Міністерство освіти і науки України

Луцький національний технічний університет
(повне найменування закладу вищої освіти)

Факультет комп'ютерних та інформаційних технологій
(повне найменування факультету)

Кафедра комп'ютерної інженерії та кібербезпеки
(повне найменування кафедри)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА ЗА СТУПЕНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ «БАКАЛАВР»

СИСТЕМА МОНІТОРИНГУ ЯКОСТІ ПОВІТРЯ НА БАЗІ ESP32

AIR QUALITY MONITORING SYSTEM BASED ON ESP32

спеціальність 123 Комп'ютерна інженерія
(шифр і назва спеціальності)

освітня програма Комп'ютерна інженерія
(назва освітньої програми)

Виконав: здобувач вищої освіти
групи КІ-41
Бабич Костянтин Сергійович

(підпис)

Керівник:
к.т.н., доцент
Лавренчук Світлана Василівна

(підпис)

Кваліфікаційну роботу
допущено до захисту
«_____» червня 2024 р.
Гарант освітньої програми:
к.т.н., доцент
Лавренчук Світлана Василівна

(підпис)

Луцьк – 2024 року

ЛУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет *комп'ютерних та інформаційних технологій*
Кафедра *комп'ютерної інженерії та кібербезпеки*
Ступінь вищої освіти: *бакалавр*
Галузь знань: *12 Інформаційні технології*
Спеціальність: *123 Комп'ютерна інженерія*
Освітня програма: *«Комп'ютерна інженерія»*

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
_____ проф. Н.Чернящук
« 10 » 01 2024 р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ ВИЩОЇ ОСВІТИ

Бабичу Костянтину Сергійовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема кваліфікаційної роботи *Система моніторингу якості повітря на базі ESP32*

Керівник роботи *к.т.н., доцент Лавренчук Світлана Василівна*

затверджені наказом закладу вищої освіти від «30» грудня 2023 року № 459/01-02
2. Строк подання здобувачем вищої освіти кваліфікаційної роботи 10.06.2024р.

3. Вихідні дані до роботи *джерелом розробки є науково-технічна література та публікації в періодичних виданнях з даного питання, опубліковані зарубіжні та вітчизняні роботи в даній області та різні інтернет-ресурси технічного спрямування*

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):
Вступ
Аналіз проблемної області та наявних рішень
Вибір апаратно-програмної бази для проєкту
Проєктування та тестування системи моніторингу
Висновки

5. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу:
Функціональна схема системи моніторингу
Схема під'єднання сенсора до плати ESP
Принципова схема системи моніторингу
Інтерфейс системи моніторингу

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис	
		завдання видав	завдання прийняв
Аналіз проблемної області та наявних рішень	*Лавренчук С.В.., доцент*		
Вибір апаратно-програмної бази для проєкту	*Лавренчук С.В.., доцент*		
Проєктування та тестування системи моніторингу	*Лавренчук С.В.., доцент*		
Нормоконтроль	*Багнюк Н.В., доцент*		
Гарант ОП	*Лавренчук С.В., доцент*		
Показник запозичень тексту	***___%***		
Академічна доброчесність	*Міскевич О.І.,асистент*		

7. Дата видачі завдання 10.01.2024 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	*Розділ 1. Аналіз проблемної області та наявних рішень*	до 15.02.2024 р.	Виконано
2.	*Розділ 2. Вибір апаратно-програмної бази для проєкту*	до 15.03.2024 р.	Виконано
3.	*Розділ 3. Проєктування та тестування системи моніторингу*	до 04.05.2024 р.	Виконано
4.	*Висновки та пропозиції*	до 07.05.2025 р.	Виконано
5.	*Формування списку використаних джерел*	до 10.05.2024 р.	Виконано
6.	*Формування додатків*	до 15.05.2024 р.	Виконано
7.	*Оформлення ілюстративного матеріалу*	до 20.05.2024 р.	Виконано
8.	*Нормоконтроль*	до 01.06.2024 р.	Виконано
9.	*Інструментальна перевірка на академічний плагіат*	до 04.06.2024 р	Виконано
10.	*Представлення кваліфікаційної роботи бакалавра до захисту*	до 11.06.2024 р.	Виконано

Здобувач вищої освіти _____ Бабич К.С.
(підпис) (прізвище, ініціали)

Керівник кваліфікаційної роботи _____ Лавренчук С.В.
(підпис) (прізвище, ініціали)

АНОТАЦІЯ

Бабич К.С. Система моніторингу якості повітря на базі ESP32. Рукопис.

Кваліфікаційна робота бакалавра ОП «Комп'ютерна інженерія» спеціальності 123 Комп'ютерна інженерія. Луцький національний технічний університет. Луцьк, 2024. 61 с.

Кваліфікаційна робота складається з вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел, додатку.

Перший розділ присвячено огляду предметної олбасті, тут обгрунтовано актуальність обраної теми, розглянуто вплив якості повітря на здоров'я людини, визначено складові індексу якості повітря, проаналізовано існуючі рішення в галузі (сервіси European Air Quality Index, ЛУН Місто, проєкт EcoCity, боти в месерджерах).

В другому розділі здійснено вибір та обгронтування засобів розробки. Розглянуто будову та принцип роботи газових сенсорів серії MQ, а також датчики газу Figaro TGS, Alphasense B4, SGX Sensortech MiCS. Виконано порівняння технічних характеристик мікроконтролерів ESP32 і ESP8266 і розглянуто особливості середовищ програмування.

Третій розділ присвячено алгоритму проєктування пристрою, створенню прошивки мікроконтролера системи моніторингу, також розглянуто можливості вдосконалення прототипу пристрою.

Ключові слова: ESP, NodeMCU, якість повітря, сенсори серії MQ, Arduino IDE.

ANNOTATION

Babych K.S. Air quality monitoring system based on ESP32. Manuscript.

Qualifying work of a bachelor of EP «Computer Engineering» specialty 123 Computer Engineering. Lutsk National Technical University. Lutsk, 2024. 61 p.

Qualification work consists of an introduction, three sections, conclusions, a references, and an appendix.

The first section is devoted to an overview of the subject area, the relevance of the chosen topic is substantiated, the influence of air quality on human health is considered, the components of the air quality index are determined, existing solutions in the industry are analyzed (European Air Quality Index services, LUN City, EcoCity project, messenger bots).

In the second section, the selection and justification of development tools is carried out. The design and operating principle of gas sensors of the MQ series, as well as Figaro TGS, Alphasense B4, SGX Sensortech MiCS gas sensors are considered. The technical characteristics of the ESP32 and ESP8266 microcontrollers are compared and the features of the programming environments are considered.

The third section is devoted to the device design algorithm, the creation of firmware for the microcontroller of the monitoring system, and the possibilities of improving the prototype device are also considered.

Keywords: ESP, NodeMCU, air quality, MQ series sensors, Arduino IDE.

ЗМІСТ

ВСТУП 7
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ ТА НАЯВНИХ РІШЕНЬ 8
1.1 Обгрунтування актуальності обраної теми 8
1.2 Вплив якості повітря на здоров’я людей та стан екології 9
1.1.1 Основні параметри, що визначають якість повітря 11
1.1.2 Джерела забруднення повітря 14
1.3 Огляд існуючих рішень в області моніторингу якості повітря 15
РОЗДІЛ 2 ВИБІР АПАРАТНОЇ ТА ПРОГРАМНОЇ БАЗИ ДЛЯ ПРОЄКТУ 20
2.1 Сенсори для вимірювання якості повітря 20
2.1.1 Будова та принцип роботи сенсорів серії MQ 20
2.1.2 Серія датчиків газу Figaro TGS 25
2.1.3 Серія сенсорів Alphasense B4 26
2.1.4 Серія SGX Sensortech MiCS 27
2.2 Вибір мікроконтролера 28
2.3 Програмне забезпечення проєкту 31
РОЗДІЛ 3 ПРОЄКТУВАННЯ ТА ТЕСТУВАННЯ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ 34
3.1 Проєктування прототипу системи моніторингу 34
3.1.1 Схема та монтаж пристрою 34
3.1.2 Налаштування середовища програмування та портів 38
3.1.3 Програмування мікроконтролера 40
3.2 Тестування системи моніторингу 46
3.3 Вдосконалення системи моніторингу 49
ВИСНОВКИ 53
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 54
ДОДАТКИ 58

ВСТУП

Актуальність теми. Забруднення повітря – одна з актуальних екологічних проблем сучасності, яка негативно впливає на здоров’я людей та довкілля. Для вчасного реагування та ефективної боротьби з забрудненням повітря потрібно мати дані про його склад та динаміку змін. Багато існуючих методів моніторингу якості повітря мають ряд недоліків, серед яких: недостатня точність, обмежена функціональність, висока вартість або складність використання. Тому завдання розробки нових методів та засобів відстеження параметрів повітря, які будуть функціональними, доступними та простими у використанні є досить актуальним.

Метою роботи є пошук дієвих та недорогих способів моніторингу параметрів повітря для визначення його якості.

Об’єкт дослідження – система моніторингу якості повітря.

Предмет дослідження – використання мікроконтролера ESP для створення системи моніторингу.

Завдання, які необхідно виконати:

– познайомитися з основними параметрами, які визначають якість повітря;

– здійснити огляд існуючих рішень в сфері моніторингу якості повітря;

– обрати сенсори, мікроконтролер та інші складові для проєкту;

– обрати середовище для створення прошивки мікроконтролера;

– спроєктувати та перевірити роботу системи моніторингу якості повітря;

– розглянути можливі шляхи вдосконалення спроєктованої системи.

РОЗДІЛ 1
АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ ТА НАЯВНИХ РІШЕНЬ

1.1 Обґрунтування актуальності обраної теми

У 2024 році питання про стан забруднення Землі стає ще більш актуальним. Покращення якості повітря прямо або опосередковано сприяє досягненню 11 з 17 цілей сталого розвитку ООН: 3, 6, 7, 11, 12, 13, 15, 16, 17 [11]. Покращення якості повітря не може обійтися без моніторингу стану навколишнього середовища, адже він відіграє важливу роль в контексті кліматичних змін на всій планеті і в Україні, зокрема. Одним із головних показників якості навколишнього середовища є чистота повітря.

Багато країн вже впровадили або працюють над темою впровадження національних мереж, які містять тисячі станцій для контролю якості атмосферного повітря в режимі реального часу. Ці станції збирають показники, на основі яких відслідковуються основні джерела та осередки забруднення атмосфери. Зазвичай такі осередки мають андрогенний характер, виникають при різних виробничих процесах в різних галузях. Наприклад, енергетичні та транспортні підприємства є джерелом викидів різних хімічних речовин та частинок пилу різних розмірів.

Незважаючи на велику увагу та зусилля всесвітніх організацій щодо поліпшення якості повітря, наша (українська) система моніторингу якості повітря [27] розвивається повільно і поки не здатна забезпечити актуальною інформацією про стан повітря, особливо в умовах військових дій, які так само мають значний вплив на якість повітря [18, 20].

Отож, зважаючи на такі фактори, як існування великої кількості промислових об’єктів (ТЕЦ і ТЕС, металургійні заводи, хімічні підприємства, пилорами), велику кількість транспорту (яка ще зростає), військові дії на території України, питання моніторингу якості повітря в залишається актуальним. Інтеграція та підтримка заходів щодо покращення якості повітря в державні та місцеві політики є дуже важливим кроком для досягнення сталого

розвитку: зменшення негативних наслідків впливу неякісного повітря на здоров'я людей; зниження рівня забруднення призведе до покращення загальної якості життя мешканців громад; зниження викидів забруднюючих речовин (наприклад, CO_2 або метан, тощо) сприятиме зменшенню парникового ефекту і, як наслідок, допоможе в боротьбі зі зміною клімату; усвідомлення рівня забрудненості спонукатиме до ширшого використання чистих джерел енергії; покращення якості повітря сприятиме збереженню здоров'я та біорізноманіття багатьох екосистем.

1.2 Вплив якості повітря на здоров'я людей та стан екології

Якість повітря – це комплексний показник, що містить інформацію не лише про його склад, але й про придатність для дихання.

Шкідливі речовини, які містить забруднене повітря, можуть спричиняти серйозні захворювання та нашкодити навколишньому середовищу (таблиця 1.1). Забруднення повітря може стати причиною великої кількості респіраторних захворювань і навіть передчасних смертей. Вчені навіть проводили дослідження, які «підтверджують зв'язок між рівнем забрудненості повітря і зростанням показників смертності від COVID-19» [28]. Покращення якості повітря та постійний моніторинг якості сприятиме зменшенню цих негативних наслідків.

Таблиця 1.1 – Вплив якості повітря на здоров'я людей та екологію

Вплив на здоров'я		Вплив на екологію	
Респіраторні захворювання	високий рівень забруднення повітря викликає або загострює захворювання дихальних шляхів, такі як астма, бронхіт та інші хронічні захворювання легень	Кислотні дощі	оксиди азоту та сірки, можуть з повітря потрапити в опади, забруднюючи ґрунт та водні ресурси. Це може мати вплив життєдіяльність рослин та тварин, а також може призвести до підкислення ґрунту та водних масивів
	тверді частинки проникають глибоко в легені, можуть навіть спричиняти запалення та пошкодження легеневої тканини		

Продовження таблиці 1.1

Вплив на здоров'я		Вплив на екологію	
Серцево-судинні захворювання	чадний газ та озон збільшують ризик серцевих нападів, інсультів та сприяють підвищенню артеріального тиску	Забруднення ґрунту	шкідливі речовини з повітря можуть осідати на ґрунт, забруднюючи його та роблячи непридатним для сільського господарства
	тривалий вплив забрудненого повітря може сприяти розвитку атеросклерозу		
Онкологія	досить часто повітря містить канцерогенні компоненти (наприклад, бензол), що підвищує ризик розвитку різних видів раку, особливо раку легенів	Зміна клімату	сажа в повітрі (чорний вуглець) сприяє глобальному потеплінню, парникові гази, сприяють зміні клімату. Зменшення викидів цих речовин допоможе зменшити глобальне потепління
Імунні та ендокринні хвороби	важкі метали та діоксини можуть порушувати роботу ендокринної системи і пригнічувати імунну систему		
Репродуктивна система	забруднення повітря може негативно впливати на репродуктивну систему людей, призводити до проблем з зачаттям, викиднів та вроджених дефектів	Вплив на рослинність	озон у приземному шарі атмосфери може пошкодити листя рослин, знизити їх продуктивність і стійкість до хвороб
Вплив на дітей	забруднене повітря може негативно впливати на утробний розвиток дитини, спричиняти низьку вагу при народженні, передчасні пологи, проблеми з розвитком нервової системи тощо	Зменшення біорізноманіття	забруднення повітря може шкідливо впливати на рослини та тварини, призводити до втрати біорізноманіття, адже багато видів рослин і тварин не здатні адаптуватися до швидких змін якості повітря
Нервова система	забруднене повітря може негативно впливати на нервову систему, призводити до погіршення пам'яті, уваги, концентрації та когнітивних функцій		

1.1.1 Основні параметри, що визначають якість повітря

У вересні 2021 року ВООЗ опублікувала оновлені «глобальні рекомендації щодо якості повітря та результати впливу забруднення повітря на здоров'я населення» [15].

Якість повітря визначається за концентрацією в ньому різних (хімічних, фізичних і біологічних) речовин. Оновлені рекомендації ВООЗ індикують рівень якості повітря за шістьма забруднювачами, щодо яких є найбільш доказова інформація щодо впливу на здоров'я: тверді частинки, озон (O_3), діоксид азоту (NO_2) діоксид сірки (SO_2) та окис вуглецю (CO). Розглянемо їх вплив детальніше.

В повітрі зазвичай містяться тверді (завислі частинки), основними компонентами яких є мінеральний пил, сульфати, нітрати, сажа, аміак, хлорид натрію та вода. Такі частинки в повітрі – це складна суміш твердих і рідких (органічних та неорганічних) речовин. Часто концентрацію твердих часток застосовують як непрямий показник рівня забруднення повітря. Частинки, що мають діаметр від 3 до 10 мікрон (позначають PM_{10}), можуть проникати глибоко в легені, а ще більш суттєвий вплив на здоров'я мають частки, що мають діаметр менше 2,5 мікрона ($PM_{2.5}$), адже вони можуть потрапляти у кровоносну систему. Відносні розміри цих частинок наведено на рисунку 1.1.

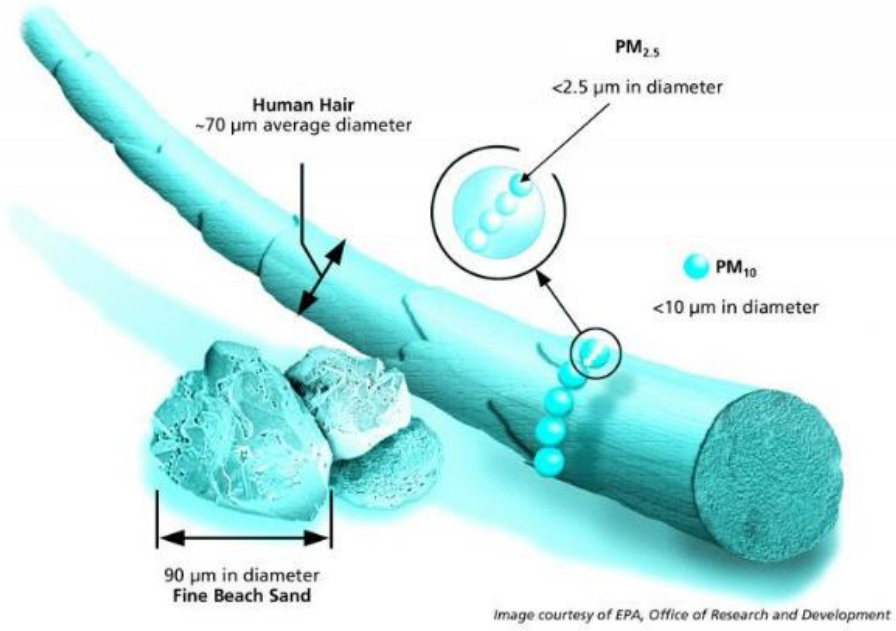


Рисунок 1.1 – Розмір PM частинок порівняно з волосиною людини [17]

PM_{10} можуть потрапляти в дихальні шляхи і викликати респіраторні захворювання, а $PM_{2.5}$ здатні проникати глибоко в легені, можуть потрапляти в кровоток та провокувати серцево-судинні та респіраторні захворювання. Тому це важливий показник якості повітря. «Рекомендованими граничними значеннями концентрації дрібнодисперсних зважених частинок ($PM_{2,5}$) для середньодобового значення є 15 мкг/м^3, а для середньорічного – 5 мкг/м^3» [17].

Високий рівень озону може подразнювати дихальні шляхи, викликати задуху, кашель та інші проблеми з диханням, а також подразнення очей.

Високі концентрації діоксиду азоту, як і діоксиду сірки, можуть викликати подразнення дихальних шляхів і знижувати функцію легенів, погіршувати стан людей з астмою.

Чадний газ може викликати головний біль, запаморочення, а у високих дозах може мати смертельний вплив, блокуючи транспортування кисню в крові, що може призвести до втрати свідомості чи смерті.

Усі ці шкідливі речовини, що входять до індексу якості повітря, вимірюють або в реальному часі (з певною частотою), або в середньому за добу [19]. Далі показники усереднюють за певний конкретний відрізок часу, групують за балами і приводять до шкали від 0 до 500. Шкала містить 6 категорій, кожна має свій колір і має вигляд, як на рисунку 1.2.

-	Індекс якості повітря (ІКВ = AQI)	Рівні концерну охорони здоров'я
0 - 50	добре	Якість повітря вважається задовільним, і забруднення повітря є незначним у межах норми.
51 -100	задовільний	Якість повітря є прийнятною; однак, деякі забруднювачі можуть становити небезпеку для людей, які є особливо чутливими до забруднення повітря.
101-150	Нездоровий для чутливих груп	Може впливати на особливо чутливу групу осіб. На середнього представника не має видимого впливу.
151-200	нездоровий	Кожен може почати зазнавати наслідків для свого здоров'я; особливо чутливі люди можуть відчувати серйозніші наслідки.
201-300	Дуже Нездоровий	Небезпека здоров'я від надзвичайних умов. Це позначиться, мабуть, по всьому населенню.
300+	небезпечний	Небезпека для здоров'я: кожна людина може мати більш серйозні наслідки для здоров'я

Рисунок 1.2 – Американська шкала якості повітря [23]

Українські науковці [26] розробили власну шкалу якості – Ukrainian Air Quality Index (UAQI). Ця шкала містить чотири групи (рисунок 1.3) основних забруднюючих речовин та фізичні параметри, які впливають на якість повітря та здоров'я людей. Таким чином український індекс забезпечує комплексний підхід до моніторингу якості.

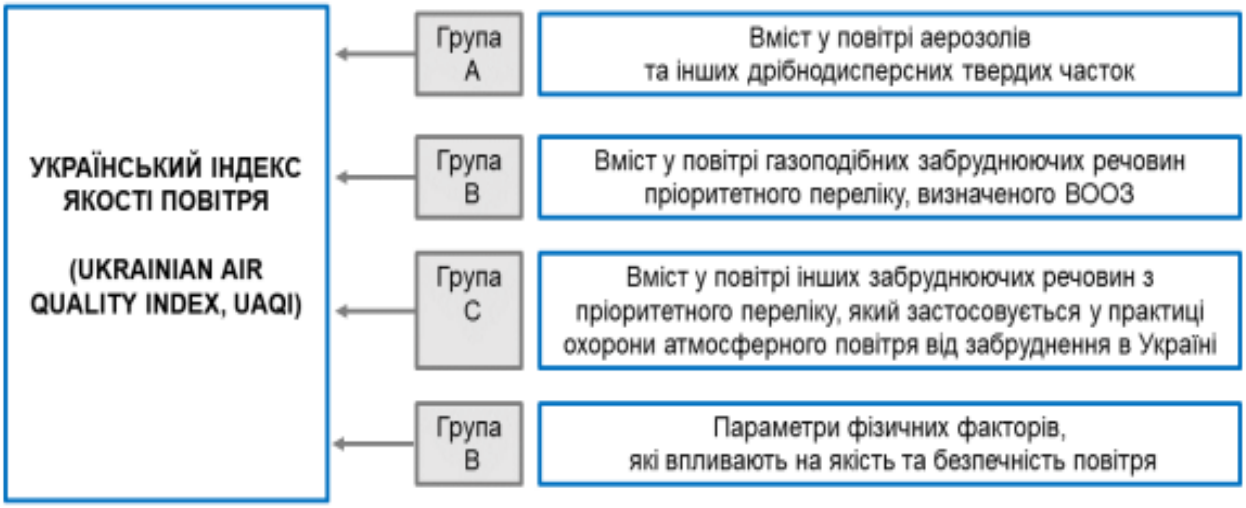


Рисунок 1.3 – Групи параметрів моніторингу UAQI [26]

Мережа спостережень гідрометеорологічних організацій збирає інформацію про показники вмісту забруднювальних речовин в атмосферному повітрі міст України, ці дані можна завантажити для аналізу на порталі відкритих даних [29]. Наприклад, з цього порталу можна завантажити інформацію в форматі .xlsx або .csv для подальшого використання та аналізу. На рисунку 1.4 наведено результати спостережень за вмістом шкідливих речовин в повітрі в місті Луцьку в квітні 2024 року. Як бачимо з рисунку, тут враховано більше показників, ніж рекомендовано ВООЗ. Портал містить дані починаючи з 2020 року (відповідно до постанови [21]), а також опис структури набору даних в форматі json, що дає змогу зручно використовувати ці дані для аналітики.

Вміст забруднювальних речовин в атмосферному повітрі міст України за даними спостережень у квітні 2024 року

($q_{ср}$ - середньомісячна концентрація, мг/м^3; q_{max} - максимальна разова концентрація, мг/м^3)

Місто	Назва домішки	$q_{ср}$, мг/м^3	у ГДК$_{с.д.}$	$q_{макс}$, мг/м^3	у ГДК$_{м.р.}$
Луцьк	Завислі речовини	0,07	0,5	0,30	0,6
Луцьк	Діоксид сірки	0,002	0,0	0,005	0,0
Луцьк	Сульфати	0,01		0,02	
Луцьк	Оксид вуглецю	0,1	0,0	1,0	0,2
Луцьк	Діоксид азоту	0,08	1,9	0,23	1,1
Луцьк	Оксид азоту	0,04	0,7	0,11	0,3
Луцьк	Фенол	0,006	2,2	0,013	1,3
Луцьк	Формальдегід	0,008	2,5	0,035	1,0
Індекс забруднення атмосфери: 9,16					

Рисунок 1.4 – Інформація про рівень домішок у повітрі в м. Луцьку в квітні 2024 року

1.1.2 Джерела забруднення повітря

Якість повітря залежить від рівня концентрації різних домішок, як природних, так і техногенних (рисунок 1.5).

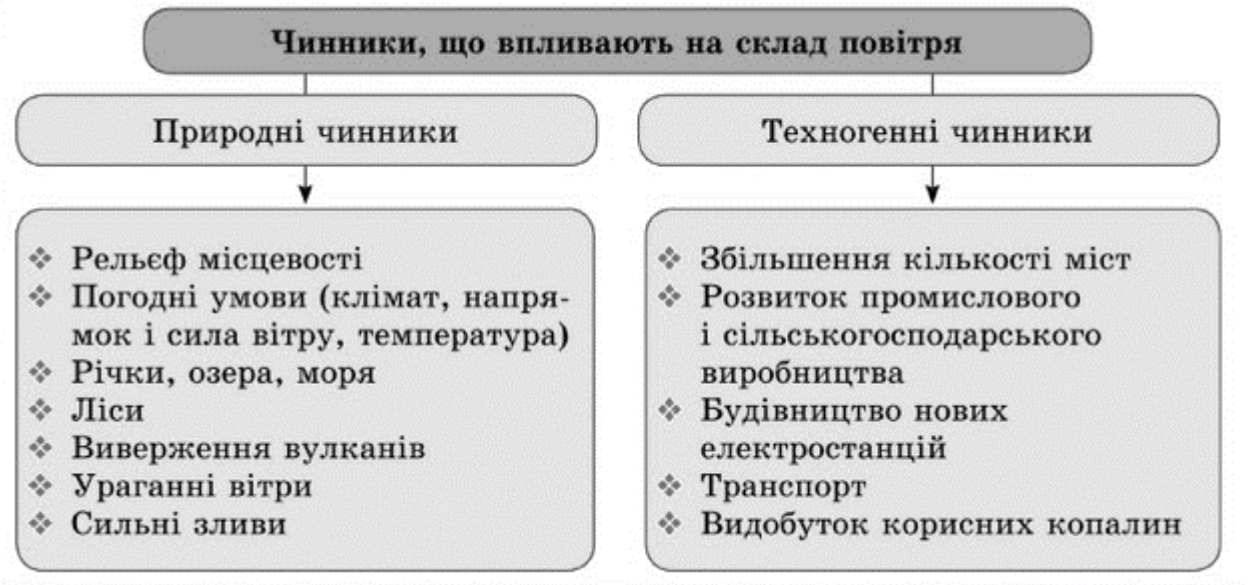


Рисунок 1.5 – Чинники, які впливають на стан повітря

Джерелом PM_{10} може бути цвіль, пилок, спори, дим, бруд та пил від виробництва та сільського господарства.

Частинки $PM_{2,5}$ виникають внаслідок процесів горіння різних речовин або використання транспортних засобів. Електростанції, використання деревини для обігріву приміщень, лісові пожежі, спалювання сільськогосподарських відходів та інші промислові процеси спричиняють виникнення токсичних органічних сполук та/або важких металів. Це теж є джерелом твердих часток.

Значна кількість PM у викидах двигунів легкових автомобілів, які працюють на основі дизельного палива, привела до заборони їх використання у країнах Західної Європи і Америки.

Озон (O_3) – це фотохімічний газ, він утворюється в атмосфері під дією сонячного світла під час реакцій між оксидами азоту і леткими органічними сполуками. В деяких країнах Європи біля аптек та медичних закладів встановлено стаціонарні газоаналізатори озону.

Діоксид азоту (NO_2) – це газ, що утворюється при спалюванні палива, наприклад, в автомобілях або на електростанціях.

Діоксид сірки (SO_2) токсичний, утворюється при спалюванні сірковмісних матеріалів, таких як вугілля та нафта та вулканічній активності.

Чадний газ (CO) утворюється при неповному згорянні палива.

Внаслідок сільськогосподарської промислової діяльності може утворюватися аміак (NH_3). Його високі концентрації можуть викликати подразнення слизових оболонок та дихальних шляхів.

1.3 Огляд існуючих рішень в області моніторингу якості повітря

Здійснювати моніторинг якості повітря можна на різних рівнях [14], застосовуючи різні технології та підходи: від великих стаціонарних станцій до портативних пристроїв [6, 13] та мобільних додатків [22].

Стаціонарні моніторингові станції обладнані різними сенсорами для вимірювання концентрацій забруднюючих речовин у повітрі, вони розташовані в постійних місцях, мають свою геолокацію. Наприклад, в місті Луцьку є 5 стаціонарних станцій, розміщених в різних районах.

В листопаді 2017 року Європейська агенція довкілля (European Environment Agency – EEA) впровадила сервіс, що відображає Європейський індекс якості повітря [5], що надало можливість відстежувати показники якості повітря в країнах, які впровадили відповідні протоколи (моніторингу та передачі даних у режимі реального часу). Користувач бачить інтерактивну карту (рисунок 1.6), на якій може подивитися рівень забруднення повітря в містах Європи. Карта реалізована засобами бібліотеки Mapbox GL для JavaScript. Перевагою цього ресурсу є можливість масштабування, плавні переходи та можливість налаштування властивостей для різних об’єктів (шарів), серед недоліків можна відмітити відсутність можливості завантаження даних для здійснення аналітичних досліджень.

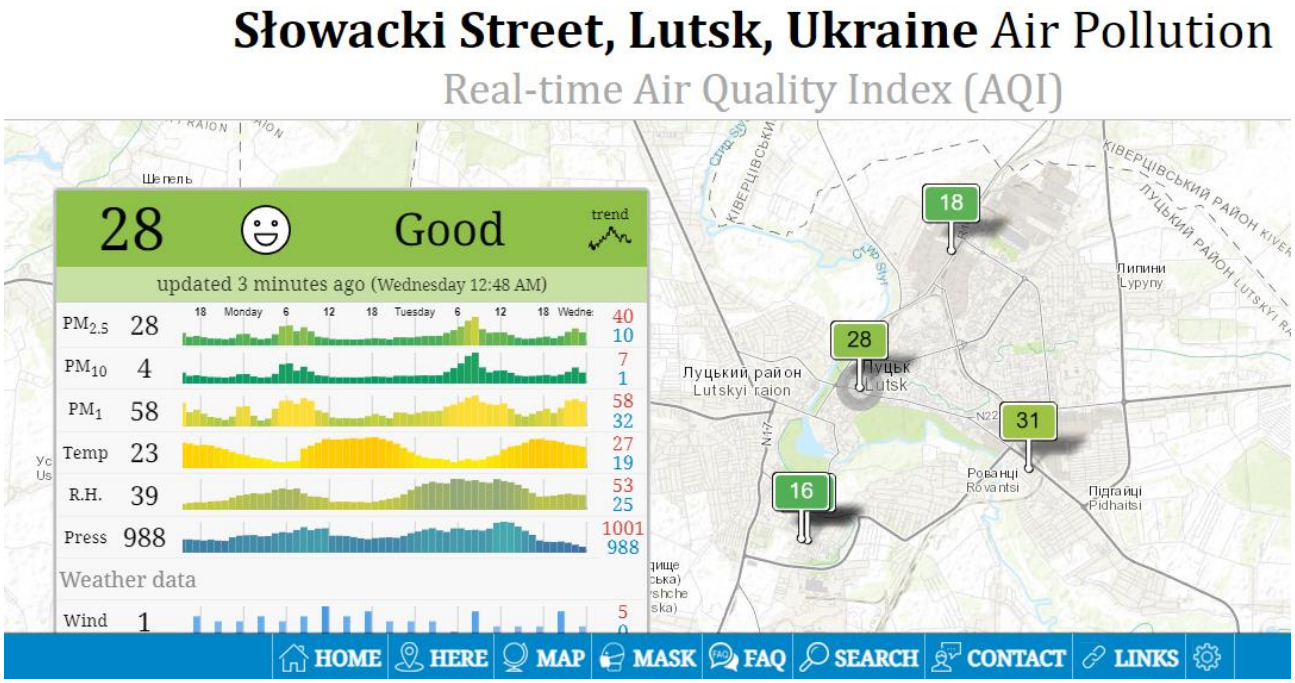
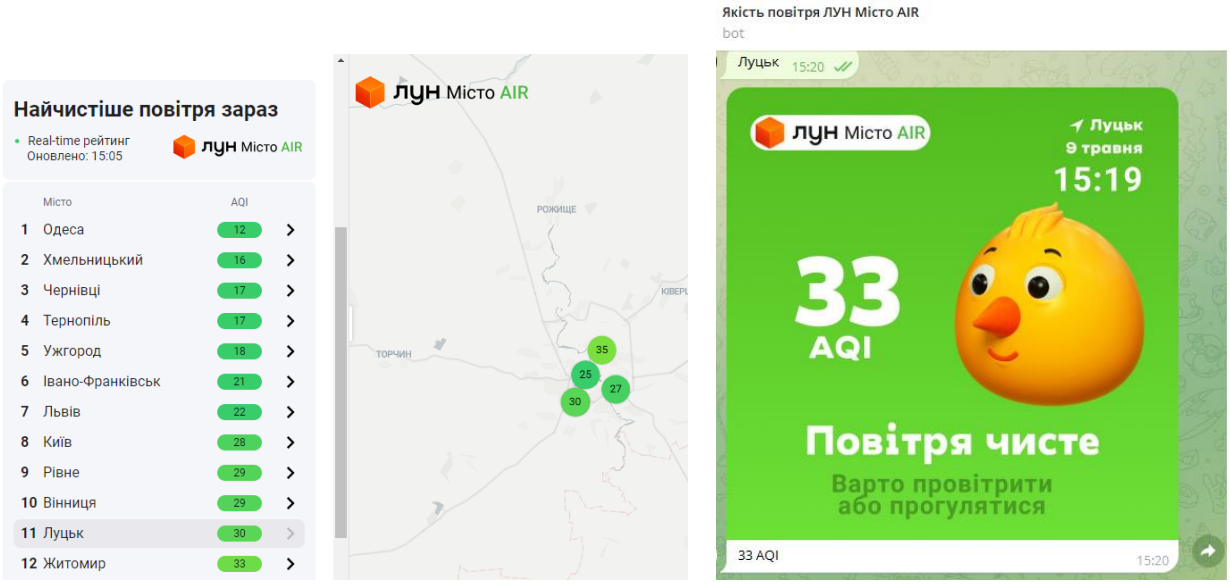


Рисунок 1.6 – Індекс якості повітря в реальному часі на мапі світу (на прикладі міста Луцька)

Одною з найбільш відомих та популярних в Україні є платформа ЛУН Місто [24], створена командою української IT-компанії ЛУН разом з науковцями Факультету радіофізики, електроніки та комп’ютерних систем КНУ ім. Шевченка. Результати монітрингу відображаються у вигляді індексу якості

повітря – Air Quality Index (AQI), який використовується у різних країнах світу, але спочатку був розроблений в США, Агенцією з охорони довкілля. Чим нижче значення індексу AQI, тим чистішим вважається повітря. Показники виводяться на карту (https://misto.lun.ua/air/) в режимі реального часу, доступні також боти у Telegram (https://t.me/aqualitybot) та Viber (https://chats.viber.com/air-now), є віджет для iOS. Сервіси ЛУН Місто AIR (рисунок 1.7) доступні користувачам в режимі реального часу з телефону та комп'ютера.



а) б)

Рисунок 1.7 – Сервіси ЛУН Місто AIR: а) – веб-карта; б) Telegram-бот

Хорошим прикладом реалізації IT-продуктів, спрямованих на покращення інформування про якість повітря в Україні, є проєкт EcoCity [3], над яким працюють починаючи з 2017 року ряд громадських організації України в партнерстві з громадською організацією з Чехії «Арніка» (Прага). Одним із осередків розвитку цього проєкту в Україні є місто Івано-Франківськ (громадська організація «Фрі Ардуіно» та її керівник Олексій Трелевський, який залучає молодь та студенство до розвитку проєкту). Також до розвитку проєкту доклали зусилля громадські організації міста Дніпро: «Зелений світ – Друзі Землі» та «Центр Екологічного Моніторингу», які активно звертають увагу громадськості до досягнення цілей сталого розвитку. В даний час ця команда (з

2024 року) починає новий дворічний проєкт «Зелена відбудова України: стале відновлення постраждалих від війни регіонів», який передбачає просування та підтримку зелених технологій [25].

Історія розвитку проєкту EcoCity прослідковується з гуртка Олександра Аронця (Івано-Франківськ), де молодь вивчала електроніку та робототехніку починаючи з Arduino, на етапі впровадження системи моніторингу було реалізовано інтерфейс у вигляді сайту (рисунок 1.8), на даний час розробники мають свій інтернет-магазин (https://beegreen.com.ua/), де продають пристрої та деталі для моніторингу якості повітря, а також разом з партнерами видали електронну публікацію [26], яка вільно поширюється та містить рекомендації щодо параметрів моніторингу та шкалу Українського індексу якості повітря. Також в 2024 році було розроблено додаток EcoCity для Andoid та для iOS. Додаток містить весь функціонал раніше розробленого сайту, має можливість отримувати інформацію з понад 250 власних станцій та деяких партнерських (наприклад від ЛУН Місто), також є можливість додати свою станцію, налаштувати параметри сповіщень. До того вони здійснювали оповіщення через телеграм-бот (Radiation and Smog Alarm), який мав більш обмежений функціонал у порівнянні з додатком (рисунок 1.9).

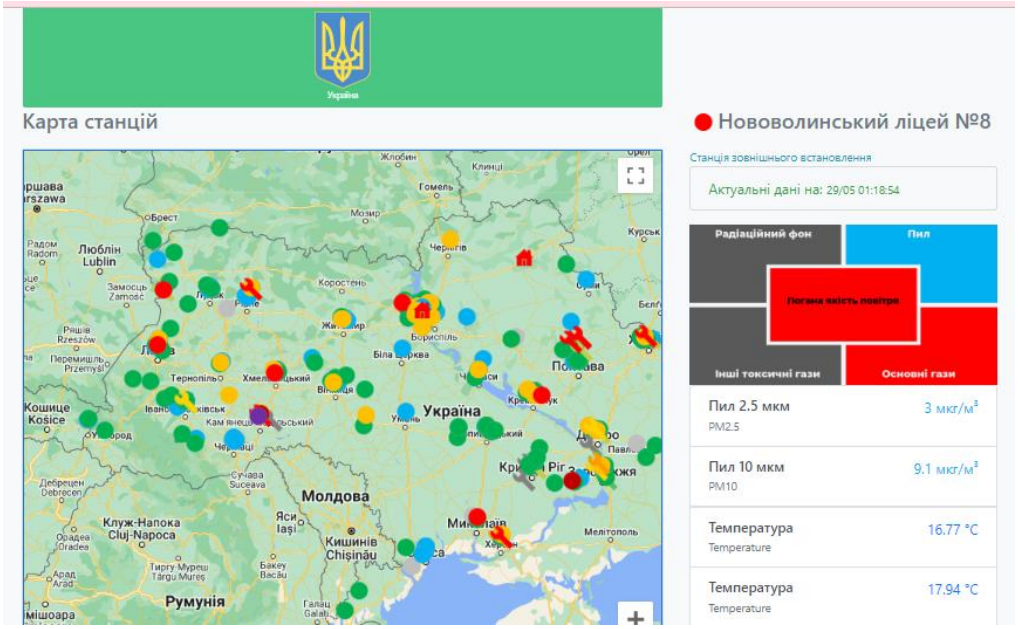


Рисунок 1.8 – Карта метеорологічних станцій проєкту EcoCity

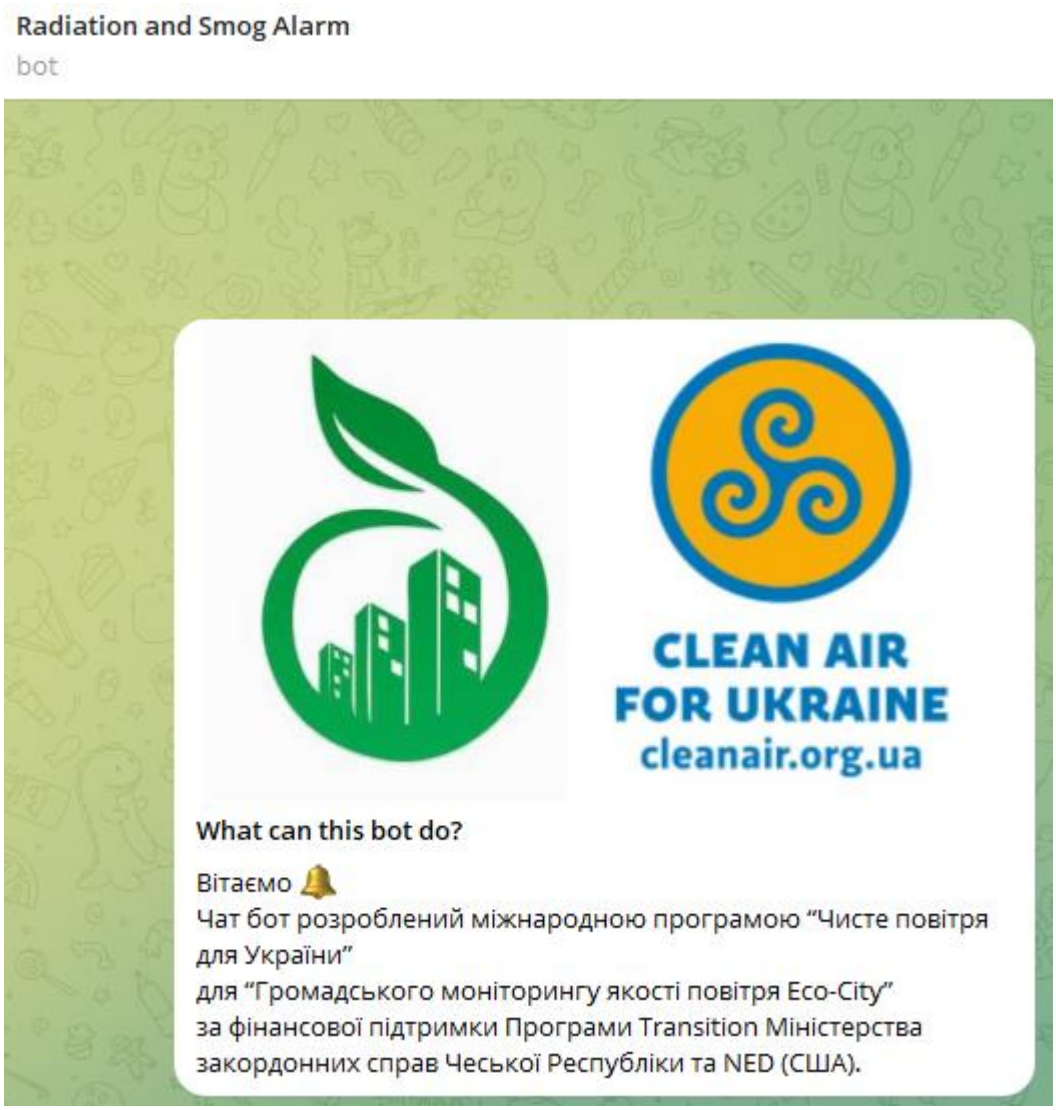


Рисунок 1.9 – Телеграм-бот з оповіщенням про стан повітря

РОЗДІЛ 2
ВИБІР АПАРАТНОЇ ТА ПРОГРАМНОЇ БАЗИ ДЛЯ ПРОЄКТУ

2.1 Сенсори для вимірювання якості повітря

Сенсор газу – це електронний пристрій, який застосовують для виявлення певного газу в повітрі. Сенсори газу бувають різних розмірів та форм, дуже часто вони стають частинами схем, які працюють разом з мікроконтролерами. Існує кілька серій газових сенсорів, які відіграють досить важливі ролі у різних сферах:

– серія датчиків газу MQ;
– серія датчиків газу Figaro TGS;
– серія Alphasense B4;
– серія SGX Sensortech MiCS.

2.1.1 Будова та принцип роботи сенсорів серії MQ

Газові сенсори серії MQ – недорогі та популярні аналогові сенсори, саме тому вони добре підходять для проєктів інтернету речей на основі мікроконтролерів, в тому числі в системах моніторингу якості повітря, виявлення витоків газу та інших цілей. Вони не лише доступні та прості у використані, але й здатні виявляти широкий спектр газів.

Принцип дії таких сенсорів електрохімічний, тобто вони змінюють свій опір (провідність) під час впливу певних газів. Вони складаються з нагрівача і електрохімічного сенсора. Коли газ контактує з сенсором, він адсорбується на каталітичному покритті, що викликає зміну опору напівпровідникового шару. Зміна опору цього шару пропорційна концентрації газу. Датчик опору працює як дільник напруги (рисунок 2.1). Опір перетворюється на електричний сигнал за допомогою мікросхеми. Саме цей сигнал передається на вхід мікроконтролера або іншого електронного пристрою.

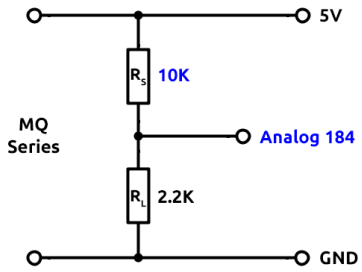


Рисунок 2.1 – Принцип отримання аналогового сигналу з опору для сенсора серії MQ

Сенсори цієї серії працюють від 5 В (інколи від 2 В) постійного струму та споживають приблизно 800 мВт (160 мА). Коли повітря чисте, опір становить 10 кОм і він зменшується, коли виявляються гази.

Так як всередині сенсорів є обігрівач, то вони покриті двома шарами тонкої сітки з нержавіючої сталі («антивибухова мережа»), щоб при контакті з легкозаймистими газами не сталося вибуху. Ще одна функція куполу з сітки – захист сенсора (чутливого елементу) та фільтрування зважених частинок, щоб лише газоподібні елементи проходили через камеру.

Затискне кільце з мідним покриттям кріпить сітку до решти корпусу. Під захисною сіткою мітиться чутливий елемент і шість сполучних ніжок, які утворюють структуру у формі зірки (рисунок 2.2). Два із шести контактів (на рисунку позначено як Н) призначені для нагрівання чутливого елемента та з’єднані разом нікель-хромовою котушкою. Ще чотири сигнальні дроти (на рисунку позначено як А і В) з’єднані платиновими проводами. Ці дроти з’єднані з корпусом чутливого елемента та передають незначні коливання струму, що протікає через чутливий елемент.

Рисунок 2.2 – Будова типового сенсора серії MQ

Сенсор серії MQ має чотири контакти (рисунок 2.3).

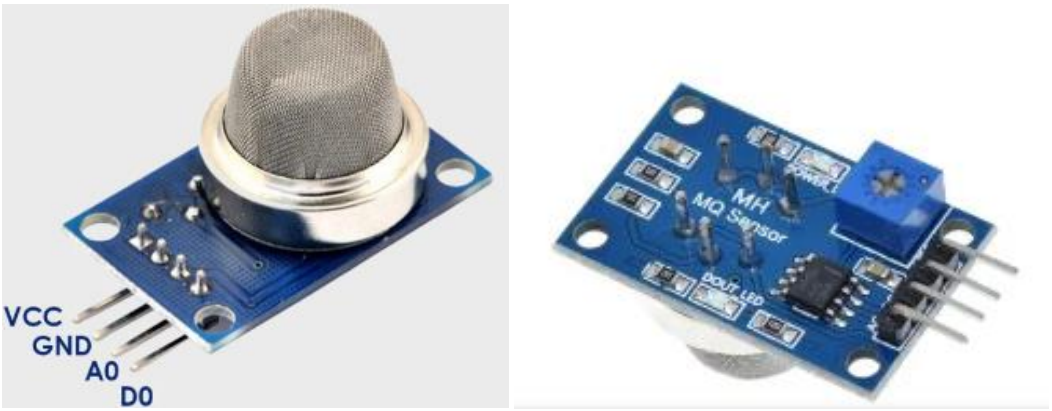


Рисунок 2.3 – Зовнішній вигляд та піни модуля сенсора серії MQ

Контакт VCC забезпечує живлення, його потрібно підключено до 5 В мікроконтролера.

GND – контакт заземлення, його потрібно підключити до контакту GND мікроконтролера (0 В).

D0 – цифровий вихідний контакт, який вказує на наявність шкідливих газів у повітрі. При виявленні високої концентрації газу цей контакт видає сигнал LOW, а коли повітря чисте – сигнал HIGH. За допомогою вбудованого потенціометра можна регулювати порогове значення концентрації шкідливих газів та виконувати калібрування сенсора.

A0 – аналоговий вихідний контакт передає напругу в аналоговому вигляді, пропорційну концентрації газу. При збільшенні концентрації газу вихідна напруга теж зростає.

Сенсор MQ додатково має два світлодіодні індикатори:

– світлодіод PWR є індикатором живлення. Він світиться коли на датчик надходить живлення, тобто коли сенсор працює;

– світлодіод DO-LED під’єднано до контакту DO сенсора, він призначений для візуального представлення концентрації газу на основі значення, що надходить від контакту DO. Коли є шкідливі домішки, які перевищують встановлений поріг, що регулюється потенціометром, то вихід DO

встановлюється на LOW і вмикається цей індикатор (світлодіод світиться), а коли шкідливих газів немає – світлодіод гасне.

Ці сенсори часто використовуються в системах безпеки, проєктах, пов’язаних з домашньою автоматизацією, навчальних проектах та інших додатках завдяки через низьку вартість та просту інтеграцію.

Моделі сенсорів серії MQ наведено на рисунку 2.4, а їх основні характеристики – в таблиці 2.1.

Рисунок 2.4 – Моделі MQ-сенсорів [7]

Таблиця 2.1 – Основні характеристики MQ-сенсорів

Модель сенсора	Чутливі гази	Діапазон вимірювання, ppm	Напруга живлення	Типовий час відгуку	Особливості
MQ-2	метан, пропан, бутан, дим	300-10000	5V	< 10 с	димові датчики, газові витоки
MQ-3	алкоголь, бензин, CO	20-2000	5V	< 10 с	алкотестери, виявлення парів спирту
MQ-4	метан, природний газ	200-10000	5V	< 10 с	виявлення витоків газу
MQ-5	природний газ, LPG, CO, CH_4, алкоголь	200-10000	5V	< 10 с	детектори газу, системи безпеки
MQ-6	пропан, бутан, LPG	200-10000	5V	< 10 с	газові витоки, домашня безпека
MQ-7	вуглекислий газ (CO)	20-2000	5V	< 10 с	моніторинг якості повітря, детектори CO
MQ-8	водень (H_2)	100-10000	5V	< 10 с	виявлення витоків водню
MQ-9	CO, метан, пропан	10-1000 CO 100-10000 CH_4/C_3H_8	5V	< 10 с	детектори CO, газові витоки
MQ-131	озон (O_3)	10-1000	5V	< 60 с	моніторинг якості повітря, виявлення витоків O_3
MQ-135	аміак (NH_3), спирт, бензол, дим	10-1000	5V	< 10 с	моніторинг якості повітря, промислові додатки
MQ-136	сірководень (H_2S)	1-200	5V	< 60 с	моніторинг якості повітря, виявлення витоків H_2S в промислових установках

Продовження таблиці 2.1

Модель сенсора	Чутливі гази	Діапазон вимірювання, ppm	Напруга живлення	Типовий час відгуку	Особливості
MQ-137	аміак (NH_3)	10-300	5V	< 60 с	моніторинг якості повітря, виявлення витоків NH_3 в промислових установках
MQ-138	толуол, бензол, алкоголь, ацетон, етанол, інші органічні пари	10-1000	5V	< 60 с	моніторинг якості повітря в приміщеннях, виявлення витоків органічних речовин у промислових установках
MQ-214	метан (CH_4)	100-10000	5V	< 60 с	моніторинг якості повітря, виявлення витоків CH_4 в промислових установках

2.1.2 Серія датчиків газу Figaro TGS

Серія датчиків газу Figaro (Taguchi Gas Sensors – TGS) – це сенсори, які широко використовуються для виявлення різних газів у повітрі. Вони мають високу чутливість, стабільні та надійні, тому добре підходять для використання в системах моніторингу якості повітря, а також в інших IOT-проєктах, промислових додатках та в системах безпеки.

Принцип їх дії подібний до сенсорів серії MQ, проте їх чутливість та стабільність роботи вища в порівнянні з сенсорами серії MQ, але й ціна також вища. Тому зазвичай MQ-сенсори застосовуються в домашніх умовах, системах безпеки та в навчальних проєктах та прототипах, а TGS-сенсори добре підходять для промислових додатків та професійних моніторингових систем.

Серія TGS має сенсори, чутливі до різних газів (таблиця 2.2).

Таблиця 2.2 – Taguchi Gas Sensors

Модель сенсора	Чутливі гази
TGS822	органічні розчинники, етанол, чадний газ
TGS2610	зріджений нафтовий газ (LPG) і бутану
TGS2611	метан і природний газ
TGS2620	Алкоголь та органічні розчинники
TGS2600	чадний газ і метан
TGS2602	гази, які спричиняють неприємний запах, такі як аміак і сірководень
TGS813	метан, бутан, пропан та інші горючі гази

Схема підключення типового сенсора серії TGS наведена на рисунку 2.5.

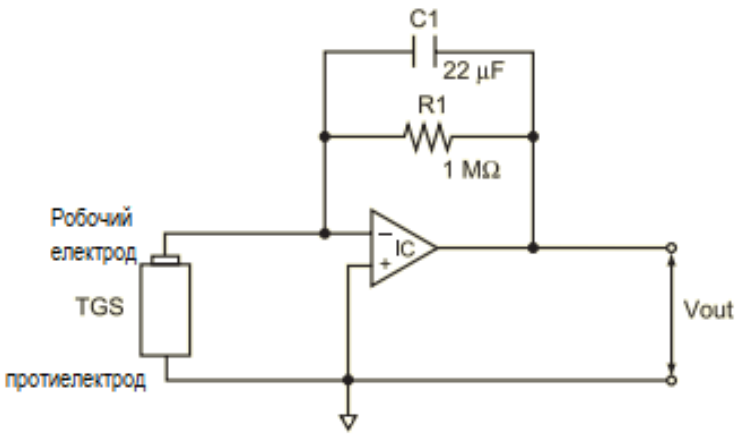


Рисунок 2.5 – Схема підключення сенсора TGS

2.1.3 Серія сенсорів Alphasense B4

Серія сенсорів Alphasense B4 [1] – це напівпровідникові датчики, спеціально розроблені для вимірювання різних газів у повітрі. Вони мають високу чутливість та точність, що робить їх популярними серед дослідників, інженерів та екологів.

Порівняно з сенсорами, розглянутими вище, вони мають свої переваги: висока чутливість і точність при вимірюванні концентрацій газів; надійність при тривалому використанні; менша чутливість до температури (стабільно працюють при від -20°C до +50°C) та вологості (стабільно працюють при від 0% до 95%); ширший спектр газів для вимірювання (включаючи токсичні гази).

Серед недоліків можна виділити високу вартість та можливі складнощі під час інтеграції. Приклад застосування сенсорів Alphasense B4 для моніторингу викидів котлів на твердому паливі чеськими дослідниками наведено в праці [2].

2.1.4 Серія SGX Sensortech MiCS

Серія датчиків MiCS виробляється компанією SGX Sensortech [9] та використовується для вимірювання різних газів у повітрі. Ці датчики відрізняються високою чутливістю, компактним дизайном та широким спектром застосувань. Працюють за технологією Metal Oxide Semiconductor (металооксидний напівпровідник – МОП), мають час відгуку менше 10 секунд і працюють у діапазоні температур від -30°C до 85°C, тобто можуть використовуватися в різних умовах довкілля.

На рисунку 2.6 наведено приклад сенсора серії MICS – модуль сенсора MICS-4514 для виявлення чадного газу CO (в діапазоні 1-1000ppm), діоксиду азоту NO_2 (0,05-10 ppm), етанолу C_2H_5OH (10-500 ppm), водню H_2 (1-1000 ppm), аміаку NH_3 (до 500ppm), метану CH_4 (> 1000 ppm), пропану C_3H_8 (> 1000 ppm), ізобутану C_4H_{10} (> 1000 ppm).

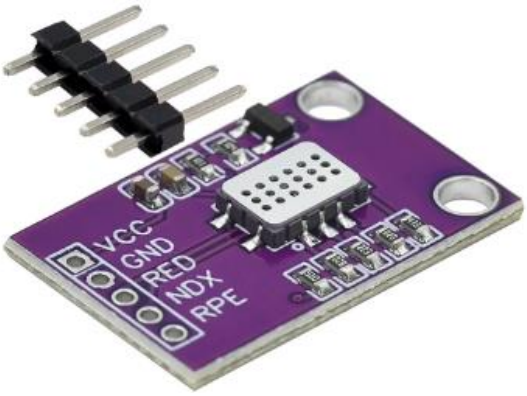


Рисунок 2.6 – Модуль датчика газу MICS-4514

Серія сенсорів MiCS має різні моделі, кожна з яких призначена для вимірювання конкретного типу газів. Для вимірювання якості повітря найпоширенішими є:

– MiCS-2610 – сенсор, призначений для вимірювання концентрації оксиду вуглецю (CO), часто використовується для моніторингу рівня CO у промислових та міських середовищах;

– MiCS-2710 – модель сенсора, призначена для вимірювання аміаку (NH_3), може знадобитися для виявлення аміаку у промислових процесах, а також у вентиляційних системах для контролю рівня аміаку у приміщеннях;

– MiCS-5524 – сенсор, який може вимірювати різні гази: оксид вуглецю (CO), метан (CH_4) та аміак (NH_3). Ця універсальна модель широко використовується для моніторингу якості повітря в різних середовищах;

– MiCS-5525 – модель, яка також призначена для вимірювання оксиду вуглецю (CO), метану (CH_4) та аміак (NH_3), але вона має додаткові характеристики, які роблять її популярною для вимірювання газових забруднень у саме житлових приміщеннях. Завдяки точності та надійності вимірювань MiCS-5525 часто називають покращеною версією MiCS-5524.

Це лише кілька прикладів моделей датчиків MiCS. Кожна з них має свої унікальні характеристики та може бути використана для вимірювання певних типів газів у повітрі.

2.2 Вибір мікроконтролера

Мікроконтролери отримують інформацію від датчика газу та керують іншими елементами схеми. Мікроконтролер – це інтегральна схема, яка здатна виконувати програми.

На відміну від персональних комп’ютерів, мікроконтролер поєднує в одному кристалі функції процесора та периферійних пристроїв, він містить оперативну пам’ять і постійно запам’ятовуючий пристрій для зберігання коду та даних, проте має значно менші обчислювальні ресурси.

В сфері інтернету речей (IoT), яка є досить популярною і в науковій, і в промисловій сферах, дуже часто використовують мікроконтролери ESP32 або ESP8266. Це мікроконтролери, розроблені компанією Espressif Systems [12].

Вони обидва є відносно не дорогими та оснащені модулями Wi-Fi, що робить їх підходящими для IoT-проектів та домашньої автоматизації.

Вони обидва мають 32-розрядний процесор і GPIO (General-purpose input/output – інтерфейс введення/виведення загального призначення), що підтримує різні протоколи, такі як UART, ADC, DAC, SPI, I2C, і PWM.

Наявність модуля Wi-Fi відрізняє їх від інших мікроконтролерів, таких як Arduino, адже за відносно низьку ціну ми можемо віддалено керувати пристроями та контролювати їх через Wi-Fi або Bluetooth (у випадку ESP32). Якщо ж для проєкту бездротові можливості не потрібні, ми можемо використовувати ESP32/ESP8266 для керування входом і виходом, подібно до Arduino.

Хоча технічно термін «ESP32» позначає саме чіп, розробники часто використовують його як синоніми для позначення і модулів, і плат розробки, які містять цей чіп. У серії ESP32 доступні різні моделі мікросхем, зокрема: ESP32-D0WDQ6 (та ESP32D0WD), ESP32-D2WD, ESP32-S0WD, серія ESP32 S, серія ESP32-C, серія ESP32-H, система в упаковці (SiP) – ESP32-PICO-D4.

ESP8266 – комплексна схема системи на кристалі, яка функціонує як автономний модуль Wi-Fi, оснащений стеком протоколів IP/TCP. Через Wi-Fi-з’єднання ESP8266 забезпечує доступ для будь-якого мікроконтролера.

Основна роль ESP8266 – розміщення програм або розвантаження всіх мережевих функцій Wi-Fi. Його конструкція та експлуатаційна довговічність дозволяє йому стабільно працювати навіть у складних промислових умовах (в тому числі завдяки широкому діапазону робочих температур). Крім того, він побудований на енергоефективній архітектурі та має 32-розрядний процесор Tensilica. Завдяки повному стеку TCP/IP модуль полегшує обробку даних і дозволяє зчитувати та контролювати GPIO.

ESP32 є наступником ESP8266, маючи додаткове ядро ЦП, швидший Wi-Fi, розширені GPIO і підтримку Bluetooth 4.2 і Bluetooth Low Energy. Крім того, ESP32 містить сенсорні штифти для пробудження від глибокого сну,

інтегрований датчик Холла та, у попередніх версіях, вбудований датчик температури (хоча останні версії не мають цієї функції).

Обидві плати є економічно ефективними, проте ESP32 трохи дорожча. ESP32 зазвичай коштує від 6 до 12 доларів, тоді як ESP8266 можна знайти в діапазоні від 4 до 6 доларів (ціни актуальні на станом на весну 2024 року та можуть відрізнятися залежно від продавця та моделі).

У таблиці 2.3 наведено відмінності між мікросхемами ESP32 і ESP8266.

Таблиця 2.3 – Основні характеристики мікросхем ESP32 і ESP8266

Технічні характеристики	ESP32	ESP8266
Ядро (MCU)	двоядерний (Xtensa Dual-Core 32-bit LX6 із 600 DMIPS)	одноядерний (Xtensa 32-bit L106)
802.11 b/g/n Wi-Fi	HT40	HT20
Bluetooth	Bluetooth 4.2 і BLE	немає
Типова частота	160 МГц – 240 МГц	80 МГц
Вбудована пам’ять	Flash до 16 MB	Flash до 16 MB
SRAM	є	немає
Спалах	є	немає
GPIO	34-36	17
Hardware /Software PWM	немає / 16 каналів	немає / 8 каналів
SPI/I2C/I2S/UART	4/2/2/2	2/1/2/2
АЦП	12-бітний	10-бітний
CAN	є	немає
Інтерфейс Ethernet MAC	є	немає
Сенсор дотику	є	немає
Температурний сенсор	є (старіші версії)	немає
Датчик Холла	є	немає
Робоча температура	-40ºC до 125ºC	-40ºC до 125ºC

Проаналізувавши дані, зведені в таблиці 2.3, можемо зробити висновок, що ESP32 добре підходить якщо нам потрібні будуть більші обсяги пам'яті, підтримка Bluetooth або більша кількість GPIO, а ESP8266 – хороший вибір для менших проектів з обмеженими вимогами щодо пам’яті та функціональності або для створення навчальних зразків та прототипів проєктів.

Для практичного тестування та створення прототипів використання чистих мікросхем ESP32 або ESP8266 може бути складним завданням. Використовують плати, розроблені для цих чіпів, адже вони є зручнішими, забезпечують основну схему живлення чіпа, безперебійне підключення до комп'ютерів, просте завантаження коду, контакти периферійного підключення, вбудовані світлодіоди живлення та керування, а також інші корисні функції.

Плати розробки, які зазвичай використовуються: плата розробки ESP32 DEVKIT DOIT і комплект ESP8266 ESP-12E NodeMCU. Детальніше зупинимося на останньому варіанті, бо це доступний варіант для проєктів, де важлива простота використання та низька вартість.

NodeMCU – це недорога IoT-платформа з відкритим кодом, плата розробника на базі чіпа ESP8266 (версія ESP12E) або на основі чіпа ESP32. Вона забезпечує легкий спосіб роботи з цими чіпами завдяки вбудованій підтримці мови програмування Lua та підтримці середовища розробки Arduino IDE.

Nodemcu V3 Esp8266 працює на чипі ESP8266EX, частота 26 МГц, MAC: 48:55:19:f6:e2:3d, розмір вбудованої пам'яті 4 MB, 16 контактів GPIO, послідовний периферійний інтерфейс (SPI) [8].

2.3 Програмне забезпечення проєкту

Arduino IDE – офіційна платформа для розробки та завантаження коду на мікроконтролери Arduino, проте це середовище можна використовувати і для програмування мікроконтролерів ESP32 і ESP8266. Обидві плати сумісні з Arduino IDE. Вони спільно використовують ту саму бібліотеку та набір команд, але важливо зазначити, що певні бібліотеки можуть виключно підтримувати або ESP32, або ESP8266, що вимагає незначних коригувань.

Платформа Arduino IDE доступна для Windows, macOS та Linux, що дає змогу розробникам працювати на будь-якій операційній системі. Середовище Arduino IDE можна вільно завантажити з офіційного сайту [10]. Існує також

Arduino Web Editor, який дозволяє писати коди прямо в браузері без необхідності встановлення додаткового програмного забезпечення.

Arduino IDE використовує спрощену версію мови C++ з додатковими бібліотеками, що полегшує програмування навіть для початківців. Підсвічування синтаксису та автодоповнення допомагають уникати помилок та спрощують написання коду. Є можливість компіляції коду для перевірки на наявність помилок. Після перевірки код завантажується на плату через інтерфейс USB.

В середовищі Arduino IDE є монітор, який зручно використовувати для налагодження та взаємодії з платою через послідовний інтерфейс. Тут здійснюється відображення даних, які надходять від плати, та відбувається відправка команд.

Саме менеджер плат дозволяє встановлювати додаткові плати та інструменти для розробки, в тому числі і ESP. Менеджер бібліотек дозволяє шукати, встановлювати та оновлювати бібліотеки безпосередньо з IDE.

Ще один спосіб програмування плат ESP32 і ESP8266 – використання мікропрограмного забезпечення MicroPython.

MicroPython – нова інтерпретація Python 3, розроблена спеціально для мікроконтролерів та вбудованих систем. Він дуже нагадує звичайний Python, тому добре підходить розробникам, які володіють навичками програмування на Python. В MicroPython більшість скриптів мовою Python сумісні з обома платами, на відміну від Arduino IDE. Це означає, що найчастіше той самий скрипт можна взаємозамінно застосовувати як для ESP32, так і для ESP8266.

PlatformIO – це сучасне середовище розробки для вбудованих систем, яке підтримує широкий спектр плат (понад 800 плат з різними мікроконтролерами), пропонує потужні інструменти для розробки, налагодження та тестування програмного забезпечення для вбудованих систем. PlatformIO інтегрується з популярними редакторами коду, такими як Visual Studio Code, Atom та інші. Всі налаштування проекту зберігаються в єдиному конфігураційному файлі (platformio.ini). Інтегрований менеджер бібліотек забезпечує легке додавання та оновлення бібліотек. PlatformIO підтримує юніт-тестування для вбудованих

систем, що надає можливість написання та запуску тестів для перевірки функціональності коду. Підтримує такі популярні платформи як Arduino, ESP8266, ESP32, STM32, AVR, ARM та багато інших.

PlatformIO в порівнянні з Arduino IDE має всі ознаки сучасного середовища розробки: організація проектів, підтримка плагінів, автодоповнення коду та багато іншого. Особливістю розробки на PlatformIO є уніфікована структура проєкту для всіх платформ (рисунок 2.7).

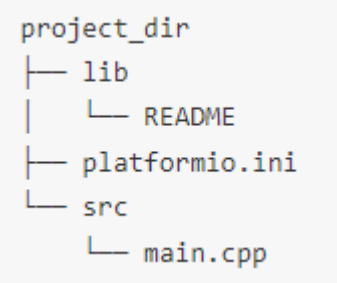


Рисунок 2.7 – Файлова структура проєкту PlatformIO

Для ESP32 компанія Espressif розробила фреймворк під назвою IoT Development Framework, відомий як ESP-IDF [4]. Його можна знайти на Github. Проект містить дуже хорошу документацію та має приклади, які можна брати за основу розробки або для тестування плати. Для зручної роботи в ESP-IDF мають бути встановлені git, python3 та pip3. Також ESP-IDF можна підключити до IDE Visual Studio Code або Eclipse у вигляді плагіну.

Менш популярне середовище Espruino. Це SDK та інтерпретатор на основі мови JavaScript, яка працює в браузері та точно емулює Node.js. Тому це середовище може бути корисними для окремих проєктів, особливо для фахівців, які працюють з мовою JavaScript.

РОЗДІЛ 3
ПРОЄКТУВАННЯ ТА ТЕСТУВАННЯ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ

3.1 Проєктування прототипу системи моніторингу

3.1.1 Схема та монтаж пристрою

Щоб відстежувати якість повітря в приміщенні спроєктовано міні-систему моніторингу якості повітря на основі технології IoT, яка відстежуватиме якість повітря через веб-сервер та передаватиме дані про відсоток забрудненості повітря на комп'ютер або смартфон, щоб ми могли легко її відстежувати. Для спрощення розуміння роботи системи покажемо її функціональну схему на прикладі одного сенсора (рисунок 3.1).

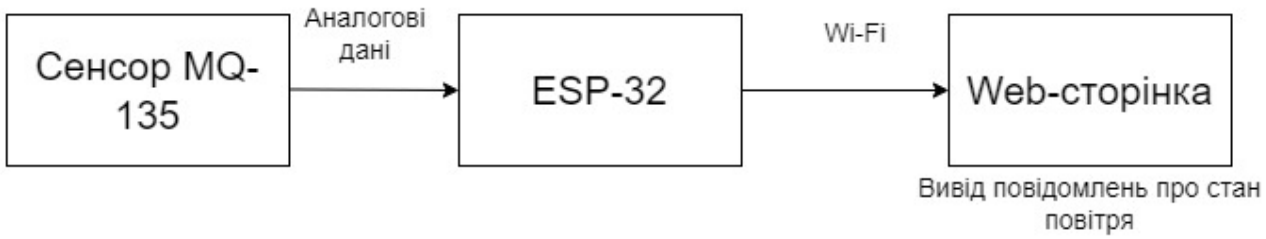


Рисунок 3.1 – Функціональна схема системи моніторингу

Сенсор MQ-135 може виявляти різні гази, включаючи аміак, оксид азоту, дим, спирт, бензин, вуглекислий газ та інші, тому він один може використовуватися для вимірювання якості повітря.

Поєднання сенсора MQ-135 та плати ESP8266 (наприклад, NodeMCU) дозволяє створити систему моніторингу якості повітря.

Для створення апаратної частини проєкту нам потрібні компоненти:

– плата розробки ESP32 (але для початку спробуємо реалізувати той самий функціонал на дешевшій платі – NodeMCU ESP8266 12E);

– модуль датчика газу MQ-135;

– макетна плата або імпровізований корпус пристрою;

– резистори, з'єднувальні кабелі;

– живлення (5V).

Якщо ми хочемо під’єднати один сенсор до плати NodeMCU ESP8266, то для цього нам знадобиться її єдиний аналоговий пін A0 (рисунок 3.2).

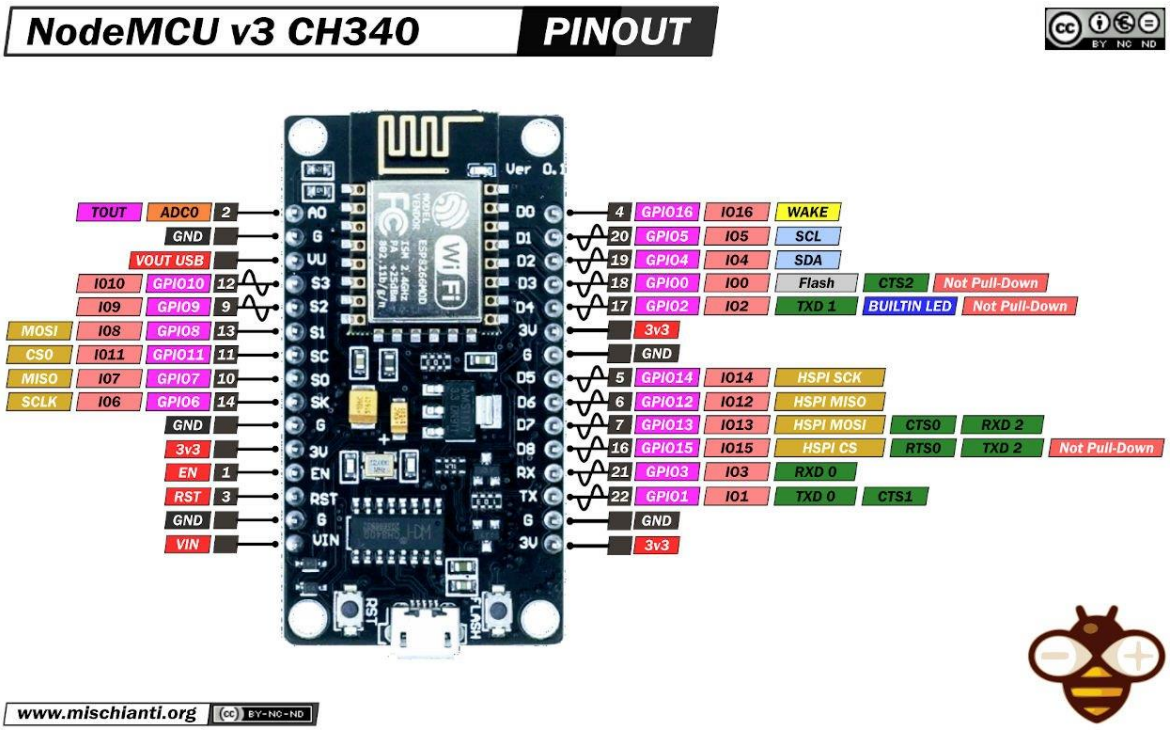


Рисунок 3.2 – Роз’єми (піни) плати ESP8266 [8]

Газовий датчик MQ135 має загалом 4 роз’єми, які чітко позначені як GND, DOUT (цифровим вихід), AOUT (аналоговий вихід), і VCC (рисунок 3.3).

Рисунок 3.3 – Зовнішній вигляд та піни модуля сенсора MQ-135

Для живлення сенсора від плати мікроконтролера потрібно пін VCC сенсора MQ-135 з'єднати з піном 3V3 (або з піном Vin як на рисунку 3.4) на ESP8266, а пін GND сенсора MQ-135 – з GND на ESP8266.

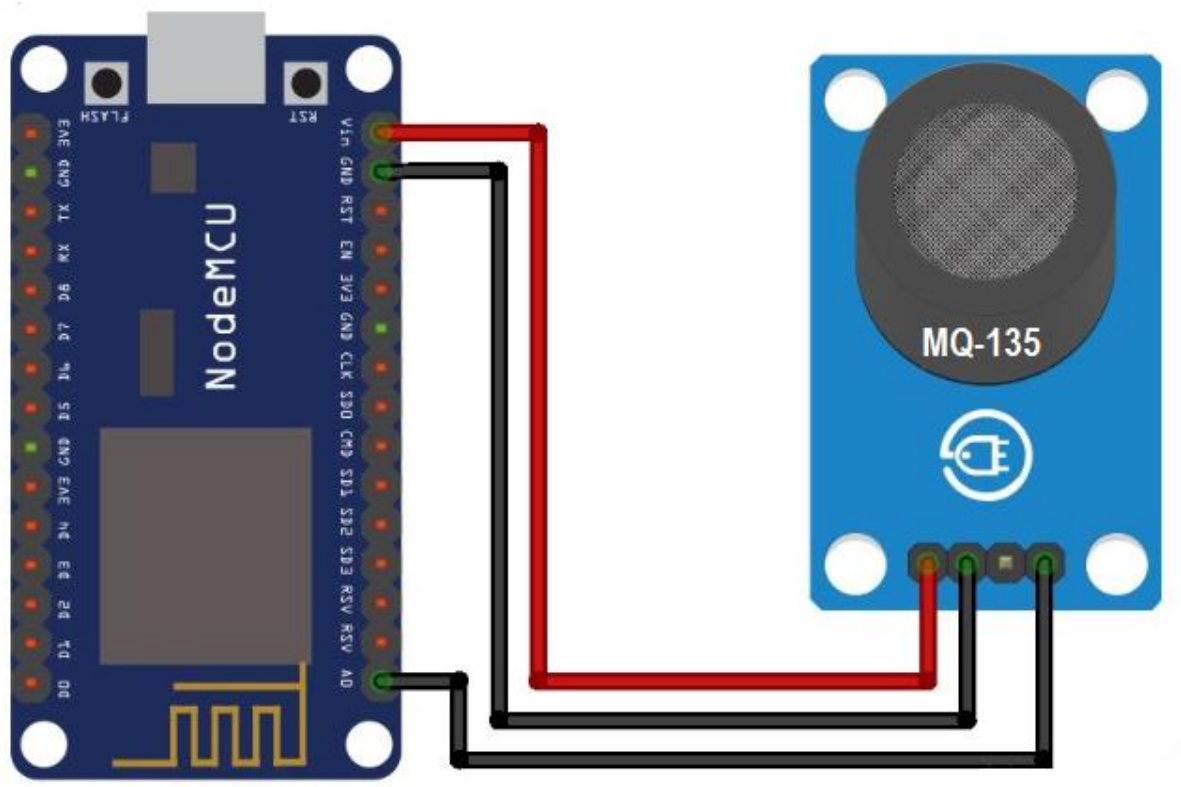


Рисунок 3.4 – Схема під'єднання сенсора MQ-135 до плати ESP8266

Для передачі вихідного сигналу від сенсора до плати мікроконтролера можна використати цифровий вихід (DO) сенсора MQ-135 підключивши його до будь-якого цифрового піну на ESP8266 (наприклад, D1, D2 і т.д), але цей спосіб використовується рідко, оскільки аналоговий вихід дає більш точну інформацію про концентрацію газів. Тому для передачі інформації від сенсора до мікроконтролера використовуємо AO (аналоговий вихід) сенсора MQ-135 з'єднавши його з аналоговим входом A0 на ESP8266.

Замість макетної плати використано старий корпус від квартирного дзвінка (рисунок 3.5). З'єднавши контакти сенсора та мікроконтролера за схемою, наведеною на рисунку 3.4 та приєднавши всі елементи до корпусу, отримали пристрій, зовнішній вигляд якого можна побачити на рисунку 3.6.

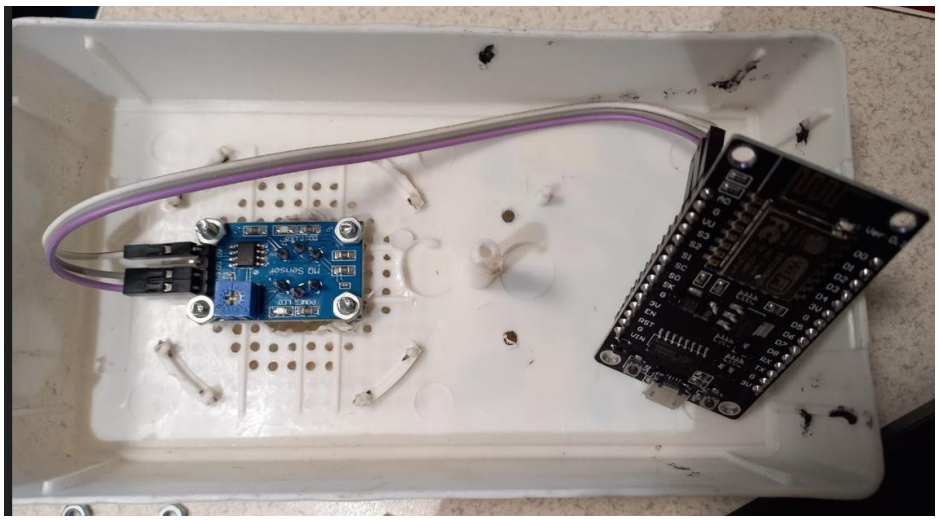
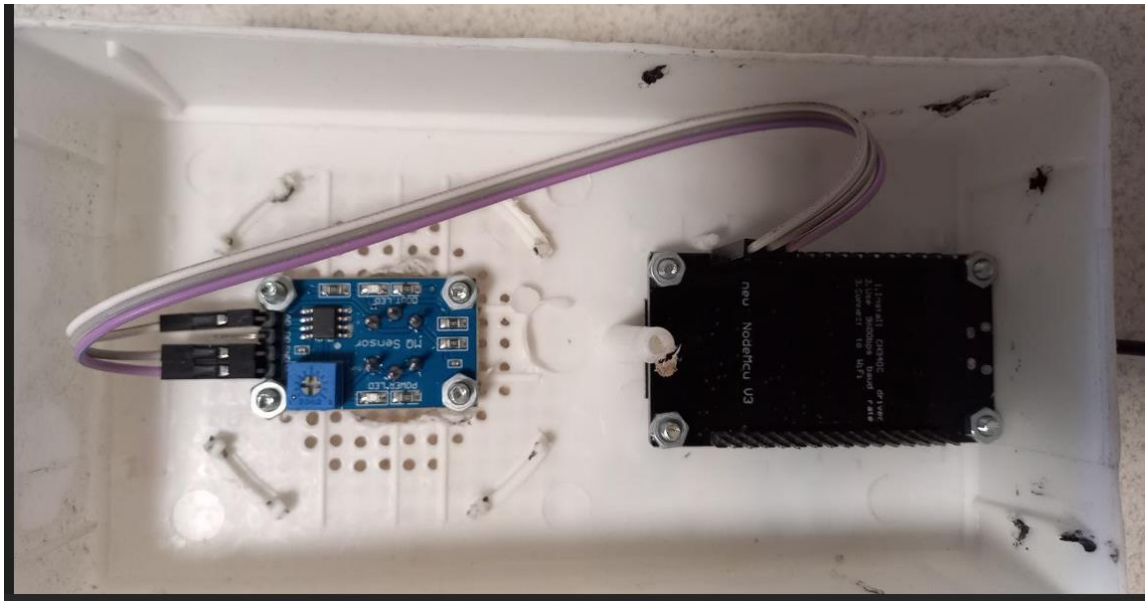


Рисунок 3.5 – Приєднання сенсора MQ-135 до корпусу



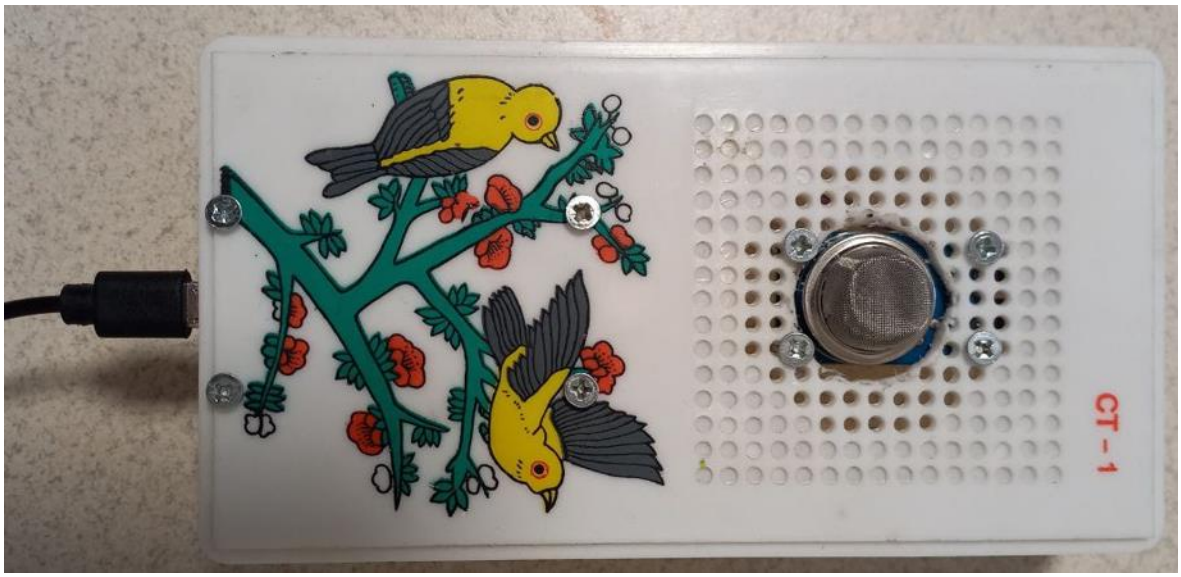


Рисунок 3.6 – Зовнішній вигляд пристрою (прототипу системи моніторингу)

3.1.2 Налаштування середовища програмування та портів

Для створення прошивки мікроконтролера було використано середовище Arduino IDE. Це середовище спочатку було призначене для програмування мікроконтролерів фірми Atmel мовою C, але в наш час в ньому можна прошивати різні контролери, в тому числі й ESP8266 (який знаходиться на нашій платі NodeMCU V3). Для цього в середовищі Arduino IDE потрібно зайти в меню «Файл»/ «Налаштування» та додати адресу JSON-файлу в полі «додаткові URL-адреси менеджера плат» (рисунок 3.7).

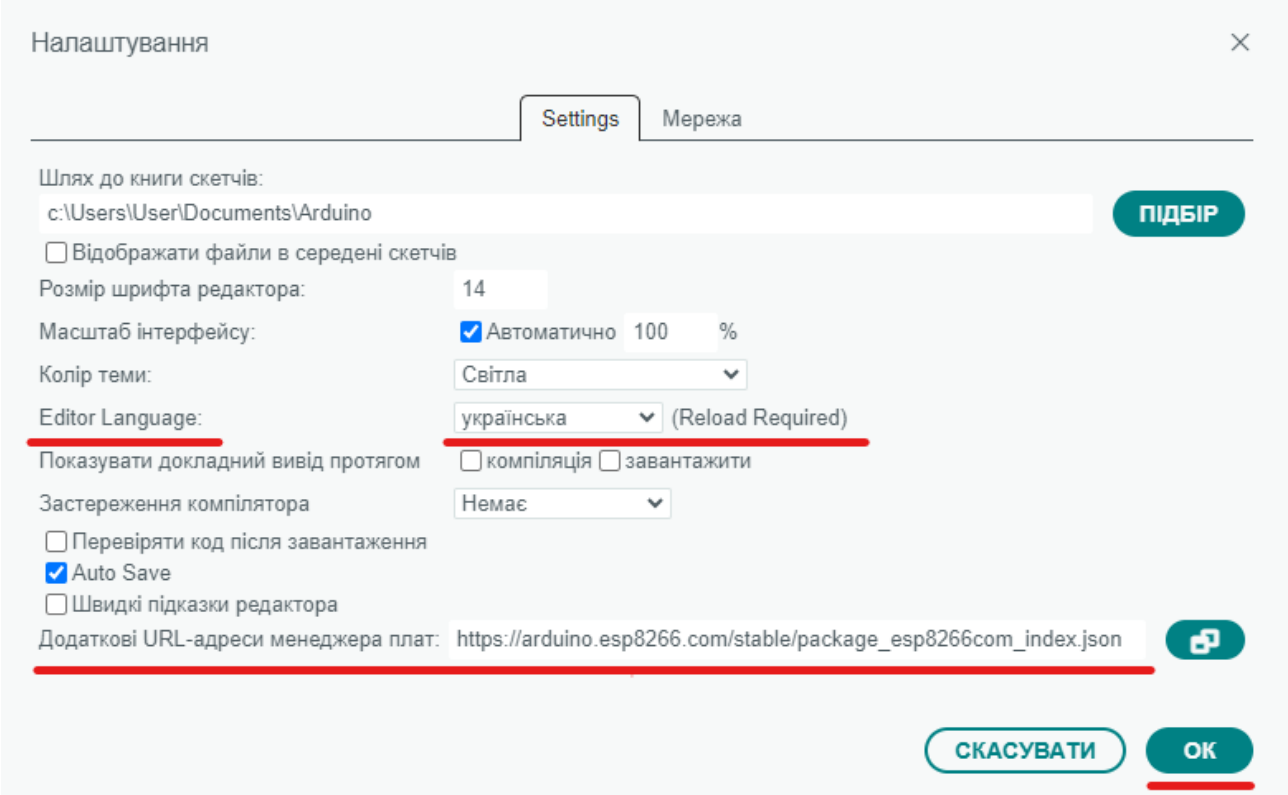


Рисунок 3.7 – Додавання в середовищі Arduino IDE JSON-файлу з налаштуваннями плати ESP8266

Після цього знаходимо в меню Інструменти/ Плата «Arduino Uno»/ Менеджер плат (рисунок 3.8), в полі пошуку вводимо «esp8266» та натискаємо «Встановити». Тоді знову заходимо в меню «Інструменти» та замість «Arduino Uno» вибираємо NodeMCU 1.0 (ESP12E Module) (рисунок 3.9).

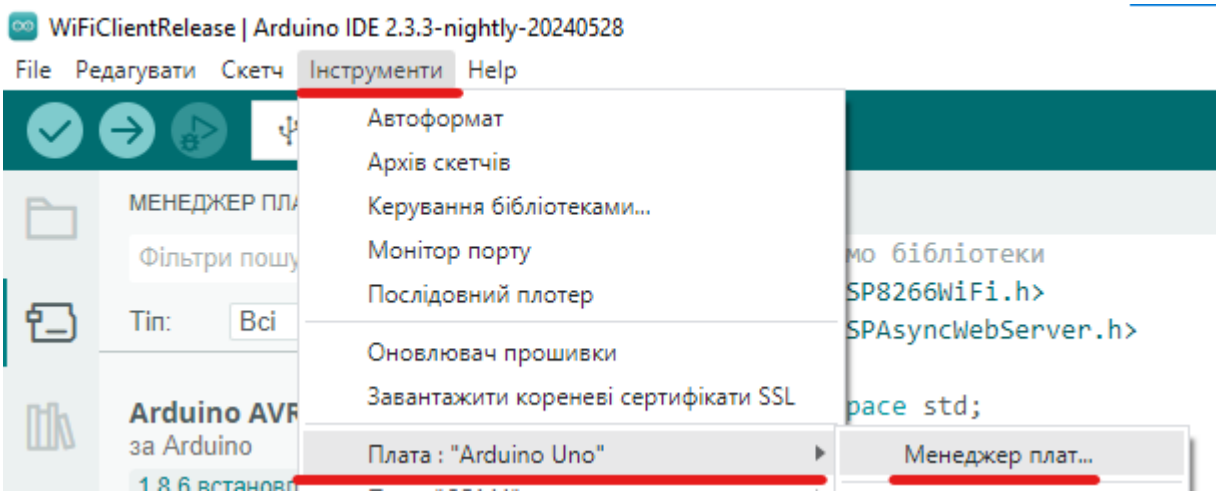


Рисунок 3.8 – Менеджер плат в середовищі Arduino IDE

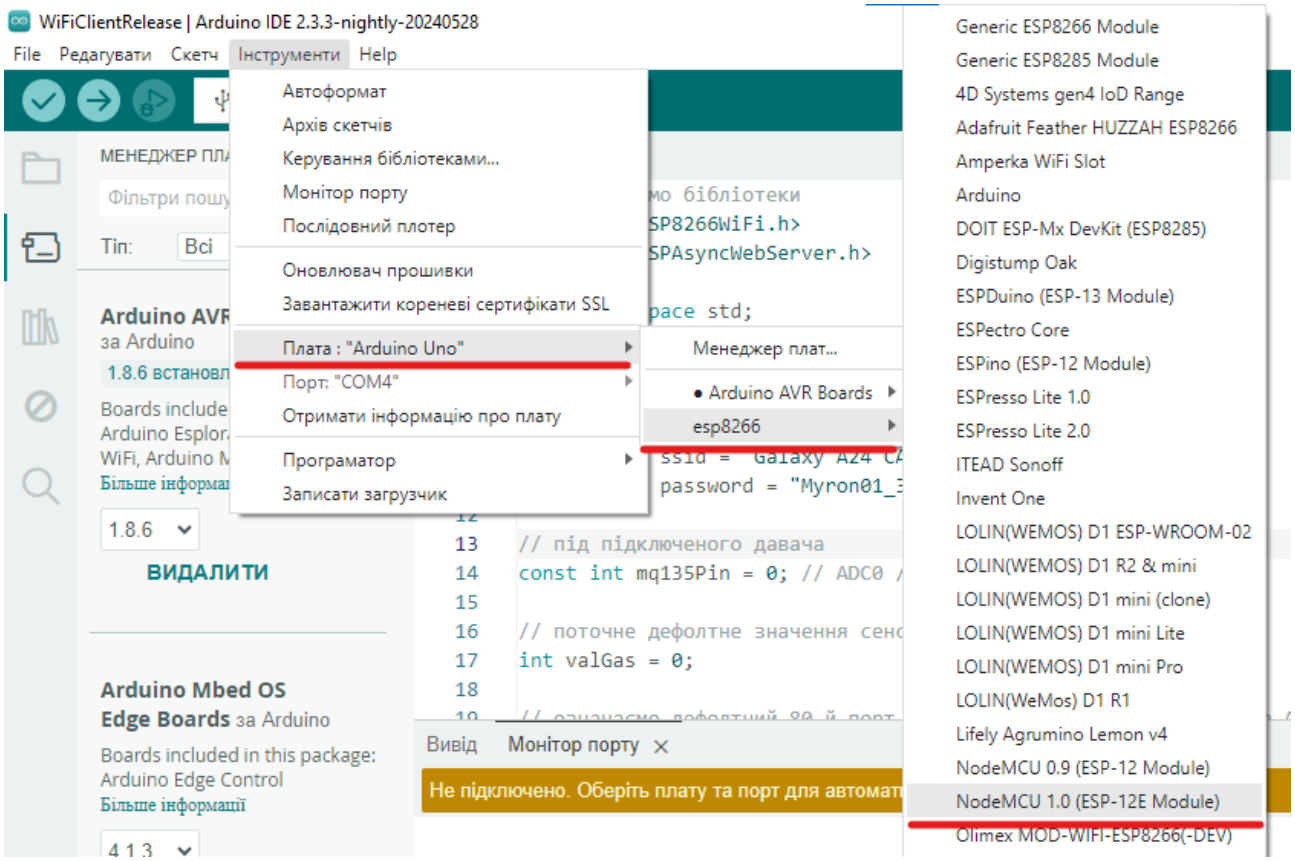


Рисунок 3.9 – Налаштування Arduino IDE для роботи з ESP12E Module

Після приєднання нашого пристрою до USB-порту комп’ютера потрібно зайти в меню «Цей ПК»/ «Керування» / «Диспетчер пристроїв» та подивитися до якого порту доєднано наш пристрій, а також властивості цього порту, зокрема на якій швидкості відбувається передача даних (рисунок 3.10).

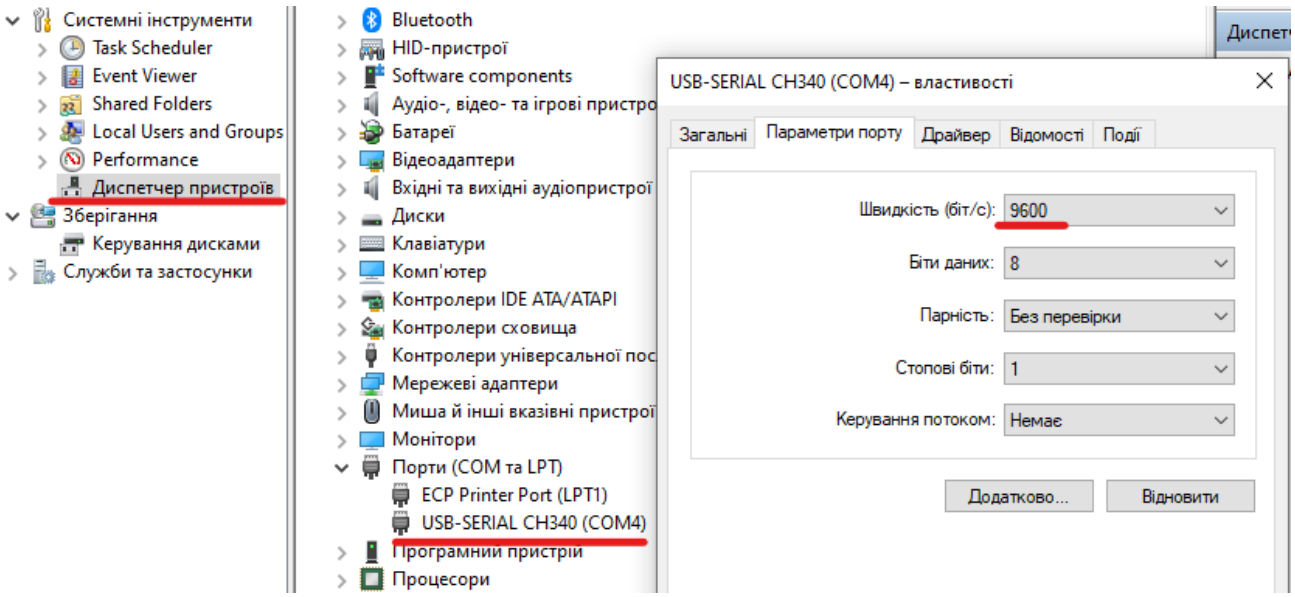


Рисунок 3.10 – Порт пристрою та його параметри

Повертаємося в середовище програмування та обираємо відповідний послідовний порт для прошивки (рисунок 3.11).

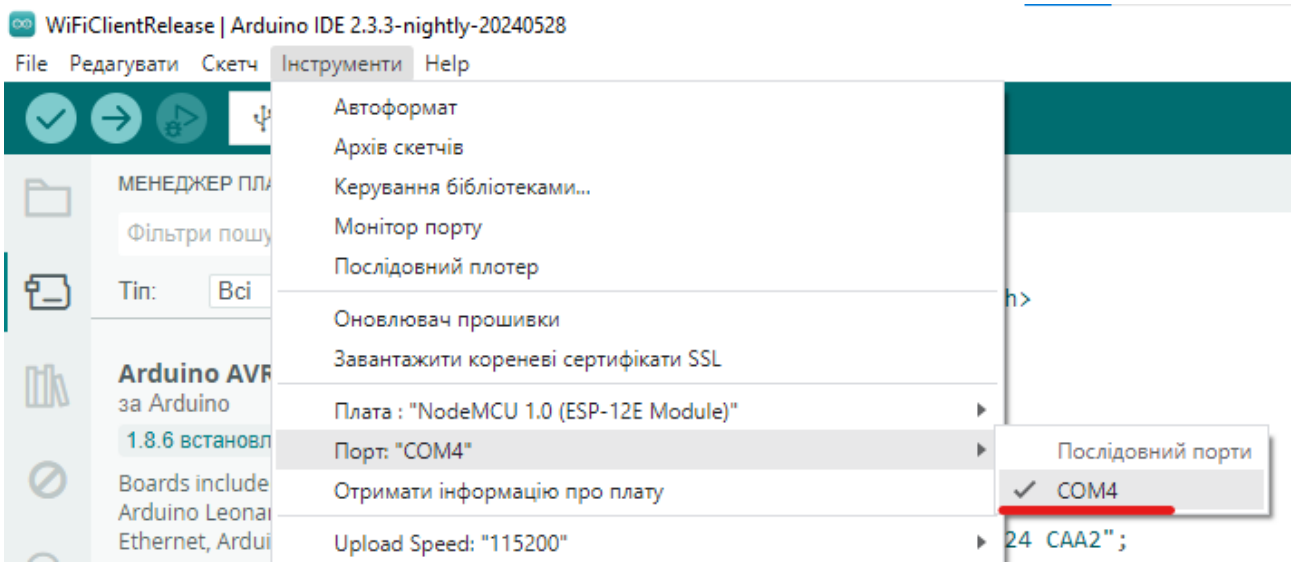


Рисунок 3.11 – Вибір порта передачі даних в середовищі Arduino IDE

3.1.3 Програмування мікроконтролера

У Arduino IDE для програмування ESP8266, позначення пінів трохи відрізняється від стандартних плат Arduino. На платах ESP8266, таких як NodeMCU, використовуються маркування, які часто не збігаються з фізичними

позначеннями на самій мікросхемі ESP8266. Для уникнення помилок під час програмування розглянемо таблицю відповідності пінів для NodeMCU.

Таблиця 3.1 – Відповідність пінів NodeMCU (ESP8266)

NodeMCU пін (позначення на платі)	GPIO пін	Фізичний пін на ESP8266	IO index	Примітка
D0	GPIO16	16	0	int ledPin = 16;
D1	GPIO5	5	1	int ledPin = 5;
D2	GPIO4	4	2	int ledPin = 4;
D3	GPIO0	0	3	int ledPin = 0;
D4	GPIO2	2	4	int ledPin = 2;
D5	GPIO14	14	5	int ledPin = 14;
D6	GPIO12	12	6	int ledPin = 12;
D7	GPIO13	13	7	int ledPin = 13;
D8	GPIO15	15	8	int ledPin = 15;
D9	GPIO3	3	9	int ledPin = 3;
D10	GPIO1	1	10	int ledPin = 1;
A0	A0	ADC0		

Ця таблиця створена на основі технічної документації до плати мікроконтролера [4] (рисунок 3.12).

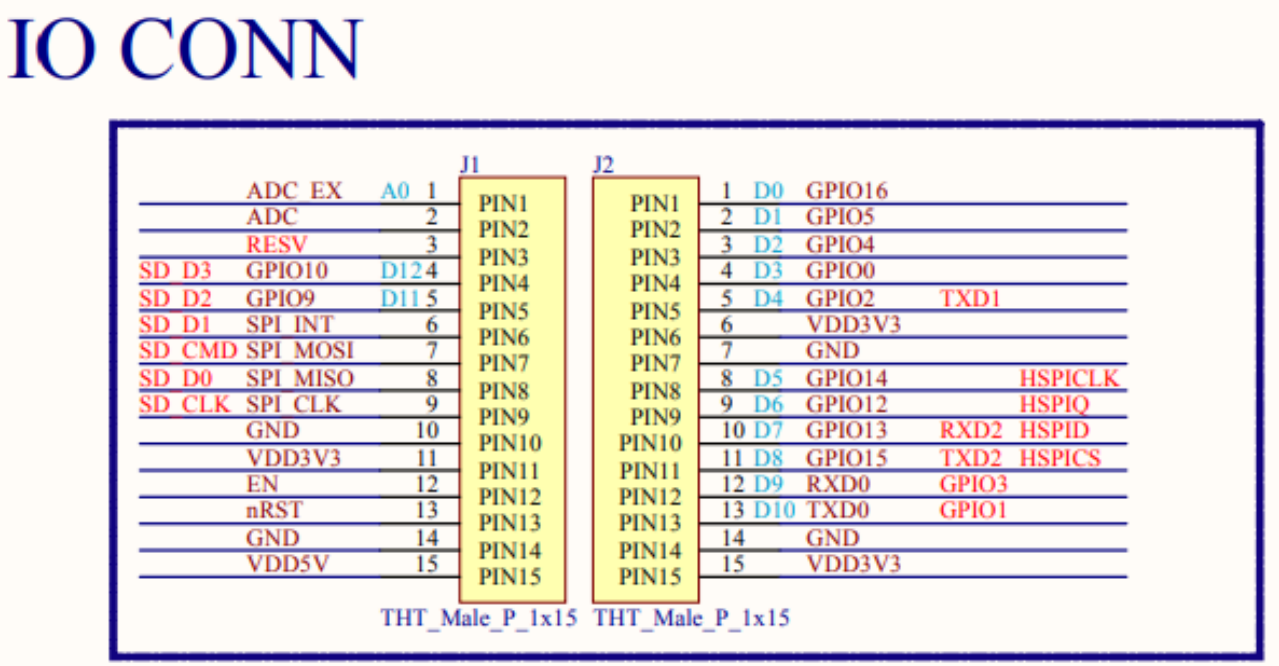


Рисунок 3.12 – Підключення входу/виходу NodeMCU

Оскільки мікроконтролер буде не лише керувати роботою системи, але завдяки вбудованому модулю Wi-Fi, ще й виступати в ролі web-сервера, то нам знадобляться бібліотеки ESP8266WiFi.h та ESPAsyncWebServer.h (рисунок 3.13).

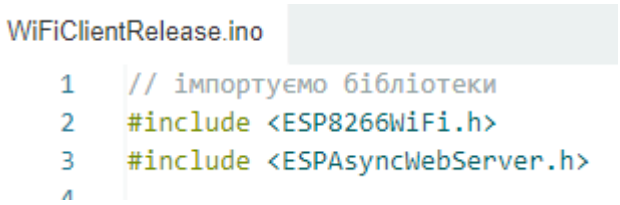


Рисунок 3.13 – Підключення бібліотек

Передача даних для об’єкта асинхронного сервера AsyncWebServer буде здійснюватися через 80 порт (рисунок 3.14), тобто використаємо стандартний порт для обміну даними між Web-сервером (на мікроконтролері) та веб-браузерами (по комп’ютері або мобільний пристроях) для протоколу HTTP. Для передачі даних від сенсора до мікроконтролера використаємо порт 9600 (див. рисунок 3.10), який використовується як швидкість передачі даних у серійному зв’язку.

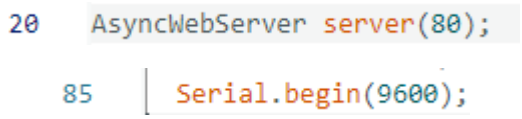


Рисунок 3.14 – Порти комутації з мікроконтролером

Покази з сенсора будемо зчитувати кожні 500 мілісекунд.

Програми для мікроконтролерів мовою С зазвичай містять дві основні функції: setup() та loop().

Підпрограма setup() викликається лише один раз під час запуску програми (або після натискання кнопки reset та платі мікроконтролера), вона використовується для під’єднання до мережі за раніше вказаною назвою (ssid) та паролем (password), ініціалізації змінних, налаштування режимів виводу пінів, початку програмного з’єднання з іншими пристроями, а також для інших завдань, які виконуються один раз (рисунок 3.15).

```
void setup(){
  // Послідовний порт для налагодження
  Serial.begin(9600);

  // Connect to Wi-Fi
  WiFi.begin(ssid, password);
  Serial.println("Connecting to WiFi");
  while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
    delay(1000);
    Serial.println(".");
  }

  // Print ESP8266 Local IP Address
  Serial.println(WiFi.localIP());

  // Route for root / web page
  server.on("/", HTTP_GET, [](AsyncWebServerRequest *request){
    request->send_P(200, "text/html", index_html, processor);
  });
  server.on("/gasvalue", HTTP_GET, [](AsyncWebServerRequest *request){
    request->send_P(200, "text/plain", String(valGas).c_str());
  });

  // Start server
  server.begin();
}
```

Рисунок 3.15 – Функція setup()

Ця функція перевіряє чи під’єднано систему моніторингу до мережі Wi-Fi: якщо з’єднання відсутнє, то та моніторі будемо бачити виведення крапок (рисунок 3.16), а коли з’єднання буде встановлено, то ми побачимо IP-адресу сервера (рисунок 3.17), за якою і будемо до нього приєднуватися в браузері (рисунок 3.18).

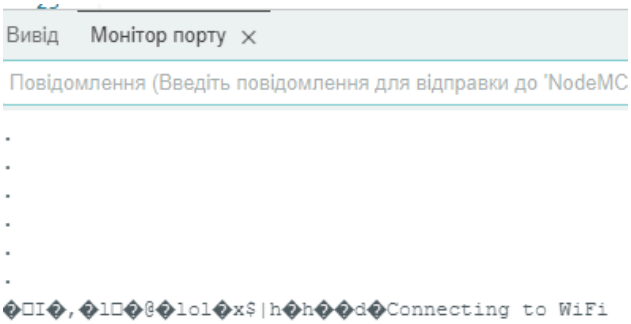


Рисунок 3.16 – Відсутнє з’єднання з Wi-Fi

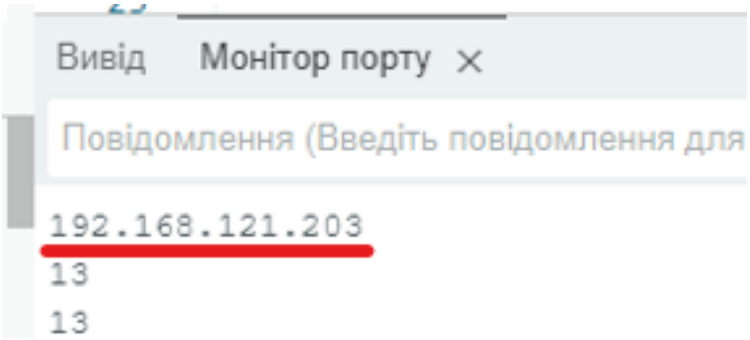


Рисунок 3.17 – IP-адреса Web-сервера (на ESP)

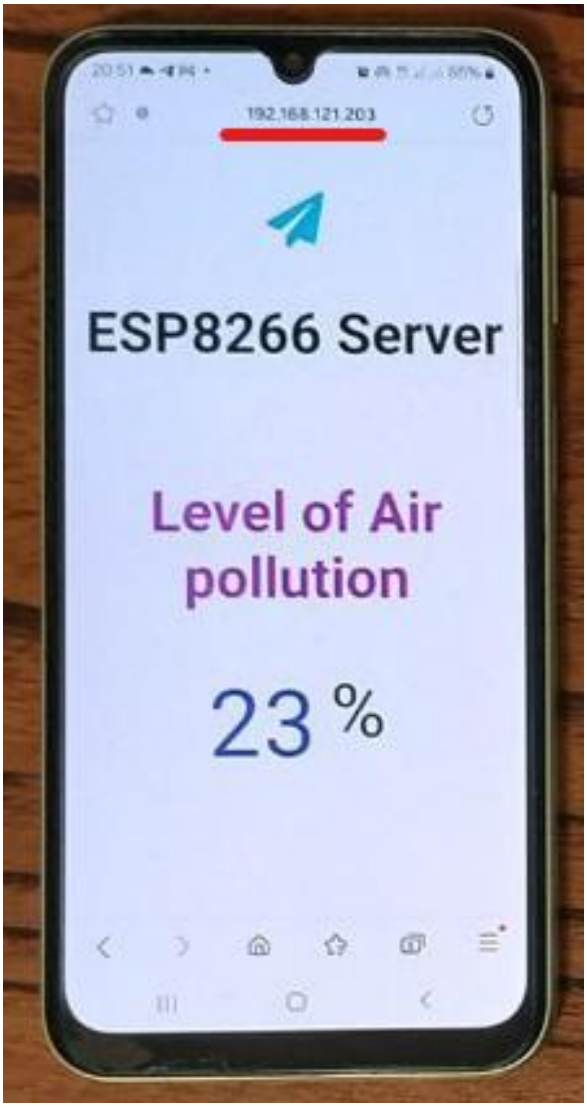


Рисунок 3.18 – Сторінка для моніторингу якості повітря через браузер

Як бачимо, відсоток забрудненості повітря у реальному часі можна переглядати/спостерігати не лише в Arduino IDE Serial Monitor, але також і в браузері через Wi-Fi. HTML-код цієї сторінки, її стиль поміщено в скетч плати

(рисунок 3.19). Дані на стороні клієнта з’являються завдяки методу get(). Як бачимо з рисунку 3.18, зовнішній вигляд сторінки в браузері лаконічний та простий, адже наша головна мета – показувати дані про якість повітря в режимі реального часу та забезпечити віддалений моніторинг.

```
    padding-bottom: 15px;
   }
  </style>
</head>
<body>
  <h2 > <i class="fa fa-paper-plane" style="color:#00add6;"></i> </h2>
  <h2 >ESP8266 Server   </h2>
  <h2 style="color:#9b30b5;">Level of Air pollution </h2>
  <p>
   <span id="gasvalue" style="font-size: 5.0rem; color:#4855bd;">%GASVALUE%</span>
   <sup class="units" > % </sup>
  </p>
</body>
<script>
setInterval(function ( ) {
  var xhttp = new XMLHttpRequest();
  xhttp.onreadystatechange = function() {
   if (this.readyState == 4 && this.status == 200) {
    document.getElementById("gasvalue").innerHTML = this.responseText;
   }
  };
  xhttp.open("GET", "/gasvalue", true);
  xhttp.send();
}, 1000 ) ;
</script>
</html>)rawliteral";
```

Рисунок 3.19 – HTML-код в прошивці плати

Функцію loop() викликаємо нескінченно (поки є живлення пристрою) після завершення setup(). Саме вона відповідає за зчитування даних з сенсорів, управління пристроєм та взаємодію з користувачем. В нашому випадку (рисунок 3.20) тут здійснюється зчитування даних з сенсора по аналоговому каналу зв’язку (analogRead()), перевіряється чи сенсор працює (передає значення – !isnan(sensorValue)) та здійснюється вивід цих значень на монітор (Arduino IDE Serial Monitor) – Serial.println(valGas).

```
void loop(){
  unsigned long currentMillis = millis();
  if (currentMillis - previousMillis >= interval) {
    // save the last time you updated the sensor values
    previousMillis = currentMillis;

    // Read RAW Gas Sensor value
    int sensorValue = analogRead(mq135Pin) / 10;

    // if Gas Sensor read failed, don't change valGas value
    if (isnan(sensorValue)) {
      Serial.println("Failed to read value from sensor!");
    }
    else {
      valGas = sensorValue;
      Serial.println(valGas);
    }
  }
}
```

Рисунок 3.20 – Функція loop()

Повністю скетч для мікроконтролера наведено в додатку А.

3.2 Тестування системи моніторингу

Функціонально готовий пристрій для використання має вигляд як на рисунку 3.6 (див. вище).

Якщо ми зайдемо в браузер на будь-якому пристрої і введемо IP-адресу веб-сервера, на якому є дані про стан повітря, то очікуємо отримати результат, як на рисунку 3.18, однак може бути й інший результат (рисунок 3.21).

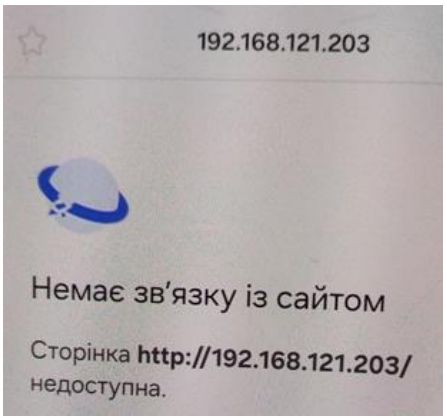


Рисунок 3.21 – Відмова в доступі до Web-сервера (на ESP)

Як було зазначено вище, пристрій повинен мати живлення 5 V, проте мікроконтролер ESP8266 потребує напруги 3,3 V. Тому на платі NodeMCU окрім роз'єму microUSB встановлений також стабілізатор напруги, а також передбачені виходи 3,3 V для живлення інших елементів. Тому за допомогою дата-кабелю USB/microUSB ми можемо не лише завантажити скетч на плату, але й забезпечити їй живлення (від USB-порту комп'ютера чи ноутбука або від повербанку).

Після подачі живлення на пристрій (приєднання до повербанку) та оновлення сторінки браузера ми можемо бачити результат роботи пристрою (рисунок 3.22). Цей самий результат (але в іншому вигляді) ми можемо спостерігати через Arduino IDE Serial Monitor (рисунок 3.23).

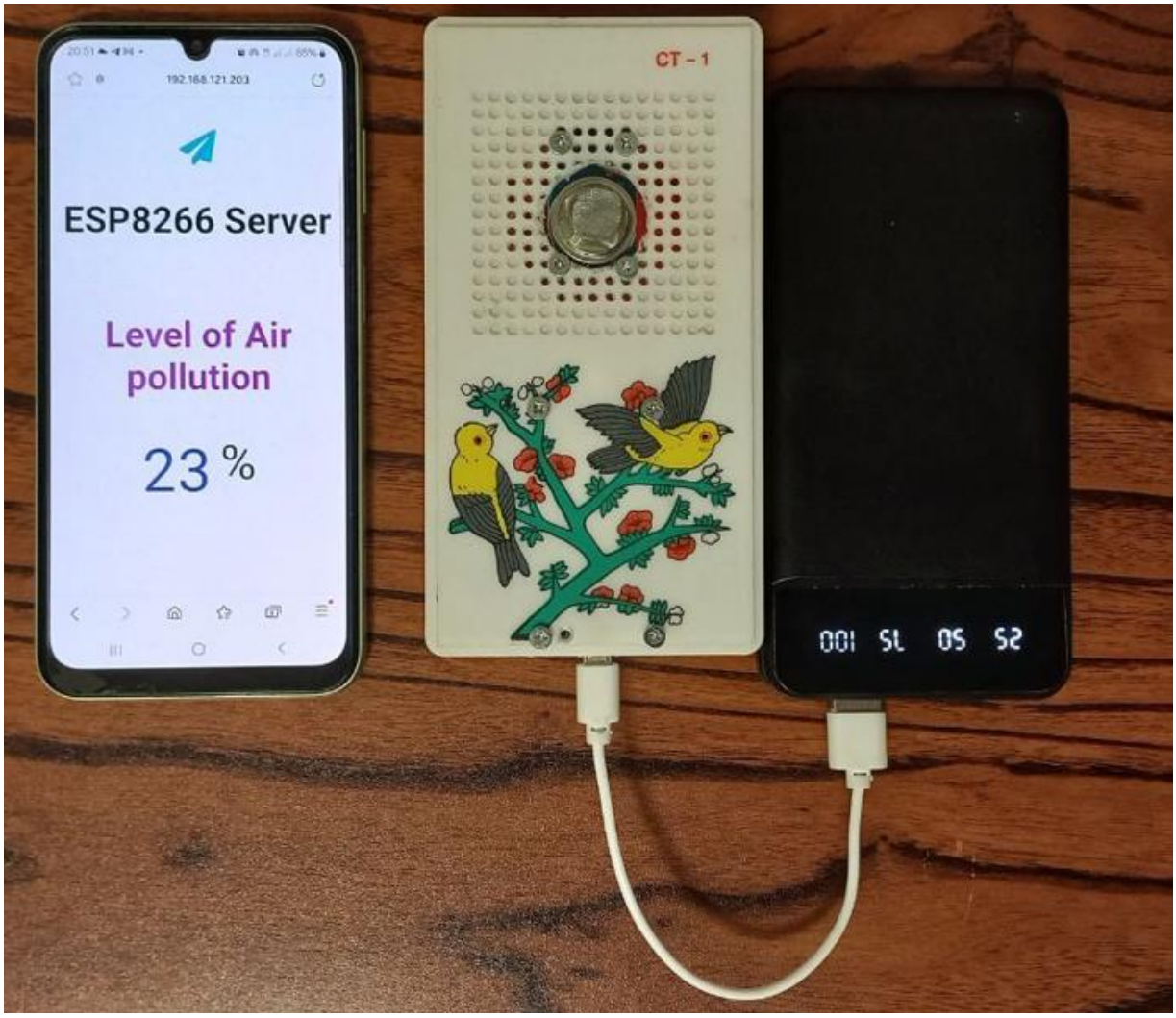


Рисунок 3.22 – Передавання інформації про якість повітря через Wi-Fi

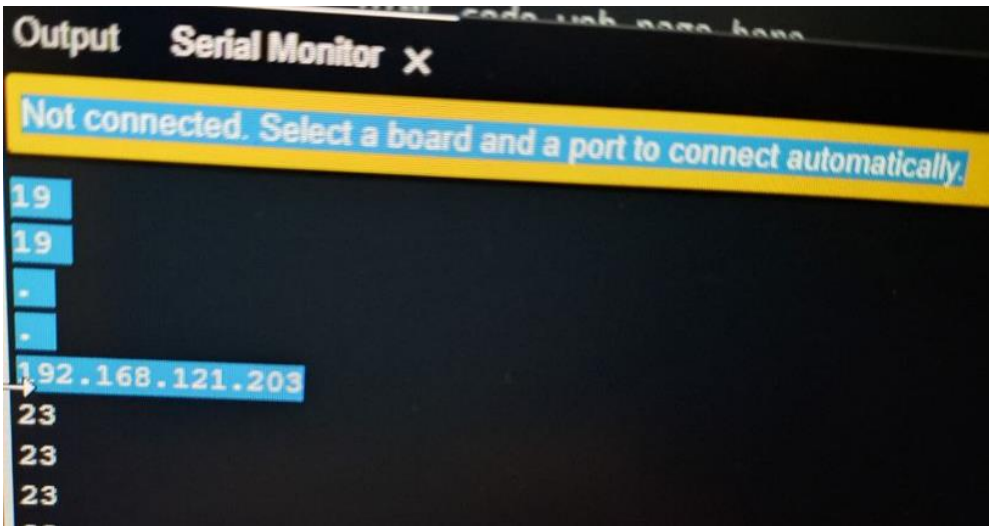


Рисунок 3.23 – Моніторинг якості повітря на ПК (через USB з’єднання)

Для тестування роботи пристрою було використано випари різних речовин (аміак, алкоголь, повітря, яке видихає людина) – покази змінювалися (рисунок 3.24), що свідчить про коректну роботу пристрою.

Рисунок 3.24 – Тестування роботи пристрою

3.3 Вдосконалення системи моніторингу

Для створення вдосконаленої апаратної частини проєкту нам потрібні компоненти:

– плата розробки ESP32 (але спробуємо реалізувати той самий функціонал на дешевшій платі – NodeMCU ESP8266 12E);

– модулі датчиків газу MQ-135 та MQ-9;

– сенсор вологості та температури DHT11;

– аналоговий мультиплексор/демультиплексор CD4051;

– макетна плата або імпровізований корпус пристрою;

– резистори, з’єднувальні кабелі, живлення (5V).

Якщо ми під’єднали один сенсор до плати NodeMCU ESP8266, то для цього використали її аналоговий пін A0, проте коли сенсорів в системі моніторингу декілька, то потрібно ще додатково застосувати аналого-цифровий перетворювач, який буде своєрідним хабом для з’єднання сенсорів з платою NodeMCU ESP8266 (рисунок 3.25).

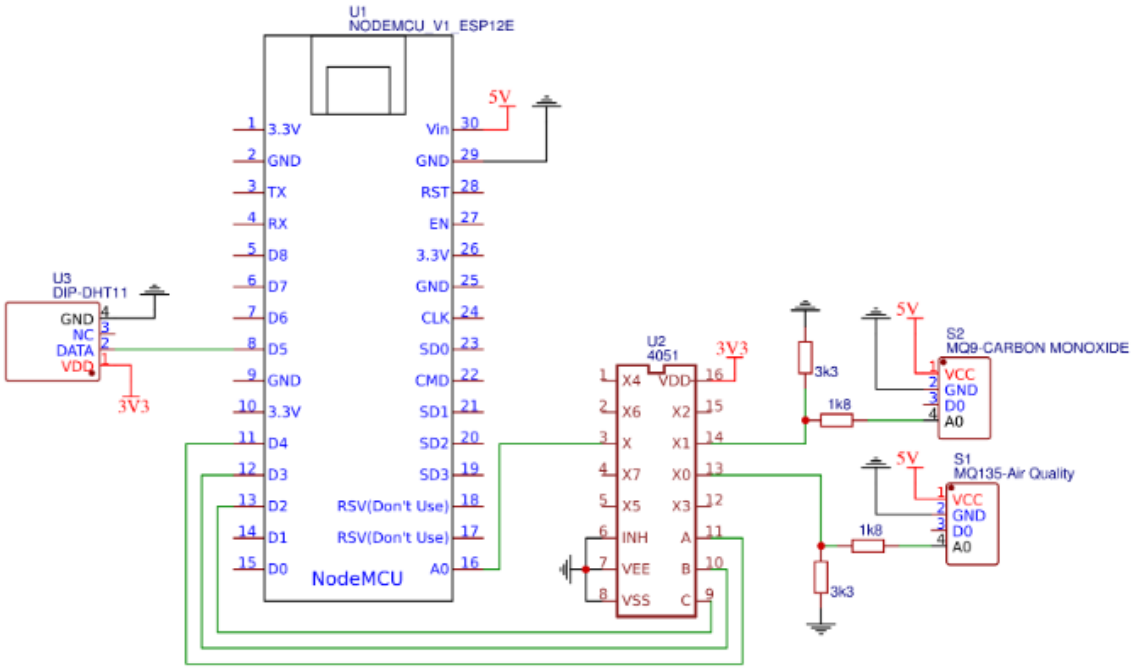


Рисунок 3.25 – Принципова схема системи моніторингу з кількома сенсорами

Аналоговий мультиплексор/демультиплексор CD4051 дасть можливість збільшити кількість аналогових виходів мікроконтролера. CD4051 – це 8-канальний аналоговий CMOS мультиплексор/демультиплексор (рисунок 3.26), його мікросхема допоможе з 1 аналогового та 3 цифрових входів отримати 8 аналогових входів. Функціональна схема комутатора CD4051 наведена на рисунку 3.27.

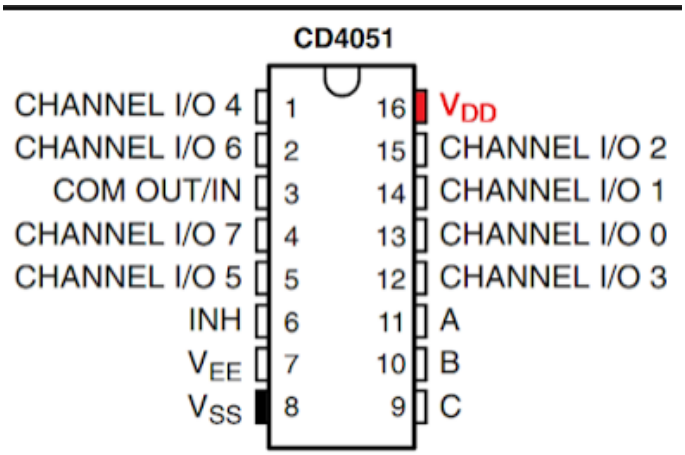


Рисунок 3.26 – Аналоговий комутатор CD4051

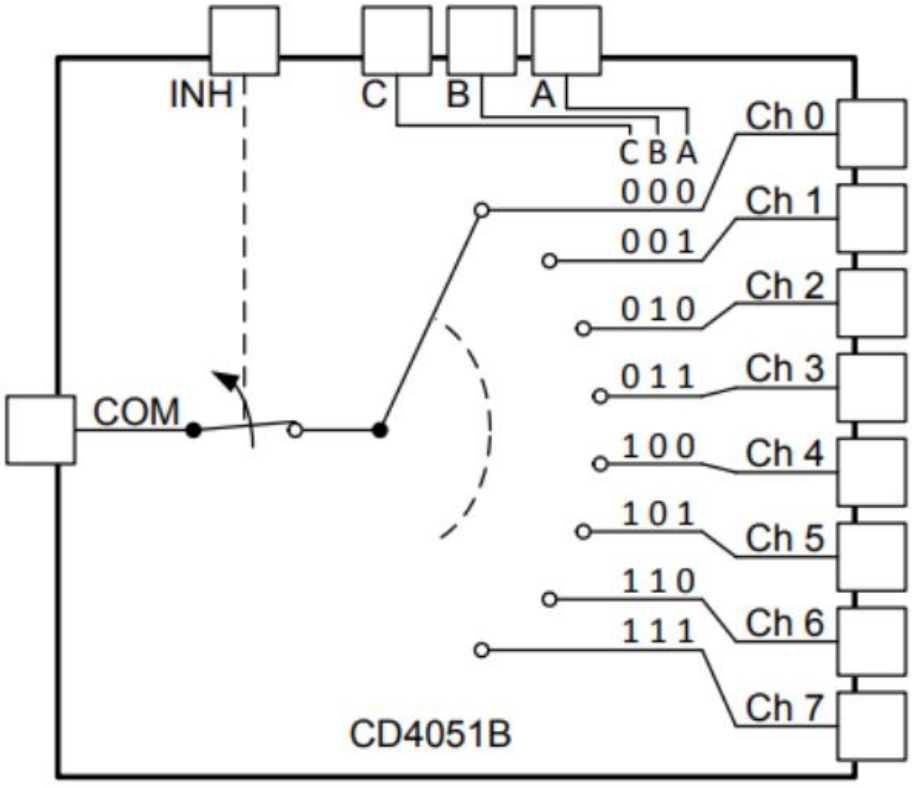


Рисунок 3.27 – CD4051. Схема функціональна

Мультиплексор – пристрій, який дає змогу передавати сигнал від одного з кількох входів на один-єдиний вихід. Демультиплексор, навпаки, передає сигнал від єдиного входу (COM) на один з інформаційних виходів (Ch0-Ch7). Вихід COM CD4051 підключається до аналогового виводу мікроконтролера. За значеннями на цифрових входах A, B, C визначають який із каналів буде з'єднаний з виходом COM.

Відповідно до схеми, наведеної на рисунку 3.2, вихід COM підключений до піну A0 NodeMCU ESP8266, виходи A, B та C до цифрових пінів D4, D3 та D2 відповідно. Приклад коду, який забезпечує програмну логіку роботи комутатора, наведено на рисунку 3.28.

```
byte AnalogIn = A0; // CD4051 pin 3 (Common in/out)

void  setup () {
   Serial . begin ( 9600 );
   pinMode ( 4 ,   OUTPUT );   // CD4051 pin 4(A)
  pinMode ( 3 ,   OUTPUT );   // CD4051 pin 3 (B)
  pinMode ( 2 , OUTPUT );   // CD4051 pin 2 (C)
}

void  loop () {
   for ( byte i = 0 ; i < 8 ; i++) {
    PORTB = (PORTB & B11111000) ^i;
    Serial . print (i);
     Serial . print ( ":" );
     Serial . println ( analogRead (AnalogIn));
  }
  Serial . println ();
   delay ( 1000 );
}
```

Рисунок 3.28 – Приклад роботи з мікросхемою CD4051

В цьому прикладі показано всі 8 варіантів інформаційних входів з комутатора, а для нашого проєкту потрібно лише два з них – по одному для сенсорів MQ-135 та MQ-9, сенсор температури та вологості DHT11 приєднано до цифрового входу мікроконтролера (див. рисунок 3.25). Після додавання цих сенсорів наша система моніторингу матиме вигляд як на рисунку 3.29.

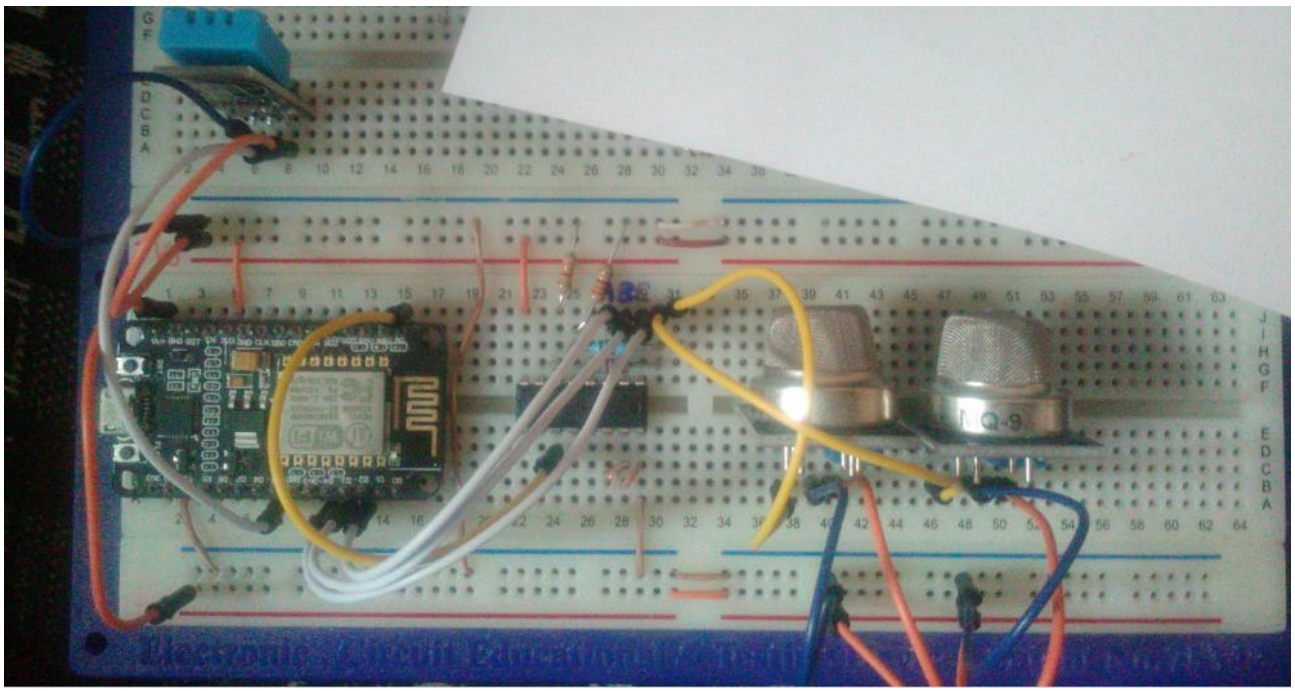


Рисунок 3.29 – Приклад приєднання кількох сенсорів до ESP8266

ВИСНОВКИ

Під час роботи над проєктом здійснено обґрунтування актуальності обраної теми, розглянуто питання впливу якості повітря на здоров’я людей. Також розглянуто основні параметри, які визначають якість повітря (складові індексів якості) та основні джерела забруднень.

Виконано огляд існуючих рішень в сфері моніторингу якості повітря, зокрема розглянуто веб-мапу, яка відображає Європейський індекс якості повітря, сервіси ЛУН Місто AIR, проєкт EcoCity, а також вклад українських науковців та громадських організацій в розробку та розвиток систем моніторингу.

Здійснено детальний огляд сенсорів для аналізу складу повітря, наприклад розглянуто сенсори серій MQ, Figaro TGS, Alphasense B4, SGX Sensortech MiCS, для проєкту обрано сенсори серії MQ. Під час вибору мікроконтролера було виконано порівняння технічних характеристик мікроконтролерів ESP32 і ESP8266. Для свого проєкту було обрано модуль NodeMCU ESP8266 12E.

Розглянуто особливості середовищ програмування, серед яких Arduino IDE, MicroPython, PlatformIO, фреймворк ESP-IDF, Espruino. Для написання скетчу обрано середовище Arduino IDE.

Створено проєкт на основі обраних пристроїв, розглянуто монтажну схему пристрою, виконано збірку апаратної частини, налаштування середовища Arduino IDE для роботи з ESP.

З метою перевірки коректності роботи пристрою виконано тестування спроєктованої системи моніторингу.

Запропоновано ідею для вдосконалення та розширення системи моніторингу, наприклад шляхом використання більшої кількості сенсорів. Для того, щоб не міняти мікроконтролер і мати змогу доєднати до нього більше сенсорів запропоновано додатково використати комутатор CD4051, наведено схеми його використання.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Alphasense UK – Browse Gas Sensors & Air Quality Monitors. URL: https://www.alphasense.com/ (дата звернення: 22.02.2024).

2. Buček, P.; Bílek, J.; Maršolek, P.;Bílek, O. Can Air Quality Gas Sensors BeUsed for Emission Monitoring ofSmall-Scale Local Air Pollution Sources?Pilot Test Evaluation. (PDF) Can Air Quality Gas Sensors Be Used for Emission Monitoring of Small-Scale Local Air Pollution Sources? Pilot Test Evaluation..*Atmosphere*. 2023. Vol. 14, no. 2. P. 248. URL: https://doi.org/10.3390/atmos14020248 (дата звернення: 02.03.2024).

3. Eco-City. *Eco-City Громадський моніторинг стану якості повітря*. URL: https://www.eco-city.org.ua/ (дата звернення: 21.03.2024).

4. ESP-IDF Getting Started. URL: https://idf.espressif.com/ (дата звернення: 18.04.2024).

5. European Air Quality Index. URL: https://airindex.eea.europa.eu/AQI/index.html (дата звернення: 24.05.2024).

6. Hura V., Monastyrskii L. IOT-based solution for detection of air quality using ESP32. Artificial Intelligence. 2023. Vol. 28, AI.2023.28(3). P. 86–93. URL: https://doi.org/10.15407/jai2023.03.086 (дата звернення: 25.04.2024).

7. MQ Gas Sensor Series – The Engineering Projects. *The Engineering Projects*. URL: https://www.theengineeringprojects.com/2024/04/mq-gas-sensor-series.html (дата звернення: 01.04.2024).

8. NodeMCU v3 high resolution pinout and specs. *Renzo Mischianti*. URL: https://mischianti.org/nodemcu-v3-high-resolution-pinout-and-specs/ (дата звернення: 12.03.2024).

9. SGX – Industrial. URL: https://www.sgxsensortech.com/ (дата звернення: 27.02.2024).

10. Software. *Arduino – Home*. URL: https://www.arduino.cc/en/software (дата звернення: 15.02.2024).

20. Деякі питання забезпечення провадження господарської діяльності в умовах воєнного стану. *Офіційний вебпортал парламенту України*. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/314-2022-п#Text (дата звернення: 03.03.2024).

21. Деякі питання здійснення державного моніторингу в галузі охорони атмосферного повітря. *Офіційний вебпортал парламенту України*. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/827-2019-п#Text (дата звернення: 11.04.2024).

22. Калінский П. В. Побудова низькобюджетної портативної системи моніторингу запиленості повітря на базі смартфона. *Вісник студентського наукового товариства ДонНУ імені Василя Стуса*. URL: https://jvestnik-sss.donnu.edu.ua/article/view/14714 (дата звернення: 30.03.2024).

23. Калькулятор AQI – конвертер масштабів Агентства охорони навколишнього середовища США. *aqicn.org*. URL: https://aqicn.org/calculator/ru/?fbclid=IwZXh0bgNhZW0CMTAAAR1waRegARquYqFk6QZkOgQKVPUldWn_Qtu5vob4M3FxvvULc2cl1Lz1J7g_aem_Afebd1wvbciYx_Z_rVibpE1-tRwaJZE-wXfWmO4mvH1w1ghuwLJlGsL1OHx3s6gJ7REDM_w-mDZTHLKW-ivhYCha (дата звернення: 09.02.2024).

24. Карта якості повітря ЛУН Місто Air. *ЛУН Місто – Громадська організація дослідження комфорту та якості життя в українських містах*. URL: https://misto.lun.ua/air/lutsk (дата звернення: 27.04.2024).

25. Про нас. *Все про повітря*. URL: https://cleanair.org.ua/pro-nas/ (дата звернення: 28.05.2024).

26. Сорока М. Л. Radiation and Smog Alarm. Настанови та принципи оповіщення населення про якість повітря, радіаційну та хімічну небезпеку. Прага – Івано-Франківськ, Arnika, 2022. 58 с.

27. Створення ефективної системи моніторингу довкілля в Україні: проблеми і шляхи їх вирішення. Аналітична записка. *Національний інститут стратегічних досліджень*. URL: https://niss.gov.ua/doslidzhennya/nacionalna-bezpeka/stvorennya-efektivnoi-sistemi-monitoringu-dovkillya-v-ukraini (дата звернення: 08.04.2024).

28. Супутникові дані допомагають моніторити з космосу якість повітря під час пандемії та збирати важливу для законотворців інформацію. *UNDP*. URL: https://www.undp.org/uk/ukraine/press-releases/suputnykovi-dani-dopomahayut-monitoryty-z-kosmosu-yakist-povitrya-pid-chas-pandemiyi-ta-zbyraty-vazhlyvu-dlya-zakonotvortsiv (дата звернення: 29.03.2024).

29. Узагальнена інформація про якість атмосферного повітря в населених пунктах за даними мережі спостережень гідрометеорологічних організацій. Міністерство внутрішніх справ України. Портал відкритих даних. URL: https://data.gov.ua/dataset/3eda331d-d4ec-4e7f-b11bf21fe1f56239 (дата звернення: 15.05.2024).