові перетворювачі повинні бути розташовані в геометрії, яка дозволяє утворювати щонайменше три осі в 3D-просторі. Однією з можливостей є компонування, в якому перетворювачі утворюють три ортогональні осі. На жаль, у цьому випадку явище, показане на рисунку 2.2, матиме більший вплив на вимірювання швидкості. Це пояснюється тим, що якщо вітер дме паралельно земній площині, що є найпоширенішою умовою на практиці, і буває, що одна вісь точно відповідає умовам, показаним на рисунку 2.2, дві інші ортогональні осі призведуть до вимірювання майже нульового значення, оскільки вітер перпендикулярний до інших. Таким чином, вимірювання швидкості вітру майже повністю залежить від осі, яка знаходиться в стані на рисунку 2.2. Саме тому запропоновано неортогональну механічну структуру. Це призводить до того, що вітри, паралельні земній площині (найчастіша ситуація на практиці), не матимуть компонентів, близьких до нуля, на двох осях, коли третя знаходиться в стані, зображеному на рисунку 2.2. Це значно зменшує невизначеність вимірювань [18].

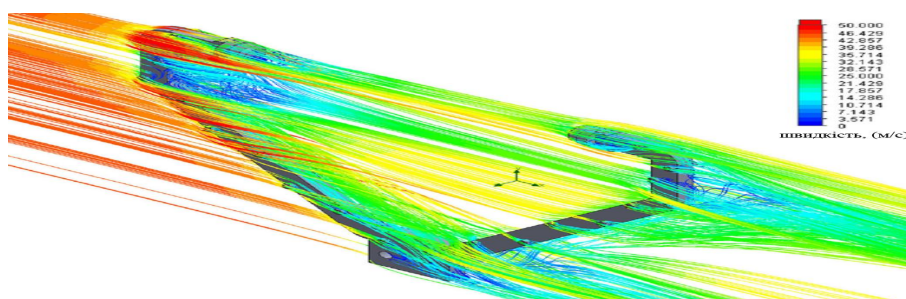
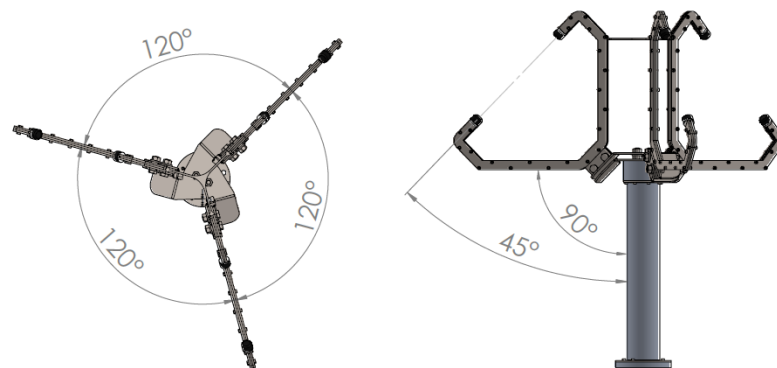


Рисунок 2.2 – Моделювання потоку вітру, коли він дме паралельно вимірюваній осі.

Як уже обговорювалося, для вимірювання тривимірної швидкості вітру ультразвукові перетворювачі повинні бути розташовані в геометрії, яка дозволяє утворювати щонайменше три осі в 3D просторі. Залежно від кута променя перетворювачів, можна зробити так, щоб два з них могли приймати сигнал від одного перетворювача. У цьому випадку, маючи лише чотири перетворювачі, можна сформувати три осі в 3D просторі. Це дозволяє розробляти тривимірні анемометри зі зменшеною кількістю перетворювачів. Однак на практиці частіше зустрічаються ультразвукові перетворювачі з вузькими кутами. Тому в цьому дослідженні ми вибрали схему, в якій кожна вісь системи координат визначається парою ультразвукових перетворювачів. Таким чином, було необхідно всього шість ультразвукових перетворювачів, по одній парі для кожної осі. Більш конкретно, пари перетворювачів утворюють розташування, показане на рисунку 2.3 (та наведено у Додатку А рис 2). На рисунку 2.4 (та наведено у Додатку А рис. 3) показано позиційну геометрію, прийняту на звичайних декартових осях X, Y і Z. У цьому розташуванні два перетворювачі розташовані лицем до лица на відстані 20 см. Крім того, уся конструкція була спроектована з пластин з нержавіючої сталі, вирізаних лазером, як показано на рисунку 2.5. Це дозволяє отримати всі відстані з високою точністю, таким чином зменшуючи помилки. Крім того, такий підхід робить інструмент більш стійким до механічних ударів. Це важливо, оскільки інструмент призначений для зовнішнього застосування.



Рисунк 2.3 – Використання неортогональної позиційної геометрії у прототипі



Щоб збільшити механічну міцність конструкції, вставимо у верхню частину анемометра ферму, яка з'єднує всі осі. Це зменшує можливість скручування та вібрації конструкції зі швидкостями понад 100 км/год.

Аналізуючи рисунок 2.3, можна помітити, що конструкція анемометра виконана так, що в більшості випадків вона не перешкоджає проходженню вітрового потоку через перетворювачі. Коли вітер дме зверху вниз, турбулентності немає. З іншого боку, перешкода з боку конструкції буде тільки в тому випадку, якщо напрям вітрового потоку буде точно паралельним одній із площин, утворених вимірювальними осями. У цьому випадку центральна опора перетворювачів працює як щит. Подібний стан також може виникнути, коли вітер тече знизу вгору. На рисунку 2.3 стає зрозумілим, що в цьому випадку осі анемометра будуть у ситуації, подібній до ситуації на рисунку 2.2. На щастя, на практиці це незвичайна ситуація. Крім того, у застосуванні, де поширені висхідні вітри, можна використовувати резервування, вставивши більше пар перетворювачів у геометричному розташуванні, яке забезпечує принаймні одну пару перетворювачів без перешкод.

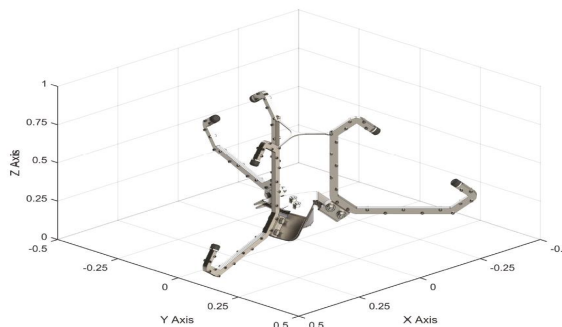


Рисунок 2.4 – Неортогональна позиційна геометрія анемометра по відношенню до загальноприйнятої декартової осі координат.

Відстань між ультразвуковими перетворювачами, що належать одній осі, є важливим параметром конструкції. Якщо надто мало, залежно від інтенсивності та напрямку вітру рідина між перетворювачами буде дуже турбулентною. З іншого боку, більша відстань збільшує неоднозначність при оцінці часу проходження ультразвукового імпульсу. Під час вимірювання часу проходження

необхідно вибрати еталонний перетин нуля для розрахунку швидкості вітру, і чим коротша відстань між перетворювачами, тим менша загальна кількість нуль-схрещувань, з яких потрібно вибрати правильний (менше неоднозначності).

У пропонованому розташуванні з шістьма перетворювачами необхідно провести кілька одновимірних вимірювань швидкості вітру для отримання тривимірного вимірювання. Це дасть швидкість вітру в системі координат, утвореній неортогональними осями анемометра. Таким чином, необхідно застосувати процес ортогоналізації, щоб провести вимірювання у звичайній ортогональній системі координат. Цей процес описано нижче [19].

Припустимо, що запропоновану топологію на рисунку 2.3 потрібно вставити в ортогональну систему координат. У цьому випадку положення кожного з перетворювачів, що входять до складу анемометра, можна представити вектором положення  $P_i$ , де  $i = 1, \dots, 6$ . Таким чином, три вектори, що характеризують неортогональну систему координат, утворену осями запропонованого анемометра, будуть:

$$\begin{aligned} u_x &= \frac{P_2 - P_1}{\|P_2 - P_1\|}, \\ u_y &= \frac{P_4 - P_3}{\|P_4 - P_3\|}, \\ u_z &= \frac{P_6 - P_5}{\|P_6 - P_5\|}. \end{aligned} \quad (2.2)$$

У свою чергу, це неортогональна система, по відношенню до ортогональної, кут повороту  $\theta = 15$  градусів. Отже, в процесі ортогоналізації версори в рівнянні (2.2) повинні бути перемножені з  $R$ , тобто:

$$u'_x = Ru_x, u'_y = Ru_y \text{ та } u'_z = Ru_z, \quad (2.3)$$

де:

$$R = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 0 \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

Таким чином, нехай  $V_{NO}$  буде вектором, який представляє швидкість вітру в неортогональній системі координат, утвореній осями анемометра на рисунку 2.3. Потім той самий вектор у якої ортогональна система координат задана так:

$$V_O = V_{NO}M^{-1}, \quad (2.5)$$

де:

$$M = [u'_x{}^T \quad u'_y{}^T \quad u'_z{}^T]. \quad (2.6)$$

Отже, щоб отримати ортогональну швидкість вітру з неортогональної топології ми повинні помножити матрицю містить швидкості вітру, отримані в незвичайній системі матриця ортогоналізації. У цьому дослідженні ця операція була в будовані в розроблену мікропрограму.

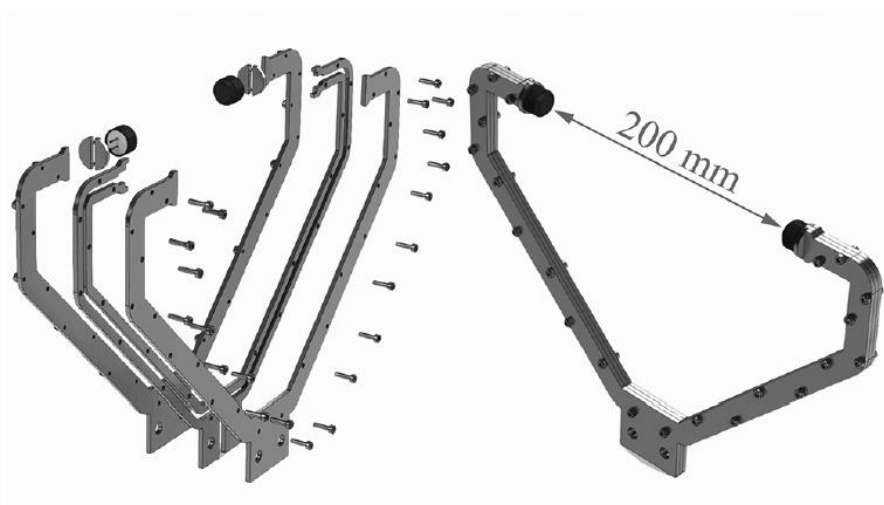


Рисунок 2.5 – Датчики у компонентному та ізометричному зображеннях

## 2.4 Висновки до розділу

Основна увага даного розділу була зосереджена на створенні геометричної конструкції, яка дозволяє точно вимірювати швидкість і напрямок вітру у трьох вимірах. Розробка такого анемометра включала в себе детальний аналіз механічної структури та її впливу на точність вимірювань. Використання неортогональної геометрії дозволило підвищити точність вимірювань та розширити діапазон їх застосування. Ця конструкція включає шість ультразвукових перетворювачів, розташованих таким чином, що формують три неортогональні осі. Така організація не тільки забезпечує точність вимірювань у трьох вимірах, але й знижує вплив перешкод, викликаних вітром. Крім того, були розглянуті аспекти фізичної структури анемометра, з акцентом на механічну міцність та зменшення перешкод вітру. Було підтверджено, що неортогональна геометрія анемометра значно покращує точність вимірювань швидкості вітру, особливо у складних умовах. Це відкриває нові перспективи для застосування ультразвукових анемометрів в різноманітних галузях, де точність вимірювань швидкості вітру є критично важливою.

### **3 ПІДБІР КОМПОНЕНТІВ ДЛЯ РОЗРОБКИ ЗАСОБУ ВИМІРЮВАННЯ ШВИДКОСТІ ВІТРОВОГО ПОТОКУ З ПОКРАЩЕНИМИ МЕТРОЛОГІЧНИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ТА РОЗРОБКА ЕЛЕКТРИЧНОЇ СХЕМИ**

#### **3.1 Компонентно-програмна база та електрична схема**

У запропонованій методології один і той же ультразвуковий перетворювач використовується в різний час як передавач і також як приймач. Таким чином, кожен перетворювач має як електронну схему, відповідальну за випромінювання, так і іншу, відповідальну за прийом. Перетворювач, використаний у цьому дослідженні, був 400EP18A від Prowave. Він працює на частоті 40 кГц і є герметичним, що дозволяє використовувати його в зовнішніх середовищах. Схема, призначена для збудження перетворювача, показана у верхній частині рисунка 6. У цій схемі сигнал, створений мікроконтролером (STM32F429, від STMicroelectronics), подається на R1 і проходить через неізолюваний драйвер U1, який використовується для захисту мікроконтролера. Потім сигнал подається на MOSFET (за допомогою R7 і R8), який збуджує імпульсний трансформатор. Цей трансформатор (K4000004, робоча частота 40 кГц, регульована індуктивність 6,0 мГн  $\pm$  6%, Q = 90 і коефіцієнт трансформації 1:10, від Prowave) підсилює сигнал збудження. Це пояснюється тим, що через герметичність використовуваний перетворювач має меншу здатність до вібрації. Таким чином, ми порушили його імпульсами 40 кГц 120 В від піку до піку, присутніми на виході трансформатора. Крім того, перш ніж досягти трансформатора, сигнал збудження проходить через RC фільтр нижніх частот, утворений R4 і C2. Цей фільтр має частоту зрізу 7 Гц і має функцію фільтрації шуму, наявного в джерелі живлення системи. У свою чергу компонент D2 є стабілітроном і викликає напругу, індуковану первинною обмоткою трансформатора під час його розвантаження, до 13 В. Це дуже важливо, оскільки це спричиняє менше спотворень у вторинній обмотці трансформатора, яка є сигналом, відповідальним за збудження передавального перетворювача.

Емпірично ми помітили, що без стабілітрона середньоквадратичне значення хвилі, що подається на перетворювач, на 8% менше, що призводить до нижчої амплітуди збудження та спричиняє більший шум і меншу інтенсивність сигналу прийому. Нарешті, R5 і C3 мають функцію, що дозволяє розряджати енергію, що зберігається в перетворювачі, таким чином зменшуючи спотворення та збільшуючи амплітуду сигналу збудження на 4%. Потім цей сигнал подається на перетворювач передавача, так що ультразвуковий імпульс передається і досягає відповідного перетворювача приймача. Потім це генерує електричний сигнал, який обумовлений частиною ланцюга, показаною внизу на рисунку.

Схема, пов'язана з прийомом ультразвукового сигналу, має напругу зсуву 1,65 В, яка необхідна для того, щоб сигнал, створений перетворювачем приймача, був повністю позитивним. Подвійний діод D3 і резистор R6 захищають схему від високих напруг. Вони використовуються для того, щоб, коли перетворювач працює як передавач, сигнал 120 В, який використовується для його збудження, не досягав приймального контуру. З іншого боку, коли перетворювач використовується як приймач, надходить сигнал має набагато малу амплітуду. Таким чином, інвертуючий підсилювач забезпечує посилення напруги для сигналу прийому від 26,85 дБ до 46,85 дБ, залежно від налаштування потенціометра POT. Налаштування POT виконується таким чином, щоб результуючий сигнал на виході схеми мав максимальну амплітуду приблизно 1,65 В від піку до піку, яка може змінюватися на  $\pm 0,5$  В залежно від налаштування. Потім шуми усуваються фільтром низьких частот другого порядку з топологією Sallen-Key, одиничним посиленням, відгуком Баттерворта та частотою зрізу 86 кГц. Цю частоту використовували для збереження інформації про основну частоту та першу гармоніку ультразвукового сигналу 40 кГц, а також через наявність комерційних цінностей для компонентів. Використовується операційний підсилювач OPA1662, який має швидкість наростання 13 В/мкс і CMRR 100 дБ для напруги джерела живлення, на якій працює схема. У кінці циклу кондиціонування досягнуте SNR становило 38 дБ. Програмне забезпечення, яке використовувалося при розробці друкованої плати, було Proteus [20].



Оскільки в запропонованому анемометрі є шість ультразвукових перетворювачів, необхідно шість схем. На рисунку 3.1 (та наведено у Додатку А рис. 4) показано розроблену електричну схему розробленого анемометра.

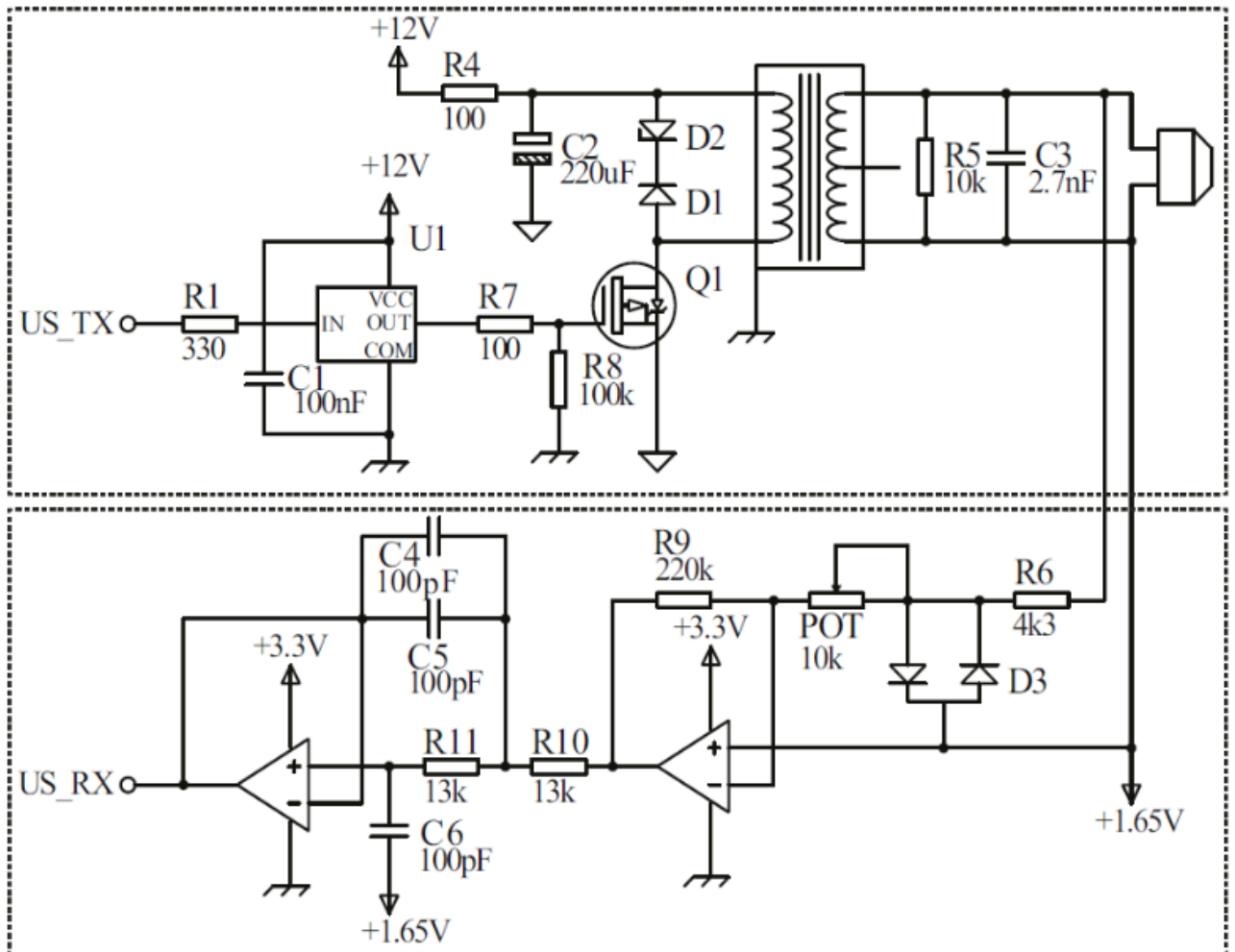


Рисунок 3.1 – Електрична схема розробленого анемометра

### 3.2 Процедура вимірювання

Виходячи з того, що було представлено, можна описати процедуру, яку виконує обладнання для вимірювання швидкості вітру, як описано нижче:

- 1) Мікроконтролер генерує двадцять імпульсів (швартуваність 50% і частота 40 кГц), які застосовуються до US\_TX у схемі на рисунку 3.1.
- 2) Ці імпульси проходять через схему передачі і перетворюються в ультразвуковий сигнал датчиком передавача, як зображено на рисунку 3.2.

3) Після поширення в повітрі під впливом вітру цей сигнал досягає датчика приймача і перетворюється назад в електричний сигнал. Це, у свою чергу, обумовлюється схемою на рисунку 3.1 і оцифровується мікроконтролером у точці US\_RX, який вимірює час проходження.

4) Попередні кроки повторюються, щоб виміряти час проходження в протилежному значенні, а потім швидкість вітру обчислюється за рівнянням (2.1), до цього моменту дії виконуються одночасно в трьох неортогональних осях.

5) Ортогоналізація швидкості вітру виконується за рівнянням (2.3).

6) Цикл повторюється через 50 мс після закінчення передачі ультразвукового сигналу.

У реалізації алгоритму вимірювання результат рівняння (2.3) зберігається в 12-бітній змінній. Крім того, передбачається максимальна швидкість вітру може сягати 200 км/год.

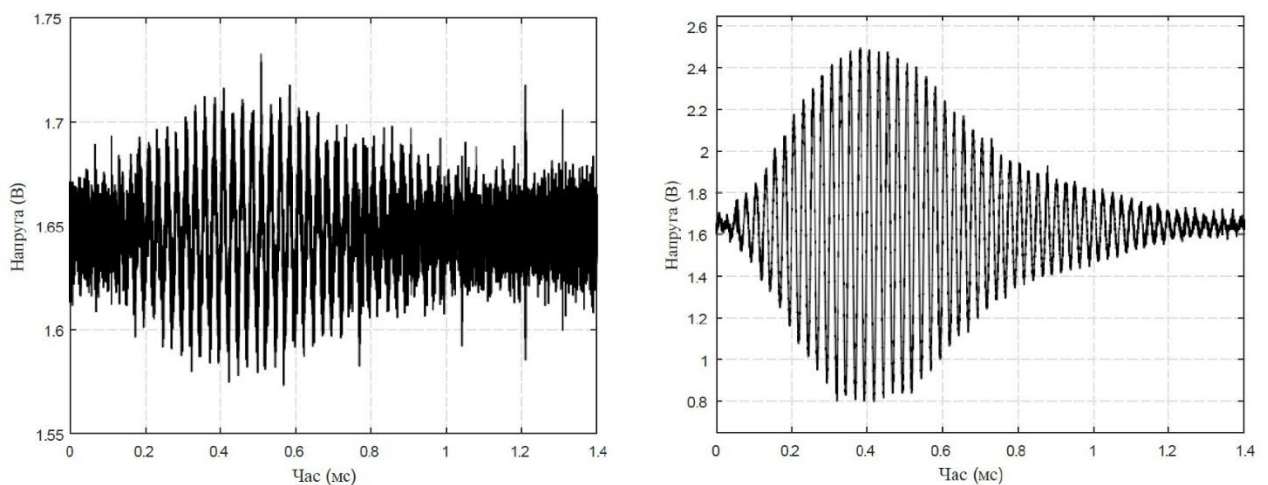


Рисунок 3.2 – а) Прийом сигналу на ультразвуковий перетворювач.

б) Ультразвуковий прийом сигналу після проходження через кондиціонування.

### 3.3 Висновок до розділу

У цьому розділі було досягнуто значного прогресу у виборі та інтеграції компонентно-програмної бази для розробки засобу вимірювання швидкості вітрового потоку з покращеними метрологічними. Підбір компонентів був

зосереджений на забезпеченні високої точності, надійності та ефективності роботи пристрою. Вибрані компоненти, включаючи мікроконтролери, ультразвукові перетворювачі та вторинні елементи схеми, відповідають сучасним технологічним вимогам і стандартам. Розробка електричної схеми анемометра включала створення структури, яка забезпечує ефективну передачу та обробку сигналів від ультразвукових перетворювачів. Особлива увага була приділена оптимізації схеми для зниження шумів і забезпечення стабільності сигналу в різних умовах експлуатації.

## 4 МОДЕЛЮВАННЯ ТА РЕЗУЛЬТАТ РОБОТИ РОЗРОБЛЕНОГО ЗАСОБУ ВИМІРЮВАННЯ ШВИДКОСТІ ВІТРОВОГО ПОТОКУ З ПОКРАЩЕНИМИ МЕТРОЛОГІЧНИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

### 4.1 Моделювання роботи

У проведених випробуваннях вся обробка ультразвукових сигналів, розрахунок часу проходження і, як наслідок, швидкості вітру виконується на розробленій друкованій платі. Так, під час випробувань дані передавалися на комп'ютер через порт USB. Дані про швидкість вітру, виміряні обладнанням, уже представлені в км/год.

У таблиці 4.1 (та наведено у Додатку А таблиця 1) показано розширені невизначеності які були отримані з добутку комбінованої невизначеності та коефіцієнта охоплення  $k = 2$  для рівня довірчої ймовірності приблизно 95%. У таблиці 4.1 можна спостерігати відносно високу похибку, яка досягає приблизно 25 км/год, на швидкості 160 км/год.

Виходячи з даних у таблиці 4.1, прототип можна відкалібрувати. Для підтвердження калібрування прототип був підданий новому випробуванню в аеродинамічній трубі. Знову ж таки, швидкість в аеродинамічній трубі змінювалася та вимірювалася прототипом. Таким чином, можна було виправити значення, виміряне прототипом ( $Y$ ), до значення ( $Y_{adj}$ ), яке є ближчим до реального, на  $Y_{adj} = 0,8654Y - 0,3774$ . Таким чином, можна перевірити різницю між реакцією системи до і після калібрування. Можна побачити, що тепер відносна похибка між прототипом і еталонним обладнанням становить щонайбільше 1%. У цьому випадку отримано коефіцієнт детермінації  $R^2 = 0,999994$ . Однак  $R^2$  можна вважати унітарним, і стає зрозуміло, що після належного калібрування похибка між еталонним обладнанням і розробленим анемометром є майже нульовою.

За методом Ліра вдалося розрахувати невизначеність апаратури, яка дорівнює  $\pm 0,1$  м/с або  $\pm 0,36$  км/год. З конструктивних характеристик прототипу

його роздільна здатність розрахована як 0,014 м/с або 0,049 км/год. У таблиці 4.2 (та наведено у Додатку А таблиця 2) представлено порівняння між розробленим прототипом і тими, що представлені в інших роботах, а також з комерційним анемометром, який використовується в польових випробуваннях.

Таблиця 4.1 – Порівняльне випробування в аеротрубі

Швидкість вітру (км/год)	Прототип (км/год)	Абсолютна похибка (км/год)	Відносна похибка (%)	Невизначеність (км/год)
13.90	16.56	2.66	19.11	2.64
21.53	25.41	3.88	18.03	1.77
32.40	37.96	5.56	17.15	1.40
43.30	50.50	7.20	16.63	1.41
54.10	62.89	8.78	16.23	1.57
65.06	75.52	10.46	16.08	1.79
76.07	88.11	12.04	15.83	2.05
86.83	100.77	13.94	16.06	2.3
97.60	113.25	15.65	16.03	2.58
108.23	125.55	17.32	16.01	2.85
118.82	137.72	18.90	15.91	3.13
129.48	149.89	20.42	15.77	3.40
140.04	162.07	22.03	15.73	9.68
150.44	174.30	23.86	15.86	3.95

Таблиця 4.2 – Порівняння між розробленим прототипом та іншими існуючими анемометрами

Обладнання	Невизначеність (м/с)	Допуск (м/с)
Han and Park	±1.22	–
del Valle et. al.	±1.00	0.100
Han et.al.	±0.40	0.100
WindMaster 3D	±0.18	0.010
Розроблений прототип	±0.10	0.014

Також були проведені порівняльні випробування між розробленим прототипом і комерційним обладнанням WindMaster 3D від Gill Instruments.

Випробування проводилися випадковим чином змінюючи швидкість вітру, при цьому обидва обладнання розташовувалися поруч. Отриманий коефіцієнт детермінації  $R^2 = 0,9789$ . Цей  $R^2$  є низьким і демонструє, що насправді структура анемометра впливає на вимірювання швидкості вітру. Крім того, таке ж випробування також проводили з анемометром з неортогональною структурою. Тепер результуючий коефіцієнт детермінації становив  $R^2 = 0,9954$ . Це показує, що в цьому випадку неортогональна структура призвела до меншої похибки. Це пояснюється тим, що завдяки топології розробленого анемометра вітер, що падає на прототип, зазнає менше перешкод від конструкції.

#### 4.2 Результат роботи

Як уже обговорювалося, після калібрування невизначеність запропонованого обладнання становила лише  $\pm 0,1$  м/с. З іншого боку, у випробуваннях похибка комерційного обладнання, що використовується для порівняння з розробленим приладом, становить  $0,18$  м/с. Таким чином можна вважаємо, що під час випробувань отримана похибка головним чином спричинена невизначеністю комерційного обладнання. Також у цьому випадку вітер, що падав, був турбулентним. Отже, похибка була б меншою, якби була більша синхронність між вимірюваннями в обох пристроях. Комерційне обладнання має вхід для запуску процесу вимірювання швидкості вітру.

Розроблене обладнання вимірює швидкість вітру в трьох вимірах. Однак під час калібрування напрямок вітру залишався постійним. Очевидно, це не ідеальна ситуація. Натомість під час процесу слід було змінювати напрямок вітру. Незважаючи на це, отримані результати є обнадійливими. Графіки порівнянь «до» та «після» калібрування, та з комерційним обладнанням показано на рисунках 4.1, 4.2, 4.3 (та наведено у Додатку А рис. 5, рис. 6, рис. 7).



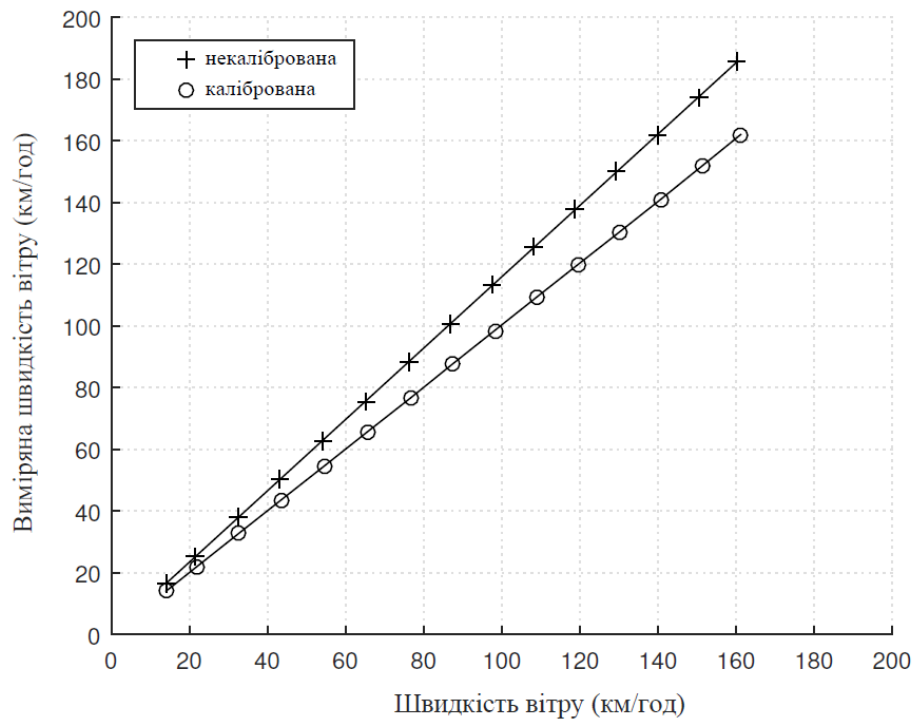


Рисунок 4.1 – Порівняння вимірних значень швидкості вітру з реальними значеннями «до» і «після» калібрування.

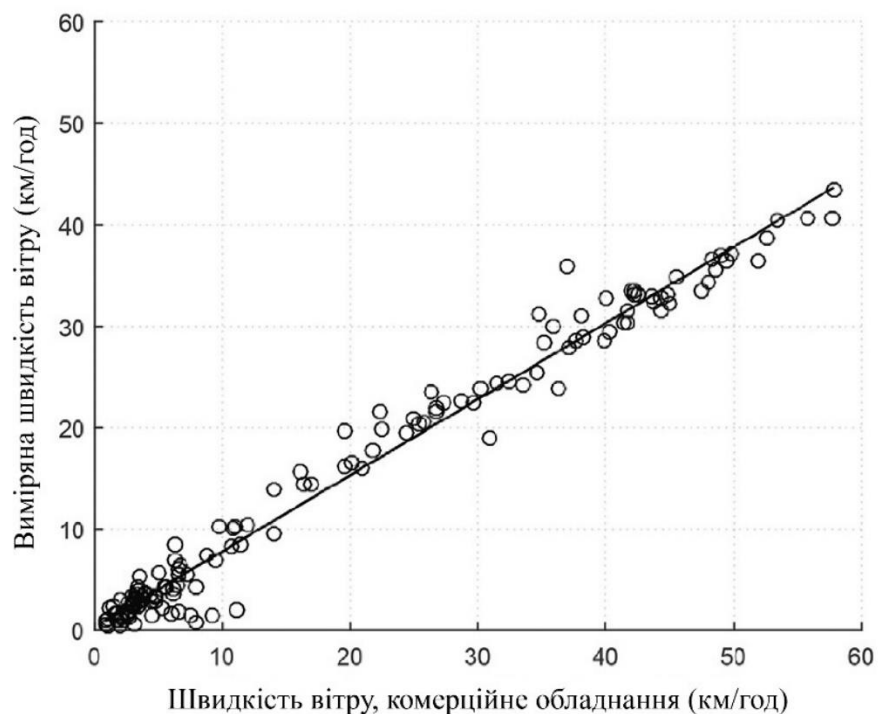


Рисунок 4.2 – Порівняльний тест між прототипом з ортогональною топологією та комерційним обладнанням із падаючим вітром, паралельним одній осі вимірювання.

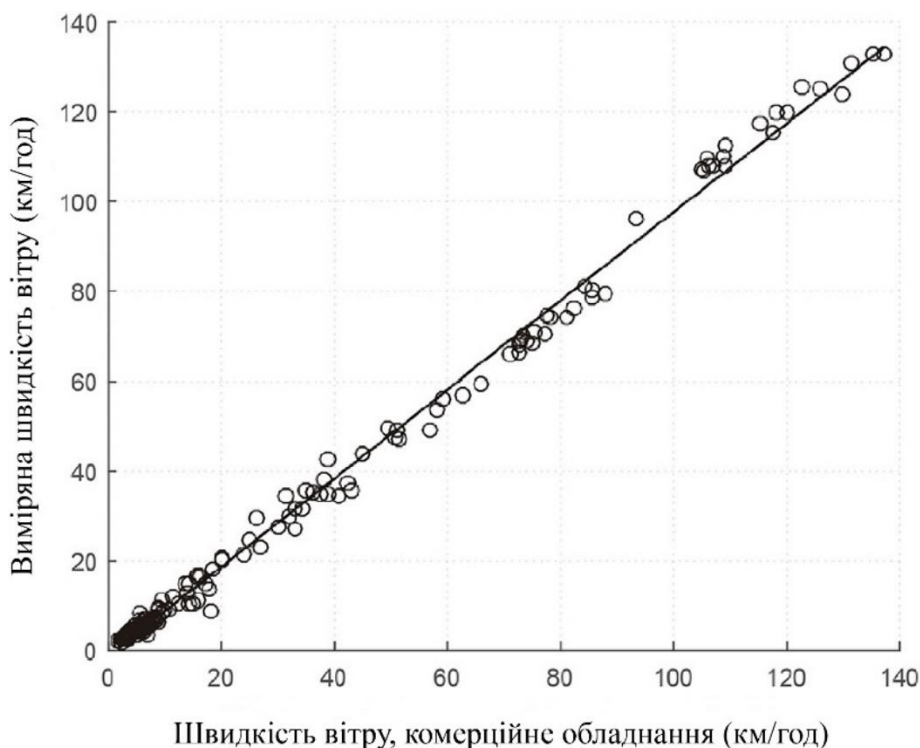


Рисунок 4.3 – Порівняльний тест із комерційним обладнанням і падаючим вітром, паралельним на північ від неортогонального прототипу.

#### 4.3 Висновок до розділу

У даному розділі проведено порівняльні випробування між розробленим прототипом анемометра та комерційним обладнанням WindMaster 3D від Gill Instruments. Випробування включали оцінку турбулентності потоку вітру та можливого впливу конструкції анемометра на вимірювання швидкості вітру. Результати цих досліджень вказують на те, що конструкція анемометра суттєво впливає на точність вимірювань швидкості вітру. За допомогою моделювання було проведено порівняльний аналіз вимірювань, зокрема, між ортогональною та неортогональною структурами анемометра. Результати показали, що неортогональна структура призвела до меншої похибки у вимірюваннях швидкості вітру, що пояснюється зменшенням впливу конструкції на потік вітру. Коефіцієнти детермінації  $R^2$  вказують на високу кореляцію між розробленим прототипом та неортогональною структурою і більш низьку кореляцію з

ортогональною структурою. Після калібрування виявлено, що похибка запропонованого обладнання становила лише  $\pm 0,1$  м/с, що є дуже точним показником. Порівнюючи це з похибкою комерційного обладнання, яка складала 0,18 м/с. Отже, результати даного розділу підтверджують важливість конструкції анемометра для точних вимірювань швидкості вітру і показують, що розроблений прототип має потенціал для покращення точності вимірювань у порівнянні з комерційним обладнанням, особливо в умовах турбулентного потоку вітру.

## 5 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

Науково-технічна розробка має право на існування та впровадження, якщо вона відповідає вимогам часу, як в напрямку науково-технічного прогресу та і в плані економіки. Тому для науково-дослідної роботи необхідно оцінювати економічну ефективність результатів виконаної роботи.

Магістерська кваліфікаційна робота з розробки та дослідження «Засіб контролю швидкості вітрового потоку з покращеними метрологічними характеристиками» відноситься до науково-технічних робіт, які орієнтовані на виведення на ринок (або рішення про виведення науково-технічної розробки на ринок може бути прийнято у процесі проведення самої роботи), тобто коли відбувається так звана комерціалізація науково-технічної розробки. Цей напрямок є пріоритетним, оскільки результатами розробки можуть користуватися інші споживачі, отримуючи при цьому певний економічний ефект. Але для цього потрібно знайти потенційного інвестора, який би взявся за реалізацію цього проекту і переконати його в економічній доцільності такого кроку.

Для наведеного випадку нами мають бути виконані такі етапи робіт:

- 1) проведено комерційний аудит науково-технічної розробки, тобто встановлення її науково-технічного рівня та комерційного потенціалу;
- 2) розраховано витрати на здійснення науково-технічної розробки;
- 3) розрахована економічна ефективність науково-технічної розробки у випадку її впровадження і комерціалізації потенційним інвестором і проведено обґрунтування економічної доцільності комерціалізації потенційним інвестором.

### 5.1 Проведення комерційного та технологічного аудиту науково-технічної розробки

Метою проведення комерційного і технологічного аудиту дослідження за темою «Засіб контролю швидкості вітрового потоку з покращеними метрологічними характеристиками» є оцінювання науково-технічного рівня та

рівня комерційного потенціалу розробки, створеної в результаті науково-технічної діяльності.

Оцінювання науково-технічного рівня розробки та її комерційного потенціалу рекомендується здійснювати із застосуванням 5-ти бальної системи оцінювання за 12-ма критеріями, наведеними в табл. 5.1 [21].

Таблиця 5.1 – Рекомендовані критерії оцінювання науково-технічного рівня і комерційного потенціалу розробки та бальна оцінка

Бали (за 5-ти бальною шкалою)					
	0	1	2	3	4
Технічна здійсненність концепції					
1	Достовірність концепції не підтверджена	Концепція підтверджена експертними висновками	Концепція підтверджена розрахунками	Концепція перевірена на практиці	Перевірено працездатність продукту в реальних умовах
Ринкові переваги (недоліки)					
2	Багато аналогів на малому ринку	Мало аналогів на малому ринку	Кілька аналогів на великому ринку	Один аналог на великому ринку	Продукт не має аналогів на великому ринку
3	Ціна продукту значно вища за ціни аналогів	Ціна продукту дещо вища за ціни аналогів	Ціна продукту приблизно дорівнює цінам аналогів	Ціна продукту дещо нижче за ціни аналогів	Ціна продукту значно нижче за ціни аналогів
4	Технічні та споживчі властивості продукту значно гірші, ніж в	Технічні та споживчі властивості продукту трохи гірші, ніж в аналогів	Технічні та споживчі властивості продукту на рівні аналогів	Технічні та споживчі властивості продукту трохи кращі, ніж в	Технічні та споживчі властивості продукту значно кращі, ніж в
5	Експлуатаційні витрати значно вищі, ніж в аналогів	Експлуатаційні витрати дещо вищі, ніж в аналогів	Експлуатаційні витрати на рівні експлуатаційних витрат аналогів	Експлуатаційні витрати трохи нижчі, ніж в аналогів	Експлуатаційні витрати значно нижчі, ніж в аналогів
Ринкові перспективи					
6	Ринок малий і не має позитивної динаміки	Ринок малий, але має позитивну динаміку	Середній ринок з позитивною динамікою	Великий стабільний ринок	Великий ринок з позитивною динамікою
7	Активна конкуренція великих компаній на	Активна конкуренція	Помірна конкуренція	Незначна конкуренція	Конкуренція немає

Продовження таблиці 5.1

Практична здійсненість					
8	Відсутні фахівці як з технічної, так і з комерційної реалізації ідеї	Необхідно наймати фахівців або витратити значні кошти та час на навчання наявних фахівців	Необхідне незначне навчання фахівців та збільшення їх штату	Необхідне незначне навчання фахівців	Є фахівці з питань як з технічної, так і з комерційної реалізації ідеї
9	Потрібні значні фінансові ресурси, які відсутні. Джерела фінансування ідеї відсутні	Потрібні незначні фінансові ресурси. Джерела фінансування відсутні	Потрібні значні фінансові ресурси. Джерела фінансування є	Потрібні незначні фінансові ресурси. Джерела фінансування є	Не потребує додаткового фінансування
10	Необхідна розробка нових матеріалів	Потрібні матеріали, що використовуються у військово-промисловому комплексі	Потрібні дорогі матеріали	Потрібні досяжні та дешеві матеріали	Всі матеріали для реалізації ідеї відомі та давно використовуються у виробництві
11	Термін реалізації ідеї більший за 10 років	Термін реалізації ідеї більший за 5 років. Термін окупності інвестицій більше 10-ти років	Термін реалізації ідеї від 3-х до 5-ти років. Термін окупності інвестицій більше 5-ти років	Термін реалізації ідеї менше 3-х років. Термін окупності інвестицій від 3-х до 5-ти років	Термін реалізації ідеї менше 3-х років. Термін окупності інвестицій менше 3-х років
12	Необхідна розробка регламентних документів та отримання великої кількості дозвільних документів на виробництво та реалізацію продукту	Необхідно отримання великої кількості дозвільних документів на виробництво та реалізацію продукту, що вимагає значних коштів та часу	Процедура отримання дозвільних документів для виробництва та реалізації продукту вимагає незначних коштів та часу	Необхідно тільки повідомлення відповідним органам про виробництво та реалізацію продукту	Відсутні будь-які регламентні обмеження на виробництво та реалізацію продукту

Результати оцінювання науково-технічного рівня та комерційного потенціалу науково-технічної розробки потрібно звести до таблиці 5.2.

Таблиця 5.2 – Результати оцінювання науково-технічного рівня і комерційного потенціалу розробки експертами

Критерії	Експерт (ПІБ, посада)		
	1	2	3
	Бали:		
1. Технічна здійсненність концепції	3	4	4
2. Ринкові переваги (наявність аналогів)	3	3	3
3. Ринкові переваги (ціна продукту)	3	2	2
4. Ринкові переваги (технічні властивості)	3	2	2
5. Ринкові переваги (експлуатаційні витрати)	2	2	2
6. Ринкові перспективи (розмір ринку)	2	2	2
7. Ринкові перспективи (конкуренція)	2	2	2
8. Практична здійсненність (наявність фахівців)	4	4	4
9. Практична здійсненність (наявність фінансів)	2	3	2
10. Практична здійсненність (необхідність нових матеріалів)	2	2	2
11. Практична здійсненність (термін реалізації)	3	4	4
12. Практична здійсненність (розробка документів)	4	4	4
Сума балів	33	34	33
Середньоарифметична сума балів $СБ_c$	33,3		

За результатами розрахунків, наведених в таблиці 5.2, зробимо висновок щодо науково-технічного рівня і рівня комерційного потенціалу розробки. При цьому використаємо рекомендації, наведені в табл. 5.3 [21].

Таблиця 5.3 – Науково-технічні рівні та комерційні потенціали розробки

Середньоарифметична сума балів $СБ$ розрахована на основі висновків експертів	Науково-технічний рівень та комерційний потенціал розробки
41...48	Високий
31...40	Вище середнього
21...30	Середній
11...20	Нижче середнього
0...10	Низький

Згідно проведених досліджень рівень комерційного потенціалу розробки за темою «Засіб контролю швидкості вітрового потоку з покращеними метрологічними характеристиками» становить 33,3 бала, що, відповідно до

таблиці 5.3, свідчить про комерційну важливість проведення даних досліджень (рівень комерційного потенціалу розробки вище середнього).

## 5.2 Розрахунок узагальненого коефіцієнта якості розробки

Окрім комерційного аудиту розробки доцільно також розглянути технічний рівень якості розробки, розглянувши її основні технічні показники. Ці показники по-різному впливають на загальну якість проектної розробки.

Узагальнений коефіцієнт якості ( $B_n$ ) для нового технічного рішення розраховуємо за формулою [22]

$$B_n = \sum_{i=1}^k \alpha_i \cdot \beta_i, \quad (5.1)$$

де  $k$  – кількість найбільш важливих технічних показників, які впливають на якість нового технічного рішення;

$\alpha_i$  – коефіцієнт, який враховує питому вагу  $i$ -го технічного показника в загальній якості розробки. Коефіцієнт  $\alpha_i$  визначається експертним шляхом і

при цьому має виконуватись умова  $\sum_{i=1}^k \alpha_i = 1$ ;

$\beta_i$  – відносне значення  $i$ -го технічного показника якості нової розробки.

Відносні значення  $\beta_i$  для різних випадків розраховуємо за такими формулами:

- для показників, зростання яких вказує на підвищення в лінійній залежності якості нової розробки

$$\beta_i = \frac{I_{ni}}{I_{ai}}, \quad (5.2)$$



де  $I_{ni}$  та  $I_{на}$  – чисельні значення конкретного  $i$ -го технічного показника якості відповідно для нової розробки та аналога;

- для показників, зростання яких вказує на погіршення в лінійній залежності якості нової розробки

$$\beta_i = \frac{I_{ai}}{I_{ni}} ; \quad (5.3)$$

Використовуючи наведені залежності можемо проаналізувати та порівняти техніко-економічні характеристики аналогу та розробки на основі отриманих наявних та проектних показників, а результати порівняння зведемо до таблиці 5.4.

Таблиця 5.4 – Порівняння основних параметрів розробки та аналога.

Показники (параметри)	Одиниця вимірювання	Аналог	Проектований пристрій	Відношення параметрів нової розробки до аналога	Питома вага показника
Частота роботи	kHz	35 kHz	40 kHz	1,14	0,3
Вихідна потужність	W	5 W	7 W	1,4	0,1
Діапазон робочих температур	°C	-10 до 50 °C	-20 до 70 °C	1,5	0,25
Розмір перетворювача	мм	18 x 12 мм	18 x 15 мм	0,8	0,15
Чутливість	dB	-75 dB	-70 dB	1,07	0,2

Узагальнений коефіцієнт якості ( $B_n$ ) для нового технічного рішення складе

$$B_n = \sum_{i=1}^k \alpha_i \cdot \beta_i = 1,14 \cdot 0,3 + 1,4 \cdot 0,1 + 1,5 \cdot 0,25 + 0,8 \cdot 0,15 + 1,07 \cdot 0,2 = 1,19.$$

Отже за технічними параметрами, згідно узагальненого коефіцієнту якості розробки, науково-технічна розробка переважає існуючі аналоги приблизно в 1,19 рази.

### 5.3 Розрахунок витрат на проведення науково-дослідної роботи

Витрати, пов'язані з проведенням науково-дослідної роботи на тему «Засіб контролю швидкості вітрового потоку з покращеними метрологічними характеристиками», під час планування, обліку і калькулювання собівартості науково-дослідної роботи групуємо за відповідними статтями.

#### 5.3.1 Витрати на оплату праці

До статті «Витрати на оплату праці» належать витрати на виплату основної та додаткової заробітної плати керівникам відділів, лабораторій, секторів і груп, науковим, інженерно-технічним працівникам, конструкторам, технологам, креслярам, копіювальникам, лаборантам, робітникам, студентам, аспірантам та іншим працівникам, безпосередньо зайнятим виконанням конкретної теми, обчисленої за посадовими окладами, відрядними розцінками, тарифними ставками згідно з чинними в організаціях системами оплати праці.

Основна заробітна плата дослідників

Витрати на основну заробітну плату дослідників ( $Z_o$ ) розраховуємо у відповідності до посадових окладів працівників, за формулою [21]

$$Z_o = \sum_{i=1}^k \frac{M_{ni} \cdot t_i}{T_p}, \quad (5.4)$$

де  $k$  – кількість посад дослідників залучених до процесу досліджень;

$M_{ni}$  – місячний посадовий оклад конкретного дослідника, (грн.);

$t_i$  – число днів роботи конкретного дослідника, дн.;

$T_p$  – середнє число робочих днів в місяці,  $T_p=22$  дні.

$$Z_o = 15550,00 \cdot 32 / 22 = 22618,18 \text{ (грн.)}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці 5.5.

Таблиця 5.5 – Витрати на заробітну плату дослідників

Найменування посади	Місячний посадовий оклад, (грн.)	Оплата за робочий день, (грн.)	Число днів роботи	Витрати на заробітну плату, (грн.)
Науковий керівник дослідної роботи	15550,00	706,82	32	22618,18
Інженер-конструктор інформаційно-вимірювальної техніки 1-ї категорії	15050,00	684,09	30	20522,73
Технік 1-ї категорії	8450,00	384,09	7	2688,64
Всього				45829,55

### Основна заробітна плата робітників

Витрати на основну заробітну плату робітників ( $Z_p$ ) за відповідними найменуваннями робіт НДР на тему «Засіб контролю швидкості вітрового потоку з покращеними метрологічними характеристиками» розраховуємо за формулою

$$Z_p = \sum_{i=1}^n C_i \cdot t_i, \quad (5.5)$$

де  $C_i$  – погодинна тарифна ставка робітника відповідного розряду, за виконану відповідну роботу, (грн.)/год;

$t_i$  – час роботи робітника при виконанні визначеної роботи, год.

Погодинну тарифну ставку робітника відповідного розряду  $C_i$  можна визначити за формулою

$$C_i = \frac{M_M \cdot K_i \cdot K_c}{T_p \cdot t_{зм}}, \quad (5.6)$$

де  $M_M$  – розмір прожиткового мінімуму працездатної особи, або мінімальної місячної заробітної плати (в залежності від діючого законодавства), прийmemo  $M_M=6700,00$  (грн.);

$K_i$  – коефіцієнт міжкваліфікаційного співвідношення для встановлення тарифної ставки робітнику відповідного розряду (табл. Б.2, додаток Б) [21]

$K_c$  – мінімальний коефіцієнт співвідношень місячних тарифних ставок робітників першого розряду з нормальними умовами праці виробничих об'єднань і підприємств до законодавчо встановленого розміру мінімальної заробітної плати.

$T_p$  – середнє число робочих днів в місяці, приблизно  $T_p = 22$  дн;

$t_{зм}$  – тривалість зміни, год.

$$C_1 = 6700,00 \cdot 1,10 \cdot 1,35 / (22 \cdot 8) = 56,53 \text{ (грн.)}$$

$$Z_{pl} = 56,53 \cdot 7,50 = 423,98 \text{ (грн.)}$$

Таблиця 5.6 – Величина витрат на основну заробітну плату робітників

Найменування робіт	Тривалість роботи, год	Розряд роботи	Тарифний коефіцієнт	Погодинна тарифна ставка, (грн.)	Величина оплати на робітника (грн.)
Монтаж обладнання	7,50	2	1,10	56,53	423,98
Підготовка робочого місця конструктора інформаційно-вимірювальної техніки	5,50	3	1,35	69,38	381,59
Встановлення програмного забезпечення розробки інформаційно-вимірювальної техніки	6,20	4	1,50	77,09	477,95
Вхідний контроль компонентів та дослідних вузлів	2,50	5	1,70	87,37	218,42
Монтаж компонентів досліджуваної техніки	6,50	5	1,70	87,37	567,88
Випробування дослідних блоків	4,25	5	1,70	87,37	371,31
Налагодження блоків та вузлів	2,30	6	2,00	102,78	236,40
Технічна підтримка експерименту	10,00	3	1,35	69,38	693,79
Всього					3371,32

Додаткова заробітна плата дослідників та робітників

Додаткову заробітну плату розраховуємо як 10 ... 12% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою

$$Z_{\text{доп}} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{\text{доп}}}{100\%}, \quad (5.7)$$

де  $H_{\text{доп}}$  – норма нарахування додаткової заробітної плати. Прийmemo 11%.

$$Z_{\text{доп}} = (45829,55 + 3371,32) \cdot 11 / 100\% = 5412,10 \text{ (грн.)}$$

### 5.3.2 Відрахування на соціальні заходи

Нарахування на заробітну плату дослідників та робітників розраховуємо як 22% від суми основної та додаткової заробітної плати дослідників і робітників за формулою

$$Z_n = (Z_o + Z_p + Z_{\text{доп}}) \cdot \frac{H_{\text{зн}}}{100\%} \quad (5.8)$$

де  $H_{\text{зн}}$  – норма нарахування на заробітну плату. Приймаємо 22%.

$$Z_n = (45829,55 + 3371,32 + 5412,10) \cdot 22 / 100\% = 12014,85 \text{ (грн.)}$$

### 5.3.3 Сировина та матеріали

До статті «Сировина та матеріали» належать витрати на сировину, основні та допоміжні матеріали, інструменти, пристрої та інші засоби і предмети праці, які придбані у сторонніх підприємств, установ і організацій та витрачені на проведення досліджень за темою «Засіб контролю швидкості вітрового потоку з покращеними метрологічними характеристиками».

Витрати на матеріали ( $M$ ), у вартісному вираженні розраховуються окремо по кожному виду матеріалів за формулою

$$M = \sum_{j=1}^n H_j \cdot C_j \cdot K_j - \sum_{j=1}^n B_j \cdot C_{ej}, \quad (5.9)$$

де  $H_j$  – норма витрат матеріалу  $j$ -го найменування, кг;

$n$  – кількість видів матеріалів;

$C_j$  – вартість матеріалу  $j$ -го найменування, (грн.)/кг;

$K_j$  – коефіцієнт транспортних витрат, ( $K_j = 1,1 \dots 1,15$ );

$B_j$  – маса відходів  $j$ -го найменування, кг;

$C_{ej}$  – вартість відходів  $j$ -го найменування, (грн.)/кг.

$$M_1 = 1 \cdot 230,00 \cdot 1,03 - 0 \cdot 0 = 236,90 \text{ (грн.)}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці 5.7.

Таблиця 5.7 – Витрати на матеріали

Найменування матеріалу, марка, тип, сорт	Ціна за 1 кг, (грн.)	Норма витрат, кг	Величина відходів, кг	Ціна відходів, (грн.)/кг	Вартість витраченого матеріалу, (грн.)
FLASH-пам'ять BAFF 32GB	230,00	1	0	0	236,90
Диск оптичний COOL-CD/RW	27,00	4	0	0	111,24
Картридж для принтера HP-1568	1920,00	1	0	0	1977,60
Начиння канцелярське COOL	173,00	4	0	0	712,76
Органайзер офісний COOL light	144,00	4	0	0	593,28
Папір для заміток COOL-B (A5)/70	97,00	2	0	0	199,82

Продовження таблиці 5.7

Папір канцелярський офісний COOL-	202,00	2	0	0	416,12
-----------------------------------	--------	---	---	---	--------

500 (A4)					
Тека для паперів	98,00	4	0	0	403,76
Провід живлення	24,00	2,500	0	0	61,80
Провід монтажний	16,00	1,100	0	0	18,13
Припій ПОС-92	538,00	0,030	0	0	16,62
Флюс	405,00	0,040	0	0	16,69
Лак термостійкий	328,00	0,050	0	0	16,89
Інші матеріали	300,00	1,0	0	0	309,00
Всього					5090,61

### 5.3.4 Розрахунок витрат на комплектуючі

Витрати на комплектуючі ( $K_6$ ), які використовують при проведенні НДР на тему «Засіб контролю швидкості вітрового потоку з покращеними метрологічними характеристиками», розраховуємо, згідно з їхньою номенклатурою, за формулою

$$K_6 = \sum_{j=1}^n H_j \cdot C_j \cdot K_j \quad (5.10)$$

де  $H_j$  – кількість комплектуючих  $j$ -го виду, шт.;

$C_j$  – покупна ціна комплектуючих  $j$ -го виду, (грн.);

$K_j$  – коефіцієнт транспортних витрат, ( $K_j = 1,1 \dots 1,15$ ).

$$K_6 = 1 \cdot 2800,00 \cdot 1,03 = 2884,00 \text{ (грн.)}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці 5.8.

Таблиця 5.8 – Витрати на комплектуючі

Найменування комплектуючих	Кількість, шт.	Ціна за штуку, (грн.)	Сума, (грн.)
Ультразвуковий перетворювач Prowave 400EP18A	1	2800,00	2884,00
Мікроконтролер STM32F429	1	845,00	870,35
MOSFET	1	560,00	576,80
Імпульсний трансформатор	1	759,00	781,77
Всього			5112,92

### 5.3.5 Спецустаткування для наукових (експериментальних) робіт

До статті «Спецустаткування для наукових (експериментальних) робіт» належать витрати на виготовлення та придбання спецустаткування необхідного для проведення досліджень, також витрати на їх проектування, виготовлення, транспортування, монтаж та встановлення.

Балансову вартість спецустаткування розраховуємо за формулою

$$B_{\text{спец}} = \sum_{i=1}^k C_i \cdot C_{\text{пр.і}} \cdot K_i, \quad (5.11)$$

де  $C_i$  – ціна придбання одиниці спецустаткування даного виду, марки, (грн.);

$C_{\text{пр.і}}$  – кількість одиниць устаткування відповідного найменування, які придбані для проведення досліджень, шт.;

$K_i$  – коефіцієнт, що враховує доставку, монтаж, налагодження устаткування тощо, ( $K_i = 1, 10 \dots 1, 12$ );

$k$  – кількість найменувань устаткування.

$$B_{\text{спец}} = 9620,00 \cdot 1 \cdot 1,03 = 9908,60 \text{ (грн.)}$$

Отримані результати зведемо до таблиці 5.9.



Таблиця 5.9 – Витрати на придбання спецустаткування по кожному виду

Найменування устаткування	Кількість, шт	Ціна за одиницю, (грн.)	Вартість, (грн.)
Осцилограф	1	9620,00	9908,60
Лабораторний блок живлення	1	2400,00	2472,00
Всього			12380,60

### 5.3.6 Програмне забезпечення для наукових (експериментальних) робіт

До статті «Програмне забезпечення для наукових (експериментальних) робіт» належать витрати на розробку та придбання спеціальних програмних засобів і програмного забезпечення, (програм, алгоритмів, баз даних) необхідних для проведення досліджень, також витрати на їх проектування, формування та встановлення.

Балансову вартість програмного забезпечення розраховуємо за формулою

$$B_{npz} = \sum_{i=1}^k C_{inprz} \cdot C_{npz.i} \cdot K_i, \quad (5.12)$$

де  $C_{inprz}$  – ціна придбання одиниці програмного засобу даного виду, (грн.);

$C_{npz.i}$  – кількість одиниць програмного забезпечення відповідного найменування, які придбані для проведення досліджень, шт.;

$K_i$  – коефіцієнт, що враховує інсталяцію, налагодження програмного засобу тощо, ( $K_i = 1, 10 \dots 1, 12$ );

$k$  – кількість найменувань програмних засобів.

$$B_{npz} = 7559,00 \cdot 1 \cdot 1,03 = 7785,77 \text{ (грн.)}$$

Отримані результати зведемо до таблиці 5.10.

Таблиця 5.10 – Витрати на придбання програмних засобів по кожному виду

Найменування програмного засобу	Кількість, шт	Ціна за одиницю, (грн.)	Вартість, (грн.)
Програмне середовище розробки для STM32 (STM32CubeIDE)	1	7559,00	7785,77
Пакет Visual System Simulator	1	5120,00	5273,60
Всього			13059,37

## 5.3.7 Амортизація обладнання, програмних засобів та приміщень

В спрощеному вигляді амортизаційні відрахування по кожному виду обладнання, приміщень та програмному забезпеченню тощо, розраховуємо з використанням прямолінійного методу амортизації за формулою

$$A_{обл} = \frac{Ц_{б}}{T_{в}} \cdot \frac{t_{вик}}{12}, \quad (5.13)$$

де  $Ц_{б}$  – балансова вартість обладнання, програмних засобів, приміщень тощо, які використовувались для проведення досліджень, (грн.);

$t_{вик}$  – термін використання обладнання, програмних засобів, приміщень під час досліджень, місяців;

$T_{в}$  – строк корисного використання обладнання, програмних засобів, приміщень тощо, років.

$$A_{обл} = (26520,00 \cdot 2) / (2 \cdot 12) = 2210,00 \text{ (грн.)}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці 5.11.

Таблиця 5.11 – Амортизаційні відрахування по кожному виду обладнання

Найменування обладнання	Балансова вартість, (грн.)	Строк корисного використання, років	Термін використання обладнання, місяців	Амортизаційні відрахування, (грн.)
ПК розробника інформаційно-вимірювальної техніки	26520,00	2	2	2210,00

Продовження таблиці 5.11

Електронно-графічна система проектування	43799,00	2	2	3649,92
Робоче місце інженера-розробника інформаційно-вимірювальної техніки	9460,00	5	2	315,33
Монтажне обладнання	8560,00	4	2	356,67
Вольтметр цифровий	6850,00	5	2	228,33
Оргтехніка	8880,00	5	2	296,00
Приміщення лабораторії розробки інформаційно-вимірювальної техніки	400000,00	30	2	2222,22
ОС Windows	6520,00	2	2	543,33
Прикладний пакет Microsoft Office	6510,00	2	2	542,50
Принтер виводу графічної інформації	8299,00	5	2	276,63
Всього				10640,94

## 5.3.8 Паливо та енергія для науково-виробничих цілей

Витрати на силову електроенергію ( $B_e$ ) розраховуємо за формулою

$$B_e = \sum_{i=1}^n \frac{W_{yi} \cdot t_i \cdot C_e \cdot K_{\text{внi}}}{\eta_i}, \quad (5.14)$$

де  $W_{yi}$  – встановлена потужність обладнання на визначеному етапі розробки, кВт;

$t_i$  – тривалість роботи обладнання на етапі дослідження, год;

$C_e$  – вартість 1 кВт-години електроенергії, (грн.); (вартість електроенергії визначається за даними енергопостачальної компанії), прийmemo  $C_e = 7,50$  (грн.);

$K_{eni}$  – коефіцієнт, що враховує використання потужності,  $K_{eni} < 1$ ;

$\eta_i$  – коефіцієнт корисної дії обладнання,  $\eta_i < 1$ .

$$B_e = 0,26 \cdot 240,0 \cdot 7,50 \cdot 0,95 / 0,97 = 468,00 \text{ (грн.)}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці 5.12.

Таблиця 5.12 – Витрати на електроенергію

Найменування обладнання	Встановлена потужність, кВт	Тривалість роботи, год	Сума, (грн.)
Персональний комп'ютер розробника інформаційно-вимірювальної техніки	0,26	240,0	468,00
Електронно-графічна система проектування	0,42	240,0	756,00
Робоче місце інженера-розробника інформаційно-вимірювальної техніки	0,10	240,0	180,00
Монтажне обладнання	0,01	25,0	1,88
Вольтметр цифровий	0,09	120,0	81,00
Оргтехніка	0,36	2,3	6,21
Принтер виводу графічної інформації	0,25	4,7	8,81
Осцилограф	0,15	120,0	135,00
Всього			1636,90

### 5.3.9 Службові відрядження

До статті «Службові відрядження» дослідної роботи на тему «Засіб контролю швидкості вітрового потоку з покращеними метрологічними характеристиками» належать витрати на відрядження штатних працівників, працівників організацій, які працюють за договорами цивільно-правового характеру, аспірантів, зайнятих розробленням досліджень, відрядження, пов'язані

з проведенням випробувань машин та приладів, а також витрати на відрядження на наукові з'їзди, конференції, наради, пов'язані з виконанням конкретних досліджень.

Витрати за статтею «Службові відрядження» розраховуємо як 20...25% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою

$$B_{cv} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{cv}}{100\%}, \quad (5.15)$$

де  $H_{cv}$  – норма нарахування за статтею «Службові відрядження», прийmemo  $H_{cv} = 20\%$ .

$$B_{cv} = (45829,55 + 3371,32) \cdot 20 / 100\% = 9840,17 \text{ (грн.)}$$

5.3.10 Витрати на роботи, які виконують сторонні підприємства, установи і організації

Витрати за статтею «Витрати на роботи, які виконують сторонні підприємства, установи і організації» розраховуємо як 30...45% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою

$$B_{cn} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{cn}}{100\%}, \quad (5.16)$$

де  $H_{cn}$  – норма нарахування за статтею «Витрати на роботи, які виконують сторонні підприємства, установи і організації», прийmemo  $H_{cn} = 30\%$ .

$$B_{cn} = (45829,55 + 3371,32) \cdot 30 / 100\% = 14760,26 \text{ (грн.)}$$

### 5.3.11 Інші витрати

До статті «Інші витрати» належать витрати, які не знайшли відображення у зазначених статтях витрат і можуть бути віднесені безпосередньо на собівартість досліджень за прямими ознаками.

Витрати за статтею «Інші витрати» розраховуємо як 50...100% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою

$$I_{\text{в}} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{\text{ив}}}{100\%}, \quad (5.17)$$

де  $H_{\text{ив}}$  – норма нарахування за статтею «Інші витрати», прийmemo  $H_{\text{ив}} = 50\%$ .

$$I_{\text{в}} = (45829,55 + 3371,32) \cdot 50 / 100\% = 24600,43 \text{ (грн.)}$$

### 5.3.12 Накладні (загальновиробничі) витрати

До статті «Накладні (загальновиробничі) витрати» належать: витрати, пов'язані з управлінням організацією; витрати на винахідництво та раціоналізацію; витрати на підготовку (перепідготовку) та навчання кадрів; витрати, пов'язані з набором робочої сили; витрати на оплату послуг банків; витрати, пов'язані з освоєнням виробництва продукції; витрати на науково-технічну інформацію та рекламу та ін.

Витрати за статтею «Накладні (загальновиробничі) витрати» розраховуємо як 100...150% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою

$$B_{\text{нзв}} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{\text{нзв}}}{100\%}, \quad (5.18)$$

де  $H_{нзв}$  – норма нарахування за статтею «Накладні (загальновиробничі) витрати», прийmemo  $H_{нзв} = 100\%$ .

$$B_{нзв} = (45829,55 + 3371,32) \cdot 100 / 100\% = 49200,86 \text{ (грн.)}$$

Витрати на проведення науково-дослідної роботи на тему «Засіб контролю швидкості вітрового потоку з покращеними метрологічними характеристиками» розраховуємо як суму всіх попередніх статей витрат за формулою:

$$B_{заг} = Z_o + Z_p + Z_{доd} + Z_n + M + K_в + B_{снец} + B_{прс} + A_{обл} + B_e + B_{св} + B_{сн} + I_в + B_{нзв}. \quad (5.19)$$

$$B_{заг} = 45829,55 + 3371,32 + 5412,10 + 12014,85 + 5090,61 + 5112,92 + 12380,60 + 13059,37 + 10640,94 + 1636,90 + 9840,17 + 14760,26 + 24600,43 + 49200,86 = 212950,87 \text{ (грн.)}$$

Загальні витрати  $ЗВ$  на завершення науково-дослідної (науково-технічної) роботи та оформлення її результатів розраховується за формулою

$$ЗВ = \frac{B_{заг}}{\eta}, \quad (5.20)$$

де  $\eta$  - коефіцієнт, який характеризує етап (стадію) виконання науково-дослідної роботи, прийmemo  $\eta = 0,95$ .

$$ЗВ = 212950,87 / 0,95 = 224158,81 \text{ (грн.)}$$

5.4 Розрахунок економічної ефективності науково-технічної розробки при її можливій комерціалізації потенційним інвестором

В ринкових умовах узагальнюючим позитивним результатом, що його може отримати потенційний інвестор від можливого впровадження результатів тієї чи іншої науково-технічної розробки, є збільшення у потенційного інвестора величини чистого прибутку.

Результати дослідження проведені за темою «Засіб контролю швидкості вітрового потоку з покращеними метрологічними характеристиками»

передбачають комерціалізацію протягом 4-х років реалізації на ринку. Результати відповідають напрямку «Розробка чи суттєве вдосконалення машини (механізму, приладу, пристрою) для використання кінцевими споживачами».

В цьому випадку майбутній економічний ефект буде формуватися на основі таких даних:

$\Delta N$  – збільшення кількості споживачів пристрою, у періоди часу, що аналізуються, від покращення його певних характеристик;

Показник	1-й рік	2-й рік	3-й рік	4-й рік
Збільшення кількості споживачів, осіб	100	300	400	200

$N$  – кількість споживачів які використовували аналогічний пристрій у році до впровадження результатів нової науково-технічної розробки, прийmemo 5500 осіб;

$C_o$  – вартість пристрою у році до впровадження результатів розробки, прийmemo 4300,00 (грн.);

$\pm \Delta C_o$  – зміна вартості пристрою від впровадження результатів науково-технічної розробки, прийmemo 401,30 (грн.)

Можливе збільшення чистого прибутку у потенційного інвестора  $\Delta \Pi_i$  для кожного із 4-х років, протягом яких очікується отримання позитивних результатів від можливого впровадження та комерціалізації науково-технічної розробки, розраховуємо за формулою [21]

$$\Delta \Pi_i = (\pm \Delta C_o \cdot N + C_o \cdot \Delta N)_i \cdot \lambda \cdot \rho \cdot \left(1 - \frac{g}{100}\right), \quad (5.21)$$

де  $\lambda$  – коефіцієнт, який враховує сплату потенційним інвестором податку на додану вартість. У 2023 році ставка податку на додану вартість складає 20%, а коефіцієнт  $\lambda = 0,8333$ ;

$\rho$  – коефіцієнт, який враховує рентабельність інноваційного продукту).  
Прийmemo  $\rho = 40\%$ ;



$\rho$  – ставка податку на прибуток, який має сплачувати потенційний інвестор, у 2023 році  $\rho = 18\%$ ;

Збільшення чистого прибутку 1-го року:

$$\Delta\Pi_1 = (401,30 \cdot 5500,00 + 4701,30 \cdot 100) \cdot 0,83 \cdot 0,4 \cdot (1 - 0,18/100\%) = 728862,71 \text{ (грн.)}$$

Збільшення чистого прибутку 2-го року:

$$\Delta\Pi_2 = (401,30 \cdot 5500,00 + 4701,30 \cdot 400) \cdot 0,83 \cdot 0,4 \cdot (1 - 0,18/100\%) = 1112827,28 \text{ (грн.)}$$

Збільшення чистого прибутку 3-го року:

$$\Delta\Pi_3 = (401,30 \cdot 5500,00 + 4701,30 \cdot 800) \cdot 0,83 \cdot 0,4 \cdot (1 - 0,18/100\%) = 1624780,05 \text{ (грн.)}$$

Збільшення чистого прибутку 4-го року:

$$\Delta\Pi_4 = (401,30 \cdot 5500,00 + 4701,30 \cdot 1000) \cdot 0,83 \cdot 0,4 \cdot (1 - 0,18/100\%) = 1880756,43 \text{ (грн.)}$$

Приведена вартість збільшення всіх чистих прибутків  $\Pi\Pi$ , що їх може отримати потенційний інвестор від можливого впровадження та комерціалізації науково-технічної розробки

$$\Pi\Pi = \sum_{i=1}^T \frac{\Delta\Pi_i}{(1 + \tau)^t}, \quad (5.22)$$

де  $\Delta\Pi_i$  – збільшення чистого прибутку у кожному з років, протягом яких виявляються результати впровадження науково-технічної розробки, (грн.);

$T$  – період часу, протягом якого очікується отримання позитивних результатів від впровадження та комерціалізації науково-технічної розробки, роки;

$\tau$  – ставка дисконтування, за яку можна взяти щорічний прогнозований рівень інфляції в країні,  $\tau = 0,15$ ;

$t$  – період часу (в роках) від моменту початку впровадження науково-технічної розробки до моменту отримання потенційним інвестором додаткових чистих прибутків у цьому році.

$$\begin{aligned} \Pi\Pi &= 728862,71/(1+0,15)^1 + 1112827,28/(1+0,15)^2 + 1624780,05/(1+0,15)^3 + \\ &+ 1880756,43/(1+0,15)^4 = 633793,66 + 841457,30 + 1068319,25 + 1075328,59 = 3618898,81 \\ &\text{(грн.)} \end{aligned}$$

Величина початкових інвестицій  $PV$ , які потенційний інвестор має вкласти для впровадження і комерціалізації науково-технічної розробки

$$PV = k_{инв} \cdot 3B, \quad (5.23)$$

де  $k_{инв}$  – коефіцієнт, що враховує витрати інвестора на впровадження науково-технічної розробки та її комерціалізацію, приймаємо  $k_{инв} = 2$ ;

$3B$  – загальні витрати на проведення науково-технічної розробки та оформлення її результатів, приймаємо 224158,81 (грн.)

$$PV = k_{инв} \cdot 3B = 2 \cdot 224158,81 = 448317,63 \text{ (грн.)}$$

Абсолютний економічний ефект  $E_{абс}$  для потенційного інвестора від можливого впровадження та комерціалізації науково-технічної розробки становитиме

$$E_{абс} = III - PV \quad (5.24)$$

де  $III$  – приведена вартість зростання всіх чистих прибутків від можливого впровадження та комерціалізації науково-технічної розробки, 3618898,81 (грн.);

$PV$  – теперішня вартість початкових інвестицій, 448317,63 (грн.)

$$E_{абс} = III - PV = 3618898,81 - 448317,63 = 3170581,18 \text{ (грн.)}$$

Внутрішня економічна дохідність інвестицій  $E_e$ , які можуть бути вкладені потенційним інвестором у впровадження та комерціалізацію науково-технічної розробки

$$E_e = \sqrt[Tж]{1 + \frac{E_{абс}}{PV}} - 1, \quad (5.25)$$

де  $E_{абс}$  – абсолютний економічний ефект вкладених інвестицій, 3170581,18 (грн.);

$PV$  – теперішня вартість початкових інвестицій, 448317,63 (грн.);

$T_{ж}$  – життєвий цикл науково-технічної розробки, тобто час від початку її розробки до закінчення отримання позитивних результатів від її впровадження, 4 роки.

$$E_g = \sqrt[4]{1 + \frac{E_{abc}}{PV}} - 1 = (1 + 3170581,18/448317,63)^{1/4} = 0,69.$$

Мінімальна внутрішня економічна дохідність вкладених інвестицій  $\tau_{min}$

$$\tau_{min} = d + f, \quad (5.26)$$

де  $d$  – середньозважена ставка за депозитними операціями в комерційних банках; в 2023 році в Україні  $d = 0,11$ ;

$f$  – показник, що характеризує ризикованість вкладення інвестицій, прийmemo 0,33.

$\tau_{min} = 0,11 + 0,33 = 0,44 < 0,69$  свідчить про те, що внутрішня економічна дохідність інвестицій  $E_g$ , які можуть бути вкладені потенційним інвестором у впровадження та комерціалізацію науково-технічної розробки вища мінімальної внутрішньої дохідності. Тобто інвестувати в науково-дослідну роботу за темою «Засіб контролю швидкості вітрового потоку з покращеними метрологічними характеристиками» доцільно.

Період окупності інвестицій  $T_{ок}$  які можуть бути вкладені потенційним інвестором у впровадження та комерціалізацію науково-технічної розробки

$$T_{ок} = \frac{1}{E_g}, \quad (5.27)$$

де  $E_g$  – внутрішня економічна дохідність вкладених інвестицій.

$$T_{ок} = 1 / 0,69 = 1,46 \text{ р.}$$

$T_{ок} < 3$ -х років, що свідчить про комерційну привабливість науково-технічної розробки і може спонукати потенційного інвестора профінансувати впровадження даної розробки та виведення її на ринок.

### 5.5 Висновки до розділу

Згідно проведених досліджень рівень комерційного потенціалу розробки за темою «Засіб контролю швидкості вітрового потоку з покращеними метрологічними характеристиками» становить 33,3 бала, що, свідчить про комерційну важливість проведення даних досліджень (рівень комерційного потенціалу розробки вище середнього).

При оцінюванні за технічними параметрами, згідно узагальненого коефіцієнту якості розробки, науково-технічна розробка переважає існуючі аналоги приблизно в 1,19 рази.

Також термін окупності становить 1,46 р., що менше 3-х років, що свідчить про комерційну привабливість науково-технічної розробки і може спонукати потенційного інвестора профінансувати впровадження даної розробки та виведення її на ринок.

Отже можна зробити висновок про доцільність проведення науково-дослідної роботи за темою «Засіб контролю швидкості вітрового потоку з покращеними метрологічними характеристиками».

## ВИСНОВОК

У цій роботі представлено повну розробку прототипу, здатного вимірювати швидкість вітру в трьох вимірах на основі ультразвуку. Під час процесу механічної розробки було обережно, щоб уникнути структурного впливу прототипу на вимірювання. Що стосується розробленої електронної схеми, також були застосовані міркування, які дозволили задовільну роботу обладнання, зробивши обробку ультразвукових сигналів і розрахунок швидкості вітру повністю цифровими. Це дозволило ефективно функціонувати вимірювальній техніці за допомогою обчислення часу проходження, про що можна було свідчити в представлених результатах. Представлений процес калібрування був задовільним, зробивши прототип точним, з максимальною похибкою 1% по відношенню до еталонного обладнання та похибкою  $\pm 0,1$  м/с. Чутливість розробленого прототипу становила 0,049 км/год. Роботу прототипу перевірено для вимірювання швидкості вітру до 160 км/год. Однак, враховуючи механічну міцність і отримані результати, очікується, що він зможе вимірювати й вищі швидкості. Таким чином, у майбутніх роботах будуть проведені нові випробування, під час яких обладнання буде піддано впливу вітру більшої інтенсивності та різних напрямків. Порівняльні експерименти, проведені з комерційним обладнанням, емпірично показали проблеми, які можуть бути спричинені структурою під час вимірювань, що було переконливо доведено моделюванням. Ці випробування також продемонстрували більшу точність розробленого прототипу. Економічна частина дослідження свідчить про високу комерційну привабливість науково-технічної розробки, яку підтверджує термін окупності у 1,46 років. Цей факт говорить про можливість інвестицій у впровадження розробки на ринок та її подальший успішний вигляд у комерційному плані.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Анемометр, загальна інформація про прилад [Електронний ресурс]// URL: <https://www.davisinstruments.com/pages/what-is-an-anemometer>
2. Чашкові анемометри, застосування [Електронний ресурс]//URL: <https://www.mrclab.com/how-to-use-cup-anemometer>
3. Лазерні анемометри, застосування [Електронний ресурс]//URL: [https://www.gophotonics.com/community/what-is-laser-doppler-velocimetry?gclid=Cj0KCQiAj\\_CrBhD-ARIsAIiMxT9kl29\\_r2ClZr7GiFh1m3c9l-8G2pGwmvuGs2R9yNMuaT0lW\\_EakRgaAgFfEALw\\_wcB](https://www.gophotonics.com/community/what-is-laser-doppler-velocimetry?gclid=Cj0KCQiAj_CrBhD-ARIsAIiMxT9kl29_r2ClZr7GiFh1m3c9l-8G2pGwmvuGs2R9yNMuaT0lW_EakRgaAgFfEALw_wcB)
4. Теплові анемометри, застосування [Електронний ресурс]//URL: [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4615-2586-8\\_6](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4615-2586-8_6)
5. Трубчасті анемометри, приклади застосування, [Електронний ресурс]//URL: <https://www.renkeer.com/anemometer-types/>
6. Анемометри нажимної пластини, застосування [Електронний ресурс]//URL: <https://www.vedantu.com/physics/anemometer>
7. Акустичні анемометри, застосування [Електронний ресурс]//URL: <https://www.watelectrical.com/anemometer-types-working-principle-uses/>
8. P. Olmos, «Ultrasonic velocity meter to evaluate the behaviour of a solar chimney» Measurement Science and Technology, vol. 15, no. 7, pp. N49–N53, jul 2004.
9. M. Comes, P. Drumea, M. Blejan, I. Dutu, and A. Vasile, «Ultrasonic Flowmeter» in 2006 29th International Spring Seminar on Electronics Technology. IEEE, may 2006, pp. 386–389.4.
10. Метеорологічні вежі, застосування [Електронний ресурс]//URL: <https://www.windfarmbop.com/meteorological-towers-in-a-wind-farm/>
11. Контроль вітрового потоку за допомогою роторів та вітерцевих тунелів [Електронний ресурс]//URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/1136/1/012022/pdf9>

12. Вітряки (керовані вентилятори) [Електронний ресурс]//URL: <https://www.axair-fans.co.uk/news/fans-used-renewable-energy-source-wind-power/>
13. Основи вітроенергетики: підручник / Г. Півняк, Ф. Шкрабець, О75 Н. Нойбергер, Д. Циценков ; М-во освіти і науки України, Нац. гірн. ун-т. – Д.: НГУ, 2015. – 335 с.
14. Аеродинамічні системи управління [Електронний ресурс]//URL: <https://chota.plast.org.ua/materials/osnovy-aerodynamiky/>
15. Положення про кваліфікаційні роботи на другому (магістерському) рівні вищої освіти / СУЯ ВНТУ-03.02.02-П.001.01:21 / Розробники: Семенов А.О.; Громова Л.П.; Середюк О.В.; Макарова Т.В. – Вінниця ВНТУ, 2021 – 60 с.
16. R. Wagner, I. Antoniou, S. M. Pedersen, M. S. Courtney, and H. E. Jørgensen, «The influence of the wind speed profile on wind turbine performance measurements,» Wind Energy, vol. 12, no. 4, pp. 348–362, 2009.
17. D. Banfield and R. Dissly, «A Martian sonic anemometer» in 2005 IEEE Aerospace Conference, vol. 2005. IEEE, 2005, pp. 641–647.
18. T. S. El-Madany, F. Griessbaum, G. Fratini, J.-Y. Juang, S.-C. Chang, and O. Klemm, «Comparison of sonic anemometer performance under foggy conditions» Agricultural and Forest Meteorology, vol. 173, pp. 63–73, may 2013.
19. D. Han, S. Kim, and S. Park, «Two-dimensional ultrasonic anemometer using the directivity angle of an ultrasonic sensor» Microelectronics Journal, vol. 39, no. 10, pp. 1195–1199, oct 2008.
20. V. Hans and H. Windorfer, «Comparison of pressure and ul-trasound measurements in vortex flow meters» Measurement, vol. 33, no. 2, pp. 121–133, mar 2003.
21. Методичні вказівки до виконання економічної частини магістерських кваліфікаційних робіт / Уклад. : В. О. Козловський, О. Й. Лесько, В. В. Кавецький. – Вінниця : ВНТУ, 2021. – 42 с.
22. Кавецький В. В. Економічне обґрунтування інноваційних рішень: практикум / В. В. Кавецький, В. О. Козловський, І. В. Причепа – Вінниця : ВНТУ, 2016. – 113 с

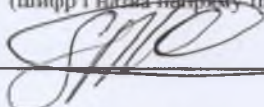
Додаток А  
(обов'язковий)

## ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА


### ЗАСІБ КОНТРОЛЮ ШВИДКОСТІ ВІТРОВОГО ПОТОКУ З ПОКРАЩЕНИМИ МЕТРОЛОГІЧНИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

Виконав: студент 2-го курсу, групи КІВТ-22м  
спеціальності 152 – Метрологія та  
інформаційно-вимірювальна техніка  
ОП Комп'ютеризовані інформаційно-  
вимірювальні технології

(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

  
Климчук О.О.  
(прізвище та ініціали)

Керівник: доц. каф. ІРТС

  
Дудатьєв І.А.  
(прізвище та ініціали)

«18» \_\_\_\_\_ 19 \_\_\_\_\_ 2023 р.



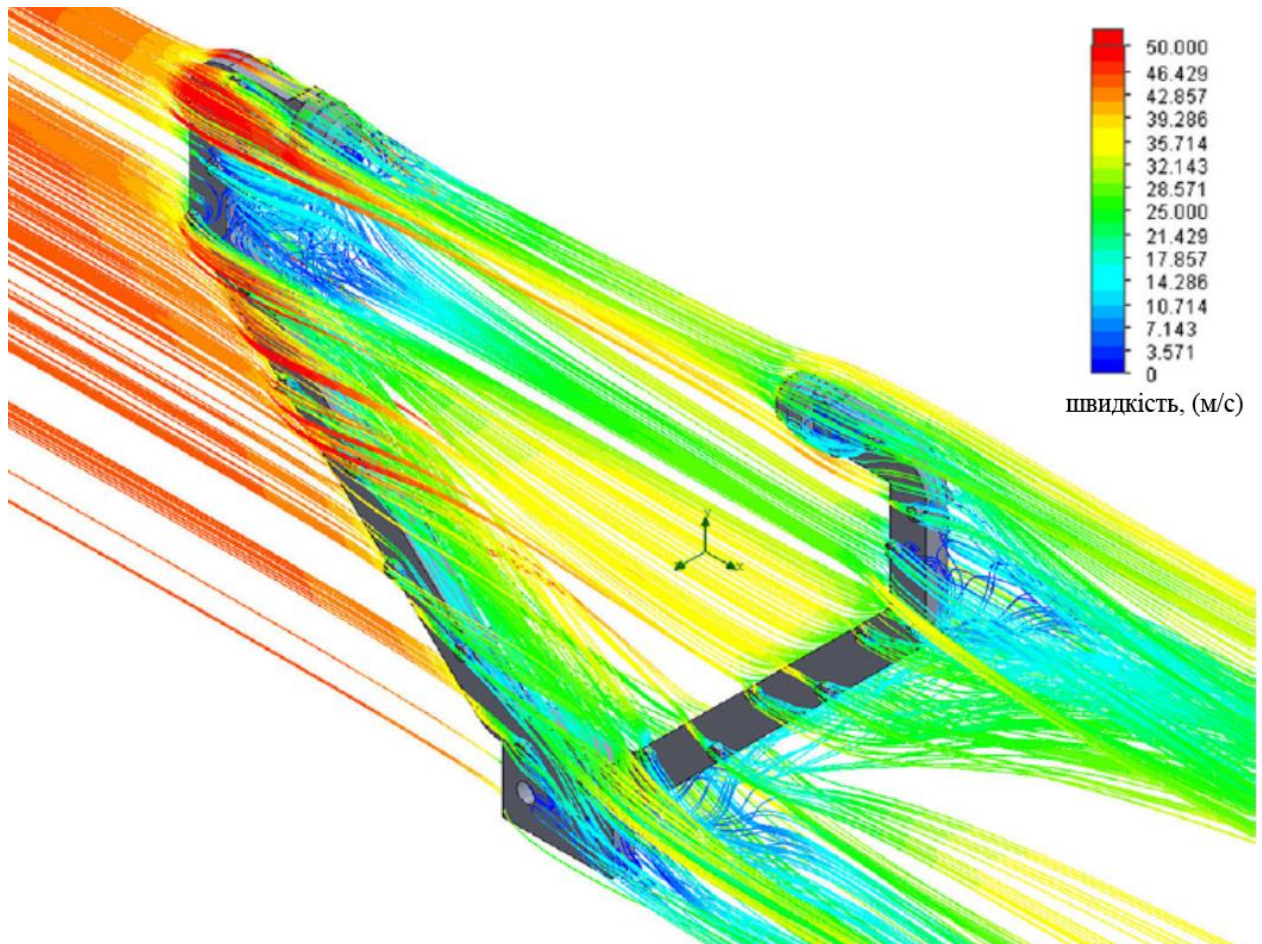


Рисунок 1 – Зображення змодельованого потоку вітру, коли він дме паралельно вимірюваній осі

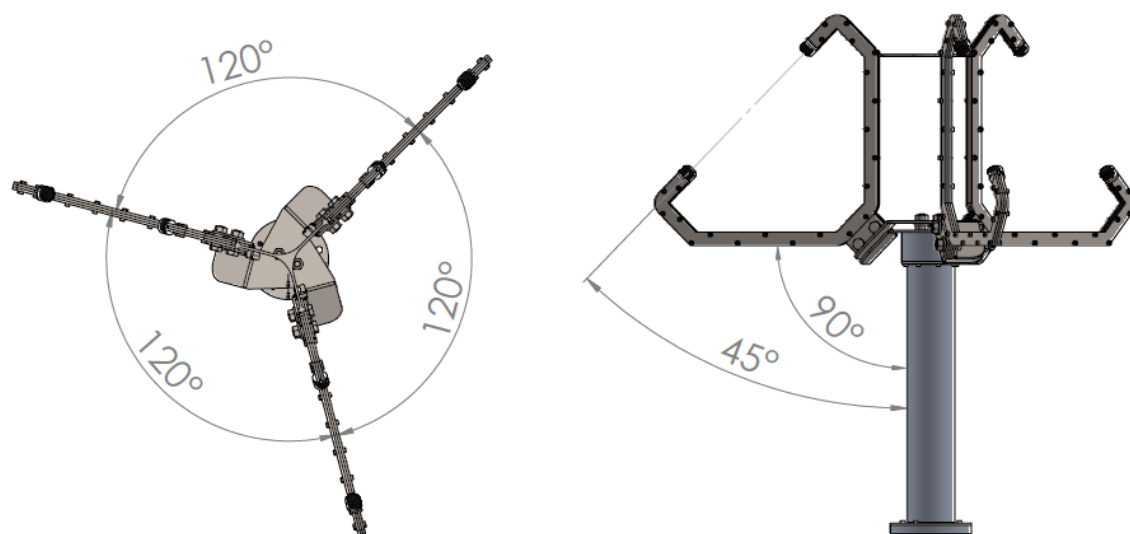


Рисунок 2 – Зображення використання неортогональної позиційної геометрії у розробленому засобі вимірювання

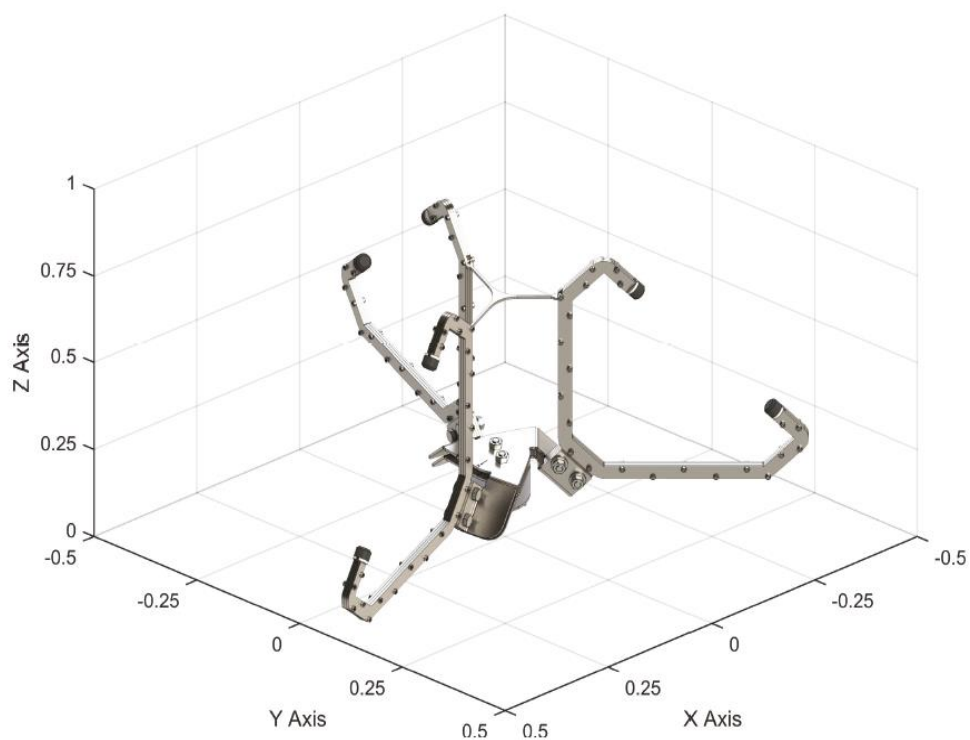


Рисунок 3 – зображення неортогональної позиційної геометрії розробленого засобу вимірювання по відношенню до декартової системи координат

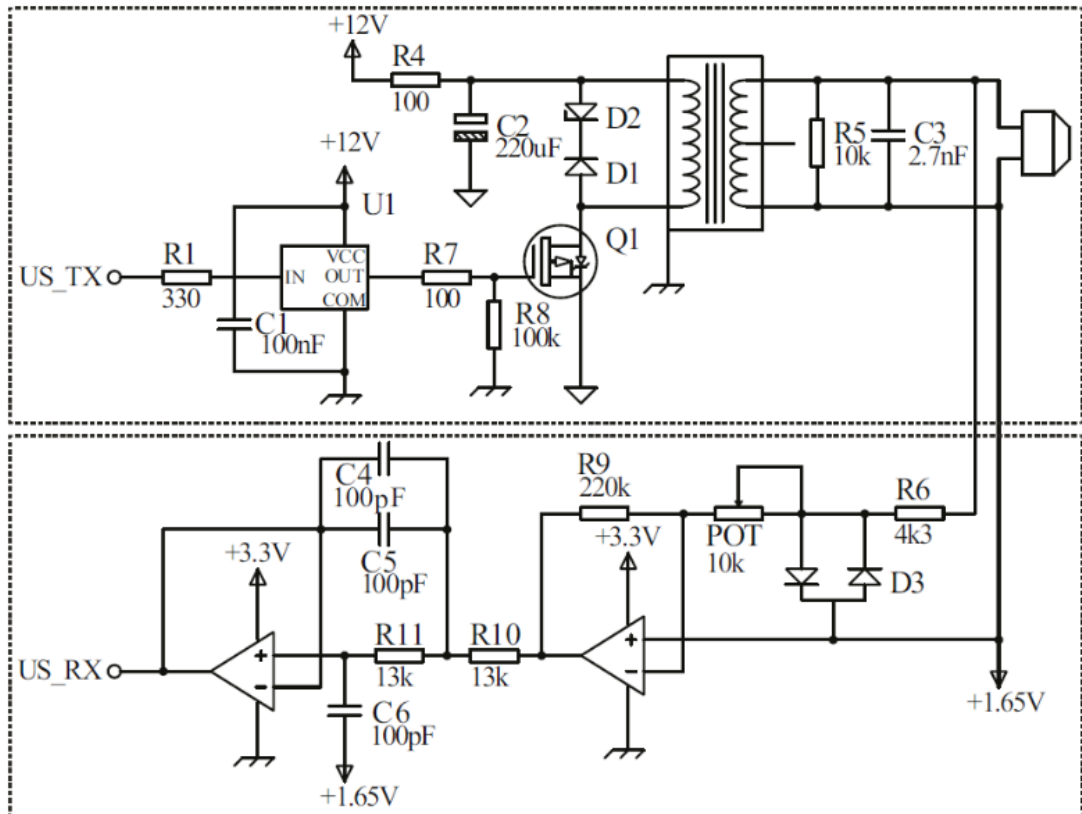


Рисунок 4 – Електрична схема розробленого засобу вимірювання

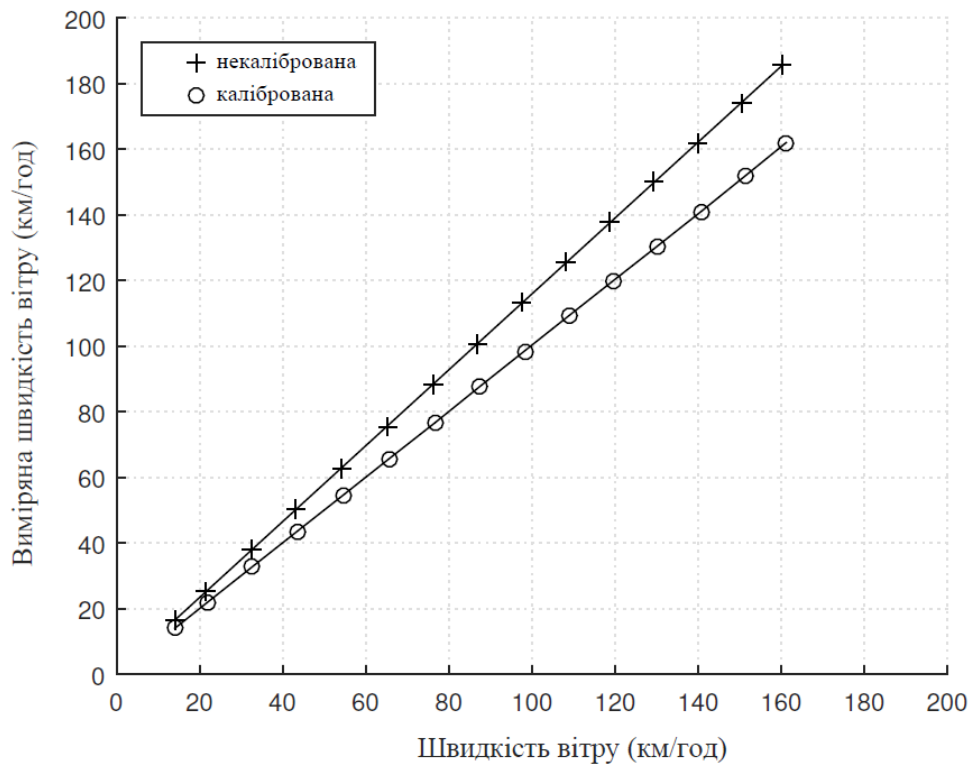


Рисунок 5 – Графік порівняння вимірних значень швидкості вітру з реальними значеннями до і після калібрування

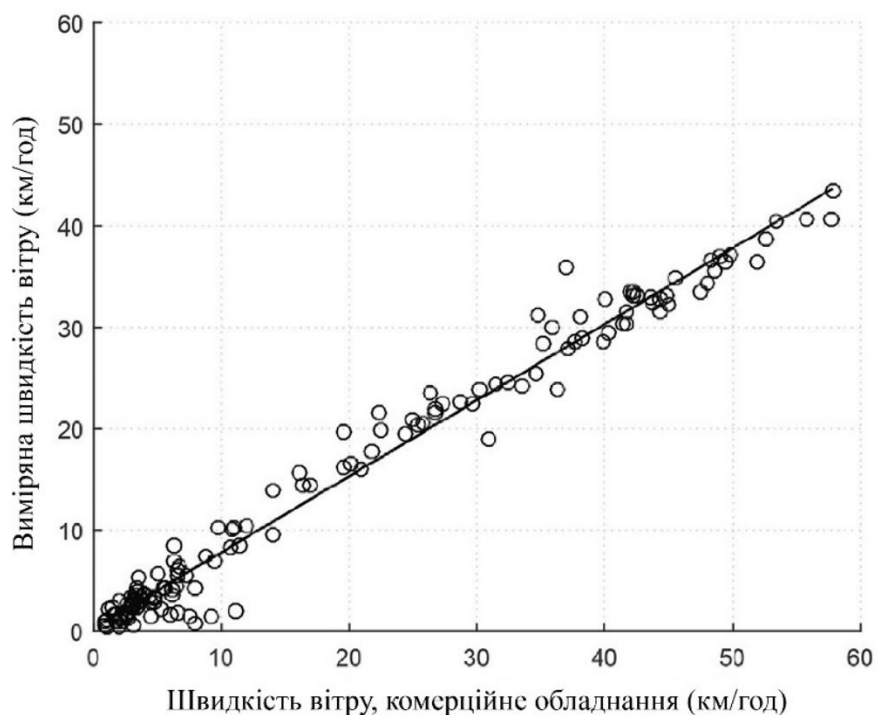


Рисунок 6 – Графік порівняльного тесту між засобом вимірювання з ортогональною топологією та комерційним обладнанням з паралельним вітром для одноосьового вимірювання

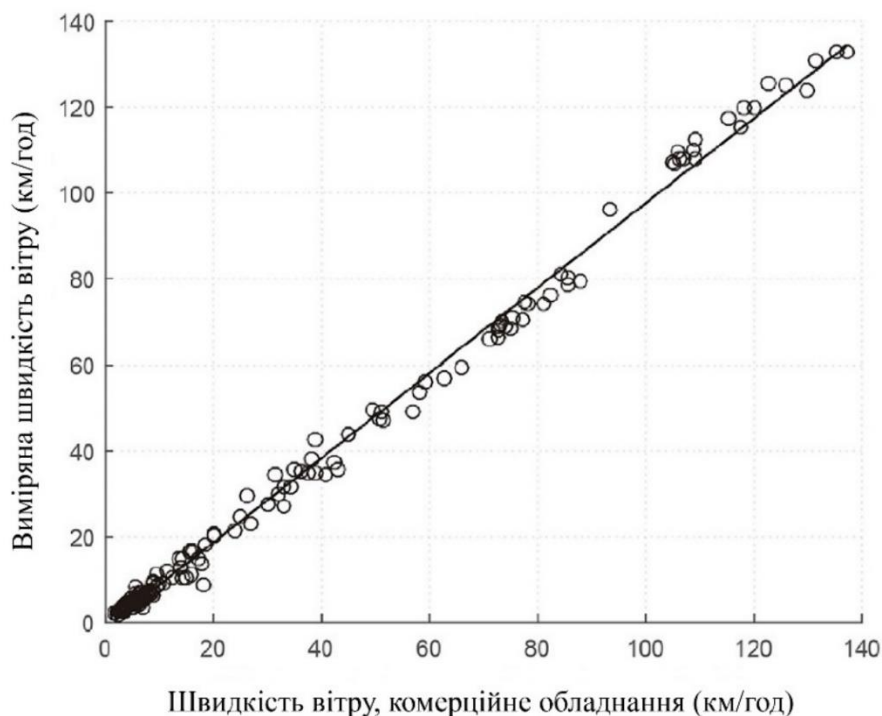


Рисунок 7 – Графік порівняльного тесту із комерційним обладнанням і падаючим вітром паралельно на північ від засобу вимірювання з неортогональною геометрією

Таблиця 1 – Порівняльне випробування в аеротрубі

Швидкість вітру (км/год)	Прототип (км/год)	Абсолютна похибка (км/год)	Відносна похибка (%)	Невизначеність (км/год)
13.90	16.56	2.66	19.11	2.64
21.53	25.41	3.88	18.03	1.77
32.40	37.96	5.56	17.15	1.40
43.30	50.50	7.20	16.63	1.41
54.10	62.89	8.78	16.23	1.57
65.06	75.52	10.46	16.08	1.79
76.07	88.11	12.04	15.83	2.05
86.83	100.77	13.94	16.06	2.3
97.60	113.25	15.65	16.03	2.58
108.23	125.55	17.32	16.01	2.85
118.82	137.72	18.90	15.91	3.13
129.48	149.89	20.42	15.77	3.40
140.04	162.07	22.03	15.73	9.68
150.44	174.30	23.86	15.86	3.95

Таблиця 2 – Порівняння розробленого прототипу з іншими існуючими засобами вимірювання

Обладнання	Невизначеність (м/с)	Допуск (м/с)
Han and Park	±1.22	–
del Valle et. al.	±1.00	0.100
Han et.al.	±0.40	0.100
WindMaster 3D	±0.18	0.010
Розроблений прототип	±0.10	0.014

Додаток Б  
(обов'язковий)

**ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ РОБОТИ**  
**ЗАСІБ КОНТРОЛЮ ШВИДКОСТІ ВІТРОВОГО ПОТОКУ З**  
**ПОКРАЩЕНИМИ МЕТРОЛОГІЧНИМИ ХАРАКТЕР**



ПРОТОКОЛ  
ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ  
НА НАЯВНІСТЬ ТЕКСТОВИХ ЗАПОЗИЧЕНЬ

Назва роботи: «Засіб контролю швидкості вітрового потоку з покращеними метрологічними характеристиками»

Тип роботи: Магістерська кваліфікаційна робота  
(БДР, МКР)

Підрозділ кафедра ІРТС  
(кафедра, факультет)

**Показники звіту подібності Unicheck**

Оригінальність 95,38% Схожість 4,62%

Аналіз звіту подібності (відмітити потрібно):

1. Запозичення, виявлені у роботі, оформлені коректно і не містять ознак плагіату.
2. Виявлені у роботі запозичення не мають ознак плагіату, але їх надмірна кількість викликає сумніви щодо цінності роботи і відсутності самостійності її виконання автором. Роботу направити на розгляд експертної комісії кафедри.
3. Виявлені у роботі запозичення є недобросовісними і мають ознаки плагіату та/або в ній містяться навмисні спотворення тексту, що вказують на спроби приховування недобросовісних запозичень.

Особа, відповідальна за перевірку

  
(підпис)

Звягін О.С.

(прізвище, ініціали)

Ознайомлені з повним звітом подібності, який був згенерований системою Unicheck щодо роботи.

Автор роботи

  
(підпис)

Климчук О.О.

(прізвище, ініціали)

Керівник роботи

  
(підпис)

Дудатьєв І.А.

(прізвище, ініціали)