

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДОНЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ ВАСИЛЯ СТУСА

КАЛІНСКИЙ ПАВЛО ВОЛОДИМИРОВИЧ

Допускається до захисту:

завідувач кафедри
ботаніки та екології,
к.б.н., доцент

_____ О.В. Машталер

«__» _____ 20__ р.

**МОНІТОРИНГ ПИЛУ ТА АЕРОЗОЛІВ В ПОВІТРІ ЗА ДОПОМОГОЮ
ОПТИЧНОГО ПИЛОМІРА**

Спеціальність 101 Екологія

Кваліфікаційна (магістерська) робота

Науковий керівник:

А. М. Міщенко, старший викладач
кафедри біофізики і фізіології,
канд. біол. наук

(підпис)

Оцінка _____ / _____ / _____

(бали/за шкалою ЄКТС/за національною шкалою)

Голова ЕК: _____

(підпис)

Вінниця 2023

АНОТАЦІЯ

Калінский П. В. Моніторинг пилу та аерозолів в повітрі за допомогою оптичного пиломіра. Спеціальність 101 «Екологія» Освітньої програми «Екологія» Донецький національний університет імені Василя Стуса Вінниця 2023.

У кваліфікаційній (магістерській) роботі проведено дослідження питання з моніторингом пилу та аерозолів в повітрі за допомогою оптичного пиломіра. Було створено портативну бездротову систему для вимірювання щільності пилу в повітрі на основі оптичного аналогового датчика щільності часточок пилу GP2Y1010AU0F. Для збереження, візуалізації, а також прив'язки вимірянних даних до поточних GPS-координат використовується смартфон. Оцифрування сигналу датчика пилу, їх первинна обробка та безпроводний зв'язок між смартфоном та системою моніторингу реалізовані з використанням недорогого мікроконтролера ESP32-S. Для тесту, створено карту забруднення в м. Вінниця.

Ключові слова: Пил, моніторинг, оптичний пиломір, аерозолі, Інтернет речей, ESP32-S, дослідження.

69 с., 21 рис., 32 джерела

ABSTRACT

Kalinskyi P.V Monitoring of dust and aerosols in the air by dint of an optical dust meter. Specialty 101 "Ecology" of the Educational Program "Ecology" Donetsk National University named Vasyl Stus Vinnytsia 2023.

In the qualification (master's) work's, the issue of monitoring dust and aerosols in the air with the help of an optical dust meter was studied. A portable wireless system for measuring the density of dust in the air was created based on the GP2Y1010AU0F optical analog density sensor of dust particles. A smartphone is used to store, visualize, and link the measured data to the current GPS coordinates. Digitization of the dust sensor signal, their primary processing and wireless communication between the smartphone and the monitoring system are implemented using an inexpensive ESP32-S microcontroller. For testA, has been created a map of pollution in the city of Vinnytsia.

Keywords: Dust, monitoring, optical dust meter, aerosols, Internet of Things, ESP32-S, research.

69 pp., 21 fig., 32 sources

ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ.....	2
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	5
ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1 ПИЛ ТА АЕРОЗОЛІ У ПОВІТРІ.....	10
1.1 Основні положення.....	10
1.1.1 Класифікація пилу та аерозолів у повітрі.....	10
1.1.2 Стандарти якості атмосферного повітря	17
1.1.3 Дія пилу на організм людини	19
1.2 Вимірювання запиленості повітря	23
1.2.1 Методи визначення запиленості повітря.....	23
1.2.2 Прилади для виміру пилу в повітрі.....	25
1.2.3 Пиломіри в Інтернеті речей	30
РОЗДІЛ 2 ОБ'ЄКТИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	34
2.1 Програмне забезпечення	34
2.1.1 Android studio.....	34
2.1.2 Arduino IDE (Integrated Development Environment).....	36
2.1.3 Python бібліотеки	39
2.1.4 Сервіс ThingSpeak.....	47
2.2 Метод роботи оптичного пиломіра.....	48
2.2.1 Огляд роботи оптичного пиломіра Sharp GP2Y1010AU0F.....	48
2.2.2 Огляд мікроконтролера ESP32-S.....	52
РОЗДІЛ 3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА	56
ВИСНОВКИ.....	66
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	67

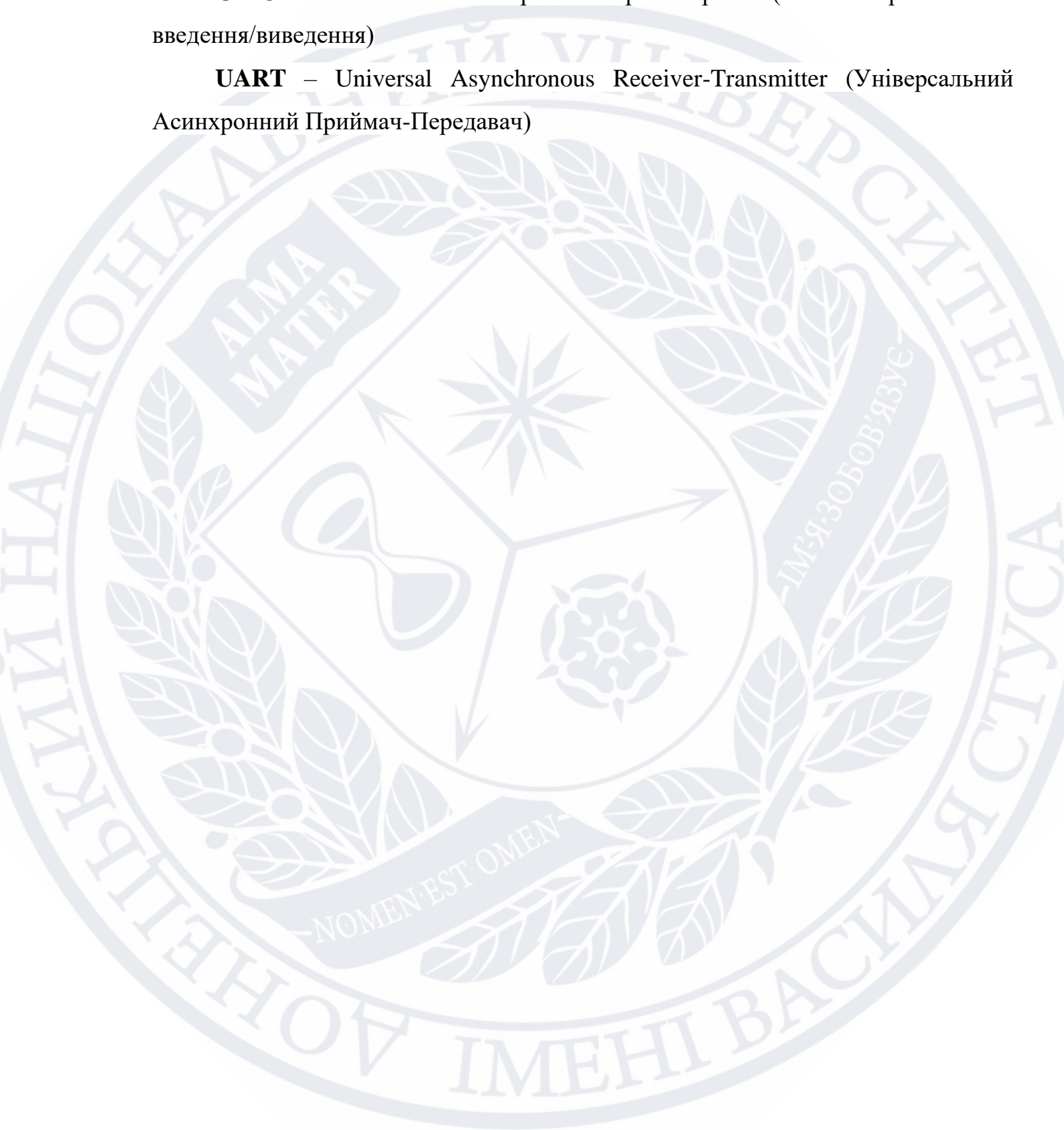
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

- ГДК** – Гранично допустима концентрація
- ГДК_{мр}** – Максимально разова гранично допустима концентрація
- ГДК_{сд}** – Середньодобова гранично допустима концентрація
- ДСН** – Державні санітарні норми
- ЄС** – Європейському Союзу
- США** – Сполучені Штати Америки
- AQI** – Air quality index (індекс якості повітря)
- ХОЛЛ** – Хронічна обструктивна хвороба легень
- НІСМЯАП** – Національна інформаційна система моніторингу якості атмосферного повітря
- IoT** – Internet of things, iot (інтернет речей)
- IDE** – Integrated Development Environment (Інтегроване середовище розробки)
- API** – Application Programming Interface (Інтерфейс програмування програми)
- HTTP** – HyperText Transfer Protocol (Протокол передачі гіпертексту)
- SPDY** – Speedy (Спіді)
- API** – Application Programming Interface (Інтерфейс програмування додатків)
- USB** – Universal Serial Bus (Універсальна послідовна шинна)
- CSV** – Comma-Separated Values (Значення, розділені комами)
- SQL** – Structured Query Language (Мова структурованих запитань)
- JSON** – JavaScript Object Notation (Нотація об'єктів JavaScript)
- URL** – Uniform Resource Locator (Однорідний локатор ресурсів)
- АЦП** – Аналогово-цифровий перетворювач
- ШИМ** – Широтно-імпульсна модуляція
- I²C** – Inter-Integrated Circuit (Шина передачі даних)

SPI – Serial Peripheral Interface (Серійний периферійний інтерфейс)

GPIO – General Purpose Input/Output (Загальнопризначений введення/виведення)

UART – Universal Asynchronous Receiver-Transmitter (Універсальний Асинхронний Приймач-Передавач)



ВСТУП

Світові дослідження наукового співтовариства постійно звертають увагу на вплив часток пилу на здоров'я людини, оскільки цей вплив має серйозні наслідки. Зокрема, частки PM10 (розміром до 10 мікрметрів), що переважно виявляються у пилу в повітрі, а також менші частки PM2,5 (розміром до 2,5 мікрметрів), притаманні диму та туману, є основними предметами уваги. Ці мікрочастки можуть проникати глибоко в дихальні шляхи та легені, сприяючи виникненню хронічного бронхіту, погіршенню симптомів захворювань дихальних шляхів та інших негативних наслідків для органів дихання. У світі наукових спільнот наведені дані, що підтверджують вплив часток на здоров'я людини та нагальність і важливість проблеми, яка потребує безперервного контролю навколишнього середовища.

Встановлено, що середньорічна допустима концентрація PM10 становить 28 мікрограм на кубічний метр повітря, в той час як для PM2,5 це значення складає 17 мікрограм на кубічний метр. Існує широкий вибір приладів для вимірювання щільності пилу, проте багато з них мають високу вартість або не такі зручні для портативного використання, чи мають визначені сфери застосування. У зв'язку з цим виникає необхідність розробки доступних та ефективних систем вимірювання, які базуються на використанні простих і недорогих компонентів. Такі системи можуть використовуватися в різних сферах застосування, незважаючи на меншу точність у порівнянні з комерційно використовуваними дорогими і громіздкими аналогами. Впровадження бездротового зв'язку дозволить використовувати ці системи в якості бездротових сенсорних мереж.

Серед кількох методів вимірювання щільності пилу найбільш кращим є оптичний принцип. Датчики, що працюють за цим принципом, випромінюють світловий промінь, який у присутності пилу розсіюється на сенсори та перетворюється на імпульсний сигнал, пропорційний концентрації частинок.

У сучасному світі моніторинг якості повітря здійснюється за допомогою стаціонарних вимірювальних станцій, що контролюються державними органами. Однак великі витрати на їх придбання та обслуговування обмежують їх кількість і призводять до обмеженої просторової роздільної здатності опублікованих карт забруднення. Рішенням цієї проблеми є розробка індивідуальної вимірювальної системи з використанням недорогих готових компонентів.

Для отримання детальної інформації про забруднення повітря можна залучити мобільні пристрої, такі як смартфони з вбудованим GPS. Це відкриває можливість створення широкомасштабної сенсорної мережі для спільного моніторингу забруднення повітря.

Актуальністю дослідження є те, що в умовах швидких змін та погіршення стану повітря, важливо мати можливість моніторити та реагувати на зміну стану повітря.

Метою дослідження є розробка недорогої портативної бездротової системи для вимірювання щільності пилу в повітрі.

Завданням дослідження є

- розробка та створення прототипу апаратної частини приладу
- розробка програмного забезпечення для апаратної частини модуля та мобільного додатку для дистанційного керування приладом
- апробація роботи приладу в міських умовах

Об'єктом дослідження є оцінка якості повітря за допомогою сенсорів інтернету речей

Предметом дослідження є сенсори виміру пилу

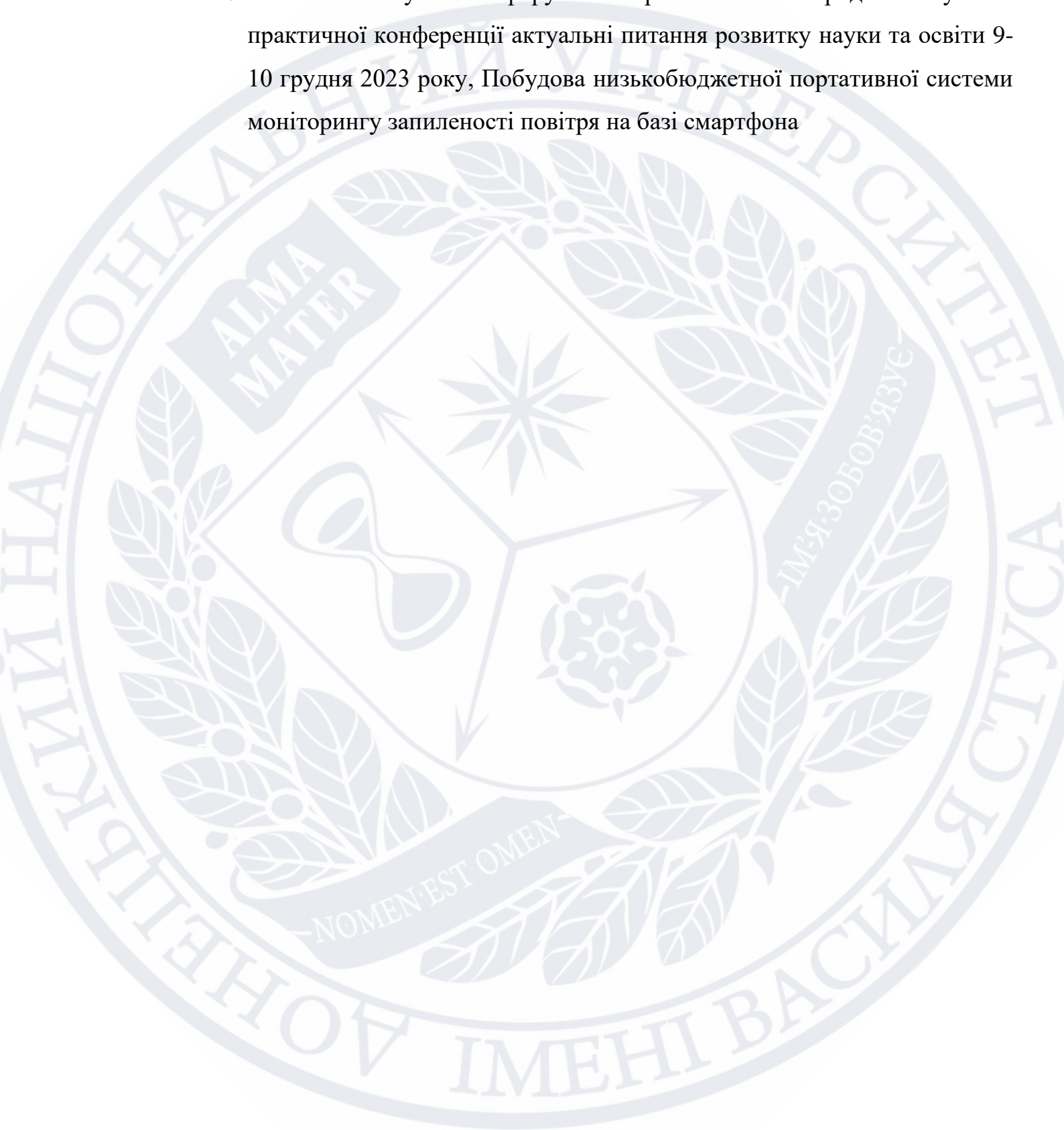
Наукова новизна даної магістерської роботи є створення недорогої портативної бездротової системи для вимірювання щільності пилу в повітрі.

Апробація:

1. Вісник студентського наукового товариства ДонНУ імені Василя Стуса, Том 2 № 15 (2023) Низькобюджетна безпроводна система моніторингу

запиленості повітря на базі android-смартфона

2. Львівський науковий форум матеріали x міжнародної науково-практичної конференції актуальні питання розвитку науки та освіти 9-10 грудня 2023 року, Побудова низькобюджетної портативної системи моніторингу запиленості повітря на базі смартфона



РОЗДІЛ 1 ПИЛ ТА АЕРОЗОЛІ У ПОВІТРІ

1.1 Основні положення

1.1.1 Класифікація пилу та аерозолів у повітрі

Запиленість повітря - це міра концентрації пилу та аерозолів у повітрі. Запиленість повітря може бути виміряна за допомогою спеціальних приладів, таких як лазерні дифрактометри або фотометри.

Висока запиленість повітря може мати шкідливий вплив на здоров'я людей, особливо на людей з захворюваннями дихальних шляхів. Мінімальною шкодою можна назвати, що це може призвести до подразнення очей, нежиті в горлі, кашлю, та інших респіраторних проблем. Максимальна шкода і довго тривалість знаходження в поганих умовах може нести більш важкі наслідки.

Запиленість повітря може бути зумовлена різними факторами, такими як промислова діяльність, автотранспорт, будівельні роботи, як то будівництво та демонтаж, природні пожежі, природні катастрофи, такі як пилові бурі та вулканічна активність, а також пил, що утворюється в процесі діяльності людей, такий як тютюновий дим, та інші. Наразі, деякі країни, в своїх містах з високим рівнем запиленості повітря, здійснюють заходи для зменшення викидів забруднюючих речовин, такі як заборона в'їзду великогабаритних транспортних засобів у центр міста або встановлення фільтрів на промислових підприємствах, проводять контроль забрудненості, і здійснюють інформування населення про стан повітря [14].

Пил є дисперсною системою, в якій дисперсним середовищем є повітря, а дисперсною фазою тверді пилові частинки.

Пил - це дисперсна система, яка складається з твердих частинок різного розміру та форми, що знаходяться в повітрі. Дисперсійна фаза пилу - тверда фаза, а дисперсне середовище - повітря. Пил може містити різні речовини, такі як мінерали, метали, вуглеводні, діоксид кремнію, сірку, нітрогено кислоти та інші.

Пил може бути шкідливим для здоров'я, оскільки тверді частинки можуть

потрапляти в легені та викликати різноманітні захворювання дихальних шляхів та серцево-судинної системи. Деякі пилові частинки також можуть бути канцерогенними або викликати алергічну реакцію у людей. Тому важливо контролювати рівень запиленості повітря та вживати заходів для зменшення викидів забруднюючих речовин в атмосферу.

Дим - це газоподібна дисперсійна система, яка складається з дрібних твердих частинок, рідинних крапель та газу, що утворюються в результаті згоряння органічних речовин або інших процесів, що супроводжуються виділенням продуктів горіння. Дим може мати різний склад і хімічну природу в залежності від джерела його утворення.

Дим може мати різні джерела, такі як побутові та промислові викиди, викиди автотранспорту, пожежі тощо. Дим може містити канцерогенні речовини, такі як бензопірен, альдегіди, оксиди азоту та інші шкідливі речовини, які можуть впливати на здоров'я людей.

Крім того, дим може мати негативний вплив на довкілля, оскільки його компоненти можуть взаємодіяти з атмосферними компонентами, такими як водні пари, кисень та інші, і утворювати нові речовини, які можуть бути ще більш шкідливими.

Туман - це атмосферне явище, коли висока вологість повітря спричинює утворення хмароподібної суспензії водяних крапель або льодяних кристалів, які розкидають світло та зменшують видимість. Туман може бути низьким або високим в залежності від того, на якій висоті він утворюється.

Умовами утворення туману є наявність достатньої кількості водяної пари в повітрі та охолодження цієї пари до точки роси. Туман може утворюватися при низьких температурах, при яких вологе повітря охолоджується до точки роси і водяні краплі утворюються на поверхнях та об'єктах.

Туман може мати негативний вплив на транспорт та інші види людської діяльності, оскільки знижує видимість та може спричинити аварії та інші негативні наслідки. Також, високі рівні вологості та туман можуть спричинювати збільшення розвитку плісняви та інших грибкових інфекцій, які

можуть бути шкідливими для здоров'я людей.

Причинами зростання кількості туману в атмосфері можуть бути забруднення повітря та зміна кліматичних умов. Зменшення викидів забруднюючих речовин в атмосферу та збільшення екологічної свідомості можуть допомогти зменшити кількість туману та покращити якість повітря.

Пил може бути класифікований за декількома ознаками, включаючи за своїм походженням. Основні класи пилу за походженням включають:

- Природний пил: це пил, який утворюється природними процесами, такими як вітер, вулканічна діяльність, лісові пожежі та інші природні катастрофи.
- Антропогенний пил: це пил, який утворюється в результаті людської діяльності, такої як промислові викиди, дорожній рух, будівництво та інші людські дії.
- Комбінований пил: це пил, який містить як природні, так і антропогенні компоненти, і утворюється в результаті взаємодії між ними.

Хімічний склад пилу залежить від його джерела, і тому пил може бути класифікований як органічний або неорганічний.

Органічний пил утворюється в результаті процесів, пов'язаних з живою матерією, таких як рослинні джерела, бактерії, гриби та тварини. Органічний пил може містити складні органічні сполуки, такі як білки, цукри, жири, кислоти та інші.

Неорганічний пил утворюється в результаті процесів, не пов'язаних з живою матерією, таких як вітер, абразія, ерозія, вулканічна діяльність та інші. Неорганічний пил може містити метали, мінерали та інші неорганічні сполуки.

Хімічний склад пилу може бути важливим фактором, який визначає його потенційний вплив на здоров'я людини та навколишнє середовище. Наприклад, певні види органічного пилу можуть бути канцерогенними, тоді як неорганічний пил може бути токсичним через наявність металів, наприклад таких як свинець або ртуть.

Так як згідно з класифікацією, пил може бути природного або антропогенного походження. Природний пил включає частки, що утворюються

при природних процесах, таких як ерозія ґрунту та вивітрювання гірських порід. Антропогенний пил, у свою чергу, походить від людської діяльності, такої як автотранспорт, енергетика та промисловість. Склад антропогенного пилу може змінюватися з часом та залежить від конкретного джерела забруднення. Крім того, практично на будь-якому виробництві відбуваються процеси, що супроводжуються утворенням пилу, який може впливати на здоров'я людини [1].

Шкідливий вплив пилу на організм людини залежить від багатьох факторів:

1. Розміру і форми частинок пилу. Більшість пилових частинок, що мають діаметр більше 10 мкм, відкладаються в верхніх дихальних шляхах і не проникають в легені. Однак менші частки пилу (менше 2,5 мкм) можуть дістатися до глибоких дихальних шляхів та легенів, що може спричинити різноманітні захворювання.

2. Концентрації пилу в повітрі. Чим вища концентрація пилу в повітрі, тим більше можливість його негативного впливу на організм людини.

3. Тривалості впливу. Тривалий контакт з пилом може призвести до розвитку хронічних захворювань.

4. Складу та токсичності пилу. Різні типи пилу можуть містити різні хімічні речовини, які можуть бути токсичними для організму людини. Такі речовини можуть впливати на дихальну, кровообігову, нервову та інші системи організму.

5. Індивідуальної чутливості. Індивідуальні риси організму людини, такі як вік, стать, стан здоров'я, можуть впливати на чутливість до пилу та ступінь його негативного впливу.

За дисперсністю пилу класифікують на наступні групи:

1. Великодисперсний пил - частинки розміром більше 100 мкм. Такий пил може бути видимим для ока, іноді має грубу текстуру та може відчуватися на дотик.

2. Середньодисперсний пил - частинки розміром від 10 до 100 мкм. Цей пил може бути видимим у вигляді туману або диму, але зазвичай не має грубої текстури.

3. Дрібнодисперсний пи́л - частинки розміром від 0,5 до 10 мкм. Цей пи́л може бути повітрям і практично невидимим, але він може залишатися у повітрі довгий час і засмічувати легені.

4. Ультрадрібнодисперсний пи́л - частинки розміром менше 0,5 мкм. Цей пи́л повністю невидимий, але може проникати в дихальні шляхи і засмічувати легені, де він може викликати запалення.

5. Наночастинки - частинки розміром менше 100 нм. Цей тип пи́лу найменший і найбільш потенційно небезпечний, оскільки він може проникати в найменші дихальні шляхи та навіть потрапляти в кровоносну систему.

Аерозолі поділяються на природні та штучні за походженням. Природні аерозолі утворюються приблизно в кількості 1850 млн. тонн щороку, тоді як господарська діяльність людства призводить до викиду 800 млн. тонн штучних аерозолів. Навіть безшкідливий пи́л може поглинати токсичні гази та пари завдяки водяній плівці.

Науково доведено, що найбільш небезпечними для людського організму є пилові частинки з розміром від 0,5 до 10 мкм, які здатні проникати в дихальні шляхи та залишатися там. Частинки більшого розміру затримуються в верхній частині дихальних шляхів та виводяться при кашлі та чханні, тоді як менші частинки виводяться при видиху.

Найнебезпечнішими серед видів пи́лу є ті, які мають зазубрені краї та голчасту форму (наприклад, скляні, металеві, азбестові). Деякі типи пи́лу можуть адсорбувати отруйні гази, що призводить до того, що неотруйний пи́л стає токсичним. Розчинність пи́лу може бути корисною властивістю, якщо пи́л не токсичний. Однак, якщо пи́л містить отруйні речовини, це може сприяти їх швидшому проникненню в кров.

Зважені частинки можуть мати позитивний або негативний заряд. Частинки з однаковим зарядом відштовхуються одна від одної, тому можуть перебувати у повітрі тривалий час. Частинки з протилежним зарядом притягуються одна до однієї і швидко осідають. На сьогоднішній день недостатньо досліджено вплив електрзарядженості пи́лу на організм людини.

Але можна припустити, ймовірно, що саме пил з негативним зарядом має більший вплив, оскільки сприяє збільшенню кількості частинок в організмі.

Якщо в повітрі робочої зони присутні кілька шкідливих речовин, то вони можуть мати адитивний, потенційований, антагоністичний або незалежний вплив на організм людини.

Адитивну дію мають речовини, які взаємодіють з однією і тією ж системою організму. При цьому, якщо компоненти замінити один на одного в однаковій кількості, токсичність суміші не змінюється. При потенційованій дії один з компонентів може збільшувати токсичність іншого. Антагоністичний вплив спостерігається, коли одна речовина зменшує токсичність іншої. Незалежний вплив характеризується тим, що токсичність суміші речовин не залежить від токсичності окремих компонентів.

Отже, при роботі з шкідливими речовинами необхідно враховувати їх можливий адитивний, потенційований або антагоністичний вплив, а також електрзарядженість частинок пилу, які можуть залишатися у повітрі тривалий час та потрапляти в організм через дихальні шляхи. Необхідно застосовувати заходи попередження та захисту, такі як використання спеціального захисного обладнання, та наявність правильно працюючої вентиляції, щоб запобігти негативному впливу шкідливих речовин на здоров'я людини.

З метою захисту людини та навколишнього середовища від шкідливого впливу пилу виробничі приміщення повинні мати обмеження на допустиму концентрацію пилу в повітрі робочої зони. Це регулюється встановленим рівнем гранично допустимих концентрацій (ГДК), який забезпечує контроль за змістом пилу в повітрі, та застосуванні засобів для зменшення його негативного впливу на здоров'я людини та довкілля.

ГДК встановлюються з урахуванням максимально допустимих концентрацій речовин, що містяться в повітрі робочої зони, які не мають негативного впливу на здоров'я людини та довкілля. Однак варто зазначити, що ГДК не є абсолютними значеннями, і в залежності від конкретних умов роботи, їх можуть знижувати.

ГДК є важливим параметром при проектуванні промислових об'єктів, оскільки вона визначає максимально допустиму концентрацію речовини в повітрі робочої зони, що не викликає негативних наслідків для здоров'я працівників.

У гігієнічних нормативах встановлюють два типи ГДК: максимально разова (ГДК_{мр}) та середньодобова (ГДК_{сд}). ГДК_{мр} відноситься до короткочасного впливу речовин на організм людини, тому вона визначає максимально допустиму концентрацію речовини в повітрі, при вдиханні якої протягом 30 хвилин у людини не буде спостерігатися рефлекторних реакцій відповідь, таких як кашель, чхання, сльозотеча.

ГДК_{сд} встановлюється на основі середньодобової концентрації речовини в повітрі, виявленої протягом доби або вибраної на основі прогнозованих максимальних навантажень обладнання та метеорологічних умов. В гігієнічних нормативах також зазначається клас небезпеки речовини, її агрегатний стан та особливості впливу на організм людини.

Шкідливі речовини, які містяться в повітрі робочої зони, поділяються на чотири класи небезпеки в залежності від рівня їх впливу на людину. Ці класи визначаються на основі значень ГДК та характеристик речовини.

Перший клас небезпеки відповідає найбільш шкідливим речовинам, які можуть призвести до летальних наслідків або негайного ураження організму при вдиханні. До цього класу належать речовини, ГДК яких дуже низький.

Другий клас небезпеки характеризує речовини, високі концентрації яких в повітрі робочої зони можуть викликати гострі захворювання. ГДК таких речовин зазвичай встановлюється на значення менше середньодобової концентрації.

Третій клас небезпеки відповідає речовинам, які можуть викликати хронічні захворювання при довготривалому впливі на організм людини. ГДК цих речовин встановлюється на значення менше середньодобової концентрації.

Четвертий клас небезпеки відповідає речовинам, які при вдиханні не викликають шкідливих наслідків, але можуть викликати інші негативні впливи на організм людини при взаємодії з ними в процесі виробництва. До цього класу

належать речовини, ГДК яких встановлюється на значення вище середньодобової концентрації.

1.1.2 Стандарти якості атмосферного повітря

Для підтримання чистоти повітря належить проводити високоефективний та систематичний контроль за станом його забрудненості. Ступінь аерозольної запиленості повітря є явищем змінним у часі та просторі, і визначається рядом чинників, що включають:

- Особливості джерел викидів забруднюючих речовин (тип джерела, природа та фізико-хімічні властивості викидів, обсяг викидів);
- Вплив метеорологічних та топографічних умов (напрямок вітру, його швидкість, термічні інверсії, атмосферний тиск, вологість повітря, рельєф місцевості та відстань до джерела забруднення).

Для визначення ступеня забрудненості повітря необхідно встановлення стандартів якості повітря, що дозволяють ефективно регулювати заходи збереження екологічної чистоти. Існування таких стандартів дає змогу здійснювати раціональний підхід до процесу атмосферної оздоровчої діяльності, спрямовуючи зусилля на ті регіони, де ступінь забрудненості перевищує встановлені норми гігієнічно-санітарних нормативів.

Україна має встановлені ГДК повітря для пилу. Згідно зі стандартами ДСН 3.3.6.042-99[21] та ДСН 3.3.6.037-99[22] максимальна допустима концентрація пилу (загальної) у повітрі навколишнього середовища на робочій зоні не повинна перевищувати $0,15 \text{ мг/м}^3$, а для населення - $0,05 \text{ мг/м}^3$.

У світі існують різні встановлені стандарти ГДК для пилу. Наприклад, в Європейському Союзі (ЄС) максимальна допустима концентрація пилу в повітрі на робочій зоні становить 10 мг/м^3 для кремнійорганічних сполук та 3 мг/м^3 для силікатного пилу, а для населення - $0,05 \text{ мг/м}^3$. В США максимальна допустима концентрація пилу в повітрі на робочій зоні становить 5 мг/м^3 для кремнію та його сполук та 15 мг/м^3 для інших пилу. Для населення США максимальна допустима концентрація пилу в повітрі становить $0,15 \text{ мг/м}^3$.

AQI (Air Quality Index) - це уніфікований кольоровий індекс, що використовується для звітування та прогнозування щоденної якості повітря. Цей індекс розроблений у США та використовується у більшості країн світу.

AQI обчислюється на основі рівнів забруднення повітря на п'яти головних забруднювачах: озон (O₃), частки (PM_{2.5} та PM₁₀), діоксид сірки (SO₂) та діоксид азоту (NO₂). Кожен з цих забруднювачів має свій власний максимально допустимий рівень забруднення повітря.

AQI зосереджується на оцінці впливу забрудненого повітря на здоров'я людини, що може виникнути протягом кількох годин або днів після його вдихання. Ця оцінка використовує нормовану шкалу від 0 до 500, де більш високі значення AQI вказує на більший рівень забруднення та загрозу для здоров'я людини. Значення AQI 100, як правило, відповідає рівню короткострокового національного стандарту якості повітря для конкретного забруднювача. Якщо AQI на рівні 100 і менше, то це вважається прийнятним для здоров'я людини. Але, якщо AQI більше 100, то якість повітря вважається нездоровою, спочатку для людей, які належать до групи з найбільшим ризиком впливу на здоров'я, а потім для всього населення в разі зростання значень AQI (понад 150).

Для розрахунку індексу якості атмосферного повітря потрібна інформація про рівень забруднення за визначений середній період, який можна отримати з газоаналізаторів моніторингу якості атмосферного повітря або методом обчислення. При цьому враховуються як концентрація забруднюючих речовин, так і час їх розповсюдження в атмосфері. Епідеміологічні дослідження свідчать про шкідливий вплив забруднення на здоров'я людей. Для визначення індексу якості повітря використовуються показники, які перетворюються на індекс залежно від сили та функції забруднювача повітря. Індекс якості повітря може бути різним залежно від рівня забруднення і має свої ознаки та характеристики, а також колірний код та стандартизоване інформаційне повідомлення про вплив на здоров'я громадськості.

Збільшення індексу якості повітря може бути спричинене різними

факторами, такими як дорожній рух у час пік, пожежі, відсутність вітру або недостатньою кількістю розріджувачів забруднювачів повітря. Нерухоме повітря може бути викликане антициклоном, інверсією температури або низькою швидкістю вітру, що сприяє збільшенню концентрації забруднюючих речовин в атмосфері і може призвести до хімічної реакції між ними.

У день, коли передбачається зростання рівня індексу якості повітря, агенція або організація охорони здоров'я має зобов'язання вжити необхідних заходів для інформування громадськості про можливі наслідки негативного впливу забруднення повітря на здоров'я людей та рекомендувати заходи для зменшення впливу забруднення на здоров'я, наприклад, обмеження фізичних навантажень, використання засобів захисту дихальних шляхів, обмеження виходу на вулицю в період підвищеного рівня забруднення повітря. Також організація може пропонувати заходи для зменшення викидів забруднюючих речовин, наприклад, пересідання на громадський транспорт або використання екологічно чистих видів транспорту.

Так, в багатьох країнах існують законодавчі акти, які передбачають заходи у випадку низької якості повітря. У разі, якщо індекс якості повітря падає нижче певного порогового значення, агенції або уповноважені органи можуть запроваджувати надзвичайні плани, які передбачають зниження рівня забруднення повітря, а також інші заходи для зменшення впливу на здоров'я населення. Наприклад, можуть бути обмежені викиди забруднюючих речовин підприємствами, зменшені обсяги транспортного руху, запроваджені рекомендації щодо захисту здоров'я населення та інші.

1.1.3 Дія пилу на організм людини

Вивчення пилу як реального фактору, присутнього в оточенні, виявляє його не лише дратівливою, але й потенційно шкідливою речовиною, що систематично недооцінюється. Варто відзначити, що дана забруднююча субстанція має широкий розповсюджений характер, проникаючи в усі сфери нашого оточення. Незважаючи на це, наукове сприйняття впливу пилу на

робочому місці, зокрема, на здоров'я людини, залишається надто поверхневим або, в більшості випадків, відсутнім.

Багато осіб не досягають належного розуміння того, що не весь пил може вважатися безпечним, а його наявність може визначати причини різних проблем зі здоров'ям. В реальності пил виступає як потенційно небезпечна субстанція, яка здатна негативно впливати на життя мільйонів осіб. Ця проблематика вимагає більш глибокого та фундаментального дослідження, спрямованого на вивчення впливу пилу на біологічні процеси та патогенез здоров'я людини.

В атмосферному середовищі, що оточує нас як у приміщеннях, так і на вулицях, неперервно присутні частки забруднень. Одні з цих елементів, такі як пил, бруд, дим або кіптява, мають достатній розмір для того, щоб їх можна було візуально спостерігати без застосування спеціальних засобів чи інструментів. Але також існують частки настільки мікроскопічні, що для їх виявлення необхідне використання електронного мікроскопа (див. рис. 1.1) [17].



Рисунок 1.1 – Розмір частинок забруднення

Пил – це частки твердих речовин, які можуть знаходитися у повітрі навколо нас, і вплив пилу на організм людини може бути досить серйозним. Цей вплив має різноманітні аспекти, особливо при довготривалій інгаляції великих

його кількостей. По-перше, пил містить різноманітні забруднюючі речовини, такі як хімічні сполуки, бактерії, грибки та інші алергени, які можуть призвести до подразнення слизової оболонки легень та алергічних реакцій при їхньому потраплянні в дихальні шляхи, тобто короткостроковий або і довгостроковий негативний вплив на здоров'я людини.

Подовжений контакт з пилом може сприяти розвитку захворювань дихальних шляхів, таких як бронхіт, пневмонія або хронічна обструктивна хвороба легень (ХОЛЛ). Великі частки пилу можуть осідати в бронхах, заважаючи нормальному функціонуванню дихальної системи. Забруднення повітря пилом може також впливати на кардіоваскулярну систему, збільшуючи ризик розвитку серцево-судинних захворювань.

Крім того, пил може бути носієм токсичних речовин, таких як важкі метали та хімічні сполуки, які потрапляють в організм разом із вдихаємим повітрям і які можуть накопичуватися в тканинах органів, спричиняючи різні хвороби та порушення функцій органів.

Розмір частинок пилу визначає ступінь їхньої потенційної небезпеки для фізичного благополуччя людини. Частинки розміром понад 10 мкм можуть викликати лише зовнішні подразнення, такі як роздратування шкіри та очей. З іншого боку, частинки менше 10 мкм можуть потрапити у дихальні шляхи, асоціюючись з респіраторними захворюваннями, такими як астма, трахеїт, пневмонія та алергічний риніт, і можуть викликати серцево-судинні розлади.

Вплив пилових частинок на здоров'я величезний, і, згідно з великим дослідженням, яке вилилося в глобальну модель в 2014 році, пилові частинки викликали приблизно 400 000 передчасних смертей від серцево-легеневих захворювань серед осіб віком понад 30 років [3].

Існує можливість передачі деяких інфекційних захворювань через частки пилу, який вважається не лише дратівливою, але й потенційно шкідливою речовиною. Менінгококовий менінгіт, представляючи бактеріальну інфекцію тонкого шару тканин, що відокремлює головний і спинний мозок, належить до

патологій, які можуть викликати серйозні ускладнення, такі як пошкодження мозку та, у 50% випадків без відповідного лікування, смерть. Захворювання, викликані менінгококовим менінгітом, прогресують у різних регіонах світу, проте найвищий рівень захворюваності спостерігається в так званому "поясі менінгіту", що охоплює частину Африки на південь від Сахари з численністю населення приблизно 300 мільйонів осіб. Зазначено, що спалахи цього захворювання виявляють сезонний характер, і результати численних досліджень свідчать про взаємозв'язок з умовами навколишнього середовища, зокрема низькою вологістю і запиленням, які можуть визначати час і місце інфекції [4]. Наукові дослідження також вказують на можливість того, що вдихання часток пилу в умовах гарячого і сухого клімату може сприяти ураженню слизової оболонки носа і горла, що утворює сприятливе середовище для розвитку бактеріальної інфекції [5]. Зазначено також, що оксиди заліза, що містяться в частках пилу, можуть підвищити ризик зараження.

Пил, безумовно, є не тільки неприємним фактором в повсякденному середовищі, але й відіграє важливу роль у передачі патогенних агентів. Він виявляється ключовим в перенесенні долинної лихоманки, серйозного захворювання, що може призвести до летальних наслідків, особливо на території південно-західних регіонів Сполучених Штатів Америки та Північної Мексики. Пил служить переносником спор грибів, відомих як Кокцидіоидес, які є причиною цієї хвороби (див. рис. 1.2)[15].

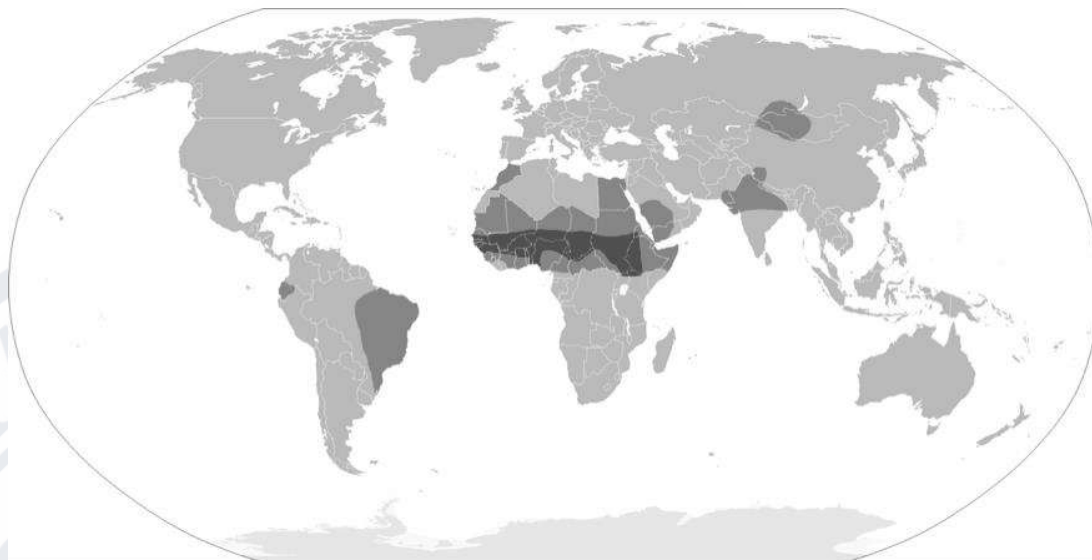


Рисунок 1.2 – Карта смуги менінгіту (чорним кольором) та регіонів з високим ризиком епідемій (темно-сірий), всі інші регіони можуть мати меншу частоту спалахів та спорадичних випадків

Отже, довготривала експозиція до пилу може викликати різні захворювання та мати серйозний вплив на здоров'я людини. Вживання заходів для зменшення контакту з пилом та поліпшення якості повітря є важливими для збереження здоров'я дихальної та серцево-судинної систем.

1.2 Вимірювання запиленості повітря

1.2.1 Методи визначення запиленості повітря

Методи визначення запиленості повітря можуть бути різними, наприклад: гравіметричний (ваговий), лічильний (мікроскопічний), фотометричний та інші. Кожен метод має свої переваги та недоліки, залежно від мети дослідження, характеристик пилу та умов вимірювання [2].

У санітарно-гігієнічній практиці найбільш використовуваним способом виявлення запилення є гравіметричний метод визначення запиленості повітря, який полягає в зважуванні фільтра, на якому зібрано забруднення повітря. Спочатку фільтр вкладають до забору зразка повітря, потім після забору зразка повітря та збирання на фільтрі частинок. Різниця між цими двома вимірами дає масу зібраних на фільтрі частинок.

Цей метод є простим і дешевим, тому його широко використовують у

багатьох країнах для вимірювання рівня запиленості повітря. Однак його недоліком є те, що він не дозволяє визначити хімічний склад частинок, які зібрані на фільтрі. Також, цей метод не є достатньо чутливим для вимірювання наддрібних та наночастинок, які можуть бути особливо шкідливими для здоров'я людини.

Лічильний (мікроскопічний) метод визначення запиленості повітря полягає у визначенні кількості частинок в зразку повітря шляхом їх ручного підрахунку під мікроскопом. Для цього зразок повітря збирають на фільтр або відкладають на підкладку під час його пропускання через певний об'єм повітря. Після цього фільтр або підкладку аналізують під мікроскопом з використанням спеціальних препаратів та підраховують кількість частинок з відповідними розмірами та формами.

Цей метод вимірює кількість частинок, а не їх масу або склад, тому він не дозволяє отримати повну інформацію про забруднення повітря. Проте цей метод є дуже ефективним у визначенні концентрації пилу та інших видів частинок у повітрі з точністю до декількох мікрометрів. Використовується лічильний метод, зокрема, у випадках, коли потрібно збирати дані для порівняння зі стандартами забруднення повітря або вивчення залежності концентрації частинок від різних умов.

Якісну характеристику пилу визначають фотометричним методом за допомогою ультрафіолетового фотометра.

Фотометричний метод визначення запиленості повітря використовується для вимірювання концентрації пилу за допомогою фотометра. Цей метод полягає у вимірюванні рівня світла, що проходить через забруднений повітряний зразок, та порівнянні його з рівнем світла, яке проходить через чистий повітряний зразок. Різниця у рівнях світла дозволяє визначити концентрацію пилу в повітрі.

Для вимірювання концентрації пилу за допомогою фотометра зазвичай використовуються фільтри, які затримують пил та інші забруднюючі речовини з повітряного зразка. Фільтри можуть мати різні характеристики та властивості, що дозволяє використовувати фотометричний метод для вимірювання різних

типів пилу та інших забруднюючих речовин у повітрі.

Однією з переваг фотометричного методу є його висока чутливість та швидкість вимірювання. Однак, він не дозволяє визначати хімічний склад забруднюючих речовин та не є достатньо точним для вимірювання дуже низьких рівнів концентрації пилу. Також він може бути обмежений вимогами до чистоти та калібрування приладу.

1.2.2 Прилади для виміру пилу в повітрі

Прилади для моніторингу рівня пилу представляють собою технічні пристрої та апарати, спроектовані для визначення концентрації пилових частинок у повітрі.

Ці прилади можна класифікувати у дві основні категорії: засоби для відбору проб пилу та аналітичні прилади. Прилади для відбору проб (наприклад, пробовідбірники та аспіратори) використовуються виключно для збору зразків для подальшого аналізу газового та аерозольного забруднення атмосферного повітря. Процес відбору проб може проводитися за допомогою фільтрів чи поглиначів. Після цього фільтри з осілим пилом зважуються для отримання даних про ступінь забруднення повітря пилом. Більшість пристроїв для відбору проб мають вбудований таймер, який автоматично припиняє процес взяття проби після встановленого часового інтервалу. Ці прилади, як правило, вартістю доступніші, ніж аналізатори. Проте, їхній головний недолік полягає в необхідності додаткового аналізу відібраних проб, що може відсувати у часі отримання результатів.

Засоби для вимірювання концентрації пилу в атмосферному повітрі розподіляються за різними категоріями, такими як пристрої фільтруючої, інерційної, седиментаційної, термо- та електропречищення дії. Необхідно зауважити, що в сфері практичного використання для моніторингу пилу найбільш широко поширені пристрої фільтруючої дії. Ці прилади ефективно визначають об'єм повітря, який протікає через фільтри під час відбору зразка [16]:

$$V = q \cdot t \quad (1.4)$$

Де,

q - об'ємна швидкість повітря, л/хв;

t - час відбору проби пилу, хв.

Маса взятого для аналізу забруднюючого пилу визначається шляхом вимірювання різниці маси фільтра після (P_2 , мг) та перед (P_1 , мг) збиранням зразка. Концентрація пилу (n , мг/м³) розраховується за допомогою наступної формули [16]:

$$n = \frac{P_2 - P_1}{q \cdot t} \cdot 1000 \quad (1.5)$$

Де,

P_1 – маса фільтра перед збиранням зразка.

P_2 – маса фільтра після збиранням зразка.

Прилади, призначені для комплексного аналізу атмосферного середовища, включаючи аналізатори пилу, вимірювачі концентрації пилу та пиломіри, є необхідними інструментами для надійного визначення якості повітря. Ці технічні засоби забезпечують швидке та ефективно збирання та аналіз проб повітря, а отримані дані використовуються для кількісного визначення концентрації забруднюючих частинок. Результати аналізу можуть бути представлені у формі окремих вимірів, табличних даних або гістограм, а також можуть бути збережені у внутрішній пам'яті приладу чи відображені на його дисплеї.

Серед переваг використання цих приладів можна відзначити швидкість збирання даних, що коливається від 30 секунд до декількох хвилин, можливість відображення результатів в різних форматах, а також можливість автоматичного вимірювання забрудненості повітря і системи сигналізації при перевищенні заданого рівня концентрації. Втім, важливо враховувати і високу вартість цих приладів, яка може перевищувати вартість інших методів аналізу від 3 до 20 разів.

До того ж, для точного визначення ступеня забруднення атмосферного

повітря використовуються різні методи вимірювань, такі як оптичний (фотометричний), гравіметричний, п'єзобалансний, трибоелектричний та радіоізотопний методи. Кожен з цих пристроїв з різними методами вимірювання має різну вартість, та свої унікальні характеристики, та області застосування, що вимагає обґрунтованого вибору конкретного типу приладу для вирішення конкретних задач.

Розглянемо кожен із них:

Оптичний метод вимірювання пилу в повітрі базується на залежності між вмістом пилу в повітрі і зменшенням пропускної здатності повітря відбиття або розсіяння світла. Цей метод використовується для вимірювання концентрації пилу в атмосферному повітрі, промислових викидах, а також для контролю навколишнього середовища. Перевагами оптичного методу вимірювання пилу є швидкість вимірювання та можливість автоматизації, що дозволяє проводити безперервний моніторинг концентрації пилу в повітрі. Недоліком є чутливість до різних типів пилу та наявність вторинних факторів, таких як вологість, що можуть впливати на точність вимірювань [6, 7, 23].

Фотометричний метод полягає в тому, що через розчин пилу проводиться світло і поглинання світла залежить від концентрації пилу. Світло, яке проходить через зону, де є пил, проходить через фотодетектор, який перетворює його на електричний сигнал. Вимірювання проводиться відносно стандартного зразка або повітря, що не містить пилу (рис 1.3) [18].

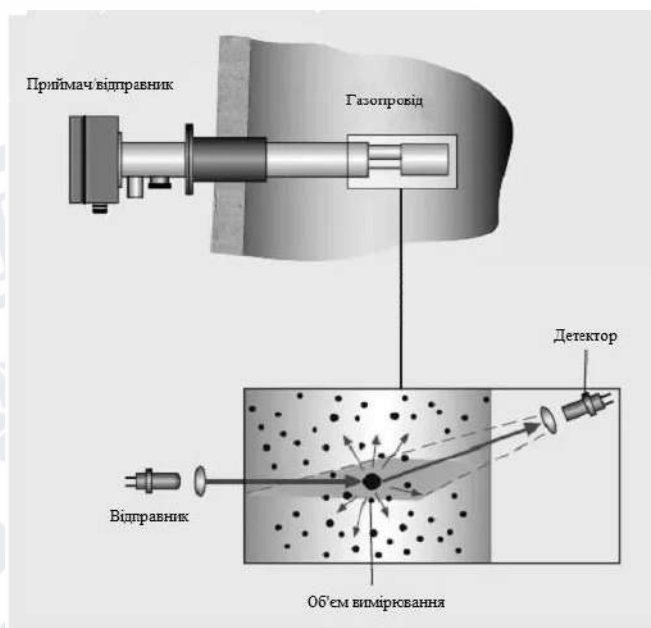


Рисунок 1.3 – Фотометричний метод

Нефелометричний метод використовується для вимірювання розсіювання світла на частинках пилу. Принцип полягає в вимірюванні інтенсивності світла, що розсіюється на пилових частинках, яка залежить від концентрації пилу в повітрі. За допомогою приладу нефелометра вимірюють відносну величину зменшення інтенсивності світла.

Гравіметричний метод - це метод вимірювання пилу, що ґрунтується на зважуванні пилу, що осідає на фільтрі під час проходження повітря через нього.

Принцип роботи полягає в наступному: повітря зразка пропускається через фільтр, де пил осідає. Після забору зразка фільтр з пилом зважується на аналітичних вагах, а зважена маса пилу обчислюється за різницею маси фільтра перед та після забору зразка.

До переваг гравіметричного методу належать висока точність вимірювання та можливість вимірювати різні фракції пилу. Гравіметричний метод є стандартом для вимірювання величини запиленості у повітрі і застосовується в якості еталонного методу для перевірки інших методів.

Однак, до недоліків гравіметричного методу належать високі витрати на обладнання, необхідність частої калібрування обладнання та складнощі в підготовці фільтрів та їхньої обробки [24].

У сучасній науці спостерігається тенденція до заміщення витратних та складних гравіметричних методів аналізу пилових зразків більш передовими підходами. Одним з таких новаторських методів є метод п'єзобалансного зважування осажденої проби пилу.

П'єзобалансний метод вимірювання пилу базується на зважуванні осаду пилу на кварцевому кристалі, на який падає пробне повітря. При цьому кристал зазнає коливань, які реєструються за допомогою п'єзоелементу. За допомогою додаткових пристроїв, які дозволяють вимірювати витрату повітря, можна розрахувати концентрацію пилу.

Плюсами п'єзобалансного методу є висока точність вимірювання, здатність вимірювати концентрацію пилу з великою динамічним діапазоном, а також відсутність впливу параметрів навколишнього середовища. Також, цей метод вимірювання є достатньо швидким і може бути використаний в автоматизованих системах контролю за якістю повітря.

Мінусами п'єзобалансного методу є те, що цей метод не дозволяє визначати розмір часток пилу та їх хімічний склад. Крім того, п'єзобалансні прилади потребують регулярної калібрування і підтримки в чистоті, щоб уникнути помилкових результатів [25].

Трибоелектричний метод вимірювання пилу базується на генерації електричного заряду при терті різних матеріалів, в результаті чого відбувається вимірювання електричного заряду, що виникає при проходженні повітря через вимірювальний прилад.

Основною перевагою трибоелектричного методу є можливість безперервного моніторингу великих потоків повітря, так як він дозволяє вимірювати забруднення в реальному часі із високою точністю. Крім того, цей метод може вимірювати пил різного розміру та форми, і не потребує частого калібрування.

Серед недоліків трибоелектричного методу можна відзначити його вплив на якість повітряних зразків, відбір яких потрібно проводити з обережністю. Крім того, цей метод може виявляти забруднення, що мають високу електричну

провідність, а також відображати результати вимірювання з певною похибкою [26].

Радіоізотопний метод вимірювання пилу базується на рівні мінливості радіоактивної дії пилу в повітрі. Цей метод полягає в тому, що на частинки пилу випромінюється енергія радіоактивного матеріалу, який розміщений в імпульсному режимі. Після цього, енергія, яку поглинула кожна частинка пилу, фіксується детектором і перетворюється в електричний сигнал, який подається на аналізатор.

Одним із найбільших переваг радіоізотопного методу є його висока чутливість, яка дозволяє вимірювати дуже малі концентрації пилу в повітрі. Крім того, цей метод не потребує попередньої підготовки проб повітря, що є його особливістю порівняно з іншими методами вимірювання пилу.

Проте, радіоізотопний метод має деякі недоліки, включаючи високу вартість обладнання та небезпеку пов'язану з використанням радіоактивних матеріалів. Крім того, цей метод не дозволяє вимірювати розміри та форми частинок пилу [27].

1.2.3 Пиломіри в Інтернеті речей

Шкідливі ефекти від забруднення атмосферного середовища, спричиненого дрібним пилом та озоном, викликають широкий інтерес до стану атмосфери у всьому світі.

Зростаюча необхідність впровадження систем постійного та регулярного моніторингу атмосферного середовища свідчить про важливість розвитку технологій, здатних ефективно вимірювати та аналізувати забруднюючі речовини в повітрі. Загроза забруднення атмосфери набуває серйозних розмірів, і саме тому у більшості країн впроваджено урядові системи моніторингу повітря, які служать для надання користувачам даних про забруднення повітря шляхом систематичного спостереження за атмосферним середовищем [5]. Додатково, інформацію про рівень забруднення повітря вивчають за допомогою Національної інформаційної системи моніторингу якості атмосферного повітря

(НІСМЯАП). Необхідно відзначити, що ця система включає в себе високотехнологічне обладнання для вимірювань атмосферного середовища, що призводить до високих витрат на побудову нових станцій вимірювань атмосферного середовища.

Упередженість урядової інформації щодо концентрації дрібного пилу в атмосфері виникає з факту представлення даних на регіональному рівні, що не дозволяє забезпечити високу точність у визначенні ступеня забруднення повітря в конкретних локальних зонах. Виявлення різних рівнів дрібного пилу у визначених територіальних районах свідчить про недооцінку урядової інстанції у забезпеченні адекватної інформації для всієї громадськості.

Можливість виявлення концентрації дрібного пилу на місцевому рівні, а також в домашніх умовах має великий потенціал у запобіганні потенційним ризикам для здоров'я.

Виникає необхідність у впровадженні такої системи моніторингу атмосферного середовища, яка спроможна ефективно надавати результати спостереження за якістю стану повітря в об'єктах загального користування, як приклад таких як дитячі садки та школи, або в будівлях та комерційних об'єктах, чи у тих зонах, де робота станцій вимірювання атмосферного середовища Національної інспекції з метрології, стандартизації, метрологічного забезпечення, акредитації та захисту прав споживачів (НІСМЯАП) недостатньо забезпечує користувачів необхідною інформацією, і не може оперативно слідкувати за змінами стану атмосферного повітря, та своєчасно інформувати людей у разі небезпечних змін.

Як приклад, з початку листопада 2021 року на факультеті комп'ютерних систем і автоматики Вінницького національного технічного університету впроваджено функціональність станції "Air Fresh Max Environment OS". Зазначена станція, найновіший зразок технологічного обладнання, систематично та в реальному часі надсилає дані на сервер, охоплюючи 12 параметрів якості повітря. Серед них вказані концентрації пилу з розмірами частинок 1, 2.5 та 10 мікрометрів (PM1, PM2.5, PM10), діоксид азоту (NO₂), монооксид вуглецю (CO),

діоксид вуглецю (CO₂), озон (O₃), формальдегід, леткі органічні речовини, температура, вологість та атмосферний тиск. Про це повідомляє вчений інженер, доктор технічних наук, професор, керівник кафедри системного аналізу, комп'ютерного моніторингу та інженерної графіки, науковий керівник науково-дослідної лабораторії екологічних досліджень та екологічного моніторингу Віталій Мокін [19].

Ця необхідність вирішується шляхом застосування системи моніторингу повітря, яка інтегрується в інтернет речей. Новітні пристрої, наявні в даний час на ринку, мають таку невисоку вартість, що роблять їх доступними навіть для особистого використання. Зазначені пристрої надають точні виміри та можливість постійного моніторингу якості та стану повітря (див. рис. 1.4) [9].

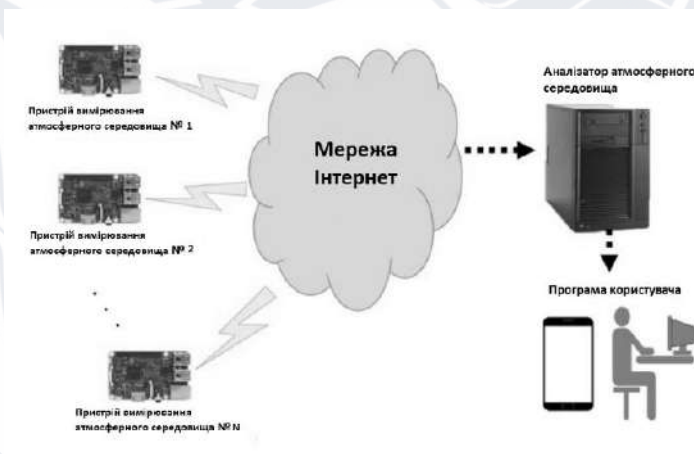


Рисунок 1.4 – Конфігурація системи моніторингу атмосфери в Інтернеті речей

Концепція Інтернету речей (IoT) представляє собою вдосконалену, хоча й просту ініціативу, яка набула свого розвитку протягом часу. Термін "Інтернет речей" або його абревіатура IoT, що виникла від поєднання слів "інтернет" і "речі", визначається як технологічна концепція, яка передбачає підключення будь-якого фізичного пристрою до Інтернету. Ця технологія дозволяє здійснювати зв'язок та управління цими фізичними об'єктами з будь-якої точки світу. Різке зростання кількості користувачів Інтернету, обумовлене розвитком гаджетів, персональних комп'ютерів і мобільних телефонів, робить парадигму Інтернету речей необхідною та невід'ємною частиною сучасної епохи [10].

Інтернет речей, концептуально віднесений до мереж нового покоління, представляє собою інтеграцію різноманітних інфокомунікаційних технологій, що утворюють основу функціонування даного Інтернету речей. Архітектура Інтернету речей ілюструє взаємодію цих технологій між собою, як це проілюстровано на рисунку 1.5 [8, 11].

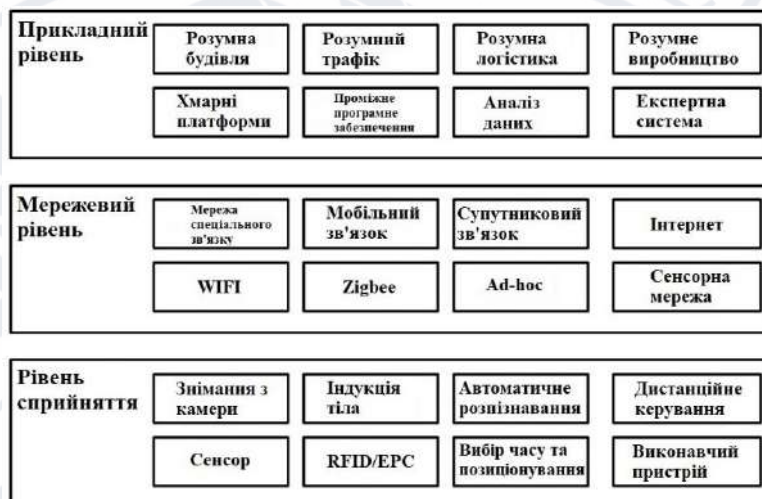


Рисунок 1.5 – . Трирівнева архітектура

- 1) Рівень сприйняття трирівневої архітектури: Рівень усвідомлення завершує процес збору інформації про особу, фізичний об'єкт, транзакцію чи процес за допомогою спеціалізованих інструментів усвідомлення.
- 2) Мережевий рівень у рамках трирівневої архітектури: Мережевий рівень передає інформацію, що надійшла на рівень усвідомлення, на рівень додатків, забезпечуючи безпечний, швидкий та надійний обмін даними між рівнем усвідомлення та рівнем додатків через різні мережі.
- 3) Прикладний рівень трирівневої архітектури: Прикладний рівень вивчає та обробляє отриману інформацію від рівня усвідомлення та мережевого рівня, реалізуючи програму Інтернету речей (IoT) [12].

РОЗДІЛ 2 ОБ'ЄКТИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Програмне забезпечення

2.1.1 Android studio

Android Studio - це інтегроване середовище розробки (IDE), створене спеціально для розробки програм для операційної системи Android. Вона надає зручний інтерфейс для написання коду, візуального редагування інтерфейсів користувача, тестування програм, налагодження, а також збірки і розгортання Android-додатків. Ось кілька позитивних і негативних аспектів Android Studio:

Позитивні сторони Android Studio:

1. Краща підтримка Android: Android Studio розроблена спеціально для роботи з Android-додатками, тому вона має вбудовані інструменти для оптимізації його роботи з платформою Android.
2. Широкі можливості: Інтегроване середовище має багато функцій, таких як візуальний редактор інтерфейсів, зручний дебагер, можливості профілювання, що дозволяють розробникам швидко і ефективно створювати програми.
3. Оновлення та підтримка: Android Studio регулярно оновлюється з виправленнями помилок, новими функціями та покращеннями.
4. Зручний інтерфейс: Android Studio має інтуїтивно зрозумілий інтерфейс, що полегшує розробку додатків для платформи Android.
5. Підтримка Kotlin і Java: Android Studio підтримує як Java, так і Kotlin, що робить його багатofункціональним для розробників.
6. Вбудована емуляція: Засоби вбудованої емуляції дозволяють вам перевірити додаток на різних пристроях та версіях Android без фактичного обладнання.

Негативні сторони Android Studio:

1. Великі вимоги до ресурсів: Для покращеного функціоналу Android Studio потрібні великі обсяги оперативної пам'яті та місця на диску, що може впливати на продуктивність менш потужних комп'ютерів.

2. Час завантаження: Запуск Android Studio може займати значний час, особливо при першому відкритті проекту.

3. Час вивчення: Для новачків вивчення всіх функцій та можливостей Android Studio може зайняти час, оскільки інтегроване середовище має велику кількість інструментів і налаштувань.

4. Можливі проблеми зі сумісністю: Іноді можуть виникати проблеми зі сумісністю певних версій Android Studio з іншими інструментами або бібліотеками, що використовуються у проекті.

Загалом, Android Studio є потужним інструментом для розробки Android-додатків, але варто враховувати його вимоги та можливі труднощі, особливо для початківців.

В роботі використовувались бібліотеки:

1) Бібліотека "GraphView" - це потужний інструмент для візуалізації графіків в Android додатках [30]. Основні позитивні сторони включають:

1. Простота використання: GraphView надає зручний API для швидкого створення різноманітних графіків без великих зусиль.

2. Гнучкість і конфігуруємість: Бібліотека дозволяє налаштовувати різні аспекти графіків, такі як типи ліній, маркери, кольори тощо.

3. Підтримка різних типів графіків: GraphView дозволяє будувати різні типи графіків, такі як лінійні, стовпчасті, точкові і т.д.

Проте, деякі негативні сторони включають:

1. Обмежена функціональність: У порівнянні з іншими бібліотеками, GraphView може мати обмежену функціональність, особливо для складних вимог візуалізації даних.

2. Відсутність активного оновлення: Якщо бібліотека не отримує регулярних оновлень, це може призвести до відсутності підтримки нових функцій або проблем з безпекою.

2)"OkHttp" - це бібліотека для роботи з мережевими запитами в програмах на мові Java або Kotlin. Вона розроблена компанією Square і є дуже популярною в середовищі розробників Android та Java[29].

Позитивні сторони "OkHttp":

1. Простота використання: OkHttp надає простий та легкий інтерфейс для виконання HTTP-запитів і отримання відповідей.
2. Висока продуктивність: Бібліотека оптимізована для використання в мобільних додатках, що забезпечує високу швидкість виконання запитів.
3. Підтримка HTTP/2 і SPDY: OkHttp підтримує сучасні протоколи, що дозволяють покращити ефективність мережеских взаємодій.
4. Можливості кешування: OkHttp вбудовує можливості кешування, що дозволяє зменшити кількість запитів до сервера та покращити швидкодію додатка.

Негативні сторони "OkHttp":

1. Розмір бібліотеки: Хоча OkHttp є досить легкою, її розмір може бути важливим чинником, особливо для малих проектів чи додатків.
2. Вимоги до Android API: Деякі нові функції можуть вимагати вищого рівня Android API, що може ускладнити інтеграцію з деякими старішими версіями Android.
3. Можливі проблеми із сумісністю: Зміни в нових версіях можуть призвести до проблем із сумісністю, які варто враховувати при оновленні бібліотеки.

Незважаючи на ці негативні моменти, OkHttp залишається потужним інструментом для роботи з мережею в Android- та Java-програмах, і його переваги часто переважають його обмеження.

2.1.2 Arduino IDE (Integrated Development Environment)

Arduino IDE (Integrated Development Environment) - це середовище розробки, спеціально створене для програмування мікроконтролерів Arduino. Arduino - це відкрита апаратно-програмна платформа, яка використовується для створення простих електронних пристроїв і проектів. Основною метою Arduino IDE є полегшення процесу розробки програмного забезпечення для мікроконтролерів Arduino навіть для тих, хто не має глибоких знань в області

програмування.

Основні функції Arduino IDE:

1. Редагування та написання коду: Arduino IDE надає зручний текстовий редактор для написання коду на мові програмування C/C++. Користувачі можуть створювати програми для керування введенням та виведенням, обробки подій, та багато іншого.
2. Компіляція коду: Після написання коду, Arduino IDE дозволяє компілювати його в машинний код, який розуміє мікроконтролер Arduino.
3. Завантаження коду: Після компіляції код може бути завантажений на мікроконтролер Arduino через USB-порт.
4. Монітор порту: Arduino IDE має вбудований монітор порту, який дозволяє переглядати вивід програми, що виконується на мікроконтролері, що корисно для відладки.

Позитивні сторони Arduino IDE:

1. Простота використання: Arduino IDE розроблено з урахуванням початківців. Воно має простий інтерфейс та основні засоби, які дозволяють швидко почати програмування мікроконтролерів.
2. Велика спільнота: Arduino має широку та активну спільноту користувачів, що означає, що можна легко знайти допомогу, підказки та приклади коду для різних проектів.
3. Кросплатформенність: Arduino IDE підтримується на різних операційних системах, таких як Windows, macOS, і Linux.
4. Наявність бібліотек: Arduino IDE має велику кількість готових бібліотек, які дозволяють швидко реалізувати різноманітні функції без написання коду з нуля.

Негативні сторони Arduino IDE:

1. Обмежені можливості для високорівневого програмування: Для складних проектів або проектів, що вимагають високорівневих можливостей, Arduino IDE може бути обмеженим.
2. Не підтримується всіма мікроконтролерами: Хоча Arduino IDE

спеціально розроблено для мікроконтролерів Arduino, воно не підтримує всі мікроконтролери або платформи, що може бути недоліком у випадку використання інших пристроїв.

3. Може бути повільним: При великих проектах або складних алгоритмах, час компіляції та завантаження коду на мікроконтролер може бути значною перешкодою.

4. Обмежені можливості редагування коду: Інтерфейс Arduino IDE не має всіх функцій розробки, які є у більш продвинених середовищах, що може бути незручним для досвідчених розробників.

5. Обмежена підтримка мови: Хоча мова Arduino базується на C/C++, вона має свої особливості, що можуть ускладнювати перехід до інших мов програмування.

Враховуючи всі ці аспекти, Arduino IDE залишається потужним інструментом для початківців та середніх розробників, які працюють з мікроконтролерами Arduino.

В магістерській роботі для зв'язку між мікроконтролером і сервером використовувався WebSocket який є протоколом зв'язку між клієнтом і сервером через веб-сокет (WebSocket). У контексті Arduino IDE це може бути використано для забезпечення зв'язку між Arduino-платою та іншими пристроями або серверами.

Позитивні сторони використання WebSocket в Arduino IDE:

1. Двосторонній зв'язок:

WebSocket дозволяє встановити двосторонній зв'язок між Arduino та іншими пристроями або серверами. Це означає, що як сервер, так і клієнт можуть надсилати дані один одному безпосередньо в режимі реального часу.

2. Мале споживання ресурсів:

WebSocket має низький рівень споживання ресурсів, що робить його придатним для використання на пристроях з обмеженими ресурсами, таких як Arduino.

3. Реальний час:

WebSocket забезпечує миттєвий обмін даними, що дозволяє реалізувати реальночасові застосунки. Це особливо корисно для проектів, де важлива швидкість передачі даних.

Негативні сторони використання WebSocket в Arduino IDE:

1. Обмежені ресурси:

Arduino-плати часто обмежені в обсязі пам'яті та обчислювальних ресурсах, тому великі об'єми даних чи складні операції можуть викликати проблеми.

2. Специфічність:

WebSocket – це специфічний протокол, і його використання вимагає підтримки з обох сторін – як зі сторони Arduino, так і зі сторони сервера чи клієнта.

3. Споживання енергії:

В реальних вбудованих системах, де енергоефективність є пріоритетом, постійне утримання активного з'єднання WebSocket може споживати електроенергію, що може бути недоцільним.

4. Сумісність із мережевими умовами:

WebSocket може не завжди ефективно працювати в умовах ненадійного з'єднання чи обмежених мережевих ресурсах.

При використанні WebSocket в Arduino IDE важливо обміркувати потреби конкретного проекту та врахувати обмеження вбудованих систем для досягнення ефективного та стабільного з'єднання.

2.1.3 Python бібліотеки

1) Бібліотека Pandas у Python - це потужний інструмент для обробки та аналізу даних. Вона надає структури даних та інструменти для роботи з ними, зокрема DataFrame, який дозволяє легко маніпулювати табличними даними.

Позитивні сторони pandas:

1. Легкість використання: Pandas надає простий та зручний інтерфейс для завантаження, обробки та аналізу даних.

2. Потужність та функціональність: Pandas дозволяє виконувати різнообразні операції над даними, такі як сортування, фільтрація, групування, об'єднання, обчислення статистичних показників та багато іншого.

3. Підтримка читання та запису даних: Pandas дозволяє легко завантажувати дані з різноманітних форматів, таких як CSV, Excel, SQL, а також з інших джерел.

4. Відмінна обробка відсутності даних: Pandas надає ефективні інструменти для роботи з відсутніми або неповними даними.

5. Гнучкість в індексації та вибірці даних: Індикація та вибірка даних в pandas є потужними та гнучкими, що полегшує роботу з різними структурами даних.

Негативні сторони pandas:

1. Обсяг пам'яті: Для великих наборів даних pandas може бути вимогливим до пам'яті, і це може призвести до обмежень при роботі з об'ємними даними.

2. Швидкодія на деяких операціях: У деяких випадках деякі операції в pandas можуть бути менш ефективними порівняно з іншими інструментами, особливо у випадках, коли обробка даних виконується великими обсягами.

3. Непрозорість помилок: У випадку помилок часом може бути важко визначити їхні причини через внутрішню структуру pandas.

4. Відсутність вбудованих засобів машинного навчання: Pandas не є спеціалізованою бібліотекою для машинного навчання, і хоча вона добре працює з обробкою даних, для задач машинного навчання зазвичай використовують інші бібліотеки, такі як scikit-learn чи TensorFlow.

2) Bokeh - це бібліотека для створення інтерактивних візуалізацій у мові програмування Python. Основні модулі бібліотеки включають «bokeh.plotting», «bokeh.models», «bokeh.io» і «bokeh.layouts».

1. bokeh.plotting: Модуль «bokeh.plotting» надає інтерфейс для створення базових графіків і фігур. Він включає функції, такі як «figure», яка ініціалізує нову фігуру для графічного відображення даних.

2. bokeh.models: «bokeh.models» містить базові об'єкти, які можна

використовувати для побудови графіків. Наприклад, «HoverTool» дозволяє додавати інтерактивні підказки до елементів графіку.

3. bokeh.io: Модуль «bokeh.io» включає функції для відображення графіків, такі як «show». Ця функція відображає графік у веб-браузері або у ноутбучі.

4. bokeh.layouts: «bokeh.layouts» дозволяє компонувати різні елементи графіків, такі як рядки і стовпці, для створення складних макетів.

Використані команди Bokeh в роботі:

1. figure: Функція «figure» створює нову фігуру для графічного відображення даних.

2. show: Функція «show» відображає графік у веб-браузері або у ноутбучі.

3. HoverTool: «HoverTool» додає інтерактивні підказки до графічних елементів.

4. CheckboxGroup: «CheckboxGroup» дозволяє вибирати елементи за допомогою прапорців.

5. CustomJS: «CustomJS» дозволяє вставляти JavaScript-код для керування поведінкою графічних елементів.

6. ColumnDataSource: «ColumnDataSource» створює об'єкт джерела даних для графіків.

7. output_file: «output_file» визначає файл для збереження графіку.

Ці команди дозволяють створювати, керувати і відображувати інтерактивні графіки з даними використовуючи Bokeh.

Позитивні сторони Bokeh:

1. Інтерактивність: Bokeh надає можливості для створення інтерактивних візуалізацій, що дозволяє користувачеві взаємодіяти з графіками, наприклад, збільшувати, переміщати та взаємодіяти з елементами графіку.

2. Простота використання: Легко створювати базові візуалізації без глибокого розуміння внутрішньої роботи.

3. Сумісність з браузерами: Графіки, створені за допомогою Bokeh, можна переглядати у будь-якому сучасному веб-браузері.

Негативні сторони:

1. Специфічний синтаксис: Для деяких користувачів синтаксис `Vokey` може бути не таким інтуїтивно зрозумілим, як у інших бібліотек візуалізації, таких як `Matplotlib`.

2. Великий обсяг даних: При роботі з великими обсягами даних `Vokey` може показати погіршення продуктивності, порівняно з іншими бібліотеками.

3. Залежність від браузера: Інтерактивні функції `Vokey` покладаються на можливості браузера, і деякі з них можуть не працювати в усіх браузерах однаково.

Загалом, `Vokey` - це потужний інструмент для візуалізації даних в `Python` з інтерактивними можливостями, але користувачам слід враховувати його особливості та обмеження.

3) `NumPy` - це бібліотека мови програмування `Python`, яка надає підтримку для великих, багатовимірних масивів та матриць, разом з великою колекцією математичних функцій для роботи з цими масивами. Вона є ключовою бібліотекою у чисельних обчисленнях в екосистемі `Python` і використовується в багатьох галузях, таких як наука про дані, машинне навчання, обробка сигналів та ін.

Позитивні сторони:

1. Швидкість виконання: `NumPy` пропонує ефективні операції над масивами та векторизацію, що дозволяє прискорити обчислення.

2. Масиви: Масиви `NumPy` є ефективними для представлення та роботи з великими об'ємами даних.

3. Математичні функції: Бібліотека включає в себе велику кількість математичних функцій для роботи з числовими даними.

4. Інтеграція з іншими бібліотеками: `NumPy` добре інтегрується з іншими бібліотеками для наукових обчислень, такими як `SciPy`, `Matplotlib` та `Pandas`.

Негативні сторони:

1. Вивчення: Для новачків може знадобитися час для вивчення концепцій та синтаксису `NumPy`.

2. Пам'ять: Використання масивів `NumPy` може вимагати більше пам'яті

порівняно зі звичайними списками в Python.

3. Синтаксис: Для простих операцій синтаксис NumPy може бути більш складним порівняно зі звичайним синтаксисом Python.

У цілому, NumPy є потужним інструментом для роботи з числовими даними в Python, і його позитивні аспекти зазвичай переважають негативні, особливо коли маємо справу з обчисленнями великого обсягу даних.

4) Бібліотека «urllib.request» є частиною стандартної бібліотеки Python і використовується для взаємодії з різними ресурсами через мережу за допомогою протоколу HTTP. Основна функціональність включає в себе відправлення HTTP-запитів та обробку HTTP-відповідей.

Позитивні сторони:

1. Вбудована в Python: «urllib.request» поставляється разом із стандартною бібліотекою Python, що робить її доступною і не вимагає додаткового встановлення.

2. Простота використання: Бібліотека має простий інтерфейс, що дозволяє легко виконувати HTTP-запити та отримувати відповіді.

3. Підтримка різних протоколів: «urllib.request» підтримує роботу з різними протоколами, такими як HTTP, HTTPS, FTP тощо.

Негативні сторони:

1. Обмежена функціональність: У порівнянні з іншими бібліотеками, такими як «requests», «urllib.request» може мати обмежену функціональність і не надає такого рівня зручності в роботі з HTTP-запитами та відповідями.

2. Синхронний характер: Бібліотека працює синхронно, тобто код буде чекати завершення кожного запиту перед тим, як виконати наступний. Це може впливати на продуктивність в деяких сценаріях, особливо в асинхронному програмуванні.

3. Може бути менш зручною в роботі: Для більш складних задач часто використовують бібліотеки вищого рівня, наприклад, «requests», які надають зручний та розширений функціонал для роботи з HTTP-запитами.

5) «json» - це стандартна бібліотека мови програмування Python,

призначена для роботи з форматом обміну даними JSON (JavaScript Object Notation). JSON - це легкопарсимий формат даних, який є зручним для обміну інформацією між різними системами.

Позитивні сторони:

1. Простота використання: Бібліотека «json» надає простий і зрозумілий інтерфейс для кодування (serialization) та декодування (deserialization) даних у форматі JSON.

2. Інтеграція з Python: Оскільки це частина стандартної бібліотеки Python, вам не потрібно встановлювати додаткові пакети для роботи з JSON.

3. Підтримка різних типів даних: «json» може працювати з різними типами даних Python, включаючи словники, списки, рядки, числа, булеві значення та «None».

4. Підтримка на різних платформах: Бібліотека «json» підтримується на різних платформах, що робить її придатною для використання в різних середовищах.

Негативні сторони:

1. Обмежена підтримка специфікації JSON: Бібліотека «json» обмежена у підтримці деяких аспектів специфікації JSON, таких як відсутність підтримки для нестандартних розширень.

2. Важкість роботи з деякими Python-специфічними об'єктами: Деякі об'єкти Python можуть бути важкі для коректного кодування або декодування з використанням стандартного кодера «json».

3. Не підтримує бінарні дані без додаткових обгорток: Якщо потрібно обробляти бінарні дані, може знадобитися використовувати додаткові засоби (наприклад, Base64-кодування).

Загалом, бібліотека «json» є потужним і зручним інструментом для роботи з JSON в Python, і багато з негативних аспектів можна обійти з використанням додаткових інструментів чи обгортки, якщо це необхідно.

б) «datetime» - це модуль у мові програмування Python, який надає класи для роботи з датою і часом. Основні класи, які визначені в цьому модулі,

включають «datetime», «date», «time», «timedelta» і інші. Основні можливості цього модуля включають:

Позитивні сторони:

1. Робота з Датою та Часом: «datetime» дозволяє ефективно працювати з датою та часом, що є важливим у багатьох програмах, таких як робота зі статистикою, розкладами, робота зі специфічними подіями тощо.

2. Маніпуляція часом: «datetime» надає можливості для виконання різних операцій з часом, включаючи додавання або віднімання часових інтервалів, обчислення різниці між двома моментами часу тощо.

3. Підтримка Часових поясів: Модуль «datetime» має підтримку роботи з часовими поясами, що важливо у веб-розробці та додатках, які працюють з міжнародними даними.

4. Широкі Можливості Форматування: Можливість легко формувати дати та час у різні рядки з використанням різних форматів.

Негативні сторони:

1. Складний Синтаксис: Деякі операції, зокрема робота зі стрічками формату дати, може бути трошки складною і вимагати деякого часу для розуміння.

2. Обмежені можливості для деяких складних обчислень: У деяких випадках для складних обчислень, пов'язаних з датами і часом, може бути корисніше використовувати спеціалізовані бібліотеки.

3. Неможливість працювати зі змінними інтервалами: Інтервали часу в «datetime» є незмінними, тобто їх не можна змінювати після створення.

Загалом, бібліотека «datetime» вважається потужним і корисним інструментом для роботи з датами та часом у Python.

7) Бібліотека Folium в Python призначена для створення інтерактивних карт з використанням даних з об'єктів GeoJSON. Основні позитивні та негативні сторони Folium включають:

Позитивні сторони:

1. Простота використання: Folium надає простий та зрозумілий інтерфейс

для створення карт, що робить її досить доступною для початківців.

2. Інтерактивність: За допомогою Folium можна легко додавати елементи управління, такі як маркери, полігони, кола, лінії та інше, роблячи карту більш інтерактивною для користувачів.

3. Підтримка шарів: Folium підтримує додавання різних шарів на карту, що дає змогу відобразити різні типи інформації на одній карті.

4. Легка інтеграція з Pandas: Можливість легко інтегрувати дані з Pandas дозволяє зручно візуалізувати та аналізувати дані на карті.

Негативні сторони:

1. Обмежені можливості географічного візуалізації: Хоча Folium підходить для багатьох простих випадків візуалізації географічних даних, для деяких складніших випадків можуть знадобитися більш потужні інструменти.

2. Залежність від браузера: Інтерактивність Folium базується на використанні JavaScript, тому коректна робота бібліотеки може залежати від підтримки браузера.

3. Обмежені можливості налаштування вигляду: Folium пропонує базові засоби для налаштування вигляду карт, але для більш специфічних або складних вимог може знадобитися використання інших інструментів.

Незважаючи на обмеження, Folium є популярним інструментом для швидкої та простої візуалізації географічних даних в середовищі Python.

8) Модуль «webbrowser» у Python - це зручний інструмент, який дозволяє відкривати веб-сторінки, URL-адреси в браузері користувача просто з програми на Python.

Позитивні сторони:

1. Простота використання: Модуль дозволяє відкривати посилання в стандартному браузері без необхідності встановлення додаткових налаштувань.

2. Кросплатформеність: Підтримується на різних операційних системах, тож код, який використовує «webbrowser», буде працювати на більшості платформ.

3. Відкритість: Дозволяє автоматично відкривати URL-и в браузері, що

спрощує взаємодію з інтернет-ресурсами.

Негативні сторони:

1. Обмеженість функціоналу: Модуль «webbrowser» не надає широкого спектру можливостей для взаємодії з браузером. Наприклад, він не дозволяє контролювати браузерні вікна або виконувати складніші дії, такі як заповнення форм.

2. Залежність від налаштувань користувача: Відкриття посилання відбувається в браузері, який встановлений за замовчуванням на комп'ютері користувача. Якщо він змінив ці налаштування, це може вплинути на роботу модуля.

Загалом, «webbrowser» - це зручний спосіб відкривати веб-сторінки в браузері, але він може бути обмеженим для складніших завдань, пов'язаних із взаємодією з веб-інтерфейсами.

2.1.4 Сервіс ThingSpeak

ThingSpeak - це інтернет-платформа для збору та аналізу даних з різних джерел, таких як сенсори, пристрої Інтернету речей (IoT) та інші джерела. Вона була розроблена компанією MathWorks і забезпечує можливість створення та обміну каналами, кожен з яких може збирати дані в реальному часі.

Принцип роботи:

1. Створення каналу: Користувачі можуть створювати канали для збору даних. Кожен канал має унікальний ідентифікатор і може бути публічним або приватним.

2. Надсилання даних: Дані можна надсилати на канал ThingSpeak через різні інтерфейси, такі як HTTP, MQTT або за допомогою вбудованих заходів безпеки ThingSpeak.

3. Збереження та візуалізація даних: ThingSpeak зберігає дані у формі таблиць та графіків, що дозволяє користувачам відстежувати та аналізувати їх в реальному часі.

4. Взаємодія з додатками: ThingSpeak дозволяє налаштовувати реакції на

певні події та використовувати вбудовані MATLAB-сценарії для аналізу даних.

Сфери застосування:

1. Моніторинг: ThingSpeak використовується для відстеження та моніторингу параметрів, таких як температура, вологість та інші дані в реальному часі.

2. IoT проекти: Його можна використовувати для об'єднання та аналізу даних з IoT-пристроїв, датчиків та інших пристроїв.

3. Дослідження: Вчені можуть використовувати ThingSpeak для збору та аналізу даних у реальному часі у вигляді вимірювань, графіків та таблиць.

Позитивні аспекти:

1. Простота використання: Інтерфейс легко засвоюється для зберігання, візуалізації та аналізу даних.

2. Безкоштовність базового функціоналу: Безкоштовний план доступний для багатьох застосувань Інтернету речей (IoT).

Негативні аспекти:

1. Обмеження в безкоштовному плані: Для роботи з більшим обсягом даних або розширення функціоналу може знадобитися платний тариф.

2. Приватність та безпека: Під час користування онлайн-платформою необхідно враховувати аспекти конфіденційності та безпеки даних.

3. Обмежена масштабованість: Для великих проектів може виявитися непридатною.

4. Залежність від інтернет-з'єднання: ThingSpeak потребує наявності Інтернет-з'єднання для передачі даних.

2.2 Метод роботи оптичного пиломіра

2.2.1 Огляд роботи оптичного пиломіра Sharp GP2Y1010AU0F

1. Принцип роботи:

Оптичний пиломір GP2Y1010AU0F вимірює концентрацію часток пилу у повітрі за допомогою інфрачервоного світла. Світло, яке випромінюється діодом,

проходить через повітря, а потім відбивається від часток пилу. Фотодатчик отримує відбите світло, і його інтенсивність залежить від кількості пилових часток у повітрі (див. рис. 2.1)[7].



Рисунок 2.1 – Взаємодія світлового потоку і пилу

У виконанні поставленого завдання використовуємо засіб для моніторингу якості повітря, а саме - датчик, призначений для визначення наявності часток пилу.

Використовуючи нефелометричний принцип, датчик пилу від компанії Sharp працює на інфрачервоному діапазоні та базується на розсіюванні світла. Вбудований датчик GP2Y1010AU0F має здатність виявляти дрібні частинки, що мають розмір більше 0,8 мкм у діаметрі, включаючи сигаретний дим. Технічні параметри цього сенсора включають чутливість на рівні $0,5 \text{ V}/(100 \text{ мкг}/\text{м}^3)$, діапазон вимірювання до $500 \text{ мкг}/\text{м}^3$.

У пристрої розміщені інфрачервоний світлодіод та світлочутливий елемент, розташовані під кутом приблизно 120 градусів на оптичній площині. Ця конфігурація дозволяє вибірково збирати розсіяне чи відбите світло від часток пилу у повітрі.

Для підтримки різноманітних джерел живлення передбачено вбудовану схему підсилення напруги. Датчик відрізняється низьким споживанням енергії, зазвичай становлячи 10–20 мА, та може житися від постійного струму від 4,5 до 7 В. Це робить його зручним для безпосереднього підключення до мікропроцесорних плат, таких як популярний Arduino Uno. Останній може

надавати струмовий під напругою 5 В постійного струму.

Вихідний сигнал датчика Sharp представляє собою аналоговий напруговий імпульс, висота та площа якого пропорційні вимірюваній густині пилу. Виробник вказує на чутливість датчика до рівня 0,5 В висоти імпульсу при концентрації 0,1 мг/м³ РМ.

Було виявлено, що шум вимірювання в основному виникає в схемі виявлення фотодіода, і що електромагнітні перешкоди можуть різко впливати на сигнали датчика пилу.

Початкова напруга оптичний пиломір GP2Y1010AU0F вимірює проявляє пропорційну залежність від густини пилу у діапазоні від 0 до 0,5 мг/м³. На представленому графіку ілюструється, що максимальна вихідна напруга досягає значення $V_{\text{вих.мак}}=3,7$ В (див. рис. 2.2) [32].

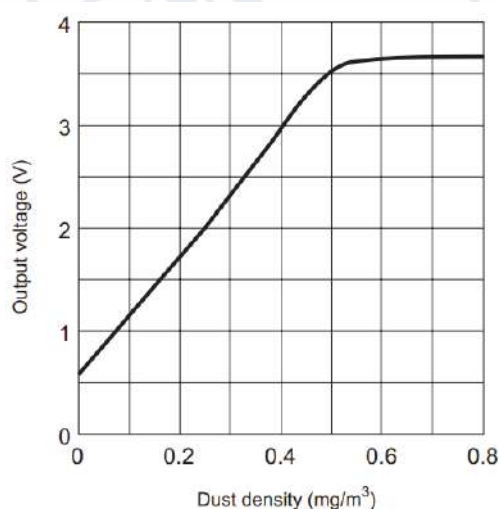


Рисунок 2.2 – Вихідна напруга модуля пропорційна щільності пилу

2. Структура датчика:

- Діод-випромінювач: випромінює інфрачервоне світло.
- Фотодатчик: отримує відбите світло.
- Електроніка обробки сигналу: конвертує зчитування фотодатчика в вимірювання концентрації пилу.

У конфігурації до датчика моніторингу якості повітря моделі Sharp GP2Y1010AU0F впроваджено використання подільника напруги, в якому фігурують резистори R6 та R10. Функцією якого є значне зниження амплітуди

вихідного сигналу, практично до 1/11 від його первинного значення (див. рис. 2.3) [32].

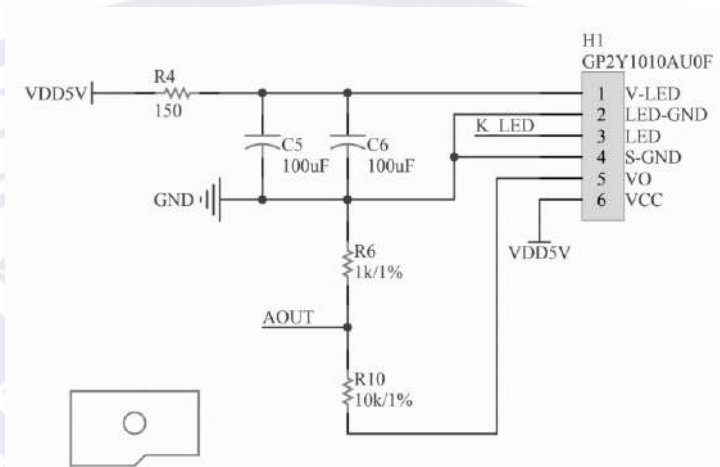


Рисунок 2.3 – Подільник напруги датчика моніторингу якості повітря моделі Sharp GP2Y1010AU0F

В дослідженні [28] було виявлено, що при ємності, меншій за 22 мкФ, світлодіод не працював/спрацьовував належним чином. При ємності до 100 мкФ яскравість вихідного світла світлодіода була >25% тьмянішою, ніж можна було досягти при вищих ємностях. Ємності від 470 до 3300 мкФ забезпечували найвищу вказану яскравість світлодіода (значення в межах 5% одне від одного). Шум від імпульсу до імпульсу також був зменшений (вимірювався у відсотках відносного стандартного відхилення). Збільшуючи ємність від менше ніж 100 мікрофарад до 3300 мікрофарад, відсоток відносного стандартного відхилення зменшувався з майже 10% до <3% для окремих наступних світлодіодних імпульсів.

Результати свідчили, що ємність > 500 мкФ була бажаною для драйвера світлодіода, щоб одночасно максимізувати яскравість світлодіода та зменшити шум. Для всіх наступних експериментів у схемі використовувався конденсатор ємністю 1000 мкФ. Використання сприятливого конденсатора було визначено як дуже простий та ефективний спосіб покращення функціональності датчика пилу від компанії Sharp.

3. Формули для Розрахунків та Калібрування

Унаслідок цього, максимальний рівень напруги, що подається на

мікроконтролер, становитиме приблизно $V_{OUTmax}=3.6/11=0.32$ В. Таким чином, для трансформації вихідного сигналу в концентрацію пилу в повітрі необхідно здійснити програмний розрахунок за допомогою формули (2.3):

$$v = \frac{v_{OUT}}{2^{**adc}} * v_{ref} \text{ В} \quad (2.1)$$

Де,

v_{OUT} – напруга яка надходить з датчика моніторингу якості повітря Sharp GP2Y1010AU0F на мікроконтролер

adc – Розрядність АЦП

v_{ref} – максимальна напруга мікроконтролера

$$v_2 = v * 3.7 - v_{zero} \text{ В} \quad (2.2)$$

Де,

v_{zero} – нульова напруга ($v_{zero} = 0.1$)

$$dust_dens = (v_2 \cdot 1 \cdot 10^3) * K \text{ мг/м}^3 \quad (2.3)$$

Де,

K – коефіцієнт пропорційності

4. Калібрування Датчика

- Вимірювання Фонового Рівня: Виміряйте вихідний сигнал при чистому повітрі для визначення фонового рівня.
- Корекція Значень: Співвіднесення виміряного значення з відомими концентраціями пилу для корекції системних похибок.

2.2.2 Огляд мікроконтролера ESP32-S

Мікросхема ESP32-S є компактним модулем, що базується на потужному двоядерному процесорі Xtensa 32-bit LX6 із тактовою частотою до 240 МГц. Цей модуль включає в себе ряд функцій, таких як підтримка бездротового зв'язку Wi-Fi та Bluetooth, різноманітні інтерфейси введення-виведення, вбудовану флеш-пам'ять та інші можливості (див. рис. 2.4)[31].

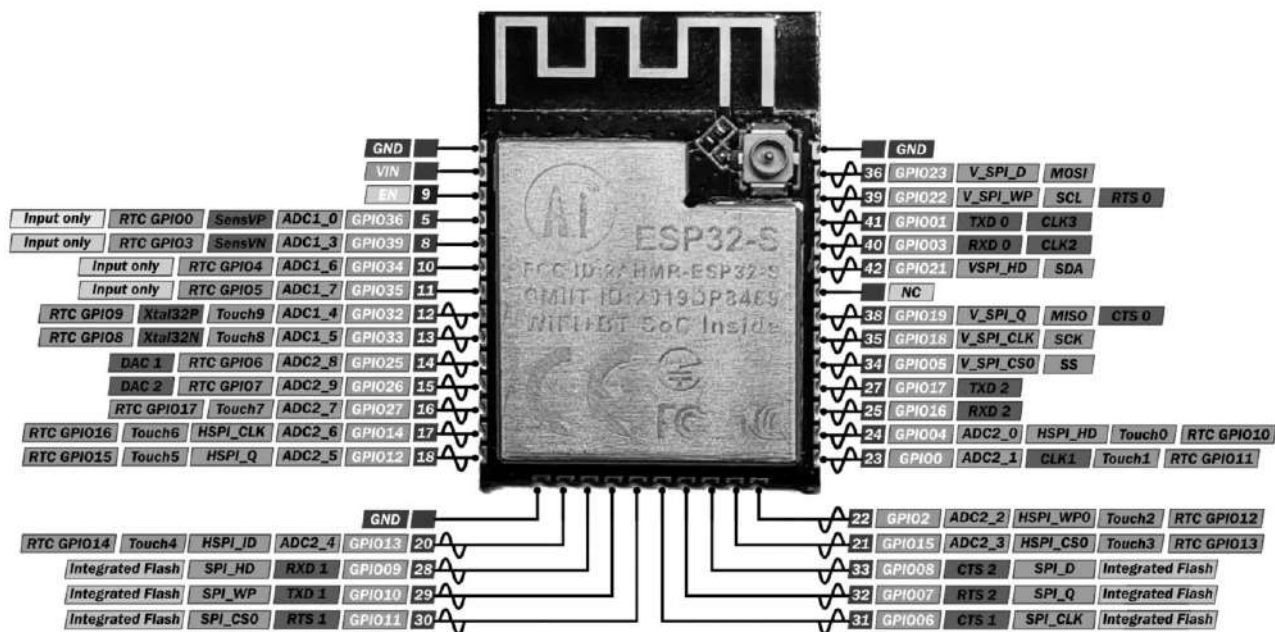


Рисунок 2.4 – Розпіновка мікроконтролера ESP32-S

Основні характеристики ESP32 включають:

- Двоядерний процесор: ESP32 має два ядра, що дозволяє виконувати багатозадачні завдання та забезпечує високу продуктивність.
- Бездротові можливості: ESP32 підтримує бездротові технології, такі як Wi-Fi і Bluetooth, що робить його ідеальним для розробки IoT-проектів.
- Низька споживана потужність: Завдяки режимам низького споживання енергії, ESP32 може бути використаний у батарейних пристроях з тривалим терміном служби.
- Розширена функціональність: Мікроконтролер має багато периферійних пристроїв, таких як АЦП, ШІМ, ІС, SPI, GPIO і багато інших, що полегшує підключення різноманітних датчиків та пристроїв.

Мікроконтролер ESP32-S видається продуктивним та універсальним засобом, який володіє вражаючим функціоналом у сферах безпроводного зв'язку, зокрема, підтримує технології WiFi та Bluetooth.

Завдяки вбудованому модулю WiFi, ESP32-S може ефективно взаємодіяти з бездротовими мережами та легко підключатися до глобальної мережі Інтернет. Такий підхід забезпечує стабільний та високошвидкісний зв'язок, уникати необхідності використання провідних з'єднань.

Крім того, ESP32-S володіє вбудованим Bluetooth-модулем, що надає можливість налагоджувати бездротові з'єднання із іншими пристроями Bluetooth, такими як смартфони, навушники та інші периферійні пристрої. Це сприяє розширенню спектру можливостей та використанню даного мікроконтролера в різноманітних застосуваннях інтернету речей та бездротових технологій.

Використання стандартів Wi-Fi 802.11 b/g/n та підтримка Bluetooth 4.2 BLE є основними характеристиками цього пристрою. Його компактні розміри співвідносяться з низьким рівнем споживаної енергії, що робить його ефективним у використанні. Бездротове з'єднання забезпечується швидко та стабільно, забезпечуючи легкий доступ до мережі Інтернет.

Цей пристрій володіє можливістю взаємодії з іншими Bluetooth-пристроями та має зручну інтеграцію з різноманітними проектами завдяки вбудованому мікроконтролеру ESP32-S. Архітектура цього контролера є 32-бітною, з частотою процесора 240 МГц.

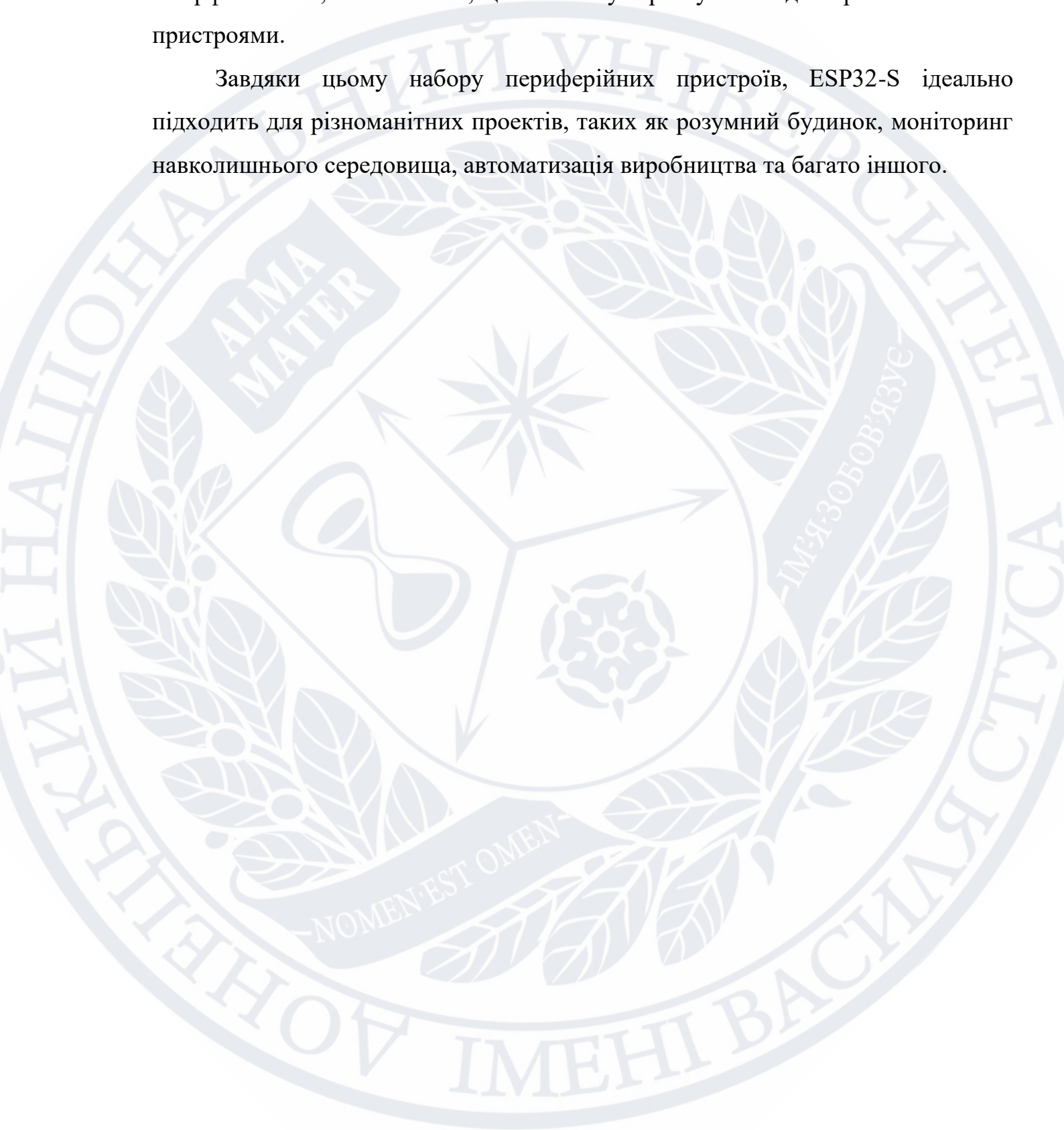
Його низький рівень споживаної енергії робить його економічним у використанні та дозволяє використовувати пристрій у різних областях, включаючи Інтернет речей, системи розумного будинку та автоматизацію.

ESP32-S представляє значну перевагу завдяки широкому спектру периферійних пристроїв, які дозволяють реалізовувати різноманітні проекти з мінімальними витратами на додаткове обладнання. Ось кілька з них:

1. Модулі Wi-Fi та Bluetooth: ESP32-S підтримує бездротове з'єднання за протоколами Wi-Fi та Bluetooth, що дозволяє швидко та легко створювати мережеві та IoT-застосунки.
2. GPIO-піни: на платі ESP32-S є 38 GPIO-пінів, які можна використовувати для підключення різноманітних компонентів та датчиків.
3. Аналого-цифровий перетворювач (АЦП): ESP32-S має 12-бітний АЦП, що дозволяє вимірювати аналогові значення напруги з високою точністю.
4. Широтно-імпульсна модуляція (ШИМ): ESP32-S підтримує до 16 каналів ШИМ, що дозволяє керувати яскравістю світлодіодів або швидкістю двигунів.

5. I2C, SPI та UART: ESP32-S має вбудовану підтримку комунікаційних інтерфейсів I2C, SPI та UART, що забезпечує просту взаємодію з різноманітними пристроями.

Завдяки цьому набору периферійних пристроїв, ESP32-S ідеально підходить для різноманітних проєктів, таких як розумний будинок, моніторинг навколишнього середовища, автоматизація виробництва та багато іншого.



РОЗДІЛ 3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА

З метою отримання інформації щодо щільності пилу, вихідний сигнал аналогового датчика GP2Y1010AU0F піддається оцифруванню. Для цього використовується мікроконтролер ESP32S, обладнаний модулями WiFi та Bluetooth, а також 12-розрядним аналого-цифровим перетворювачем. Оцифровані дані передаються на мобільний телефон для подальшого аналізу

Приклад підключення наведено на (див. рис. 3.1).

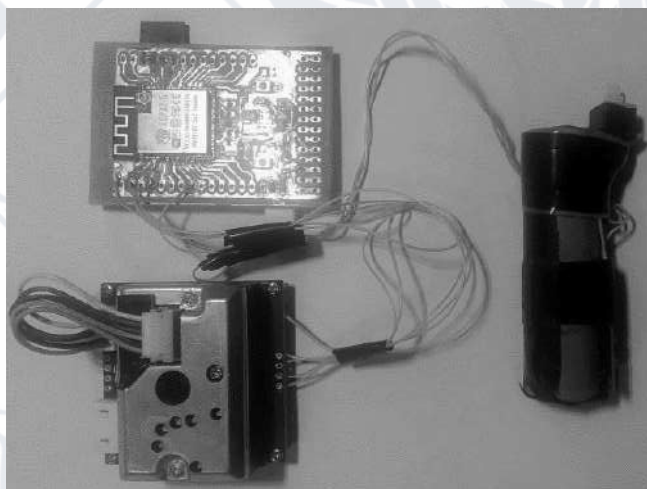


Рисунок 3.1 – Датчик для моніторингу якості повітря Sharp GP2Y1010AU0F підключений до мікроконтролера ESP32-S.

Внаслідок вбудованого в мікроконтролер ESP32-S аналого-цифрового перетворювача з розрядністю 12 біт та максимальною робочою напругою 1 В, виникає можливість здійснення більш точного вимірювання концентрації пилу в атмосферному повітрі.

Працюємо з газовим датчиком за допомогою одного акумулятора типу 18650 з номінальною ємністю 1500 мАг при напрузі 3,7 В. Враховуючи найвищий вимірний струм, що споживає 50 мА, приблизно оцінюємо термін служби однієї зарядки акумулятора в 30 годин. Ця тривалість життя дозволяє контролювати концентрацію пилу в повітрі протягом приблизно однієї доби.

Тестуючи прилад, та проводячи моніторинг повітря з 09.09.2023 по 10.09.2023 виявлені незначні коливання концентрацій пилу в повітрі (див. рис. 3.2).

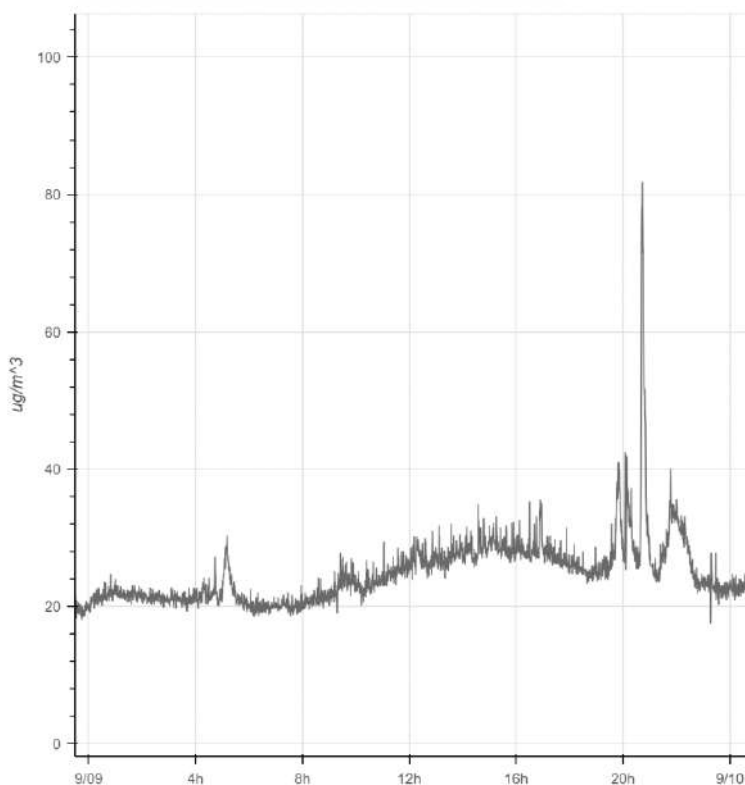


Рисунок 3.2 – Моніторинг концентрацій пилу в повітрі з 09.09.2023 до 10.09.2023

Уздовж періоду з 30 червня 2023 року до 13 жовтня 2023 року здійснено тривалий науковий моніторинг, що дозволяє виявити, що концентрація пилу перебувала в цей період в межах норми. Незначні різкі коливання можуть свідчити про вплив зовнішніх факторів, таких як, наприклад, дим, виниклий внаслідок горіння багаття, чи накопичення викидів автомобілів при збільшенні інтенсивності рухи, і т.д. (див. рис. 3.3).

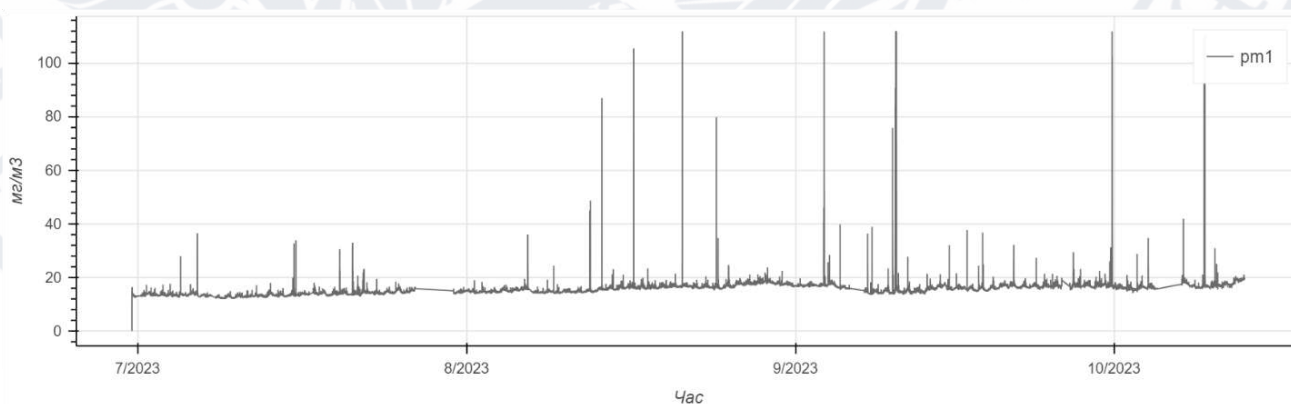


Рисунок 3.3 – Моніторинг концентрацій пилу в повітрі з 30.06.2023 до 13.10.2023

Засновуючись на представлених даних, був проведений спектральний аналіз. Крім того, для визначення закономірностей використовувалися відомості щодо тиску та температури (див. рис. 3.4).

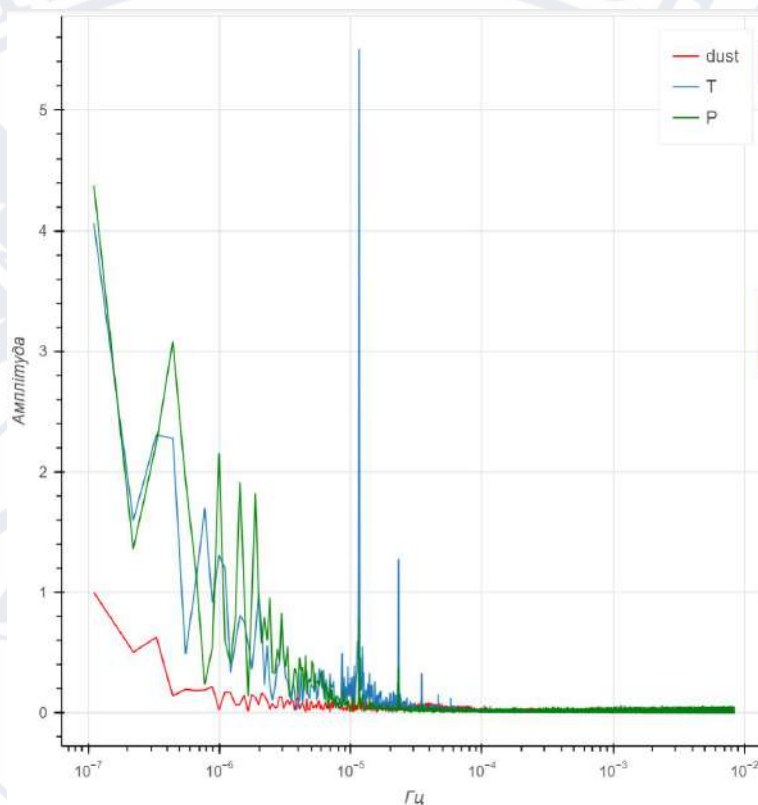


Рисунок 3.4 – Спектральний аналіз

На підставі наведених даних визначено період, представлений формулою:

$$T = \frac{1}{f} \quad (3.1)$$

Де,

T – період

f – частота.

$$T = \frac{1}{1.104 \cdot 10^{-7}} = 3021148.03 \text{ c} \quad (3.2)$$

У результаті виконання вимірювань, отримано значення 3021148.03 секунд. З метою полегшення аналізу перетворимо цей часовий інтервал у більш зручну одиницю вимірювання, використовуючи формулу $t = 3021148.03 / 60 / 60 / 24$, де t виражає час у днях. В результаті цього обчислення отримали

значення $t_1 = 34.96$ днів. Другий суттєвий максимум амплітудних коливань відзначається періодичністю $t_2=13.09$ днів, а наступні $t_3= 10.48$, $t_4= 7.48$, $t_5= 6.55$ днів.

На представленому графіку демонструється регулярність добових флуктуацій концентрації аерозолів у повітрі, ймовірно пов'язаних із змінами температури та атмосферного тиску(див. рис. 3.5).

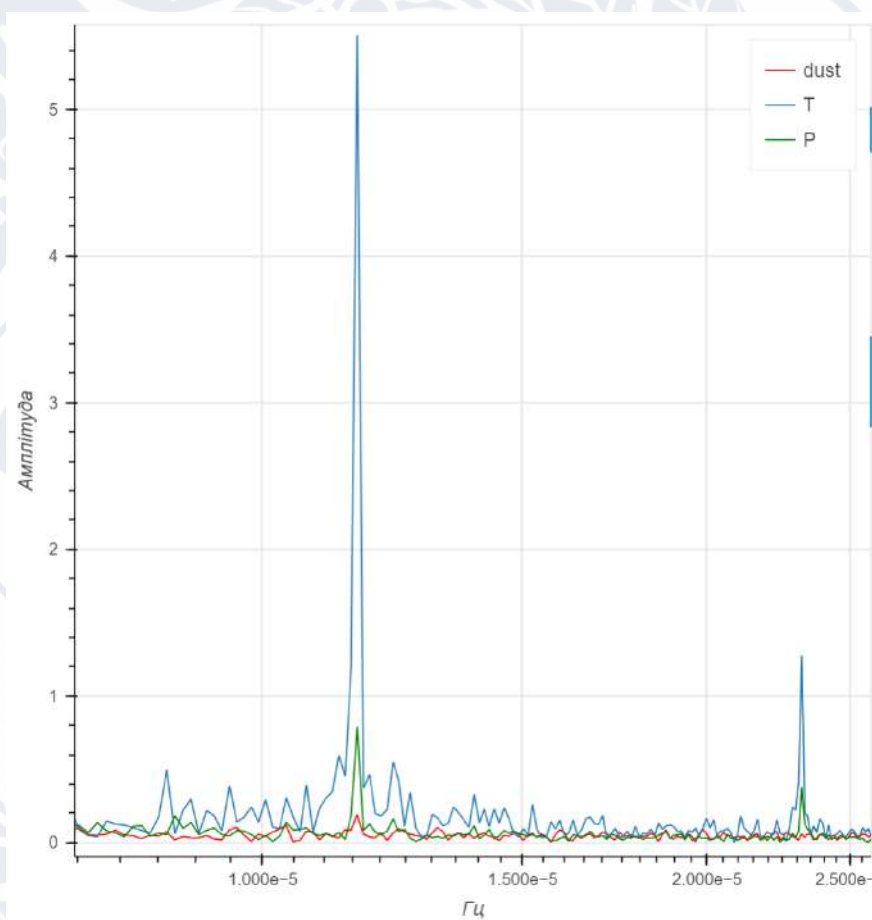


Рисунок 3.5 – Спектральний аналіз добових коливань концентрації аерозолів у повітрі

Для оптимізації процедури моніторингу концентрації пилу в повсякденному житті, розроблено програмний комплекс, який, використовуючи систему глобального позиціонування (Global Positioning System, GPS), автоматично визначатиме географічні координати точок, де вимірюються показники пилу.

Прошивка для мікроконтролера ESP32 запускає його в режимі WiFi, точки

доступу до якої підключається смартфон. Обмін даними між смартфоном та мікроконтролером здійснюється за протоколом WebSocket. Мікроконтролер виступає в ролі WebSocket сервера. WebSocket клієнт на смартфоні передає команди для зміни конфігурації системи моніторингу, зміни параметрів реєстрації, запуску та зупинки процесу моніторингу. В зворотному напрямку передаються зареєстровані дані. Одне вимірювання триває мінімум 10 мс, але тривалість циклу вимірювань може бути збільшена для покращення точності вимірювань [28]. Перед передачею на смартфон мікроконтролер усереднює результати вимірювань, розмір вибірки, що усереднюється, також можна міняти (див. рис. 3.6).

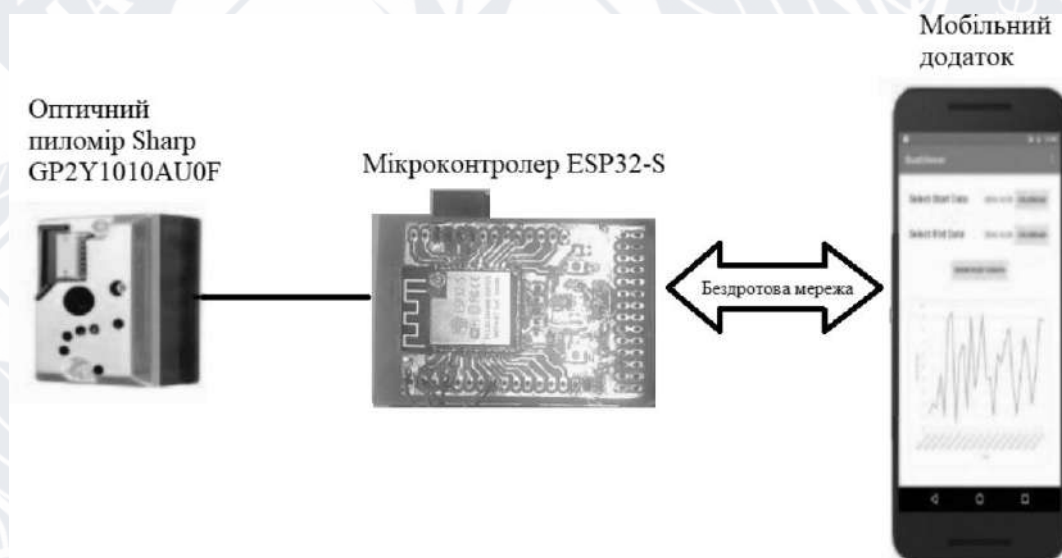


Рисунок 3.6 – Архітектура системи

Мобільний додаток, призначений для платформи Android, виконує регулювання параметрів та управління функціоналом системи моніторингу (див. рис. 3.7).

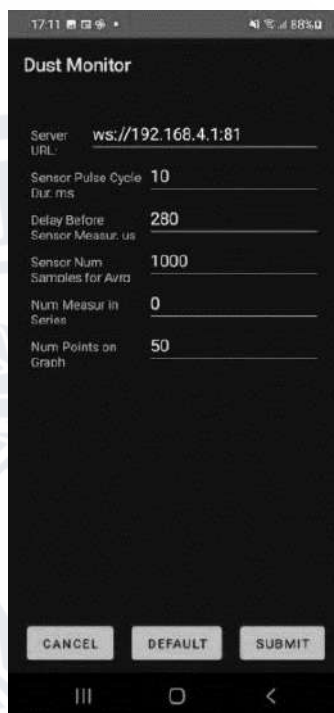


Рисунок 3.7 – Панель для налаштування параметрів в мобільному додатку "Dust Monitor"

Він реалізує збір зареєстрованих даних, вимірює поточні GPS-координати та здійснює їх прив'язку до поточних даних, а отримані результати зберігає у текстовому форматі. Крім того, додаток виводить поточні результати на екран у вигляді текстової інформації та динамічних графіків. WebSocket-клієнт був імплементований за допомогою бібліотеки OkHttp. Задачі збору даних, а також визначення GPS координат були реалізовані у вигляді фонових сервісів, для можливості їх виконання в фоновому режимі роботи смартфона чи мобільного додатка. Для реалізації динамічних графіків використовується бібліотека GraphView (див. рис. 3.8).

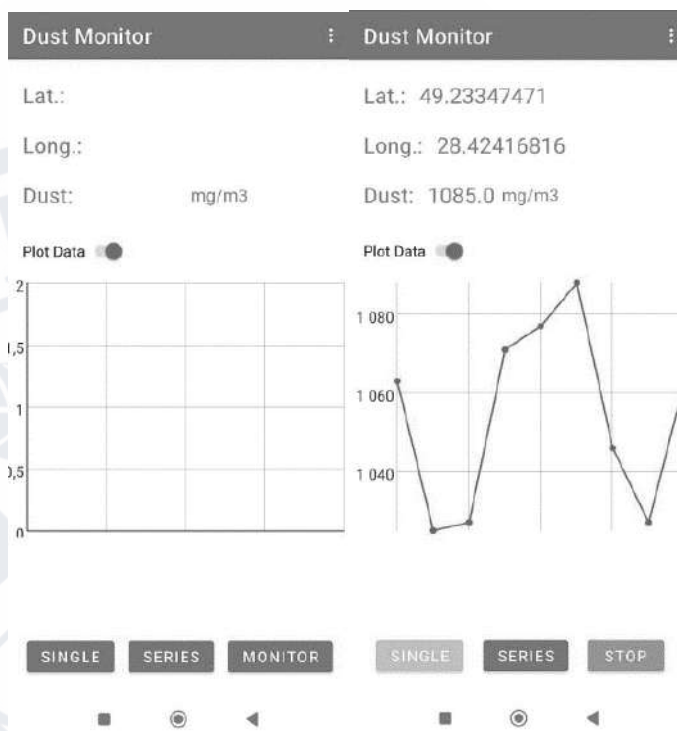


Рисунок 3.8 – Панель для виведення результату виміру в мобільному додатку "Dust Monitor"

У датчика для моніторингу якості повітря Sharp GP2Y1010AU0F, конденсатори, використані для світлодіода, проявляють відмінності від параметрів, описаних у технічній документації. Ця аномалія впливає на яскравість випромінювання. Замість вказаних у даташиті 0.6 вольт, ми спостерігаємо значення 0.4 вольт. Відтак, виходячи з цих відхилень, формула (2.2) приймає вигляд:

$$v_2 = v * 0.1714 - v_{zero} \text{ В} \quad (3.3)$$

Де,

v_{zero} – нульова напруга ($v_{zero} = 0.07$)

Однак, навіть при врахуванні наших виправлених значень (від 1.5 до 0.2 вольт), концентрація залишається невизначеною, тобто дорівнює нулю.

Варто зазначити, що датчик пилу все ж працює та реагує на зміни концентрації. Це може свідчити або про дуже низьку концентрацію (нижче встановленого порогу), або про необхідність калібрування. Тому ми вводимо у розрахунки калібровочний коефіцієнт.

Коли пристрій знаходився в стаціонарному стані, ми встановлювали

тривалість циклу вимірювань на рівні 100 мс, а не 10 мс, як це було рекомендовано. Пізніше виявилось, що це призводить до подвоєння вимірних значень напруги. Досліджені величини виявилися в хорошій узгодженості з результатами моніторингу, опублікованими на відповідних веб-ресурсах. Тому, враховуючи зазначені особливості, ми вводимо калібровочний коефіцієнт і множимо наші результати вимірювань на три, використовуючи формулу (див. рис. 3.9).

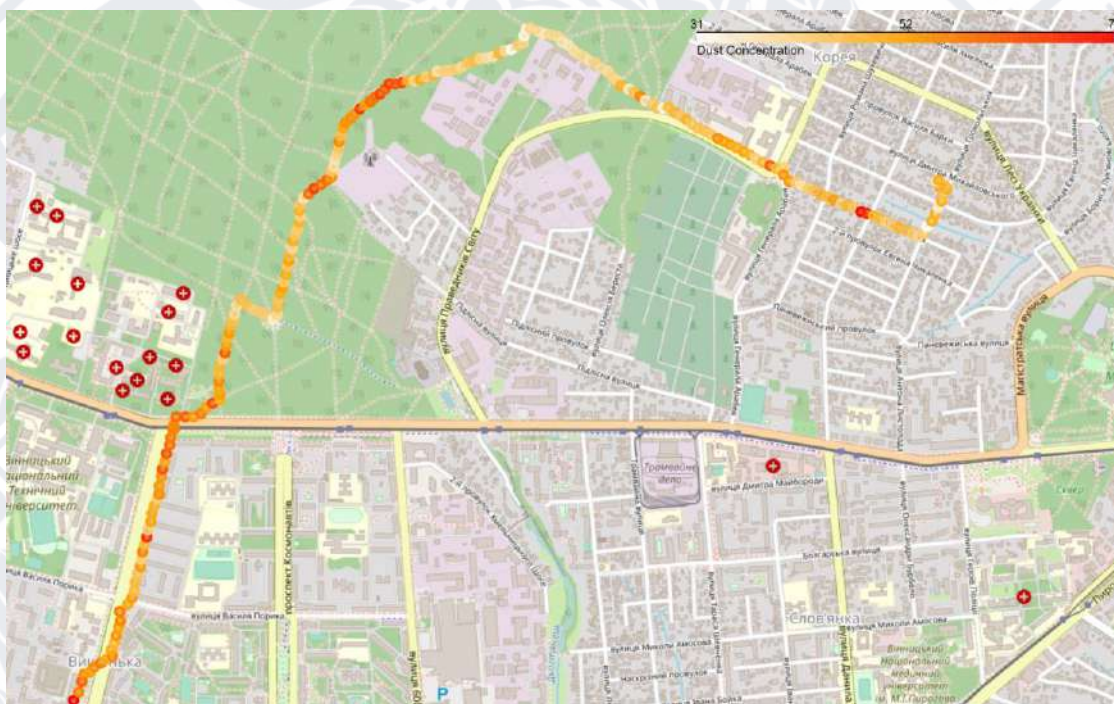


Рисунок 3.9 – Відображення на графічній карті точок виміру пилу в повітрі з калібруванням показників

Був проведений моніторинг в місті, а також в екологічно чистих місцях, таких як ліс.

За отриманими результатами можна спостерігати збільшення щільності пилу біля доріг (див. рис. 3.10).

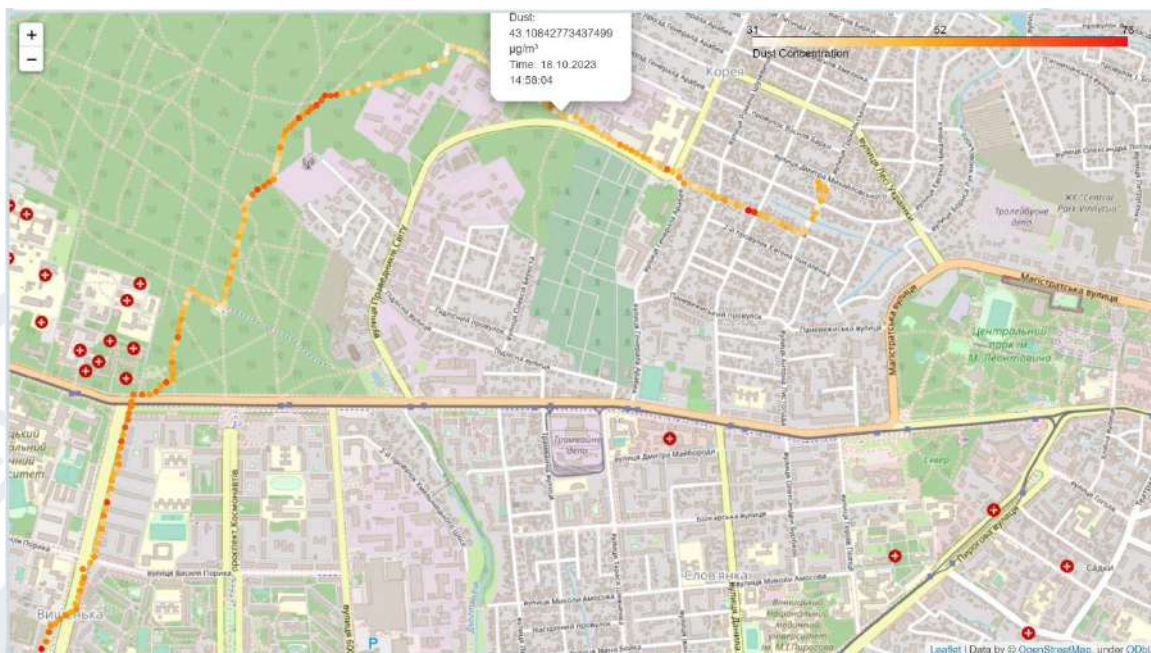


Рисунок 3.10 – Концентрація забруднення повітря біля дороги з інтенсивним рухом

В лісі щільність забруднення не виходить за межі норми (див. рис. 3.11). Однак в деяких місцях спостерігається підвищення щільності пилу, що може бути пов'язано зі спорами грибів, що розповсюджуються в повітрі.

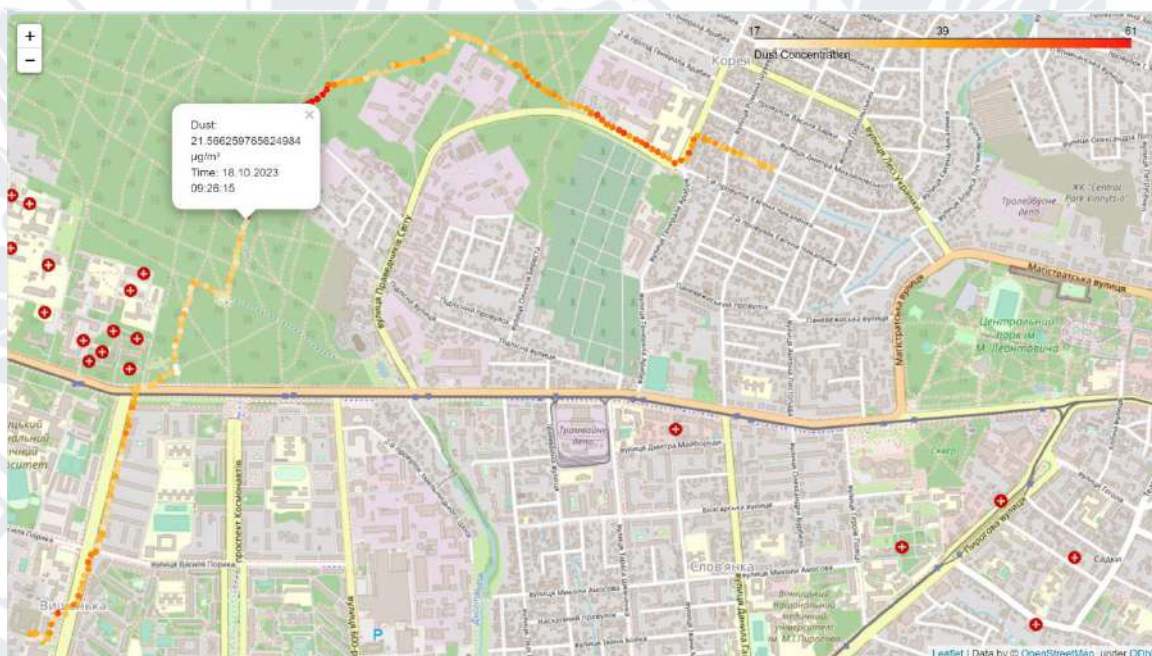


Рисунок 3.11 – Концентрація забруднення повітря в лісопарку

Вимірювання за однаковим маршрутом проводились декілька разів впродовж дня. Щільність пилу біля доріг підвищується зранку, коли трафік автотранспорту є більшим (див. рис. 3.12).

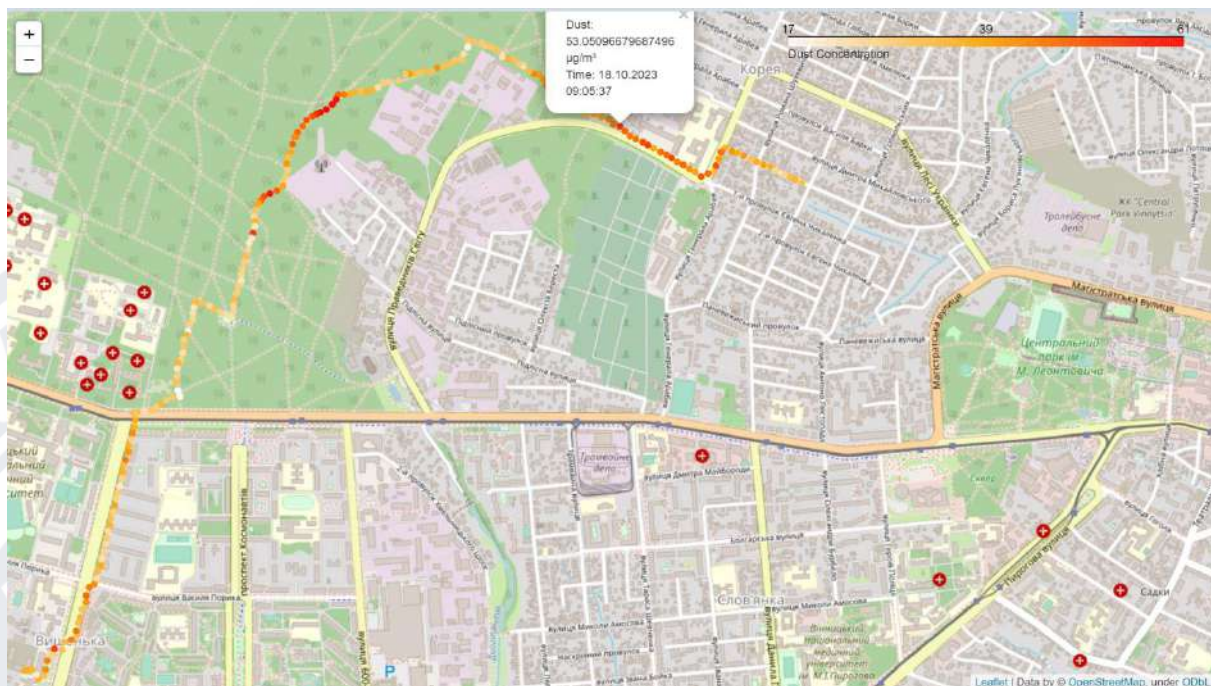


Рисунок 3.12 – Концентрація забруднення повітря біля дороги з інтенсивним рухом зранку

Також за результатами моніторингу треба відзначити, що при відсутності вітру та засушливій погоді виміряна концентрація забруднення в повітрі вища.

ВИСНОВКИ

1. Здійснено огляд поточного стану реалізації потреб, пов'язаних із вимірюванням забруднення повітря, що охоплює перегляд видів забруднення та методів його кількісного визначення. Розглянута актуальність застосування пиломірів у контексті Інтернету речей. Здійснено ретельний розгляд принципу дії оптичних пиломірів, виокремлено вплив розміру частинок пилу на інтенсивність розсіяного випромінювання.

2. Проведено дослідження використання датчика Sharp GP2Y1010AU0F для моніторингу якості повітря, де вбудований оптичний датчик взаємодіє з мікроконтролером ESP32-S, що забезпечує точніші вимірювання завдяки аналого-цифровому перетворювачу.

3. Розроблено програмне забезпечення для апаратної реалізації модуля та мобільного додатку, призначеного для дистанційного управління вимірювальним пристроєм.

4. Проведено продовжене моніторингове вимірювання коливань пилу в атмосферному повітрі протягом періоду з 30 червня 2023 року по 13 жовтня 2023 року, і проаналізовані результати вимірювання.

5. Виконано спектральний аналіз, який демонструє регулярність добових флуктуацій концентрації аерозолів в атмосферному повітрі, ймовірно пов'язаних із змінами температури та атмосферного тиску.

6. Запроваджено технологію глобального позиціонування (GPS) для отримання картографічних даних щодо якості атмосферного повітря.

7. Проведено апробацію пристрою в міських умовах, виявлені відмінності в параметрах, описаних у технічній документації для датчика моніторингу якості повітря Sharp GP2Y1010AU0F, та виконано коригування для зменшення похибок вимірювань пристрою.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Кулик М. І., Івах Ю. А. Оцінка якості атмосферного повітря на основних автостанціях. УДК: 502.3:504.5:621.43.068.4. м. Харків. СРСР, 2019. 12с.
2. Гандзюка М. П. Основи охорони праці. Каравела. М. Київ, 2004 317 с.
3. Giannadaki, D., Pozzer, A., Lelieveld, J. Modeled global effects of airborne desert dust on air quality and premature mortality, *Atmos. Chem. Phys.* 2014. Pp. 957–968
4. Molesworth, A. M., Cuevas L. E., Connor S. J., Morse A. P. Thomson M. C. Environmental Risk and Meningitis Epidemics in Africa. *Emerging Infectious Diseases*, 9(10). 2003. Pp. 1287-1293.
5. Dukic V., Hayden M., Forgor A. A., Hopson T, Akweongo P., Hodgson A., Monaghan A., Wiedinmyer C., Yoksas T., Madeleine C. Thomson, Trzaska S., Pandya R. The Role of Weather in Meningitis Outbreaks in Navrongo, Ghana: A Generalized Additive Modeling Approach. *Journal of Agricultural Biological and Environmental Statistics*, 2012, Volum 17, Number 3, Pp. 442-460.
6. Корнієнко Д. Г. Вдосконалення структурних схем побудови оптичних вимірювачів пилу. *Технологический аудит и резервы производства* — № 3/2(29), 2016. 23-40 с.
7. Hasheminasab F., Aminossadati S.M., Bagherpour R., Amanzadeh M. Fibre-Optic Based Sensors for Dust Monitoring, 2nd International Conference of Fibre-optic and Photonic Sensors for Industrial and Safety Applications, 2017. Pp. 33-38.
8. Wonseok Choi, Dokyung Hwang, Jongpil Kim, Jangmyung Lee. Fine dust monitoring system based on Internet of Things, 2018. Pp. 4.
9. Seung Ho Kim, Jong Mun Jeong, Min Tae Hwang, Chang Soon Kang. Development of an IoT-based Atmospheric Environment Monitoring System, 2017. Pp. 861 – 863.
10. A.A.Chandra, N.I.Jannif, S.Prakash and V.Padiachy. Cloud Based Real-time Monitoring and Control of Diesel Generator using the IoT Technology, 2017. Pp.5
11. Wonseok Choi, Dokyung Hwang, Jongpil Kim, Jangmyung Lee. Fine dust monitoring system based on Internet of Things, 2018. Pp. 4.

12. Chang-le Zhong, Zhen Zhu, Ren-gen Huang. Study on the IoT Architecture and Access Technology, 2017. Pp. 113-116.
13. Васильєв Г. С., Васильєва С.М., Герасименко Ю.С., Лінючева О.В. Корозійно-екологічний моніторинг повітряного і водного середовищ. Київ : КПП ім. Ігоря Сікорського, 2021. 265 с
14. Смирнов В.О., Білецький В.С., Шолда Р.О. Переробка корисних копалин. Донецьк: Східний видавничий дім, 2013. 600 с.
15. Airborne Dust: A Hazard to Human Health, Environment and Society, [Електронний ресурс]. <https://public.wmo.int/en/resources/bulletin/airborne-dust-hazard-human-health-environment-and-society> (дата звернення: 03.05.2023)
16. Пилевого контролюя приборы. [Електронний ресурс]. <http://www.mining-enc.ru/p/pylevogo-kontrolyu-pribory/> (дата звернення: 03.05.2023)
17. What is Particle Pollution? [Електронний ресурс]. <https://www.epa.gov/pmcourse/what-particle-pollution> (дата звернення: 03.05.2023)
18. Měření koncentrace prachu a senzory prachu [Електронний ресурс]. <https://automatizace.hw.cz/clanek/2006111201> (дата звернення: 06.11.2022)
19. Технічний університет тепер моніторить повітря у Вінниці. [Електронний ресурс]. <https://vitatv.com.ua/tekhnichnyu-universytet-teper-monitoryt-povitrya-u/> (дата звернення: 03.05.2023)
20. Ambient (outdoor) air pollution [Електронний ресурс] [https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health) (дата звернення: 03.05.2023)
21. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень ДСН 3.3.6.042-99. М. Київ. 1999 р. 10 с.
22. Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку ДСН 3.3.6.037-99 м. Київ. 1999 р. 10 с.
23. Laboratory Evaluation of Low-Cost Optical Particle Counters for Environmental and Occupational Exposures [Електронний ресурс] <https://www.who.int/news-https://www.mdpi.com/1424-8220/21/12/4146> (дата звернення: 03.05.2023)
24. Мороз М. О., Гармаш Б. К. Дослідження запиленості виробничих приміщень, м.

Харків. 2017. 18 с.

25. Седов В. П., Рябченко В. А. Аналіз методів вимірювання концентрації пилу у повітрі. Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. 2013. № 9(186).31-35 с.
26. Fatemeh Rahimi Sardo, Arash Rayegani, Ali Matin Nazar, Mohammadali Balaghiinaloo. Recent Progress of Triboelectric Nanogenerators for Biomedical Sensors: From Design to Application. 2022. Pp 29.
27. Radionuclide monitoring [Електронний ресурс]. <https://www.ctbto.org/our-work/monitoring-technologies/radionuclide-monitoring> (дата звернення: 03.05.2023)
28. Thompson J. E., Improved Measurement Performance for the Sharp GP2Y1010 Dust Sensor: Reduction of Noise. Department of Chemistry & Biochemistry, Texas Tech University, Lubbock, TX 79409, USA. 2021. 12(6), 775.
29. OkHttp [Електронний ресурс]. <https://square.github.io/okhttp/> (дата звернення: 29.11.2023)
30. GraphView [Електронний ресурс]. <https://github.com/jjoe64/GraphView> (дата звернення: 29.11.2023)
31. ESP32-S high resolution pinout and specs [Електронний ресурс]. <https://mischianti.org/esp32-s-high-resolution-pinout-and-specs/> (дата звернення: 29.11.2023)
32. SHARP Corporation. Compact Optical Dust Sensor GP2Y1010AU0F. 2006. Pp 9