

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ІНФОРМАЦІЙНИХ
ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ ТА ТЕХНОЛОГІЙ

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему: «ІoT-система автономної мережі датчиків для
відстеження якості повітря в місті»

на здобуття освітнього ступеня бакалавра (магістра)
зі спеціальності 126 Інформаційні системи та технології
освітньо-професійної програми Інформаційні системи та технології

*Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень.
Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на
відповідне джерело*

(підпис)

Ім'я, ПРІЗВИЩЕ здобувача

Виконав:

здобувач вищої освіти гр. ІСД-41

Кирило СЕРДЮК

Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Керівник:

Сергій СОЛОМАХА, к. е. н.

*науковий ступінь,
вчене звання*

Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Рецензент:

*науковий ступінь,
вчене звання*

Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Київ 2025

**ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ**
Навчально-науковий інститут інформаційних технологій

Кафедра Інформаційні системи та технології

Ступінь вищої освіти бакалавр

Спеціальність 126

Освітньо-професійна програма _____

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри _____

_____ Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

«_____» _____ 20__ р.

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

Сердюк Кирило Віталійович

(прізвище, ім'я, по батькові здобувача)

1. Тема кваліфікаційної роботи: IoT-система автономної мережі датчиків для відстеження якості повітря в місті

керівник кваліфікаційної роботи Сергій СОЛОМАХА, к. е. н.,

(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій від «24» 02 2025 р. № 56

2. Строк подання кваліфікаційної роботи «30» 05 2025 р.
3. Вихідні дані до кваліфікаційної роботи: науково-технічна література, технічна документація мікроконтролерів Arduino та ESP, протоколів проводової та безпроводової передачі даних, науково-технічна література.
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)
1. Огляд технічних аспектів поточного стану моніторингу повітря в Україні
 2. Розробка комплексу апаратного забезпечення системи моніторингу якості повітря
 3. Розробка програмного забезпечення системи моніторингу якості повітря
5. Перелік ілюстративного матеріалу: *презентація*
6. Дата видачі завдання «24» 02 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з\п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Підбір науково-технічної літератури	01.03.2025 р.	
2	Дослідження існуючих систем моніторингу та покращення якості повітря у містах	15.03.2025 р.	
3	Формулювання технічного завдання, функціональних та нефункціональних вимог на розробку системи моніторингу якості повітря	17.03.2025 р.	
4	Вибір технологічного стеку та проєктування архітектури і монтажної схеми системи автономної мережі датчиків	4.04.2025 р.	
5	Реалізація та тестування програмного забезпечення	16.05.2025 р.	
6	Розробка демонстраційних матеріалів	26.05.2025 р.	
7	Попередній захист дипломної роботи	27.05.2025 р.	
8	Подання роботи в деканат	30.05.2025 р.	

Здобувач(ка) вищої освіти

(підпис)

(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Керівник кваліфікаційної роботи

(підпис)

(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

РЕФЕРАТ

Текстова частина кваліфікаційної роботи на здобуття освітнього ступеня бакалавра (магістра): 74 стор., 52 рис., 0 табл., 38 джерел.

Мета роботи – розробити автоматизовану IoT-систему для моніторингу якості повітря в міському середовищі з можливістю збору, обробки та передачі даних у режимі реального часу.

Об'єкт дослідження – автоматизована система моніторингу якості повітря на основі IoT-технологій.

Предмет дослідження – методи побудови автономних IoT-систем з використанням мікроконтролерів, сенсорів та бездротових технологій.

Короткий зміст роботи: у роботі розглянуто проблему забруднення повітря у великих містах та її вплив на здоров'я населення. Проведено аналіз джерел забруднення, міжнародних стандартів якості повітря та технологічних підходів до екологічного моніторингу. Обґрунтовано вибір апаратних компонентів для створення прототипу автономної IoT-системи, зокрема мікроконтролера ESP та сенсорів для вимірювання PM, CO₂, температури, вологості та летких органічних речовин. Розроблено алгоритм роботи програми, реалізовано виведення екологічних показників на дисплей із супровідною сигналізацією. Система функціонує автономно, без підключення до бездротових мереж, що дозволяє застосовувати її в умовах обмеженої інфраструктури. Робота містить рекомендації щодо практичного впровадження системи у міське середовище та перспективи її подальшого розвитку.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ІНТЕРНЕТ РЕЧЕЙ (IOT), МОНІТОРИНГ ЯКОСТІ ПОВІТРЯ, МІКРОКОНТРОЛЕР ESP, ЕКОЛОГІЧНИЙ СЕНСОР, АВТОНОМНА СИСТЕМА, МІСЬКЕ СЕРЕДОВИЩЕ, ARDUINO IDE, ДАТЧИКИ ЗАБРУДНЕННЯ, AQI, C++, ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ

ABSTRACT

Text part of the master's qualification work:

74 pages, 52 pictures, 0 table, 38 sources.

The purpose of the work is to develop an automated IoT system for monitoring air quality in urban environments with the ability to collect, process and transmit data in real time.

Object of research – an automated air quality monitoring system based on IoT technologies.

Subject of research – methods of building autonomous IoT systems using microcontrollers, sensors and wireless technologies.

Summary of the work: the thesis addresses the issue of air pollution in large cities and its impact on public health. It includes an analysis of pollution sources, international air quality standards, and technological approaches to environmental monitoring. The choice of hardware components for developing a prototype autonomous IoT system is justified, including the ESP microcontroller and sensors for measuring PM, CO₂, temperature, humidity, and volatile organic compounds. A program algorithm was developed, enabling the display of environmental indicators along with visual and acoustic alerts. The system operates autonomously without connection to wireless networks, making it suitable for use in infrastructure-limited environments. The work also provides recommendations for practical implementation in urban areas and outlines prospects for further *development*.

KEYWORDS: INTERNET OF THINGS (IOT), AIR QUALITY MONITORING, ESP MICROCONTROLLER, ENVIRONMENTAL SENSOR, AUTONOMOUS SYSTEM, URBAN ENVIRONMENT, ARDUINO IDE, POLLUTION SENSORS, AQI, C++, ENERGY EFFICIENCY.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	9
1 АНАЛІЗ ВПЛИВУ ШКІДЛИВОГО ПОВІТРЯ НА ЯКІСТЬ ЖИТТЯ ЖИТЕЛІВ ВЕЛИКИХ МІСТ	11
1.1 Огляд відповідності стану повітря у сучасних великих містах міжнародним нормам якості.....	11
1.2 Основні фактори стану повітря, що впливають на здоров'я та якість життя містян.....	13
1.3 Технологічні аспекти забрудненості повітря у містах	15
1.4 Огляд існуючих технічних рішень з моніторингу якості повітря	17
2 ПРОЄКТУВАННЯ АПАРАТНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ МЕРЕЖІ ДАТЧИКІВ НА БАЗІ МІКРОКОНТРОЛЕРА ESP	30
2.1 Технічний огляд мікроконтролерів та датчиків, що застосовуються для моніторингу якості повітря	30
2.2 Мережеві протоколи передачі даних для забезпечення зв'язку між компонентами моніторингової системи.....	42
2.3 Особливості взаємодії компонентів мережі та корпус	48
3 ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ МЕРЕЖІ МОНІТОРИНГУ НА БАЗІ МІКРОКОНТРОЛЕРА ESP.....	51
3.1 Налаштування середовища розробки та огляд інструментів.....	51
3.2 Алгоритм роботи та основні функції програм	59
3.3 Особливості та прогнози впровадження системи у місто.....	67
ВИСНОВКИ.....	69
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	71

ВСТУП

Вибір теми кваліфікаційної роботи обумовлений зростаючими екологічними проблемами в умовах урбанізації, зокрема погіршенням якості повітря в містах. Через інтенсивний розвиток транспорту, промисловості, будівництва та інші антропогенні чинники рівень шкідливих речовин у повітрі перевищує допустимі норми, що негативно впливає на здоров'я населення. Своєчасний моніторинг якості повітря дозволяє приймати оперативні заходи з метою покращення екологічної ситуації, планування міської інфраструктури та інформування громадськості.

Сучасні технології Інтернету речей (IoT) дають змогу створювати розподілені автономні системи спостереження, які можуть працювати у режимі реального часу, не потребуючи постійного втручання людини. Завдяки цьому з'являється можливість реалізувати ефективну та доступну систему моніторингу забруднення повітря в міських умовах, яка може використовуватися як у реальних проєктах, так і в освітніх лабораторіях для підготовки майбутніх фахівців у галузі інформаційних технологій, електроніки та екології.

Об'єктом дослідження є автоматизована IoT-система моніторингу якості повітря, яка призначена для оцінки екологічного стану атмосферного середовища в умовах урбанізації на основі збору, обробки та передачі даних з використанням сенсорних пристроїв і мікроконтролерів.

Предметом дослідження є методи побудови автономних IoT-систем з використанням мікроконтролерів, сенсорів якості повітря та бездротової передачі даних, а також принципи аналізу отриманих результатів.

Метою роботи є розробка автоматизованої IoT-системи моніторингу якості повітря, яка дозволяє відслідковувати рівень шкідливих речовин у міському середовищі та передавати дані для подальшої обробки й візуалізації.

Для досягнення поставленої мети були визначені наступні задачі:

1. Провести аналіз сучасних проблем якості повітря в міських умовах та методів її моніторингу;

2. Ознайомитися з архітектурою IoT-систем, відповідними мікроконтролерами та сенсорами;
3. Розробити прототип IoT-пристрою для вимірювання показників якості повітря;
4. Реалізувати систему збору, обробки, збереження та передачі даних на сервер;
5. Перевірити працездатність розробленого рішення та оцінити його ефективність.

Методика дослідження складається з теоретичної та практичної частин. Теоретичний етап включає вивчення літератури, технічної документації, існуючих рішень в галузі моніторингу повітря та IoT. Практичний етап полягає у проектуванні, складанні та тестуванні реального прототипу пристрою та його програмного забезпечення.

Наукова новизна роботи полягає у створенні компактної, енергоефективної та економічно доцільної IoT-системи для моніторингу якості повітря на базі відкритих апаратних і програмних рішень, що дозволяє легко адаптувати її під потреби навчального процесу або громадських ініціатив.

Практична значущість результатів дослідження полягає у можливості використання розробленої системи в рамках навчальних лабораторій університетів, екологічного моніторингу на рівні громади, а також у створенні основи для майбутніх досліджень у сфері розумного міста та сталого розвитку.

Апробація дослідження здійснювалась у формі участі в фахових конференціях:

1. II всеукраїнська науково-технічна конференція «Технологічні горизонти: дослідження та застосування інформаційних технологій для технологічного прогресу України і світу» з поданням тез на тему «Технологічні інновації в освіті»
2. VII міжнародна науково-технічна конференція «Сучасний стан та перспективи розвитку IoT» з поданням тез на тему «IoT для розумних міст та промисловості»

1 АНАЛІЗ ВПЛИВУ ШКІДЛИВОГО ПОВІТРЯ НА ЯКІСТЬ ЖИТТЯ ЖИТЕЛІВ ВЕЛИКИХ МІСТ

1.1 Огляд відповідності стану повітря у сучасних великих містах міжнародним нормам якості

У сучасних мегаполісах рівень забруднення повітря часто перевищує допустимі межі, визначені міжнародними екологічними стандартами, зокрема тими, що були встановлені Всесвітньою організацією охорони здоров'я (ВООЗ). Основними чинниками такої тенденції є інтенсивне зростання кількості автотранспорту, відсутність належного контролю над промисловими викидами, а також збільшення потреб в енергоспоживанні, що супроводжується використанням переважно традиційних джерел енергії. Додатковою проблемою залишається недостатній рівень систематичного моніторингу якості повітря у багатьох регіонах, що ускладнює об'єктивну оцінку екологічного стану та перешкоджає впровадженню ефективних стратегій управління навколишнім середовищем.

Практика провідних світових міст, таких як Сінгапур, Токіо, Нью-Йорк і Стокгольм, демонструє, що інтеграція міжнародних екологічних норм у національне законодавство та місцеву політику дає позитивні результати. Ці міста активно обмежують використання транспортних засобів з двигунами внутрішнього згоряння, впроваджують інфраструктуру для екологічно чистих видів транспорту, а також стимулюють розвиток альтернативної, так званої "зеленої" енергетики. У результаті спостерігається суттєве зменшення рівня викидів шкідливих речовин в атмосферу та покращення загального стану довкілля.

Особливу роль у вирішенні проблеми забруднення повітря відіграють місцеві органи влади у взаємодії з громадськістю. Забезпечення відкритого доступу до екологічної інформації, активна співпраця з міжнародними екологічними організаціями та залучення населення до участі в ініціативах у

сфері екології, створюють передумови для підвищення екологічної свідомості громадян.

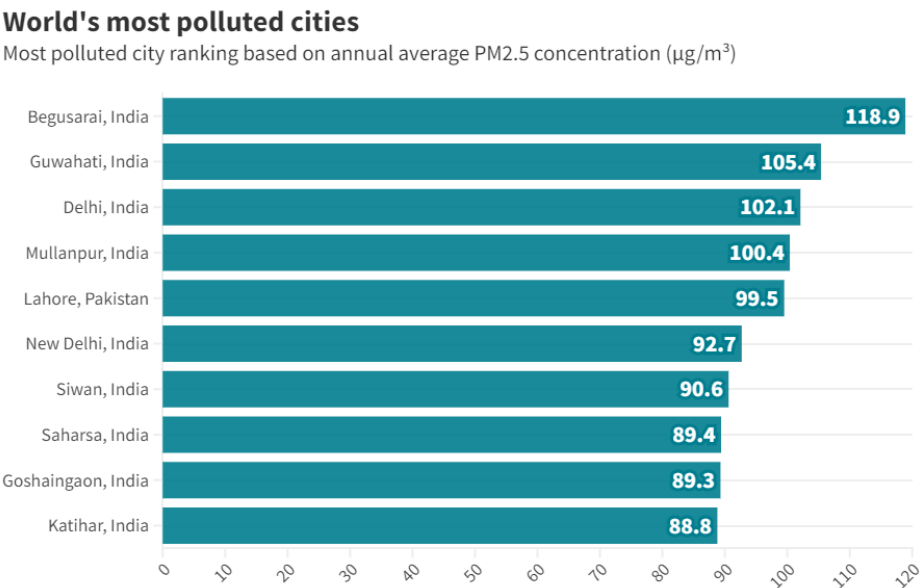


Рис. 1.1 Рейтинг міст з найбільшим забрудненням у світі [1]

На рисунках 1.1 та 1.2 продемонстровано рейтинг найбільш забруднених та найчистіших міст у світі [1, 2].



Рис. 1.2. Рейтинг найчистіших міст у світі [2]

В підсумку, комплексний підхід, який поєднує інноваційні технологічні рішення, ефективні законодавчі механізми регулювання та активну участь суспільства, формує фундамент для досягнення відповідності сучасним міжнародним стандартам, а також позитивно впливає на якість життя в урбанізованих середовищах.

1.2 Основні фактори стану повітря, що впливають на здоров'я та якість життя містян

Атмосферне повітря у великих містах справляє безпосередній вплив на стан здоров'я населення та загальну якість життя. Одним із ключових факторів погіршення повітря є викиди автотранспорту, що функціонує на застарілих екологічних стандартах, які не забезпечують належного рівня очищення вихлопних газів. Додатковими джерелами забруднення виступають промислові підприємства, що працюють на основі спалювання викопного палива, а також застарілі системи централізованого та індивідуального опалення, які мають низьку енергоефективність та високий рівень викидів. У сукупності ці фактори спричиняють зростання концентрації шкідливих речовин в атмосфері, зокрема дрібнодисперсних часток (particulate matter), які класифікуються відповідно до шкал $PM_{2.5}$ та PM_{10} , оксидів азоту, вуглецю, а також приземного озону. Ці речовини є визнаними чинниками розвитку респіраторних, серцево-судинних та інших хронічних захворювань, що безпосередньо впливають на показники загальної смертності та тривалості життя.

Висока концентрація вказаних шкідливих сполук має суттєві соціально-економічні наслідки. Забруднене повітря не лише знижує працездатність і загальне самопочуття громадян, але й скорочує очікувану тривалість життя, підвищує навантаження на систему охорони здоров'я та призводить до підвищеної смертності, що у довгостроковій перспективі може спричинити дефіцит трудових ресурсів. Найбільш уразливими до негативного впливу забруднювальних речовин є діти, особи літнього віку та пацієнти з хронічними захворюваннями дихальної системи. На рис. 1.3 візуалізовано основні групи ризику та статистичні показники їхньої чутливості до забруднення повітря [3].

Додатковим ускладненням у боротьбі з атмосферним забрудненням виступає слабка циркуляція повітря у щільно забудованих міських районах, що сприяє накопиченню викидів та підвищенню локального рівня забруднення. Для ефективного зменшення концентрації шкідливих речовин необхідно застосовувати інноваційні технології моніторингу, стимулювати використання

екологічно чистого транспорту, а також впроваджувати системні заходи, спрямовані на скорочення джерел викидів. У довгостроковій перспективі такі заходи сприятимуть покращенню здоров'я населення, зниженню екологічних ризиків і забезпеченню стійкого розвитку міст.

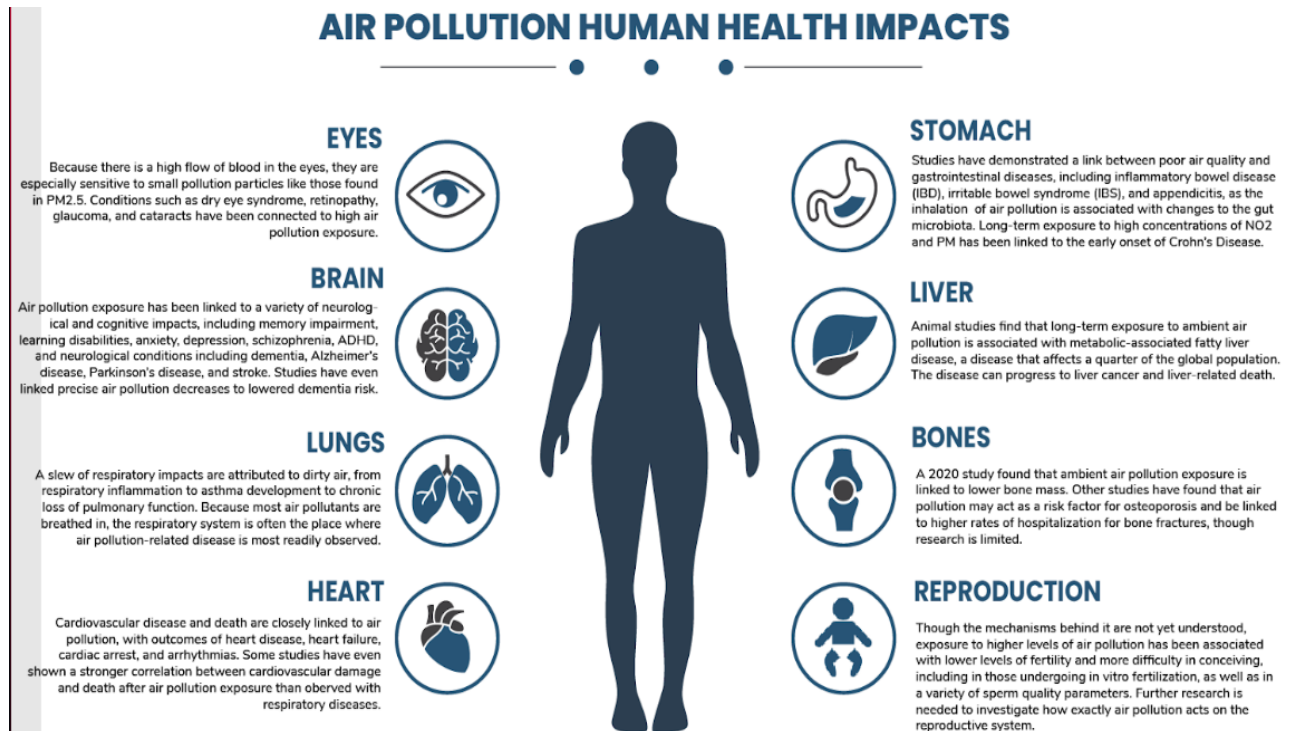


Рис 1.3. Вплив на людський організм, уражений забрудненим повітрям [3]

Дрібнодисперсні частки РМ (particulate matter) — це мікроскопічні тверді чи рідкі частинки, що зависають у повітрі та мають різноманітний хімічний склад. Через свої надзвичайно малі розміри ці частинки здатні проникати в органи дихання, а надалі — у кровоносну систему, розповсюджуючись по всьому організму та осідаючи в життєво важливих органах, зокрема серці та мозку. Тому, навіть короткотривалий вплив часток РМ може викликати серйозні патологічні стани, особливо серед представників уразливих категорій населення.

Індекс якості повітря	PM _{2.5}	PM ₁₀
Добрий	0	0
Задовільний	12	54
Шкідливий для групи ризику	35	154
Шкідливий	55	254
Дуже шкідливий	150	354
Небезпечний	250	424

Рис 1.4. Індекс якості повітря за шкалою PM_{2.5} та PM₁₀ [4]

У практиці держав Європейського Союзу та Сполучених Штатів Америки здійснюється систематичне вимірювання концентрації часток PM₁₀ (діаметром менше 10 мкм) та PM_{2.5} (менше 2.5 мкм). Законодавчо встановлені гранично допустимі рівні концентрацій цих частинок у повітрі з метою зменшення негативного впливу на здоров'я людей. Для зручності оцінювання екологічного стану створено стандартизовану шкалу індексу якості повітря, яка передбачає градацію значень відповідно до вимірних рівнів PM_{2.5} та PM₁₀ (рис. 1.4) [4].

1.3 Технологічні аспекти забрудненості повітря у містах

Забруднення атмосферного повітря в урбанізованих середовищах значною мірою зумовлене техногенними процесами, що супроводжують інтенсивний розвиток сучасної інфраструктури. Основні джерела антропогенного впливу на навколишнє середовище, згадані в попередніх підрозділах, розглядаються нижче з метою деталізації їхнього впливу на якість повітря.

Одним із найпоширеніших джерел викидів шкідливих речовин є транспорт, зокрема використання транспортних засобів, оснащених традиційними двигунами внутрішнього згорання. Під час їх експлуатації в атмосферу вивільняються значні обсяги вуглекислого газу (CO₂), сірчистого газу (SO₂), оксидів азоту (NO_x), а також дрібнодисперсних часток (PM), які становлять суттєву загрозу для здоров'я населення та довкілля. У зв'язку з цим, у низці країн було запроваджено жорсткі нормативи, зокрема стандарти Євро, що

регламентують допустимі рівні шкідливих викидів та вимагають встановлення систем каталізаторів і засобів очищення вихлопних газів (рис. 1.5) [5].

Вміст токсичних речовин у вихлопі легкових авто, г/км

Стандарт	Дата	CO	THC	NMHC	NO _x	HC+NO _x	PM
Дизельні двигуни							
Євро-1	Липень 1992	2,72 (3,16)	-	-	-	0,97(1,13)	0,14 (0,18)
Євро-2	Січень 1996	1,0	-	-	-	0,7	0,08
Євро-3	Січень 2000	0,64	-	-	0,50	0,56	0,05
Євро-4	Січень 2005	0,50	-	-	0,25	0,30	0,025
Євро-5	Вересень 2009	0,500	-	-	0,180	0,230	0,005
Євро-6	Вересень 2014	0,500	-	-	0,080	0,170	0,005
Бензинові двигуни							
Євро-1	Липень 1992	2,72 (3,16)	-	-	-	0,97 (1,13)	-
Євро-2	Січень 1996	2,2	-	-	-	0,5	-
Євро-3	Січень 2000	1,3	0,20	-	0,15	-	-
Євро-4	Січень 2005	1,0	0,10	-	0,08	-	-
Євро-5	Вересень 2009	1,00	0,100	0,068	0,060	-	0,005
Євро-6	Вересень 2014	1,00	0,100	0,068	0,060	-	0,005

Рис. 1.5. Таблиця зі стандартами Євро [5]

Суттєвий внесок у забруднення атмосфери також здійснюють промислові підприємства, особливо ті, що функціонують на базі застарілих технологій. Відсутність або недостатня ефективність фільтраційних систем призводить до неконтрольованого викиду токсичних сполук у повітря. Аналогічна ситуація спостерігається в системах опалення, де через використання низькоякісного палива — вугілля або мазуту — відбувається додаткове навантаження на атмосферне середовище, особливо в холодну пору року.

У цьому контексті особливої актуальності набувають інноваційні технології моніторингу та управління якістю повітря. Зокрема, впровадження IoT-систем (Internet of Things) забезпечує можливість безперервного контролю рівнів забруднюючих речовин у режимі реального часу, що дозволяє оперативно реагувати на критичні зміни екологічної ситуації за умов мінімальних витрат.

Серед найбільш ефективних технологічних рішень, спрямованих на зменшення рівня забруднення, слід відзначити: перехід на електричний транспорт, модернізацію промислових об'єктів із впровадженням

фільтраційного обладнання, а також використання екологічно чистих джерел енергії. Запровадження таких заходів створює підґрунтя для формування екологічно безпечного міського простору, що відповідає сучасним вимогам сталого розвитку та забезпечує належну якість життя для населення.

1.4 Огляд існуючих технічних рішень з моніторингу якості повітря

Сучасні технічні рішення для моніторингу якості атмосферного повітря охоплюють широкий спектр технологій, що дозволяють точно вимірювати концентрації забруднювальних речовин і здійснювати оперативний аналіз екологічного стану. Одним із ключових елементів таких систем є стаціонарні пункти моніторингу, які оснащуються високоточними сенсорами для визначення рівнів дрібнодисперсних часток ($PM_{2.5}$, PM_{10}), оксидів азоту, озону, вуглекислого газу та інших шкідливих сполук. Паралельно з ними широкого розповсюдження набули портативні й мобільні засоби контролю, що завдяки доступності та компактності забезпечують можливість моніторингу повітря окремими користувачами та організаціями у заданих точках у режимі реального часу.

Стрімкий розвиток технологій Інтернету речей (IoT) відкрив нові можливості для впровадження розподілених сенсорних мереж, що забезпечують безперервне спостереження за якістю повітря на великих територіях. Одним із прикладів є проєкт на базі платформи Raspberry Pi (рис. 1.6) [6], у якому реалізовано систему вимірювання забруднювальних речовин у межах діапазону від 0 $мкг/м^3$ до 1000 $мкг/м^3$.



Рис. 1.6. Компоненти пристрою моніторингу якості повітря [6]

Пристрій має час відгуку до 6 секунд, максимальний струм споживання — 80 мА, а точність вимірювання концентрацій часток $PM_{2.5}$ і PM_{10} становить приблизно 15%, що відповідає вимогам згідно зі стандартом ІЕС61000 (рис 1.7). Пристрій можна помістити в коробку, розміром 360мм х 270мм х 165мм.

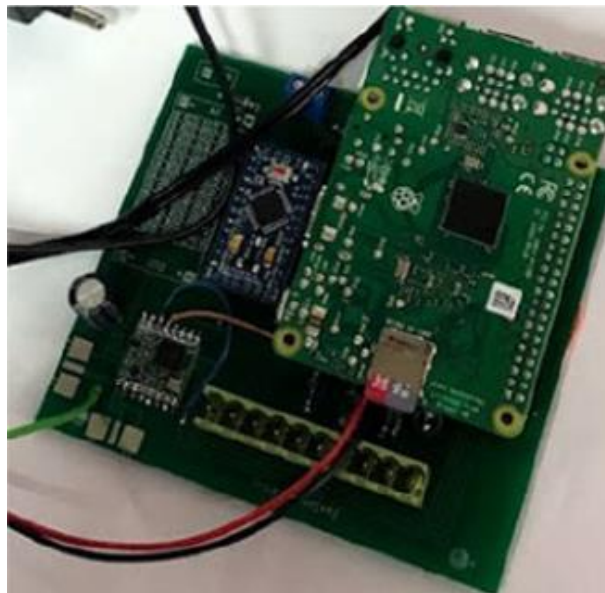


Рис 1.7. Вся плата в зборі [6]

Після апаратної збірки пристрою реалізується програмна частина. Веб-платформа, розроблена із використанням HTML, CSS, PHP, JavaScript та SQL, надає можливість користувачам обирати на мапі або зі списку промислові об'єкти, що їх цікавлять, та переглядати відповідні дані з конкретного сенсора у

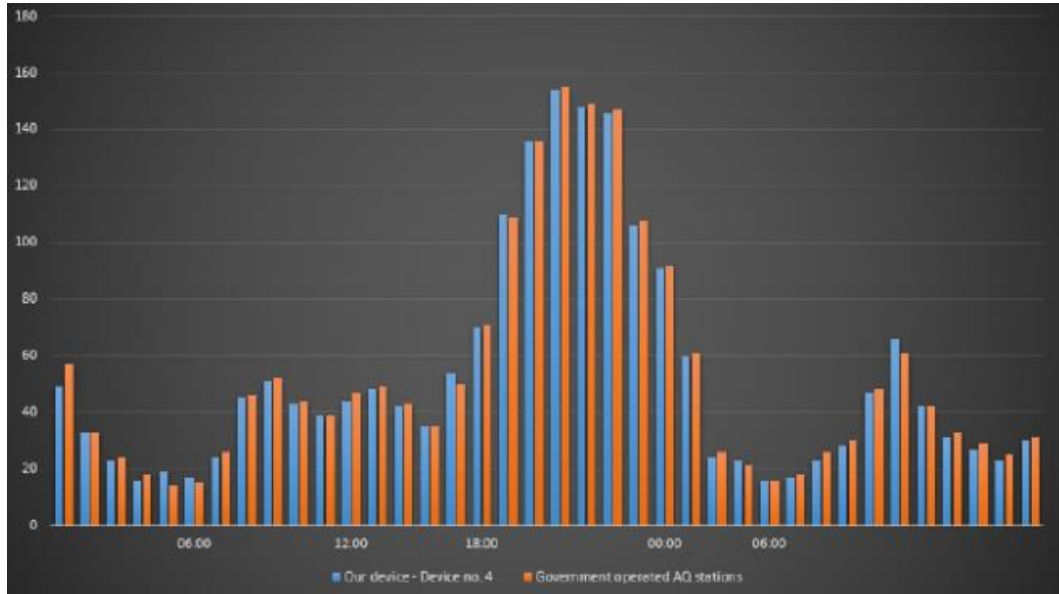


Рис. 1.9. Порівняння даних державних станцій якості повітря з даними цих недорогих пристроїв - значення оксиду азоту (NO₂) за 24 години [6]

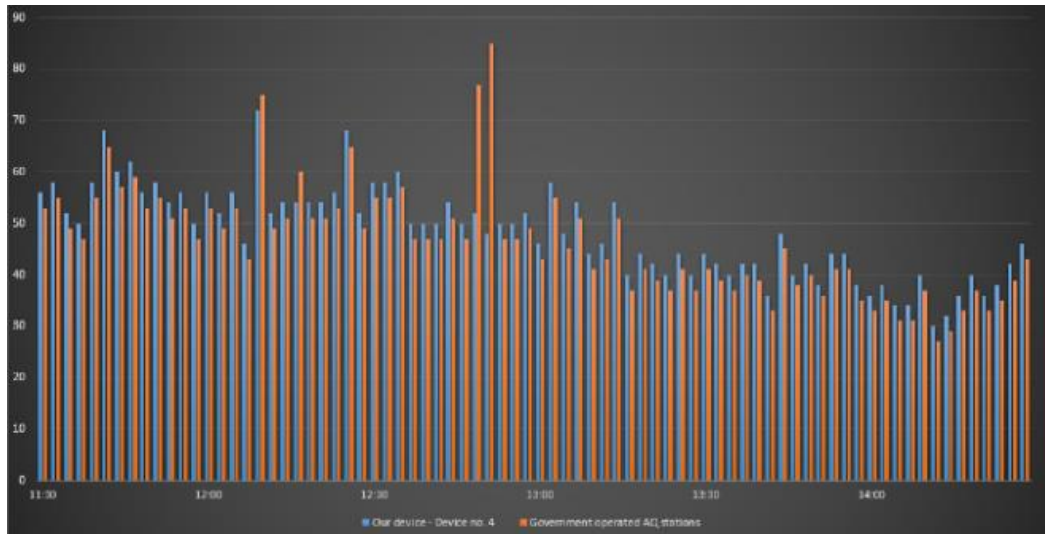


Рис 1.10. Порівняння даних державних станцій якості - значення РМ₁₀ за 3 години [6]

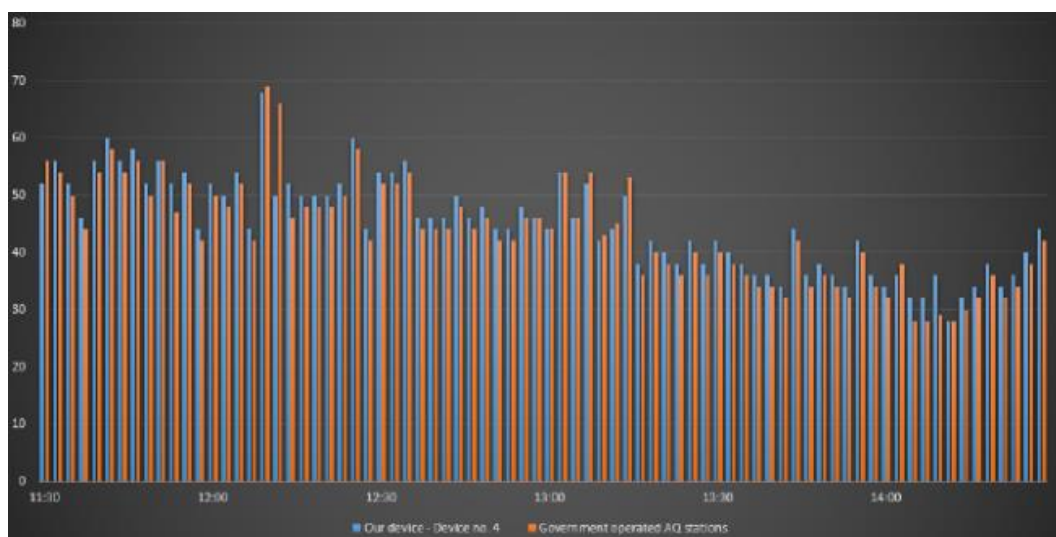


Рис 1.11. Порівняння даних державних станцій контролю якості повітря - значення $PM_{2.5}$ за 3 години [6]

Після ознайомлення з принципами роботи пристроїв для моніторингу якості повітря доцільно розглянути приклади інших приладів зі схожим функціоналом (рис. 1.12–1.15).

AirFresh — це пристрій громадського моніторингу повітря, розроблений у межах проєкту EcoCity. Він здатен вимірювати не лише дві стандартні фракції твердих часток ($PM_{2.5}$ та PM_{10}), а й дрібнодисперсні частки PM_1 . Додатковою перевагою пристрою є наявність автоматизованого термокомпенсаційного модуля, що здійснює попереднє нагрівання повітря перед подачею до пилеміра при підвищеній відносній вологості понад 70%. Це дозволяє суттєво знизити похибку вимірювань у туманну або вологу погоду (рис. 1.12) [7].



Рис. 1.12. Пристрій AirFresh [7]

Ajax LifeQuality Jeweler — інтелектуальний сенсор якості повітря, обладнаний модулями для вимірювання температури, вологості та концентрації вуглекислого газу (CO_2). Пристрій забезпечує постійний моніторинг мікроклімату в різних типах приміщень — від житлових до офісних і виробничих. У поєднанні з іншими елементами екосистеми безпеки Ajax LifeQuality пристрій здатен автоматично активувати вентиляцію або зволоження повітря у разі виявлення відхилень від комфортних параметрів (рис. 1.13) [8].



Рис. 1.13. Пристрій Ajax LifeQuality Jeweler [8]

Xiaomi Qingping Air Detector — компактний і естетично оформлений прилад для побутового використання, що забезпечує безперервний контроль п'яти основних показників якості повітря в приміщенні. Завдяки своїм невеликим розмірам, простоті використання та наочному відображенню інформації він став популярним рішенням серед користувачів для створення комфортного мікроклімату у повсякденному середовищі (рис. 1.14) [9].



Рис. 1.14. Пристрій Xiaomi Qingping Air Detector [9]

Ще одним із прикладів успішної реалізації прикладного проєкту в сфері екологічного моніторингу є ініціатива українських студентів під назвою **AirC**. Мотивацією для започаткування цього проєкту стали численні екологічні проблеми, пов'язані з якістю повітря в міських умовах, зокрема в столиці України. Суттєвий внесок у розробку проєкту зробила критична ситуація із забрудненням повітря внаслідок транспортних заторів, що, згідно зі статистичними даними, спричиняють підвищену смертність серед мешканців мегаполісів [10].

Розробка пристрою розпочалася на початку 2020 року, в умовах пандемії COVID-19, і проходила повністю в онлайн-режимі. До проєкту було залучено 40 студентів, які об'єднали зусилля для реалізації інноваційної ідеї. Програмування здійснювалося мовою C++ на базі операційної системи Linux. Замість традиційного навчання за шаблонними прикладами, учасники проєкту отримали можливість працювати над реальними, нестандартними технічними завданнями, що вимагали командної взаємодії, критичного мислення та міждисциплінарного підходу. Завдяки цьому було забезпечено ефективне поєднання знань і навичок із різних галузей, що стало основою для створення функціонального прототипу пристрою (рис. 1.15).

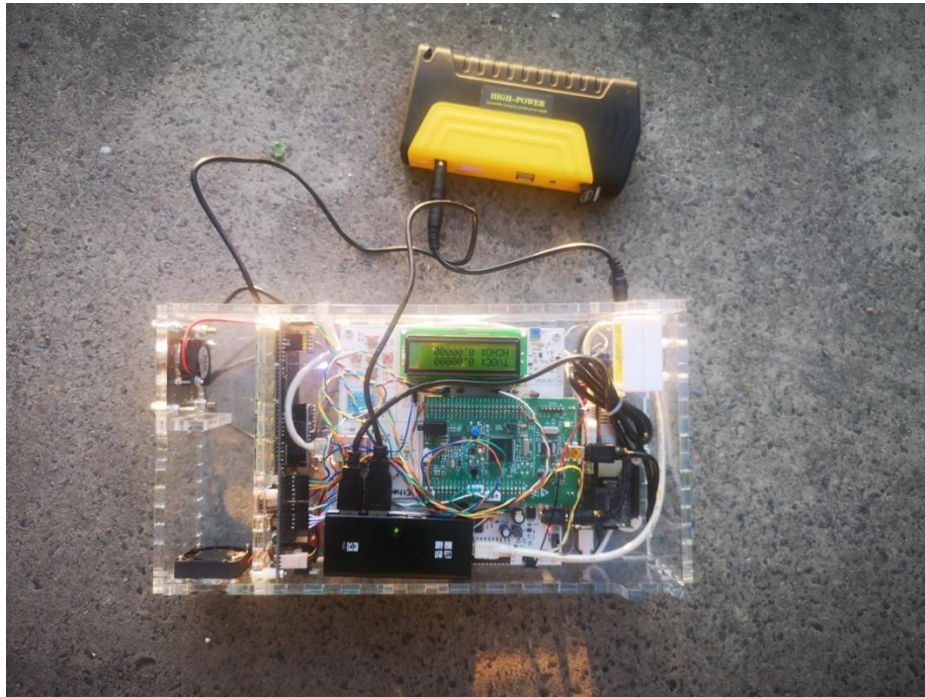


Рис. 1.15. Прототип пристрою AirC [10]

Попри інноваційність концепції та практичну значущість проєкту, на етапі тестування виявлено ряд недоліків. Зокрема, встановлені у пристрої сенсори не забезпечували достатньої точності у вимірюванні забруднення повітря. Це зумовлено як фізичними обмеженнями недорогих датчиків, так і складністю самої задачі аналізу повітря, яка вимагає використання високоточних та вартісних приладів (рис. 1.16).

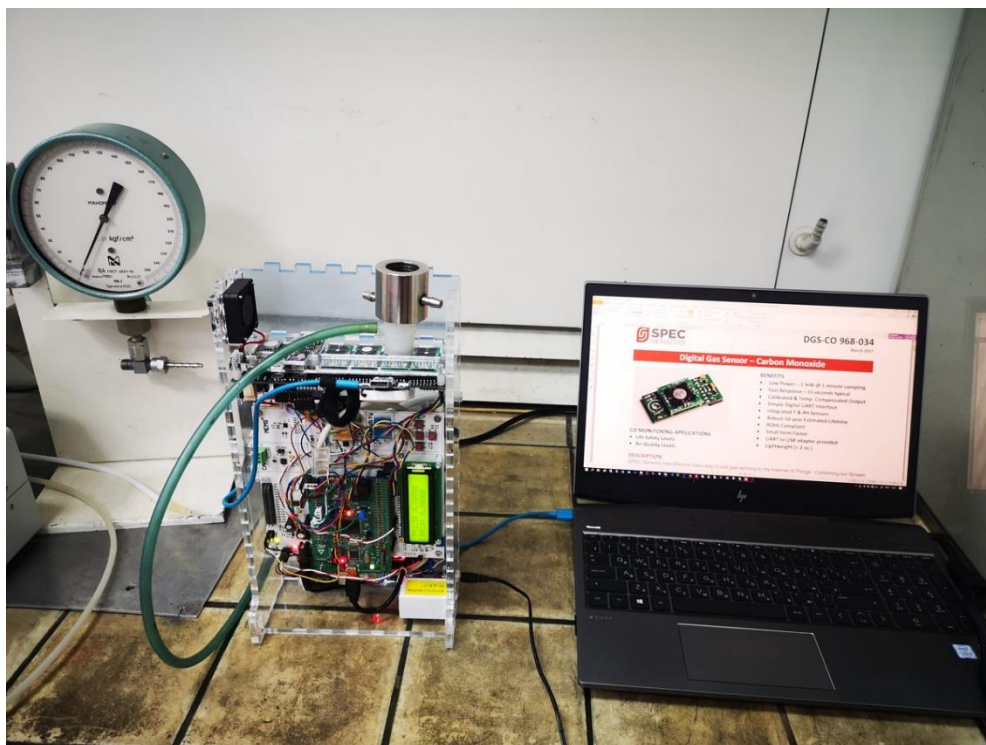


Рис 1.16. Тестування AirC в лабораторії ДП [10]

Остаточне тестування пристрою було проведене фахівцями ДП «Укрметрестандарт» у місті Києві. За результатами перевірки встановлено, що пристрій здатний реагувати на зміну концентрацій певних речовин у межах свого робочого діапазону. Вже на етапі початкової розробки автори проєкту усвідомлювали, що не зможуть досягти абсолютної точності у визначенні концентрацій таких шкідливих речовин, як CO, NO₂, SO₂ та O₃, тому пристрій був здатний забезпечити базову оцінку рівня забрудненості. З метою тестування репрезентативності результатів було здійснено вимірювання показників забруднення повітря на ділянці дороги з високою інтенсивністю руху в умовах затору. Зокрема, було отримано інтегральне значення рівня пилу PM_{2.5} за дві години, яке сягало 18 мг/м³, що значно перевищує допустимі норми та підтверджує актуальність проблеми (рис. 1.17).

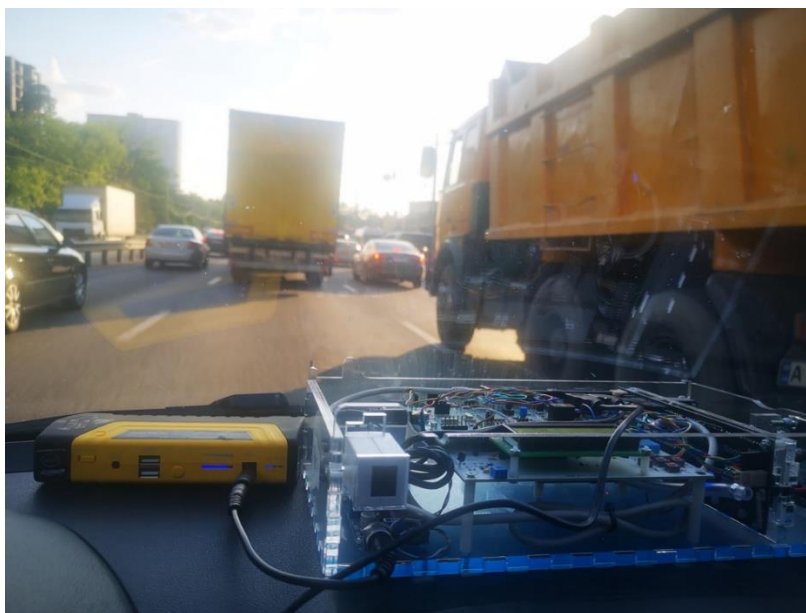


Рис. 1.17. Випробування пристрою в польових умовах [10]

ENVEA Cairnet V3 — є ще одним із прикладів сучасних рішень у сфері моніторингу атмосферного повітря автономна мережева станція, призначена для здійснення моніторингу якості повітря в режимі реального часу. Система включає до шести високочутливих мікросенсорів Cairnsens та забезпечується живленням за допомогою вбудованих сонячних панелей, що дозволяє експлуатувати її в умовах обмеженого доступу до електромережі. Передача даних відбувається через стільниковий зв'язок, що розширює можливості її використання в польових умовах (рис. 1.18) [11].

Завдяки наявності інтегрованого колектора з функцією динамічного відбору проб, станція забезпечує високу точність та надійність вимірювань. Конструктивно пристрій розроблено з урахуванням експлуатації в агресивних атмосферних умовах — усі електронні компоненти є герметичними та захищеними від вологості й впливу зовнішнього середовища.

Cairnet V3 відзначається компактністю, мобільністю та енергонезалежністю, що робить її зручним і економічно доцільним рішенням для довготривалого спостереження за концентрацією газів і твердих частинок у повітрі. Завдяки цим характеристикам станція дозволяє сформувати повну екологічну картину впливу виробничих або урбаністичних процесів на довкілля.

Її використання є доцільним у широкому спектрі галузей, зокрема в промисловості, екологічному моніторингу, транспортній інфраструктурі тощо.

Він пропонує безпрецедентну гнучкість у проведенні точних і динамічних вимірювань якості повітря в широкому діапазоні галузей і застосувань.



Рис. 1.18. Індикативна станція моніторингу атмосферного повітря ENVEA Cairnet V3 [11]

Окрім наземних рішень, важливе значення у сфері моніторингу повітря мають супутникові системи спостереження, які забезпечують доступ до інформації про якість повітря на глобальному рівні. Застосування технологій дистанційного зондування атмосфери дозволяє отримувати комплексні дані про просторово-часові зміни у концентрації забруднювальних речовин, що є особливо актуальним для регіонів із відсутністю або нестачею наземної вимірювальної інфраструктури (рис. 1.19) [12].

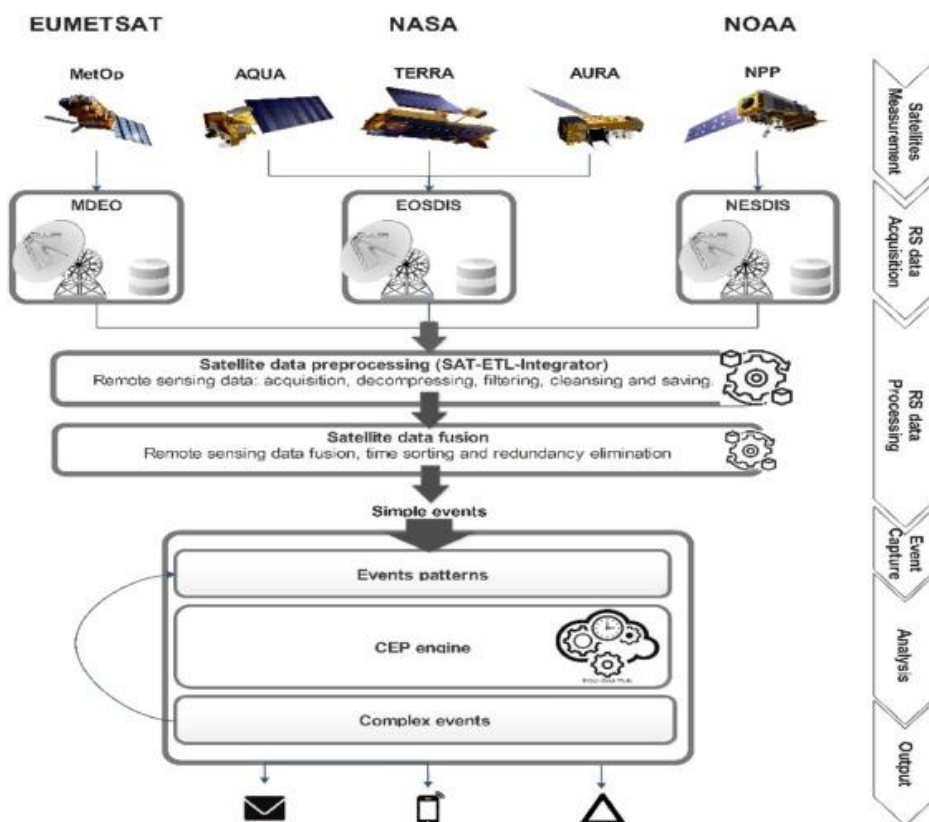


Рис 1.19. Принцип дії супутникових систем [12]

Окрім апаратних засобів моніторингу, важливим напрямом у покращенні стану атмосферного повітря є **розробка та впровадження хімічних замінників шкідливих речовин**, які здатні зменшити негативний вплив на довкілля.

Однією з ключових міжнародних ініціатив у цьому напрямі є **Монреальський протокол**, підписаний у 1987 році з метою поступового припинення використання хлорфторвуглеців (ХФВ), гідрохлорфторвуглеців (ГХФВ) та гідрофторвуглеців (ГФВ), які активно використовувалися як розчинники, пропеленти та холодоагенти. Встановлено, що ці речовини мають високу здатність руйнувати озоновий шар Землі. У зв'язку з цим було започатковано розробку альтернативних сполук, які могли б забезпечити ті ж функції, проте без руйнівного впливу на озоновий шар [13].

Серед таких альтернатив найбільшого поширення набули гідрофторвуглеці (ГФВ) — сполуки, які, на відміну від ХФВ і ГХФВ, не містять атомів хлору. Саме цей елемент, згідно з науковими дослідженнями, є основним чинником руйнування озонового шару. Широке впровадження ГФВ стало одним із

головних досягнень Монреальського протоколу, оскільки дозволило зберегти технологічну функціональність промислових процесів без шкоди для атмосфери.

Проте, незважаючи на їхню відносну екологічність, ГФВ не є абсолютно безпечними. Ці речовини, хоч і не руйнують озонового шару, сприяють глобальному потеплінню, оскільки мають високу парникову активність і тривалий період перебування в атмосфері. Отже, використання ГФВ становить нову екологічну проблему, що потребує подальшого наукового аналізу та розробки безпечніших рішень.



Рис 1.20. Також ГФВ використовується в зовнішніх кондиціонерах, задля зменшення шкідливих викидів з конденсату [13]

У світовій практиці все більше країн усвідомлюють необхідність комплексного підходу до боротьби із забрудненням повітря. Державна підтримка у формі грантів та програм стимулювання дозволяє активніше впроваджувати інноваційні екологічні проєкти, сприяючи розвитку зелених технологій та формуванню свідомого ставлення до охорони навколишнього середовища серед громадськості

2 ПРОЄКТУВАННЯ АПАРАТНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ МЕРЕЖІ ДАТЧИКІВ НА БАЗІ МІКРОКОНТРОЛЕРА ESP

2.1 Технічний огляд мікроконтролерів та датчиків, що застосовуються для моніторингу якості повітря

Мікроконтролери та датчики становлять невід’ємну частину сучасних систем моніторингу якості повітря, оскільки забезпечують збір, обробку та передавання даних про стан атмосфери в режимі реального часу. Особливої популярності набули мікроконтролери, що поєднують у собі низьке енергоспоживання, підтримку бездротових інтерфейсів та достатню обчислювальну потужність, необхідну для обробки екологічних параметрів у рамках IoT-архітектур.

Одним із найбільш поширених рішень є мікроконтролер **ESP8266** (рис. 2.1) [15], розроблений компанією Espresif Systems [14]. Цей пристрій вирізняється інтегрованим Wi-Fi-модулем, що дозволяє встановлювати з’єднання з мережею без необхідності використання додаткового обладнання. Його привабливість обумовлена доступною вартістю, компактними розмірами та достатньою продуктивністю, яку забезпечує 32-бітний процесор Tensilica L106 із тактовою частотою до 160 МГц. Завдяки підтримці основних периферійних інтерфейсів, таких як UART, SPI, I2C, PWM та GPIO, ESP8266 легко інтегрується в різноманітні проєкти. Крім того, мікроконтролер підтримує автономну роботу без потреби у підключенні до зовнішнього керуючого пристрою, а можливість програмування через платформи Arduino IDE, MicroPython чи NodeMCU розширює сферу його застосування.

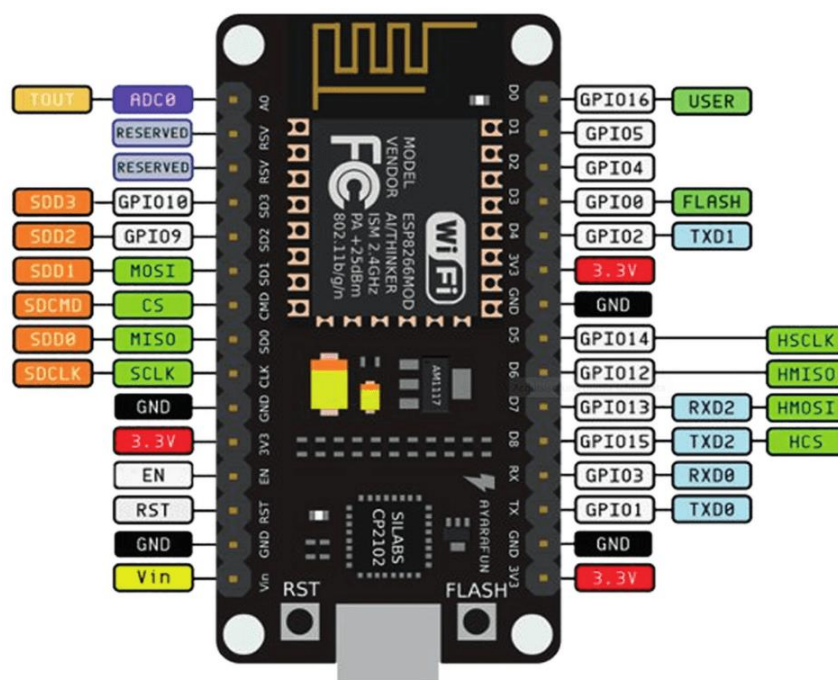


Рис 2.1. Схема модулю ESP8266 [16]

Водночас, пристрій має і певні обмеження. Зокрема, він оснащений відносно невеликою кількістю портів GPIO, не підтримує Bluetooth-з'єднання, має обмежений обсяг оперативної пам'яті (до 80 КБ) та флеш-пам'яті (до 4 МБ), що може створювати труднощі при реалізації більш складних програм. Крім того, ESP8266 характеризується вищим енергоспоживанням у порівнянні з сучаснішими аналогами, обмеженою стабільністю під час роботи з багатозадачними системами та високою чутливістю до перепадів напруги живлення.

Альтернативним і технічно досконалішим рішенням є мікроконтролер **ESP32** (рис 2.2) [17], який також розроблено компанією Espressif Systems. На відміну від попередньої моделі, цей пристрій оснащено не лише покращеним Wi-Fi-модулем, але й підтримкою Bluetooth у двох режимах (у тому числі BLE), що значно розширює його функціональні можливості в контексті IoT-проектів. Високу продуктивність забезпечує двоядерний процесор Tensilica Xtensa LX6 із тактовою частотою до 240 МГц. Обсяг вбудованої пам'яті сягає 520 КБ SRAM та до 16 МБ Flash, що дозволяє обробляти складні обчислення та реалізовувати ресурсоемні завдання. Крім того, ESP32 має понад 30 універсальних портів

введення/виведення, широкий спектр підтримуваних інтерфейсів, включаючи I2C, SPI, UART, PWM, ADC і DAC, а також додаткові сенсори, зокрема температурний датчик і сенсори дотику. Підтримка режимів енергозбереження (Deep Sleep, Light Sleep) робить його ефективним для автономного використання, а програмування можливе як через Arduino IDE і MicroPython, так і за допомогою офіційного SDK – ESP-IDF.

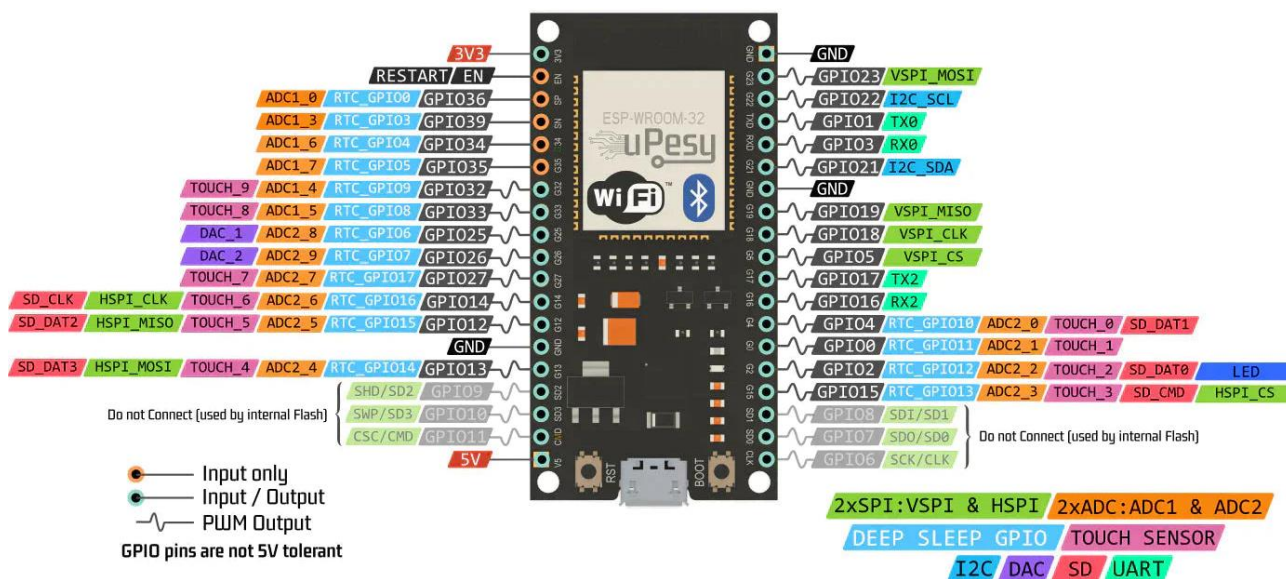


Рис 2.2. Схема модулю ESP32 [18]

Разом з тим, ESP32 є дорожчим рішенням порівняно з ESP8266 і вимагає більш глибоких знань при розробці, особливо при використанні ESP-IDF. Базовий рівень енергоспоживання також є вищим, якщо не активовано енергозберігаючі режими. Додаткові труднощі можуть виникати при розведенні пінів, оскільки частина з них має обмеження при завантаженні прошивки. Варто також враховувати, що не всі бібліотеки, сумісні з ESP8266, можуть бути безпосередньо адаптовані до ESP32, що потребує додаткових модифікацій коду.

У контексті реалізації систем моніторингу якості повітря, вибір між ESP8266 та ESP32 залежить від конкретних вимог до функціональності, стабільності та енергоспоживання. Проте в більшості випадків ESP32 вважається універсальнішим та технологічно досконалішим варіантом.

Щодо сенсорних модулів, які використовуються в системах оцінювання якості повітря, їх вибір залежить від параметрів, які підлягають вимірюванню.

Зокрема, для визначення концентрації зважених частинок $PM_{2.5}$ та PM_{10} застосовуються сенсори PMS5003 і SDS011. Для аналізу складу газів у повітрі ефективним є сенсор MQ-135, здатний виявляти присутність аміаку, бензолу та формальдегіду. Для оцінювання рівня вуглекислого газу доцільно використовувати модулі типу SCD30. Також у таких системах активно застосовуються сенсори температури, вологості та атмосферного тиску, як-от BME280 або DHT22, що дозволяє проводити корекцію показників з урахуванням поточних метеорологічних умов.



Рис. 2.3. Датчик пилу PMS5003 [19]

Серед сенсорів, які використовуються для контролю за якістю повітря, особливу увагу привертає лазерний датчик PMS5003 (рис. 2.3) [18]. Цей сенсор працює за принципом розсіювання лазерного променя, що дає змогу точно вимірювати концентрацію зважених частинок у повітрі, зокрема $PM_{2.5}$ і PM_{10} . Завдяки вбудованому вентилятору здійснюється стабільний забір повітря, що забезпечує безперервне отримання достовірних показників у режимі реального часу. Висока чутливість, малі габарити та низький рівень енергоспоживання роблять цей модуль одним із найпопулярніших рішень для побудови компактних IoT-систем моніторингу навколишнього середовища. Для передачі даних використовується інтерфейс UART, що значно спрощує підключення до сучасних мікроконтролерів, таких як ESP32 або Arduino.

З технічної точки зору, PMS5003 забезпечує вимірювання частинок PM1.0, PM2.5 і PM10 у діапазоні від 0 до 500 мкг/м³ із роздільною здатністю 1 мкг/м³. Час відгуку становить не більше однієї секунди, що дозволяє використовувати його в системах з високими вимогами до оперативності. Живлення датчика здійснюється від джерела 5 В постійного струму, при цьому типове енергоспоживання варіюється в межах 100–200 мА. Діапазон робочих температур становить від -10°C до +60°C, а допустима вологість – від 0 до 99% без конденсації. Заявлений виробником термін служби перевищує 30 000 годин, що робить пристрій придатним для тривалого використання. Розміри модуля становлять 50 × 38 × 21 мм.

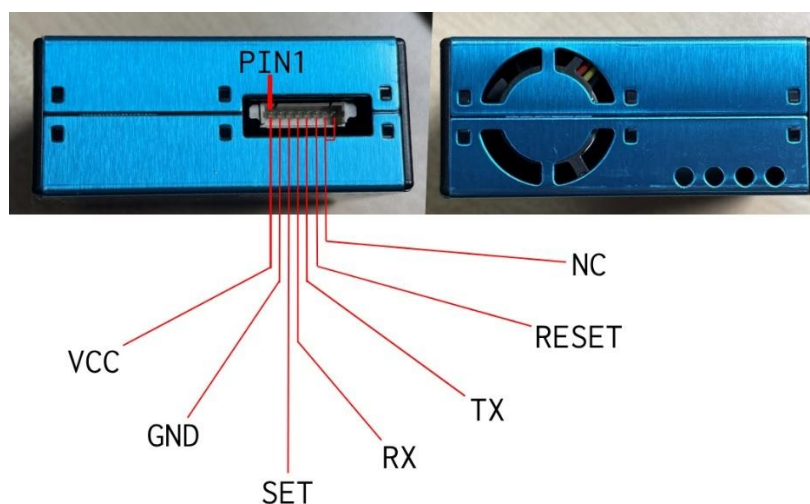


Рис 2.4. Схема датчику пилу PMS5003 [20]

Іншим широко вживаним сенсором для контролю рівня твердих часток у повітрі є SDS011 (рис. 2.5) [21]. За аналогією з PMS5003, він базується на технології лазерного розсіювання світла, що забезпечує високу точність під час визначення рівня забруднення частками PM_{2.5} і PM₁₀. Можливість роботи в реальному часі робить цей сенсор придатним для побудови систем моніторингу з негайним відображенням поточних значень концентрацій забруднювачів.



Рис. 2.5. Датчик пилу SDS011[21]

Датчик SDS011 здатен здійснювати вимірювання у широкому діапазоні – від 0 до 1500 мкг/м³ як для PM_{2.5}, так і для PM₁₀, із аналогічною роздільною здатністю 1 мкг/м³. Передача даних реалізується за допомогою UART-інтерфейсу з підтримкою TTL-рівнів (3.3 В або 5 В) та серійного протоколу, що забезпечує сумісність з більшістю сучасних мікроконтролерів. Живлення подається напругою 5 В постійного струму, при цьому енергоспоживання становить від 100 до 150 мА. Сенсор ефективно працює в температурному діапазоні від -20°C до +50°C і при вологості до 90% без утворення конденсату. Час відгуку коливається від однієї до двох секунд, що забезпечує своєчасне оновлення даних. Мінімальний термін експлуатації пристрою становить 8000 годин. Габаритні розміри сенсора – 73 × 55 × 23 мм, що слід враховувати при розробці корпусів пристроїв.

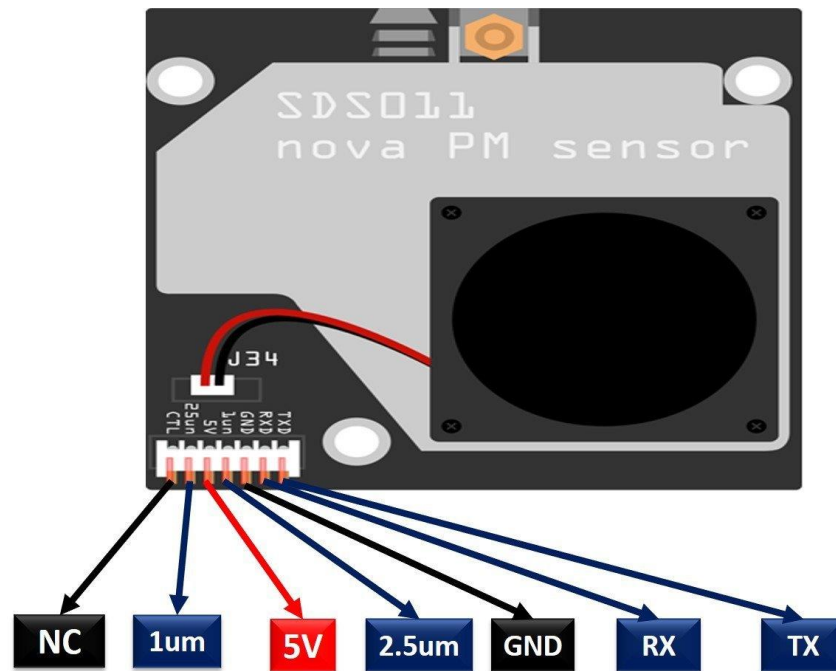


Рис 2.6. Схема датчику SDS011 [21]

До складу системи моніторингу якості повітря також входить датчик MQ-135 (рис. 2.7) [22], який належить до групи напівпровідникових газових сенсорів. Основне його призначення — виявлення широкого спектра шкідливих газів у повітрі, таких як аміак (NH_3), оксиди азоту (NO_x), діоксид сірки (SO_2), бензол (C_6H_6), чадний газ (CO), а також леткі органічні сполуки (VOC). Завдяки цьому MQ-135 є популярним елементом у складі екологічних IoT-рішень, приладів для оцінки забрудненості повітря та побутових систем вентиляції.



Рис. 2.7. Газовий датчик MQ-135 [22]

Сенсор працює на основі зміни провідності металоксидного напівпровідника в присутності газів, що окиснюються або відновлюються. Він живиться від джерела постійного струму 5 В, при цьому споживаний струм сягає приблизно 150 мА. Датчик реагує на концентрації газів у межах 10–1000 ppm, що робить його придатним для побутових та лабораторних застосувань. Проте для забезпечення стабільних показників він потребує тривалого прогріву — не менше 24 годин з моменту першого увімкнення.

MQ-135 має як аналоговий, так і цифровий інтерфейс (при підключенні до додаткового підсилювача), що забезпечує сумісність з такими популярними платформами, як Arduino або ESP32. Його робочий температурний діапазон становить від -10°C до $+50^{\circ}\text{C}$, а час відгуку на зміну концентрації газів — не перевищує 30 секунд.

Серед ключових переваг MQ-135 — висока чутливість до широкого спектра газів, доступність, простота інтеграції та невисока вартість. Водночас він має і низку обмежень: зокрема, відносно низьку вибірковість, що ускладнює точне визначення конкретної речовини, та високу залежність від умов навколишнього середовища — температури та вологості. Отже, сенсор зазвичай використовується для загальної оцінки якості повітря, а для детального аналізу рекомендується його комбінування з іншими, вузькоспеціалізованими газовими модулями.

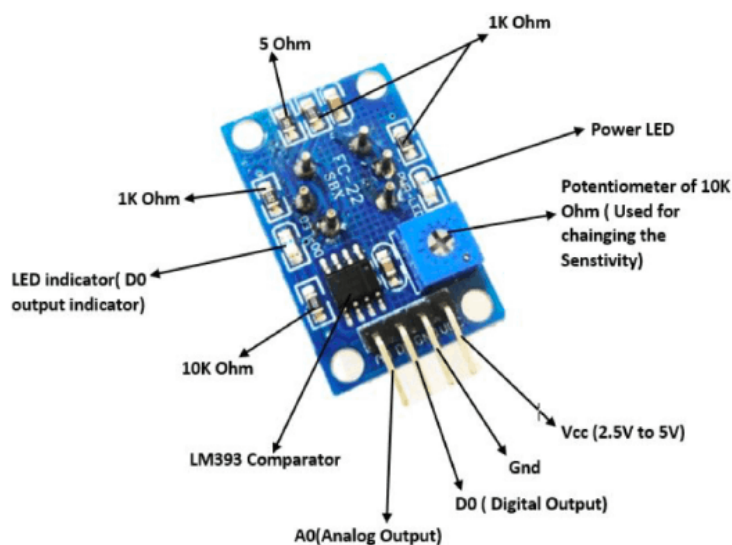


Рис. 2.8. Схема датчику MQ-135 [23]

Датчик SCD-30 (рис. 2.9) [24] є сучасним високоточним сенсором вуглекислого газу (CO_2), який забезпечує вимірювання в реальних одиницях – частинах на мільйон (ppm). На відміну від сенсорів, що лише орієнтовно визначають рівень летких органічних сполук, SCD-30 використовує принцип недисперсійного інфрачервоного поглинання (NDIR), що гарантує високу точність та надійність результатів.

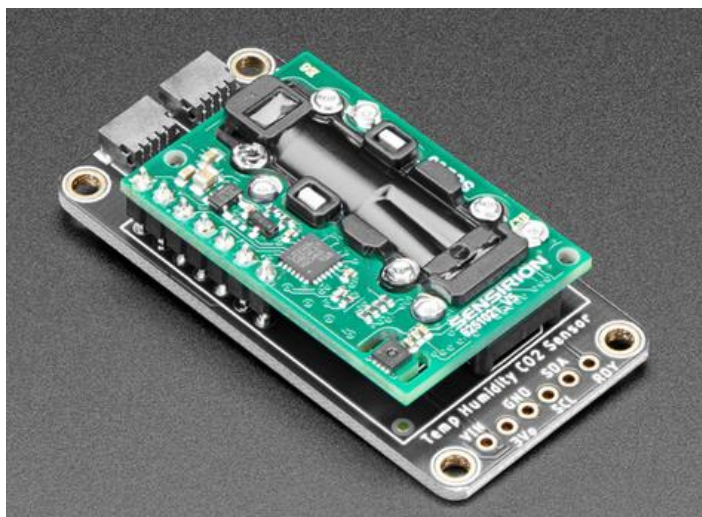


Рис. 2.9. Датчик моніторингу CO_2 SCD-30 [24]

Датчик здатен вимірювати концентрацію CO_2 в діапазоні від 400 до 10 000 ppm із точністю $\pm(30 \text{ ppm} + 3\% \text{ від значення})$, що робить його придатним для застосування в системах екологічного моніторингу, вентиляційних установках, наукових дослідженнях і побутових пристроях. Крім визначення рівня CO_2 , модуль також здійснює супутнє вимірювання температури в межах від -40°C до $+70^\circ\text{C}$ із точністю $\pm 0.8^\circ\text{C}$ та вологості в межах 0–100% відносної вологості з точністю $\pm 3\%$. Живлення пристрою може здійснюватися як від 3.3 В, так і від 5 В постійного струму, а для підключення передбачено підтримку інтерфейсів UART та I²C. Датчик характеризується низьким енергоспоживанням, яке становить приблизно 19 мА в звичайному режимі роботи, а також підтримує функцію автоматичного калібрування, що полегшує його інтеграцію у тривалих проєктах з автономним функціонуванням.

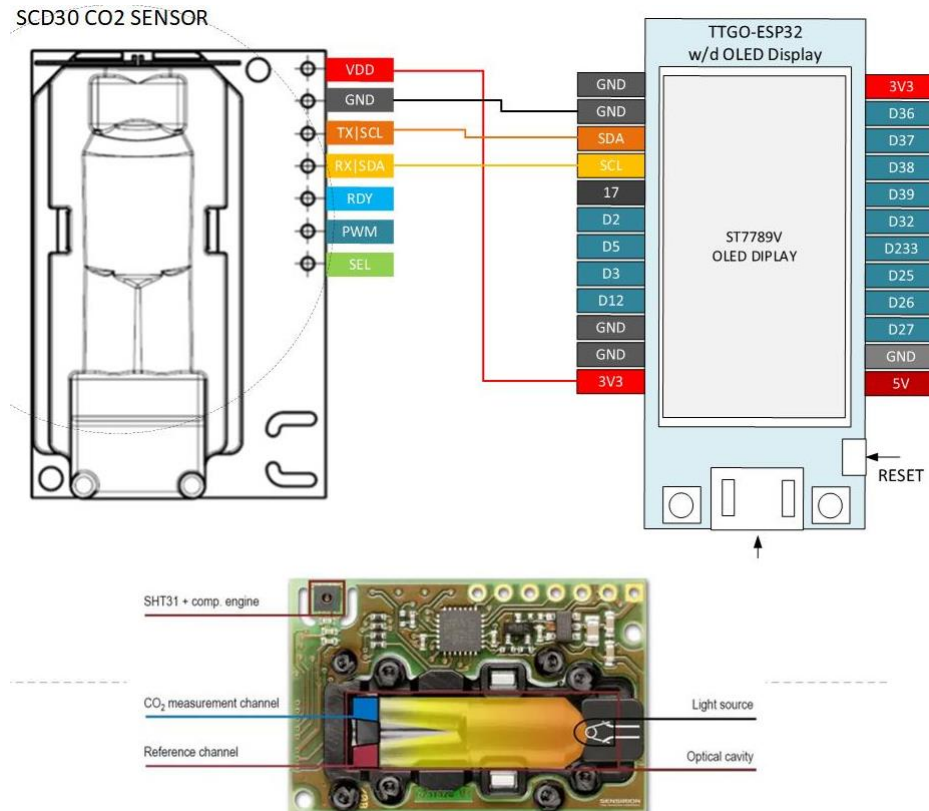


Рис 2.10. Схема датчику моніторингу CO₂ SCD-30 [25]

Ще одним важливим компонентом системи моніторингу повітря є BME280 (рис. 2.11) [26], який забезпечує точне вимірювання атмосферного тиску, вологості та температури навколишнього середовища. Датчик розроблений із урахуванням потреб мобільних і портативних пристроїв, де ключовими є компактність, низьке енергоспоживання та висока стабільність протягом усього терміну експлуатації.

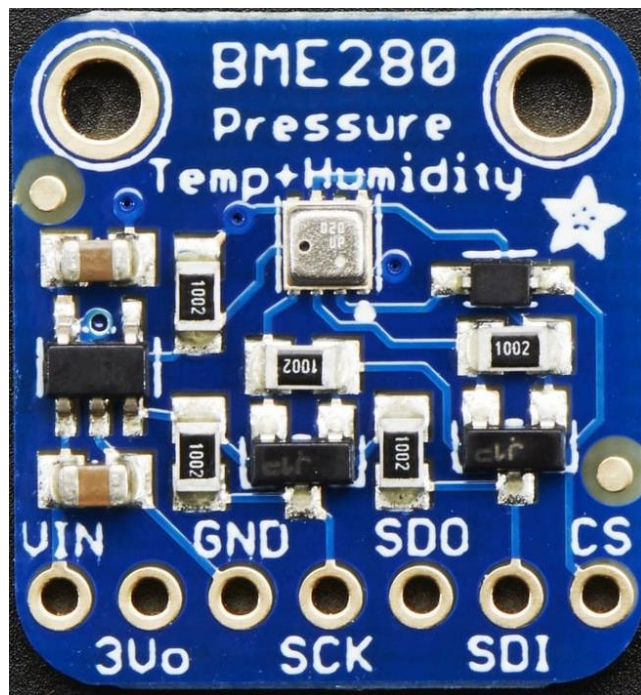


Рис. 2.11. Датчик вологості BME280 [26]

Пристрій демонструє високу лінійність та точність вимірювань, що дозволяє використовувати його в системах екологічного моніторингу, «розумних» будинках та промислових рішеннях. Температура вимірюється в межах від -40°C до $+85^{\circ}\text{C}$ із похибкою не більше $\pm 1.0^{\circ}\text{C}$, а відносна вологість — у діапазоні 0–100% з точністю $\pm 3\%$. Атмосферний тиск визначається в межах від 300 до 1100 гПа з точністю ± 1 гПа. Пристрій живиться від джерела напругою від 1.8 до 3.6 В постійного струму, підтримує інтерфейси I²C та SPI та споживає надзвичайно малу кількість енергії — всього 2.7 мкА в режимі звичайної роботи. Компактні розміри модуля — $2.5 \times 2.5 \times 0.93$ мм — роблять його зручним для інтеграції в системи з обмеженим простором для монтажу.

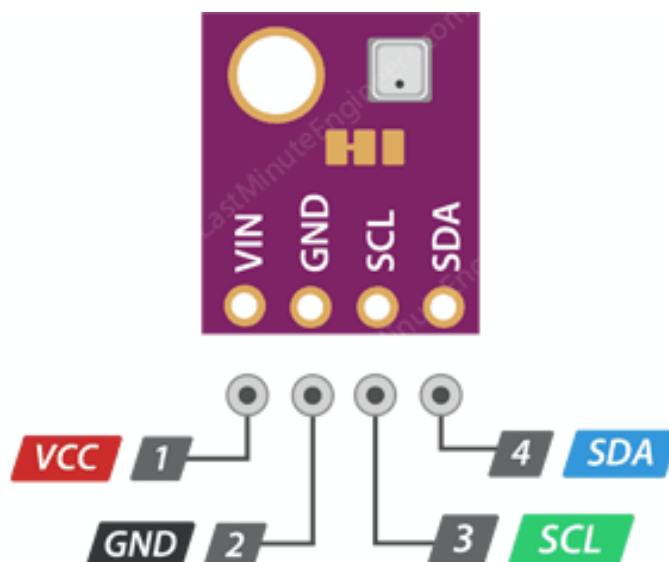


Рис. 2.12. Схема датчику вологості BME280 [27]

У контексті роботи мікроконтролерів, які здійснюють безперервний збір даних, критичною характеристикою виступає енергоефективність, адже більшість сучасних систем передбачає автономне живлення від літєвих акумуляторів або сонячних панелей. Це дозволяє забезпечити безперебійну роботу в умовах відсутності централізованого енергопостачання. Комунікація між мікроконтролерами та сенсорами, як правило, здійснюється через стандартні інтерфейси обміну даними — I²C, UART або SPI — що забезпечує високу гнучкість побудови системи і її масштабованість. Сучасні рішення з бездротової передачі інформації дають змогу створювати системи реального часу, які збирають, передають та аналізують дані про стан повітря, оперативно реагуючи на зміни екологічної ситуації.

Загалом, ефективність функціонування системи моніторингу якості повітря напряму залежить від точності, стабільності та взаємної сумісності обраних технічних компонентів. Використання високочутливих сенсорів, енергоощадних мікроконтролерів та засобів бездротової передачі даних у поєднанні з можливістю автономного живлення дозволяє реалізовувати розподілені системи тривалого спостереження за якістю повітря в умовах міського середовища та промислових зон.

2.2 Мережеві протоколи передачі даних для забезпечення зв'язку між компонентами моніторингової системи

Продуктивність обміну даними між компонентами моніторингової в системі якості повітря є одним з важливих факторів її працездатності та надійності. Оскільки система складається з великої кількості сенсорних вузлів, що збирають інформацію в режимі реального часу, важливу роль відіграє вибір відповідного мережевого протоколу для передачі даних.

Протоколи зв'язку забезпечують безперебійну взаємодію між датчиками, мікроконтролерами, шлюзами та хмарними сервісами. Серед найпоширеніших рішень для таких систем використовуються **Wi-Fi, Bluetooth, LoRa, Zigbee та MQTT**. Кожен з них має своє призначення та обмеження, що визначають їх застосування залежно від вимог до дальності зв'язку, енергоспоживання та стабільності передачі даних. Даваймо детальніше розглянемо дані протоколи.

LoRa (Long Range) [28] - це протокол бездротової модуляції, заснований на технології Chirp Spread Spectrum (CSS). Вона кодує інформацію на радіохвилях за допомогою імпульсів щебетання - подібно до того, як спілкуються дельфіни та кажани! Передача з модуляцією LoRa є стійкою до перешкод і може прийматися на великих відстанях. Зазвичай використовується для міських систем моніторингу. Протокол деально підходить для додатків, які передають невеликі фрагменти даних з низькою швидкістю передачі. Дані можуть передаватися на більшу відстань у порівнянні з такими технологіями, як Wi-Fi, Bluetooth або ZigBee. Ці особливості роблять LoRa придатним для датчиків і приводів, які працюють в режимі низького енергоспоживання.

Він може працювати в безліцензійних субгігагерцових діапазонах, наприклад, 915 МГц, 868 МГц і 433 МГц. Варто підмітити, що протокол також може працювати на частоті 2,4 ГГц для досягнення вищої швидкості передачі даних порівняно з субгігагерцовими діапазонами, але за рахунок збільшення радіусу дії. Ці частоти належать до частотних діапазонів (ISM - industrial, scientific and medical), які зарезервовані на міжнародному рівні для промислових, наукових і медичних цілей.

LoRa має свою покращену версію, яка іменується **LoRaWAN**. **LoRaWAN** - це протокол рівня керування доступом до середовища (MAC), побудований на основі модуляції **LoRa** та випущений в січні 2015 року. Це програмний рівень, який визначає, як пристрої використовують обладнання протоколу **LoRa**, наприклад, коли вони передають, і формат повідомлень.

LoRaWAN підходить для передачі невеликих за розміром корисних навантажень (наприклад, даних з датчиків) на великі відстані. Модуляція **LoRa** забезпечує значно більшу дальність зв'язку при низькій пропускній здатності, ніж інші конкуруючі технології бездротової передачі даних. На наступному малюнку показані деякі технології доступу, які можна використовувати для бездротової передачі даних, і їх очікувані дальності передачі в залежності від пропускної здатності (рис. 2.13) [28].

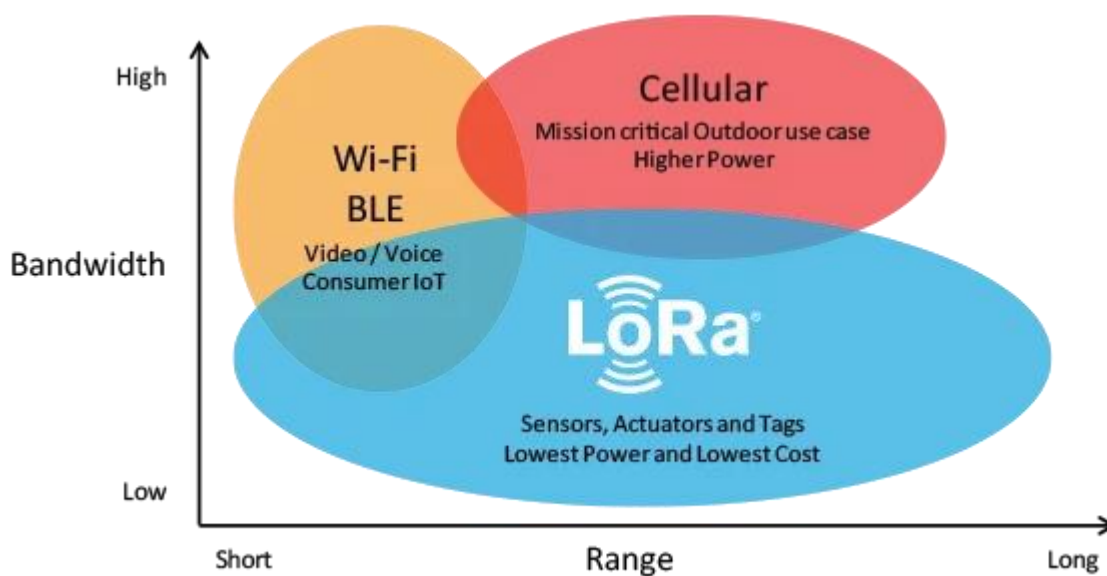


Рис. 2.13. Порівняння протоколу LoRa з іншими видами зв'язку [28]

ZigBee [29] — бездротовий стандарт для набору високорівневих протоколів зв'язку, що використовують невеликі, малопотужні цифрові приймачі, заснований за стандартом IEEE 802.15.4-2006 для бездротових персональних мереж, таких як, наприклад, бездротові навушники, що з'єднані з мобільними телефонами за допомогою радіохвиль короткохвильового діапазону. Технологія визначається специфікацією ZigBee, яка розроблена з метою бути простішою та

дешевшою, ніж інші персональні мережі, такі як Bluetooth. ZigBee призначений для мобільних пристроїв, де необхідна тривала робота від батарей і безпечність передачі даних у мережі (рис. 2.14). Модуль працює у діапазоні 2,4 ГГц, підтримує малопотужні пристрої та дозволяє створювати розгалужені мережі за технологією mesh.



Рис. 2.14. Модуль ZigBee [29]

Протоколи ZigBee розроблені для використання у вбудованих додатках, що вимагають низьку швидкість передачі даних і низьке енергоспоживання. Мета ZigBee — це створення недорогої мережі, що самоорганізується, з комірчастою топологією та призначеної для вирішення широкого кола завдань. Мережа може використовуватися в промисловому контролі, вбудованих датчиках, зборі медичних даних, сповіщенні про вторгнення або задимлення, будівельної та домашньої автоматизації та ін. Створена мережа споживає дуже мало енергії — індивідуальні пристрої згідно з даними сертифікації ZigBee дозволяють електробатарейам працювати два роки.

NB-IoT (Narrowband Internet of things) [30] - це стандарт радіотехнології малопотужної широкосмугової мережі (LPWAN), розроблений 3GPP для пристроїв і послуг стільникового зв'язку. Специфікація була заморожена в 13-й версії 3GPP (LTE Advanced Pro), в червні 2016 року. Інші технології 3GPP IoT включають eMTC (вдосконалений зв'язок машинного типу) і EC-GSM-IoT [2.14].

NB-IoT фокусується на покритті всередині приміщень, низькій вартості, тривалому часі автономної роботи і високій щільності з'єднань. NB-IoT використовує підмножину стандарту LTE, але обмежує пропускну здатність однією вузькою смугою в 200 кГц. Він використовує модуляцію OFDM для низхідного зв'язку і SC-FDMA для висхідного зв'язку. Для додатків Інтернету речей, які потребують більш частого зв'язку, краще підійде LTE-M, який не має обмежень на робочий цикл і працює в ліцензованому спектрі.



Рис 2.15. Сфери роботи протоколу NB-IoT [31]

MQTT (Message Queue Telemetry Transport) [32] - спрощений мережевий протокол, що працює на TCP/IP. Він розроблений як надзвичайно легкий транспорт повідомлень для публікації/підписки, який ідеально підходить для підключення віддалених пристроїв з невеликим кодом і мінімальною пропускну здатністю мережі. Сьогодні MQTT використовується в широкому спектрі галузей, таких як автомобільна промисловість, виробництво, телекомунікації, нафта і газ тощо.

Багато пристроїв Інтернету речей підключаються через ненадійні стільникові мережі. Підтримка MQTT постійних сесій скорочує час на відновлення з'єднання клієнта з брокером (рис 2.16).

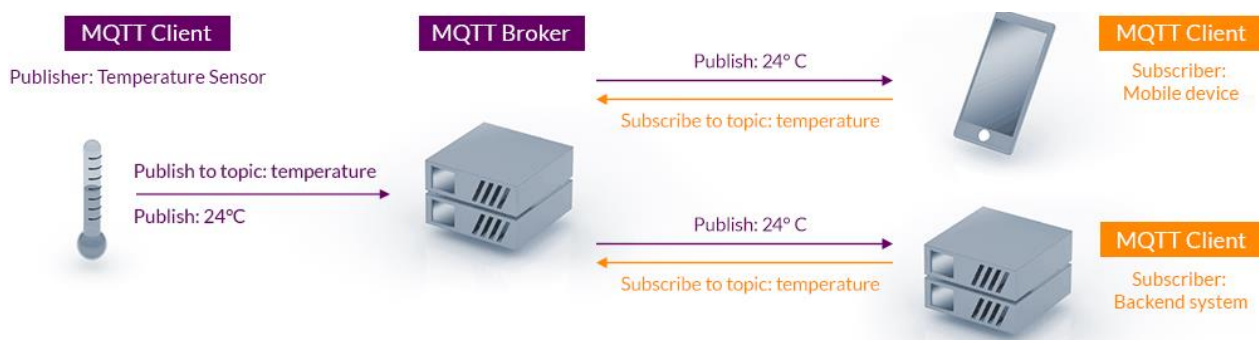


Рис. 2.16. Принцип роботи MQTT на прикладі датчика температури [32]

Wi-Fi (Wireless Fidelity) [33] — це сімейство бездротових мережевих протоколів, заснованих на сімействі стандартів IEEE 802.11, які широко використовуються для локального об'єднання пристроїв і доступу до Інтернету, дозволяючи розташованим поблизу цифровим пристроям обмінюватися даними за допомогою радіохвиль (рис. 2.17). Це найпоширеніші комп'ютерні мережі, які використовуються в усьому світі в домашніх і малих офісних мережах для об'єднання пристроїв і забезпечення доступу до Інтернету за допомогою бездротових маршрутизаторів і бездротових точок доступу в громадських місцях, таких як кав'ярні, ресторани, готелі, бібліотеки та аеропорти.

Wi-Fi є торговою маркою Wi-Fi Alliance, яка обмежує використання терміну «Wi-Fi Certified» продуктами, що успішно пройшли сертифікаційне тестування на сумісність. Невідповідне обладнання просто називають WLAN, і воно може працювати або не працювати з «Wi-Fi Certified» пристроями.

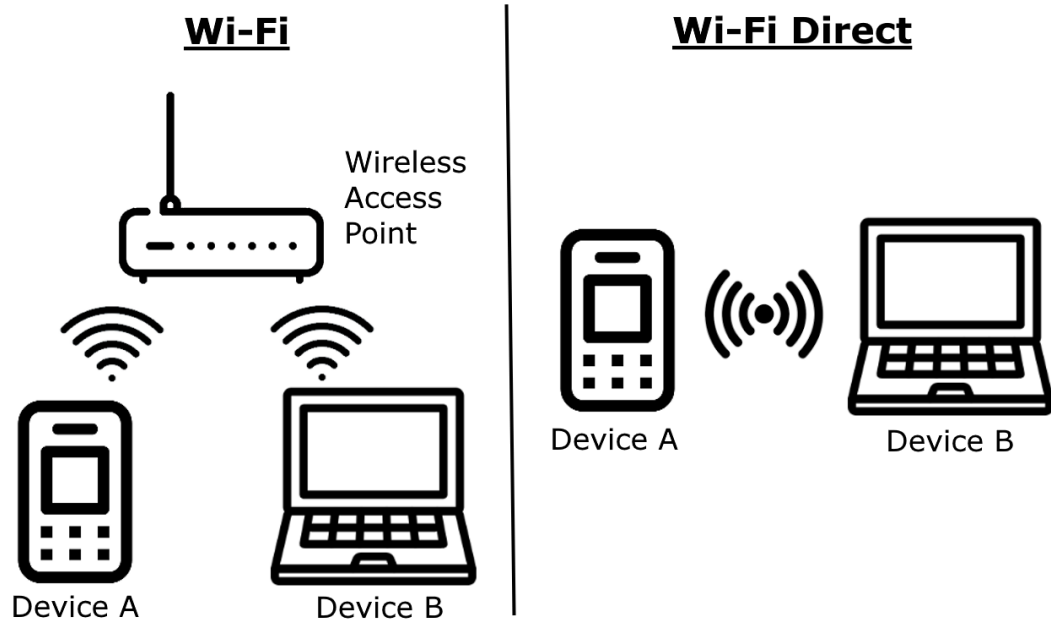


Рис 2.17. Принцип роботи Wi-Fi [33]

Bluetooth [34] - це стандарт бездротового зв'язку малого радіусу дії, який використовується для обміну даними між стаціонарними та мобільними пристроями на невеликих відстанях і побудови персональних мереж (PAN). У найбільш поширеному режимі потужність передачі обмежена 2,5 міліватами, що забезпечує дуже малий радіус дії - до 10 метрів (33 футів). Він використовує надвисокочастотні радіохвилі в діапазонах ISM, від 2,402 ГГц до 2,48 ГГц (рис. 2.18).

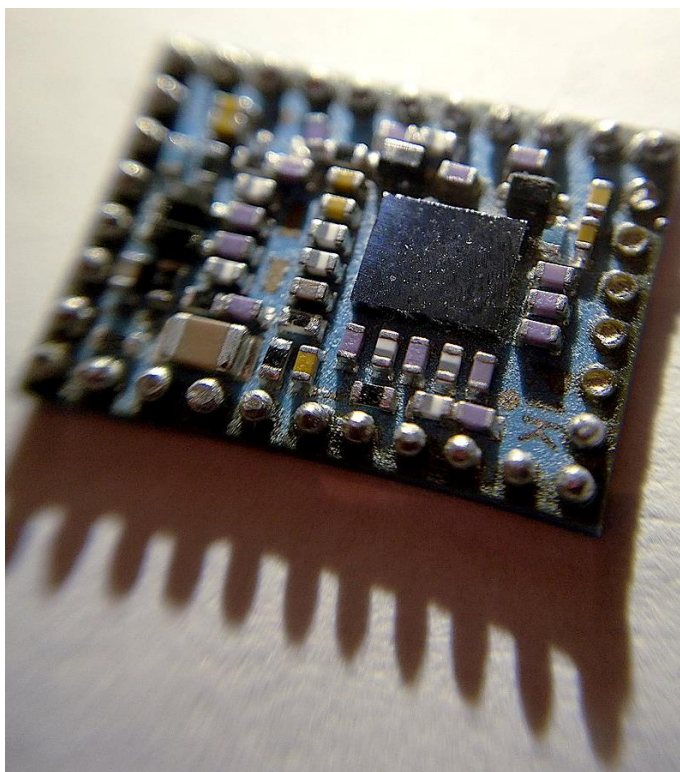


Рис. 2.18. Bluetooth-модуль виробництва Ericsson зразка 2001 року [35]

В основному, використовується, як альтернатива дротовому з'єднанню для обміну файлами між розташованими поруч підключеними портативними пристроями, на кшталт мобільних телефонів, музичних плеєрів, бездротових навушників, бездротових колонок, Hi-Fi пристроїв, автомобільних аудіосистем, а також для бездротових передач даних між телевізорами і саундбарами.

2.3 Особливості взаємодії компонентів мережі та корпус

На рисунку 2.19 представлено апаратну реалізацію прототипу системи моніторингу якості повітря, призначеної для функціонування в умовах міського середовища. Основу конструкції складає плата Arduino UNO, яка виступає центральним елементом управління та збору даних з підключених сенсорів і периферійних пристроїв. Усі компоненти змонтовані на макетній платі, що забезпечує гнучкість у модифікації схеми та спрощує тестування. Конструкція передбачає використання корпусу прямокутної форми із вентиляційними отворами в нижній частині, які забезпечують вільний доступ повітря до сенсорів. Розміщення елементів усередині корпусу має важливе значення для зниження

впливу теплових і електромагнітних перешкод, що критично для досягнення високої точності вимірювань.

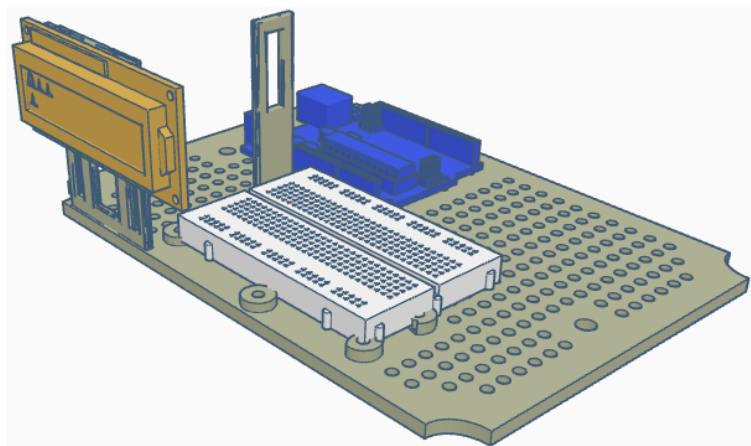


Рис. 2.19. 3D-модель корпусу автоматизованої системи з компонентами [36]

Для виведення даних про стан навколишнього повітря використовується рідкокристалічний дисплей (LCD), що закріплений на боковій частині корпусу і підключений до мікроконтролера через цифрові порти. Інформація, яку відображає дисплей, містить поточні значення показників якості повітря, отримані в результаті аналізу даних з сенсора MQ-135. Цей газовий датчик відповідає за знаходження забруднення повітря, зокрема визначає концентрації шкідливих газів, таких як аміак, діоксид вуглецю, бензол, дим та інші леткі речовини. У разі перевищення порогових значень забруднення активується п'єзодинамік, який функціонує як звуковий індикатор тривоги. Крім того, система містить набір із чотирьох світлодіодів, що виконують роль візуальної сигналізації рівня якості повітря: кожен світлодіод відповідає певному діапазону концентрації газів, надаючи користувачу швидкий зворотний зв'язок.

Передача зібраної інформації здійснюється за допомогою бездротового інтерфейсу на основі протоколу Bluetooth, що дозволяє забезпечити зв'язок між пристроєм та мобільним додатком або комп'ютерною системою для подальшого аналізу. Вибір даного мережевого протоколу обумовлений його широкою підтримкою, низьким енергоспоживанням та зручністю в реалізації для короткодіапазонної передачі даних.

Загальна структурна схема апаратного забезпечення включає такі компоненти: мікроконтролер Arduino UNO, газовий датчик MQ-135, п'єзодинамік, рідкокристалічний дисплей, чотири світлодіоди для індикації рівня забруднення, макетну плату для підключення компонентів та модуль бездротового зв'язку на базі Bluetooth. Всі елементи взаємодіють між собою за допомогою цифрових або аналогових портів мікроконтролера, що забезпечує централізовану обробку даних у реальному часі. Структурна організація системи дозволяє легко адаптувати її до конкретних умов використання та масштабувати для ширшого охоплення параметрів моніторингу (рис 2.19).

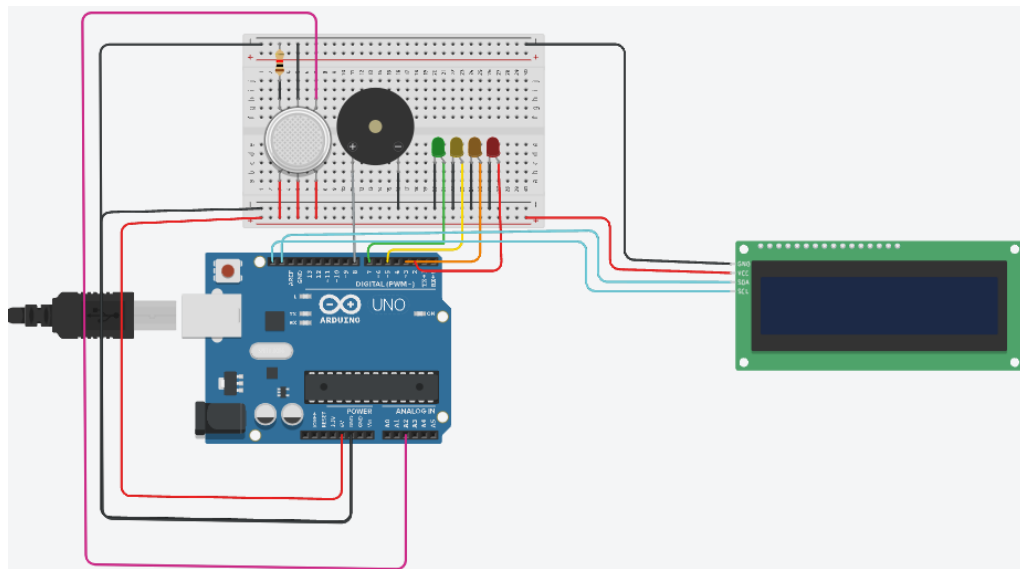


Рис. 2.20. Схема системи автономної мережі датчиків для відстеження якості повітря в місті [36]

Підсумовуючи, представлена система є ефективним, енергоощадним рішенням для автономного збору та обробки даних про якість повітря в міських умовах. Вона поєднує простоту апаратної реалізації з високим рівнем функціональності завдяки використанню сучасних сенсорів, інтерфейсів зв'язку та засобів виводу інформації.

3 ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ МЕРЕЖІ МОНІТОРИНГУ НА БАЗІ МІКРОКОНТРОЛЕРА ESP

3.1 Налаштування середовища розробки та огляд інструментів

Для розробки програмного забезпечення було обрано середовище Arduino IDE. Це інтегроване середовище розробки є кросплатформенним додатком з вихідним кодом, завдяки якому створюються прості механізми для компіляції і завантаження програм на плату Arduino в один клік. Також він містить область повідомлень, текстову консоль, панель інструментів з кнопками для загальних функцій та ієрархію операційних меню [37] (рис. 3.1).

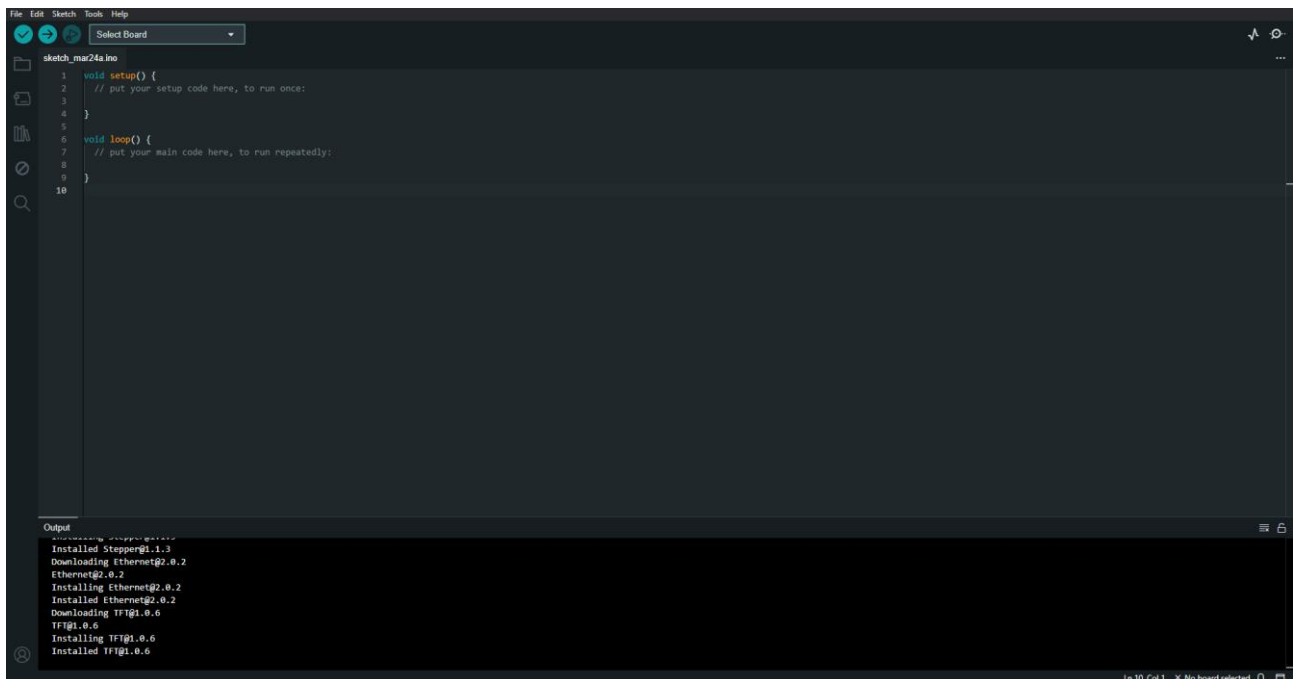


Рис. 3.1. Інтерфейс середовища розробки Arduino IDE

Ентузіасти для ESP8266 створили додаткові інструменти для даного застосунку, за допомогою якого можна легко запрограмувати плату з використанням мови C++.

Щоб середовище розпізнавало плату ESP8266, необхідно в налаштуваннях (рис. 3.2) ввести посилання з забезпеченням «http://arduino.esp8266.com/stable/package_esp8266com_index.json» в поле «Додаткові URL-адреси менеджера плат»

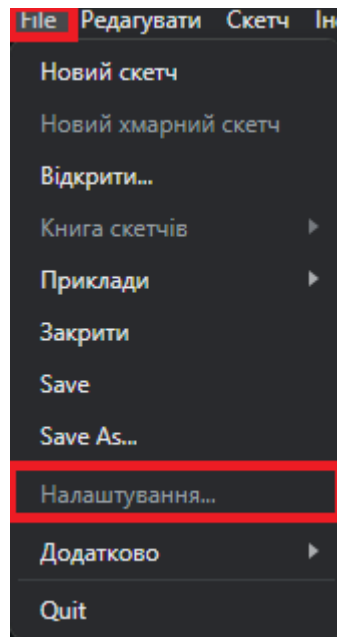


Рис. 3.2. Випадне меню з налаштуванням

Після натискання кнопки "Налаштування", користувача зустрічає меню з налагодженням шляху зберігання скетчів, розмір шрифту редактора, колір інтерфейсу самої програми, мови середовища, перевірки коду після завантаження та додаткові посилання для менеджера плат (рис. 3.3).

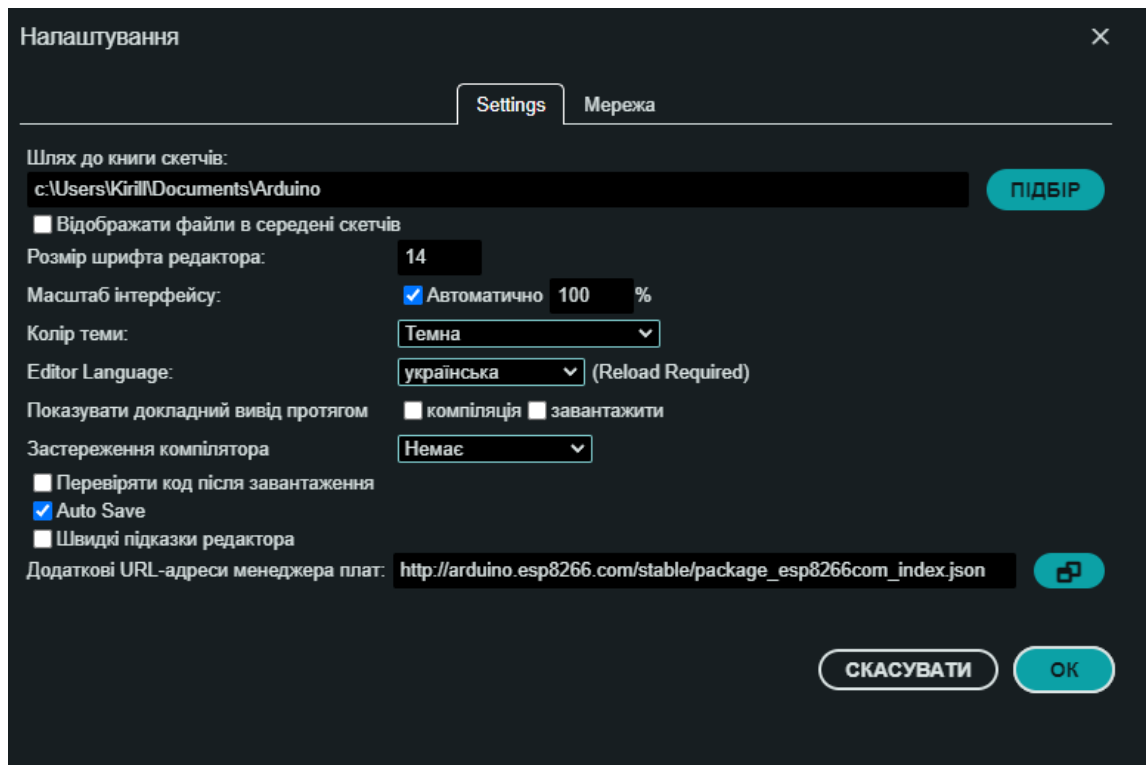


Рис. 3.3. Додавання JSON-інструкцій до менеджера плат

Потім, необхідно обрати в налаштуваннях меню «Менеджер плат»
Необхідно у верхній панелі обрати випадне меню "Інструменти", потім обрати
варіант відповіді "Плата" (рис. 3.4).

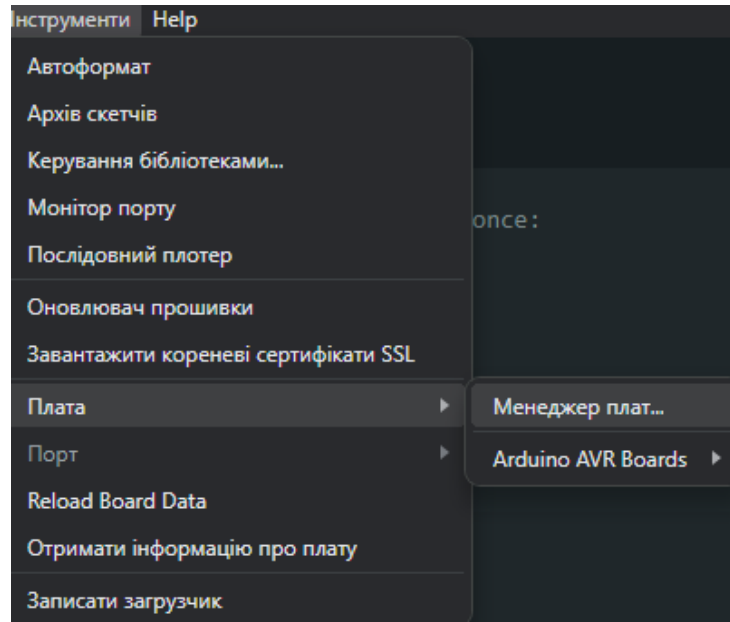


Рис. 3.4. Шлях до меню «Менеджер плат»

Та встановити бібліотеку для розпізнавання плати «ESP8266 by ESP8266 Community» (рис. 3.5).

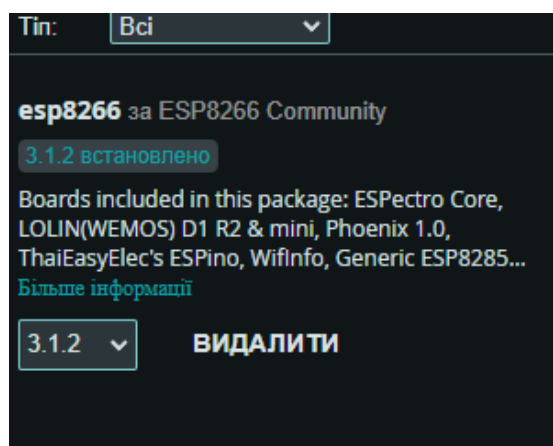


Рис. 3.5. Інсталювана бібліотека «ESP8266 by ESP8266 Community» версії
3.1.2

Як середовище стало адаптованим під мікроконтролер, налагоджується робочий простір. Для цього, потрібно обрати плату з меню «Менеджер плат» (рис. 3.6).

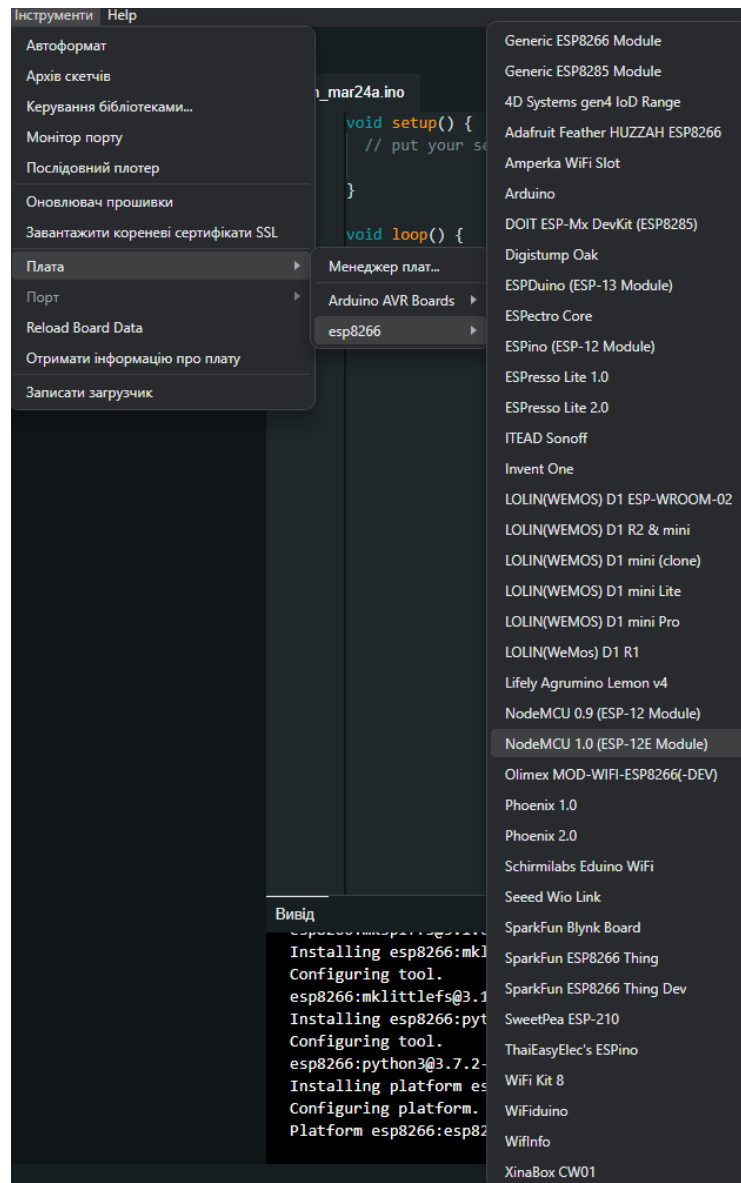


Рис. 3.6. Вибір плати з меню «Менеджер плат»

Далі, потрібно обрати порт комп'ютера, до якого була підключена плата для взаємодії з середовищем (рис. 3.7).

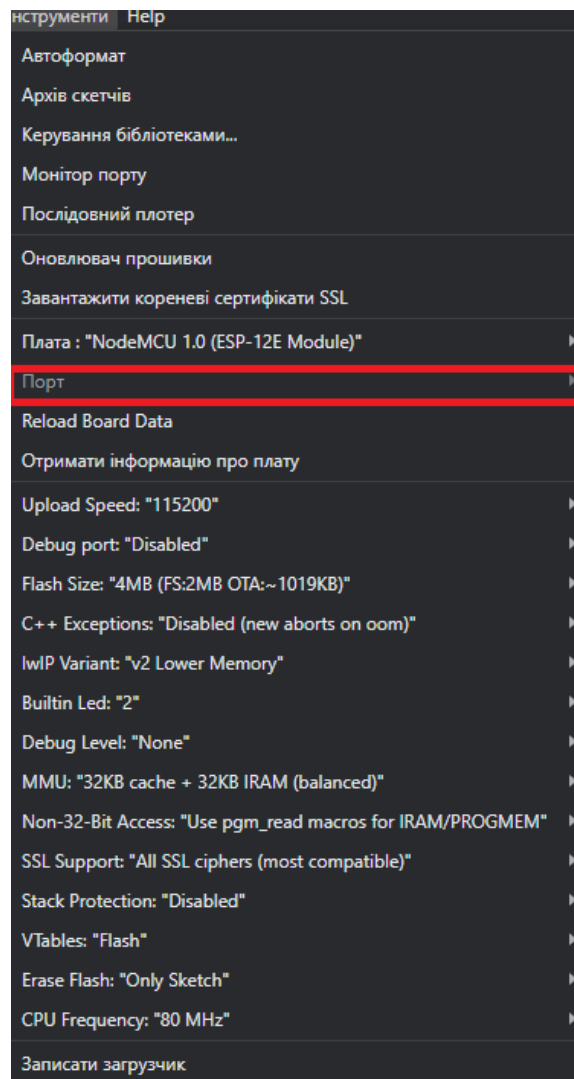


Рис. 3.7. Вибір потрібного порту до комп'ютеру

Після виконаних вище дій, середовище розробки Arduino IDE готове до роботи з модулем NodeMCU, заснований на мікроконтролері ESP8266. Також, воно здатне читати плату та прошивати її — завантажувати до пам'яті плати код, написаний мовою C++.

У процесі налагодження проєкту також застосовувалося віртуальне середовище Tinkercad [35], розроблене компанією Autodesk (рис 3.8). Tinkercad є онлайн-симулятором електроніки, що дозволяє створювати, перевіряти та моделювати прості електронні схеми без використання реального обладнання.

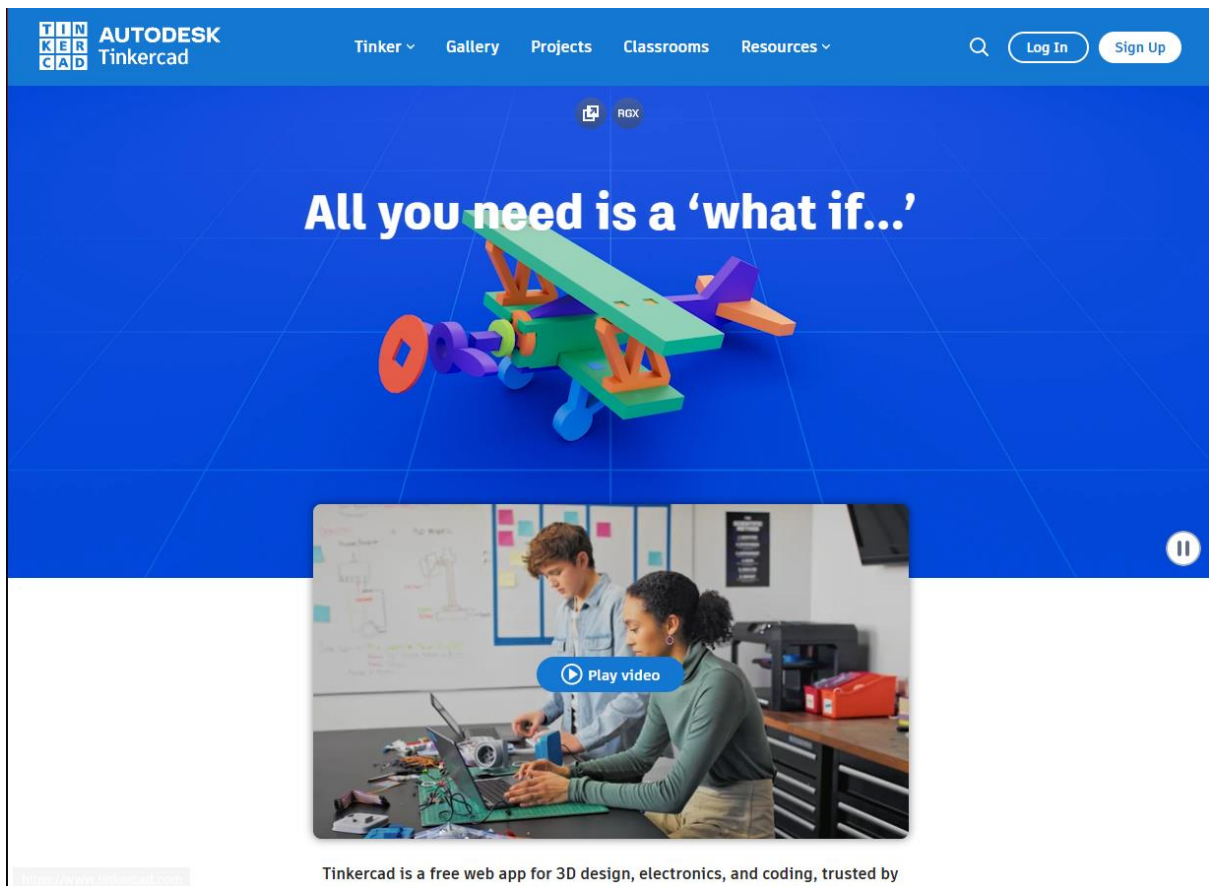


Рис. 3.8. Головна сторінка сайту-емулятора Autodesk Tinkercad [35]

Середовище підтримує віртуальну роботу з мікроконтролерами Arduino, включаючи можливість написання й симуляції коду на мові C++. Завдяки зручному графічному інтерфейсу користувачі можуть додавати компоненти (резистори, світлодіоди, датчики, тощо), з'єднувати їх провідниками та перевіряти логіку роботи пристрою у режимі реального часу. Це особливо корисно на початковому етапі проєктування, коли потрібно швидко протестувати концепцію без ризику пошкодження фізичних компонентів.

Крім того, Tinkercad активно використовується в освітньому процесі для навчання основ електроніки та програмування.

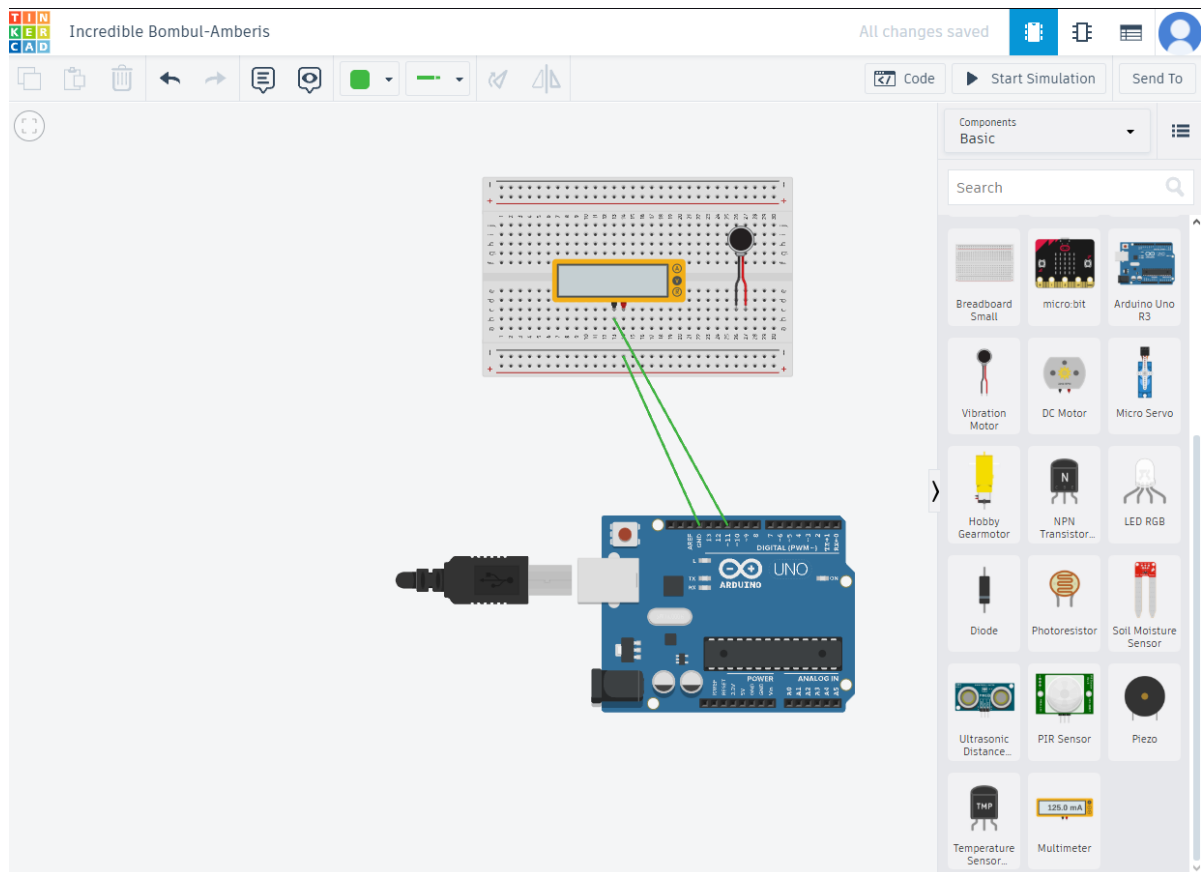


Рис. 3.9. Інтерфейс середовища емулятора Tinkercad

На рисунку 3.9 представлено інтерфейс онлайн-середовища моделювання Tinkercad, в якому здійснюється збірка електронної схеми будь-якої складності на базі плати Arduino Uno R3. Схема демонструє базові принципи з'єднання компонентів, включаючи передавання сигналів з виводів мікроконтролера до макетної плати. У правій частині інтерфейсу відображено бібліотеку доступних електронних компонентів, які можна перетягувати до робочої області.

Середовище Tinkercad дозволяє запускати симуляцію електронної схеми без використання фізичних елементів, що суттєво полегшує етап тестування та початкового налагодження проєкту. Користувач має змогу писати програмний код безпосередньо у вбудованому редакторі (кнопка "Code"), запускати віртуальну симуляцію роботи схеми (кнопка "Start Simulation") та вносити зміни в конструкцію шляхом інтерактивної взаємодії з компонентами. Також користувач має можливість поділитися своїм проєктом з іншими однодумцями (кнопка "Send

To"). Це робить Tinkercad потужним навчальним інструментом для ознайомлення з основами мікроконтролерної техніки та електроніки в інтерактивному форматі.

C++ — мова програмування загального призначення, розроблена данським програмістом Б'ярні Страуструпом на основі мови C в 1983 році. Підтримує більшість парадигм програмування: об'єктно-орієнтованої, узагальненої, процедурної тощо [37]. Наразі, мова широко використовується для розробки програмного забезпечення, будучи однією з найпопулярніших мов програмування. Завдяки її універсальності, створюють операційні системи, різноманітні прикладні програми, драйвери пристроїв, ігри тощо [38].

Серед особливостей, варто виділити:

- Сумісність з мовою C;
- Підтримка об'єктно-орієнтованого програмування через класи;
- Підтримка узагальненого програмування через шаблони;
- Доповнення до стандартної бібліотеки;
- Додаткові типи даних;
- Обробка винятків;
- Простори імен;
- Вбудовані функції;
- Перевантаження операторів;
- Перевантаження імен функцій;
- Посилання і оператори управління вільно розподіленою пам'яттю.

Основний синтаксис мови C++ подібний до інших мов у стилі C, таких як C, C# та Java, наприклад;

- Крапка з комою використовується для позначення кінця вислову;
- Фігурні дужки використовуються для групування операторів. Оператори зазвичай групуються в методи (функції), методи – на класи, а класи – на простори імен;
- Змінні призначаються за допомогою знаку рівності, але порівнюються за допомогою двох послідовних знаків рівності;

- Квадратні дужки використовуються з масивами як для їх оголошення, так і для отримання значення за заданим індексом в одному з них.

3.2 Алгоритм роботи та основні функції програм

Функціонування розробленої IoT-системи автономного моніторингу якості повітря в міських умовах ґрунтується на послідовному виконанні формалізованого алгоритму, що забезпечує узгоджену роботу апаратних і програмних модулів. Основною метою цього алгоритму є безперервне збирання, попередня обробка, локальне збереження екологічних параметрів довкілля, а також негайне інформування користувача про виявлені перевищення допустимих рівнів забруднення.

Алгоритм реалізує концепцію структурованого підходу до програмної логіки, де кожен етап виконується відповідно до чітко визначених умов. До ключових вимог, які пред'являються до алгоритму функціонування системи, належать:

- Закінченість — кожен обчислювальний цикл має завершуватись за скінченний інтервал часу;
- Структурованість — усі інструкції повинні мати однозначне тлумачення і бути логічно пов'язаними;
- Ефективність — алгоритм має гарантувати досягнення поставлених цілей у реальних умовах автономної експлуатації пристрою.

Загальна структура алгоритму передбачає реалізацію таких етапів:

1. Ініціалізація апаратних засобів.

На початковому етапі виконання програми здійснюється автоматизована ініціалізація мікроконтролера та сенсорних модулів (PMS5003, MQ-135, BME280, SCD-30). У разі виявлення апаратних помилок формується відповідне повідомлення, яке виводиться на рідкокристалічний дисплей або зберігається у внутрішній пам'яті пристрою.

2. Перевірка працездатності сенсорів.

Система виконує перевірку відповідності всіх підключених сенсорів. У разі

відсутності відповіді хоча б від одного з модулів, система переходить у режим очікування або ініціює аварійне завершення з відповідним попередженням користувача.

3. Збирання екологічних показників.

У разі успішної ініціалізації здійснюється зчитування значень концентрації CO₂, PM_{2.5}, температури, вологості та летких органічних сполук (TVOC).

4. Попередня обробка даних.

Зібрані дані проходять базову фільтрацію, калібрування та нормалізацію. Це дозволяє виключити вплив аномальних значень, зменшити похибки та покращити достовірність подальшого аналізу.

5. Виведення результатів на дисплей.

Скориговані значення виводяться на LCD-дисплей у реальному часі. Окрім цифрових значень, подається текстовий опис стану повітря, що класифікується відповідно до рівнів забруднення.

6. Індикація стану та оповіщення.

Для зручності візуального сприйняття передбачено світлову індикацію через світлодіоди відповідних кольорів, а також звукове оповіщення (зумер) при виявленні критичних значень забруднення.

7. Формування та збереження даних.

Дані структуруються у форматі JSON і зберігаються у внутрішній пам'яті пристрою. Такий підхід дозволяє виконати подальший аналіз або передачу даних у разі наявності мережевого з'єднання, без втрати результатів.

8. Аналіз порогових значень.

Після кожного зчитування система порівнює отримані значення з встановленими нормативами. У разі виявлення перевищення — ініціюється відповідна процедура індикації та оповіщення.

9. Перехід у режим енергозбереження.

Після завершення основного циклу пристрій переходить у режим низького енергоспоживання до настання наступного інтервалу збору даних, що дозволяє оптимізувати автономність роботи.



Рис. 3.10. Алгоритм роботи IoT-системи

На рисунку 3.10 представлено блок-схему реалізації зазначеного алгоритму з урахуванням етапів обробки помилок, логіки збереження даних та оповіщення користувача.

Наведений нижче програмний код реалізує алгоритм зчитування та індикації рівня забруднення повітря на базі мікроконтролера Arduino з використанням аналогового датчика якості повітря, рідкокристалічного дисплея (LCD) з інтерфейсом I²C, світлодіодних індикаторів та звукового сигналізатора (зумера). Основна мета програми — визначення рівня забруднення повітря за

шкалою AQI-подібного формату, з подальшим відображенням результатів та попередженням користувача.

```
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
```

Рис. 3.11. Включення бібліотеки LiquidCrystal_I2C

Для роботи з дисплеєм застосовується бібліотека LiquidCrystal_I2C, яка надає зручний інтерфейс для взаємодії з рідкокристалічними екранами по шині I²C. Включення бібліотеки здійснюється за допомогою директиви #include, яка дозволяє підключити сторонні бібліотеки для розширення функціональності програми. Вона надає доступ до великої групи стандартних бібліотек C (груп готових функцій), а також бібліотек, написаних спеціально для Arduino.

Ініціалізація дисплея здійснюється шляхом створення об'єкта lcd класу LiquidCrystal_I2C, як показано на рисунку 3.12:

```
LiquidCrystal_I2C lcd(32, 16, 2);
```

Рис. 3.12. Ініціалізація об'єкта lcd класу LiquidCrystal_I2C

Даний рядок є оголошенням об'єкта lcd класу LiquidCrystal_I2C, який використовується для керування LCD-дисплеєм із підтримкою інтерфейсу I²C. Даний рядок потребує детальнішого технічного розгляду, оскільки задає конфігурацію підключення дисплея до мікроконтролера.

LiquidCrystal_I2C — це клас, визначений у відповідній бібліотеці, що інкапсулює методи для роботи з LCD-дисплеями, підключеними через шину I²C. Він дозволяє виконувати ініціалізацію дисплея, керування підсвіткою, очищення екрана, позиціонування курсора та вивід символів.

lcd — це ім'я об'єкта класу, який створюється. Через цей об'єкт будуть викликатися функції, що керують дисплеєм, наприклад: lcd.begin(), lcd.print(), lcd.setCursor() тощо.

32 — це адреса пристрою на шині I²C у десятковому форматі (еквівалент 0x20 у шістнадцятковій системі). Для середовища програмування плат Arduino,

ця адреса є типовою, однак у фізичних пристроях зазвичай використовується інша адреса, зокрема 0x27 або 0x3F, яка відповідає стандартним модулю I²C на базі мікросхем PCF8574 або PCF8574A. Якщо адреса вказана неправильно, зв'язок із дисплеєм не буде встановлено.

16 — це кількість стовпців (символів у рядку) дисплея. У даному випадку йдеться про дисплей типу 16x2, тобто 16 символів у рядку.

2 — кількість рядків дисплея. Разом із попереднім параметром вказується, що використовується LCD із конфігурацією 16x2 (два рядки по 16 символів).

Такий підхід забезпечує мінімізацію навантаження на виводи мікроконтролера та спрощує апаратне з'єднання завдяки дволінійному інтерфейсу (SCL і SDA).

На подальших рисунках буде розглянуто повну реалізацію програмного модуля системи, включаючи обробку аналогових сигналів, логіку визначення рівня забруднення, керування індикацією та формування структури збережених даних.

```
void setup() {  
  pinMode(2, OUTPUT); // Red  
  pinMode(3, OUTPUT); // Orange  
  pinMode(5, OUTPUT); // Yellow  
  pinMode(7, OUTPUT); // Green  
  pinMode(8, OUTPUT); // Buzzer  
  
  lcd.init();  
  lcd.begin(16, 2);  
  lcd.backlight();  
  lcd.clear();  
  
  Serial.begin(9600);  
}
```

Рис 3.13. Функція void setup()

На рисунку 3.13 представлено функцію setup(), яка виконується одноразово після подачі живлення або перезавантаження мікроконтролера. На цьому етапі відбувається початкова конфігурація апаратних ресурсів, необхідна для коректного функціонування системи. Зокрема, встановлюється режим роботи цифрових виводів 2, 3, 5, 7 та 8 як вихідні (OUTPUT) для подальшого керування світлодіодами та звуковим сигналізатором (зумером). Далі ініціалізується об'єкт

рідкокристалічного дисплея за допомогою методу `lcd.init()`, після чого задаються його параметри через `lcd.begin(16, 2)`, вмикається підсвітка (`lcd.backlight()`) та виконується очищення екрана командою `lcd.clear()`.

Крім того, на цьому етапі ініціалізується UART-інтерфейс для серійного обміну даними зі швидкістю 9600 біт в секунду (`Serial.begin(9600)`). Цей механізм використовується для виведення діагностичної інформації в монітор порту середовища розробки, що забезпечує зручний контроль процесу виконання програми під час налагодження та експлуатації.

```
void loop() {
  int air_qual = analogRead(A2);
  Serial.println(air_qual);

  // Масштабування значення в межах 0-500 (AQI-подібна шкала)
  air_qual = map(air_qual, 93, 715, 0, 500);

  lcd.setCursor(0, 0);

  // Скидання стану
  digitalWrite(2, LOW);
  digitalWrite(3, LOW);
  digitalWrite(5, LOW);
  digitalWrite(7, LOW);
  digitalWrite(8, LOW);

  if (air_qual <= 50) {
    digitalWrite(7, HIGH); // Green
    lcd.clear();
    lcd.print("GOOD");
  } else if (air_qual > 50 && air_qual <= 100) {
    digitalWrite(5, HIGH); // Yellow
    lcd.clear();
    lcd.print("MODERATE");
  } else if (air_qual > 100 && air_qual <= 150) {
    digitalWrite(3, HIGH); // Orange
    lcd.clear();
    lcd.print("UNHEALTHY");
  } else {
    digitalWrite(2, HIGH); // Red
    digitalWrite(8, HIGH); // Buzzer
    lcd.clear();
    lcd.print("VERY UNHEALTHY");
  }

  lcd.setCursor(2, 1);
  lcd.print("AQI: ");
  lcd.print(air_qual);

  delay(1500);
}
```

Рис. 3.14 Функція `void loop()`

На рисунку 3.14 проілюстровано циклічну функцію `loop()`. Вона спочатку зчитується аналоговий сигнал з входу A2, до якого підключений сенсор якості повітря. Значення записується у змінну `air_qual` типу `int`, після чого виводиться у послідовний порт для моніторингу в режимі реального часу.

Отримане аналогове значення масштабується до діапазону від 0 до 500 за допомогою функції `map()`. Така трансформація забезпечує відповідність шкалі, аналогічній індексу якості повітря (AQI), де вищі значення вказують на погіршення стану навколишнього середовища.

Після цього курсор дисплея встановлюється на початок першого рядка. Усі світлодіоди та зумер вимикаються методом `digitalWrite(..., LOW)` для забезпечення коректної індикації поточного стану повітря без накладень від попередніх циклів.

Виконується умовний блок, який реалізує логіку оцінки якості повітря за чотирма рівнями:

- GOOD (добрий стан) — активується зелений світлодіод (вивід 7);
- MODERATE (помірне забруднення) — жовтий світлодіод (вивід 5);
- UNHEALTHY (нездоровий стан) — помаранчевий світлодіод (вивід 3);
- VERY UNHEALTHY (високий рівень небезпеки) — червоний світлодіод (вивід 2) та зумер (вивід 8).

У кожному з перелічених випадків дисплей попередньо очищується (`lcd.clear()`), після чого виводиться текстове повідомлення, що відображає відповідну якість повітря, зрозумілу для користувача. На другому рядку дисплея (позиція курсора — другий символ першого рядка) додатково виводиться числове значення індексу AQI, що дозволяє оперативно оцінити поточну екологічну ситуацію.

Завершується кожен цикл затримкою тривалістю 1500 мс (`delay(1500)`), яка виконує функцію демпфування частоти оновлення індикації та стабілізації вимірювань, що особливо актуально в умовах варіативного середовища.

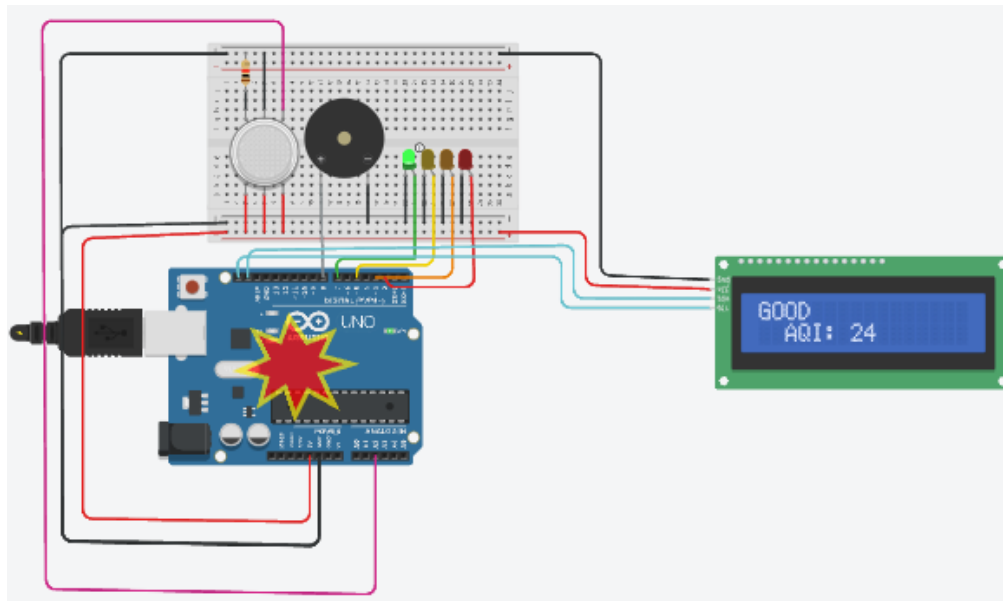


Рис. 3.15. Емуляція роботи системи

На рисунку 3.15 наведено результати емуляції функціонування розробленої системи моніторингу якості повітря. У межах віртуального середовища всі апаратні та програмні компоненти взаємодіють згідно із закладеним алгоритмом, забезпечуючи коректне виконання функціональних завдань. Вихідні дані аналізу параметрів довкілля виводяться в режимі реального часу на рідкокристалічний дисплей, що свідчить про успішну інтеграцію сенсорного модуля, індикаторів візуального та звукового оповіщення, а також логіки обробки даних мікроконтролером. Результати демонструють відповідність реалізованої архітектури заявленим вимогам і підтверджують її ефективність у контексті локального екологічного моніторингу.

Загальна структура системи побудована на основі модульного принципу, згідно з яким кожен функціональний елемент виконує чітко визначену роль: зчитування сенсорних даних, первинну обробку інформації, класифікацію рівня забруднення повітря та індикацію результатів. Така організація підвищує гнучкість, масштабованість і енергоефективність запропонованого рішення, що робить його придатним для застосування в автономних середовищах із обмеженими ресурсами в межах концепції Інтернету речей.

3.3 Особливості та прогнози впровадження системи у місто

Розроблена IoT-система моніторингу якості повітря орієнтована на інтеграцію в інфраструктуру міського простору з метою оперативного виявлення та фіксації екологічних загроз. Завдяки своїй конструктивній простоті, енергоефективності та автономності вона може функціонувати незалежно від централізованої енергетичної або мережевої інфраструктури, що є особливо важливим у районах із обмеженим доступом до ресурсів.

Основними перевагами впровадження системи є оперативність сповіщення населення про перевищення допустимих рівнів забруднення повітря, наявність локальної індикації поточного стану середовища, а також технічна адаптивність до умов розміщення. Модульний принцип побудови дозволяє масштабувати систему залежно від потреб конкретного району — наприклад, встановлення в зоні транспортного вузла, поблизу промислових підприємств або навчальних закладів. Пристрій здатен зчитувати та локально обробляти показники якості повітря, формуючи індекс забруднення, який відображається на дисплеї у вигляді текстової інтерпретації разом із числовим значенням. У разі виявлення критичного рівня індексу система активує світлову або звукову сигналізацію, що дозволяє забезпечити миттєве інформування користувача.

Для забезпечення ефективного впровадження в міське середовище необхідно врахувати низку організаційно-технічних чинників. Передусім, доцільно проводити попередній аналіз територій для визначення зон пріоритетного розміщення пристроїв. При розгортанні системи слід враховувати локальні мікрокліматичні умови, розу вітрів та щільність забудови, що впливає на розповсюдження шкідливих речовин. Живлення пристроїв може здійснюватися як від мережі, так і від альтернативних джерел, зокрема сонячних батарей, що забезпечить енергонезалежність та зменшить вартість експлуатації. Регулярне технічне обслуговування сенсорів, включаючи калібрування та очищення від забруднень, дозволить підтримувати стабільну точність вимірювань упродовж тривалого часу.

Збереження екологічних даних може реалізовуватися як у вигляді локального накопичення на SD-носіях, так і через подальше розширення системи до рівня централізованого збору інформації за допомогою міських дата-центрів. Таке рішення відкриває можливості для формування статистичних звітів, побудови графіків та картографічної візуалізації рівнів забруднення повітря в динаміці. У перспективі можлива розробка додатків для мобільних пристроїв або інтеграція з вже існуючими міськими інформаційними платформами для оперативного інформування громадян. У разі реалізації цього підходу система не лише здійснюватиме моніторинг, але й сприятиме підвищенню екологічної обізнаності населення, що є одним із ключових елементів сталого розвитку.

Очікується, що в середньостроковій перспективі впровадження системи дозволить сформувати базову екологічну інфраструктуру міста, здатну виявляти потенційно небезпечні концентрації забруднювачів до моменту їх критичного накопичення. Відповідно, муніципальні органи отримають інструмент для прийняття обґрунтованих рішень у сфері охорони довкілля, а громадяни — надійне джерело інформації щодо якості повітря у місці свого проживання чи перебування.

Враховуючи відкриту архітектуру пристрою та можливість гнучкого налаштування його параметрів, запропонована система може стати основою для створення розгалуженої мережі екологічного моніторингу з урахуванням особливостей конкретного урбаністичного середовища.

ВИСНОВКИ

Проблема постійного забруднення повітря у великих містах набула глобального характеру і потребує невідкладного вирішення як на рівні місцевих громад, так і з боку органів муніципального управління. З урахуванням сучасних тенденцій у сфері екологічної безпеки, перспективним інструментом покращення якості повітря є впровадження IoT-систем, здатних оперативно виявляти перевищення допустимих концентрацій шкідливих речовин, здійснювати прогнозування ризиків та ініціювати своєчасне реагування на потенційні загрози.

На тлі зростаючого попиту на системи екологічного моніторингу, автономна сенсорна платформа на основі мікроконтролера ESP є ефективним, доступним і масштабованим рішенням. Вона дозволяє збирати дані з широкого спектра сенсорів — для вимірювання концентрацій газів, пилу, температури та вологості. Серед ключових переваг подібних систем слід відзначити енергоефективність, простоту обслуговування, можливість автономної роботи на основі акумуляторів або альтернативних джерел живлення, підтримку модулів зв'язку для розширення функціональності, локальну обробку даних, а також гнучке налаштування виведення інформації на дисплей або у хмарне середовище.

У межах виконання дипломної роботи було розроблено автономну систему моніторингу якості повітря, що функціонує на базі мікроконтролера ESP та є складовою частиною розподіленої IoT-мережі. Основна мета розробки полягає у створенні технічного засобу для контролю атмосферного повітря в урбанізованих зонах, де рівень забруднення зростає внаслідок інтенсивної діяльності транспорту, промислових підприємств та побутових джерел.

На основі аналізу наявних технічних рішень було сформульовано перелік функціональних та апаратних вимог до системи, підібрано відповідні компоненти: мікроконтролер ESP32, сенсор твердих часток PMS5003, газовий датчик MQ-135, комбінований сенсор температури й вологості BME280 та

сенсор вуглекислого газу SCD-30. Як засоби передачі даних обрано бездротові протоколи Wi-Fi та MQTT. Проведено порівняльний аналіз конструктивних рішень та визначено оптимальне розміщення компонентів з метою забезпечення точності вимірювань та стабільної роботи пристрою.

Корпус пристрою виконано з пластику, що забезпечує базовий рівень захисту від впливу зовнішніх чинників. Для забезпечення доступу повітря до сенсорів передбачено систему вентиляційних отворів. Розроблено алгоритм роботи пристрою, який включає періодичне зчитування параметрів, попередню обробку даних та їх передачу на сервер або мобільний додаток.

У результаті реалізації проєкту створено фундамент для розробки масштабованої системи екологічного моніторингу, яка може бути адаптована до різних умов експлуатації, розширена додатковими модулями і інтегрована до концепції «розумного міста». Подальші дослідження передбачають вдосконалення енергоефективності системи, реалізацію автономного живлення, застосування методів машинного навчання для прогнозування рівня забруднення, а також створення єдиної платформи для візуалізації, збору та аналізу екологічних даних.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Drishti IAS Coaching in Delhi, Best UPSC Website For IAS Test Series & Study Material [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: https://www.drishtiiias.com/daily-updates/daily-news-analysis/world-air-quality-report-2023/print_manually.
2. Рейтинг найчистіших міст у світі. [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.village.com.ua/village/city/city-news/349121-kiyiv-vdruge-pospil-uviyshov-u-top-30-stolits-svitu-za-yakistyu-atmosfernogo-povitrya>.
3. How does Air Pollution affect Human Health? [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.clarity.io/blog/deep-dive-health-impacts-of-air-pollution>.
4. Метеопост - Що таке PM2.5 та PM10? [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: <https://meteopost.com/info/PM/>.
5. Від "Євро-0" до "Євро-6": які стандарти викидів авто діють в Україні. [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.rbc.ua/rus/news/vid-evro-0-evro-6-ki-standarti-vikidiv-avto-1715631306.html>.
6. Technical Solution for a Real-Time Air Quality Monitoring System. [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: https://www.researchgate.net/publication/342012604_Technical_Solution_for_a_Real-Time_Air_Quality_Monitoring_System.
7. Air Fresh Max Environment OS - пристрій вимірювання якості повітря. [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: <https://beegreen.com.ua/air-fresh-max-eos-prystriy-vymiryvannya-povitria-17825>.
8. Ajax LifeQuality is a smart air quality monitor. [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: <https://ajax.systems/products/lifequality/>.

9. Розумний датчик повітря Xiaomi Qingping Air Detector. [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: <https://homehub.com.ua/uk/datchiki-temperaturi/xiaomi-qingping-air-detector-lite-cgdn1-uk.html>.
10. Як ми створили AirC – пристрій для моніторингу якості повітря на дорогах в реальному часі. [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: <https://dou.ua/forums/topic/35107/>.
11. Індикативна станція моніторингу атмосферного повітря ENVEA Cairnet V3. [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: <https://shop.hlr.ua/ua/indikativnaya-stanciya-monitoringa-atmosfernogo-vozdusha-envea-cairnet-v3-237258.html>.
12. SAT-CEP-Monitor architecture. [Електронний ресурс]. – 2021. – Режим доступу до ресурсу: https://www.researchgate.net/figure/SAT-CEP-Monitor-architecture_fig1_355196965.
13. Air Pollution Solutions: 6 Pieces of Technology That Are Clearing Our Skies. [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: <https://learn.kaiterra.com/en/air-academy/air-pollution-solutions-technology>.
14. Espressif Systems. Official Site. [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.espressif.com>.
15. ESP8266 - Wikipedia. [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: <https://en.wikipedia.org/wiki/ESP8266>.
16. How to create a remote control system of two LEDs with ESP8266, Arduino Cloud and PlatformIO - Techrm. [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.techrm.com/how-to-create-a-remote-control-system-of-two-leds-with-esp8266arduino-cloud-and-platformio/>.
17. ESP32 - Wikipedia. [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: <https://en.wikipedia.org/wiki/ESP32>.
18. ESP32 Pinout: How use GPIO pins ?. [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.upesy.com/blogs/tutorials/esp32-pinout-reference-gpio-pins-ultimate-guide>.

19. Plantower PMS 5003. [Электронный ресурс]. – Режим доступа до ресурсу: <https://aqicn.org/sensor/pms5003-7003/>.

20. Learn How Particulate Sensor Works and How to Control the PMS5003 Sensor using Arduino - Software Particles. [Электронный ресурс]. – Режим доступа до ресурсу: <https://softwareparticles.com/learn-how-particulate-sensor-works-and-how-to-control-the-pms5003-sensor-using-arduino/>.

21. Nova PM SDS011 Dust Particle Sensor for Air Quality Measurement. [Электронный ресурс]. – Режим доступа до ресурсу: <https://microcontrollerslab.com/nova-pm-sds011-dust-sensor-pinout-working-interfacing-datasheet/>.

22. MQ-135 Gas Sensor - WAVESHARE WIKI. [Электронный ресурс]. – Режим доступа до ресурсу: https://www.waveshare.com/wiki/MQ-135_Gas_Sensor.

23. Gas Sensor MQ135. [Электронный ресурс]. – Режим доступа до ресурсу: <https://robo.com.cy/products/mq135-gas-sensor>.

24. Adafruit SCD30 - NDIR CO2 Temperature and Humidity Sensor. [Электронный ресурс]. – Режим доступа до ресурсу: <https://learn.adafruit.com/adafruit-scd30/overview>.

25. Sensirion SCD30 carbon dioxide sensor wiring schematics guide. [Электронный ресурс]. – Режим доступа до ресурсу: <https://www.14core.com/wiring-sensirion-scd30-co2-sensor-in-esp32-tft-display/sensirion-scd30-carbon-dioxide-sensor-wiring-schematics-guide/>.

26. Humidity Sensor BME280. [Электронный ресурс]. – Режим доступа до ресурсу: <https://learn.adafruit.com/adafruit-bme280-humidity-barometric-pressure-temperature-sensor-breakout/pinouts>.

27. BME280 Pinout, Specs, Applications-Temperature, Pressure & Humidity Sensor Module. [Электронный ресурс]. – Режим доступа до ресурсу: <https://electrocredible.com/bme280-pinout-specs-applications/>.

28. What are LoRa and LoRaWAN?. [Электронный ресурс]. – Режим доступа до ресурсу: <https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/what-is-lorawan/>.

29. Zigbee - Wikipedia. [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: <https://en.wikipedia.org/wiki/Zigbee>.
30. Narrowband IoT - Wikipedia. [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: https://en.wikipedia.org/wiki/Narrowband_IoT.
31. NB-IoT (NarrowBand-Internet of Things): Frequency Bands, Applications. [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.data-alliance.net/blog/nb-iot-narrowband-internet-of-things/>.
32. MQTT - The Standard for IoT Messaging. [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: <https://mqtt.org>.
33. Wi-Fi - Wikipedia. [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: https://en.wikipedia.org/wiki/Wi-Fi_Direct.
34. Bluetooth - Wikipedia. [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: <https://en.wikipedia.org/wiki/Bluetooth>.
35. Tinkercad. [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.tinkercad.com>.
36. Arduino - Home. [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.arduino.cc/en/software/>.
37. C++ – Вікіпедія. [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: <https://uk.wikipedia.org/wiki/C++>.
38. Уроки програмування на C++ для початківців / aCode. [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: <https://acode.com.ua/uroki-po-cpp/>.

ДЕМОНСТРАЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ (Презентація)

Державний університет
інформаційно-комунікаційних
технологій

Кафедра ІСТ
Київ 2025



IoT-система автономної мережі датчиків для відстеження якості повітря в місті

1

ПРЕЗЕНТАЦІЯ ДО ЗАХИСТУ БАКАЛАВРСЬКОЇ РОБОТИ
СТУДЕНТА 4 КУРСУ,
ГРУПИ ІСД-41,
СПЕЦІАЛЬНОСТІ 126 ІСТ
СЕРДЮКА КИРИЛА ВІТАЛІЙОВИЧА
НАУКОВИЙ КЕРІВНИК: К. Е. Н. СОЛОМАХА С. А.

Мета, об'єкт, предмет та основні завдання

2

Мета роботи - розробка IoT-системи для моніторингу якості повітря в міському середовищі.

Об'єкт дослідження - система моніторингу на основі IoT-технологій.

Предмет дослідження - методи побудови автономних IoT-систем з використанням мікроконтролерів, сенсорів та бездротових технологій.

Основні завдання:

- ▶ Аналіз екологічних проблем повітря в містах
- ▶ Дослідження архітектури IoT-систем та вибір компонентів
- ▶ Розробка та складання прототипу пристрою
- ▶ Реалізація збору та обробки даних
- ▶ Тестування системи та оцінка її ефективності

Актуальність теми

3

- Постійне осіннє забруднення повітря навколо Києва через горіння торф'яників;
- Висока смертність через забруднене повітря



Рішення у провідних містах світу

- Сінгапур — мережа IoT-датчиків з інтеграцією в міську інфраструктуру
- Токіо — датчики в громадському транспорті, онлайн-карти забруднення
- Стокгольм — екологічні зони з контролем якості повітря в режимі реального часу
- Дані доступні через мобільні застосунки, відкриті портали

Основні фактори забруднення повітря та технології протидії

4

Основними факторами забруднення є

- Транспорт із двигунами внутрішнього згоряння;
- Застарілі системи фільтрації
- Використання корисних копалин, на кшталт вугілля або мазуту;
- Людський фактор.
- Горіння копалин

Сучасні технології протидії:

- IoT-системи моніторингу забезпечує безперервний контроль якості повітря в реальному часі та пришвидшує реагування на перевищення концентрацій
- Екомодернізація:
 - електротранспорт
 - промислові фільтри
 - альтернативна енергетика



Існуючі технічні рішення моніторингу повітря

5

Портативні та DIY-рішення:

- ▶ Низька вартість, доступність, IoT-інтеграція
- ▶ Точність розрахунків залежить від рангу компонентів та умов встановлення



Готові пристрої:

- ▶ **AirFresh (EcoCity)** — визначає PM1/2.5/10 і термокомпенсацію
- ▶ **Ajax LifeQuality** — визначає CO₂, вологість, автоматизація клімату
- ▶ **Xiaomi Qingping** — домашній моніторинг з дисплеєм



Стаціонарні системи:

- ▶ **ENVEA Cairnet V3** - високоточні сенсори (PM2.5, PM10, CO₂, NO_x, O₃) з низькою мобільністю
- ▶ Переважно державні або муніципальні



Огляд мікроконтролера та датчиків

6

Мікроконтролер IoT-системи

Arduino UNO:

- 6 аналогових входів;
- 14 цифрових входів/виходів;
- Тактова частота: 16 МГц;
- ОЗП (SRAM): 2 КБ;
- Напруга живлення: 5 В;



П'єзодинамік:

- Робоча напруга: 3–5 В;
- Частота звучання: 2–4 кГц;
- Інтерфейс підключення: 2 контакти;
- Споживаний струм: < 30 мА;



Датчики

MQ-135:

- Виявляє аміак оксиди азоту, чадний газ, бензол та леткі органічні сполуки;
- Дешевий, простий у використанні;
- Робоча напруга: 5 В;
- Наявна висока похибка, чутливий до температури та вологості



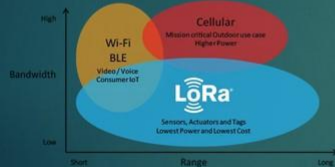
Мережеві протоколи передачі даних

7

Мережеві протоколи:

LoRa / LoRaWAN:

- Дальність: до 10 км
- Низька пропускна здатність, але енергоефективний
- Ідеально підходить для віддалених точок та міського моніторингу



Загальні вимоги до передачі даних:

- Надійність і стабільність зв'язку
- Підтримка багатьох сенсорних вузлів
- Низьке енергоспоживання
- Робота в реальному часі

Wi-Fi:

- Висока швидкість, обмежена дальність (у приміщенні – 30-60 метрів, на відкритій місцевості – до 400 метрів)
- Середнє енергоспоживання
- Оптимально — для стаціонарних вузлів з живленням



Bluetooth / BLE:

- До 10 м, низьке енергоспоживання (у випадку з Bluetooth low energy)
- Для зв'язку між пристроями в межах одного об'єкта
- Використовується для локального зчитування показників



Взаємодія компонентів і корпус

8

Апаратна основа:

- **Головний контролер:** Arduino UNO
- **Сенсор:** MQ-135;
- **Пристрій виводу:** рідкокристалічний дисплей

Передача даних:

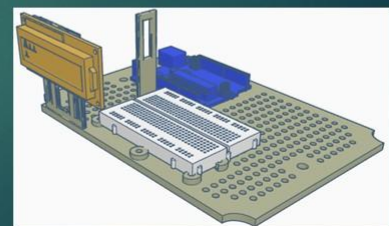
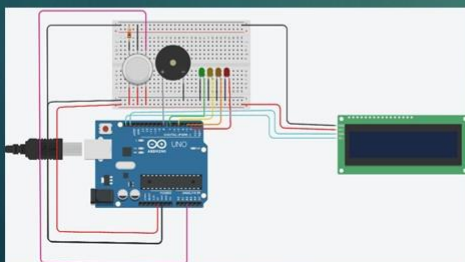
- Під'єднання через USB
- Призначено для зчитування показників у реальному часі або періодичної синхронізації

Індикація та сигналізація:

- **4 світлодіоди** - кольорова індикація рівня забруднення
- **П'єзодинамік** - звукове попередження при перевищенні норм

Корпус і компоновання:

- Прямокутна форма з вентиляційними отворами
- Внутрішнє компоновання з урахуванням вентиляції і захисту від перешкод

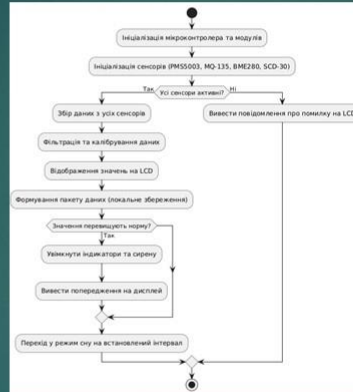


Алгоритм роботи програми

9

Основні етапи алгоритму:

- ▶ **Ініціалізація системи** (сенсори PMS5003, MQ-135, SCD-30, BME280)
- ▶ **Перевірка сенсорів** (аварійне завершення у разі помилки)
- ▶ **Збір показників:** PM2.5, CO₂, TVOC, температура, вологість
- ▶ **Попередня обробка даних:** фільтрація, калібрування, нормалізація
- ▶ **Виведення на дисплей:** РК-екран + текстова оцінка якості
- ▶ **Оповіщення:** П'єзодинамік передає звукове оповіщення, у випадку виявлення критичного рівня забрудненості + LED-індикація (4 рівні AQI)
- ▶ **Режим сну (енергозбереження)** до наступного вимірювання



Реалізація на C++:
▶ Плата: Arduino

▶ Дисплей: LCD 16x2 через PC

▶ Бібліотека: LiquidCrystal_I2C

▶ Аналоговий сенсор: MQ-135

▶ Вивід AQI (без збереження, кольорова LED-індикація + п'єзодинамік)

```
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
```

```
LiquidCrystal_I2C lcd(32, 16, 2);
```

```
void setup() {
  pinMode(2, OUTPUT); // Red
  pinMode(3, OUTPUT); // Orange
  pinMode(5, OUTPUT); // Yellow
  pinMode(7, OUTPUT); // Green
  pinMode(8, OUTPUT); // Buzzer

  lcd.init();
  lcd.begin(16, 2);
  lcd.backlight();
  lcd.clear();

  Serial.begin(9600);
}
```

```
void loop() {
  int air_qual = analogRead(A2);
  Serial.println(air_qual);

  // Normalization: convert raw value to AQI (0-500)
  air_qual = map(air_qual, 0, 1023, 0, 500);

  lcd.setCursor(0, 0);

  // Determine color
  if (air_qual < 50) {
    digitalWrite(LED_GREEN, HIGH); // Green
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print("Good");
  } else if (air_qual >= 50 && air_qual < 100) {
    digitalWrite(LED_YELLOW, HIGH); // Yellow
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print("Moderate");
  } else if (air_qual >= 100 && air_qual < 150) {
    digitalWrite(LED_ORANGE, HIGH); // Orange
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print("Unhealthy");
  } else {
    digitalWrite(LED_RED, HIGH); // Red
    digitalWrite(LED_BUZZER, HIGH); // Buzzer
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print("Very Unhealthy");
  }

  lcd.setCursor(0, 1);
  lcd.print("AQI: ");
  lcd.print(air_qual);

  delay(1000);
}
```

Апробація результатів роботи

10

Апробація роботи проходила на двох науково-технічних конференціях:

1. «Технологічні горизонти: дослідження та застосування інформаційних технологій для технологічного прогресу України і світу» з поданням тез на тему «Технологічні інновації в освіті»
2. «Сучасний стан та перспективи розвитку IoT» з поданням тез на тему «IoT для розумних міст та промисловості»

Висновки

11

Результати розробки

- ▶ Створено робочий прототип систему на базі Arduino UNO з датчиком MQ-135.
- ▶ Здійснюється зчитування, обробка та локальне відображення даних через РК-дисплей.
- ▶ Звукова та світлова індикація сигналізують про перевищення норм

Практичне значення

- ▶ Може впроваджуватись у рамках концепції «розумного міста».
- ▶ Придатна для моніторингу у транспортних вузлах, біля підприємств, в навчальних закладах.

12

ШАНОВНА КОМІСІЄ,
ДЯКУЮ ЗА УВАГУ!