

<https://doi.org/10.31891/2219-9365-2024-80-23>

УДК 504.06, 621.38, 004.94

МИХАЙЛОВ Євгеній

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

e-mail: flyron001@gmail.com

ЖЕЛДАК Ілля

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

e-mail: darwinogf@gmail.com

РОЗРОБКА ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ПИЛУ АВТОДОРИГ

В статті розкрито актуальність вирішення проблеми визначення та контролю кількості пилу на дорогах.

Досліджено науково-технічні підходи до вимірювання PM_{2.5} та PM₁₀, а також проаналізовано їх ефективність і практичне застосування

Наведеной аналіз існуючих чинників і факторів, що впливають на рівень запиленості доріг, а також досліджено сучасні методи та системи для вимірювання концентрації пилових частинок. Обґрунтовано вибір оптимального методу вимірювання та розробки інформаційно-вимірювальної системи, орієнтовуючись на найкращі практики та вимоги до моніторингу якості повітря в умовах міського середовища.

При дослідженні дорожнього пилу особлива увага приділяється кількості пилу від автомобільного транспорту та умов, що сприяють пилоутворенню. При детальному вивченні механізмів утворення пилу, які зумовлені тертям шин об дорожнє покриття, що виникає внаслідок контакту гуми з асфальтом. Аналіз джерел був спрямований на ідентифікацію фізико-хімічних процесів, що супроводжують цей контакт, з метою оцінки їхнього внеску в загальне забруднення повітря.

В результаті аналізу літературних джерел було розглянуто методи та системи моніторингу запиленості повітря як за кордоном, так і в Україні. Особливу увагу було приділено методу оптичного розсіювання, який був обраний для дослідження. Цей метод дозволяє точно вимірювати концентрацію та розмір частинок пилу в повітрі, що робить його ефективним інструментом для моніторингу якості повітря.

Розроблено інформаційно-вимірювальну систему для визначення кількості пилу на дорогах в реальному часі з заданою точністю вимірювання Система допускає збереження даних, що дозволить використовувати отриману базу даних для контролю якості повітря в містах, впровадження ефективних екологічних ініціатив і прийняття обґрунтованих рішень у сфері охорони навколишнього середовища.

Ключові слова: екологія, пил, екологічний моніторинг, виклики, інформаційно-вимірювальна система

MIKHAILOV Evgene, ZHELDAK Ilya

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

DEVELOPMENT OF INFORMATION-VIMIRIVAL SYSTEM FOR INVENTORY OF PILU HIGHWAYS

The article reveals the relevance of solving the problem of determining and controlling the amount of dust on the roads.

Scientific and technical approaches to measuring PM_{2.5} and PM₁₀ were studied, as well as their effectiveness and practical application were analyzed

An analysis of existing factors and factors influencing the level of dustiness of roads is provided, as well as modern methods and systems for measuring the concentration of dust particles are investigated. The choice of the optimal measurement method and the development of an information and measurement system is substantiated, focusing on the best practices and requirements for air quality monitoring in the urban environment.

In the study of road dust, special attention is paid to the amount of dust from road transport and the conditions that contribute to dust formation. When studying in detail the mechanisms of dust formation, which are caused by the friction of tires against the road surface, which occurs because of the contact of rubber with asphalt. The source analysis was aimed at identifying the physico-chemical processes accompanying this contact in order to assess their contribution to overall air pollution.

As a result of the analysis of literary sources, the methods and systems of air dust monitoring both abroad and in Ukraine were considered. Special attention was paid to the method of optical scattering, which was chosen for the study. This method allows accurate measurement of the concentration and size of dust particles in the air, making it an effective tool for air quality monitoring.

An information and measurement system has been developed to determine the amount of dust on the roads in real time with a given measurement accuracy. The system allows data storage, which will allow the use of the obtained database to monitor air quality in cities, implement effective environmental initiatives, and make informed decisions in the field of environmental protection.

Key words: ecology, dust, environmental monitoring, challenges, information and measurement system

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ У ЗАГАЛЬНОМУ ВИГЛЯДІ ТА ЇЇ ЗВ'ЯЗОК ІЗ ВАЖЛИВИМИ НАУКОВИМИ ЧИ ПРАКТИЧНИМИ ЗАВДАННЯМИ

Інформаційно-вимірювальні системи для моніторингу дорожнього пилу набувають все більшої актуальності в контексті екологічних викликів сучасності. Аналіз літературних джерел дозволяє дослідити науково-технічні підходи до вимірювання PM_{2.5} та PM₁₀, а також оцінити їх ефективність і практичне

застосування. Результати такого аналізу формують основу для розробки інноваційних рішень, спрямованих на підвищення точності та доступності вимірювань.

Пил є значущим фактором, який впливає не лише на здоров'я людини, а й на інші елементи навколишнього середовища. Він складається з сукупності твердих частинок різних розмірів, що перебувають в атмосферному повітрі. Термін "Particulate Matter" (PM) позначає тверду фазу атмосферних забруднювачів, що включає як тверді частинки, так і рідкі краплі, що присутні у повітрі. Окремі частки, такі як пил, бруд, сажа або дим, мають розміри та оптичні властивості, які дозволяють їх спостереження неозброєним оком, тоді як інші є настільки мікроскопічними, що їх можна виявити лише за допомогою електронного мікроскопа.

Частинки пилу мають як природне, так і антропогенне походження.

Основні антропогенні джерела пилоутворення:

- Сільське господарство: Сільськогосподарська діяльність, така як оранка ґрунту, випас худоби та спалювання стерні, може призвести до викидання в атмосферу великої кількості пилу.
- Промисловість: Промислові підприємства, такі як електростанції, цементні заводи та металургійні комбінати, викидають в атмосферу пил та інші забруднюючі речовини.
- Транспорт: Транспортні засоби, такі як автомобілі, літаки та кораблі, спалюють вичерпане паливо, що призводить до викидів пилу та інших шкідливих речовин.
- Будівництво: Будівельні роботи, такі як знесення будівель, прокладання доріг та будівництво нових будівель, можуть призвести до викидання в атмосферу пилу та інших забруднюючих речовин.
- Спалювання побутових відходів: Спалювання побутових відходів на відкритому повітрі є одним із найсерйозніших джерел пилу та інших забруднюючих речовин.
- Нанесення пилу в результаті пилових бурь.

СТАН ПРОБЛЕМИ ТА ЇЇ РОЗВ'ЯЗАННЯ

На онлайн платформах для оцінки використовують індекс якості повітря (AQI, Air Quality Index), розроблений Агентством з охорони довкілля США і застосовуваний в багатьох країнах світу. З підвищенням значення індексу AQI зростає рівень забруднення повітря, що, своєю чергою, підвищує ризик розвитку захворювань серед населення, таких як бронхіт, астма та хронічне обструктивне захворювання легень. [1]

При дослідженні дорожнього пилу особлива увага приділяється кількості пилу від автомобільного транспорту та умов, що сприяють пилоутворенню. При детальному вивченні механізмів утворення пилу, які зумовлені тертям шин об дорожнє покриття, що виникає внаслідок контакту гуми з асфальтом. Аналіз джерел був спрямований на ідентифікацію фізико-хімічних процесів, що супроводжують цей контакт, з метою оцінки їхнього внеску в загальне забруднення повітря. Склад шин: натуральний та синтетичний каучук 14% та 27%, сталевий дріт –14%, сажа – 26: та домішки –16%. [2]

Дорожній пил складається в основному з мінералів ґрунтового походження з кварцом у складі та глинистими мінералами, такими як альбіт, мікроклін, хлорит та мусковіт, що походять із навколишніх ґрунтів. Органічна речовина здебільшого має рослинне походження. Потенційно токсичні забруднювачі формуються зі зносу гальм і шин, викидів згоряння та попелу від асфальту. Важкі метали, зокрема Zn, Cu, Pb, Ni, Cr і Cd, переважно походять від транспортних засобів, тоді як Fe, Al і Mn — з навколишніх ґрунтів. Аналіз літературних джерел підтвердив значний вплив автомобільного руху на накопичення пилу на міських дорогах. Тертя – це сила, яка чинить опір ковзанню або коченню одного твердого предмета по іншому. Близько 20% потужності двигуна автомобіля витрачається на подолання сил тертя в рухомих частинах. [3]

Коефіцієнт тертя залежить від стану дороги: від 0,9 на сухій поверхні до 0,1 на мокрій.

Під час руху автомобіля шини піддаються зношуванню внаслідок абразивної дії асфальтового покриття, що веде до поступового відокремлення мікрочастинок гуми. Інтенсивне зношування спостерігається під час маневрів, таких як гальмування, прискорення та здійснення поворотів, коли сила тертя між шинами та дорожнім покриттям збільшується. Частинки гуми, що відокремлюються від шин, можуть підійматися в атмосферу або осідати на поверхні дорожнього покриття, де вони знову піднімаються під час подальшого руху транспортних засобів або через вплив вітрових потоків. Крім того, пил, що утворюється, може містити частинки дорожнього покриття, які також відриваються під дією тертя між шинами і асфальтом.

Під час руху автомобіля ступінь зносу протектора шини визначається інтенсивністю слідів, що утворюються шинами, а також величиною розподілу неявних характеристик цих слідів. Цю величину та різницю зносу шини позначають як TWQD. Водночас, зв'язок між появою слідів на шинах, властивостями дорожнього покриття та динамічними параметрами автомобіля залишається недостатньо дослідженим. Питання зносу шин є об'єктом досліджень уже багато років, і TWQD вважається однією з основних причин, що впливають на характеристики слідів шин.

Проаналізувавши дані, зроблено висновок що матеріали шин, динаміка автомобіля та властивості дороги є трьома основними факторами, які впливають на знос шин. Знос шини спричинений ковзанням між протектором шини та дорогою, залежить від роботи тертя, створеної контактом шини з дорогою. В останні роки запропоновано динамічне тертя ковзання для аналізу механізмів взаємодії між шиною та дорожнім покриттям, що може більш точно обчислити роботу сил тертя, коли шина та дорога знаходиться в стані ковзання. Щоб отримати величину зносу шин, було запропоновано чисельний розрахунок з енергетичного аспекту та метод аналізу кінцевих елементів.

Фактори, що впливають на знос і погіршення якості шин, включають суміш шин, умови траси та стиль водіння. Склад шини є головним фактором, оскільки м'які суміші зношуються швидше, ніж твердіші. Умови дорожнього покриття також відіграють важливу роль, оскільки нерівні дороги спричиняють більший знос і деградацію шин. Нарешті, стиль водіння також може впливати на знос і погіршення якості шин, причому агресивний стиль водіння спричиняє більше зношування та погіршення якості, ніж більш консервативний стиль водіння.

Є кілька способів звести до мінімуму знос і деградацію шин, включаючи використання в складі шин більш м'яких сумішей, більш обережне водіння та уникнення агресивних маневрів [4].

Формула обчислення зносу шин [5]:

$$W = k T v \quad (1)$$

де: W — зношування шин;

k — коефіцієнт, що враховує якість дорожнього покриття;

T — час;

v — швидкість руху.

Усі ці фактори разом створюють пил, який ми можемо спостерігати на дорогах, особливо у великих містах з інтенсивним рухом. Висока концентрація автомобілів у міських умовах робить їх одним із головних винуватців забруднення повітря. Інтенсивне використання автотранспорту негативно впливає на здоров'я та довкілля:

Таким чином, проаналізувавши основні фактори та наслідки підвищення рівня запиленості є актуальною необхідність впровадження ефективних заходів щодо зниження концентрації пилу в повітрі. Дана магістерська дисертація буде спрямована на вимірюванні запиленості від автомобільного транспорту на дорогах, в реальному часі, що сприятиме збереженню здоров'я населення при можливості обрання магістралі з меншим рівнем запиленості. Це особливо важливо для велосипедистів, людей, які рухаються на самокатах тощо. Інші джерела запиленості не будуть братись до уваги.

Згідно з чинними нормативами в Україні та інших країнах, вміст пилу в повітрі оцінюється за допомогою показника pr , який визначається як масова концентрація пилу. Цей показник є сумарною масою пилових часток, що містяться в одиниці об'єму повітря. Однак pr є не єдиним важливим параметром. Значення мають також інші характеристики пилу, зокрема його хімічний склад, розподіл часток за розмірами тощо [11/5] В таблиці 1 наведено методи вимірювання концентрації пилу в повітрі.

Таблиця 1

Методи вимірювання концентрації пилу в повітрі

Метод	Опис
Методи з осадженням пилу: виділення пилу; оцінка кількості осадженого пилу	Вимірювання концентрації пилу відбувається в два етапи: – пил осаджується з повітря шляхом фільтрації через фільтр з спеціальної тканини; – для оцінки кількості осадженого пилу застосовуються електричні або неелектричні методи.
Методи без осадження пилу	Концентрація пилу вимірюється без попереднього осадження частинок, що дозволяє застосовувати прямі методи, такі як вимірювання маси частинок через різницю ваги фільтра до та після експозиції в повітрі.

При вимірювання запиленості одним з найпоширеніших методів для точного визначення концентрацій PM_{10} , є визначення маси частинок шляхом різниці ваги фільтра до та після його експозиції в певному об'ємі повітря. [6]

Гравіметричний метод полягає у зважуванні пилових частинок, які виділяються із відомої кількості запиленого повітря. Пилові частинки відділяються за допомогою протягування досліджуваного об'єму повітря крізь фільтр, що затримує частинки пилу (пилинки). Збільшення маси фільтра після експерименту і є тією кількістю пилу, що містяться в досліджуваному об'ємі повітря. Вагомою умовою для прикладання до дослідження вмісту пилу в повітрі гравіметричного методу є незмінна та стабільна концентрація пилу в повітрі протягом часу вимірювання, адже вагомий недоліком є низка швидкодія приладів, що працюють застосовуючи гравіметричний метод [13/7].

Принцип гравіметричного методу полягає в тому, щоб зібрати зразок пилу з повітря за допомогою спеціального фільтра. Для визначення масової концентрації пилу (M_c) важлива різниця в вазі фільтра до і після відбору проб, а також швидкість повітряного потоку. Ці показники використовуються для розрахунку масової концентрації пилу, яку можна визначити за допомогою відповідного рівняння:

$$M_c = \frac{m_1 - m_2}{Q_v} \quad (2)$$

де: m_1 та m_2 це вага фільтрів до та після збору;

Q_v - об'ємна швидкість потоку повітря.

Головною перевагою гравіметричного методу є його простота та можливість отримання порівнянних результатів, незалежно від типу використовуваних вимірювальних приладів. Завдяки цим характеристикам, гравіметричний метод був обраний як стандартний метод для визначення масової концентрації пилу. Фільтри для цього методу виготовляються з таких матеріалів, як целюлоза, скловолокно, тефлон, МСЕ (змішаний ефір целюлози), ПВХ, срібло та інші. Діапазон вимірювань для цього методу коливається від 0,1 до 2000 мг/м³, що залежить від виробника пристрою [14/8].

$$u_{M_c} = \sqrt{\left(\frac{\partial M_c}{\partial m_{\text{після}}}\right)^2 \cdot u_{m_{\text{після}}}^2 + \left(\frac{\partial M_c}{\partial m_{\text{до}}}\right)^2 \cdot u_{m_{\text{до}}}^2 + \left(\frac{\partial M_c}{\partial Q_v}\right)^2 \cdot u_{Q_v}^2} \quad (3)$$

де: $m_{\text{після}}$, $m_{\text{до}}$ це вага фільтрів до та після збору;

Q_v - об'ємна швидкість потоку повітря;

u_{Q_v} – стандартна невизначеність вимірювання об'єму відібраних проб забруднень повітря.

Для отримання часткової чутливості використовується наступна формула:

$$\frac{\partial M_c}{\partial m_{\text{після}}} = \frac{1}{Q_v^2}, \quad \frac{\partial M_c}{\partial m_{\text{до}}} = -\frac{1}{Q_v^2};$$

$$\frac{\partial M_c}{\partial Q_v} = -\frac{1}{Q_v^2} (m_{\text{після}} - m_{\text{до}}). \quad (4)$$

Тоді:

$$u_{M_c} = \sqrt{\left(\frac{1}{Q_v^2}\right)^2 \cdot u_{m_{\text{до}}}^2 + \left(-\frac{1}{Q_v^2}\right)^2 \cdot u_{m_{\text{після}}}^2 + \left(-\frac{1}{Q_v^2} (m_{\text{після}} - m_{\text{до}})\right)^2 \cdot u_{Q_v}^2} \quad (5)$$

Невизначеність обох вимірювань ваги однакова $u_{m_{\text{до}}} = u_{m_{\text{після}}} = u_m$, тому можна написати рівняння для стандартної невизначеності масової концентрації пилу:

$$u_{M_c} = \frac{1}{Q_v} \sqrt{2 \cdot u_m^2 + (m_{\text{після}} - m_{\text{до}})^2 \cdot u_{Q_v}^2} \quad (6)$$

Важливою перевагою методів, що розглядаються, є значна об'ємна показність одержаних результатів. Вона забезпечується тим, що в процесі осадження пилу (при відборі проби) через прилад прокачується досить великий об'єм повітря (декілька м³), і вимірне значення пр є середнім для цього об'єму. Методи, що реалізуються без попереднього осадження пилу. Цю групу методів можна розділити на дві досить великі підгрупи: оптичні, що базуються на явищах поглинання і розсіювання світла частинками пилу електростатичні, що базуються на вимірюванні сумарного електричного заряду частинок пилу.

Лазерне або світлове випромінювання проходить через повітря, і чутливі детектори вимірюють кількість світла, яке розсіюється частинками PM2.5 або PM10. Інтенсивність розсіювання корелює з концентрацією частинок.

Оптичні методи засновані на визначенні запиленості повітря по величині світлового потоку, поглинутого або розсіяного пиловим аерозолем. При цьому вимірюють або інтегральний світловий потік від відносно великих об'ємів аерозолу, або від окремих часток пилу. Використовують також прилади, в яких визначають зміну оптичної щільності фільтру, через який протягують пиловий аерозоль [5].

При використанні оптичних методів мірою концентрації пилу служить інтенсивність одного з видів випромінювання ослабленого в результаті проходження через шар запиленого повітря чи розсіяного частинками пилу. Похибки оптичних методів, в основному, зумовлені значною залежністю оптичних властивостей аерозолів від їх дисперсного і хімічного складу. Мінливість форми, розмірів і складу частинок пилу ускладнює перехід від показань вимірювального оптичного приладу до шуканого значення масової концентрації пилу ρ_p . Прилад може ефективно використовуватися тільки для того виду пилу, для якого він був градуйований.

Визначення концентрації пилу електростатичними методами, базується на вимірюванні електричного заряду, який переносять аерозольні частинки. Важливою частиною приладу є вимірювальний електрод, який розташовується в потоці повітря, що аналізується. В результаті контакту з частинками пилу електрод набуває заряду, розмір якого залежить від сумарної площі поверхні пилових частинок.

В даний час найбільшого практичного застосування набула група методів, що базуються на попередньому осадженні пилу. Для визначення маси осадженого пилу на мережі контролю забруднення атмосфери використовується ваговий метод. Його основною перевагою є простота. Крім того, на відміну від багатьох інших методів, ваговий метод не потребує при вимірюваннях градуйовальної характеристики, тому що результат вимірювання не залежить від виду пилу: його хімічного складу і розподілу частинок за розмірами [6,8].

Таблиця 2

Порівняння методів визначення рівня пилу

Метод	Процес	Переваги	Недоліки
Гравіметричний	Фільтрація, зважування	Висока точність, незалежність від складу пилу	Тривалий процес, потреба в спеціальному обладнанні
Оптичний	Розсіювання світла	Швидкий результат, автоматизація.	Залежність від складу та розміру частинок.
Електростатичний	Вимірювання електричного заряду	Простота методу, ефективність для певних типів пилу	Похибки, залежність від складу пилу

В Україні наразі доступний лише оптичний метод вимірювання концентрації пилу. Інші методи, що не передбачають попереднє осадження пилу, як правило, потребують дорогих сенсорів та обладнання, яке наразі не представлено на ринку України або відсутнє в достатній кількості.

Переглянувши всі переваги та недоліки різних методів дослідження, було вирішено обрати оптичний метод. Вибір оптичного методу обумовлений здатністю забезпечувати безперервний моніторинг концентрації частинок у повітрі в реальному часі, що є важливим для оперативного виявлення змін у рівнях забруднення. Оптичний метод також зменшує потребу в складному лабораторному обладнанні та спрощує процес збору даних, що робить його більш зручним для застосування в польових умовах. Таким чином, оптичний метод виявився найбільш ефективним та практичним для досягнення цілей дослідження.

Проведено порівняльний аналіз українських та закордонних систем моніторингу якості повітря. Зокрема, розглянуто систему IMPROVE, що забезпечує точний моніторинг дрібнодисперсного пилу та інших параметрів у заповідних територіях США, а також вітчизняні системи, такі як «ЛІУН Місто AIR», та портативні пристрої DT-9880 і PCE-RCM-10. Таким чином, було поставлено задачу розробити ІВС для вимірювання кількості пилу автодоріг в реальному часі.

Таблиця 3

Технічні характеристики пиломірів доступних за кордоном

Прилад	Точність вимірювання PM2.5	Метод підключення	Сенсори	Ціна
Airthings View Plus	0 ~100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, $\pm 10\mu\text{g}/\text{m}^3$, 100 ~200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, $\pm 10\%$	Інтеграція з додатком, веб-панеллю, розумним будинком	Вимірює PM2.5, CO2, VOC, температуру, вологість, тиск повітря та радон	\$299
AirGradient ONE	$\pm 10\%$ при 100-500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, $\pm 10\mu\text{g}/\text{m}^3$ при 0-100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Веб-панель керування	Відкритий код, налаштований, вимірює PM2.5, CO2, TVOC, температуру та вологість	\$138 або \$195 (в залежності від зібраної або розібраної моделі)
Qingpin g AQM Gen2	$\pm 10\mu\text{g}/\text{m}^3$ при значенні менше 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$; $\pm 10\%$ при значенні більше 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Додаток, Mi Home	Вимірює PM2.5, CO2, TVOC, температуру та вологість	\$150
Qingpin g AM Lite	$\pm 15\%$	Додаток, HomeKit, Mi Home	Вимірює PM2.5, PM10, CO2, температуру та вологість	\$90

Системи, що використовуються в Україні: ЛУН Місто AIR це карта якості повітря на яку надходять синхронізовані данні зі станцій. Станції розташовані в 12 містах та їх областях. Станції вимірюють концентрацію дрібнодисперсного пилу — PM 1, PM 2,5, PM 10. Серед основних джерел цих часточок – автотранспорт, промисловість, пожежі. Станція складається наступних елементів:

- Plantower PMS 3003/5003/7003/A003 — сенсор для вимірювання PM 1,0, PM 2,5 та PM 10. Працює на основі розсіювання лазерного випромінювання, як і в професійних каліброваних сенсорах. Використовується у пристроях, які пройшли тестування американської програми оцінки ефективності роботи датчиків якості повітря AQ-SPEC.
- Bosch Sensortec BME-280 — сенсор для вимірювання температури, вологості та тиску. Використовується у пристроях, які пройшли тестування AQ-SPEC.
- Mediatek MT7688A — головне обчислювальне ядро станції. Відповідає за стабільну роботу з WiFi, комунікацію з сенсорами та попередню обробку даних. Має потужний, як для цих задач, процесор. Рекомендується виробником для сфери IoT.

Для вимірювання рівню запыленості в повітрі, існують портативні вимірювачі, наприклад, DT-9880 та PCE-RCM-10. Ці пристрої дозволяють вимірювати концентрацію пилу в атмосфері та отримувати дані про якість повітря в конкретних місцях. DT-9880 - прилад є піломіром з 2,8-дюймовим кольоровим РК-дисплеєм TFT і картою пам'яті MicroSD для зйомки зображень (JPEG) або відео (3GP) для перегляду на вашому ПК. Отримання швидких, простих і точних показань для лічильника твердих частинок, детекторів газу (НСНО, Со), температури повітря та відносної вологості, більшості вимірювань температури поверхні. У режимі ввімкнення пристрій відображатиме три режими вимірювання та відобразить три параметри налаштування. Ви можете використовувати кнопку або для вибору будь-якого потрібного вам режиму вимірювання та використовувати функціональну кнопку F1, F2, F3 вхід в інтерфейс системи. Цей прилад має три режими: вимірювання твердих часток; вимірювання НСНО (формальдегідів); вимірювання CO₂...

PCE-RCM-10 — це портативний вимірювач частинок та якості повітря, який використовується для моніторингу концентрації твердих частинок (PM) у повітрі. Розроблений для допомоги в оцінці якості повітря в приміщенні, цей лічильник частинок також вимірює температуру повітря та відносну вологість. PCE-RCM-10 може живитися як від вбудованої акумуляторної батареї, так і від USB-порту. USB-порт також використовується для зарядки акумулятора. При повному заряді акумулятор забезпечує до 5 годин безперервної роботи. Лічильник частинок відображає всі вимірювання одночасно на 2,4-дюймовому LCD-екрані приладу. Найбільші значення PM проявляються в зеленому, жовтому, золотому, помаранчевому, рожевому і червоному кольорах. Ця система візуального кольорового кодування дозволяє легко розпізнати, коли рівень концентрації твердих часток стає небезпечним, що дозволяє швидко вжити заходів [9].

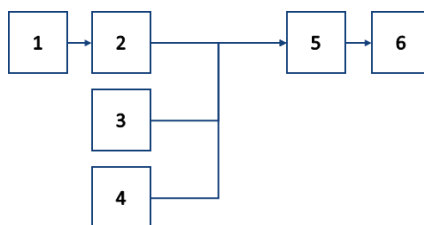


Рис. 1. Структурна схема розробленої ІВС: 1 – Джерело випромінювання; 2 – Приймач інфрачервоного випромінювання вимірювального каналу; 3- Сенсор вимірювання вологості
4 – Сенсор вимірювання температури; 5 - Мікроконтролер; 6 – Світлодіоди індикації

Таким чином, було розроблено інформаційно-вимірювальну систему. В складі якої ІВС сенсор GP2Y1010AU0F (рис. 1), який вимірює концентрацію часток пилу розміром більше 0.8 мкм. Крім того, для врахування впливу вологості та температури повітря на концентрацію пилу використовується сенсор DHT22. Дані зчитуються за допомогою плати Arduino, що дозволяє отримати оцінку запыленості повітря.

GP2Y1010AU0F – це оптичний сенсор. Інфрачервоний випромінюючий діод (IRED) і фототранзистор розташовані по діагоналі в цьому пристрої. Він виявляє відбите світло пилу в повітрі. Сенсор найбільш ефективний для виявлення дуже дрібних часток, таких як сигаретний дим. Крім того, він може відрізнити частки диму від домашнього пилу за схемою імпульсів вихідної напруги [3] На рисунку 2 зображено графік залежності вихідної напруги(V) та щільності пилу(mg/m³).

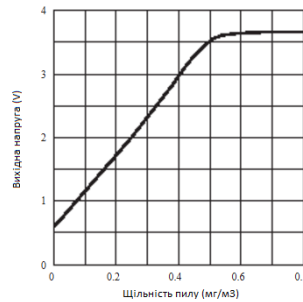


Рис. 2. Графік залежності вихідної напруги та щільності пилу

Процес вимірювання та оцінки запиленості включає зчитування значень концентрації пилу, вологості та температури з відповідних сенсорів. Дані будуть оброблюються та аналізуються для визначення залежності між запиленістю, вологості та температурою повітря. В таблиці 4 наведено точність сенсорів [3].

Таблиця 4

Точність сенсорів		
Сенсор	Вид вимірювання	Точність
GP2Y1010AU0F	Запиленість (PM2.5)	±0.5V per 0.1 mg/m ³
DHT22	Температура	±0.5°C
	Вологість	±2%

В таблиці 5 наведено технічні характеристики пиломірів та пиломіра на основі сенсорів GP2Y1010AU0F та DHT22 [3].

Таблиця 5

Порівняння технічних характеристик пиломірів доступних в Україні

Назва	PCE-RCM 10	DT-9880	На основі сенсорів GP2Y1010AU0F та DHT22
Розмір часток, μm	2.5, 10	0.3, 0.5, 1.0, 2.5, 5.0, 10	>0.8
Діапазон вимірювання температури, °C	-20 ... +70°C /	0°C ... 50°C	-40 °C ... 80 °C
Діапазон вимірювання вологості, RH	0 ... 100 %	40% ... 60%	0% ... 99.9%
Час роботи	До 5 годин	До 4 годин	До 4 годин
Вартість	12 320 грн	43 700 грн	800 грн

Точність сенсора DHT22 при вимірюванні температури становить ±0,5 одиниці при температурі від -40 до +80 °C. Водночас точність сенсора може змінюватися залежно від температурних умов. Для розрахунку похибки за інших температур є формула:

$$\delta_T = \frac{0.3 \cdot \delta_o}{10^\circ C} (t_b - t_n) \quad (7)$$

де, δ_T – додаткова температурна похибка;

δ_o – основна мультиплікативна похибка;

t_b – верхня границя температури роботи сенсору;

t_n – нижня границя температури роботи сенсору;

Підставивши у формулу наведені значення з технічних характеристик сенсору маємо:

$$\delta_T = \frac{0.3 \cdot \delta_o}{10^\circ C} (t_b - t_n); \delta_T = \frac{0.3 \cdot 0.5}{10^\circ C} (80 - (-40)) = 1.8\%$$

З отриманого результату температурна похибка сенсора для вимірювання температури буде дорівнювати 1,8% за діапазоном від -40 до +80 °C. Далі виміряємо температурну похибку для усіх інших сенсорів, що використовуються у нашій системі:

Сенсор вологості повітря DHT22 точність якого становить ± 2 одиниці при з діапазоном температури експлуатації від -40 до $+80^\circ\text{C}$, отримаємо:

$$\delta_B = \frac{0.3 \cdot \delta_O}{10^\circ\text{C}} (t_b - t_n) ; \delta_B = \frac{0.3 \cdot 2}{10^\circ\text{C}} (80 - 40) = 7.2\% .$$

Останнім розрахуємо сенсор запиленості GP2Y1010U0F точність якого становить $\pm 0,5$ одиниць, що має діапазон температури експлуатації від -10 до $+65^\circ\text{C}$. Підставимо отримані дані до формули 4.1:

$$\delta_{\Pi} = \frac{0.3 \cdot \delta_O}{10^\circ\text{C}} (t_b - t_n) ; \delta_{\Pi} = \frac{0.3 \cdot 0.5}{10^\circ\text{C}} (65 - 10) = 1,1\% .$$

Тобто при температурі за межами від -10 до 65°C похибка сенсору запиленості GP2Y1010AU0F буде складати $1,1\%$. Похибка аналого-цифрового перетворювача можна визначити за похибкою квантування, що обраховується за формулою:

$$\lambda_{\text{АЦП}} = \frac{1}{2^N} \cdot 100\% = \frac{1}{2^{10}} \cdot 100\% = 0.1\% .$$

Похибка по характеру прояву адитивна випадкова, розподілена за рівномірним законом.

Виміряємо сумарну мультиплікативну похибку каналу передачі даних для кожного сенсору, вона обчислюється за формулою:

$$\delta_{\Sigma} = \sqrt{\delta_T^2 + \delta_B^2 + \delta_{\Pi}^2} \quad (8)$$

де δ_T – мультиплікативна похибка сенсору температури;

δ_B – мультиплікативна похибка сенсору вологості;

δ_{Π} – мультиплікативна похибка сенсору запиленості;

Сумарну адитивну похибку каналу передачі даних визначаємо згідно (8), отримаємо:

$$\delta_{\Sigma T} = \sqrt{\delta_T^2} = 7.2\%$$

$$\delta_{\Sigma B} = \sqrt{\delta_B^2} = 1.1\%$$

$$\delta_{\Sigma \Pi} = \sqrt{\delta_{\Pi}^2} = 1.8\%$$

Сумарна адитивна похибка каналу передачі даних:

$$\gamma_{\Sigma} = \sqrt{\gamma_T^2 + \gamma_B^2 + \gamma_{\Pi}^2 + \gamma_{\text{АЦП}}^2} \quad (9)$$

Звідси:

$$\gamma_{\Sigma T} = \sqrt{\gamma_T^2 + \gamma_{\text{АЦП}}^2} = \sqrt{0.5^2 + 0.1^2} = 0.51\%$$

$$\gamma_{\Sigma B} = \sqrt{\gamma_B^2 + \gamma_{\text{АЦП}}^2} = \sqrt{2^2 + 0.1^2} = 2.01\%$$

$$\gamma_{\Sigma \Pi} = \sqrt{\gamma_{\Pi}^2 + \gamma_{\text{АЦП}}^2} = \sqrt{0.5^2 + 0.1^2} = 0.51\%$$

де γ_T – адитивна похибка сенсору температури;

γ_B – адитивна похибка сенсору вологості;

γ_{Π} – адитивна похибка сенсору запиленості;

$\gamma_{\text{АЦП}}$ – адитивна похибка АЦП;

Сумарна похибка вимірювального каналу передачі даних буде порахована за формулою:

$$\xi_{\Sigma} = \sqrt{\delta_{\Sigma}^2 + \gamma_{\Sigma}^2} \quad (10)$$

$$\xi_{\Sigma T} = \sqrt{\delta_{\Sigma T}^2 + \gamma_{\Sigma T}^2} = 7,21\%$$

$$\xi_{\Sigma B} = \sqrt{\delta_{\Sigma B}^2 + \gamma_{\Sigma B}^2} = 2,28\%$$

$$\xi_{\Sigma \Pi} = \sqrt{\delta_{\Sigma \Pi}^2 + \gamma_{\Sigma \Pi}^2} = 1,87\%$$

Зазначаємо, що сумарна похибка вимірювального каналу передачі даних склала: $7,21\%$ для температурного сенсора, $2,28\%$, для сенсора вологості, $1,87\%$ для сенсора запиленості GP2Y1010U0F. Результат похибки слід враховувати залежно від конкретних умов проведення дослідження або ж вони настільки малі що ними можна знехтувати.

ВИСНОВКИ З ДАНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ І ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ РОЗВІДОК У ДАНОМУ НАПРЯМІ

В результаті аналізу літературних джерел було розглянуто методи та системи моніторингу запиленості повітря як за кордоном, так і в Україні, було вибрано оптичний метод, який базується на принципі взаємодії світла з частинками пилу, який має кілька переваг, включаючи високу точність, швидкість вимірювань та можливість безперервного моніторингу.

Розроблено Інформаційно-вимірювальну систему, яка буде працювати на акумуляторних батареях типу 18650, що забезпечить її автономність і мобільність в реальному часі. Крім того, система матиме можливість записувати дані на Micro SD карту. Це дозволить зберігати зібрану інформацію для подальшого аналізу та обробки, що забезпечить надійне зберігання інформації та легкий доступ до неї для подальшого використання.

Література

1. What are dust particles? Everyone should know / [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://oizom.com/what-are-dust-particles/>. — 28.11.2024.
2. Abdullah Z. T. Expansion of a Mechano-Chemical Plant for Remanufacturing Waste Tires into Rubber Sheet and Profitable Wire Steel By-products: A Quantitative Sustainability Assessment. Applications in Engineering Science. 2023. P. 100164. URL: <https://doi.org/10.1016/j.apples.2023.100164> (date of access: 28.11.2024).
3. Защепкіна Н.М. Екологічний моніторинг запиленості автомобільних доріг/Н.М. Защепкіна, С.В. Михайлов, І.В. Приміський//збірник наукових праць XII Міжнародної науково-технічної інтернет-конференції «Проблеми та перспективи розвитку автомобільного транспорту», 3 Луцьк. ЛНТУ.–2024. – С. 112-118.
4. Визначення терміну тертя / [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://www.britannica.com/science/friction>. — 28.10.2024.
5. Daan Roosegaarde / [Електронний ресурс]. — Режим доступу: https://nl.wikipedia.org/wiki/Daan_Roosegaarde. — 28.10.2024.
6. Защепкіна Н.М. Удосконалення методу визначення пилопроникності матеріалів/Зашчепкіна Н.М., Мелконян А.А., Довгальок Р.Ю., Недобойко С.О./ Вісник Житомирського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки. №1.– 2017.С.52-57.
7. Методичні вказівки до лабораторної роботи "Вивчення методів і засобів контролю запиленості повітря" з дисципліни "Основи охорони праці" для студентів усіх спеціальностей / [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://aop.nmu.org.ua/ua/metodicki/bakalavr/oo/p/%D0%9F%D1%8B%D0%BB%D1%8C.pdf> — 28.10.2024.
8. VIEW PLUS Smart indoor air quality monitor / [Електронний ресурс]. — Режим доступу: https://cms.airthings.com/hubfs/01_Website/Product%20Sheets/view-plus/view-plus-product-sheet-EN.pdf. — 28.10.2024.
9. Qingping Air Monitor / [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://smartairfilters.com/wordpress/wp-content/uploads/sites/16/2022/07/Qingping-Air-Monitor-EN.pdf>. — 28.10.2024.

References

1. What are dust particles? Everyone should know / [Electronic resource]. — Access mode: <https://oizom.com/what-are-dust-particles/>. — 28.10.2024.
2. Abdullah Z. T. Expansion of a Mechano-Chemical Plant for Remanufacturing Waste Tires into Rubber Sheet and Profitable Wire Steel By-products: A Quantitative Sustainability Assessment. Applications in Engineering Science. 2023. P. 100164. URL: <https://doi.org/10.1016/j.apples.2023.100164> (date of access: 28.10.2024).
3. Zashchepkina N.M. Environmental monitoring of road dust/N.M. Zashchepkina, E.V. Mykhaylov, I.V. Prymiskyi/collection of scientific works of the XII International Scientific and Technical Internet Conference "Problems and Prospects of Road Transport Development", Lutsk. LNTU.–2024. - S. 112-118
4. Definition of the friction term / [Electronic resource]. — Access mode: <https://www.britannica.com/science/friction>. — 28.10.2024.
5. Daan Roosegaarde / [Electronic resource]. — Access mode: https://nl.wikipedia.org/wiki/Daan_Roosegaarde. — 28.10.2024.
6. Zashchepkina N.M. Improvement of the method of determining the dust permeability of materials / Zashchepkina N.M., Melkonyan A.A., Dovhalyuk R.Yu., Nedoboyko S.O. / Bulletin of the Zhytomyr State Technological University. Series: Technical sciences. No. 1. – 2017. P. 52-57.
7. Methodological instructions for the laboratory work "Study of methods and means of air dust control" from the discipline "Fundamentals of labor protection" for students of all specialties / [Electronic resource]. — Access mode: <https://aop.nmu.org.ua/ua/metodicki/bakalavr/oo/p/%D0%9F%D1%8B%D0%BB%D1%8C.pdf> — 28.10.2024.
8. VIEW PLUS Smart indoor air quality monitor / [Electronic resource]. — Access mode: https://cms.airthings.com/hubfs/01_Website/Product%20Sheets/view-plus/view-plus-product-sheet-EN.pdf. — 28.10.2024.
9. Qingping Air Monitor / [Electronic resource]. — Access mode: <https://smartairfilters.com/wordpress/wp-content/uploads/sites/16/2022/07/Qingping-Air-Monitor-EN.pdf>. — 28.10.2024.