

Вінницький національний технічний університет
Факультет інтелектуальних інформаційних технологій та автоматизації
Кафедра автоматизації та інтелектуальних інформаційних технологій

Бакалаврська кваліфікаційна робота на тему:

«Автоматизована система вимірювання швидкості повітряного потоку»

Виконав: студент IV курсу, групи АКІТР-23мс
спеціальності 174 – Автоматизація,
комп'ютерно-інтегровані технології та
робототехніка

(шифр і назва спеціальності)

Гелетка С. А.

(прізвище та ініціали)

Керівник: д.т.н., проф. кафедри АІТ

Бісікало О.В.

(прізвище та ініціали)

«16» 06 2025 р.

Рецензент: к.т.н., доц. каф. САІТ

Козачко О. М.

(прізвище та ініціали)

«16» 06 2025 р.

Допущено до захисту
завідувач кафедри АІТ
Олег Бісікало

«17» 06 2025 р.

Вінниця ВНТУ – 2025 рік

Вінницький національний технічний університет
(повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет інтелектуальних інформаційних технологій та автоматизації

Кафедра автоматизації та інтелектуальних інформаційних технологій

Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)

Галузь знань 17 – Електроніка, автоматизація та електронні комунікації

Спеціальність 174 – Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка

Освітньо-професійна програма Інтелектуальні комп'ютерні системи управління

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедри АІТ

д.т.н., проф. Бісікало О.В.

« 17 »

06

2025 року

ЗАВДАННЯ
НА БАКАЛАВРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Гелетка Сергію Анатолійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Автоматизована система вимірювання швидкості повітряного потоку»

керівник роботи Бісікало О.В., д.т.н, проф.

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

затверджені наказом вищого навчального закладу від «20» березня 2025 р. №97

2. Термін подання студентом роботи 10.06.2025 р.

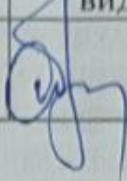
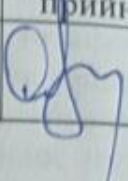
3. Вихідні дані до роботи:

- тип системи – автоматизована система вимірювання;
- метод вимірювання – сенсорний (електромагнітний з використанням датчика Холла);
- об'єкт вимірювання – повітряний потік у навколишньому середовищі або в технічному пристрої (вентиляційні системи, метеостанції, лабораторії).

4. Зміст текстової частини (перелік питань, які потрібно розробити) Вступ. Особливості автоматизованих систем вимірювання повітряного потоку. Математичне забезпечення автоматизованої системи вимірювання швидкості повітряного потоку. Апаратне забезпечення автоматизованої системи вимірювання швидкості повітряного потоку. Програмне забезпечення автоматизованої системи вимірювання швидкості повітряного потоку. Висновки.

5. Перелік ілюстративного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) Лопать. Кришка ротора. Кришка основи. Кришка корпусу. Ротор. Основа системи.

6. Консультанти розділів роботи

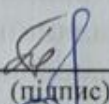
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1-4	Бісікало О.В., д.т.н, проф.		

7. Дата видачі завдання 20.03.2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

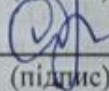
№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Термін виконання		Примітка
		початок	закінчення	
1	Вибір, узгодження та затвердження теми БКР	03.10.2024	09.10.2024	вик.
2	Аналіз літературних джерел. Попередня розробка основних розділів	12.03.2025	29.03.2025	вик.
3	Розробка технічного завдання (ТЗ)	01.04.2025	26.04.2025	вик.
4	Аналіз вирішення поставленої задачі	29.04.2025	10.05.2025	вик.
5	Розробка структурної схеми	13.05.2025	24.05.2025	вик.
6	Електричні розрахунки	27.05.2025	31.05.2025	вик.
7	Оформлення пояснювальної записки (ПЗ) та графічної частини	03.06.2025	07.06.2025	вик.
8	Перевірка ПЗ на відповідність вимогам	10.06.2025	15.06.2025	вик.
9	Попередній захист БКР, доопрацювання, рецензування БКР	15.06.2025	16.06.2025	вик.
10	Захист БКР ЕК	16.06.2025	23.06.2025	вик.

Студент


(підпис)

Гелетка С.А.
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи


(підпис)

Бісікало О.В.
(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Бакалаврська кваліфікаційна робота складається з 67 сторінок формату А4, на яких є 33 рисунки, 3 таблиці, список використаних джерел містить 16 найменувань.

У бакалаврській кваліфікаційній роботі розроблено автоматизовану систему вимірювання швидкості повітряного потоку з використанням чашкового анемометра та мікроконтролера ESP32. Робота включає теоретичний аналіз сучасних метеостанцій, сенсорів та принципів обробки метеоданих, а також класифікацію анемометрів і методів фіксації обертання. Розглянуто фізико-математичну модель вимірювання швидкості потоку, реалізовану у вигляді програмного забезпечення з урахуванням калібрування та геометричних параметрів системи. Проєкт передбачає апаратну реалізацію із використанням сенсорів температури, вологості, атмосферного тиску, а також магнітного поля для оцінки напрямку вітру. Створено 3D-модель корпусу анемометра в середовищі SolidWorks та проведено його функціональне калібрування. Запропонована система є ефективним рішенням для моніторингу метеорологічних параметрів у режимі реального часу з можливістю інтеграції у смарт-середовища.

Ключові слова: автоматизована система, анемометр, швидкість повітряного потоку, датчик Холла, ESP32, математичне моделювання, програмне забезпечення, моніторинг, цифрова обробка сигналів.

ANNOTATION

The bachelor's qualification work consists of 67 pages of A4 format, which include 33 figures, 3 tables, and the list of sources used contains 16 items.

This bachelor's qualification thesis presents the development of an automated air flow velocity measurement system using a cup anemometer and an ESP32 microcontroller. The work includes a theoretical analysis of modern weather stations, sensors, and meteorological data processing principles, as well as a classification of anemometers and rotation detection methods. A physico-mathematical model for flow speed measurement is proposed and implemented in software, taking into account system calibration and geometric parameters. The project features a hardware implementation with sensors for temperature, humidity, atmospheric pressure, and magnetic field to determine wind direction. A 3D model of the anemometer housing was created in SolidWorks, followed by functional calibration. The proposed system offers an effective solution for real-time meteorological monitoring with potential integration into smart environments.

Keywords: automated system, anemometer, air flow velocity, Hall sensor, ESP32, mathematical modeling, software, monitoring, digital signal processing.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
1 ОСОБЛИВОСТІ АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ ВИМІРЮВАННЯ ПОВІТРЯНОГО ПОТОКУ.....	6
1.1. Особливості об'єкта дослідження.....	6
1.2. Анемометри як основа автоматизованих систем вимірювання повітряного потік.....	11
1.3. Методи зчитування показників для анемометра.....	16
1.4. Висновок до розділу 1.....	21
2 МАТЕМАТИЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ ВИМІРЮВАННЯ ШВИДКОСТІ ПОВІТРЯНОГО ПОТОКУ.....	22
2.1. Фізико-математичні основи вимірювання швидкості повітряного потоку.....	22
2.2. Аналіз математичної моделі та її моделювання.....	24
2.3. Висновок до розділу 2.....	27
3 АПАРАТНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ ВИМІРЮВАННЯ ШВИДКОСТІ ПОВІТРЯНОГО ПОТОКУ.....	29
3.1. Апаратна частина на базі мікроконтролера ESP32.....	29
3.2. Додаткові сенсори вологості, температури та атмосферного тиску.....	32
3.3. Проектування анемометра як основного сенсора системи.....	35
3.4. Висновок до розділу 3.....	44
4 ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ ВИМІРЮВАННЯ ШВИДКОСТІ ПОВІТРЯНОГО ПОТОКУ.....	46
4.1. Загальний опис програмного забезпечення.....	46
4.2. Алгоритм роботи програмного забезпечення.....	49
4.3. Висновок до розділу 4.....	54
ВИСНОВКИ.....	54
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	55
ДОДАТКИ.....	57

Додаток А (Обов'язковий) Автоматизована система вимірювання швидкості повітряного потоку. Технічне завдання.....	60
Додаток Б (Обов'язковий) Автоматизована система вимірювання швидкості повітряного потоку. Ілюстративна частина.....	61
Додаток В (Обов'язковий) Автоматизована система вимірювання швидкості повітряного потоку. Лістинг програми.....	65
Додаток Г (Обов'язковий) Автоматизована система вимірювання швидкості повітряного потоку. Протокол перевірки кваліфікаційної роботи на наявність текстових запозичень.....	67

ВСТУП

Актуальність теми. Забезпечення точного та безперервного моніторингу параметрів повітряного середовища є актуальною задачею в умовах зростаючих потреб у кліматичному контролі, метеорології, агропромисловому комплексі, а також в системах «розумного» середовища. Одним із ключових параметрів мікроклімату є швидкість повітряного потоку, яка має прямий вплив на енергоефективність вентиляційних систем, точність метеопрогнозів та безпеку експлуатації технічних об'єктів.

У зв'язку з розвитком мікроелектроніки та інтернету речей (IoT), зростає потреба у створенні компактних, енергоефективних і високоточних автоматизованих систем вимірювання, здатних працювати в реальному часі та адаптуватися до змін середовища. Впровадження таких рішень дає змогу мінімізувати участь людини, підвищити точність спостережень і розширити сфери використання метеоданих.

Мета дослідження. Метою роботи є підвищення ефективності процесу вимірювання швидкості повітряного потоку на базі мікроконтролера ESP32 з використанням чашкового анемометра та сенсорних технологій.

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

- проведено аналіз сучасних методів та пристроїв вимірювання швидкості повітряного потоку;
- класифіковано анемометри за принципом дії та сферою застосування;
- обґрунтовано вибір сенсорного модуля та методу зчитування даних;
- розроблено фізико-математичну модель перетворення імпульсів у швидкість потоку;
- реалізовано апаратну частину системи на основі ESP32 та сенсора Холла;
- створено 3D-модель корпусу анемометра в SolidWorks;

- розроблено програмне забезпечення для збору, обробки та візуалізації даних;

- виконано експериментальні дослідження та калібрування системи.

Об'єктом дослідження в роботі є процес автоматизованого вимірювання швидкості повітряного потоку.

Предметом дослідження є конструкція анемометра, сенсорні технології та алгоритми цифрової обробки сигналів.

Практичне значення одержаних результатів. Результатом дослідження є створення функціональної автоматизованої системи, здатної здійснювати точний моніторинг швидкості повітряного потоку в режимі реального часу. Система може бути використана в метеостанціях, вентиляційних установках, аграрних комплексах і дослідницьких лабораторіях. Завдяки використанню відкритої апаратної платформи ESP32 і модульної структури, вона легко масштабована та адаптована до специфічних умов експлуатації.

Результати виконаної роботи доповідались та обговорювались на LIV Всеукраїнській науково-технічній конференції підрозділів Вінницького національного університету НТКП ВНТУ (2025) [16]

1 ОСОБЛИВОСТІ АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ ВИМІРЮВАННЯ ПОВІТРЯНОГО ПОТОКУ

1.1 Особливості об'єкта дослідження

Автоматизовані системи вимірювання швидкості повітряного потоку представляють собою технічні комплекси, призначені для безперервного збору, обробки та відображення метеорологічних параметрів, зокрема швидкості вітру. Їх головною перевагою є можливість оперативного моніторингу повітряних умов у режимі реального часу без участі людини.

Такі системи зазвичай базуються на мікроконтролерах (наприклад, ESP32), які забезпечують взаємодію з сенсорами (анемометрами), обробку сигналів та передавання даних. Крім швидкості, вони можуть фіксувати додаткові параметри, як-от температура, вологість, атмосферний тиск, що дозволяє отримувати більш повну картину стану атмосфери.

Сучасні системи оснащуються різними типами анемометрів — від чашкових до ультразвукових, а також сенсорами Холла, тахометрами або енкодерами для визначення частоти обертання ротора. Інтеграція з інтернетом речей (ІоТ) дозволяє передавати показники на сервер або мобільний пристрій користувача.

Ключовими характеристиками є: висока точність вимірювання; енергоефективність; автономність роботи; гнучкість у налаштуванні; можливість зберігання та аналізу історичних даних.

Варто відзначити, що такі системи активно застосовуються не лише в метеорології, а й у вентиляційних установках, промислових системах, дослідницьких проєктах, сільському господарстві та будівництві.

Метеорологічні станції відіграють ключову роль у системі спостережень за атмосферними явищами. Їх головне завдання — фіксувати, зберігати і передавати дані про фізичний стан атмосфери для використання

в прогнозуванні погоди, наукових дослідженнях, транспорті, аграрному секторі та екологічному моніторингу.

Метеостанції поділяються за функціональністю на автоматизовані й ручні, а за масштабом — на побутові, напівпрофесійні та професійні. Найбільш поширеним є автоматизований тип, здатний самостійно збирати, обробляти і передавати дані.

Серед базових елементів метеостанції — наступні прилади:

- термометричні датчики, які вимірюють температуру повітря, ґрунту та води;
- гігрометри або сенсори вологості, що фіксують відносну вологість;
- барометри, що дозволяють оцінити атмосферний тиск і передбачити погодні зміни;
- анеометри, які визначають швидкість повітряного потоку;
- флюгери, що вказують напрям вітру;
- дощоміри та сенсори опадів для кількісної оцінки вологи.

Метеостанції можуть додатково оснащуватися вольтметрами (для електричної активності атмосфери), сенсорами ультрафіолету, сонячного випромінювання, датчиками температури дорожнього покриття, і навіть GPRS-модулями для дистанційної передачі даних.

Класифікація метеостанцій представлена на рис 1.1.



Рисунок 1.1 – Класифікація метеостанцій

Більш детально розглянемо класифікацію представлену на рис. 1.1

1. За сферою використання:

Побутові (рис. 1.2) – прості прилади з базовим набором функцій: вимір температури, вологості, іноді атмосферного тиску. Оснащуються дисплеями, годинниками, календарями.



Рисунок 1.2 – Домашня метеостанція Garni 835

Напівпрофесійні – підтримують підключення додаткових модулів, мають розширені можливості налаштування та передачі даних.

Професійні (рис. 1.3) – застосовуються в промисловості, авіації, метеослужбах. Відрізняються високою точністю, модульною конструкцією і здатністю працювати в екстремальних умовах.



Рисунок 1.3 – Професійна метеостанція

2. За принципом дії:

Механічні (аналогові рис. 1.4) – не потребують електроживлення, проте мають меншу точність та складні у зчитуванні.



Рисунок 1.4 – Аналоговий механізм метеостанції

Цифрові, електронні (рис. 1.5) – забезпечують високу точність, зручне представлення даних та можливість автоматичного аналізу.



Рисунок 1.5 – Цифровий механізм метеостанції

3. За спеціалізацією:

Дорожні (рис 1.6) — аналізують стан дорожнього покриття і атмосферу на трасах.



Рисунок 1.6 – Дорожня метеостанція в м. Київ

Лісові — допомагають виявляти потенційні джерела займання.

Гідрометеорологічні — працюють у зоні водойм і морів, визначаючи погодні та гідрологічні характеристики.

1.2 Анемометри як основа автоматизованих систем вимірювання повітряного потоку

Анемометр — незамінний інструмент для визначення швидкості та інтенсивності руху повітря. Він активно використовується в метеорології, авіації, енергетиці, вентиляційних системах, а також у наукових дослідженнях.

Основні типи анемометрів:

Чашковий (ротаційний) — традиційна модель з обертовими чашками. Чим більша швидкість вітру — тим швидше обертається ротор.

Крильчастий — схожий на міні-вітряк. Часто використовується у побутових вимірюваннях.



Рисунок 1.7 – Крильчастий анемометр

Гарячодротяний (рис 1.8) — фіксує зміну температури дроту під впливом повітряного потоку.



Рисунок 1.8 – Анемометр гарячого дроту

Ультразвуковий — визначає швидкість за допомогою затримки звукового сигналу між сенсорами.

З трубкою Піто (рис 1.9) — вимірює різницю тисків для визначення швидкості потоку.



Рисунок 1.9 – Анемометр з трубкою Піто

Додатково існують багатофункціональні анемометри, які поєднують кілька типів вимірювальних модулів і дозволяють адаптацію під конкретні потреби користувача.

Щоб правильно визначити швидкість повітряного потоку, необхідно точно виміряти частоту обертання обертових елементів анемометра. Серед основних методів:

- Тахометричний — безпосереднє вимірювання обертів за одиницю часу. Перевага — висока точність.
- Електромагнітний — наприклад, з використанням датчика Холла, який реагує на зміну магнітного поля.
- Оптичний — використовує світлові імпульси або відбивачі.
- Лазерний — високоточний метод для лабораторних досліджень.
- Енкодерний — обробка сигналів за допомогою імпульсних сенсорів.

У сучасному світі, де швидкість реакції на зміну природних умов може мати вирішальне значення, анемометри стали ключовими інструментами у системах безпеки, авіаційних диспетчерських службах, будівництві, агрономії та екології.

Їх застосування дозволяє: забезпечити безпеку в умовах сильного вітру; оптимізувати енергоспоживання у системах вентиляції; проводити метеорологічні дослідження; визначати оптимальні умови для сільськогосподарських робіт.

Серед усіх пристроїв для вимірювання метеорологічних параметрів ключову роль у визначенні швидкості повітряного потоку відіграють анемометри. Саме вони виступають головним конструктивним і функціональним елементом автоматизованих систем вимірювання швидкості вітру, забезпечуючи надійність, точність та стабільність у фіксації руху повітря.

Анемометр — це прилад, який фіксує швидкість повітряного потоку на основі фізичних або електронних принципів. У традиційних моделях, таких як чашкові або крильчасті анемометри, швидкість вітру визначається

за частотою обертання ротора, викликаного тиском повітря. У цифрових та ультразвукових моделях для цього використовуються сенсори, які обчислюють параметри руху повітря без механічного контакту.

В автоматизованих системах найчастіше застосовуються анемометри з електронним зчитуванням, наприклад, з використанням датчиків Холла або тахометрів, які реагують на магнітні імпульси під час обертання ротора.

До основних типів анемометрів, що використовуються в автоматизованих системах, належать:

Чашкові анемометри (рис. 1.10) — мають обертovu систему з трьома або чотирма чашками, чутливими до напрямку повітряного потоку. Простота конструкції і висока надійність робить їх популярними у метеостанціях.



Рисунок 1.10 – Чашковий анемометр

Крильчасті (лопатеві) — принцип схожий на вітряк. Підходять для більш контрольованих умов.

Гарячодротяні — застосовуються в лабораторіях, HVAC-системах; визначають швидкість через зміну охолодження дроту.

Ультразвукові (рис. 1.11) — використовують час проходження звукового сигналу між сенсорами, мають найвищу точність і не містять рухомих частин.



Рисунок 1.11 Ультразвуковий анемометр

Багатофункціональні цифрові моделі — підтримують зчитування одразу кількох параметрів і з'єднання з мікроконтролерами або смартфонами.

Автоматизовані системи вимірювання швидкості вітру, побудовані на базі анемометрів, мають такі характерні ознаки:

- Безперервна передача даних — дані зчитуються в реальному часі та передаються на дисплей або у віддалену систему моніторингу.
- Висока чутливість — сучасні анемометри здатні реагувати навіть на незначні коливання вітру.
- Сумісність із мікроконтролерами — зокрема ESP32, Arduino тощо.
- Збереження та обробка показників — можливість ведення історії вимірювань і автоматичного аналізу.

Застосування анемометрів у складі автоматизованих систем дає змогу: підвищити точність прогнозування кліматичних умов; автома-

тизувати контроль у промислових, будівельних та аграрних умовах; зменшити залежність від людського фактора; інтегрувати метеодані в системи “розумного” середовища (Smart City, Smart Farm).

У межах даного дослідження анемометр розглядається не лише як окремий прилад, а як центральний вузол автоматизованої вимірювальної системи. Це дозволяє глибше аналізувати його конструктивні особливості, алгоритми зчитування сигналу, методи калібрування, та особливості реалізації у реальних умовах. Вибір конкретного типу анемометра впливає на кінцеву ефективність системи та її пристосованість до специфіки середовища, в якому вона працює.

1.3 Методи зчитування показників для анемометру

В автоматизованих системах контролю швидкості повітряного потоку критично важливим є точне визначення частоти обертання ротора анемометра. Від цього параметра залежить достовірність розрахунків швидкості вітру. Існує кілька технологічних підходів до вимірювання цього параметра, кожен з яких має свої переваги та особливості використання.

Основні методи зчитування швидкості обертання:

- Тахометричний метод;
- Енкодерний підхід;
- Використання гіроскопічних сенсорів;
- Аналіз електричних або магнітних сигналів.

Тахометр — це вимірювальний пристрій, який дозволяє реєструвати кількість обертів об'єкта за певний проміжок часу (часто — в обертах за хвилину, RPM). Такі прилади широко застосовуються у машинобудуванні, вентиляційних установках, електродвигунах та системах вимірювання метеоумов.

Більш детально розглянемо тахометри з точки зору технічного принципу дії.

Механічні тахометри (рис 1.12). Функціонують за рахунок передачі обертального моменту через трос чи шестерні. Обертання приводить в дію стрілку на шкалі приладу. Переваги — простота й автономність. Недоліки — механічне зношення і нижча точність.



Рисунок 1.12 – Механічний тахометр

Електромагнітні тахометри (рис. 1.13). Використовують зміну електромагнітного поля, зумовлену рухом елемента, що обертається. Такі тахометри надійні, точні, менш чутливі до зношення.



Рисунок 1.13 – Електромагнітні тахометри

Оптичні тахометри (рис. 1.14). Працюють на базі фотоелементів, які реєструють відбиття світла від мітки на обертовій частині. Дуже точні, але вимагають чистоти та правильного розміщення.



Рисунок 1.14 Оптичний Лазерний тахометр

Лазерні тахометри. Вдосконалена форма оптичних приладів, що використовує принцип ефекту Доплера. Лазер фіксує зміну частоти відбитого світла для обчислення швидкості обертання.

Тахометри мають перевагу в універсальності — їх можна інтегрувати в промислові системи, лабораторії, транспортні платформи, та навіть у малі автоматизовані метеостанції.

Енкодер (рис 1.15) — це перетворювач, що трансформує механічний рух у цифровий сигнал [1]. Цей тип сенсорів зазвичай використовується в системах автоматизації, робототехніці та контролі позиціонування.

Виділяють два основні типи енкодерів:

- Абсолютні — фіксують точне кутове положення валу незалежно від часу запуску. Підходять для застосувань, де важливе збереження координат після знеструмлення.

- Інкрементальні — обчислюють зміну положення за рахунок підрахунку імпульсів. Часто використовуються в системах з обмеженим простором або потребою у високій частоті зчитування.

У метеостанціях енкодери [2-6, 12-15] зазвичай застосовуються для розрахунку швидкості обертання чашкового анемометра, особливо коли необхідна висока роздільна здатність і точність.



Рисунок 1.15 – Енкодер інкрементальний

Гіроскопи використовуються переважно в авіаційній техніці, дронах або в складних метеорологічних приладах. Вони дозволяють фіксувати кутову швидкість обертання без необхідності механічного контакту з ротором. Переваги — відсутність рухомих елементів, компактність, можливість роботи у тривимірному просторі. Недолік — відносно висока вартість та потреба у складній калібровці.

Цей підхід передбачає обробку аналогових або цифрових сигналів, що генеруються під час обертання ротора анемометра. Наприклад, датчик Холла генерує імпульси щоразу, коли повз нього проходить магніт. За частотою цих імпульсів можна обчислити швидкість обертання, а отже — і швидкість вітру. Такий метод простий у реалізації, економний і ефективний для невеликих автоматизованих пристроїв.

Порівняння методів трансформації механічного руху у цифровий сигнал представимо у таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Порівняння методів трансформації механічного руху у цифровий сигнал

Метод	Переваги	Недоліки
Тахометр	Надійність, простота, широкий діапазон	Залежність від механіки
Енкодер	Висока точність, цифровий вихід	Чутливість до шумів
Гіроскоп	Безконтактність, точність у 3D	Висока ціна, потреба у калібруванні
Аналіз сигналу	Простота, низька вартість	Залежність від магнітних факторів

Таким чином, вибір методу зчитування обертання у системі вимірювання повітряного потоку має базуватися на вимогах до точності, умовах експлуатації, розмірах системи та вартості компонентів. У межах даної кваліфікаційної роботи для зчитування обертів використовується електромагнітний датчик Холла А3144, як надійний, компактний та недорогий інструмент для реєстрації швидкості повітряного потоку.

1.4 Висновок до розділу 1

У першому розділі було здійснено комплексний аналіз теоретичних засад функціонування метеостанцій та пристроїв для вимірювання повітряного потоку, з акцентом на роль анемометрів у складі автоматизованих систем.

Визначено, що метеостанції є ключовими елементами моніторингу атмосферних умов у багатьох галузях — від побутового використання до спеціалізованих сфер, таких як авіація, агрономія та екологія. Було наведено класифікацію метеостанцій за призначенням, принципом дії та конструктивними особливостями.

Окрему увагу приділено анемометрам, які виступають основним сенсорним модулем у вимірюванні швидкості вітру. Розглянуто різновиди анемометрів (чашкові, крильчасті, гарячодротяні, ультразвукові тощо), їхні конструктивні та функціональні характеристики, а також особливості інтеграції у сучасні автоматизовані системи.

Проаналізовано методи зчитування швидкості обертання ротора анемометра, включаючи тахометричні, енкодерні, гіроскопічні та імпульсні підходи. Зроблено порівняльний аналіз методів, що дозволило обґрунтувати вибір датчика Холла як оптимального рішення для розробки надійної, енергоефективної і компактної автоматизованої системи.

Таким чином, розділ закладає теоретичну основу для подальшої розробки та реалізації Автоматизованої системи вимірювання швидкості повітряного потоку, визначаючи технічні параметри, вимоги до точності, структуру системи та принципи її роботи.

2 МАТЕМАТИЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ ВИМІРЮВАННЯ ШВИДКОСТІ ПОВІТРЯНОГО ПОТОКУ

2.1 Фізико-математичні основи вимірювання швидкості повітряного потоку

Вимірювання швидкості повітряного потоку є однією з ключових задач у метеорології, аеродинаміці, вентиляції та екологічному моніторингу. Для цього використовуються спеціальні пристрої, які перетворюють фізичний рух повітря на вимірювальну інформацію. Такий пристрій, інтегрований з сенсорними компонентами та мікроконтролером, формує Автоматизовану систему вимірювання швидкості повітряного потоку.

Суть роботи системи полягає у перетворенні аеродинамічного впливу потоку повітря на обертання рухомого елемента, що фіксується датчиком. У більшості реалізацій таким датчиком є сенсор Холла, який генерує імпульс при кожному проходженні магніта. Таким чином, отримується інформаційний параметр у вигляді кількості імпульсів за секунду, що використовується для розрахунку швидкості потоку.

Параметри математичної моделі що описують швидкості повітряного потоку занесемо в таблицю 2.1

Таблиця 2.1 – Параметри швидкості повітряного потоку

Позначення	Опис
V	Швидкість повітряного потоку, м/с
ω	Кутова швидкість обертового елемента, рад/с
r	Радіус до центра лопаті (або чашки), м
T	Період одного оберту, с
f	Частота обертання, об/с
n	Кількість імпульсів за секунду
N	Кількість імпульсів на один оберт
k	Калібрувальний коефіцієнт

Автоматизована система вимірювання швидкості повітряного потоку використовує обертання ротора або лопаті для зчитування швидкості вітру [6-8]. Лінійна швидкість обертової частини системи:

$$v = \omega \cdot r, \quad (2.1)$$

де $\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$.

Звідси:

$$v = 2\pi r f. \quad (2.2)$$

Швидкість обертання визначається через частоту імпульсів:

$$f = \frac{n}{N}. \quad (2.3)$$

Підставляючи у попереднє рівняння:

$$v = 2\pi r \cdot \frac{n}{N}. \quad (2.4)$$

Оскільки ця швидкість може відрізнятися від реальної швидкості вітру через конструктивні особливості, вводиться калібрувальний коефіцієнт k , що враховує ці відхилення:

$$V = k \cdot v = k \cdot 2\pi r \cdot \frac{n}{N}. \quad (2.5)$$

Отже, швидкість повітряного потоку, яку визначає Автоматизована система вимірювання швидкості повітряного потоку, обчислюється за формулою:

$$V = \frac{2\pi rk}{N \cdot n}. \quad (2.6)$$

Залежність швидкості повітряного потоку V від частоти імпульсів n представимо на рис 2.1.

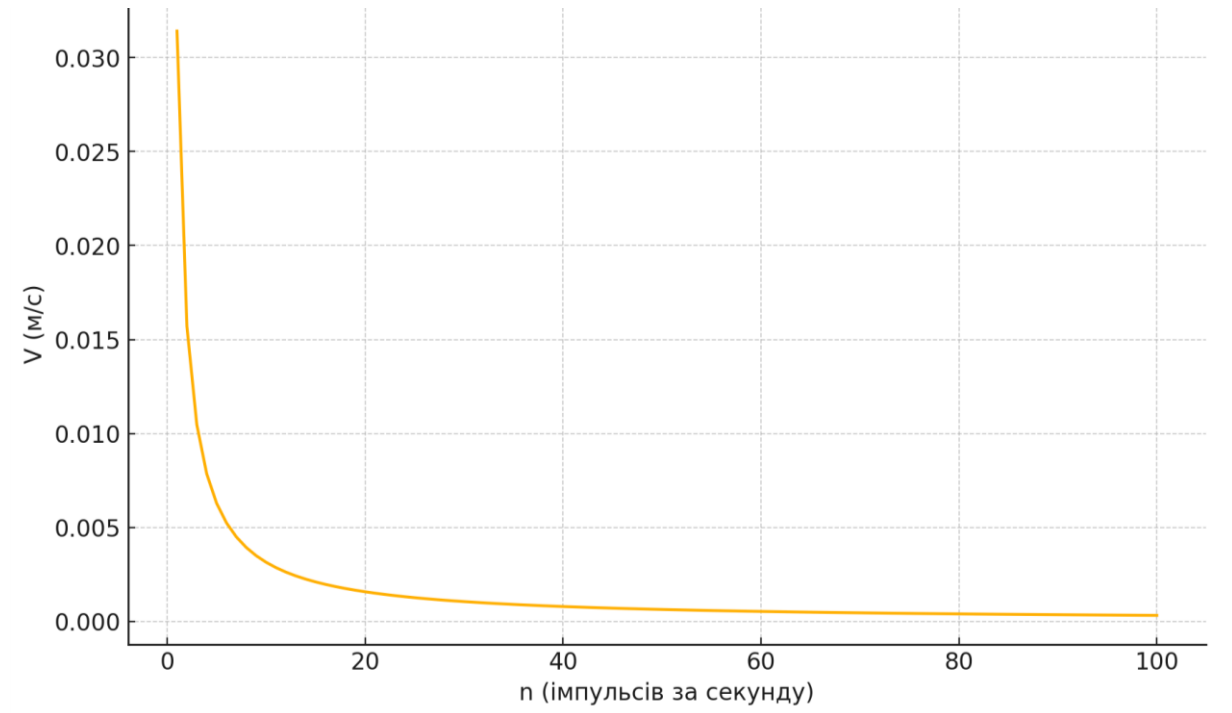


Рисунок 2.1 – Залежність швидкості повітряного потоку V від частоти імпульсів n

2.2 Аналіз математичної моделі та її моделювання

Припустимо, напруга має бути прямо пропорційною швидкості:

$$V_{\text{вим}} = V \cdot K. \quad (2.7)$$

Підставимо V з попереднього з формули :

$$V_{\text{вим}} = \left(\frac{2\pi rk}{N \cdot n} \right) \cdot K. \quad (2.8)$$

Графічне моделювання залежності кількості імпульсів n від напруги $V_{\text{вим}}$ представимо на рис 2.2

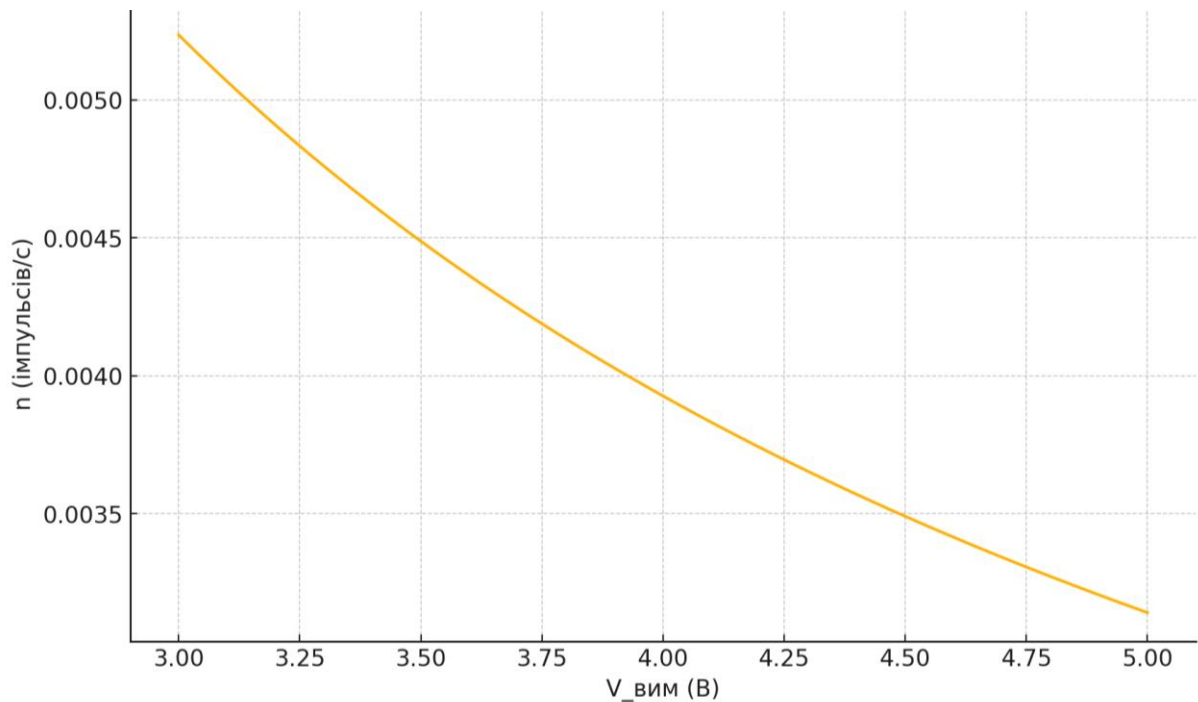


Рисунок 2.2 – Графік залежності кількості імпульсів n від напруги $V_{\text{вим}}$

З графіка 2.2 видно що напруга $V_{\text{вим}}$ обернено пропорційна частоті імпульсів n . Чим більше імпульсів на секунду — тим менше напруга, що подається на АЦП. Це можна реалізувати через мікроконтролер або перетворювач частоти у напругу (наприклад, інтегруючий ОП або програмно). Також можна зробити проміжні висновки що r — впливає на довжину дуги, що описується чашкою або лопаттю системи, N — зростання кількості імпульсів на оберт зменшує коефіцієнт пропорційності, k — враховує опір, форму лопатей та інші інженерні аспекти.

Ця модель лінійна, що спрощує програмну реалізацію розрахунків і дозволяє працювати в режимі реального часу. Цифровий код АЦП зменшується зі збільшенням імпульсів n . Він прямо пропорційний усім системним параметрам і розрядності АЦП. Моделювання проводились з використанням мікроконтролера ESP32 що має 12 разрядів:

$$\text{Код}_{\text{АЦП}} = \left(\frac{2\pi r k K}{N \cdot n \cdot V_{\text{реф}}} \right) \cdot 2^n. \quad (2.9)$$

Залежності цифрового коду АЦП від швидкості повітряного потоку V представимо на рис. 2.3.

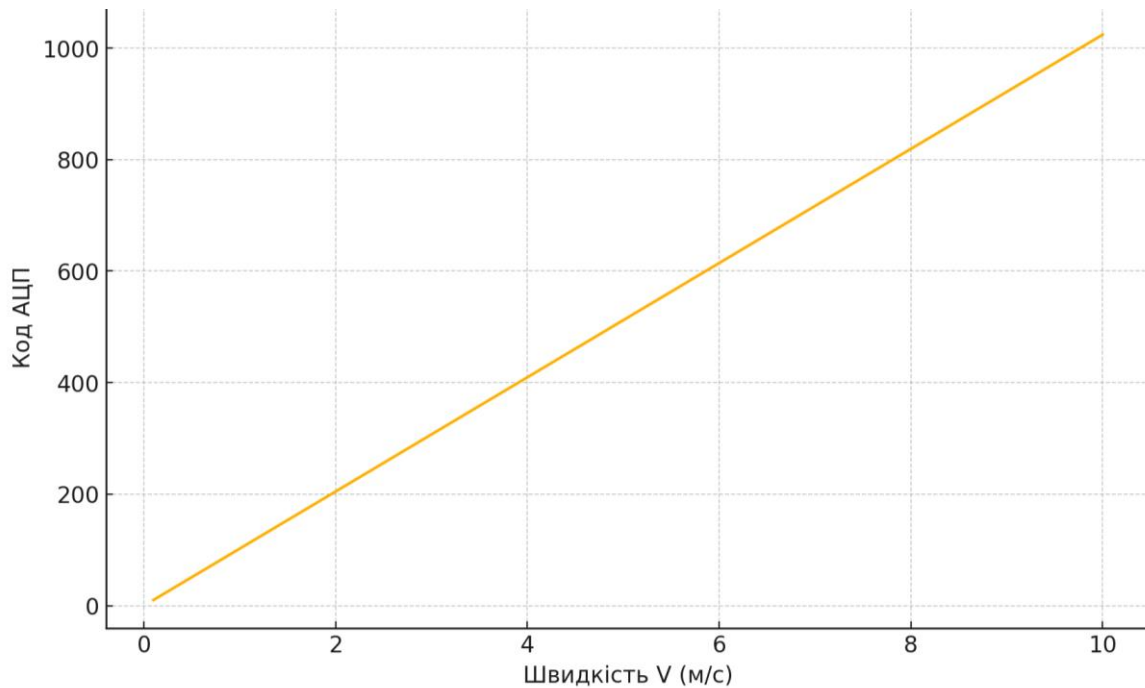


Рисунок 2.3 – Графік залежності цифрового коду АЦП від швидкості повітряного потоку V

Автоматизована система вимірювання швидкості повітряного потоку потребує надійного математичного забезпечення для точного розрахунку швидкості. Запропонована модель дозволяє:

- Оперативно визначати швидкість потоку на основі імпульсних даних;
- Масштабувати систему на різні конструктивні варіанти;
- Забезпечити точність за допомогою калібрування.

Отримана формула (2.6) є універсальною основою для розрахунків у автоматизованих системах різного класу — від побутових до промислових.

2.3 Висновок до розділу 2

У цьому розділі було сформовано математичне підґрунтя функціонування Автоматизованої системи вимірювання швидкості повітряного потоку. Розглянута модель базується на перетворенні механічного обертання, викликаного потоком повітря, у цифрову форму через підрахунок імпульсів, згенерованих датчиком Холла.

Ключовим елементом стало виведення формули яка враховує геометричні та конструктивні параметри системи (радіус r , кількість імпульсів на оберт N), а також калібрувальний коефіцієнт k , що дозволяє адаптувати розрахунок до реальних умов експлуатації. Такий підхід гарантує достатню точність і стабільність вимірювань навіть при варіаціях зовнішніх чинників.

Описана модель є лінійною, що спрощує реалізацію алгоритмів у програмному середовищі мікроконтролера. Завдяки використанню імпульсного підрахунку та можливості програмного калібрування, Автоматизована система вимірювання швидкості повітряного потоку легко масштабована і адаптована до будь-якого типу обертового анемометра.

Таким чином, математичне забезпечення є фундаментом точності та ефективності системи і дозволяє реалізувати вимірювання в реальному часі з високим рівнем достовірності.

3 АПАРАТНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ ВИМІРЮВАННЯ ШВИДКОСТІ ПОВІТРЯНОГО ПОТОКУ

3.1 Апаратна частина на базі мікроконтролер ESP32

При розробці системи вимірювання повітряного потоку одним з найважливіших аспектів є вибір відповідного мікроконтролера та модулів, які забезпечать надійне та ефективне збирання даних.

За основу був взятий один із найпопулярніших мікроконтролерів, який широко використовується для розробки метеостанцій - ESP32. Він є потужним мікроконтролером з вбудованим модулем Wi-Fi та Bluetooth, що забезпечує зручну комунікацію з Інтернетом та іншими пристроями. Його великий обсяг пам'яті дозволяє зберігати та обробляти значну кількість даних про погоду, що є важливим для забезпечення точності та надійності прогнозування. Крім того, ESP32 має багато портів введення-виведення (GPIO), що дозволяє підключати різноманітні датчики погоди та інші модулі для створення комплексної метеостанції. Приклад мікроконтролера ESP32 зображено на рисунку 3.1.

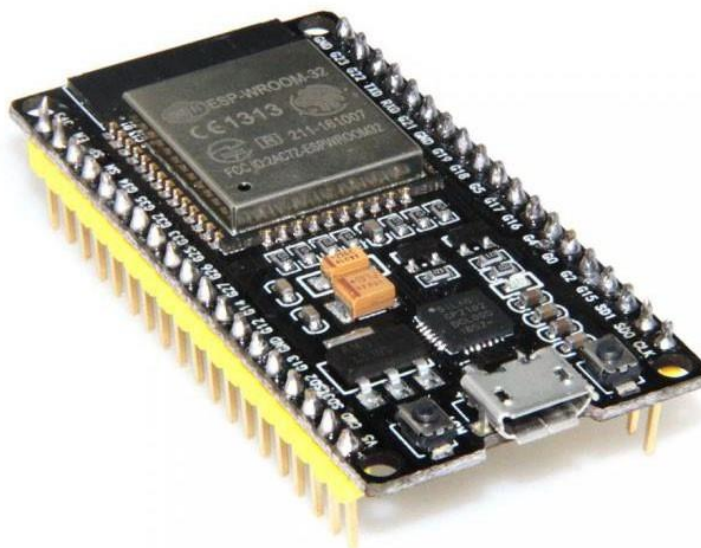


Рисунок 3.1 – Модуль LuaNode с мікроконтролером ESP32

Мікроконтролер ESP32 — це потужний пристрій з вбудованим двоядерним 32-бітним процесором Xtensa, який працює на частоті до 240 МГц і виконує до 600 мільйонів інструкцій за секунду. Він має 520 КБ оперативної пам'яті та підтримує бездротовий зв'язок через Wi-Fi (802.11 b/g/n) та Bluetooth 4.2, включаючи BLE.

Серед основних апаратних можливостей — 12-бітний АЦП до 18 каналів, два 8-бітні цифро-аналогові перетворювачі, 10 ємнісних сенсорів, а також інтерфейси UART, I2C, SPI, I2S, CAN, SD і Ethernet. Пристрій дозволяє керувати світлодіодами і моторами через ШІМ-виходи, має вбудований температурний датчик і інфрачервоний порт.

ESP32 підтримує глибокий сон із дуже низьким споживанням енергії — всього 5 мкА, а також має вбудовані засоби безпеки: шифрування пам'яті, безпечне завантаження, криптографію AES, RSA, SHA та інше. Програмувати його можна на Arduino IDE, MicroPython, JavaScript, C/C++ через офіційний SDK (ESP-IDF) та інші середовища, включаючи Zerynth і Lua.

Дисплей. Для відображення інформації про погодні умови потрібен пристрій для виведення інформації, за основу такого пристрою був взятий модуль LCD 1602, також відомий як символьний LCD дисплей 16x2 (рис 3.2), є одним з найпоширеніших та використовуваних дисплеїв для відображення текстової інформації. Він складається з 16 символьних рядків по 2 символи в кожному рядку, загалом 32 символи. Такий тип дисплею має свої особливості та переваги.



Рисунок 3.2 – Модуль LCD 1602 16x2

Модуль LCD 1602 — це один із найпоширеніших текстових дисплеїв, який використовується в електроніці для виведення інформації у зручному для користувача вигляді. Назва «1602» означає, що дисплей здатен виводити до 16 символів у кожному з двох рядків, тобто максимум 32 символи одночасно. Завдяки своїй простоті, надійності та широкій підтримці, цей модуль часто використовується у навчальних проектах, хобі-розробках та вбудованих системах.

LCD 1602 базується на контролері HD44780 або його сумісному аналогу. Цей контролер широко підтримується бібліотеками Arduino, STM32, ESP та інших мікроконтролерів, що значно полегшує процес програмування. Вивід інформації на дисплей відбувається за допомогою команд та даних, які надсилаються через паралельний інтерфейс (4 або 8 біт). Для зручності часто використовують додаткову плату з I2C-конвертером (на базі чіпа PCF8574), яка дозво-

ляє передавати ті ж дані лише через два дроти (SDA та SCL), економлячи порти мікроконтролера.

Дисплей підтримує виведення латинських літер, цифр та більшості основних символів ASCII. Крім того, він дозволяє створювати до 8 користувацьких символів (наприклад, значки температури, стрілки тощо), які можна зберегти у внутрішній пам'яті CGRAM.

Енергоспоживання модуля досить низьке, що дозволяє використовувати його в автономних пристроях. Підсвічування дисплея (зазвичай на синій або зеленій основі з білими символами) може бути постійним або вимикатись програмно або апаратно, що ще більше економить енергію.

LCD 1602 активно використовується у таких проєктах, як: домашні метеостанції, термометри, годинники, лічильники, системи безпеки, контролери для теплиць, дисплеї статусу в робототехніці тощо. Завдяки зручному форм-фактору, модуль легко монтується в корпуси або на панелі.

Однією з головних переваг LCD 1602 є його доступність і величезна база прикладів та готових бібліотек, які роблять його ідеальним рішенням як для початківців, так і для досвідчених розробників вбудованих систем.

Керування дисплеєм здійснюється через спеціальні сигнали — RS, RW і EN, які підключаються до цифрових виводів мікроконтролера. Передача даних і команд відбувається через 4- або 8-бітну шину. Завдяки простому інтерфейсу, модуль легко налаштовується і керується стандартними бібліотеками, наприклад, у середовищі Arduino.

LCD 1602 широко застосовується у різних проєктах: у системах керування освітленням, безпеки, автоматизації, вимірювальних приладах (наприклад, термометрах, метеостанціях), а також в інформаційних табло. Його часто використовують у DIY-проєктах завдяки простоті підключення, доступності та низькому енергоспоживанню.

Завдяки цим якостям LCD 1602 ідеально підходить для виведення даних у системах вимірювання повітряного потоку або інших електронних приладах.

3.2 Додаткові сенсори вологості, температури та атмосферного тиску

Невід’ємною частиною кожної системи вимірювання повітряного потоку являється датчики які зчитують показання вологості, температури та атмосферного тиску.

Модуль GY-21, також відомий під назвами SHT21 або HTU21, є високоточним цифровим датчиком температури та відносної вологості, розробленим для застосування у різних сферах автоматизованих вимірювань. Він поєднує компактні розміри, низьке енергоспоживання та цифровий інтерфейс, що робить його ідеальним вибором для інтеграції у вбудовані системи та проєкти на базі Arduino, ESP32, STM32 тощо.

Датчик використовує протокол зв’язку I2C, який дозволяє швидко передавати дані мікроконтролеру лише через два сигнальні дроти: SDA та SCL. Завдяки цьому забезпечується простота підключення та економія портів вводу/виводу. Адреса пристрою на шині I2C зазвичай є фіксованою (0x40), хоча в деяких версіях можливе її перепризначення.

GY-21 забезпечує вимірювання температури з точністю до $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ та вологості — до $\pm 2\%$ у стандартному діапазоні. Окрім основних значень, деякі версії датчика можуть також повідомляти про стан живлення або рівень самодіагностики, що особливо корисно в системах з підвищеними вимогами до надійності.

Вбудований АЦП (аналогово-цифровий перетворювач) обробляє сигнали з сенсорних елементів, після чого дані передаються вже в цифровому форматі. Це мінімізує похибки, викликані аналоговими шумами, та забезпечує високу стабільність вимірювань. Час відгуку датчика досить швидкий — для температури близько 85 мс, а для вологості — близько 30 мс, що дозволяє оперативно реагувати на зміну умов.

Модуль GY-21 широко використовується в метеостанціях, системах розумного дому, клімат-контролі, інкубаторах, теплицях, вентиляційних установках, а також у побутових пристроях для вимірювання мікроклімату. Завдяки

стандартному форм-фактору та наявності готових бібліотек для Arduino IDE та інших середовищ розробки, він легко інтегрується навіть початківцями.

Додатковою перевагою є невеликі габарити та низьке енергоспоживання, що робить GY-21 особливо зручним для автономних пристроїв із живленням від батарей. Він чудово підходить для мобільних метеостанцій, носимих пристроїв або IoT-рішень, де важливо зберегти баланс між точністю, автономністю та компактністю.

На кристалі модуля розташовані аналого-цифровий перетворювач, система обробки сигналу та пам'ять з калібрувальними даними, які записані ще на заводі. Це забезпечує високу точність, стабільність показань і повну взаємозамінність модулів без додаткового налаштування. Модуль має мале енергоспоживання — лише 150 мкА в активному режимі та 60 пА в режимі очікування. Серед технічних характеристик — точність вимірювання вологості $\pm 3\%$ RH і температури $\pm 0.4^\circ\text{C}$, робочий діапазон температур від -40 до $+125^\circ\text{C}$, а вологості — від 0 до 100% RH. Модуль живиться напругою 5–6 В, а сам чіп працює в діапазоні 1.9–3.6 В. Крім того, він оснащений вбудованим мініатюрним нагрівачем для покращення стабільності при конденсації.

Для зчитування показань атмосферного тиску був обраний модуль BMP280 (рис. 3.3). Він є одним з найпопулярніших та ефективних датчиків тиску та температури, який використовується в системах вимірювання повітряного потоку та інших проектах, пов'язаних з вимірюванням погодних умов. Цей модуль є компактним, точним та легко інтегрованим у різноманітні системи.

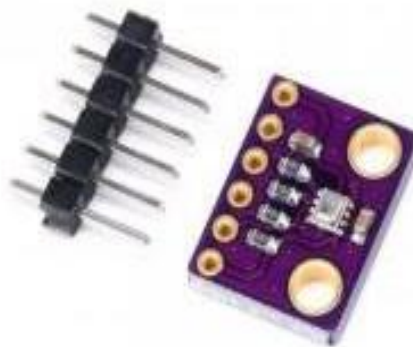


Рисунок 3.3 – Модуль BMP280

В системі вимірювання повітряного потоку є реалізація компасу яка виконана у вигляді модулю LSM303DLHC(рис. 3.4), який містить в собі датчик магнітного поля, який може бути використаний для вимірювання напрямку, а також для визначення азимуту метеостанції. Це може бути корисно для вимірювання напрямку вітру, встановлення орієнтації метеостанції та визначення магнітних властивостей досліджуваної території.



Рисунок 3.4– Модуль LSM303DLHC

Модуль GY-BMP280 з мікросхемою LSM303DLHC призначений для вимірювання магнітних полів і прискорення у трьох напрямках. Він поєднує в собі акселерометр і магнітометр, що дозволяє відстежувати як рух, так і орієнтацію в просторі. Модуль зручно інтегрується з мікроконтролерами через інтерфейс I2C.

Акселерометр підтримує діапазони вимірювання до $\pm 16g$, а магнітометр — до ± 8.1 Гаус. Крім основних вимірювань, чип має вбудовані функції детекції руху та змін магнітного поля, що корисно для створення компасів, навігаційних систем, а також систем контролю положення.

Живлення модуля здійснюється в діапазоні від 3.3 до 5 В, що робить його сумісним із більшістю сучасних мікроконтролерів. Розміри плати компактні

— лише $20.5 \times 14.5 \times 3$ мм, що дозволяє використовувати його в мініатюрних або мобільних пристроях.

3.3 Проектування анемометра як основного сенсора системи вимірювання повітряного потоку

У даному кваліфікаційному проєкті для зчитування швидкості обертання валу анемометра було обрано електромагнітний тахометр на основі датчика Холла A3144 (рис. 3.5).

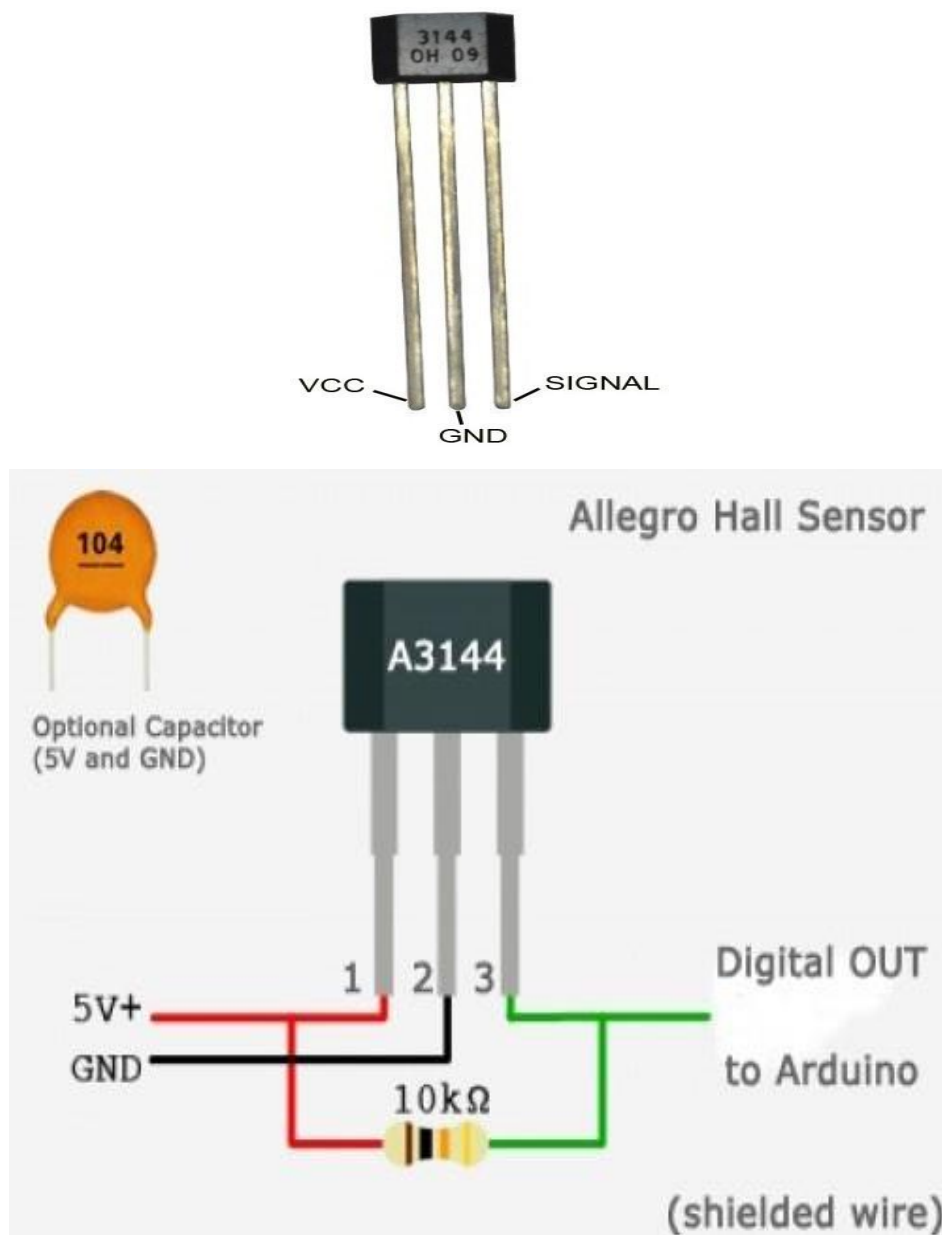


Рисунок 3.5 – Сенсор Холла A3144

Розглянемо процес проектування корпусу анемометра який виконується за допомогою програмного забезпечення SolidWorks, яке надає широкий спектр інструментів для створення 3D-моделей, креслень та аналізу. Корпус анемометра був розроблений на основі інших анемометрів чашкового типу з метою досягнення оптимальної функціональності.

Корпус анемометру складається з декількох частин таких як : основа, ротор, лопастей , фіксуючої кришки ротора, та кришки дна основи.

Основна частина(рис 3.6): Ця частина корпусу виконує роль опорної платформи, яка забезпечує стійкість і надійність анемометра.

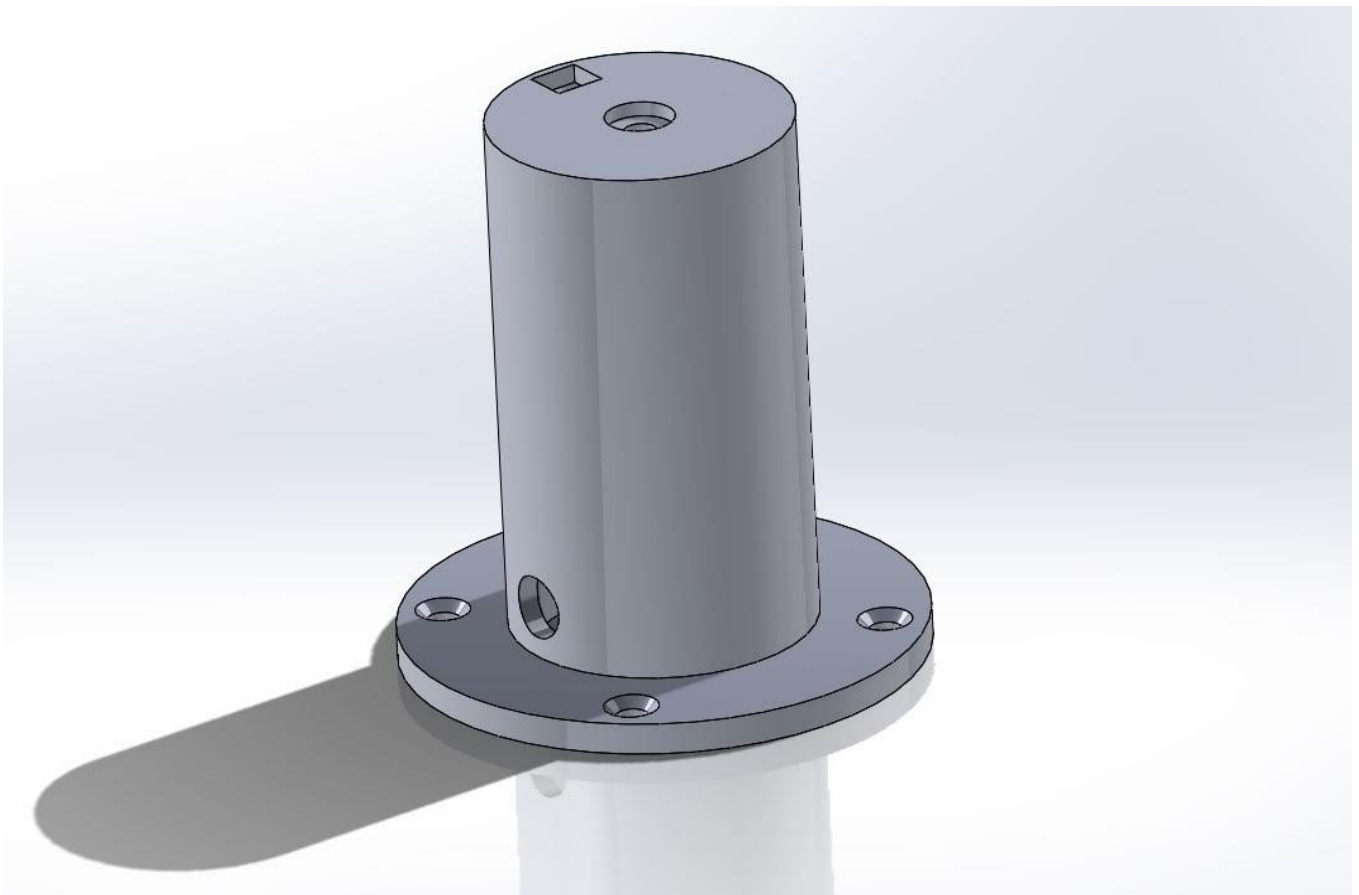


Рисунок 3.6 – Основна анемометра

Основа являє собою порожнистий циліндр з діаметром 28 мм, внутрішній діаметр 24 мм та жорстка основа для кріплення з діаметром 48мм. Деталь також має ряд технологічних отворів таких як :

Отвір для датчику Холла – являє собою прямокутний отвір з розмірами 4,80 x 4.20 мм верху циліндра ;

Отвір для встановлення фіксуючої гайки підшипника з діаметром 6,40 мм та виріз 1.40 мм. Цей отвір разом з підшипником являє собою опорну точку для ротора, що обертається. Він дозволяє ротору вільно обертатися навколо своєї осі та одночасно утримує його у правильному положенні.

Отвір в нижній частині циліндру з діаметром 6 мм призначений для становлення проводу

Чотири отвори для болтів з діаметром 3мм, що фіксують кришку dna основи.

Ротор(рис. 3.7) : Ротор є ключовою складовою анемометра, він виконаний у формі циліндру з діаметром 32 мм, внутрішній діаметр 31 мм, висотою 25 мм. На ньому є спеціальні пази, зображені синім кольором, ці пази мають такі розміри 6x10x3 мм, також ці пази мають додатковий виріз з глибиною 6.40 мм, призначений для більш жорсткого фіксування лопатей.

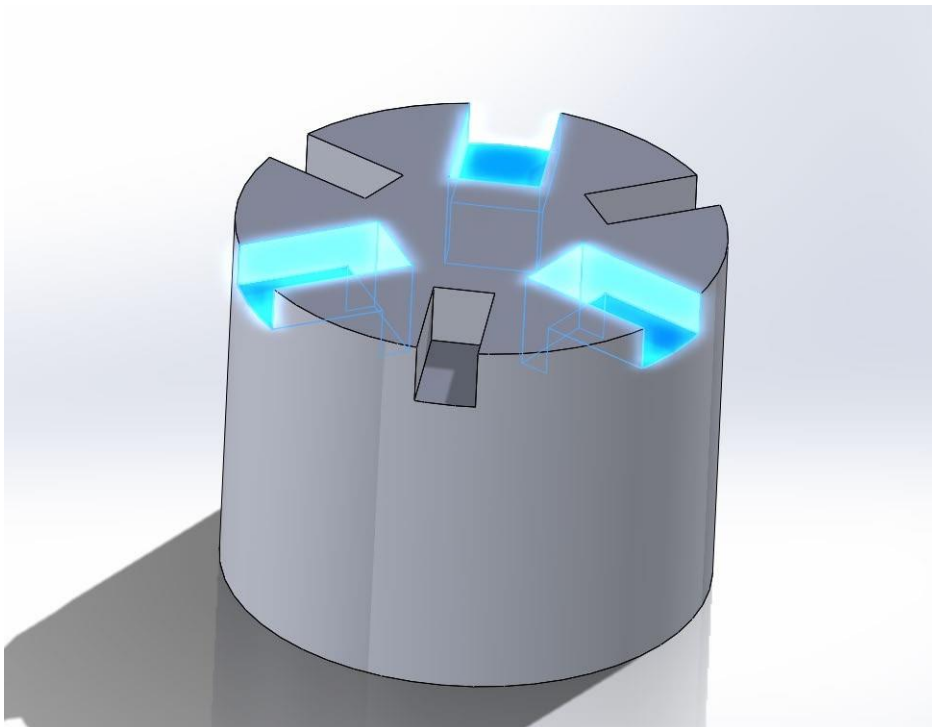


Рисунок 3.7 – Ротор анемометра

В ці пази них встановлюються три лапасті, які призначені для захоплення повітряного потоку та генерації обертового руху. Це дозволяє виміряти швидкість вітру. Ротор встановлюється на осі, яка забезпечує його обертання.

Також на роторі є пази, зображені на рис. 3.8, ці пази мають такі розміри 4 x 8 x 4 мм, вони використовуються для фіксування кришки ротора.

В внутрішній частині ротора є 4 технологічних отвори, діаметр яких 3,50 мм, призначені для магнітів та технологічний отвір по середині для підшипника діаметр 10,20 мм, дані отвори зображені на рис. 3.8.

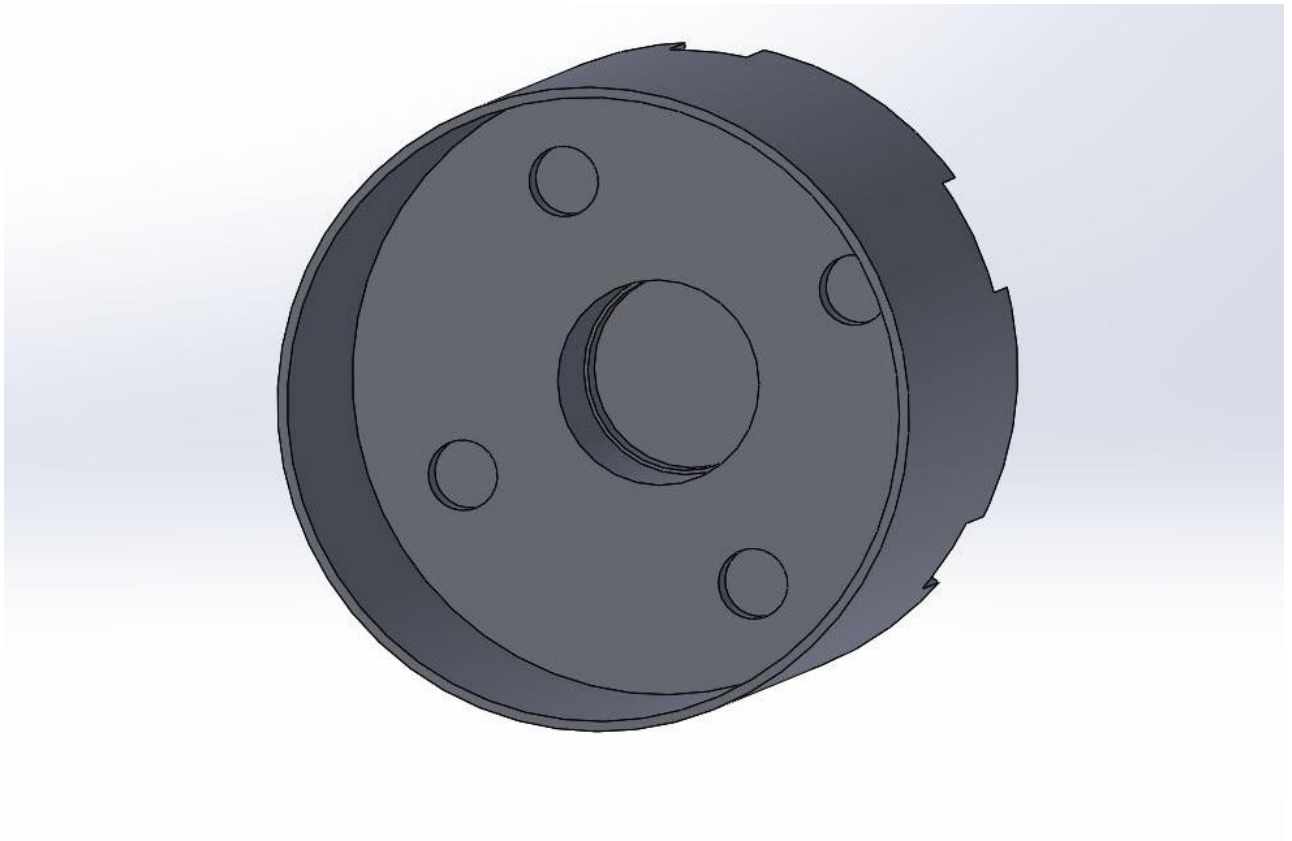


Рисунок 3.8 – Внутрішня частина ротора анемометра

Лопаті анемометра, що використовуються у корпусі, мають чашкоподібну форму (рис 3.9) . Цей дизайн лопатей базується на досвіді та принципах, що застосовуються в анемометрах чашкового типу. Чашкоподібна форма лопатей дозволяє краще захоплювати повітряний потік та ефективно перетворювати його енергію на обертовий рух.

Були вибрані оптимальні розміри лопатей а саме: діаметр чашки - 40 мм, загальна довжина - 81 мм, ширина - 6 мм.

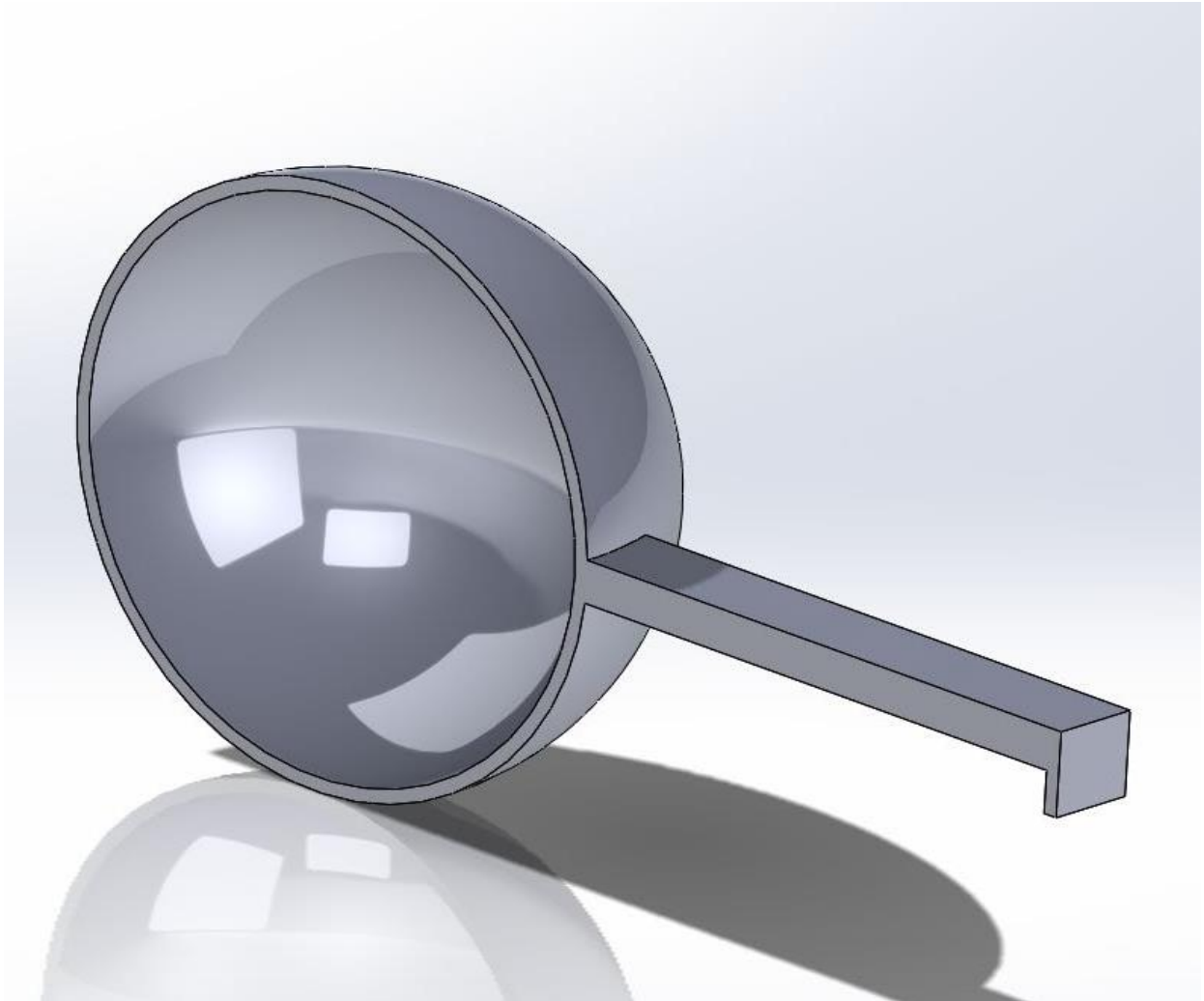


Рисунок 3.9 – Лопать анемометра

Головна перевага лопатей у вигляді чашок полягає в їхній здатності забезпечувати стабільність роботи анемометра при різних швидкостях вітру. Чашкоподібна форма допомагає зменшити вплив побічних факторів, таких як вітер з інших напрямків, і забезпечує точні та стабільні вимірювання.

Також лопать має спеціальний виступ для фіксації в роторі та придання жорсткості з'єднання.

Фіксує кришки ротора (рис. 3.10): служить для надійної фіксації лопатей ротора. Вона забезпечує правильне положення лопатей та недопущення

їхнього вільного руху під час роботи. Кришка має товщину 2 мм та спеціальний виступаючі елементи з розмірами 3,5 x 8 мм.

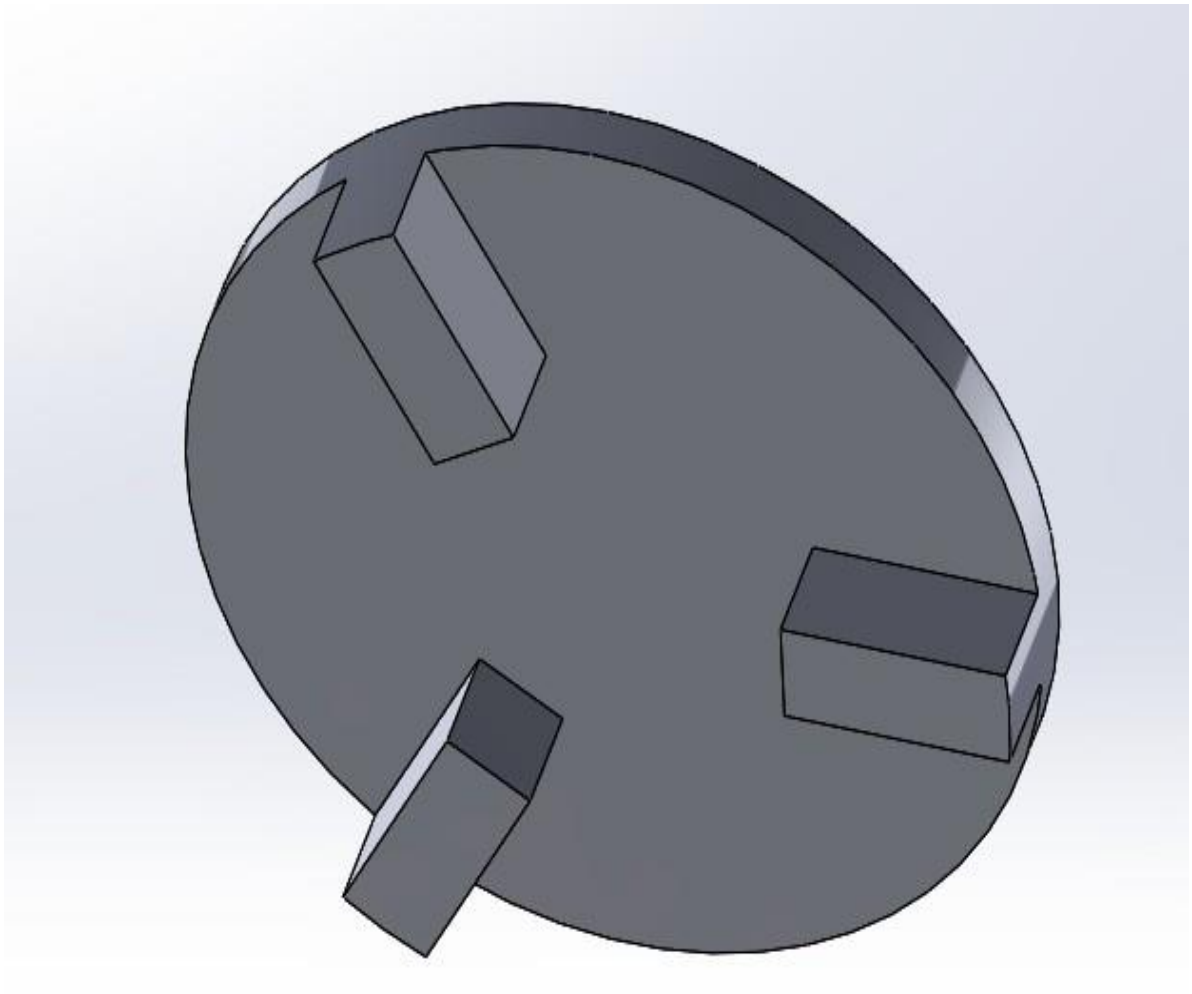


Рисунок 3.10 – Фіксуюча кришки ротора

Кришка дна для основної частини (рис. 3.10). Ця кришка виконує важливу роль у збірці корпусу анемометра. Вона прикриває нижню частину основної частини корпусу, що надає йому додаткову стійкість та захищає внутрішні компоненти від зовнішніх впливів. Дана кришка має діаметр 48 мм товщину 4 мм та 4 отвори з діаметром 3мм.

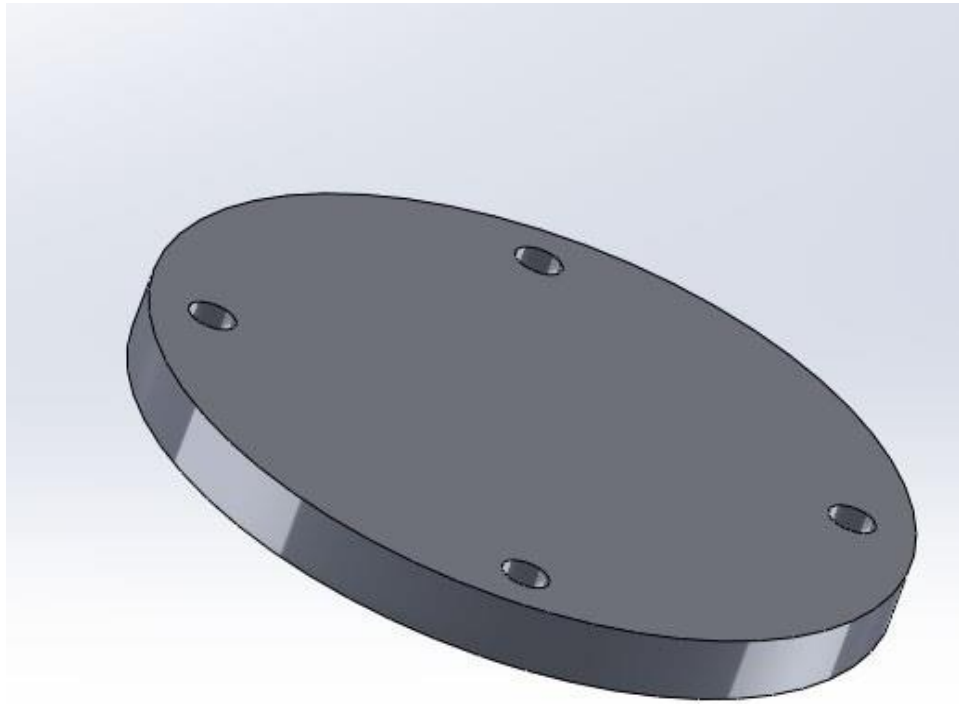


Рисунок 3.10 – Кришка дна для основної частини

Усі наведені деталі утворюють тривимірну модель анемометра, яка зображена на рисунку 3.11.

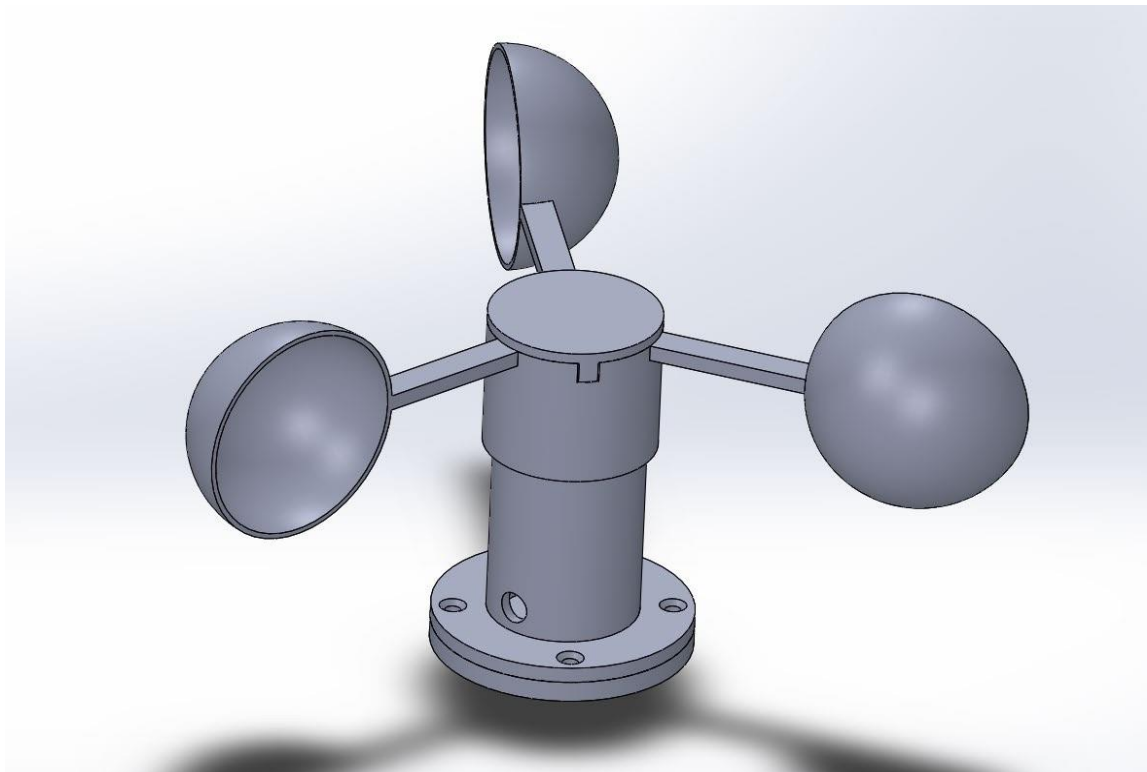


Рисунок 3.11 – Тривимірна модель анемометру

Отримані тривимірні деталі дозволяють зручно виготовляти їх технологіями тривимірного друку із пластку.

Калібрування чашкових анемометрів — це обов'язкова процедура, яка дозволяє забезпечити точність вимірювання швидкості повітряного потоку. Цей процес полягає у визначенні співвідношення між частотою обертання анемометра та реальною швидкістю вітру. Його мета — усунути систематичні похибки та забезпечити відповідність показників реальним умовам навколишнього середовища.

Одним із найпоширеніших методів калібрування є використання аеродинамічної труби. У цьому випадку анемометр розміщується в контрольованому повітряному потоці, де швидкість точно задається. Після цього здійснюється запис кількості імпульсів або обертів за певний проміжок часу. На основі отриманих даних будується калібрувальна крива, яка дозволяє перетворювати частоту імпульсів у швидкість повітряного потоку.

Ще одним поширеним методом є порівняльне калібрування за допомогою еталонного приладу. В такому випадку анемометр розміщують поряд із сертифікованим еталоном у реальних умовах (наприклад, на метеостанції або вітровому полі). Дані збираються одночасно з обох приладів, після чого проводиться аналіз розбіжностей. Якщо спостерігається стабільне відхилення, вводиться коригувальний коефіцієнт у програмному забезпеченні або виконується апаратне налаштування.

Важливо зазначити, що точність калібрування значною мірою залежить від стабільності умов під час проведення процедури. Для зменшення похибок використовують середнє значення показів за тривалий період, особливо у випадках поривчастого вітру. У лабораторних умовах використовують також лазерні доплерівські анемометри як еталонні засоби вимірювання.

Для побутових або польових систем на базі Arduino або ESP32 часто застосовують спрощене калібрування. Зазвичай це виконується емпіричним шляхом — встановлюється анемометр поруч із цифровою метеостанцією або про-

фесійним пристроєм, і програмно підбирається коефіцієнт перетворення (k), який забезпечує найбільш точні покази.

Таким чином, калібрування є критичним етапом у розробці анемометрів. Воно дозволяє забезпечити відповідність системи реальним умовам, підвищити точність вимірювань та надати користувачеві надійні дані про швидкість повітряного потоку. Правильне виконання калібрування суттєво підвищує цінність вимірювальної системи як у наукових дослідженнях, так і в прикладних інженерних задачах.

Калібрування анемометра [9-11]. Калібрування чашкових анемометрів включає визначення їх точності та регулювання їх у разі необхідності. Ось кілька методів, які зазвичай використовуються для калібрування чашкових анемометрів:

- Механічне калібрування: цей метод передбачає порівняння показань чашкового анемометра з еталонним анемометром із відомою точністю. Еталонним анемометром може бути калібрований прилад або аеродинамічна труба. Розмістивши обидва анемометри в одному місці записуються їх покази одночасно. Вимірювання повторюється при різних швидкостях і напрямках вітру, щоб охопити широкий діапазон робочих умов. Показання чашкового анемометра порівнюються з еталонним анемометром і звертається увага на розбіжності. Якщо спостерігаються значні відмінності, можна відкоригувати коефіцієнт калібрування чашкового анемометра, щоб підвищити його точність.

- Калібрування в аеродинамічній трубі: аеродинамічні труби забезпечують контрольовані вітрові умови, що робить їх ідеальними для калібрування чашкових анемометрів. Анемометр поміщається в аеродинамічну трубу в якій змінюється швидкість і напрямок вітру за допомогою елементів керування тунелю. Вимірюється потужність анемометра при різних швидкостях і напрямках вітру та порівнюється з відомими значеннями, встановленими в аеродинамічній трубі.

- Калібрування лабораторіями калібрування: професійні лабораторії калібрування мають спеціальне обладнання та досвід для точного калібрування

чашкових анемометрів. Вони дотримуються галузевих стандартів і використовують відстежувані еталонні калібрування. Надсилання анемометра до перевіреної калібрувальної лабораторії гарантує надійні та точні результати калібрування.

- Польове калібрування: для калібрування на місці ви можете порівняти показання чашкового анемометра з анемометром із відомою точністю. Це може бути портативний калібрований анемометр або системи вимірювання повітряного потоку з вбудованим анемометром.

Важливо відзначити, що чашечні анемометри можуть з часом зношуватися, що впливає на їх точність. Для забезпечення надійності вимірювань рекомендується регулярно калібрування, особливо після технічного обслуговування або коли помічені значні зміни в продуктивності. Крім того, завжди потрібно звертатися до вказівок виробника та специфікацій щодо конкретних процедур калібрування для чашкового анемометра.

3.4 Висновок до розділу 3

У третьому розділі було детально розглянуто апаратне забезпечення Автоматизованої системи вимірювання швидкості повітряного потоку, що є фундаментом для ефективної роботи всієї метеостанції. Особливу увагу приділено вибору мікроконтролера ESP32, який завдяки своїй потужності, великій кількості інтерфейсів та вбудованому Wi-Fi модулю став оптимальним рішенням для обробки та передавання даних.

Окрему роль у функціонуванні Автоматизованої системи вимірювання швидкості повітряного потоку відіграє модуль LCD 1602, який забезпечує зручне виведення інформації користувачу. Впровадження точних і енергоефективних сенсорів GY-21 та BMP280 дозволяє системі виконувати моніторинг температури, вологості та атмосферного тиску з високою точністю. Модуль LSM303DLHC у складі системи відкриває додаткові можливості щодо орієнтації та визначення напрямку вітру.

Розробка конструктивних елементів Автоматизованої системи вимірювання швидкості повітряного потоку, зокрема чашкового анемометра, реалізована із використанням сучасного CAD-середовища SolidWorks. Було спроектовано корпус та елементи обертання, що забезпечують ефективну фіксацію, надійність та адаптацію під встановлення сенсорів. Застосування датчика Холла А3144 у складі електромагнітного тахометра дозволяє точно та стабільно визначати швидкість обертання ротора — основного механізму Автоматизованої системи вимірювання швидкості повітряного потоку.

Крім того, описано методи калібрування, що забезпечують точність показань Автоматизованої системи вимірювання швидкості повітряного потоку у польових та лабораторних умовах. Створення корпусу для інтеграції всіх компонентів забезпечує компактність, зручність розміщення та захист елементів від зовнішнього впливу.

Таким чином, апаратне забезпечення Автоматизованої системи вимірювання швидкості повітряного потоку є комплексним, технічно обґрунтованим та здатним забезпечити точне вимірювання метеорологічних параметрів у режимі реального часу.

4 ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ ВИМІРЮВАННЯ ШВИДКОСТІ ПОВІТРЯНОГО ПОТОКУ

4.1 Загальний опис програмного забезпечення

Програмне забезпечення, розроблене для мікроконтролера Arduino Uno (або сумісного, наприклад ESP32), виконує функції реєстрації імпульсів від датчика Холла, математичної обробки отриманих даних та виведення результату — швидкості повітряного потоку. Система працює в реальному часі з використанням апаратних переривань і виконує вимірювання щосекунди.

На початку програми оголошуються константи, які визначають основні параметри фізичної моделі:

- Радіус обертання рухомого елемента системи — змінна r , наприклад 0,06 м.
- Кількість імпульсів на один оберт — змінна N . Це число залежить від кількості магнітів, встановлених на роторі.
- Калібрувальний коефіцієнт k , що враховує похибки конструкції та забезпечує відповідність реальним значенням швидкості.
- Змінна `hallPin` вказує, до якого цифрового входу мікроконтролера підключений датчик Холла.
- Для підрахунку імпульсів, які генеруються датчиком Холла при кожному проходженні магніта, використовується механізм апаратного переривання. Це означає, що кожного разу, коли на піні `hallPin` виявляється спад сигналу (тип сигналу `FALLING`), викликається спеціальна функція `countImpulse`, яка просто збільшує глобальну змінну `impulseCount` на одиницю. Такий підхід забезпечує точний підрахунок імпульсів незалежно від основного циклу програми.

Основна логіка обробки розташована в головному циклі `loop`. У ньому реалізовано перевірку, чи пройшов один повний інтервал часу (зазвичай 1000 мілісекунд або 1 секунда). Якщо так — виконується вимірювання: переривання

тимчасово вимикаються, щоб точно зчитати кількість імпульсів за останню секунду. Отримане значення копіюється у змінну `impulses`, а лічильник обнуляється. Переривання повторно активуються.

На основі зчитаної кількості імпульсів за секунду обчислюється частота np — тобто кількість імпульсів за секунду. Потім виконується обчислення швидкості вітру за формулою, яка була виведена у математичному розділі. Ця формула перетворює кількість імпульсів у метри на секунду, враховуючи розміри системи та емпіричний коефіцієнт.

Розраховане значення швидкості виводиться через послідовний порт (Serial Monitor) у вигляді текстового повідомлення. Вивід включає як кількість імпульсів за секунду, так і відповідну швидкість вітру у метрах на секунду. Таким чином користувач може бачити поточне значення вітру в реальному часі.

Використання апаратних переривань забезпечує максимальну точність зчитування імпульсів, навіть якщо швидкість вітру змінюється динамічно. Завдяки циклічному вимірюванню з інтервалом у одну секунду досягається стабільна частота оновлення даних, що є оптимальним для більшості метеорологічних задач.

Розроблене програмне забезпечення є ефективним інструментом для перетворення механічного обертання у цифрові дані та подальшого обчислення швидкості повітряного потоку. Воно поєднує в собі:

- точний підрахунок імпульсів від сенсора;
- реалізацію математичної моделі з обліком геометрії системи;
- простоту кодування та гнучкість масштабування;
- можливість подальшої інтеграції з інтерфейсами виводу (дисплей, Wi-Fi, SD-карта).

Таке ПЗ можна адаптувати для інших задач, змінюючи лише параметри r , N і k . Окрім цього, перспективним напрямом є вдосконалення інтерфейсу користувача та розширення можливостей виводу даних. Наприклад, підключення дисплея OLED або TFT дозволить виводити результати вимірювання безпосередньо на пристрої без потреби в ПК. Також можлива інтеграція модуля Wi-Fi

(наприклад ESP8266 або ESP32) для передавання даних у хмарні сервіси або на локальний сервер, що значно розширює можливості використання в автоматизованих системах моніторингу.

Ще одним напрямком розвитку є застосування адаптивних алгоритмів фільтрації даних, які можуть покращити точність у випадках із нестабільними умовами вимірювання. Наприклад, використання ковзного середнього або медіанного фільтра дозволить згладити короточасні флуктуації та забезпечити стабільні результати.

У контексті енергоефективності важливою є також реалізація режимів енергозбереження. Наприклад, між вимірюваннями мікроконтролер може переходитися у сплячий режим, що зменшить загальне енергоспоживання системи — особливо актуально для автономних станцій із живленням від батарей або сонячних панелей.

На завершення, система є чудовим прикладом поєднання апаратної та програмної складових у створенні точного, гнучкого та масштабованого рішення для вимірювання швидкості повітряного потоку. Така система може використовуватись не лише в метеорології, а й у вентиляційних, кліматичних установках, а також у дослідницьких проєктах.

Основна логіка обробки розташована в головному циклі `loop`. У ньому реалізовано перевірку, чи пройшов один повний інтервал часу (зазвичай 1000 мілісекунд або 1 секунда). Якщо так — виконується вимірювання:

Переривання тимчасово вимикаються, щоб точно зчитати кількість імпульсів за останню секунду. Отримане значення копіюється у змінну `impulses`, а лічильник обнуляється. Переривання повторно активуються.

На основі зчитаної кількості імпульсів за секунду обчислюється частота pp — тобто кількість імпульсів за секунду. Потім виконується обчислення швидкості вітру за формулою, яка була виведена у математичному розділі 2. Ця формула перетворює кількість імпульсів у метрів на секунду, враховуючи розміри системи та емпіричний коефіцієнт.

Розраховане значення швидкості виводиться через послідовний порт (Serial Monitor) у вигляді текстового повідомлення. Вивід включає як кількість імпульсів за секунду, так і відповідну швидкість вітру у метрах на секунду. Таким чином користувач може бачити поточне значення вітру в реальному часі.

Використання апаратних переривань забезпечує максимальну точність зчитування імпульсів, навіть якщо швидкість вітру змінюється динамічно. Завдяки циклічному вимірюванню з інтервалом у одну секунду досягається стабільна частота оновлення даних, що є оптимальним для більшості метеорологічних задач.

Розроблене програмне забезпечення є ефективним інструментом для перетворення механічного обертання у цифрові дані та подальшого обчислення швидкості повітряного потоку. Воно поєднує в собі:

- точний підрахунок імпульсів від сенсора;
- реалізацію математичної моделі з обліком геометрії системи;
- простоту кодування та гнучкість масштабування;
- можливість подальшої інтеграції з інтерфейсами виводу (дисплей, Wi-Fi, SD-карта).

Таке ПЗ можна адаптувати для інших задач, змінюючи лише параметри r , N і k .

4.2 Алгоритм роботи програмного забезпечення

Алгоритм роботи [16] програмного забезпечення автоматизованої системи вимірювання швидкості повітряного потоку представлено на рис. 4.1.

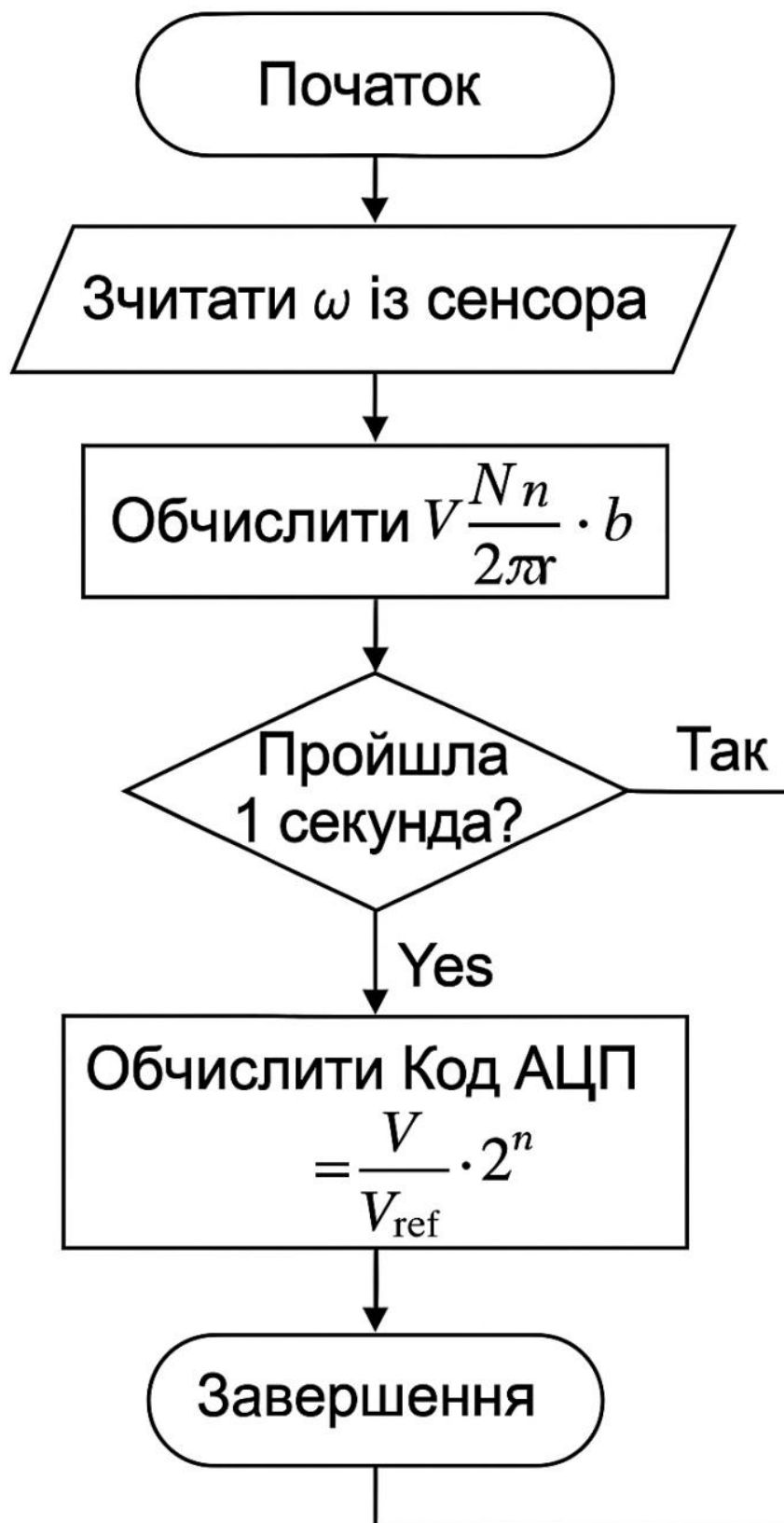


Рисунок 4.1 – Алгоритм роботи програми

Алгоритм роботи автоматизованої системи вимірювання швидкості повітряного потоку реалізується в кілька послідовних етапів. Весь процес виконується циклічно, з інтервалом оновлення вимірювань у 1 секунду.

На цьому етапі програма виконує первинне налаштування апаратної частини системи:

- Оголошуються основні параметри системи: радіус обертання (r), кількість імпульсів на оберт (N), коефіцієнт калібрування (k).
- Налаштовується вхід для зчитування сигналу з датчика Холла, підключеного до одного з цифрових пінів мікроконтролера.
- Активується апаратне переривання, яке дозволяє відслідковувати імпульси — кожне проходження магніта біля сенсора автоматично викликає функцію підрахунку.

Після ініціалізації система переходить у циклічний режим роботи. В головному циклі програма постійно перевіряє, чи пройшов часовий інтервал (звичай 1 секунда). Якщо інтервал ще не завершився, програма повертається до початку циклу, очікуючи настання наступної секунди.

Щойно система фіксує, що минула одна секунда, виконується:

- тимчасове вимкнення переривань, щоб уникнути помилок під час зчитування;
- зчитування кількості імпульсів за останню секунду;
- скидання лічильника імпульсів;
- повторне включення переривань.

Кількість імпульсів за секунду фіксується у змінній np . Це і є інформаційний параметр, який буде використано для подальших обчислень.

Таким чином, система повністю автоматично перетворює частоту імпульсів у швидкість потоку без необхідності втручання користувача.

Після розрахунку значення швидкості вітру система виводить результати на інтерфейс (наприклад, у серійну консоль або на дисплей, якщо він підключений). Виводяться як значення імпульсів np , так і розраховане значення швидкості VV .

Після виведення результатів програма оновлює часову мітку і повертається до початку циклу, чекаючи наступного інтервалу в одну секунду. Таким чином забезпечується періодичне та безперервне вимірювання швидкості повітряного потоку.

Використання апаратних переривань гарантує, що система не пропустить жодного імпульсу, навіть якщо частота обертання висока.

Розрахунки проводяться в плаваючій точці, що дозволяє досягти високої точності.

Структура коду дає можливість легко адаптувати систему до різних типів сенсорів або мікроконтролерів.

Описаний алгоритм забезпечує ефективне, точне і стабільне вимірювання швидкості вітру в реальному часі. Завдяки чіткому поділу на етапи та використанню математичного моделювання, програмне забезпечення є універсальним, надійним і придатним для використання в різних типах метеорологічних систем.

4.3 Висновок до розділу 4

У даному розділі було розглянуто структуру та логіку програмного забезпечення Автоматизованої системи вимірювання швидкості повітряного потоку, розробленого для мікроконтролера Arduino Uno. Детально описано етапи ініціалізації, зчитування даних з датчика Холла, обробки отриманої інформації, обчислення швидкості вітру за допомогою математичної моделі та виведення результатів для користувача.

Запропонований алгоритм роботи забезпечує надійність, точність та стабільність функціонування системи в реальному часі, що є критично важливим у метеорологічних застосуваннях. Використання апаратних переривань дозволяє гарантувати повноту реєстрації імпульсів навіть при змінній швидкості повітряного потоку, а реалізація математичної моделі у вигляді коду дає змогу точно інтерпретувати інформаційний параметр як фізичну величину.

Програмне забезпечення має модульну структуру, є гнучким для масштабування та легко адаптується до використання в різних сферах — від простих побутових метеостанцій до промислових систем моніторингу. Застосування такої програмної реалізації дозволяє автоматизувати процес збору та обробки метеорологічних даних, що є важливим для підвищення точності спостережень та оптимізації ресурсів.

ВИСНОВКИ

У результаті виконання бакалаврської кваліфікаційної роботи було розроблено, обґрунтовано та реалізовано автоматизовану систему вимірювання швидкості повітряного потоку, що поєднує сучасні сенсорні технології, математичне моделювання та програмне забезпечення на базі мікроконтролера.

Проведено глибокий теоретичний аналіз принципів функціонування метеостанцій, класифікації та призначення анемометрів, а також методів зчитування швидкості обертання. Було визначено оптимальний варіант сенсорного модуля — чашковий анемометр з використанням датчика Холла, що забезпечує точні та стабільні вимірювання у реальному часі.

На основі математичного моделювання виведено формулу для обчислення швидкості повітряного потоку за частотою імпульсів, яка враховує геометричні параметри системи та калібрувальний коефіцієнт. Це дозволило забезпечити високу точність розрахунків і масштабованість для інших конфігурацій.

Розроблено програмне забезпечення для Arduino, яке реалізує алгоритм підрахунку імпульсів, обчислення швидкості за математичною моделлю та виведення результатів користувачу. Застосування апаратних переривань забезпечує високу надійність навіть за змінної динаміки потоку.

Підсумовуючи, можна стверджувати, що створена Автоматизована система вимірювання швидкості повітряного потоку є ефективним технічним рішенням для точного контролю метеорологічних параметрів, з можливістю подальшої модернізації, інтеграції з мережевими технологіями та застосування у смарт-системах.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Головка В.М. Вплив параметрів системи орієнтації ротора з використанням конструктивної схеми "хвіст на косому шарнірі" на статичні характеристики вітроустановки / В.М. Головка, В.П. Коханевич, М.О.
2. Павлов В.Б. Особливості роботи автономних зарядних станцій електромобілів з використанням вітроелектричних установок та буферних акумуляторів енергії / В.Б. Павлов, С.О. Кудря, В.І. Бudyко, В.М. Кириленко, В.Ю. Іванчук // Технічна електродинаміка. – 2019. – №4. – С. 70-76.
3. Кудря С.О. Використання вітрової та сонячної енергії для опріснення / С.О. Кудря, М.А. Ткаленко, Л.В. Яценко, Л.Я. Шинкаренко, В.І. Бudyко // XVIII Міжнародна науково-практична конференція «Відновлювана енергетика XXI століття». – Київ, 2016. – С.229–231.
4. Остапчук О.В. Перспективи використання джерел розподіленої генерації в енергосистемі України / О.В. Остапчук, В.І. Бudyко // Міжнародна науково-практична конференція — Енергозбереження та енергоефективність - 2018, Дніпро, 2018р. – С.36–38.
5. Каплун В.В. Структурно-параметричний синтез комбінованих систем електроживлення: монографія / В.В. Каплун – К.: КНУТД, 2017. – 187с.
6. Поліщук Є.С., Дорожовець М.М., Яцук В.О. та ін. Метрологія та вимірювальна техніка: Підручник / Є.С. Поліщук, М.М. Дорожовець, В.О. Яцук, В.М. Ванько, Т.Г. Бойко; За ред. проф. Є.С. Поліщука. – Львів: Видавництво «Бескид Біт», 2003. – 544 с.
7. В.О. Бржезицький, Я.О. Гаран, І.М. Маслюченко. Трансформування вищих гармонічних складових напруги електромагнітними трансформаторами // Наукові праці НУХТ. — 2013. — № 49. — с. 98 – 103.
8. Поджаренко В.О., Кухарчук В.В. Вимірювання і комп'ютерно-вимірювальна техніка. Навчальний посібник. – К.: УМК ВО, 1991. – 240 с.

9. Evans, Annette; Strezov, Vladimir; Evans, Tim (June 2009). "Assessment of sustainability indicators for renewable energy technologies". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 13 (5): 1082–1088.

10. Baqersad, Javad; Niezrecki, Christopher; Avitabile, Peter (2015). "Full-field dynamic strain prediction on a wind turbine using displacements of optical targets measured by stereophotogrammetry". *Mechanical Systems and Signal Processing*. 62–63: 284–295.

11. Lundstrom, Troy; Baqersad, Javad; Niezrecki, Christopher; Avitabile, Peter (4 November 2012). "Using High-Speed Stereophotogrammetry Techniques to Extract Shape Information from Wind Turbine/Rotor Operating Data". In Allemang, R.; De Clerck, J.; Niezrecki, C.; Blough, J.R. (eds.). *Topics in Modal Analysis II*, 85 Volume 9. Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series. Springer New York. pp. 269–275.

12.

13. Крешчик О.О. Автоматизована система кондиціонування повітря з контролем швидкості повітряного потоку / О.О. Крешчик; наук. кер. С.М. Осінов // Бакалаврська робота. – Суми: СумДУ, 2021. – 47 с.

14. Мокін В.Б. та ін. Автоматизована система екоінспекційного контролю стану забруднення довкілля України та викидів, скидів і відходів / В.Б. Мокін, Б.І. Мокін, Г.Ю. Псарьов та ін. – Вінниця: ВНТУ, 2007. – 130 с.

15. Гринь Г.І., Мохонько В.І., Суворін О.В. та ін. Методи вимірювання параметрів навколишнього середовища: підручник / Г.І. Гринь, В.І. Мохонько, О.В. Суворін та ін. – Сєвєродонецьк: СХУ ім. В. Даля, 2019. – 420 с.

16. Гелетка С. А. Автоматизована система вимірювання швидкості повітряного потоку [Електронний ресурс] / С. А. Гелетка, О. В. Бісікало // LIV Всеукраїнська науково-технічна конференція факультету інформаційних електронних систем. - Електрон. текст. дані. - 2025. - Режим доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fksa/all-fksa-2025/paper/view/24311>

Додатки

Вінницький національний технічний університет
(повне найменування вищого навчального закладу)

Кафедра автоматизації та інтелектуальних інформаційних технологій
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри АІТ
д.т.н., професор Бісікало О. В.

(підпис)

«___» _____ 2025 р.

ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ

на бакалаврську кваліфікаційну роботу

Автоматизована система вимірювання швидкості повітряного потоку

08-31.БКР.004.02.000 ТЗ

Керівник бакалаврської кваліфікаційної роботи

д.т.н., проф. Бісікало О. В.

«___» _____ 2025 р.

Розробив студент гр. АКІТР-23мс

Гелетка С. А.

«___» _____ 2025 р.

Додаток А
(обов'язковий)
Технічне завдання на бакалаврську кваліфікаційну роботу

1 Підстава для проведення робіт

Підставою для виконання бакалаврської кваліфікаційної роботи на тему: «Автоматизована система вимірювання швидкості повітряного потоку» є наказ №97 від 20.03.2025 р.

Термін виконання робіт:

початок 03.09.2024 р.
кінець 10.06.2025 р.

2 Мета та вихідні дані для проведення робіт

Метою бакалаврської кваліфікаційної роботи є підвищення ефективності процесу вимірювання швидкості повітряного потоку на базі мікроконтролера ESP32 з використанням чашкового анемометра та сенсорних технологій.

Вихідними даними для проведення робіт є індивідуальне завдання на бакалаврську кваліфікаційну роботу від 20.03.2025 р.

3 Етапи виконання робіт

Виконавцем всіх перерахованих в даному розділі етапів є: студент групи **АКІТР-23мс Гелетка Сергій Анатолійович** факультету інтелектуальних інформаційних технологій та автоматизації Вінницького національного технічного університету, а замовником є кафедра автоматизації та інтелектуальних інформаційних технологій.

№ Етапу	Зміст етапу	Строки виконання
Е1	Особливості автоматизованих систем вимірювання повітряного потоку	03.09 – 26.02
Е2	Математичне забезпечення автоматизованої системи вимірювання швидкості повітряного потоку	01.03 – 19.03
Е3	Апаратне забезпечення автоматизованої системи вимірювання швидкості повітряного потоку	22.03 – 09.04
Е4	Програмне забезпечення автоматизованої системи вимірювання швидкості повітряного потоку	12.04 – 28.05

4 Призначення і галузь застосування

Автоматизована система вимірювання швидкості повітряного потоку призначена для точного та безперервного контролю повітряних потоків у реальному часі й застосовується в метеорології, вентиляційних системах, аграрних об'єктах, наукових дослідженнях і промисловості, забезпечуючи високий рівень надійності, адаптивності та інтеграції з цифровими технологіями.

5 Технічні дані

5.1 Тип системи – автоматизована система вимірювання швидкості повітряного потоку;

5.2 Метод вимірювання – сенсорний (електромагнітний з використанням датчика Холла);

5.3 Об'єкт вимірювання – повітряний потік у навколишньому середовищі або в технічному пристрої (вентиляційні системи, метеостанції, лабораторії).

6 Джерела розробки

1. Методичні вказівки до виконання бакалаврських кваліфікаційних робіт (проектів) для студентів спеціальностей: 126 «Інформаційні системи та технології», 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» [Електронний ресурс] / уклад. : К. В. Овчинников, О. В. Бісікало. – Вінниця : ВНТУ, 2023. – 50 с.
2. ДСТУ 8725:2017. Якість повітря. Викиди стаціонарних джерел. Методи визначення швидкості та об'ємної витрати газопилових потоків. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2018.
3. ДСТУ EN 12599:2005. Вентиляція будівель. Процедури випробування та методи вимірювання під час здавання в експлуатацію систем вентиляції та кондиціонування повітря. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2005.
4. ДСТУ 8726:2017. Якість повітря. Викиди стаціонарних джерел. Методи визначення тиску та температури газопилових потоків. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2018.

здобувач. гр. АКІТР-23мс _____ Гелетка С.А.

Додаток Б
(обов'язковий)

ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА

АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА ВИМІРЮВАННЯ ШВИДКОСТІ
ПОВІТРЯНОГО ПОТОКУ

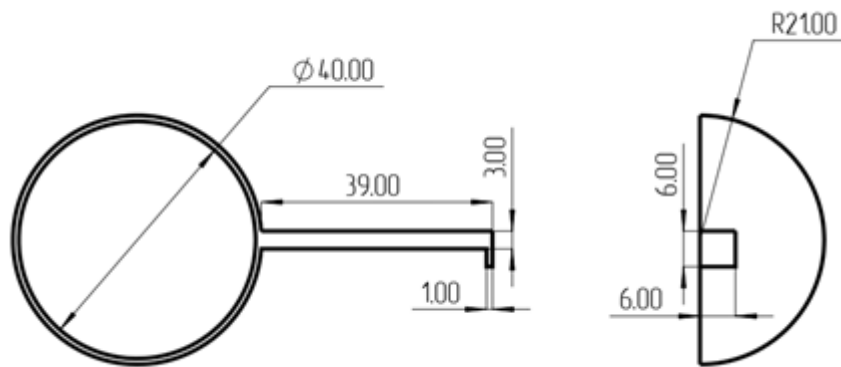


Рисунок Б.1 – Лопать

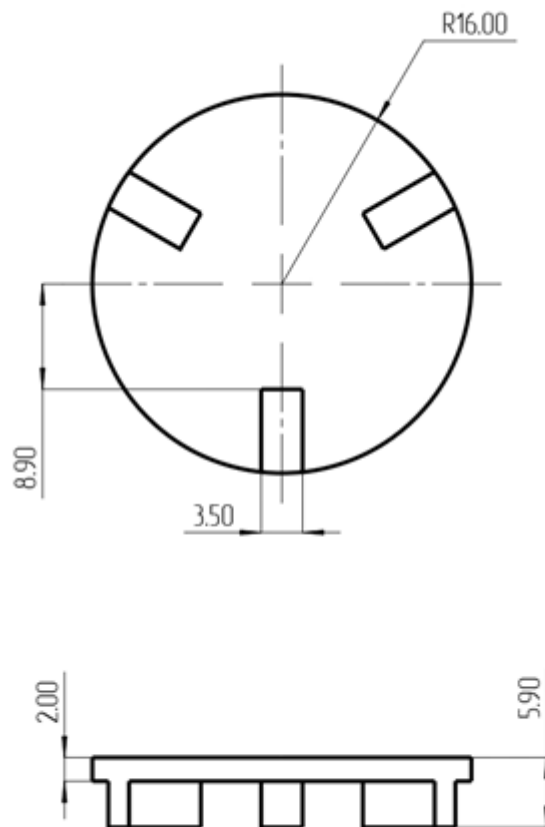


Рисунок Б.2 – Кришка ротора

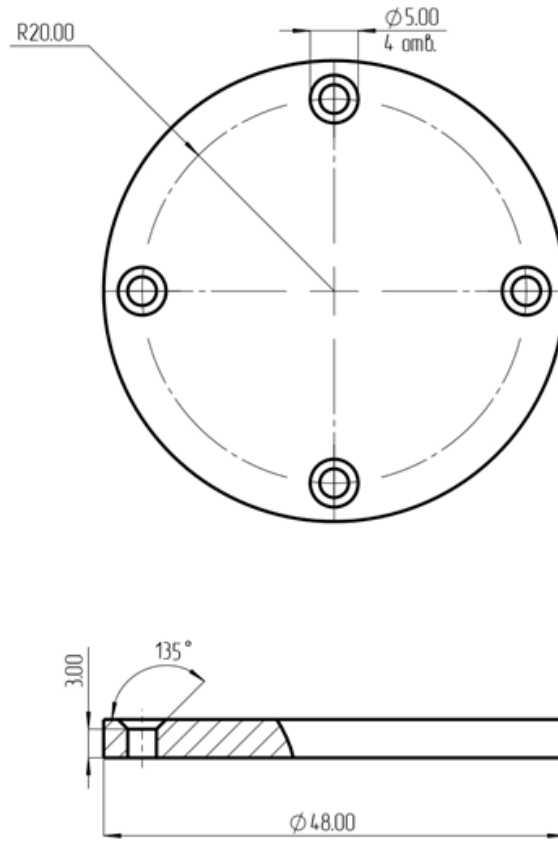


Рисунок Б.3 – Кришка основи

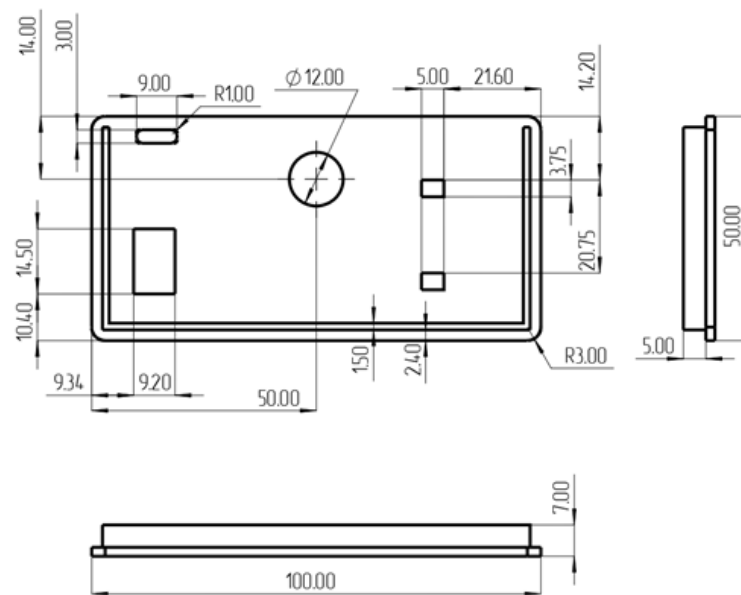


Рисунок Б.4 – Кришка корпусу

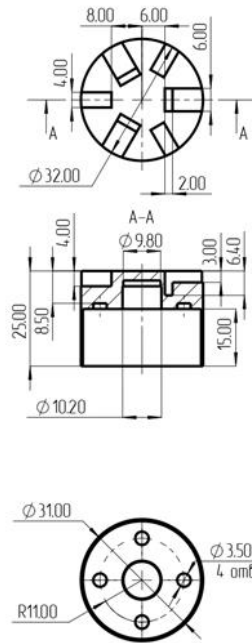


Рисунок Б.5 – Ротор

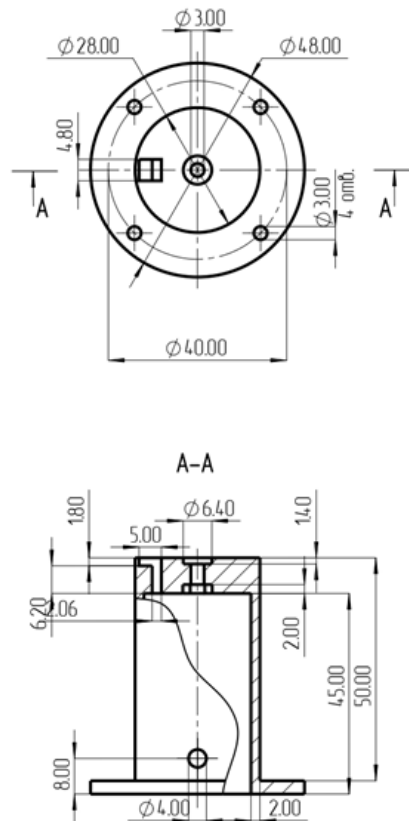


Рисунок Б.6 – Основа системы

Додаток В
(обов'язковий)
Лістинг програми

Програмна реалізація контролю якості повітря в автомобілі представницького класу з урахуванням перетворення значень

Граничні значення параметрів якості повітря (норми)

```
NORMALS = {
    "temperature": (20, 24),      # °C
    "humidity": (40, 60),        # %
    "co2": (400, 1000),          # ppm
    "pm25": (0, 12),             # мкг/м³
    "voc": (0, 300),             # ppb
    "ozone": (0, 100),           # ppb
    "co": (0, 10),               # ppm
}
```

Імітація сирих даних з сенсорів (напруга, цифрове значення тощо)

```
sensor_raw = {
    "temperature_raw": 520,      # наприклад, значення АЦП
    "humidity_raw": 380,         # умовна шкала 0-1023
    "co2_voltage": 1.5,          # напруга з NDIR датчика
    "pm25_voltage": 0.7,         # напруга з оптичного датчика пилу
    "voc_resistance": 30000,      # опір МОХ-сенсора в Ом
    "ozone_voltage": 0.1,        # напруга з електрохімічного сенсора
    "co_voltage": 0.35           # напруга з електрохімічного сенсора
}
```

Формули перетворення сирих значень у фізичні величини

```
def convert_temperature(raw):
```

```
    return (raw / 1023) * 125 - 40 # приклад для AM2320
```

```
def convert_humidity(raw):
```

```
    return (raw / 1023) * 100      # умовна шкала 0-100%
```

```
def convert_co2(voltage):
```

```
    return voltage * 1000 / 1.65 * 5 # просте масштабування для CO2 в ppm
```

```
def convert_pm25(voltage):
```

```
    return (voltage - 0.1) * 1000   # умовна формула: 0.1В = 0, кожні 1В = 1000
    мкг/м³
```

```

def convert_voc(resistance):
    return (resistance / 1000)    # умовна формула в ppb

def convert_ozone(voltage):
    return voltage * 200          # умовна градація

def convert_co(voltage):
    return voltage * 20           # умовна градація

# Перетворення сирих значень
sensor_data = {
    "temperature": round(convert_temperature(sensor_raw["temperature_raw"]), 2),
    "humidity": round(convert_humidity(sensor_raw["humidity_raw"]), 2),
    "co2": round(convert_co2(sensor_raw["co2_voltage"]), 2),
    "pm25": round(convert_pm25(sensor_raw["pm25_voltage"]), 2),
    "voc": round(convert_voc(sensor_raw["voc_resistance"]), 2),
    "ozone": round(convert_ozone(sensor_raw["ozone_voltage"]), 2),
    "co": round(convert_co(sensor_raw["co_voltage"]), 2)
}

# Функція для перевірки значень
def check_air_quality(data):
    results = {}
    for param, value in data.items():
        min_val, max_val = NORMALS.get(param, (None, None))
        if min_val is None:
            results[param] = "Немає норми"
        elif value < min_val:
            results[param] = f"Нижче норми (мін. {min_val})"
        elif value > max_val:
            results[param] = f"Вище норми (макс. {max_val})"
        else:
            results[param] = "У межах норми"
    return results

# Перевірка якості повітря
report = check_air_quality(sensor_data)

# Виведення звіту
for parameter, status in report.items():
    print(f"{parameter.upper()}: {status} (значення: {sensor_data[parameter]})")

```

Додаток Г
(обов'язковий)

ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Назва роботи: Автоматизована система вимірювання швидкості повітряного пото-

ку

Тип роботи: бакалаврська кваліфікаційна робота

(бакалаврська кваліфікаційна робота / магістерська кваліфікаційна робота)

Підрозділ АПТ, ФПТА, АКІТР-23мс

(кафедра, факультет, навчальна група)

Коефіцієнт подібності текстових запозичень, виявлених у роботі
системою StrikePlagiarism 199 %

Висновок щодо перевірки кваліфікаційної роботи (відмітити потрібне)

- ☒ Запозичення, виявлені у роботі, є законними і не містять ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації. Роботу прийняти до захисту
- ☐ У роботі не виявлено ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації, але надмірна кількість текстових запозичень та/або наявність типових розрахунків не дозволяють прийняти рішення про оригінальність та самостійність її виконання. Роботу направити на доопрацювання.
- ☐ У роботі виявлено ознаки плагіату та/або текстових маніпуляцій як спроб укриття плагіату, фабрикації, фальсифікації, що суперечить вимогам законодавства та нормам академічної доброчесності. Робота до захисту не приймається.

Експертна комісія:

Олег Бісікало, зав. каф. АПТ

(прізвище, ініціали, посада)

Людוב Янчук, секретар каф. АПТ

(прізвище, ініціали, посада)

(підпис)

(підпис)

Особа, відповідальна за перевірку

(підпис)

Овчинников К. В.

(прізвище, ініціали)

З висновком експертної комісії ознайомлений(-на)

Керівник

(підпис)

Бісікало О. В.

(прізвище, ініціали, посада)

Здобувач

(підпис)

Гелетка С. А.

(прізвище, ініціали)