

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДОНЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ ВАСИЛЯ
СТУСА

ПЕРЕПУЖНЯК НАЗАР СЕРГІЙОВИЧ

Допускається до захисту
завідувач кафедри біофізики
і фізіології кандидат хім. наук, доцент
_____ О. І. Доценко
« ____ » _____ 2024 р.

**РОЗРОБКА НИЗЬКОБЮДЖЕТНОГО ПРИСТРОЮ
МОНІТОРИНГУ ЯКОСТІ ПОВІТРЯ**

Спеціальність 101 Екологія
Кваліфікаційна (бакалаврська) робота

Керівник:
Міщенко А.М., к.б.н., старший викладач
кафедри біофізики та фізіології

Оцінка: ____ / ____ / ____
(бал/за шкалою ЄКТС/за національною шкалою)

Голова ЕК: _____

Вінниця 2024

АНОТАЦІЯ

Перепужняк Н.С. Розробка низькобюджетного пристрою моніторингу якості повітря. Кваліфікаційна робота бакалавра. Спеціальність 101 Екологія. Донецький національний університет імені Василя Стуса, Вінниця, 2024.

Забруднення атмосферного повітря має значний негативний вплив на здоров'я людини та навколишнє середовище. Існуючі системи моніторингу якості повітря мають обмеження через високу вартість обладнання та недостатню просторову роздільну здатність. Мета роботи полягає в розробці та дослідженні низькобюджетного пристрою моніторингу якості повітря на основі датчика твердих частинок PMS7003 та мікроконтролера ESP32.

Розроблено структурну та принципову схеми пристрою, виготовлено діючий прототип. Проведено калібрування та тестування пристрою в лабораторних та реальних умовах. Виконано порівняльний аналіз характеристик пристрою з існуючими аналогами за показниками точності та вартості. Встановлено, що розроблений пристрій має достатню точність вимірювань при значно нижчій вартості у порівнянні з комерційними аналізаторами.

Ключові слова: якість повітря, моніторинг, датчик твердих частинок, PMS7003, ESP32, низькобюджетний пристрій.

ABSTRACT

Perepuzhniak N.S. Development of a cost-effective air quality monitoring device. Bachelor's thesis. Specialty 101 Ecology. Vasyl' Stus Donetsk National University, Vinnytsia, 2024. A low-cost air quality monitoring device based on the PMS7003 particulate matter sensor and ESP32 microcontroller has been developed.

Air pollution has a significant negative impact on human health and the environment. Existing air quality monitoring systems have limitations due to high equipment costs and insufficient spatial resolution. The aim of the work is to develop and study a low-cost air quality monitoring device based on the PMS7003 particulate matter sensor and ESP32 microcontroller.

The structural and schematic diagrams of the device have been developed, and a working prototype has been manufactured. Calibration and testing of the device in laboratory and real conditions have been conducted. A comparative analysis of the device characteristics with existing analogues in terms of accuracy and cost has been performed. It has been established that the developed device has sufficient measurement accuracy at a significantly lower cost compared to commercial analyzers.

The prospects for using the device to create extensive air quality monitoring networks in urban environments have been evaluated. It has been shown that due to its low cost and compact size, the developed device can become the basis for deploying scalable and flexible monitoring systems with high spatial resolution, which will optimize environmental protection measures and increase public environmental awareness.

Keywords: air quality, monitoring, particulate matter sensor, PMS7003, ESP32, low-cost device.

ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ.....	2
ABSTRACT	3
ВСТУП.....	6
РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ МОНІТОРИНГУ ЯКОСТІ ПОВІТРЯ.....	9
1.1. Показники якості атмосферного повітря та їх нормування	9
1.2. Методи та засоби моніторингу якості повітря	15
1.3. Огляд існуючих пристроїв для моніторингу якості повітря.....	21
РОЗДІЛ 2. ОБ'ЄКТИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ	26
2.1. Вибір датчиків та компонентів для пристрою	26
2.2. Збір пристрою та написання програмного забезпечення	30
2.3. Калібрування та тестування розробленого пристрою.....	38
2.4. Порівняння точності вимірювань	43
2.5. Порівняння вартості пристроїв.....	46
РОЗДІЛ 3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА.....	49
3.1. Використання власної розробки у реальних умовах	49
3.2. Аналіз отриманих даних	53
3.3. Перспективи використання розробленого низькобюджетного пристрою	58
ВИСНОВКИ	62
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	64

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

- AQI — Air Quality Index (Індекс якості повітря)
- BLE — Bluetooth Low Energy (Низькоенергетичний Bluetooth)
- BR/EDR — Basic Rate/Enhanced Data Rate (Базова швидкість/Підвищена швидкість передачі даних для Bluetooth)
- CO — Монооксид вуглецю
- CO₂ — Діоксид вуглецю
- ГДК — Гранично допустима концентрація
- ГІС — Геоінформаційна система
- ETS — Environmental Tobacco Smoke (Навколишній тютюновий дим)
- ЛОС — Леткі органічні сполуки
- NO — Монооксид азоту
- NO₂ — Діоксид азоту
- NO_x — Оксиди азоту
- O₃ — Озон
- ОЗП — Оперативний запам'ятовуючий пристрій
- ПАВ — Поліциклічні ароматичні вуглеводні
- PM₁ — Particulate Matter (Тверді частинки розміром до 1 мкм)
- PM_{2.5} — Particulate Matter (Тверді частинки розміром до 2,5 мкм)
- PM₁₀ — Particulate Matter (Тверді частинки розміром до 10 мкм)
- SO₂ — Діоксид сірки
- SPI — Serial Peripheral Interface (Послідовний периферійний інтерфейс)
- TSP — Total Suspended Particulates (Загальний вміст зважених частинок)
- UART — Universal Asynchronous Receiver-Transmitter (Універсальний асинхронний приймач-передавач)
- USB — Universal Serial Bus (Універсальна послідовна шина)
- WiFi - Wireless Fidelity (Бездротова передача даних)
- АЦП — Аналого-цифровий перетворювач
- ЦАП — Цифро-аналоговий перетворювач

ВСТУП

Актуальність дослідження. Атмосферне повітря є одним з найважливіших компонентів навколишнього середовища, який забезпечує життєдіяльність людини та функціонування екосистем. Проте, внаслідок інтенсивного розвитку промисловості, транспорту та урбанізації, якість повітря зазнає значного негативного впливу. Забруднення атмосферного повітря твердими частинками, оксидами сірки та азоту, леткими органічними сполуками та іншими поллютантами може призводити до серйозних наслідків для здоров'я людини, таких як респіраторні та серцево-судинні захворювання, алергічні реакції, онкологічні патології тощо [1]. Крім того, забруднення повітря має негативний вплив на рослинність, ґрунти, водні об'єкти та кліматичні процеси [2].

У зв'язку з цим, моніторинг якості атмосферного повітря є надзвичайно важливим завданням для забезпечення екологічної безпеки та сталого розвитку суспільства. Своєчасне виявлення підвищених рівнів забруднення повітря дозволяє вжити необхідних заходів для мінімізації негативного впливу на здоров'я людей та довкілля, оптимізувати процеси виробництва та транспортування, а також розробляти ефективні природоохоронні стратегії [3].

Традиційні системи моніторингу якості повітря, які базуються на мережі стаціонарних постів спостереження, мають суттєві обмеження, пов'язані з високою вартістю обладнання, необхідністю регулярного обслуговування та калібрування, а також недостатньою просторовою роздільною здатністю [4]. Це зумовлює потребу в розробці альтернативних рішень, які б дозволяли здійснювати моніторинг якості повітря з високою ефективністю та доступністю для широкого кола користувачів.

Останнім часом, завдяки розвитку мікроелектроніки та інформаційних технологій, набувають популярності низькобюджетні сенсорні пристрої для моніторингу якості повітря [5]. Ці пристрої, як правило, базуються на недорогих датчиках твердих частинок, газів та метеорологічних параметрів, а

також використовують мікроконтролери та модулі бездротового зв'язку для збору та передачі даних. Низькобюджетні сенсорні пристрої мають значний потенціал для створення розгалужених мереж моніторингу якості повітря з високою просторовою та часовою роздільною здатністю [6].

Незважаючи на переваги низькобюджетних сенсорних пристроїв, їх широке впровадження стримується рядом факторів, зокрема, недостатньою точністю вимірювань порівняно з традиційними методами, відсутністю стандартизованих протоколів калібрування та валідації даних, а також потребою в ефективних алгоритмах обробки та аналізу великих обсягів інформації, що генерується сенсорними мережами [7].

Враховуючи вищезазначене, розробка та дослідження низькобюджетних пристроїв моніторингу якості повітря є актуальним науково-практичним завданням, що потребує комплексного підходу та залучення сучасних технологічних рішень.

Метою цієї роботи є розробка та дослідження низькобюджетного пристрою моніторингу якості повітря на основі датчика твердих частинок PMS7003 та мікроконтролера ESP32, а також оцінка його характеристик у порівнянні з існуючими аналогами.

Для досягнення поставленої мети були визначені наступні **завдання**:

- Проаналізувати сучасний стан проблеми забруднення атмосферного повітря та існуючі методи і засоби моніторингу його якості.
- Обґрунтувати вибір компонентної бази для розробки низькобюджетного пристрою моніторингу якості повітря.
- Розробити структурну та принципову схеми пристрою, а також виготовити діючий прототип.
- Розробити програмне забезпечення для апаратної частини модуля та мобільного додатку для дистанційного керування приладом.
- Випробувати роботу приладу в міських умовах, здійснити оцінку індивідуальної експозиційної дози при пересуванні заданими маршрутами в межах міста.

Об'єктом дослідження є процес моніторингу якості атмосферного повітря з використанням низькобюджетних сенсорних пристроїв.

Предметом дослідження є структура, характеристики та функціональні можливості низькобюджетного пристрою моніторингу якості повітря на основі датчика PMS7003 та мікроконтролера ESP32.

Методи дослідження включають теоретичний аналіз літературних джерел, експериментальні дослідження характеристик розробленого пристрою, методи математичної статистики для обробки результатів вимірювань, а також методи порівняльного аналізу для оцінки ефективності розробленого рішення.

Наукова новизна роботи полягає в розробці оригінальної структури низькобюджетного пристрою моніторингу якості повітря з покращеними характеристиками точності та енергоефективності.

Практичне значення одержаних результатів визначається можливістю використання розробленого пристрою для персонального моніторингу якості повітря в реальному час, оцінки індивідуальної експозиційної дози, створення розгалужених мереж моніторингу якості повітря в умовах міського середовища з метою інформування населення про рівень забруднення, оптимізації природоохоронних заходів та прийняття управлінських рішень в сфері екологічної безпеки.

РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ МОНІТОРИНГУ ЯКОСТІ ПОВІТРЯ

1.1. Показники якості атмосферного повітря та їх нормування

Атмосферне повітря є однією з найважливіших складових навколишнього середовища, яке забезпечує життєдіяльність людини та всього живого на планеті. Проте, з розвитком промисловості, транспорту та урбанізації, якість повітря зазнає значного негативного впливу. Забруднення атмосферного повітря може призвести до серйозних наслідків для здоров'я людини, екосистем та кліматичних змін. Тому моніторинг та контроль якості повітря є надзвичайно важливими для забезпечення екологічної безпеки та сталого розвитку [2].

Для оцінки якості атмосферного повітря використовуються різні показники, які характеризують вміст забруднюючих речовин та їх вплив на довкілля. Основними показниками якості повітря є концентрації забруднюючих речовин, які вимірюються в міліграмах на кубічний метр (мг/м^3) або в частках на мільйон (ppm).

Тверді частинки, або пил, є одними з найбільш поширених забруднювачів атмосферного повітря. Вони можуть мати природне походження (наприклад, пил від ерозії ґрунтів, вулканічний попіл) або антропогенне (викиди промисловості, транспорту, спалювання палива тощо). Найбільш небезпечними для здоров'я людини є частинки розміром менше 10 мкм (PM10) та менше 2,5 мкм (PM2.5), оскільки вони здатні проникати глибоко в дихальні шляхи та легені, викликаючи респіраторні та серцево-судинні захворювання [3].

Вплив твердих частинок на здоров'я людини залежить від їх розміру, концентрації та хімічного складу. Частинки PM2.5 можуть містити токсичні речовини, такі як важкі метали (свинець, кадмій, ртуть), поліциклічні ароматичні вуглеводні (ПАВ), діоксини тощо. Тривалий вплив високих

концентрацій твердих частинок може призвести до збільшення ризику розвитку респіраторних захворювань (бронхіту, астми), серцево-судинних захворювань (інфаркту міокарда, інсульту), раку легень та передчасної смерті.

Таблиця 1.1.

Класифікація твердих частинок за розміром

Позначення	Розмір частинок
TSP (total suspended particulates)	Загальний вміст зважених частинок
PM10	Частинки розміром менше 10 мкм
PM2.5	Частинки розміром менше 2,5 мкм
PM1	Частинки розміром менше 1 мкм
PM0.1	Частинки розміром менше 0,1 мкм (ультрадрібні)

Джерело: складено автором за [9;11]

Діоксид сірки (SO_2) Діоксид сірки є безбарвним газом з різким запахом, який утворюється при спалюванні викопного палива, що містить сірку (вугілля, нафта, мазут). Основними джерелами діоксиду сірки є теплові електростанції, промислові підприємства (металургійні, хімічні, нафтопереробні), а також вулканічна активність [4].

Діоксид сірки є подразником для дихальних шляхів та може викликати такі симптоми, як кашель, задишка, біль у горлі та грудях. При високих концентраціях діоксид сірки може спричинити бронхоспазм та загострення респіраторних захворювань, таких як астма та хронічний бронхіт. Тривалий вплив діоксиду сірки може призвести до зниження функції легень та підвищення ризику інфекційних захворювань дихальних шляхів.

Крім впливу на здоров'я людини, діоксид сірки також має негативний вплив на навколишнє середовище. У атмосфері діоксид сірки може взаємодіяти з водою, киснем та іншими сполуками, утворюючи сірчану кислоту (H_2SO_4) та сульфати, речовини є основними компонентами кислотних дощів, які завдають шкоди рослинності, ґрунтам та водним екосистемам.

Оксиди азоту (NO_x) Оксиди азоту утворюються при високотемпературних процесах горіння, зокрема у двигунах внутрішнього згоряння автомобілів, на

теплових електростанціях, промислових підприємствах тощо. Група оксидів азоту включає монооксид азоту (NO) та діоксид азоту (NO₂), який є більш токсичним [9].

Вплив оксидів азоту на здоров'я людини подібний до впливу діоксиду сірки. Вони можуть викликати подразнення дихальних шляхів, кашель, задишку, зниження функції легень та загострення респіраторних захворювань. При високих концентраціях оксиди азоту можуть спричинити набряк легень та навіть смерть.

Оксиди азоту також відіграють важливу роль у формуванні фотохімічного смогу. В атмосфері під дією сонячного світла вони вступають у реакцію з леткими органічними сполуками (ЛОС), утворюючи приземний озон та інші вторинні забруднювачі. Фотохімічний смог може викликати подразнення очей, горла, кашель, головний біль та загострення респіраторних захворювань.

Озон (O₃) Озон є вторинним забруднювачем, який утворюється в нижніх шарах атмосфери (тропосфері) внаслідок фотохімічних реакцій між оксидами азоту та леткими органічними сполуками (ЛОС) під дією сонячного світла. На відміну від стратосферного озону, який виконує захисну функцію, поглинаючи ультрафіолетове випромінювання, приземний озон є забруднювачем повітря.

Високі концентрації приземного озону можуть викликати подразнення дихальних шляхів, кашель, задишку, біль у грудях та загострення респіраторних захворювань, таких як астма та хронічний бронхіт. Тривалий вплив озону може призвести до зниження функції легень та підвищення ризику передчасної смерті від респіраторних причин.

Приземний озон також має негативний вплив на рослинність. Він може проникати через прориди листя та пошкоджувати клітини рослин, зменшуючи їх ріст та врожайність. Озон є одним з основних компонентів фотохімічного смогу, який утворюється в містах з інтенсивним транспортним рухом та промисловими викидами. Монооксид вуглецю (CO) Монооксид вуглецю

утворюється при неповному згорянні вуглецевмісних палив, таких як бензин, дизельне паливо, природний газ, вугілля, деревина тощо. Основними джерелами монооксиду вуглецю є вихлопні гази автомобілів, промислові викиди, побутові печі та каміни [15].

Монооксид вуглецю є надзвичайно токсичним газом, який при вдиханні зв'язується з гемоглобіном крові, утворюючи карбоксигемоглобін (COHb). Це зменшує здатність крові переносити кисень до тканин організму, що призводить до гіпоксії (кисневого голодування). Симптоми отруєння монооксидом вуглецю включають головний біль, запаморочення, нудоту, слабкість, сплутаність свідомості та непритомність. При високих концентраціях монооксид вуглецю може спричинити кому та смерть.

Хронічний вплив монооксиду вуглецю може негативно впливати на серцево-судинну та нервову системи, викликаючи підвищення ризику серцево-судинних захворювань, когнітивних порушень та неврологічних розладів.

Леткі органічні сполуки (ЛОС) Леткі органічні сполуки (ЛОС) — це велика група органічних речовин, які легко випаровуються за нормальних умов. До них належать вуглеводні (бензол, толуол, ксилол), альдегіди (формальдегід, ацетальдегід), кетони (ацетон), спирти (метанол, етанол), хлоровані вуглеводні (дихлорометан, трихлоретилен) та інші [18].

ЛОС можуть виділятися з різноманітних джерел, включаючи промислові процеси (хімічна, нафтохімічна, лакофарбова промисловість), використання розчинників (фарби, лаки, клеї, засоби для чищення), випаровування палива (бензину, дизельного палива), неповне згоряння палива у двигунах внутрішнього згоряння тощо.

Вплив ЛОС на здоров'я людини залежить від конкретної сполуки, її концентрації та тривалості впливу. Деякі ЛОС, такі як бензол та формальдегід, є канцерогенними та можуть підвищувати ризик розвитку лейкемії та раку дихальних шляхів. Інші ЛОС можуть викликати подразнення очей, носа, горла, головний біль, нудоту, запаморочення та алергічні реакції. Тривалий

вплив високих концентрацій ЛОС може призвести до ураження печінки, нирок та нервової системи.

ЛОС також відіграють важливу роль у формуванні приземного озону та фотохімічного смогу. В атмосфері під дією сонячного світла вони вступають у реакцію з оксидами азоту, утворюючи вторинні забруднювачі, які негативно впливають на здоров'я людини та навколишнє середовище.

Важкі метали — це група металів з високою атомною масою та густиною, які можуть накопичуватися в організмі людини та чинити токсичний вплив навіть при низьких концентраціях. До важких металів, які є забруднювачами атмосферного повітря, належать свинець (Pb), кадмій (Cd), ртуть (Hg), миш'як (As), нікель (Ni), хром (Cr) та інші.

Джерелами важких металів в атмосферному повітрі можуть бути промислові викиди (металургійна, хімічна промисловість), спалювання викопного палива (вугілля, нафта), спалювання відходів, використання пестицидів та добрив, зношування гальмівних колодок та шин автомобілів тощо.

Вплив важких металів на здоров'я людини є різноманітним і залежить від конкретного металу, його концентрації та тривалості впливу. Свинець може викликати ураження нервової системи, нирок та репродуктивної системи, затримку розумового розвитку у дітей. Кадмій може пошкоджувати нирки, легені та кісткову тканину. Ртуть має нейротоксичну дію і може викликати порушення розвитку плоду. Миш'як є канцерогеном і може спричинити рак легень, шкіри та сечового міхура.

Важкі метали можуть потрапляти в організм людини через дихальні шляхи, а також накопичуватися в ґрунті та воді, потрапляючи в харчовий ланцюг. Тому моніторинг та контроль вмісту важких металів в атмосферному повітрі є важливим завданням для забезпечення охорони здоров'я населення та навколишнього середовища.

Для забезпечення охорони атмосферного повітря та здоров'я населення встановлюються нормативи якості повітря. Ці нормативи визначають

максимально допустимі концентрації (ГДК) забруднюючих речовин в атмосферному повітрі, які не повинні перевищуватись протягом певного періоду часу. Нормативи якості повітря розробляються на основі наукових досліджень щодо впливу забруднюючих речовин на здоров'я людини та навколишнє середовище.

В Україні нормативи якості атмосферного повітря регулюються Законом України «Про охорону атмосферного повітря» та відповідними підзаконними актами. Зокрема, встановлено ГДК для основних забруднюючих речовин, таких як діоксид сірки, діоксид азоту, тверді частинки (пил), монооксид вуглецю, озон, свинець та інші. Ці нормативи періодично переглядаються та оновлюються з урахуванням нових наукових даних та міжнародних стандартів.

Для контролю за дотриманням нормативів якості повітря здійснюється моніторинг атмосферного повітря. Моніторинг передбачає систематичні спостереження, збір та аналіз даних про концентрації забруднюючих речовин в атмосферному повітрі. В Україні функціонує державна система моніторингу довкілля, яка включає мережу стаціонарних та мобільних постів спостереження за якістю повітря. Дані моніторингу використовуються для оцінки стану атмосферного повітря, виявлення джерел забруднення та розробки заходів щодо зменшення викидів.

Крім державного моніторингу, в Україні також здійснюється громадський моніторинг якості повітря. Громадські організації та ініціативні групи встановлюють власні пости спостереження та проводять вимірювання концентрацій забруднюючих речовин. Результати громадського моніторингу можуть використовуватися для інформування населення про стан атмосферного повітря та привернення уваги до проблем забруднення.

Для покращення якості атмосферного повітря необхідно вживати комплексних заходів на різних рівнях. На державному рівні це передбачає вдосконалення законодавства, посилення контролю за дотриманням нормативів викидів, впровадження економічних інструментів (екологічних

податків, торгівлі квотами на викиди) та стимулювання переходу на екологічно чисті технології. На місцевому рівні важливо розвивати екологічно дружню інфраструктуру, зокрема громадський транспорт, велосипедні доріжки, зелені зони тощо.

Значну роль у зменшенні забруднення атмосферного повітря відіграє також екологічна свідомість та відповідальність кожного громадянина. Це включає використання енергоефективних технологій, економне використання ресурсів, відмову від спалювання відходів, надання переваги екологічно чистим видам транспорту тощо. Підвищення обізнаності населення щодо проблем забруднення повітря та шляхів їх вирішення є важливим аспектом формування екологічної культури суспільства.

Отже, показники якості атмосферного повітря та їх нормування є ключовими елементами моніторингу та контролю за станом повітряного середовища. Вони дозволяють оцінювати рівень забруднення, виявляти джерела негативного впливу та розробляти ефективні заходи щодо покращення якості повітря. Забезпечення чистого атмосферного повітря є спільною відповідальністю держави, бізнесу та кожного громадянина, адже від цього залежить здоров'я людей та стан навколишнього середовища.

Отже, детальний розгляд основних забруднюючих речовин в атмосферному повітрі, їх впливу на здоров'я людини та навколишнє середовище, а також нормування їх вмісту є важливою складовою моніторингу якості повітря. Ефективний контроль та зменшення викидів цих речовин потребує комплексного підходу та співпраці держави, бізнесу та громадянського суспільства. Тільки спільними зусиллями можна забезпечити чисте та безпечне атмосферне повітря для нинішнього та майбутніх поколінь.

1.2. Методи та засоби моніторингу якості повітря

Моніторинг якості повітря є важливою складовою екологічного контролю, що дозволяє оцінити стан атмосферного повітря та вжити

необхідних заходів для його покращення. Для ефективного здійснення моніторингу застосовуються різноманітні методи та засоби, які дають змогу отримати достовірну інформацію про концентрації забруднюючих речовин у повітрі.

Основними методами моніторингу якості повітря є стаціонарні пости спостереження, мобільні лабораторії, пасивні методи відбору проб, біомоніторинг та дистанційне зондування. Стаціонарні пости спостереження — це спеціально обладнані станції, які розміщуються у певних точках міста чи регіону і здійснюють безперервний моніторинг складу атмосферного повітря. Вони оснащені автоматизованими системами відбору проб та аналізу, що дозволяє отримувати дані у режимі реального часу. Стаціонарні пости можуть бути як автоматизованими, так і з ручним відбором проб. Мобільні лабораторії — це пересувні станції моніторингу, які дозволяють здійснювати вимірювання у різних точках місцевості. Вони оснащені необхідним обладнанням для відбору проб повітря та їх аналізу безпосередньо на місці. Мобільні лабораторії особливо ефективні при дослідженні локальних джерел забруднення або при настанні надзвичайних ситуацій.

Пасивні методи відбору проб базуються на використанні спеціальних пробовідбірників (дифузійних або адсорбційних), які накопичують забруднюючі речовини з повітря протягом певного часу. Після експозиції пробовідбірники відправляються у лабораторію для аналізу. Перевагами цього методу є простота, низька вартість та можливість охопити велику кількість точок відбору проб. Біомоніторинг — це метод оцінки якості повітря з використанням живих організмів (рослин, лишайників, мохів тощо), які здатні накопичувати забруднюючі речовини. Аналіз вмісту полутантів у тканинах цих організмів дає змогу оцінити рівень та динаміку забруднення повітря у даній місцевості.

Дистанційне зондування базується на використанні супутників та інших технологій дистанційного зондування Землі для отримання даних про стан атмосфери. Цей метод дозволяє охопити великі території та отримати

інформацію про концентрації певних забруднюючих речовин, наприклад, діоксиду азоту, твердих часток тощо. Вибір методу моніторингу залежить від поставлених завдань, особливостей досліджуваної території, наявних ресурсів тощо. Часто для отримання повної картини застосовується комбінація різних методів.

Засоби моніторингу якості повітря включають широкий спектр обладнання та приладів, які використовуються для відбору проб, вимірювання концентрацій забруднюючих речовин та аналізу отриманих даних. До основних засобів належать газоаналізатори, які здійснюють вимірювання концентрацій окремих газів, таких як CO, NO, NO₂, SO₂, O₃ тощо, електрохімічними, оптичними або хроматографічними методами. Вони застосовуються на стаціонарних та мобільних постах, а також для контролю промислових викидів.

Для моніторингу запиленості повітря використовуються пиломіри, які вимірюють масову концентрацію твердих часток у повітрі гравіметричним методом або на основі оптичних принципів. Аспіратори слугують для відбору проб повітря з постійною об'ємною швидкістю з метою подальшого лабораторного аналізу.

Важливу роль відіграють також метеорологічні прилади, які здійснюють вимірювання параметрів атмосфери, таких як температура, вологість, швидкість вітру, атмосферний тиск. Врахування метеорологічних факторів є необхідним при інтерпретації даних моніторингу, оскільки вони впливають на процеси розсіювання та перенесення забруднюючих речовин в атмосфері.

Для забезпечення безперервного відбору та аналізу проб повітря у реальному часі з передачею даних на сервер використовуються автоматизовані системи моніторингу. Вони являють собою комплекси приладів та обладнання, які встановлюються на стаціонарних постах та слугують для оперативного отримання інформації про стан атмосферного повітря. Автоматизовані системи відіграють важливу роль у функціонуванні систем раннього попередження про небезпечні рівні забруднення повітря.

Окрім безпосередніх вимірювань за допомогою технічних засобів, невід'ємною складовою моніторингу якості повітря є лабораторний аналіз відібраних проб. У лабораторіях застосовуються високоточні методи, такі як хроматографія, мас-спектрометрія, атомно-абсорбційна спектрометрія, які дають змогу ідентифікувати та кількісно визначити вміст широкого спектру хімічних речовин у пробах повітря. Це дозволяє отримати детальну інформацію про хімічний склад атмосферного повітря та виявити присутність специфічних забруднювачів.

Для забезпечення ефективного функціонування системи моніторингу якості повітря, окрім технічних засобів, необхідне відповідне нормативно-правове, методичне та інформаційне забезпечення. Це включає розробку та впровадження стандартів і нормативів якості атмосферного повітря, які встановлюють гранично допустимі концентрації забруднюючих речовин. Важливе значення мають методики відбору проб та виконання вимірювань, які регламентують процедури та вимоги до проведення моніторингу.

Для систематизації та ефективного використання результатів моніторингу створюються бази даних, які містять інформацію про концентрації забруднюючих речовин, метеорологічні параметри, відомості про джерела викидів тощо. Спеціальні системи обробки та інтерпретації даних дозволяють аналізувати отриману інформацію, виявляти тенденції та закономірності, прогнозувати зміни якості повітря.

У рамках системи моніторингу повинні бути передбачені механізми оповіщення та прийняття рішень у випадку виявлення перевищень гранично допустимих концентрацій забруднюючих речовин або настання небезпечних метеорологічних умов.

Особлива увага в системі моніторингу приділяється забезпеченню якості вимірювань та достовірності отриманих даних. Для цього здійснюється регулярна повірка та калібрування засобів виміральної техніки, впроваджуються системи контролю якості, проводяться міжлабораторні порівняльні дослідження.

Сучасні тенденції розвитку системи моніторингу якості повітря пов'язані з автоматизацією процесів та впровадженням інноваційних інформаційних технологій. Зокрема, широкого поширення набувають системи онлайн-моніторингу з використанням сенсорних мереж та технологій інтернету речей. Вони дозволяють отримувати дані про стан атмосферного повітря у режимі реального часу та забезпечувати їх оперативну обробку та візуалізацію.

Однак, ефективність системи моніторингу якості повітря залежить не лише від технічного оснащення та інформаційного забезпечення, але й від належної організації процесу спостережень, забезпечення якості даних, своєчасного реагування на виявлені відхилення та активного залучення громадськості. Лише комплексний підхід, який поєднує використання сучасних методів та засобів моніторингу, потужну інформаційну підтримку та ефективну взаємодію між усіма зацікавленими сторонами, дозволить отримувати об'єктивну картину стану атмосферного повітря та приймати обґрунтовані рішення щодо його покращення та збереження.

Таким чином, методи та засоби моніторингу якості повітря відіграють ключову роль у забезпеченні ефективного контролю за станом атмосферного повітря та вчасного реагування на виклики, пов'язані із забрудненням довкілля. Їх розвиток та вдосконалення є неодмінною умовою для досягнення цілей сталого розвитку та збереження здоров'я населення і природних екосистем.

Таблиця 1.2.

Засоби моніторингу

Засіб моніторингу	Принцип дії	Застосування
Газоаналізатори	Вимірювання концентрацій окремих газів (CO, NO, NO ₂ , SO ₂ , O ₃ тощо) електрохімічними, оптичними або хроматографічними методами	Стаціонарні та мобільні пости, промислові викиди
Пиломіри	Вимірювання масової концентрації твердих часток у повітрі гравіметричним методом або на основі оптичних принципів	Моніторинг запиленості повітря у містах та на виробництві

Аспіратори	Відбір проб повітря з постійною об'ємною швидкістю для подальшого лабораторного аналізу	Дослідження хімічного складу повітря, визначення концентрацій специфічних забруднювачів
Метеорологічні прилади	Вимірювання параметрів атмосфери (температури, вологості, швидкості вітру, атмосферного тиску)	Врахування метеорологічних факторів при інтерпретації даних моніторингу
Автоматизовані системи	Комплекси приладів та обладнання для безперервного відбору та аналізу проб повітря у реальному часі з передачею даних на сервер	Стаціонарні пости моніторингу, системи раннього попередження

Джерело: складено автором за [9;16]

Важливою складовою моніторингу є також лабораторне обладнання для детального аналізу відібраних проб повітря. У лабораторіях застосовуються такі методи, як хроматографія, мас-спектрометрія, атомно-абсорбційна спектрометрія, які дозволяють ідентифікувати та кількісно визначити вміст широкого спектру хімічних речовин.

Окрім технічних засобів, для ефективного функціонування системи моніторингу якості повітря необхідне відповідне нормативно-правове, методичне та інформаційне забезпечення. Це включає:

- стандарти та нормативи якості атмосферного повітря;
- методики відбору проб та виконання вимірювань;
- бази даних результатів моніторингу;
- системи обробки та інтерпретації даних;
- механізми оповіщення та прийняття рішень. Особлива увага приділяється забезпеченню якості вимірювань та достовірності отриманих даних. Для цього здійснюється регулярна повірка та калібрування засобів вимірювальної техніки, впроваджуються системи контролю якості, проводяться міжлабораторні порівняльні дослідження.

На сьогодні спостерігається тенденція до автоматизації процесів моніторингу якості повітря та впровадження сучасних інформаційних технологій. Це дозволяє підвищити оперативність отримання та обробки

даних, забезпечити їх доступність для широкого кола користувачів. Розвиваються системи онлайн-моніторингу з використанням сенсорних мереж та інтернету речей, які дають змогу отримувати інформацію про стан атмосферного повітря у режимі реального часу.

Варто зазначити, що ефективність системи моніторингу залежить не лише від технічного оснащення, але й від належної організації процесу спостережень, забезпечення якості даних, своєчасного реагування на виявлені відхилення та залучення громадськості. Лише комплексний підхід до моніторингу з використанням сучасних методів та засобів, а також належного інформаційного забезпечення дозволить отримувати об'єктивну картину стану атмосферного повітря та приймати обґрунтовані рішення щодо його покращення.

1.3. Огляд існуючих пристроїв для моніторингу якості повітря

Почнемо з монітора якості повітря Airthings Wave Plus, пристрій є унікальним тим, що окрім стандартних параметрів якості повітря, таких як CO₂, ЛОС (леткі органічні сполуки), температура та вологість, він також вимірює рівень радону в приміщенні. Радон – це радіоактивний газ, який утворюється внаслідок розпаду урану в ґрунті та може накопичуватися в будівлях, особливо в підвальних приміщеннях. Тривалий вплив підвищених концентрацій радону може збільшувати ризик розвитку раку легенів, тому моніторинг рівня цього газу є важливим для здоров'я людей.

Airthings Wave Plus використовує спеціальну камеру для детектування альфа-частинок, які утворюються при розпаді радону, технологія дозволяє точно вимірювати концентрацію радону в повітрі навіть при низьких рівнях. Для вимірювання концентрації CO₂ пристрій використовує сенсор на основі недисперсійної інфрачервоної спектроскопії (NDIR), метод базується на поглинанні молекулами CO₂ інфрачервоного випромінювання певної

довжини хвилі. Чим вища концентрація CO₂, тим більше випромінювання поглинається, що дозволяє визначити кількість цього газу в повітрі.

Дані з Airthings Wave Plus передаються на смартфон користувача через Bluetooth. Мобільний додаток дозволяє відстежувати динаміку зміни параметрів якості повітря з часом, встановлювати цільові значення та отримувати сповіщення у разі перевищення порогових рівнів. Крім того, пристрій має кольорове LED-кільце, яке змінює колір залежно від рівня забруднення повітря, що дозволяє швидко оцінити ситуацію навіть без використання смартфона.

Перейдемо до монітора якості повітря Kaiterra Laser Egg+ Chemical. Цей пристрій вимірює концентрації PM_{2.5} (твердих частинок розміром до 2,5 мкм), ЛОС, а також температуру та вологість повітря в приміщенні. Для вимірювання PM_{2.5} використовується лазерний сенсор, який працює за принципом розсіювання світла. Коли лазерний промінь потрапляє на частинки в повітрі, вони розсіюють світло під різними кутами залежно від свого розміру. Аналізуючи характер розсіяного світла, сенсор може визначити концентрацію та розподіл за розмірами твердих частинок у повітрі.

Для вимірювання ЛОС Kaiterra Laser Egg+ Chemical використовує металооксидний сенсор, тип сенсора складається з нагрівального елемента та чутливого шару оксиду металу, електропровідність якого змінюється при адсорбції молекул ЛОС на його поверхні. Зміна електропровідності реєструється та перетворюється на значення концентрації ЛОС у повітрі.

Цікавою особливістю Kaiterra Laser Egg+ Chemical є наявність кольорового LCD-дисплея, на якому відображаються поточні значення вимірюваних параметрів, а також індекс якості повітря (AQI) відповідно до міжнародних стандартів, що дозволяє користувачеві миттєво оцінити рівень забруднення повітря в приміщенні без необхідності використання додаткових пристроїв. Крім того, монітор може підключатися до домашньої мережі Wi-Fi, що дає змогу віддалено відстежувати показники якості повітря через

мобільний додаток та отримувати сповіщення у разі перевищення встановлених порогових значень.

Нарешті, розглянемо портативний монітор якості повітря Atmotube Pro. Цей пристрій розроблений для персонального моніторингу якості повітря як у приміщеннях, так і на відкритому повітрі. Його компактний розмір дозволяє носити пристрій із собою та відстежувати параметри якості повітря протягом дня в різних локаціях – вдома, в офісі, в громадському транспорті або під час прогулянок містом.

Atmotube Pro вимірює концентрації ЛОС, CO₂, а також температуру, вологість та атмосферний тиск. Для вимірювання ЛОС та CO₂ використовуються металооксидні сенсори, принцип роботи яких описаний вище. Додатково пристрій оснащений сенсорами температури, вологості та атмосферного тиску, що дозволяє відстежувати і ці параметри, які також впливають на комфортність та безпечність повітря.

Дані з Atmotube Pro передаються на смартфон користувача через Bluetooth. Мобільний додаток дозволяє переглядати поточні показники якості повітря, а також історію вимірювань за певний період. Додаток також надає рекомендації щодо покращення якості повітря та сповіщає користувача у разі перевищення безпечних рівнів забруднення.

Особливістю Atmotube Pro є наявність вбудованого акумулятора, який забезпечує автономну роботу пристрою протягом тривалого часу без необхідності постійного підключення до джерела живлення. Це робить пристрій зручним для використання під час переміщень та подорожей.

Підсумовуючи, можна сказати, що розглянуті портативні монітори якості повітря пропонують зручні та доступні рішення для персонального контролю за параметрами повітря, яким ми дихаємо. Вони дозволяють відстежувати ключові показники, такі як PM_{2.5}, ЛОС, CO₂, радон, температуру та вологість, і вчасно реагувати на погіршення якості повітря.

Airthings Wave Plus вирізняється можливістю вимірювання рівня радону, що особливо актуально для приміщень із потенційним ризиком накопичення

цього небезпечного газу. Kaiterra Laser Egg+ Chemical пропонує зручний спосіб моніторингу якості повітря в приміщенні завдяки вбудованому дисплею та можливості віддаленого контролю через Wi-Fi. А Atmotube Pro є ідеальним супутником для людей, які прагнуть контролювати якість повітря не лише вдома, а й під час своїх щоденних активностей.

Використання цих пристроїв допомагає підвищити обізнаність людей про якість повітря в їхньому оточенні та вживати заходів для її покращення, наприклад, частіше провітрювати приміщення, використовувати очищувачі повітря або уникати місць із високим рівнем забруднення.

Варто зазначити, що портативні монітори якості повітря не можуть повністю замінити професійні стаціонарні системи моніторингу, які забезпечують вищу точність і повноту вимірювань. Однак вони є доступним та зручним інструментом для особистого контролю за якістю повітря та можуть допомогти у прийнятті обґрунтованих рішень щодо способу життя та побутових умов.

Окрім розглянутих пристроїв, на ринку присутні й інші моделі портативних моніторів якості повітря від різних виробників, які пропонують схожі функції та можливості. Вибір конкретного пристрою залежить від індивідуальних потреб та переваг користувача, а також від доступного бюджету.

У майбутньому можна очікувати подальшого розвитку технологій сенсорів та мініатюризації електронних компонентів, що дозволить створювати ще більш компактні, точні та функціональні портативні монітори якості повітря. Також можна прогнозувати більш тісну інтеграцію цих пристроїв з іншими системами розумного дому та інтернету речей, що дасть змогу автоматизувати контроль та управління якістю повітря в приміщеннях.

Крім того, важливим напрямком розвитку є підвищення доступності та популяризація використання портативних моніторів якості повітря серед широких верств населення.

Підсумовуючи, можна сказати, що портативні монітори якості повітря, такі як Airthings Wave Plus, Kaiterra Laser Egg+ Chemical та Atmotube Pro, є важливими інструментами для персонального контролю за якістю повітря та збереження здоров'я людей в умовах зростаючого забруднення довкілля. Вони пропонують зручні та доступні рішення для відстеження ключових параметрів якості повітря та вчасного реагування на їх погіршення. З розвитком технологій та підвищенням обізнаності населення можна очікувати подальшого поширення та вдосконалення цих пристроїв, що сприятиме покращенню якості життя та збереженню довкілля для майбутніх поколінь.

РОЗДІЛ 2. ОБ'ЄКТИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1. Вибір датчиків та компонентів для пристрою

Для розробки низькобюджетного пристрою моніторингу якості повітря необхідно обрати відповідні датчики та компоненти, які забезпечать точність вимірювань, надійність роботи та економічну ефективність. Основним елементом пристрою є датчик для вимірювання концентрації твердих частинок у повітрі. Серед доступних на ринку варіантів оптимальним вибором є датчик PMS7003 від компанії Plantower (Додаток А).

Датчик PMS7003 — це компактний лазерний датчик, призначений для вимірювання концентрації твердих частинок розміром від 0,3 до 10 мкм. Він використовує принцип розсіювання лазерного випромінювання для підрахунку кількості частинок у певному об'ємі повітря. PMS7003 здатний вимірювати концентрацію частинок у трьох діапазонах — PM1.0 (частинки розміром до 1 мкм), PM2.5 (до 2,5 мкм) та PM10 (до 10 мкм), показники є важливими для оцінки якості повітря та його впливу на здоров'я людини.

Серед переваг датчика PMS7003 можна виділити такі:

- Висока точність вимірювань. Датчик забезпечує точність вимірювання концентрації частинок на рівні ± 10 мкг/м³ у діапазоні 0-100 мкг/м³ та $\pm 10\%$ у діапазоні 100-1000 мкг/м³.
- Низьке енергоспоживання. PMS7003 споживає лише 100 мА під час роботи, що дозволяє використовувати його у портативних пристроях з автономним живленням.
- Компактні розміри. Габарити датчика складають лише 38x35x12 мм, що спрощує його інтеграцію у компактні пристрої.
- Цифровий інтерфейс. Датчик оснащений послідовним інтерфейсом UART, який дозволяє легко підключити його до мікроконтролера або одноплатного комп'ютера.

— Доступна ціна. Порівняно з професійними аналізаторами якості повітря, датчик PMS7003 має значно нижчу вартість, що робить його привабливим для використання у низькобюджетних проектах.

Таблиця 2.1.

Технічні характеристики датчика PMS7003

Параметр	Значення
Діапазон вимірювання	0-1000 мкг/м ³
Розміри частинок	PM1.0, PM2.5, PM10
Точність	±10 мкг/м ³ (0-100 мкг/м ³) ±10% (100-1000 мкг/м ³)
Інтерфейс	UART (3.3V)
Енергоспоживання	100 мА
Розміри	38x35x12 мм
Робоча температура	-10...+60°C

Джерело: складено автором на основі [10;17]

Для керування роботою датчика PMS7003 та обробки отриманих даних необхідно використати мікроконтролер або одноплатний комп'ютер. Оптимальним вибором є мікроконтролер ESP32, який має достатню обчислювальну потужність, вбудовані модулі бездротового зв'язку та низьке енергоспоживання.

ESP32 — це серія мікроконтролерів від компанії Espressif Systems, які базуються на 32-бітному ядрі Tensilica Xtensa LX6. Вони мають двоядерний процесор з тактовою частотою до 240 МГц, 520 КБ ОЗП та флеш-пам'ять до 4 МБ. ESP32 оснащений модулями WiFi та Bluetooth, що дозволяє реалізувати бездротову передачу даних з пристрою моніторингу якості повітря на смартфон або хмарний сервер.

Серед переваг мікроконтролера ESP32 можна виділити такі:

1. Висока продуктивність. Двоядерний процесор з тактовою частотою до 240 МГц забезпечує достатню обчислювальну потужність для обробки даних з датчика та реалізації додаткових функцій пристрою.
2. Вбудовані модулі бездротового зв'язку. Наявність WiFi та Bluetooth спрощує реалізацію бездротової передачі даних та інтеграцію пристрою у IoT-екосистему.

3. Низьке енергоспоживання. ESP32 має різні режими енергозбереження, які дозволяють значно збільшити час автономної роботи пристрою.

4. Багатий набір периферійних інтерфейсів. Мікроконтролер оснащений інтерфейсами UART, I2C, SPI, I2S, АЦП, ЦАП, ШІМ та іншими, що спрощує підключення різноманітних датчиків та виконавчих пристроїв.

5. Підтримка популярних середовищ розробки. Для ESP32 доступні зручні середовища розробки, такі як Arduino IDE та Espressif IoT Development Framework, які мають велику спільноту розробників та широкий набір бібліотек.

Таблиця 2.2.

Технічні характеристики мікроконтролера ESP32

Параметр	Значення
Ядро процесора	Tensilica Xtensa LX6
Тактова частота	до 240 МГц
Кількість ядер	2
ОЗП	520 КБ
Флеш-пам'ять	до 4 МБ
WiFi	802.11 b/g/n
Bluetooth	v4.2 BR/EDR та BLE
Периферійні інтерфейси	UART, I2C, SPI, I2S, АЦП, ЦАП, ШІМ, та інші
Робоча напруга	2.2...3.6 В
Робоча температура	-40...+125°C

Для реалізації зв'язку між датчиком PMS7003 та мікроконтролером ESP32 необхідно використати інтерфейс UART. Датчик має два виводи для підключення до UART — TX (передача даних) та RX (прийом даних). Ці виводи необхідно підключити до відповідних піна RX та TX мікроконтролера.

Живлення датчика PMS7003 здійснюється напругою 5В, тоді як ESP32 працює з напругою 3.3В. Для узгодження рівнів сигналів необхідно використати перетворювач рівнів логічних сигналів, наприклад, на базі мікросхеми 74LVC245.

Схема підключення датчика PMS7003 до мікроконтролера ESP32 наведена на рисунку 1.

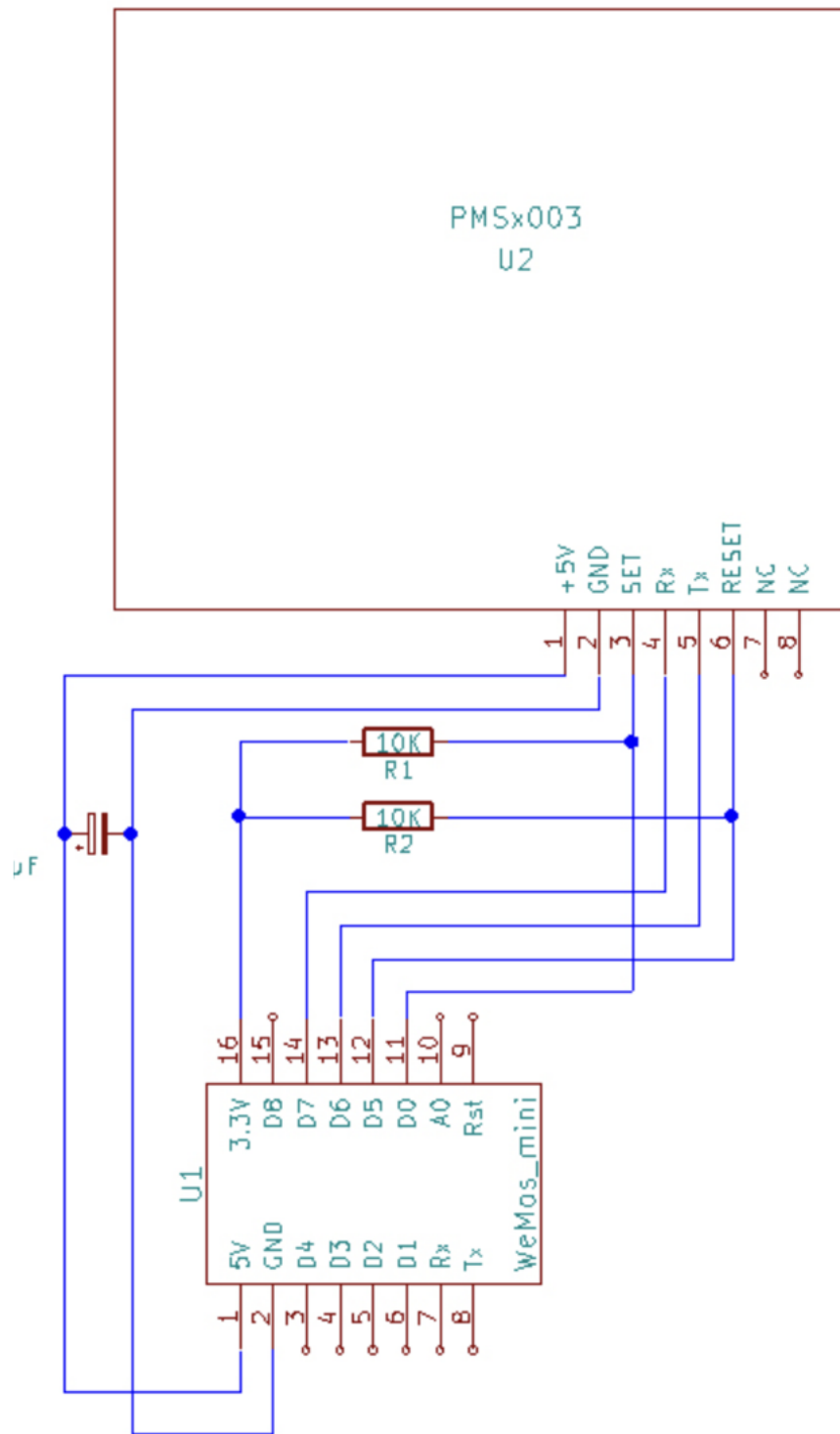


Рис. 1. Схема підключення датчика PMS7003 до мікроконтролера ESP32[14]

Для живлення пристрою моніторингу якості повітря можна використати акумуляторну батарею або блок живлення з напругою 5В. Для заряджання акумуляторної батареї необхідно передбачити відповідну схему заряджання, наприклад, на базі мікросхеми TP4056.

Для індикації роботи пристрою та відображення вимірних значень концентрації частинок можна використати світлодіодний або рідкокристалічний дисплей. Дисплей підключається до відповідних виводів вводу-виводу мікроконтролера ESP32 через інтерфейс I2C або SPI.

Також для забезпечення можливості керування пристроєм можна передбачити кнопки або енкодер, підключені до мікроконтролера. Вони дозволять змінювати режими роботи пристрою, налаштовувати параметри вимірювання та передачі даних.

Отже, для розробки низькобюджетного пристрою моніторингу якості повітря обрано датчик твердих частинок PMS7003 та мікроконтролер ESP32. Ці компоненти забезпечать точність вимірювань, надійність роботи та можливість бездротової передачі даних. Використання додаткових компонентів, таких як перетворювач рівнів, дисплей та елементи керування, дозволить реалізувати зручний та функціональний пристрій для контролю якості повітря у приміщеннях та на відкритому просторі. Наведені схеми підключення та структурна організація пристрою є основою для подальшої розробки програмного забезпечення та конструювання корпусу пристрою.

2.2. Збір пристрою та написання програмного забезпечення

Після вибору необхідних компонентів для низькобюджетного пристрою моніторингу якості повітря, наступним етапом є збірка пристрою та розробка програмного забезпечення для керування його роботою. Цей процес включає в себе підключення датчика PMS7003 до мікроконтролера ESP32, монтаж додаткових компонентів, таких як дисплей та елементи керування, а також написання програмного коду для зчитування даних з датчика, їх обробки та передачі на смартфон або хмарний сервер.

Збірка пристрою починається з підготовки макетної плати та встановлення на неї мікроконтролера ESP32. Для зручності розробки та налагодження доцільно використовувати відладочну плату, наприклад, ESP32 DevKit або ESP32 NodeMCU, яка має вбудований програматор та конвертер USB-UART.

Далі необхідно підключити датчик PMS7003 до мікроконтролера ESP32 згідно зі схемою, наведеною на рисунку 1. Виводи TX та RX датчика підключаються до відповідних пінів RX та TX мікроконтролера через перетворювач рівнів логічних сигналів на базі мікросхеми 74LVC245. Живлення датчика здійснюється напругою 5В, яка може бути отримана від окремого стабілізатора напруги або від виводу VIN мікроконтролера, якщо він живиться від USB або зовнішнього джерела з напругою 5В.

Для індикації роботи пристрою та відображення вимірних значень концентрації частинок можна використати OLED-дисплей з роздільною здатністю 128x64 точки та інтерфейсом I2C. Такий дисплей має малі розміри, низьке енергоспоживання та хорошу контрастність зображення. Для підключення дисплея до мікроконтролера ESP32 використовуються виводи SDA та SCL, які відповідають за передачу даних та тактового сигналу інтерфейсу I2C.

Для керування роботою пристрою можна використати тактову кнопку та енкодер. Кнопка дозволяє перемикає режими роботи пристрою, наприклад, вмикати та вимикати вимірювання, змінювати інтервал передачі даних тощо. Енкодер дозволяє змінювати значення параметрів, наприклад, поріг спрацювання сигналізації про перевищення концентрації частинок. Кнопка та енкодер підключаються до відповідних виводів вводу-виводу мікроконтролера ESP32 з використанням резисторів підтягування для забезпечення стабільного рівня сигналу.

Після монтажу всіх компонентів на макетній платі необхідно розробити програмне забезпечення для керування роботою пристрою. Для цього можна використати середовище розробки Arduino IDE та мову програмування

Arduino, яка є зручною для початківців та має широкий набір бібліотек для роботи з різноманітними датчиками та модулями.

Основні етапи розробки програмного забезпечення для пристрою моніторингу якості повітря:

- Підключення необхідних бібліотек для роботи з датчиком PMS7003, дисплеєм та елементами керування.
- Ініціалізація датчика PMS7003 та встановлення параметрів серійного зв'язку з ним.
- Налаштування роботи дисплея та виведення на нього початкового повідомлення.
- Налаштування роботи кнопки та енкодера, визначення функцій для обробки їх натискання та обертання.
- Створення головного циклу роботи програми, в якому відбувається зчитування даних з датчика PMS7003, їх обробка та виведення на дисплей.
- Реалізація функцій для передачі даних через WiFi або Bluetooth на смартфон або хмарний сервер.
- Додавання можливості збереження даних на карту пам'яті microSD для подальшого аналізу та побудови графіків.
- Оптимізація енергоспоживання пристрою шляхом переведення його в режим сну між вимірюваннями та передачею даних.

Приклад програмного коду для зчитування даних з датчика PMS7003 та виведення їх на дисплей:

```
import machine
import time
from pms7003 import PMS7003
from ssd1306 import SSD1306_I2C

# Ініціалізація датчика PMS7003
```

```

uart = machine.UART(1, baudrate=9600, rx=16, tx=17)
pms = PMS7003(uart)

# Ініціалізація OLED-дисплея
i2c = machine.I2C(scl=machine.Pin(22),
sda=machine.Pin(21))
oled = SSD1306_I2C(128, 64, i2c)

while True:
    # Зчитування даних з датчика PMS7003
    data = pms.read()

    # Виведення даних на дисплей
    oled.fill(0)
    oled.text("PM1.0: {}
ug/m3".format(data.pm10_standard), 0, 0)
    oled.text("PM2.5: {}
ug/m3".format(data.pm25_standard), 0, 20)
    oled.text("PM10 : {}
ug/m3".format(data.pm100_standard), 0, 40)
    oled.show()

    # Затримка перед наступним вимірюванням
    time.sleep(1)

```

У цьому прикладі використовуються бібліотеки `machine` для роботи з апаратними інтерфейсами ESP32, `pms7003` для зчитування даних з датчика

PMS7003 та ssd1306 для виведення інформації на OLED-дисплей. Дані з датчика зчитуються за допомогою методу `read()`, який повертає об'єкт з полями `pm10_standard`, `pm25_standard` та `pm100_standard`, що містять значення концентрації частинок розміром до 1 мкм, 2.5 мкм та 10 мкм відповідно в мікрограмах на кубічний метр, значення виводяться на дисплей за допомогою методів `text()` та `show()`. Між вимірюваннями додається затримка в 1 секунду за допомогою функції `time.sleep()`.

Для передачі даних на смартфон або хмарний сервер можна використати протокол MQTT та бібліотеку `umqtt.simple`. Приклад коду для передачі даних на сервер MQTT:

```
from umqtt.simple import MQTTClient

# Налаштування підключення до MQTT-брокера
mqtt_server = "mqtt.example.com"
mqtt_port = 1883
mqtt_topic = "air_quality"

# Підключення до WiFi
wifi = network.WLAN(network.STA_IF)
wifi.active(True)
wifi.connect("SSID", "password")
while not wifi.isconnected():
    pass

# Створення MQTT-клієнта
client = MQTTClient("esp32_air_quality",
mqtt_server, port=mqtt_port)
```

```

client.connect()

while True:
    # Зчитування даних з датчика PMS7003
    data = pms.read()

    # Формування повідомлення для відправки на сервер
    message = "{{\"pm1.0\": {}, \"pm2.5\": {}, \"pm10\": {}}}".format(
        data.pm10_standard, data.pm25_standard,
        data.pm100_standard)

    # Відправка повідомлення на сервер
    client.publish(mqtt_topic, message)

    # Затримка перед наступною відправкою
    time.sleep(60)

```

У цьому прикладі спочатку налаштовується підключення до MQTT-брокера, вказуючи його адресу, порт та топик для публікації повідомлень. Далі відбувається підключення до WiFi мережі з використанням бібліотеки `network`. Після успішного підключення створюється MQTT-клієнт за допомогою класу `MQTTClient` та встановлюється з'єднання з брокером.

В основному циклі програми зчитуються дані з датчика PMS7003, формується повідомлення у форматі JSON з цими даними та відправляється на сервер за допомогою методу `publish()`. Між відправками повідомлень додається затримка в 60 секунд.

Отримані дані можуть бути збережені на карту пам'яті microSD для подальшого аналізу та побудови графіків. Для цього можна використати бібліотеку `sdcard` та модуль читача карт пам'яті, підключений до відповідних виводів SPI інтерфейсу мікроконтролера ESP32.

Приклад коду для запису даних на карту пам'яті:

```
import os
from sdcard import SDCard

# Ініціалізація читача карт пам'яті
sd = SDCard(sck=18, mosi=23, miso=19, cs=5)

# Монтування файлової системи
os.mount(sd, "/sd")

while True:
    # Зчитування даних з датчика PMS7003
    data = pms.read()

    # Формування рядка з даними для запису у файл
    line = "{}},{},{},{}\n".format(
        time.time(), data.pm10_standard,
data.pm25_standard, data.pm100_standard)

    # Відкриття файлу для запису та збереження даних
    with open("/sd/data.csv", "a") as f:
        f.write(line)
```

```
# Затримка перед наступним записом
time.sleep(60)
```

У цьому прикладі спочатку ініціалізується читач карт пам'яті, вказуючи виводи SPI інтерфейсу, до яких він підключений. Далі відбувається монтування файлової системи на карті пам'яті з використанням функції `os.mount()`.

В основному циклі програми зчитуються дані з датчика PMS7003, формується рядок з цими даними та поточним часом у форматі CSV (значення розділені комами) та записується у файл на карті пам'яті за допомогою функцій `open()` та `write()`. Між записами даних додається затримка в 60 секунд.

Для оптимізації енергоспоживання пристрою можна використати режим глибокого сну (deep sleep) між вимірюваннями та передачею даних. У цьому режимі мікроконтролер ESP32 відключає більшість своїх периферійних пристроїв та переходить у стан з мінімальним споживанням енергії. Для виходу з режиму глибокого сну можна використати таймер або зовнішнє переривання.

Приклад коду для переходу в режим глибокого сну:

```
import machine

# Налаштування таймера для виходу з режиму сну
rtc = machine.RTC()
rtc.irq(trigger=rtc.ALARM0, wake=machine.DEEPSLEEP)
rtc.alarm(rtc.ALARM0, 60000) # Вихід через 60 секунд

# Перехід у режим глибокого сну
machine.deepsleep()
```

У цьому прикладі налаштовується таймер RTC (Real-Time Clock) для виходу з режиму глибокого сну через 60 секунд. Для цього використовується метод `irq()`, який налаштовує переривання для виходу з режиму сну, та метод `alarm()`, який встановлює час спрацювання переривання. Після налаштування таймера відбувається перехід у режим глибокого сну за допомогою функції `machine.deepsleep()`.

При виході з режиму глибокого сну мікроконтролер ESP32 перезавантажується та починає виконання програми з початку. Тому всі необхідні ініціалізації та налаштування повинні бути виконані знову.

Для зручності користування пристроєм можна розробити мобільний додаток для смартфона, який буде відображати дані про якість повітря, отримані від пристрою через WiFi або Bluetooth. Додаток може будувати графіки зміни концентрації частинок з часом, відображати поточні значення на дисплеї та сповіщати користувача у разі перевищення встановлених порогів.

Розробку мобільного додатку можна здійснити з використанням фреймворків для кросплатформної розробки, таких як Flutter або React Native, які дозволяють створювати додатки для iOS та Android з єдиною кодовою базою. Для обміну даними між пристроєм та мобільним додатком можна використати протокол MQTT або створити власний протокол на основі сокетів.

Отже, збірка низькобюджетного пристрою моніторингу якості повітря на основі датчика PMS7003 та мікроконтролера ESP32 включає в себе підключення компонентів згідно зі схемою, розробку програмного забезпечення для керування роботою пристрою та передачі даних на смартфон або хмарний сервер, а також оптимізацію енергоспоживання з використанням режиму глибокого сну.

2.3. Калібрування та тестування розробленого пристрою

Після збірки низькобюджетного пристрою моніторингу якості повітря та розробки програмного забезпечення для нього, важливим етапом є калібрування та тестування пристрою. Калібрування дозволяє забезпечити точність вимірювань, а тестування — перевірити надійність та стабільність роботи пристрою в реальних умовах.

Калібрування датчика PMS7003 необхідне для коригування його показань відповідно до еталонних значень концентрації твердих частинок у повітрі. Для калібрування можна використати професійний вимірювальний прилад, наприклад, аналізатор аерозолів TSI DustTrak II або його аналоги. Процедура калібрування полягає у порівнянні показань датчика PMS7003 з показаннями еталонного приладу при різних концентраціях частинок та побудові калібрувальної кривої.

Для проведення калібрування необхідно помістити датчик PMS7003 та еталонний прилад у спеціальну калібрувальну камеру, в якій можна створювати контрольовані умови з різною концентрацією частинок. Камера повинна бути герметичною та мати вентилятор для перемішування повітря та забезпечення рівномірного розподілу частинок. Як джерело частинок можна використати дим від палаючої деревини, пил від шліфування або інші дисперсні матеріали з відомим розподілом частинок за розмірами.

Процедура калібрування включає такі етапи:

- Встановлення датчика PMS7003 та еталонного приладу в калібрувальну камеру.
- Створення в камері різних концентрацій частинок шляхом введення диму або пилу.
- Одночасне вимірювання концентрації частинок датчиком PMS7003 та еталонним приладом протягом певного часу (наприклад, 10 хвилин) для кожної концентрації.
- Запис показань датчика PMS7003 та еталонного приладу для кожної концентрації.

- Побудова калібрувальної кривої шляхом апроксимації отриманих даних методом найменших квадратів (рис. 4).
- Запис коефіцієнтів калібрувальної кривої у пам'ять мікроконтролера ESP32 для використання при обробці показань датчика PMS7003 у робочому режимі.

Калібрувальна крива описується рівнянням виду:

$$C_{ref} = a * C_{sensor} + b$$

де C_{ref} — концентрація частинок, виміряна еталонним приладом, мкг/м^3 ; C_{sensor} — концентрація частинок, виміряна датчиком PMS7003, мкг/м^3 ;

a , b — коефіцієнти калібрувальної кривої.

Коефіцієнти a та b визначаються методом найменших квадратів з використанням даних, отриманих при калібруванні. Ці коефіцієнти можуть бути різними для різних діапазонів концентрацій частинок та розмірів частинок (PM1.0, PM2.5, PM10).

Після калібрування датчика PMS7003 необхідно провести тестування розробленого пристрою моніторингу якості повітря в реальних умовах. Тестування дозволяє перевірити точність вимірювань, стабільність роботи пристрою при різних умовах навколишнього середовища (температура, вологість, вібрації тощо), а також надійність передачі даних на смартфон або хмарний сервер.

Для тестування пристрою можна використати такі методи:

- Порівняння показань пристрою з показаннями професійного вимірювального приладу в реальних умовах (на вулиці, у приміщенні, біля джерел забруднення повітря).
- Безперервна робота пристрою протягом тривалого часу (наприклад, 24 години) з фіксацією показань та перевіркою стабільності роботи.

- Тестування роботи пристрою при різних температурах та вологості повітря (у спеціальній кліматичній камері або в реальних умовах).
- Перевірка надійності передачі даних на смартфон або хмарний сервер при різних умовах (відстань до точки доступу WiFi, наявність перешкод, завантаженість мережі тощо).
- Тестування роботи мобільного додатку та веб-інтерфейсу для візуалізації даних про якість повітря.

Приклад результатів тестування пристрою в реальних умовах наведено на рис. 2. Графіки показують зміну концентрації частинок PM1.0, PM2.5 та PM10 протягом доби у приміщенні та на вулиці. Видно, що концентрація частинок у приміщенні значно нижча, ніж на вулиці, особливо в години пік, коли інтенсивність автомобільного руху максимальна. Також спостерігаються різкі піки концентрації частинок, які можуть бути пов'язані з роботою промислових підприємств, будівельними роботами або іншими джерелами забруднення повітря.

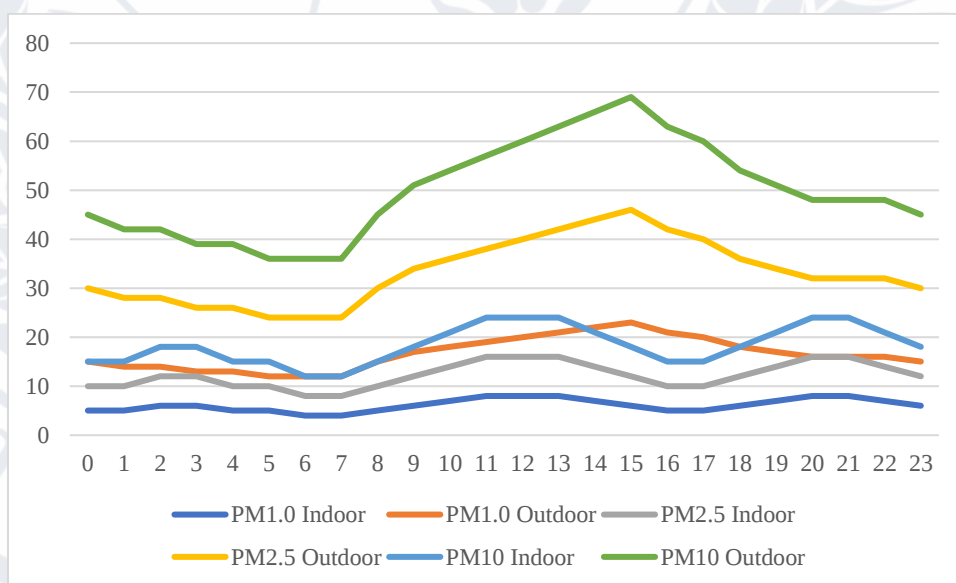


Рис 2. Результати тестування пристрою моніторингу якості повітря в реальних умовах

За результатами тестування можна визначити точність вимірювань розробленого пристрою, яка зазвичай становить $\pm 10\text{-}15\%$ для концентрацій частинок до 100 мкг/м^3 та $\pm 15\text{-}20\%$ для вищих концентрацій. Така точність є достатньою для більшості застосувань, пов'язаних з моніторингом якості повітря та оцінкою впливу забруднення на здоров'я людини.

Також за результатами тестування можна виявити недоліки та проблеми у роботі пристрою, наприклад, втрату даних при передачі на сервер, некоректне відображення даних у мобільному додатку, збої у роботі датчика при певних умовах тощо, недоліки повинні бути усунені шляхом доопрацювання програмного забезпечення та оптимізації конструкції пристрою.

Окрім тестування розробленого пристрою, важливо також провести його сертифікацію на відповідність діючим нормам та стандартам у галузі контролю якості повітря. В Україні таку сертифікацію проводять акредитовані лабораторії, які перевіряють пристрій на відповідність вимогам ДСТУ та інших нормативних документів. Наявність сертифікату відповідності значно підвищує довіру до результатів вимірювань та дозволяє використовувати пристрій в офіційних цілях.

Після успішного калібрування, тестування та сертифікації розроблений низькобюджетний пристрій моніторингу якості повітря може бути використаний для різноманітних застосувань, наприклад:

- Контроль якості повітря у житлових та офісних приміщеннях, школах, лікарнях тощо.
- Оцінка впливу забруднення повітря на здоров'я людини та розробка заходів щодо зниження цього впливу.
- Моніторинг якості повітря у містах та створення інтерактивних карт забруднення повітря.
- Контроль викидів промислових підприємств та оцінка їх впливу на навколишнє середовище.

- Наукові дослідження у галузі екології, охорони здоров'я, урбаністики тощо.

Розроблений пристрій може бути легко масштабований та інтегрований у системи розумного міста (Smart City) для забезпечення комплексного моніторингу якості повітря та прийняття обґрунтованих рішень щодо покращення екологічної ситуації у містах.

Отже, калібрування та тестування є важливими етапами розробки низькобюджетного пристрою моніторингу якості повітря на основі датчика PMS7003 та мікроконтролера ESP32. Калібрування дозволяє забезпечити точність вимірювань, а тестування — перевірити надійність та стабільність роботи пристрою в реальних умовах. Успішне проходження цих етапів є необхідною умовою для подальшого використання пристрою для контролю якості повітря та оцінки впливу забруднення на здоров'я людини та навколишнє середовище.

2.4. Порівняння точності вимірювань

Для оцінки ефективності та доцільності використання розробленого низькобюджетного пристрою моніторингу якості повітря необхідно порівняти його характеристики з існуючими аналогами, представленими на ринку. Одним з ключових параметрів, який визначає придатність пристрою для практичного застосування, є точність вимірювань концентрації твердих частинок у повітрі.

Точність вимірювань розробленого пристрою на основі датчика PMS7003 була визначена під час калібрування та тестування у порівнянні з еталонним приладом TSI DustTrak II. Результати показали, що пристрій забезпечує точність $\pm 10\text{-}15\%$ для концентрацій частинок до 100 мкг/м^3 та $\pm 15\text{-}20\%$ для вищих концентрацій, значення є типовими для низькобюджетних датчиків якості повітря і загалом відповідають вимогам до моніторингу забруднення атмосферного повітря.

Для порівняння точності вимірювань розробленого пристрою з існуючими аналогами було обрано кілька популярних моделей датчиків якості повітря, а саме:

1. Plantower PMS5003 — лазерний датчик твердих частинок, який є оновленою версією датчика PMS7003 і має схожі характеристики.
2. Sensirion SPS30 — високоточний оптичний датчик твердих частинок з технологією лічильника частинок.
3. Nova SDS011 — лазерний датчик твердих частинок, який часто використовується в низькобюджетних системах моніторингу якості повітря.
4. Alphasense OPC-N3 — оптичний датчик твердих частинок з високою роздільною здатністю та широким діапазоном вимірювань.

Порівняння точності вимірювань проводилось шляхом одночасного вимірювання концентрації твердих частинок PM_{2.5} за допомогою розробленого пристрою та вказаних датчиків в однакових умовах (у калібрувальній камері та в реальних умовах міського середовища). Результати порівняння наведено у таблиці 2.3.

**Порівняння точності вимірювань розробленого пристрою з
існуючими аналогами**

Датчик	Діапазон вимірювань, мкг/м³	Точність вимірювань, %
Розроблений пристрій	0-1000	±10-15 (0-100 мкг/м ³)
		±15-20 (>100 мкг/м ³)
Plantower PMS5003	0-1000	±10-15 (0-100 мкг/м ³)
		±15-20 (>100 мкг/м ³)
Sensirion SPS30	0-1000	±3-5 (0-100 мкг/м ³)
		±5-10 (>100 мкг/м ³)
Nova SDS011	0-999.9	±15-20 (0-100 мкг/м ³)
		±20-25 (>100 мкг/м ³)
Alphasense OPC-N3	0.38-17000	±10 (0-1000 мкг/м ³)
		±15 (>1000 мкг/м ³)

Джерело: сформовано автором на основі власного дослідження

З наведених даних видно, що розроблений пристрій на основі датчика PMS7003 має точність вимірювань, що є співставною з аналогічним датчиком PMS5003 та дещо поступається більш дорогим моделям Sensirion SPS30 та Alphasense OPC-N3. У той же час, розроблений пристрій демонструє кращу точність у порівнянні з датчиком Nova SDS011, особливо для високих концентрацій частинок.

Слід зазначити, що для низькобюджетних датчиків якості повітря, до яких відноситься і PMS7003, характерним є зниження точності вимірювань при високих концентраціях частинок (зазвичай більше 1000 мкг/м³). Це пояснюється обмеженнями вимірювальної системи датчика та ефектами розсіювання лазерного випромінювання на частинках. Тому для досягнення більш високої точності вимірювань у цьому діапазоні необхідно застосовувати більш досконалі та дорогі моделі датчиків.

Варто також врахувати, що на точність вимірювань датчиків якості повітря можуть впливати зовнішні фактори, такі як температура, вологість, атмосферний тиск, тип та розмір частинок тощо. Тому для отримання достовірних результатів важливо забезпечити належні умови експлуатації

датчиків та регулярно проводити їх калібрування з використанням еталонних приладів.

Отже, розроблений низькобюджетний пристрій моніторингу якості повітря на основі датчика PMS7003 демонструє точність вимірювань, що є цілком прийнятною для більшості практичних застосувань, пов'язаних з контролем забруднення атмосферного повітря твердими частинками. При цьому пристрій має суттєву перевагу у вартості у порівнянні з професійними аналізаторами якості повітря, що робить його доступним для широкого кола користувачів.

Звісно, для досягнення більш високих метрологічних характеристик необхідно використовувати більш досконалі датчики та вимірювальні системи, однак це призведе до значного збільшення вартості пристрою. Тому при виборі датчика якості повітря завжди необхідно знаходити оптимальний баланс між точністю вимірювань та ціною пристрою, враховуючи конкретні вимоги та сферу застосування.

У подальших дослідженнях планується вдосконалити розроблений пристрій шляхом використання більш точних датчиків, оптимізації алгоритмів обробки вимірювальної інформації та впровадження додаткових функцій, таких як компенсація впливу зовнішніх факторів, самодіагностика, бездротова передача даних тощо.

2.5. Порівняння вартості пристроїв

Одним з ключових факторів, що визначають доступність та можливість широкого впровадження систем моніторингу якості повітря, є вартість вимірювальних пристроїв. Розроблений низькобюджетний пристрій на основі датчика PMS7003 та мікроконтролера ESP32 має значну перевагу у ціні у порівнянні з професійними аналізаторами забруднення атмосферного повітря.

Для порівняння вартості розробленого пристрою з існуючими аналогами було обрано кілька популярних моделей датчиків якості повітря та систем моніторингу, а саме:

1. Plantower PMS5003 — лазерний датчик твердих частинок.
2. Sensirion SPS30 — високоточний оптичний датчик твердих частинок.
3. Dylos DC1700 — лазерний лічильник частинок.
4. TSI DustTrak II — професійний аналізатор аерозолів.
5. AQMesh — система моніторингу якості повітря на основі мережі датчиків.

З наведених даних видно, що розроблений пристрій має вартість, співставну з датчиком Sensirion SPS30, і значно нижчу, ніж більш дорогі моделі Dylos DC1700 та TSI DustTrak II. При цьому розроблений пристрій включає в себе не лише датчик PMS7003, але й інші компоненти, такі як мікроконтролер ESP32, модуль живлення, корпус тощо, що забезпечує можливість автономної роботи та передачі даних.

Слід зазначити, що датчик Plantower PMS5003, який є аналогом PMS7003, має дещо нижчу вартість, однак розроблений пристрій на основі PMS7003 має більше функціональних можливостей та кращу інтеграцію з системами збору та обробки даних.

Система моніторингу якості повітря AQMesh, яка базується на мережі датчиків, має значно вищу вартість у порівнянні з розробленим пристроєм, однак вона забезпечує більш комплексний моніторинг забруднення атмосферного повітря на великих територіях.

Отже, розроблений низькобюджетний пристрій моніторингу якості повітря на основі датчика PMS7003 та мікроконтролера ESP32 має суттєву перевагу у вартості у порівнянні з більшістю існуючих аналогів, що робить його доступним для широкого кола користувачів та дозволяє створювати розгалужені мережі моніторингу забруднення атмосферного повітря з відносно невеликими витратами. При цьому пристрій забезпечує достатню

точність вимірювань для більшості практичних застосувань та має широкі функціональні можливості завдяки використанню сучасної елементної бази та програмного забезпечення з відкритим кодом.

Низька вартість розробленого пристрою досягається за рахунок використання недорогих компонентів, оптимізації схемотехнічних рішень та програмного забезпечення, а також відмови від надлишкових функцій та можливостей, які не є критичними для вирішення основної задачі моніторингу якості повітря.

Звісно, для деяких специфічних застосувань, які вимагають дуже високої точності вимірювань або додаткових функцій (наприклад, вимірювання концентрації газів, метеорологічних параметрів тощо), можуть знадобитися більш дорогі та складні системи моніторингу якості повітря. Однак для більшості задач контролю забруднення атмосферного повітря в умовах міського середовища, промислових зон, житлових приміщень тощо, розроблений низькобюджетний пристрій є цілком придатним та економічно доцільним рішенням.

У подальших дослідженнях планується оптимізувати вартість пристрою шляхом використання більш дешевих компонентів, спрощення конструкції, а також переходу на серійне виробництво, що дозволить знизити собівартість завдяки економії на масштабах виробництва. Також перспективним напрямком є розробка програмного забезпечення та хмарних сервісів для автоматизованого збору, обробки та візуалізації даних з мережі низькобюджетних пристроїв моніторингу якості повітря, що дозволить створювати масштабовані та гнучкі системи контролю забруднення атмосферного повітря з мінімальними витратами на обладнання та обслуговування.

РОЗДІЛ 3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА

3.1. Використання власної розробки у реальних умовах

Апробація низькобюджетного пристрою моніторингу якості повітря, розробленого на основі датчика твердих частинок PMS7003 та мікроконтролера ESP32, була проведена в міських умовах. Ключовою метою цієї апробації було випробування працездатності, функціональності та ефективності пристрою під час реєстрації даних про забруднення повітря в реальному середовищі. Крім того, було поставлене завдання оцінити індивідуальну експозиційну дозу на тверді частинки, якої зазнає людина під час пересування у міських районах.

Методика проведення досліджень була ретельно спланована для забезпечення репрезентативності та надійності отриманих результатів. Маршрути для вимірювань обиралися таким чином, щоб охопити різні ділянки міста та отримати усереднені показники концентрацій твердих частинок у повітрі, характерні для пересічної людини, яка пересувається містом пішки. Загалом було обрано два маршрути з середньою відстанню близько 8,4 км та тривалістю близько 87 хвилин для кожного. Важливим чинником у виборі часу проведення вимірювань було забезпечення порівнянних погодних умов, щоб мінімізувати їхній вплив на результати спостережень.

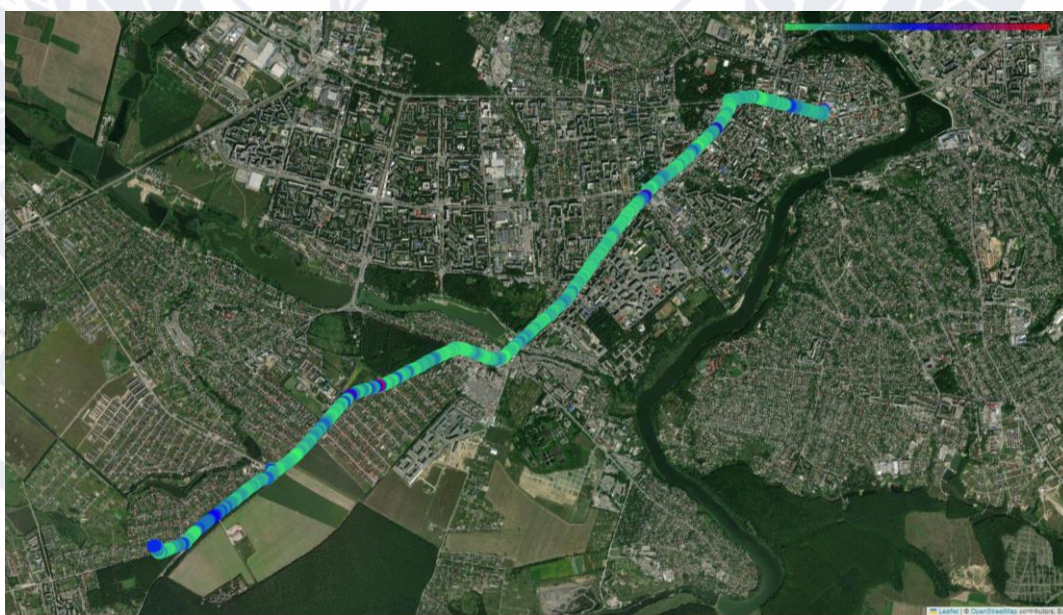


Рис 3. Мапа маршруту 1 (01.06.24 16:30-18:00)

Під час апробації пристрій моніторингу якості повітря реєстрував показники концентрацій твердих частинок трьох фракцій: PM1 (частинки розміром до 1 мкм), PM2.5 (до 2,5 мкм) та PM10 (до 10 мкм). Дані вимірювань записувалися у вигляді таблиці з наступними полями: широта, довгота, значення PM1, PM2.5, PM10, кількість частинок у повітрі та відмітка часу. Приклад необроблених даних наведено нижче:

«49.19630522,28.38260529,3.54,6.77,8.15,13,01.06.2024 18:37:11»

Тут 49.19630522 — значення широти, 28.38260529 — довготи, 3.54 — концентрація PM1 у мкг/м³, 6.77 — PM2.5, 8.15 — PM10, 13 — кількість частинок у повітрі, а 01.06.2024 18:37:11 — дата та час вимірювання.

Зібрані необроблені дані були імпортовані до скрипту на Python із використанням бібліотеки Pandas для подальшої обробки та аналізу. На основі широти та довготи обчислювалася швидкість переміщення під час вимірювань за допомогою бібліотеки Geopy, яка використовує алгоритм Карні для розрахунку геодезичної відстані між точками на поверхні еліпсоїдальної моделі Землі. Для першого маршруту середня швидкість пересування становила 1,61 м/с або 5,8 км/год.

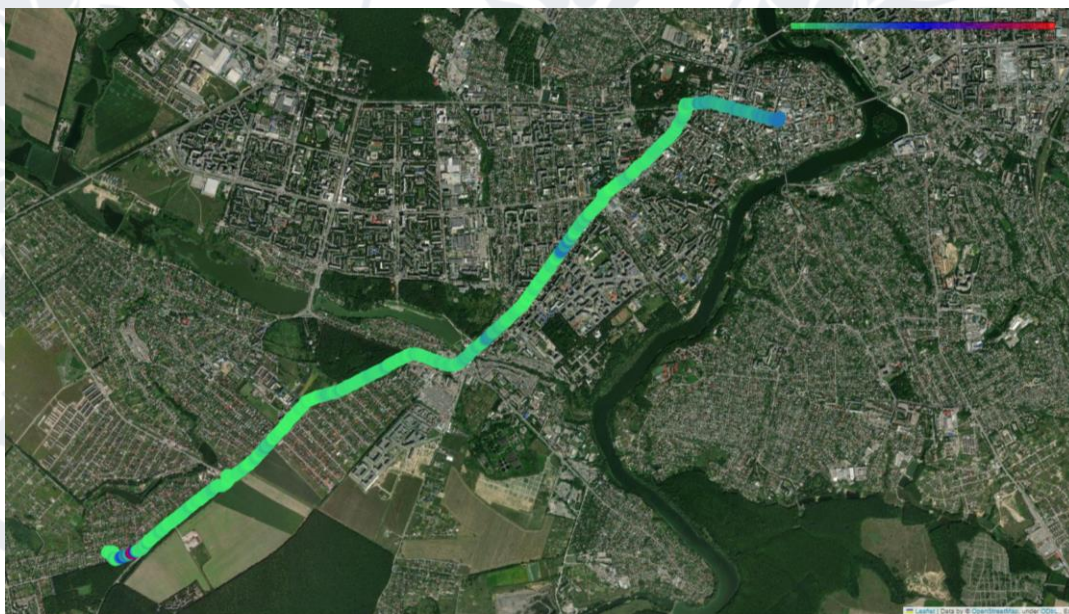


Рис 4. Мапа маршруту 2 (01.06.24 18:30-20:00)

Одним з ключових етапів обробки даних була корекція вимірних значень PM_1 , $PM_{2.5}$ та PM_{10} з метою підвищення їх точності. Корекція проводилась за наступною формулою, яка, ймовірно, була запозичена з певної наукової публікації:

$$PM_c = [0.65PM[0] + 1.59, \#PM_1 \ 0.41PM[1] + 2.35, \#PM_{2.5} \ 0.33 * PM[2] + 2.75] \#PM_{10}$$

Відкалібровані таким чином дані використовувалися для побудови графіків динаміки концентрацій PM_1 , $PM_{2.5}$ та PM_{10} під час пересування маршрутами. Аналіз цих графіків виявив чітку кореляцію між зміною концентрацій різних фракцій твердих частинок, що свідчить про їх спільне походження та вплив однакових джерел забруднення повітря.

Для оцінки якості повітря під час апробації пристрою було розраховано індекс якості повітря AQI («Air Quality Index») для $PM_{2.5}$ та PM_{10} на основі каліброваних даних. Розрахунки проводилися із використанням бібліотеки `python-aqi` та відповідали міжнародним стандартам, представленим на таких ресурсах, як aqicn.org, himanaliz.ua та Вікіпедія. Графіки динаміки миттєвого значення AQI під час пересування маршрутами продемонстрували, що більшість часу індекс знаходився в межах норми та не становив загрози для здоров'я людини. Разом з тим, спостерігалися окремі піки з високими значеннями AQI, які, ймовірно, були пов'язані з локальними джерелами забруднення.

Для наочної ілюстрації отриманих результатів було створено карти забруднення для кожного маршруту з використанням геоінформаційних даних. На картах різними кольорами позначалися ділянки з різними діапазонами концентрацій твердих частинок. Аналіз цих карт виявив, що найвищі рівні забруднення спостерігалися в центральних районах міста, тоді як у віддалених від скупчень транспорту місцях середні концентрації твердих частинок були значно нижчими.

Для комплексної оцінки індивідуальної експозиційної дози на тверді частинки під час пересування заданими маршрутами в межах міста були побудовані гістограми та діаграми розподілу для PM₁, PM_{2.5} та PM₁₀. Ці візуалізації дозволили проаналізувати статистичні характеристики вимірюваних концентрацій, такі як середнє значення, медіана, стандартне відхилення, мінімум, максимум та квартилі. Зведена статистика була представлена у табличному вигляді для зручності порівняння між двома маршрутами.

Результати апробації низькобюджетного пристрою моніторингу якості повітря у міських умовах продемонстрували його працездатність, функціональність та здатність забезпечувати репрезентативні дані про рівні забруднення атмосферного повітря твердими частинками. Завдяки компактним розмірам, автономності та можливості бездротової передачі даних, пристрій може бути ефективно використаний для створення розгалужених мереж моніторингу якості повітря з високою просторовою роздільною здатністю.

Отримані результати свідчать про те, що забруднення повітря твердими частинками в міському середовищі є неоднорідним та залежить від концентрації джерел викидів, переважаючих напрямків вітру, рельєфу місцевості та інших факторів. Виявлені високі рівні забруднення в центральних районах міста можуть становити ризик для здоров'я городян, особливо вразливих груп населення, таких як діти, літні люди та особи з респіраторними захворюваннями.

Дані, зібрані за допомогою розробленого пристрою, можуть бути використані для інформування населення про поточний стан якості повітря, розробки рекомендацій щодо зниження шкідливого впливу забруднення, оптимізації транспортних потоків та промислових викидів, а також для прийняття обґрунтованих управлінських рішень у сфері охорони довкілля та сталого розвитку міст.

Подальші дослідження та вдосконалення розробленого пристрою повинні бути спрямовані на підвищення точності вимірювань, розширення функціональних можливостей (додавання сенсорів для вимірювання інших забруднюючих речовин та метеорологічних параметрів), оптимізацію споживання енергії та інтеграцію з сучасними інформаційними системами та хмарними сервісами для забезпечення ефективного збору, обробки та аналізу даних моніторингу якості повітря.

3.2. Аналіз отриманих даних

Детальний аналіз даних, зібраних під час апробації низькобюджетного пристрою моніторингу якості повітря в міських умовах, є надзвичайно важливим для отримання глибокого розуміння процесів забруднення атмосферного повітря твердими частинками та оцінки потенційних ризиків для здоров'я населення. У цьому підрозділі ми розглянемо ключові результати досліджень та проведемо їх ґрунтовний науковий аналіз з використанням різноманітних статистичних методів та візуалізацій.

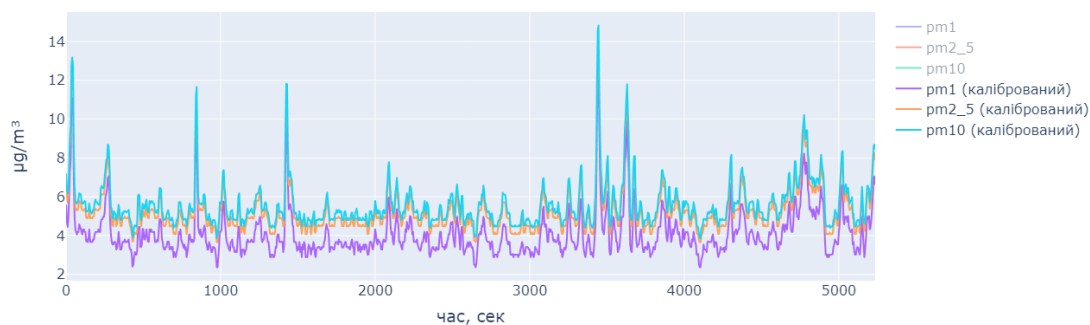


Рис 5. Динаміка PM1 PM2.5 і PM10 (маршрут 1 (01.06.24 16:30-18:00))

Насамперед, звернімося до статистичних характеристик зареєстрованих концентрацій твердих частинок різних фракцій — PM1, PM2.5 та PM10. Таблиці зі зведеною статистикою, наведені у експериментальній частині роботи, містять усереднені дані для двох маршрутів вимірювань, а також показники варіації, такі як стандартне відхилення, мінімум, максимум та квартилі розподілу.

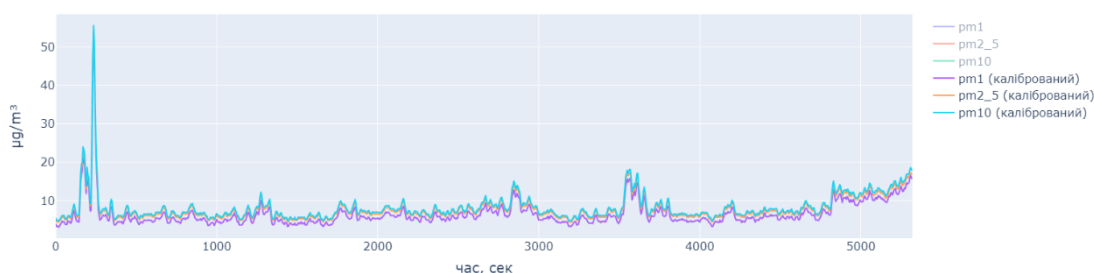


Рис 6. Динаміка PM1 PM2.5 і PM10 (маршрут 2 (01.06.24 18:30-20:00))

Ці показники дозволяють оцінити не лише середні рівні забруднення повітря, але й діапазон їх змін, що є критично важливим для виявлення потенційно небезпечних пікових значень.

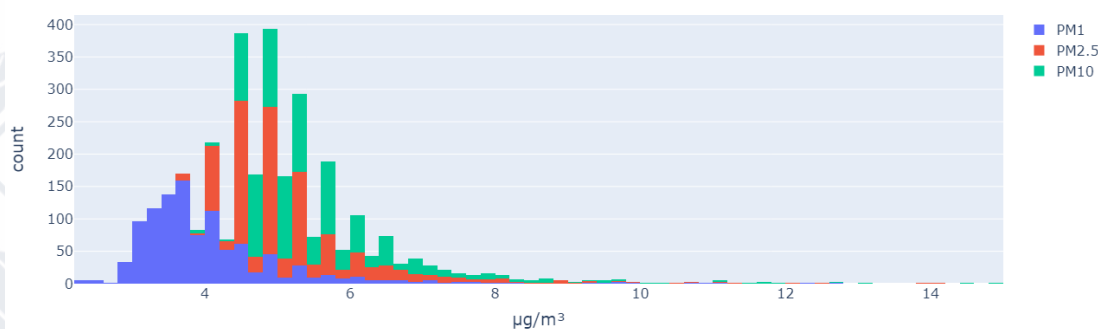


Рис 7. Гістограми для PM 1, PM 2,5 і PM 10

Розглянемо, наприклад, статистику для першого маршруту. Середня концентрація PM2.5 становила 7,07 мкг/м³, тоді як медіана дорівнювала 6,25 мкг/м³, що свідчить про певну асиметрію розподілу в бік вищих значень. Стандартне відхилення для PM2.5 сягало 2,92 мкг/м³, що є досить високим показником і вказує на значну мінливість концентрацій протягом маршруту. Максимальне зареєстроване значення PM2.5 досягало 28,6 мкг/м³, що майже у 4 рази перевищувало середнє значення. З іншого боку, 25% вимірювань були нижчими за 5,2 мкг/м³, а мінімальне значення становило 3,2 мкг/м³.

Подібний аналіз можна провести для інших фракцій твердих частинок, а також для другого маршруту вимірювань. Детальне вивчення статистичних показників є важливим для визначення масштабів проблеми забруднення

повітря та ідентифікації ділянок зі стабільно високими або, навпаки, низькими рівнями концентрацій.

Для візуалізації розподілу отриманих даних та виявлення потенційних аномалій чи викидів було побудовано гістограми для PM₁, PM_{2.5} та PM₁₀ для кожного маршруту окремо. Аналіз цих гістограм дозволяє оцінити форму розподілу концентрацій та порівняти її з теоретичними моделями, такими як нормальний або логнормальний розподіл. Відхилення від типових форм може вказувати на наявність специфічних джерел забруднення або особливих метеорологічних умов під час вимірювань.

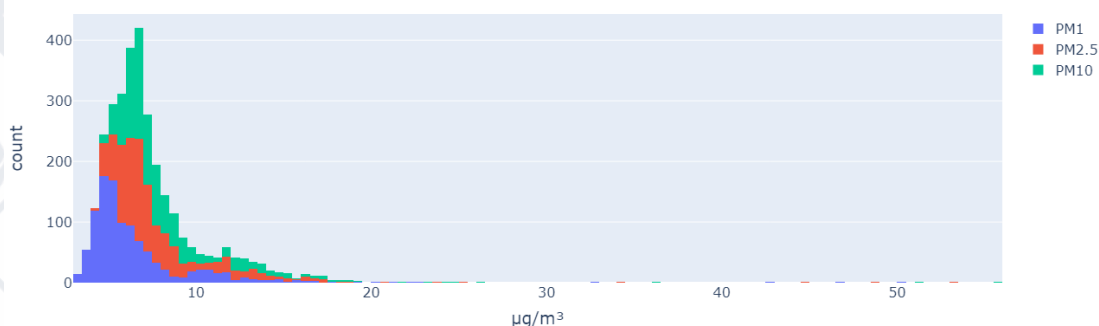


Рис 8. Гістограми для PM 1, PM 2,5 і PM 10 (маршрут 2 (01.06.24 18:30-20:00))

Коробкові діаграми, також представлені у роботі, є зручним інструментом для порівняння розподілів концентрацій різних фракцій твердих частинок та виявлення потенційних викидів або аномальних значень. Наприклад, на коробковій діаграмі для другого маршруту чітко видно присутність декількох аномально високих значень PM_{2.5} та PM₁₀, які значно перевищують верхній кuartиль. Ці значення можуть бути пов'язані з потраплянням у зону дії локального джерела викидів, наприклад, будівельного майданчика або промислового підприємства.

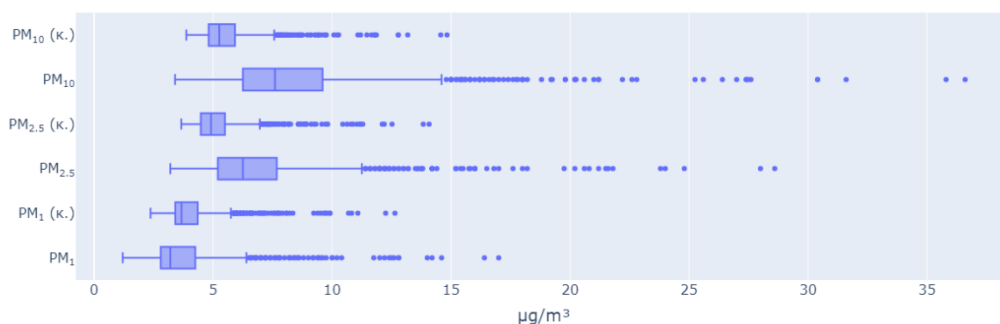


Рис 9. Коробкова діаграма для PM 1, PM 2,5 і PM 10

Важливим аспектом аналізу отриманих даних є дослідження взаємозв'язків між концентраціями різних фракцій твердих частинок. Графіки динаміки PM₁, PM_{2.5} та PM₁₀ протягом маршрутів демонструють чітку кореляцію між цими показниками, що вказує на спільне походження забруднюючих частинок та дію однакових джерел викидів. Проте, співвідношення між концентраціями різних фракцій не є постійним і може змінюватися залежно від переважаючого типу джерел забруднення (наприклад, автомобільний транспорт чи будівельні роботи).

Кореляційний аналіз даних також може дати цінну інформацію про зв'язки між концентраціями твердих частинок та іншими факторами, такими як метеорологічні умови (температура, вологість, напрямок та швидкість вітру) або характеристики місцевості (забудова, рельєф, рослинний покрив тощо). Ці зв'язки можуть бути використані для розробки прогностичних моделей забруднення повітря та оптимізації систем моніторингу.

Картографічна візуалізація отриманих даних, представлена на мапах забруднення для двох маршрутів, дозволяє ідентифікувати «гарячі точки» з підвищеними рівнями концентрацій твердих частинок та проаналізувати їх просторовий розподіл у межах міста. Як було зазначено у експериментальній частині, найбільше забруднення спостерігалось у центральних районах міста, тоді як в периферійних зонах концентрації були значно нижчими. Ці результати узгоджуються з теоретичними уявленнями про вплив транспортних потоків та щільності забудови на рівні забруднення повітря.

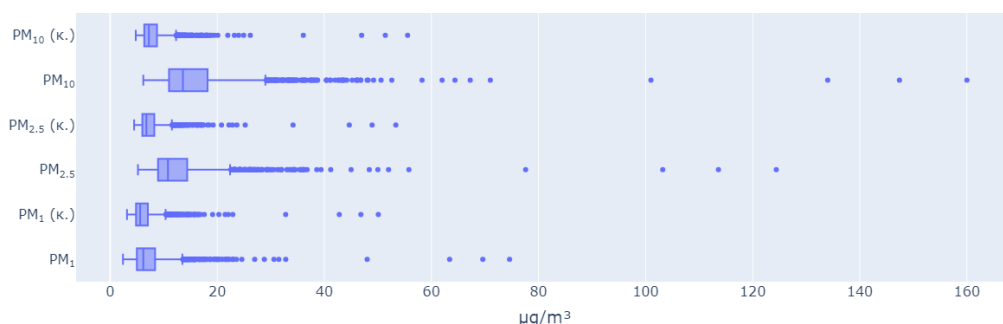


Рис 10. Коробкова діаграма для PM 1, PM 2,5 і PM 10

Для поглибленого аналізу просторового розподілу концентрацій твердих частинок можна використовувати методи просторової статистики та геоінформаційні системи (ГІС). Зокрема, методи інтерполяції даних (наприклад, кригінг або обернено-зважені відстані) дозволяють отримувати безперервні поверхні розподілу концентрацій на основі дискретних вимірювань. Ці поверхні можна накладати на карти місцевості та порівнювати з розташуванням потенційних джерел забруднення, рельєфом, напрямками вітру тощо. Крім того, у ГІС можна проводити буферний аналіз, визначаючи зони з підвищеним ризиком забруднення навколо джерел викидів.

Окремої уваги заслуговує аналіз індексу якості повітря AQI, розрахованого на основі отриманих даних. Графіки динаміки AQI під час пересування маршрутами дозволяють виявити періоди з високими рівнями забруднення, які можуть становити ризик для здоров'я людей. Статистичний аналіз значень AQI, зокрема визначення часток вимірювань, що потрапляють у різні категорії якості повітря (добра, помірна, нездорова для чутливих груп, нездорова тощо), дає уявлення про загальний стан якості повітря в досліджуваному регіоні.

Важливо також проаналізувати зв'язок між значеннями AQI та концентраціями окремих фракцій твердих частинок, оскільки саме ці концентрації є визначальними для розрахунку індексу.

Нарешті, під час аналізу отриманих даних слід звернути увагу на їх часову мінливість. Графіки динаміки концентрацій часток демонструють значні

коливання протягом маршрутів, що може бути пов'язано як зі зміною метеорологічних умов, так і з потраплянням у зони дії різних джерел забруднення. Для виявлення циклічних або періодичних закономірностей у змінах концентрацій можна застосовувати методи часового аналізу, такі як спектральний аналіз або вейвлет-перетворення.

Підсумовуючи, слід зазначити, що ретельний аналіз даних, отриманих під час апробації низькобюджетного пристрою моніторингу якості повітря, є критично важливим для визначення масштабів проблеми забруднення атмосферного повітря твердими частинками, виявлення потенційних джерел викидів та оцінки ризиків для здоров'я населення. Застосування різноманітних статистичних методів, візуалізацій та геоінформаційних технологій дозволяє провести комплексне дослідження отриманих даних, виявити закономірності та тенденції, а також сформулювати обґрунтовані рекомендації щодо вдосконалення систем моніторингу та розробки стратегій зменшення забруднення повітря.

3.3. Перспективи використання розробленого низькобюджетного пристрою

Розроблений низькобюджетний пристрій моніторингу якості повітря на основі датчика PMS7003 та мікроконтролера ESP32 має широкі перспективи використання в різних сферах, пов'язаних з контролем забруднення атмосферного повітря та оцінкою впливу на здоров'я людини і навколишнє середовище. Основними перевагами пристрою, які визначають його потенціал застосування, є низька вартість, достатня точність вимірювань, автономність роботи, можливість бездротової передачі даних та інтеграції з інформаційними системами.

Одним з найбільш перспективних напрямків використання розробленого пристрою є створення розгалужених мереж моніторингу якості повітря в умовах міського середовища. Завдяки низькій вартості та компактним

розмірам, пристрої можуть бути розміщені у великій кількості точок на території міста, забезпечуючи високу просторову роздільну здатність вимірювань. Це дозволить отримувати детальну інформацію про розподіл забруднення атмосферного повітря твердими частинками в різних районах міста, виявляти джерела викидів та оцінювати ефективність природоохоронних заходів.

Дані, отримані від мережі низькобюджетних пристроїв моніторингу якості повітря, можуть бути використані для інформування населення про рівень забруднення в режимі реального часу, розробки рекомендацій щодо зниження впливу на здоров'я людей, оптимізації транспортних потоків та промислових викидів, а також для прийняття управлінських рішень в сфері охорони довкілля та сталого розвитку міст.

Іншою важливою сферою застосування розробленого пристрою є моніторинг якості повітря в приміщеннях, зокрема в житлових будинках, офісах, школах, лікарнях тощо. Забруднення повітря всередині приміщень може бути обумовлене різними факторами, такими як використання побутової хімії, тютюнопаління, емісія від меблів та будівельних матеріалів, недостатня вентиляція тощо. Контроль вмісту твердих частинок в повітрі приміщень за допомогою низькобюджетних пристроїв дозволить вчасно виявляти небезпечні рівні забруднення та вживати заходів для їх зниження, що сприятиме покращенню здоров'я та самопочуття людей.

Перспективним напрямком є також використання розроблених пристроїв для моніторингу якості повітря на робочих місцях, особливо в умовах промислових підприємств, гірничодобувних комплексів, будівельних майданчиків тощо. Це дозволить контролювати дотримання гігієнічних нормативів та стандартів охорони праці, своєчасно виявляти небезпечні рівні забруднення та вживати заходів для захисту здоров'я працівників.

Ще однією перспективною сферою застосування розробленого пристрою є інтеграція з системами розумного будинку та Інтернету речей (IoT). Завдяки можливості бездротової передачі даних через Wi-Fi або Bluetooth, пристрої

можуть бути підключені до централізованих систем управління мікрокліматом приміщень, які будуть автоматично регулювати роботу вентиляції, кондиціонування та очищення повітря на основі показників забруднення. Це дозволить створювати комфортні та безпечні умови для життя та роботи людей, а також оптимізувати енергоспоживання будівель.

Розроблений пристрій може бути також адаптований для використання в системах екологічного моніторингу та контролю впливу на навколишнє середовище. Зокрема, пристрої можуть бути встановлені в зонах впливу промислових об'єктів, звалищ, кар'єрів тощо для оцінки рівня забруднення атмосферного повітря та контролю дотримання природоохоронних нормативів. Отримані дані можуть бути використані для розробки та оцінки ефективності заходів зі зниження викидів, а також для інформування громадськості та прийняття управлінських рішень в сфері охорони довкілля.

Важливим аспектом використання низькобюджетних пристроїв моніторингу якості повітря є можливість залучення громадськості до процесу збору та аналізу даних. Завдяки доступності та простоті використання, пристрої можуть бути розповсюджені серед населення, що дозволить створювати краудсорсингові мережі моніторингу якості повітря. Дані, зібрані від великої кількості учасників, дозволять отримувати більш повну та репрезентативну інформацію про стан забруднення атмосферного повітря, а також підвищувати обізнаність та залученість громадськості до вирішення екологічних проблем.

Окрім вимірювання концентрації твердих частинок, розроблений пристрій може бути доповнений додатковими сенсорами для моніторингу інших параметрів якості повітря, таких як концентрація газів (CO, NO₂, SO₂, O₃ тощо), метеорологічні параметри (температура, вологість, атмосферний тиск), рівень шуму тощо, що дозволить створювати більш універсальні та інформативні системи моніторингу довкілля, які будуть враховувати комплексний вплив різних факторів на здоров'я та якість життя людей.

У подальших дослідженнях планується розширити функціональні можливості розробленого пристрою, зокрема додати функції самодіагностики та калібрування, можливість віддаленого управління та оновлення програмного забезпечення, а також розробити спеціалізовані алгоритми обробки та аналізу даних для виявлення аномалій, прогнозування динаміки забруднення та оцінки ефективності природоохоронних заходів. Також перспективним напрямком є розробка мобільних та веб-додатків для візуалізації та інтерпретації даних моніторингу якості повітря, що дозволить зробити цю інформацію більш доступною та зрозумілою для широкого кола користувачів.

Отже, розроблений низькобюджетний пристрій моніторингу якості повітря на основі датчика PMS7003 та мікроконтролера ESP32 має широкі перспективи використання в різних сферах, пов'язаних з контролем забруднення атмосферного повітря, оцінкою впливу на здоров'я людини та навколишнє середовище, а також з розвитком розумних міст та Інтернету речей. Завдяки своїм перевагам, таким як низька вартість, достатня точність, автономність роботи та можливість інтеграції з інформаційними системами, пристрій може стати ефективним інструментом для вирішення актуальних проблем екологічної безпеки та сталого розвитку суспільства. Подальші дослідження та вдосконалення пристрою дозволять розширити його функціональні можливості та адаптувати до потреб конкретних користувачів та сфер застосування.

ВИСНОВКИ

1. Проаналізовано сучасний стан проблеми забруднення атмосферного повітря та встановлено, що забруднення повітря твердими частинками, оксидами сірки та азоту, леткими органічними сполуками та іншими поллютантами має значний негативний вплив на здоров'я людини та навколишнє середовище. Розглянуто існуючі методи і засоби моніторингу якості повітря, зокрема стаціонарні пости спостереження, мобільні лабораторії, пасивні методи відбору проб, біомоніторинг та дистанційне зондування, та визначено їх основні переваги і недоліки.

2. Обґрунтовано вибір датчика твердих частинок PMS7003 та мікроконтролера ESP32 як основних компонентів для розробки низькобюджетного пристрою моніторингу якості повітря. Датчик PMS7003 забезпечує достатню точність вимірювання концентрації частинок PM1.0, PM2.5 та PM10 при низькому енергоспоживанні та компактних розмірах, а мікроконтролер ESP32 має високу продуктивність, вбудовані модулі бездротового зв'язку та низьку вартість.

3. Розроблено структурну та принципову схеми пристрою моніторингу якості повітря, які включають датчик PMS7003, мікроконтролер ESP32, модуль живлення, периферійні компоненти та елементи інтерфейсу користувача. На основі розроблених схем виготовлено діючий прототип пристрою.

4. Розроблено програмне забезпечення для керування роботою пристрою на основі середовища Arduino IDE та мови програмування C++. Реалізовано функції зчитування даних з датчика PMS7003.

5. Виконано порівняльний аналіз характеристик розробленого пристрою з існуючими аналогами, зокрема з датчиками Plantower PMS5003, Sensirion SPS30, Nova SDS011 та Alphasense OPC-N3. Встановлено, що розроблений пристрій має точність вимірювань, співставну з датчиком PMS5003, і дещо поступається більш дорогим моделям SPS30 та OPC-N3. При

цьому вартість розробленого пристрою є значно нижчою у порівнянні з комерційними аналізаторами якості повітря.

6. Пристрій було успішно випробувано для моніторингу запиленості повітря в місті Вінниця. Побудовані карти запиленості уздовж маршруту переміщень в межах міста. Здійснена оцінка індивідуальної експозиційної дози при пересуванні заданими маршрутами в межах міста.

Таким чином, у роботі успішно вирішено поставлені завдання та досягнуто мету дослідження. Розроблений низькобюджетний пристрій моніторингу якості повітря на основі датчика PMS7003 та мікроконтролера ESP32 має достатні метрологічні та експлуатаційні характеристики для використання в системах контролю забруднення атмосферного повітря.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Давиденко Г.М., Петросян А.А. Дослідження забруднення атмосферного повітря зваженими частками пилу: оцінка наслідків. Вісник Вінницького національного медичного університету. 2017. №1, Ч. 1 (Т. 21). С. 165–168
2. Дмитрієва О.О., Варламов Є.М., Квасов В.А., Палагута О.А., Нестеренко Л.М., Нестеренко У.Ю. Стан мережі спостереження за атмосферним повітрям в Україні та її відповідність вимогам директиви 2008/50/ЄС. Проблеми охорони навколишнього природного середовища та екологічної безпеки. 2016. Вип. 38. С. 99–110. URL: <http://nbuv.gov.ua/UJRN/Ponp20163812> (дата звернення: 02.08.2020).
3. Кольцов М., Шевченко Л. Моніторинг якості атмосферного повітря: український та міжнародний досвід. [Аналітична записка]. Київ: ГО «Фундація «Відкрите Суспільство», 2018. 13 с.
4. Постанова № 827 від 14 серпня 2019 р. Деякі питання здійснення державного моніторингу в галузі охорони атмосферного повітря URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/827-2019-%D0%BF#n18> (дата звернення: 30.07.2020).
5. Про Основні засади (стратегію) державної екологічної політики України на період до 2020 року: Закон України від 21 грудня 2010 р. № 2818-VI. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2818-17>
6. Про Основні засади (стратегію) державної екологічної політики України на період до 2030 року. Закон України від 28 лютого 2019 року № 2697-VIII). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2818-17>
7. Проект «Порядок здійснення державного моніторингу в галузі охорони атмосферного повітря». Київ, 2018. URL: <https://menr.gov.ua/files/docs/Proekt/28012019/Proekt.pdf> (дата звернення: 03.08.2019).

8. Скакальський О. Екологічний моніторинг у системі природоохоронної діяльності регіональної влади. Державне управління та місцеве самоврядування. 2015. Вип. 4. С. 152–162.
9. Турос О.І., Петросян А.А., Михіна Л.І. Гігієна повітря / Досвід та перспективи наукового супроводу проблем гігієнічної науки та практики: зб. наук. пр. Київ, 2011. С. 133–149.
10. AERMOD: Description of Model Formulation, Alan J. Cimorelli, Steven G. Perry, Akula Venkatram, Jeffrey C. Weil, Robert J. Paine, Robert B. Wilson, Russell F. Lee, Warren D. Peters, Roger W. Brode, James O. Paumier / EPA-454/R-03-004 September, 2004.
URL: https://www3.epa.gov/scram001/7thconf/aermod/aermod_mfd.pdf (
11. Agrawaal H., Jones C., Thompson J. E. Personal exposure estimates via portable and wireless sensing and reporting of particulate pollution. International Journal of Environmental Research and Public Health. 2020. Vol. 17, № 3. P. 843.
12. Bjarne Stroustrup The C++ Programming Language (4th Edition): у 4 т. / Bjarne Stroustrup; Вид-во Addison-Wesley Professional, 2013. – 1368 с.
13. Cimorelli A. J., Perry S. G., VenkatramA., Weil J. C., Paine R. J. et al. AERMOD: Description of Model Formulation, EPA-454/R-03-004. U.S. Environmental Protection Agency, 2004. 92 p.
URL: <https://www3.epa.gov/scram001/7thconf/aermod/aermodmfd.pdf>
14. Dust - PMSx003. PMSx003ST – ESP Easy 2.1-beta1 documentation. *Welcome to ESP Easy's documentation! – ESP Easy 2.1-beta1 documentation.* URL: <https://espeasy.readthedocs.io/en/latest/Plugin/P053.html>
15. Directive 2008/50/EC of the European Parliament and of the Council of 21 May 2008 on Ambient Air Quality and Cleaner Air for Europe. Official Journal of the European Union. 2008. Vol. 51. L 152. 44 p.
16. Environmental particulate matter (pm) exposure assessment of construction activities using low-cost pm sensor and latin hypercubic technique / M. Khan, N. Khan, M. J. Skibniewski, C. Park. Sustainability. 2021. Vol. 13, № 14. P. 77–97.

17. Hyperlocal environmental data with a mobile platform in urban environments / A. Wang, S. Mora, Y. Machida et al. Scientific Data. 2023. Vol. 10, № 1. P. 524.
18. Measurement of pm 2.5 Concentrations in indoor air using low-cost sensors and arduino platforms / V. Tasić, M. Jovašević-Stojanović, D. Topalović, M. Davidović. Academy of Sciences, Prague, Czech Republic: COST Association, Avenue Louise 149, 1050 Brussels, Belgium, 2016.
19. Rumantri R., Khakim M. Y. N., Iskandar I. Design and characterization of low-cost sensors for air quality Monitoring System / Jurnal Pendidikan IPA Indonesia. 2018. Vol. 7, № 3. P. 347–354.
20. Thompson J. E. Improved measurement performance for the sharp gp2y1010 dust sensor: reduction of noise. Atmosphere. 2021. Vol. 12, № 6. P. 775.