

Міністерство освіти і науки України  
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Інформаційних радіотехнологій і технічного захисту інформації  
(повна назва)

Кафедра Радіотехнологій інформаційно-комунікаційних систем  
(повна назва)

## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА Пояснювальна записка

рівень вищої освіти перший (бакалаврський)

### ПРИСТРІЙ МОНІТОРИНГУ ВУГЛЕКИСЛОГО ГАЗУ В ПРИМІЩЕННЯХ (тема)

Виконала:  
студентка IV курсу, групи ІТІР-20-1  
Подгорнова А. Д.  
(прізвище, ініціали)

Спеціальність 126 Інформаційні системи  
та технології  
(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна

Освітня програма Інформаційні технології  
інтернету речей  
(повна назва освітньої програми)

Керівник Доцент Бітченко О. М.  
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

В.о.зав. кафедри РТІКС

\_\_\_\_\_ (підпис)

Зарудний О.А.

(прізвище, ініціали)

2024 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Інформаційних радіотехнологій і технічного захисту інформації

Кафедра Радіотехнологій інформаційно-комунікаційних систем

Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)

Спеціальність 126 Інформаційні системи та технології

(код і повна назва)

Тип програми Освітньо-професійна

Освітня програма Інформаційні технології інтернету речей

(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри \_\_\_\_\_

(підпис)

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2024 р.

## ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові ПОДГОРНОВІЙ АЛІНІ ДМИТРІВНІ

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи ПРИСТРІЙ МОНІТОРИНГУ ВУГЛЕКИСЛОГО ГАЗУ  
В ПРИМІЩЕННЯХ

затверджена наказом по університету від 27 травня 2024 р. № 500 Ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 10 червня 2024 р.

3. Вихідні дані до роботи \_\_\_\_\_

3.1 Провести огляд аналогічних систем та сформулювати постановку задачі  
для подальшої розробки

3.2 Обрати та обґрунтувати необхідні датчики

3.3 Розробити макет системи

3.4 Розробити необхідне програмне забезпечення

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі \_\_\_\_\_

Вступ. 1 Методи виміру концентрації газів. 2 Вплив вуглекислого газу на  
життєдіяльність людини. 3 Огляд та аналіз датчиків вуглекислого газу. 4  
Розробка пристрою. Висновки. Перелік джерел посилання. Додатки.

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (слайдів) \_\_\_\_\_

Комп'ютерна презентація

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

6. Консультанти розділів роботи (п.6 включається до завдання за наявності консультантів згідно з наказом, зазначеним у п.1 )

Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Вступ	08.05-09.05.2024	
2	Методи виміру концентрації газів	10.05-17.05.2024	
3	Вплив вуглекислого газу на життєдіяльність людини	18.05-25.05.2024	
4	Огляд та аналіз датчиків вуглекислого газу	26.05-30.05.2024	
5	Розробка пристрою	31.05-03.05.2024	
6	Висновки.	04.06.2024	
7	Оформлення пояснювальної записки	05.06-07.06.2024	
8	Оформлення ілюстрацій	7.06- 09.06.2024	
9	Представлення роботи на кафедрі	10.06.2024	

Дата видачі завдання **6 травня 2024 р.**

Студент \_\_\_\_\_  
(підпис)

Подгорнова А.Д.

Керівник роботи \_\_\_\_\_  
(підпис)

доц. Бітченко О.М.  
(посада, прізвище, ініціали)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка кваліфікаційної роботи бакалавра містить 82 сторінок тексту, 26 рисунків, 10 таблиць, 23 джерел посилання та 3 додатки.

### ДАТЧИК. МІКРОКОНТРОЛЕР. ВОЛОГІСТЬ. ТЕМПЕРАТУРА. КОНЦЕНТРАЦІЯ.

Об'єктом розробки є система клімат-контролю.

Метод дослідження - описово-аналітичний.

Предметом дослідження є пристрій контролю вуглекислого газу в приміщенні.

Метою даної роботи була розробка пристрою контролю вуглекислого гагу в житлових приміщеннях.

В роботі проведено огляд аналогічних пристроїв та сформульована постановка задачі для подальшої розробки, розглянуто сучасні методи виміру концентрації газів, проаналізовано вплив вуглекислого газу на життєдіяльність людини, проведено вибір необхідних датчиків, розроблено схему пристрою та відповідне програмне забезпечення.

## ABSTRACT

Explanatory note of the master's thesis contains 82 pages of text, 26 figures, 10 tables, 23 reference sources and 3 appendices.

SENSOR. MICROCONTROLLER. HUMIDITY. TEMPERATURE.  
CONCENTRATION.

The object of development is the climate control system.

The research method is descriptive and analytical.

The subject of the study is a device for controlling carbon dioxide in the room.

The purpose of this work was to develop a device for controlling carbon dioxide in residential premises.

The paper reviewed similar devices and formulated a problem statement for further development, considered modern methods of gas concentration measurement, analyzed the impact of carbon dioxide on human activity, selected the necessary sensors, developed a device scheme and appropriate software.

## ЗМІСТ

Перелік умовних позначень, символів, одиниць, скорочень і термінів.....	7
Вступ.....	8
1 Методи виміру концентрації газів.....	10
1.1 Загальні положення.....	10
1.2 Аналогові методи виміру концентрації газів.....	12
1.3 Цифрові методи виміру концентрації газів.....	13
1.3.1 Принцип роботи газоаналізатора.....	13
1.3.2 Хімічні (об'ємно-манометричні) газоаналізатори.....	14
1.3.3 Термохімічні газоаналізатори.....	14
1.3.4 Електрохімічні газоаналізатори .....	16
1.3.5 Фотоколориметричні газоаналізатори.....	18
1.3.6 Термокондуктометричні газоаналізатори.....	19
1.3.7 Магнітні газоаналізатори.....	22
1.3.8 Електричні газоаналізатори.....	26
2 Вплив вуглекислого газу на життєдіяльність людини.....	30
2.1 Загальні положення.....	30
2.2 Гранично припустима концентрація.....	31
2.3 Медичне обґрунтування небезпеки CO <sub>2</sub> .....	32
3 Огляд та аналіз датчиків вуглекислого газу.....	36
3.1 Датчик TGS4161.....	36
3.2 Датчик MG811.....	38
3.3 Датчик MQ135.....	41
3.4 Датчик МН-Z19.....	43
3.5 Висновок.....	47
4 Розробка пристрою .....	48
4.1 Контролер Arduino.....	48
4.2 Вибір мережного модуля.....	49
4.2.1 Визначення типу мережного модуля.....	49

	6
4.2.2 Мережний модуль ESP8266 ESP-07.....	51
4.3 Вибір твердотільного реле.....	54
4.4 Вибір елемента живлення.....	57
4.5 Розробка макету пристрою.....	60
4.6 Вимоги до установки детекторів вуглекислого газу.....	60
4.7 Коректування датчика МН-Z19С.....	61
Висновки.....	64
Перелік джерел посилання.....	65
Додаток А – Програмні коди.....	68
Додаток Б – Слайди презентації.....	74
Додаток В – Відомість кваліфікаційної роботи.....	81

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ,  
СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

$\delta$  – загальна товщина дифузійного шару.

$n$  – заряд іона;

$s$  – площа поверхні індикаторного електроду;

$D$  – коефіцієнт дифузії;

$C$  – концентрація визначуваної речовини;

$\text{CO}_2$  – вуглекислий газ,

$F$  – число Фарадея;

NDIR (*Nondispersive Infrared Sensor*) – недиспергуючий інфрачервоний аналізатор,

PWM (*Pulse-Width Modulation*) – широтно-імпульсна модуляція,

UART (*Universal Asynchronous Receiver-Transmitter*) – послідовний інтерфейс,

USB (*Universal Serial Bus*) – універсальна послідовна шина,

ГПК – гранично припустима концентрація,

TTL – транзисторно-транзисторна логіка.

## ВСТУП

Про загрозу тривалого впливу вуглекислого газу на людину не говорять щодня в новинах, внаслідок чого обізнаність людей у цій галузі фактично дорівнює нулю. У всьому світі тільки починають замислюватися про всі ймовірні результати дії вуглекислоти, в той час, як деякими хворобами, викликаними постійним поглинанням повітря з високим вмістом CO<sub>2</sub>, люди страждають вже зараз.

У певному сенсі це можна розглядати як бездіяльність природоохоронних організацій, які зобов'язані брати участь у науково-дослідній роботі в даній галузі. Оскільки будь-яке невиконання зобов'язань має передусім підтвержене обґрунтування. У деяких державах, таких як США чи Великобританія, вони вже потроху почали виявляти більший інтерес до проблем впливу вуглекислого газу на людину, тоді як в Україні такі дослідження проводилися лише в 1950-х роках. Що не менш важливо, результати, отримані в ході досліджень, показують усі підстави розглядати питання щодо організації контролю вмісту вуглекислого газу як вкрай необхідне.

Дуже важливо донести важливість цієї проблеми, в першу чергу, до керівників великих організацій, оскільки значна частина робочого часу людей проходить у приміщенні, і людина часто не має можливості впливати на повсякденне життя, яке складається в організації.

Доросла людина здатна розв'язати цю проблему, якщо вона відчуває та знає про згубний вплив навколишнього мікроклімату на своє здоров'я. Дитина часто залишається заручником ситуації й змушена поглинати повітря низької якості протягом усього заняття, відчуваючи дискомфорт через підвищену концентрацію CO<sub>2</sub> в приміщенні.

Сфери застосування пристрою моніторингу вуглекислого газу в приміщеннях:

- кліматичні системи та автоматична вентиляція;
- контроль мікроклімату в приміщеннях, де працюють люди, та на

виробництві, де порушення технологічних процесів неприпустимі;

- контроль вмісту вуглекислоти у вхідному повітряному потоці;
- перевірка поточного рівня та швидкої нормалізації порушеного газообміну.

Ігнорувати підвищений рівень CO<sub>2</sub> у приміщеннях не можна. Датчики вуглекислого газу здатні вчасно сигналізувати про порушення мікроклімату. Тоді можна запустити вентиляцію або провітрити кімнату, щоб оперативно виправити ситуацію та не допустити її подальшого загострення.

Метою даної роботи є розробка пристрою контролю вуглекислого газу в житлових приміщеннях.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати наступні задачі:

- проаналізувати вплив вуглекислого газу на життєдіяльність людини;
- розглянути сучасні методи виміру концентрації газів;
- провести огляд аналогічних пристроїв та сформулювати постановку задачі для подальшої розробки;
- провести вибір необхідних датчиків;
- розробити схему пристрою;
- розробити відповідне програмне забезпечення.

## 1 МЕТОДИ ВИМІРУ КОНЦЕНТРАЦІЇ ГАЗІВ

### 1.1 Загальні положення

Вимір різних газів здійснюється різними методами, кожен прилад призначений для вимірів конкретного типу, отже, створити універсальний газоаналізатор дуже складно.

По своєму призначенню газоаналізатори класифікуються на наступні групи: пристрої для контролю технологічних процесів і промислових викидів, виміри й аналіз у процесі очищення води, контроль у рудничній атмосфері, аналіз викидів двигуна, газоаналізатори систем забезпечення безпеки й охорони праці тощо.

По функціональних можливостях прилади аналізу газу можна розділити на індикатори, сигналізатори, шукачі течії, газоаналізатори. Індикатори й шукачі течії працюють за принципом точкового оповіщення за допомогою лінії індикаторів. Сигналізатори за допомогою звукових або оптичних індикаторів оповіщають про досягнення у досліджуваного компонента заданого порога, при цьому порогів може бути декілька. Газоаналізатори здатні не тільки кількісно оцінювати досліджуваний компонент, але й мають допоміжні вихідні сигнали.

Для виміру концентрації одного з компонентів газової суміші використовується та чи інша фізико-хімічна властивість цього газу, що відрізняється від властивостей інших газів [1]. Чим різкіше ця відмінність і чим вона специфічніше, тим вище чутливість методу та простіше здійснюється підготовка проб газу. Розмаїття використовуваних методів виміру обумовлена просторістю аналізованих компонентів газових сумішей і широким діапазоном зміни їх концентрацій.

Переважає більшість промислових автоматичних газоаналізаторів призначено для виміру концентрації одного компонента в суміші газів. У цьому

випадку суміш газів розглядається як бінарна, у якій обумовлений компонент впливає на вимірювану фізико-хімічну властивість суміші, а інші компоненти, незалежно від їх складу та концентрації, не впливають і вважаються другим компонентом суміші.

Існують газоаналізатори, призначені для аналізу різних складових багатоконпонентних газових сумішей, у більшості випадків ці прилади використовуються в лабораторній практиці. Газоаналізатори градууються у відсотках по обсязі,  $\text{г/м}^3$ ,  $\text{мг/л}$ . Перша одиниця виміру є більш зручною, оскільки процентний уміст компонентів суміші зберігається при зміні температури та тиску. Відтворення одиниць виміру концентрації компонентів газових сумішей відбувається за допомогою атестованих еталонних сумішей.

Наявна класифікація газоаналізаторів ґрунтується на фізико-хімічних властивостях, покладених в основу виміру концентрації обумовлених компонентів, і включає основні групи приладів: механічні, теплові, магнітні, оптичні, хроматографічні, електричні й мас-спектрометричні.

Газоаналізатори на відміну від засобів виміру температури, тиску являють собою установку, яка містить крім вимірювального перетворювача (приймача) ряд пристроїв, що забезпечують добір, підготовку і транспортування проби газу через прилад. Для газоаналізаторів характерна наявність двох груп приладів. У першу входять вимірювальні прилади, у другу – індикатори, сигналізатори, детектори витоку газів. Прилади другої групи часто є переносними, простішими за конструкцією та мають найменше число допоміжних пристроїв.

Контроль рівня  $\text{CO}_2$  необхідний у всіх областях, де цей газ існує в складі. Вуглекислий газ присутній не тільки в приміщеннях і атмосфері, але й у воді, а також частково в ґрунті. Залежно від цього, способи визначення вмісту  $\text{CO}_2$  розрізняються за типом, через їхнє різноманіття й об'ємність. Розглянемо методи, що належать до визначення рівня вуглекислоти в повітрі приміщень.

## 1.2 Аналогові методи виміру концентрації газів

Методичні посібники для фахівців в області гігієни рекомендують визначати концентрацію вуглекислого газу за допомогою відбору проб повітря для аналізу. Проби повітря в приміщенні відбирають у різні місткості: газові піпетки, відкалібровані пляшки, гумові камери або мішки. Ці зразки піддаються хімічному аналізу. Залежно від обраного методу використовуються тверді сорбенти як поглинальні середовища для парів і газів: активоване вугілля, графіт. Для аналізу зразки можуть бути узяті один раз, щоб знайти найвищу концентрацію, а також протягом доби безупинно. Тривалість відбору складає не більш 20 хвилин, залежно від методу аналізу і вмісту домішок в повітрі. Відбір проб варто проводити на відстані 1,5 метра від статі, на рівні подиху зрілої людини. Через те, що відбір може здійснюватися при різних температурах, необхідно довести стан повітря до нормальних умов, тобто 20 °C та тиску 760 мм рт.ст.

Подальша перевірка проб повітря, зібраних у будинку, може бути проведена різними способами. Більш точним є метод Субботіна-Нагорського, [2] принцип якого полягає в тому, що титрованим розчином їдкою барію ( $\text{Ba}(\text{VH})_2$ ) поглинається вуглекислий газ із визначеного обсягу повітря. По різниці титрів розчину барію до і після поглинання вуглекислого газу визначають його кількість в узятому для дослідження обсязі повітря. Цей метод вважається найбільш точним, але він громіздкий.

Через такий недолік даного методу, на практиці, як правило, застосовується експрес-метод Лунге-Цеккендорфа [3], принцип якого полягає в пропусненні досліджуваного обсягу повітря через титрований розчин  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  у присутності кислотного-основного індикатора фенолфталеїну. Розчин фенолфталеїну, що має рожеве фарбування в лужному середовищі, після зв'язування  $\text{CO}_2$  знебарвлюється (кисле середовище).

Не заглиблюючись в суть вищеописаних методів, дійдемо висновку, що аналогові методи визначення вмісту  $\text{CO}_2$  укр. не зручні й можуть бути

використані лише для разового виміру концентрації цього газу. А моніторинг приміщення повинний проводитися з інтервалом у 10 хвилин, що практично неможливо при використанні цих методів.

Проблема, що полягає в складності визначення концентрації  $\text{CO}_2$  з використанням аналогових методів, була відома вже давно, і це привело до розробки цифрових пристроїв – газоаналізаторів.

### 1.3 Цифрові методи виміру концентрації газів

#### 1.3.1 Принцип роботи газоаналізатора

Газоаналізатор – це пристрій, призначений для аналізу газового середовища, визначення складу газової суміші й виміру кількості та концентрації в ній необхідного компонента.

Принцип роботи газоаналізатора заснований на поглинанні у визначеній послідовності спеціальними реагентами складових речовин газової суміші. У випадку, коли концентрація вимірюваної речовини вище встановленої, газоаналізатор оповіщає про це спеціальним звуковим сигналом.

Базові компоненти, що входять до складу газоаналізатора будь-якого типу, це – корпус, що захищає всі елементи пристрою, акумулятор і датчик газоаналізатора (перетворювач досліджуваного компонента газової суміші в електричний сигнал).

Одна з великих класифікацій газоаналізаторів – це поділ їх на автоматичні та ручні.

Ручні газоаналізатори газу – це переносні прилади, для роботи яких необхідні дії фахівця по забору проб на аналіз. Тому, отримані результати можна одержати тільки через кілька хвилин. Ручні газоаналізатори можуть використовуватися як для контрольних або лабораторних досліджень, так і для перевірки газоаналізаторів автоматичного типу.

Автоматичні пристрої знаходяться в постійній дії, тобто безупинно

вимірюють необхідні характеристики потрібної речовини.

Існує три типи автоматичних газоаналізаторів:

- хімічні (об'ємно-манометричні);
- газоаналізатори, дія яких заснована на методах аналізу з фізико-хімічними процесами;
- фізичні газоаналізатори.

### 1.3.2 Хімічні (об'ємно-манометричні) газоаналізатори

Такі пристрої визначають характеристики газової суміші за допомогою хімічних реакцій її компонентів. Дія приладу заснована на поглинанні компонента або всієї газової суміші спеціальною речовиною, що вступає з ним у хімічну реакцію. Він дозволяє аналізувати широке коло газових компонентів за допомогою підбора необхідних поглиначів, а також вимірювати багатоконпонентні газові суміші.

### 1.3.3 Термохімічні газоаналізатори

У термохімічних газоаналізаторах концентрація обумовленого компонента вимірюється за кількістю теплоти, що виділилася при реакції каталітичного окислювання [4]. До числа обумовлених за цим методом газів входять  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{CH}_4$ . Термохімічні газоаналізатори розділяються на дві групи. У першій групі, яка має нижчу чутливість, реакція окислювання відбувається на поверхні нагрітої платинової нитки, що грає роль каталізатора. Температура платинової нитки, а відповідно, і її опір міняються зі зміною кількості теплоти, що виділилася при окислюванні обумовленого компонента. Платинова нитка з опором  $R_1$  включається в плече неврівноваженого моста (рисунок 1.1). До цього міста входить резистор  $R_2$ , виконаний із платинового дроту подібно резистору  $R_1$ , але знаходиться він в камері, заповненій невизначеними

компонентами газової суміші. Резистори  $R_3$  і  $R_4$  мають постійний опір і виконані з манганінового дроту.

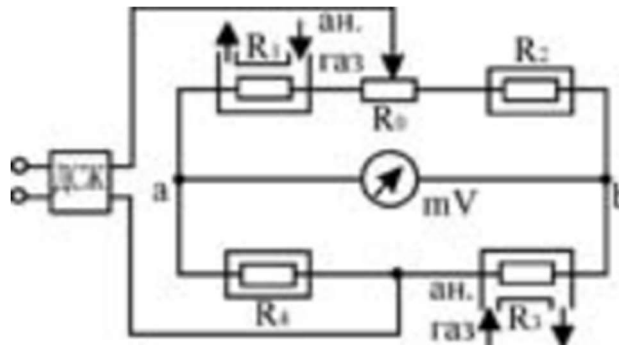


Рисунок 1.1 – Схема термохімічного газоаналізатора

За наявності обумовленого компонента в газовій суміші та його згорянні опір резистора  $R_1$  зростає й мілівольтметр (потенціометр), включений у вимірювальну діагональ моста, покаже наявність різниці напруги, пропорційної концентрації обумовленого компонента. Мілівольтметр градується в одиницях концентрації обумовленого компонента. Час установлення показань приладів цього типу складає 1 хв при граничній похибці, що досягає  $\pm 1\%$ .

Газоаналізатори першої групи в основному використовуються як індикатори та сигналізатори вибухонебезпечних концентрацій газів і виконуються в переносному варіанті, до їх числа належать сигналізатори, що вимірюють концентрацію  $H_2$  у повітрі.

У термохімічних газоаналізаторах другої групи реакція окислювання обумовленого компонента протікає на поверхні гранульованого каталізатора, в якості якого часто використовується гопкаліт (60 % двоокису марганцю і 40 % окису міді). Наявність розвинутої поверхні каталізатора забезпечує можливість виміру концентрацій обумовленого компонента, що складають частки відсотка. Кількість теплоти, що виділилася при спалюванні, вимірюється платиновим термометром опору або батареєю термопар.

Газоаналізатори другого типу є більш інерційними, час установлення їх показань сягає 5 хв, гранична похибка складає  $\pm 5\%$ .

### 1.3.4 Електрохімічні газоаналізатори

В основу роботи цих приладів входить виділення визначеного реагенту, що вступає в реакцію з потрібним компонентом газової суміші. Тобто, апарати вимірюють концентрацію газу в суміші за значенням електропровідності газ спеціального розчину, що поглинув їх. Такого роду прилади можуть застосовуватися для виміру токсичних газів у будь-яких приміщеннях, в тому числі у вибухонебезпечних зонах.

Електрохімічні методи використовують для безперервного автоматичного аналізу газів та парів. Особливо широко ці методи застосовують для визначення мікроконцентрацій домішок токсичних речовин в атмосфері [5]. Водночас, використання полімерних плівок як дифузійних бар'єрів дозволило розширити область застосування електрохімічних методів на великі концентрації речовин. Ці газоаналізатори застосовують також для визначення концентрації газів, що розчинені в рідинах.

На підставі цих методів побудовані: кондуктометричний, кулонометричний і полярографічний газоаналізатори.

Метод кулонометричного аналізу заснований на відкритому Фарадеєм законі, що встановлює пряму пропорційність між кількістю електрики, минулої через електрохімічну систему, та кількістю речовини, що прореагували на електроди. Методи кулонометричного аналізу розділяють на дві групи: метод кулонометричного титрування і метод кулонометрії при контрольованому потенціалі.

Метод кулонометричного титрування полягає в електрохімічному отриманні деякого проміжного компонента (титранту), здатного швидко реагувати з аналізованим компонентом газової суміші, відповідно до стехіометричного співвідношення. По силі струму генерування титранту судять про концентрацію. Такі газоаналізатори призначені для визначення малих концентрацій сірчистих з'єднань (сірчистого ангідриду, сірководню, сульфідів тощо) в аналізованій суміші або в повітрі виробничих приміщень.

Метод кулонометрії при контрольованому потенціалі полягає у вимірюванні сили струму при електролізі розчину, що містить визначену речовину, причому потенціал вимірювального електрода під час електролізу підтримують в таких межах, що визначений компонент реагує повністю. На базі цього методу розроблені газоаналізатори для визначення озону, сірководню, сірчистого газу тощо.

Полярографічний метод газового аналізу заснований на електролізі електrolітів, що містять електрохімічно активні речовини, кількість яких пропорційна парціальному тиску цих речовин в газі, що безперервно продувається через електrolіт.

Сила струму електролізу

$$I_{\partial} = nF_s DC / d \quad (1.1)$$

де  $n$  – заряд іона;

$F$  – число Фарадея;

$s$  – площа поверхні індикаторного електрода;

$D$  – коефіцієнт дифузії;

$C$  – концентрація визначуваної речовини;

$\partial$  – загальна товщина дифузійного шару.

При постійному  $d$  сила струму  $I_{\partial} = kC$ .

Робота полярографічних газоаналізаторів заснована на вимірюванні граничної сили дифузійного струму згідно з рівнянням (1.1) в ланцюзі триелектродного електролітичного осередку з індикаторним, порівняльним і допоміжним електродами. В процесі вимірювання контролюється різниця потенціалів між індикаторним електродом і порівняльним; потенціал останнього постійний. Різниця потенціалів порівнюється з потенціалом, заданим блоком живлення. При відхиленні різниці потенціалів від заданого значення автоматично змінюється напруга, яка подається на електроди, що викликає зміну потенціалу допоміжного й, відповідно, індикаторного електрода до відновлення зміненої різниці потенціалів.

За відсутності в електроліті електрохімічно активної речовини індикаторний електрод поляризується і сила струму у вимірювальному ланцюзі практично рівна нулю. При введенні в осередок електрохімічно активної речовини у вимірювальному ланцюзі з'являється струм, сила якого пропорційна концентрації речовини.

### 1.3.5 Фотоколориметричні газоаналізатори

Фотоколориметричні газоаналізатори використовують у своїй роботі оптичну систему. Принцип дії цих пристроїв зводиться до зміни кольору визначених речовин при їх взаємодії з досліджуваним компонентом газової суміші. Ці пристрої використовуються для визначення токсичних домішок у газових сумішах.

У фотоколориметричних газоаналізаторах концентрація обумовленого компонента, відповідно закону Ламберта-Бера, вимірюється за зміною оптичної щільності індикаторного розчину, фарбування якого вибірково міняється в присутності обумовленого компонента.

Фотоколориметричний метод характеризується універсальністю, оскільки той самий прилад з різними індикаторними розчинами може використовуватися для аналізу різноманітних компонентів газової суміші. Він відрізняється також високою вибірковістю, яка залежить від специфічності реакції, що протікає між аналізованим компонентом і індикаторним розчином. Можливість накопичення обумовленого компонента в індикаторному розчині забезпечує високу чутливість методу. Засновані на цьому принципі прилади застосовуються для контролю стану повітряного басейну, вони вимірюють концентрацію в повітрі таких шкідливих домішок, як:  $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{Cl}_2$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ . Прилади мають верхню межу виміру від 0,0005 до 0,02 мг/л залежно від аналізованого компонента.

### 1.3.6 Термокондуктометричні газоаналізатори

В основу роботи термокондуктометричних газоаналізаторів покладений метод, який використовує залежність електричного опору провідника з великим температурним коефіцієнтом опору (терморезистора), поміщеного в камеру з піддослідною газовою сумішшю і нагрітого струмом від теплопровідності суміші, що оточує терморезистор [6].

Закономірності, що зв'язують теплопровідність газової суміші з її складом, визначаються за умови зведення до мінімуму (або підтримки постійною) частки теплоти, що передається від терморезистора конвекцією й випромінюванням. Цієї умови досягають оптимізацією режиму роботи терморезистора, вибором конструктивних характеристик терморезистора і камери, обмеженням робочої температури терморезистора (як правило, не вище 200 °С). Проста принципова схема термокондуктометричного аналізатора наведена на рисунку 1.2.

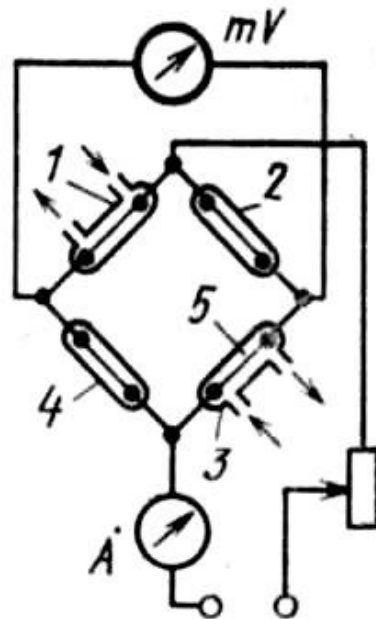


Рисунок 1.2 – Схема термокондуктометричного газоаналізатора

У плечі вимірювального неврівноваженого моста ввімкнені однакові терморезистори 5; два з них ввімкнені в протилежні плечі моста і розміщені в робочих камерах 1 і 3, через які проходить піддослідний газ, а два інші розміщені в порівняльних камерах 2 і 4, заповнених газом відомого і постійного

складу (наприклад, повітрям).

Якщо піддослідна газова суміш відрізняється по теплопровідності від порівняльного газу, то температура, а отже, і опір терморезисторів в робочих камерах відрізняються від температури й опору терморезисторів в порівняльних камерах. Сила струму в діагоналі моста залежить від величини розбалансу моста, тобто від вмісту вимірюваного компонента в газовій суміші. Для невривноваженого моста сила струму в діагоналі

$$I \approx \frac{I_0}{2} \frac{\Delta R}{R + R_{MB}}, \quad (1.2)$$

де  $I_0$  – сила струму живлення моста;

$R$  – опір терморезисторів 5;

$\Delta R$  – зміна опорів плечей моста в робочих камерах 1 і 3;

$R_{MB}$  – опір мілівольтметра.

З цього рівняння видно, що вимірювання слід проводити при  $I_0 = \text{const}$ , оскільки тільки в цьому випадку  $I$  однозначно залежить від  $\Delta R$ , тобто від вмісту вимірюваного компонента в газовій суміші.

Залежність сили струму в діагоналі моста від температур терморезисторів і стінок вимірювальних камер виражається рівнянням

$$I = k[(T_n - T_{cm}) - (T_{но} - T_{cm0})], \quad (1.3)$$

або 
$$I = k[(T_n - T_{но}) - (T_{cm} - T_{cm0})], \quad (1.4)$$

де  $k$  – постійна приладу;

$T_n$  – абсолютна температура терморезистора в робочій камері;

$T_{cm}$  – абсолютна температура стінки усередині робочої камери;

$T_{но}$  – абсолютна температура терморезистора в порівняльній камері;

$T_{cm0}$  – абсолютна температура стінки усередині порівняльної камери.

Звідси витікає, що вимірювання вмісту вимірюваного компонента можливе лише за умови рівності температур стінок усередині робочих і порівняльних камер, тобто при  $T_{cm} - T_{cm0} = 0$ . В цьому випадку справедлива однозначна залежність сили струму в діагоналі вимірювального моста від температури терморезистора в робочій камері  $I = f(T_n)$ .

Основні причини похибок в термокондуктометричних газоаналізаторах:

- коливання температури навколишнього середовища, що викликають зміну температури стінок вимірювальних камер;
- коливання напруги джерела живлення вимірювального моста;
- зміна швидкості продування газової суміші через робочі камери;
- наявність невимірювальних компонентів, зокрема, водяної пари.

При неможливості відбору на аналіз газових сумішей з постійною вологістю найчастіше суміші піддають повному осушенню перед подачею в прилад.

Більш досконалі є схеми компенсаційного типу (рисунок 1.3). Схема складається з двох неврівноважених мостів *I* і *II*, що живляться від мережі змінного струму через трансформатор *Tr*.

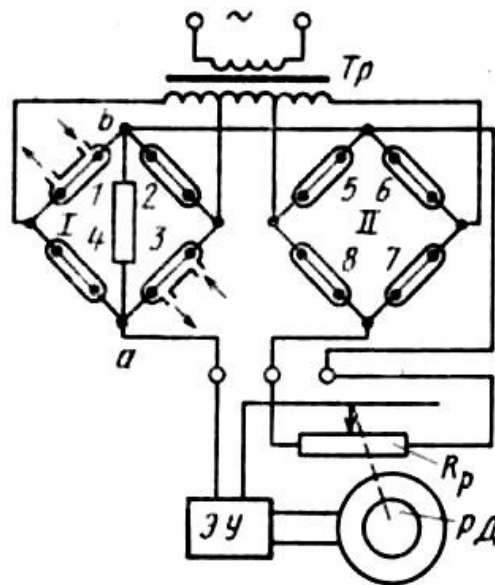


Рисунок 1.3 – Вимірювальна компенсаційна схема газоаналізатора

Два робочих плеча 1 і 3 вимірювального моста *I* омиваються піддослідним газом. Інші два плеча 2 і 4 знаходяться в газовому середовищі, склад якого відповідає початку шкали приладу. Два плеча 6 і 8 порівняльного моста *II* знаходяться в газовому середовищі, що відповідає початку шкали приладу, а плечі 5 і 7 – в газовому середовищі, склад якого відповідає кінцю шкали.

У діагональ порівняльного моста *II* включений КПР (компенсувальний

резистор)  $R_p$ , повзунок якого і вершина  $b$  моста  $I$  ввімкнені на вхід електронного підсилювача  $ЕП$ . Реверсивний двигун РД переміщує повзунок КПП  $R_p$  і показує стрілку за шкалою до тих пір, поки напруга на вершинах  $a$  і  $b$  моста не зрівноважиться напругою, що знімається з повзунка КПП. Завдяки принципу порівняння покази газоаналізатора не залежать від коливань напруги живлення і зміни температури навколишнього середовища.

Термокондуктометричні газоаналізатори, побудовані за однією з приведених схем, застосовують для визначення  $H_2$ ,  $He$ ,  $CO_2$ ,  $SO_2$ ,  $NH_3$ ,  $Ar$ ,  $Cl_2$ ,  $HCl$  в технологічних сумішах різного складу.

### 1.3.7 Магнітні газоаналізатори

У магнітних газоаналізаторах, які належать до аналізаторів бінарних сумішей, концентрація обумовленого компонента вимірюється за зміною магнітних властивостей газової суміші [7]. Газу за їх магнітною сприйнятливістю поділяються на парамагнітні, що втягуються в магнітне поле, і діамагнітні, що виштовхуються з нього. Найбільшу магнітну сприйнятливість має кисень, що належить до парамагнітних газів. У таблиці 1.1 наведені значення відносної об'ємної магнітної сприйнятливості для газів, причому знак мінус належить до діамагнітних газів.

Таблиця 1.1 – Відносна об'ємна магнітна сприйнятливість газів

Газ	Відносна об'ємна магнітна сприйнятливість	Газ	Відносна об'ємна магнітна сприйнятливість
Кисень $O_2$	1	Водень $H_2$	-0,0011
Повітря (21% $O_2$ )	0,211	Азот $N_2$	-0,004
Окис азоту $NO$	0,363	Двоокис вуглецю $CO_2$	-0,0057
Двоокис азоту $NO_2$	0,0616	Аміак $NH_3$	-0,0057
Метан $CH_4$	-0,0123	Водяна пара $H_2O$	-0,004

Зіставлення даних, наведених у таблиці 1.1, показує, що газу, крім кисню, окису і двоокису азоту, є практично немагнітними, оскільки їх об'ємна

магнітна сприйнятливість на два порядки нижче, ніж в кисню. Таким чином, магнітні властивості газової суміші визначаються концентрацією кисню, оскільки NO і NO<sub>2</sub>, які є продуктами високотемпературних окисних реакцій, зустрічаються не часто й у малих концентраціях.

Об'ємна магнітна сприйнятливість кисню  $h$  пов'язана з питомою магнітною сприйнятливістю  $c$ , і щільністю  $r$  в залежності  $h=cr$ ; оскільки  $c = C/T$ , а  $r = PM/TR$ ,

$$h = CPM/(T^2R), \quad (1.5)$$

де  $C$  – постійна Кюрі;

$P, T$  – абсолютний тиск і температура кисню з молекулярною масою  $M$ ;

$R$  – газова постійна.

Таким чином, магнітна сприйнятливість кисню залежить від тиску і знижується з ростом температури пропорційно  $1/T^2$ .

Об'ємна магнітна сприйнятливість суміші газів визначається співвідношенням

$$X_{cm} = \sum_{i=1}^n C_i X_i = C_k X_k + (1 - C_k) X_n, \quad (1.6)$$

де  $C_i$  і  $X_i$ , – об'ємні концентрації компонентів газової суміші та їх об'ємні магнітні сприйнятливості;

$C_k$  і  $X_k$  – об'ємна концентрація кисню і його магнітна сприйнятливість;

$X_n$  – усереднена магнітна сприйнятливість невизначених компонентів.

Оскільки  $C_n \ll C_k$ , зміна об'ємної магнітної сприйнятливості газової суміші однозначно визначається концентрацією кисню за умови стабілізації температури і тиску.

Існує декілька методів виміру магнітної сприйнятливості суміші газів, найбільш розповсюджений з них пов'язаний з використанням явища термомагнітної конвекції. Остання являє собою рух кисневмісного газу в неоднорідному магнітному і тепловому полях. Засновані на цьому ефекті газоаналізатори, що випускаються промисловістю, виконуються з одномостовою або двомостовою вимірювальними схемами.

На рисунку 1.4, а представлена схема чутливого елемента, застосовуваного у вітчизняних газоаналізаторах типу МН, і розміщення його між полюсами магніту (рисунк 1.4, б).

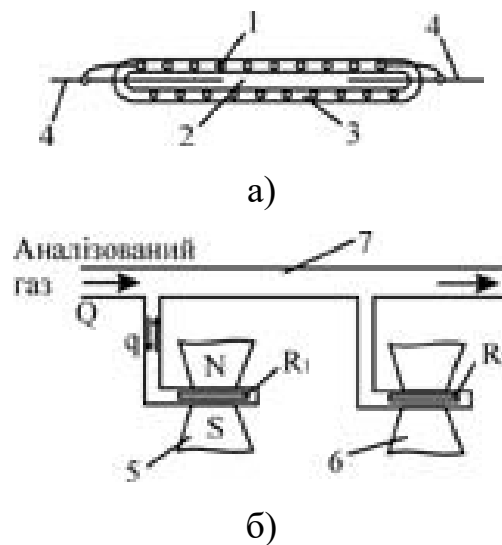


Рисунок 1.4 – Схема чутливого елемента киснеміра з зовнішньою магнітною конвекцією

Чутливий елемент являє собою платиновий дріт 1 діаметром 0,02 мм, намотаний на скляний капіляр 2 й осклований з зовнішньої сторони. 3. Кінці спирали підпаяні до струмоводів 4. Зовнішній діаметр чутливого елемента складає 0,5–0,6 мм, опір резистора 40 Ом. Кисневмісний газ, що протікає по трубці 7, втягується в магнітне поле, при цьому він нагрівається від резистора  $R_1$  і його магнітна сприйнятливність знижується. Холодний газ виштовхує нагрітий, створюючи потік магнітної конвекції  $q$ , що прохолоджує резистор  $R_1$ . Резистор  $R_2$  для забезпечення однакових умов тепловіддачі розміщений у середині немагнітного мідного блоку 6, що має ту ж конфігурацію, що й постійний магніт 5. На рисунку 1.4, б напрямки теплової та магнітної конвекції збігаються, при розміщенні кришки з лініями підведення газу 7, під магнітом напрямки конвекції стають зустрічними.

У газоаналізаторах МН використовується двомостова вимірювальна схема, наведена на рисунку 1.5.

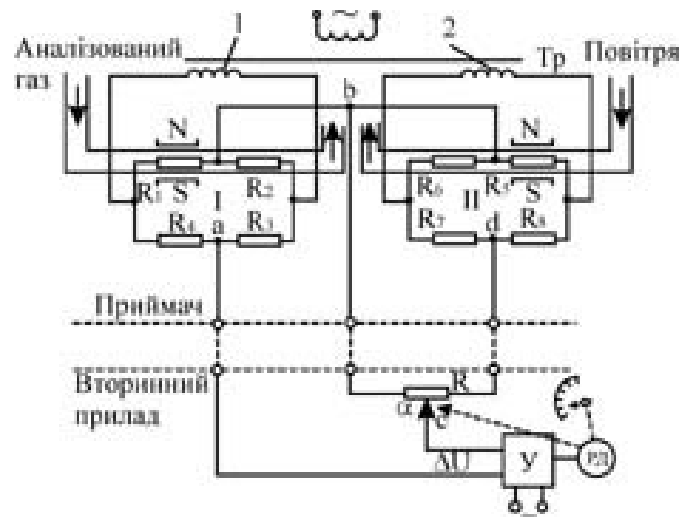


Рисунок 1.5 – Схема автоматичного магнітного газоаналізатора типу МН

У первинному перетворювачі (приймачі) розміщено два мости, що живляться від вторинних обмоток 1, 2 силового трансформатора Тр. Міст 1 є робочим, його резистори  $R_1$ ,  $R_2$ , що являють собою платинові чутливі елементи з зовнішнім теплообміном, омиваються аналізованим газом. Резистор  $R_1$  знаходиться в неоднорідному магнітному полі,  $R_2$  – між полюсами несправжнього магніту (мідного блоку). Резистори  $R_2$ ,  $R_4$  є постійними й виконані з манганінового дроту.

За наявності кисню в суміші газів міст 1 працює в нерівноважному режимі та напруга у вимірювальній діагоналі  $U_{ab}$  залежить від концентрації кисню. Для перевірки початкової точки шкали вторинного приладу приймач забезпечується металевим шунтом. За його опускання знімається магнітне поле, резистори  $R_1$  і  $R_2$  попадають в однакові умови й міст 1 повинен бути урівноважений.

Міст II є мостом порівняння. Його плечі  $R_5$  і  $R_6$ , виконані з платинового дроту, омиваються повітрям, причому  $R_6$ , як і  $R_2$  знаходиться між полюсами несправжнього магніту. Резистори  $R_7$  і  $R_8$  виконані подібно  $R_3$  і  $R_4$  з манганінового дроту. Оскільки концентрація кисню в повітрі є стабільною, міст II розвиває постійний сигнал небалансу  $U_{bd}$ . Коливання  $U_{bd}$  обумовлені тільки відхиленнями напруги живлення, температури та тиску навколишнього середовища.

Для виміру сигналу робочого моста використовується компенсаційний метод, причому сигналом компенсації служить частка напруги моста порівняння, що знімається з реохорда,  $U_{bc}=aU_{bd}$ , де  $a$  змінюється від 0 до 1. Компенсація сигналу робочого моста часткою сигналу моста порівняння здійснюється автоматично, як вторинний прилад використовується автоматичний урівноважений міст із деякими змінами у вимірювальній схемі.

У газоаналізаторах із двомостовою вимірювальною схемою вплив коливань напруги живлення, температури навколишнього середовища на показання приладу менший, ніж у приладах з одномостовою вимірювальною схемою. Це порозумівається з одночасним впливом перерахованих факторів на сигнали робочого і порівняльного мостів.

Киснеміри типу МН-5106 мають межі виміру 0–10%  $O_2$  при граничній похибці виміру  $\pm 0,25\%$   $O_2$ , МН-5130 при нульовій нижній межі виміру мають верхні 0,5; 1; 2; 5; 10; 21; 50 %, при цьому гранична похибка залежить від діапазону виміру і знаходиться в межах від  $\pm 2$  до  $\pm 10\%$  значення, що нормує. Остання цифра відповідає мінімальному діапазону виміру приладу. Киснеміри МН можуть мати безнульову шкалу з межами виміру 50–100 %  $O_2$ , 80–100 %  $O_2$ . Час установлення вихідного сигналу знаходиться в межах 0,5–1,5 хв.

Завдяки різкій відмінності магнітної сприйнятливості кисню від інших газів не потрібно попереднього видалення невизначених компонентів. Проте з метою захисту чутливих елементів установка газоаналізатора повинна містити в собі фільтр для очищення проби від сірчистого газу, якщо останній міститься в ній.

### 1.3.8 Електричні газоаналізатори

В електричних газоаналізаторах концентрація того чи іншого компонента визначається за зміною електричних властивостей газової суміші або рідини, з якими прореагував обумовлений компонент. До числа найбільш розповсюджених електричних газоаналізаторів належать електрохімічні, які застосовуються для виміру мікроконцентрацій токсичних газів, що містяться в

повітрі, визначення концентрації забруднювальних домішок при виробництві чистих газів.

До електрохімічних газоаналізаторів належать пристрої, у яких вихідний сигнал визначається електрохімічними явищами, що відбуваються в електродних системах, занурених в аналізований розчин. Електрохімічні методи в основному використовуються для аналізу рідин. Для аналізу газів частіше використовуються електрохімічні аналізатори вольтамперометричні і кулонометричні.

Вольтамперометричні газоаналізатори. Якщо в розчин електроліту занурені два електроди, до яких прикладена різниця напруги від зовнішнього чи внутрішнього джерела ЕРС, то в зовнішньому ланцюзі потече струм, обумовлений рухом іонів у розчині [8]. При цьому в поверхні електродів збираються іони протилежного знаку, створюючи у середині розчину різницю напруги  $U$ , спрямовану зустрічно активному в ланцюзі напрузі  $E$ . Струм у ланцюзі визначається вираженням

$$I = (E - U)/R, \quad (1.7)$$

де  $R$  – опір розчину;

$U$  – різниця внутрішніх потенціалів анода  $j_a$  і катода  $j_k$ .

У вольтамперометричних газоаналізаторах використовується фоновий розчин електроліту, в якому при відповідному матеріалі електродів і рівні дієвої напруги відбувається поляризація одного з електродів, і струм у ланцюзі за відсутності обумовленого газу практично дорівнює нулю.

За наявності аналізованого газу в ланцюзі виникає поляризаційний струм, що визначається кількістю введених у фоновий розчин молекул газу, здатних окислитися або відновлюватися на поляризованому електроді, змінюючи його потенціал. Порівняльний електрод має поверхню, в сотні разів перевищуючу поверхню вимірювального електрода, завдяки чому його потенціал не залежить від струму, що протікає в ланцюзі.

При введенні в розчин деполаризуючого аналізованого газу на поверхні поляризованого електрода протікають наступні реакції: перенесення деполаризатора з розчину на поверхню електрода, електрохімічна реакція на

електроді, виділення на ньому продуктів реакції. Найбільш повільним процесом є перенесення деполяризатора, при дифузійному підведенні якого струм у розчині визначається співвідношенням

$$I = nFSD \left( \frac{dc}{dx} \right)_{x=0}, \quad (1.8)$$

де  $n$  – число електронів, що переносяться;

$F$  – число Фарадея;

$S$  – площа електрода;

$D$  – коефіцієнт дифузії;

$\left( \frac{dc}{dx} \right)_{x=0}$  – просторовий градієнт концентрації в поверхні електрода.

Згідно з наведеним виразом, струм у розчині зростає зі збільшенням концентрації деполяризуючої речовини та площі електрода. Зниження товщини дифузійного шару внаслідок перемішування електроліту також приводить до росту струму.

Збільшення діючої в ланцюзі напруги викликає пропорційне збільшення струму, але в обмежених границях, обумовлених залученням в електродний процес усіх прилеглих деполяризуючих часток. Сталий струм, названий дифузійним, визначається швидкістю дифузії часток із глибини розчину.

Графік залежності струму від прикладеної напруги називається поляризаційною кривою. Її характер при заданому типі електродів і фоновому електроліті визначається видом газу, а дифузійний струм  $I_d$  – його концентрацією. Графік поляризаційної кривої, представлений на рисунку 1.6, має форму хвилі. Напівхвильовий потенціал, що відповідає половині дифузійного струму, не залежить від концентрації та є характеристикою деполяризатора. Таким чином, у вольтамперометричних газоаналізаторах струм, що протікає в зовнішньому ланцюзі, що є вихідним сигналом аналізатора, однозначно визначається концентрацією обумовленого газу.

Якщо як вимірювальний електрод використовується ртуть, прилади називаються полярографічними аналізаторами чи полярографами.

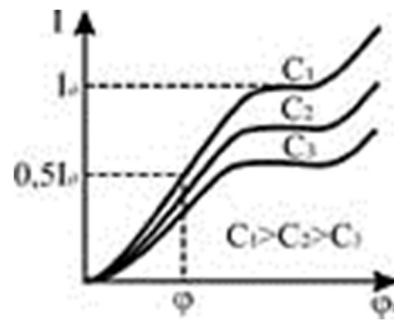


Рисунок 1.6 – Графіки поляризаційних кривих

При вимірах концентрації кисню в чистих газах у якості поляризованого електрода використовується катод, фоновим електролітом служить розчин кислоти. Підведення аналізованого газу здійснюється таким чином, щоб між концентраціями кисню в газах і електроліті встановлювалася рівновага. Кисень є активним деполіаризатором, він відновлюється на катоді до перекису водню, викликаючи проходження поляризаційного струму.

При аналізі вмісту  $\text{SO}_2$  у технічних газах для виключення впливу кисню як поляризований електрод використовується анод, на якому  $\text{SO}_2$  окислюється з утворенням сірчаної кислоти.

Кулонометричні газоаналізатори засновані на вимірі кількості електрики, витраченої при електролізі [9]. Відповідно закону Фарадея, для виділення при електролізі кількості речовини  $G$  необхідно через розчин пропустити струм  $I$  протягом часу  $t$

$$G = Mit / (96\,492n), \quad (1.9)$$

де  $M$  – молекулярна маса окисленої чи відновленої речовини;

$n$  – число електронів, що беруть участь в електродному процесі.

Речовина, що виділилася при електролізі, зв'язується без залишку з аналізованим компонентом газової суміші, завдяки чому мірою концентрації останнього служить струм, що протікає,  $I$ . Останній регулюється таким чином, щоб забезпечувалася нейтралізація розчину.

Кулонометричні газоаналізатори завдяки використанню компенсаційного методу забезпечують високу точність виміру, їх показання не залежать від вологості газу, його тиску і температури, параметрів навколишнього середовища.

## 2 ВПЛИВ ВУГЛЕКИСЛОГО ГАЗУ НА ЖИТТЄДІЯЛЬНІСТЬ ЛЮДИНИ

### 2.1 Загальні положення

Вуглекислий газ ( $\text{CO}_2$ ) – природний компонент навколишнього повітря, що утримується в ньому в концентрації приблизно 400 ppm. Вуглекислий газ присутній в навколишньому повітрі завжди й не є чимось шкідливим доти, поки його концентрація знаходиться в безпечних межах.  $\text{CO}_2$  в основному зустрічається у виді газу, але також існує й у твердому виді (сухий лід).

Вуглекислота входить до складу джерельної води, виділяється при вирубці дерев, при гнитті та горінні органічних речовин, при подиху живих істот. Цей газ також називають «парниковим газом», тому що він поглинає тепло в атмосфері й частина його осідає назад до поверхні землі, тим самим сприяючи глобальному потепленню.

Одиницею виміру змісту  $\text{CO}_2$  заведено використовувати величину ppm (від англ. parts per million, «часток на мільйон»),  $1000 \text{ ppm} = 0,1\%$ . Існує гранично припустима концентрація (ГДК) вуглекислого газу в приміщеннях. Стандарт [9] установлює припустимий рівень вуглекислого газу ( $\text{CO}_2$ ) у приміщеннях від 1000 до 1400 ppm. Оптимальний рівень знаходиться в діапазоні від 400 до 800 ppm.

Усі джерела  $\text{CO}_2$  підвищують загальний рівень вуглекислоти на планеті. Це впливає на зміну клімату, а також проявляється в самопочутті людей.

Вплив вуглекислого газу на людський організм недооцінений. Не дуже давно люди стали насправжки задумуватися про причини зниження рівня життєвої активності в містян, особливо тих, що проживають в мегаполісах, підвищеній стомлюваності, зростання випадків головного болю. І вуглекислий газ є однією з головних причин подібного роду проблем.

## 2.2 Гранично припустима концентрація

Середня концентрація вуглекислого газу, що утримується в чистому повітрі – 0,04 %. Однак у місцях, заселених людьми, така цифра практично не зустрічається. У міському повітрі вміст  $\text{CO}_2$  складає приблизно 0,06-0,08 %, і це повітря через вентиляцію попадає в будинки й робочі приміщення. Навіть гарна вентиляційна система не здатна забезпечити нормальну концентрацію  $\text{CO}_2$ . Рідкісним винятком є той випадок, коли людина проживає і працює в екологічно чистому місці.

Вуглекислий газ виробляється клітками організму в кількості до 700 г у день і поширюється по капілярах. Передається він через кров у розчиненому виді або в складі білків (таких як гемоглобін). Основна частина  $\text{CO}_2$  розчиняється, при цьому незначна його частина перетворюється в слабку вугільну кислоту під дією карбоангідрази (CAs) еритроцитів. Слабка вугільна кислота у водному середовищі розпадається на іони  $\text{H}^+$  і  $\text{HCCO}_2^-$ . Виділення вуглекислого газу відбувається в легенях через альвеолярну мембрану.

Основна функція  $\text{CO}_2$  в організмі полягає в регуляції подиху через рецептори аорти та довгастого мозку, що стимулює центр подиху в стовбурній частині головного мозку.

Як було зазначено вище,  $\text{CO}_2$  виробляється людиною при видиху. У спокійному стані людина поглинає в середньому 20-30 літрів кисню, виділяючи при цьому 18-25 літрів вуглекислого газу. Таким чином, повітря, що видихає людина, містить вуглекислоти приблизно в 100 разів більше, ніж вона має в чистому повітрі атмосфери.

Було проведено велике дослідження з виявлення максимально припустимої концентрації  $\text{CO}_2$  у приміщеннях [10]. Результатами даного дослідження користуються багато екологів, що намагаються пояснити людям небезпеку підвищеного вмісту вуглекислоти. Основним висновком є те, що в житлових і суспільних приміщеннях значення концентрації  $\text{CO}_2$  не повинно перевищувати 1000 ppm, а середня добова концентрація повинна бути нижче 500 ppm.

Перевищення цього рівня приводить до збільшення кількості скарг на якість повітря, а також з'являються перші ознаки гіпоксії [11].

### 2.3 Медичне обґрунтування небезпеки CO<sub>2</sub>

Вміст CO<sub>2</sub> заведено вважати основним параметром антропогенного забруднення повітря, тому що зростання концентрації CO<sub>2</sub> у приміщенні прямо пов'язано з підвищенням інтенсивності запахів, вироблених продуктами людського обміну. Тобто, вміст CO<sub>2</sub> у приміщенні є показником інтенсивності його використання людиною.

Багато негативних симптомів, які відчуває людина, є наслідком споживання повітря поганої якості з високою концентрацією CO<sub>2</sub>. До проявів недостатці свіжого повітря відносяться апатія, зниження зосередженості та посидючості, порушення якості сну (і, як наслідок, утома з ранку).

Ще 150 років тому німецький хімік Макс фон Петтенкофер вже визнавав «погане повітря» як негативний фактор тривалого перебування в житлових приміщеннях і освітніх установах, й виділив CO<sub>2</sub> як найважливіший компонент оцінки якості повітря.

Про те, що норми CO<sub>2</sub> у приміщенні (ppm) дійсно впливають на самопочуття людей, свідчать численні дослідження, що проводилися в країнах Азії та Європи. Серед них:

– Індійські вчені з Калькутти визначили, що CO<sub>2</sub> – небезпечний токсин, який у підвищеній концентрації приводить до біохімічних змін аж до клітинних мембран, а також провокує ацидоз. Досліджували близько 600 людей із промислових районів і пригорода, та з'ясували, що в тих, хто живе в загазованій атмосфері, у середньому на 60 % вище рівень бікарбонату в сироватці крові.

– Вчений Робертсон з Великобританії розрахував, що несприятливі зміни в людському організмі починаються вже при вмісті CO<sub>2</sub> у межах 426 ppm. Більш істотні перевищення провокують короткочасне перезбудження,

занепокоєння що не припиняється й зниження бажання виявляти фізичну активність.

– Група вчених з Фінляндії на чолі з Olli Seppanen залучили до свого експерименту понад 30 тисяч осіб і знайшли, що в тих установах, де концентрація вуглекислого газу не перевищує 800 ppm, люди працюють з більшою концентрацією уваги, рідше скаржаться на головний біль та менше хворіють на респіраторні інфекції.

– В Італії вчені (члени Європейською комісією DG SANCO у рамках програми «Health Effects of School Environment»), досліджували вплив CO<sub>2</sub> на дітей (експеримент проводився у 2006 році) і виявили, що при перевищенні рівня в 1000 ppm у дітей у 2 рази вище ризик появи риніту, а сухий кашель виникає в 3,5 рази частіше. Діти, що довго знаходяться в загазованих приміщеннях, мають більш уразливу носопроліг.

– Корейські фахівці досліджували зв'язок між астмою й концентрацією вуглекислого газу у квартирах, де живуть хворі діти. З'ясувалося, що зміст CO<sub>2</sub> прямо впливає на кількість приступів.

– Аудиторська група «KPMG» (Нідерланди) і вчені з Мідлсекського університету (Великобританія) провели експеримент серед добровольців, які були співробітниками офісу. Вони довели, що при перевищенні рівня в 800 ppm уважність знижувалася на 30 %, на рівні 1000 ppm у людей починалися головні болі. Коли рівень досяг 1500 ppm, то у більшості (80 %) з'явилася втома, а при 2000 ppm 60 % працівників не змогли зосередитися на своїх звичайних діях.

Усі ці дослідження так чи інакше підтверджують: духота, запаморочення, падіння працездатності та інші симптоми загальних нездужань виникають не від недоліку O<sub>2</sub>, а від надлишку CO<sub>2</sub>.

З медичного погляду основний вплив вуглекислий газ робить на центральну нервову систему. При концентрації, близької до 20000 ppm, відбувається погіршення умовно-рефлекторної діяльності, зниження вентиляційної функції легень, порушення гомеостазу. А при концентрації близько 50000 ppm

гнітяться електрична активність мозку [12].

Основною причиною усіх захворювань органів є порушення процесів метаболізму. Цей процес складається з трьох етапів [13]:

- вентиляція – це надходження повітря по повітроносних шляхах в альвеоли під час вдиху і його видалення під час видиху;
- дифузія або проникнення кисню і вуглекислого газу через альвеолярно-капілярну мембрану з альвеол у легеневі капіляри й назад;
- перфузія – доставлення крові, збагаченої киснем, по легневих артеріях, розподіл її по капілярах і видалення з них крові, багатой вуглекислим газом, у зворотному напрямку по легневих венах.

З вищенаведеного випливає, що у видихуваному повітрі виявляється результат змін у кожній з ланок, що в тім або іншому ступені сприяє порушенню захисних механізмів імунної системи.

При поглинанні організмом повітря з підвищеною концентрацією  $\text{CO}_2$  росте парціальний тиск двоокису вуглецю в легенях і його розчинність у крові, через що утвориться слабка вугільна кислота ( $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} = \text{H}_2\text{CO}_3$ ), що розпадається в остаточному підсумку на  $\text{H}^+$  і  $\text{HCO}_3^-$ . Відбувається окислення крові – газовий ацидоз. Чим вище концентрація вуглекислого газу у вдихуваному повітрі, тим швидше відбувається зменшення рН в крові.

Кисотно-лужна рівновага є важливим параметром, що підтримується в крові людини у визначених межах. Це необхідно для нормального функціонування різних систем організму, протікання біохімічних реакцій, оптимального функціонування ферментів.

При ацидозі можуть бути наступні симптоми:

- нудота, блювота;
- частішання частоти подиху;
- головний біль;
- падіння артеріального тиску;
- порушення ритму серця.

Ацидоз може привести організм до критичного стану. Деякі можливі

наслідки:

- підвищення згортання крові;
- інфаркт міокарда;
- порушення функції мозку;
- кома;
- летальний результат.

У таблиці 2.1 представлені наслідки підвищеного змісту CO<sub>2</sub> у приміщенні на людину [14].

Таблиця 2.1 – Вплив підвищеного змісту вуглекислого газу в приміщенні на організм людини

Час впливу вуглекислого газу на організм людини	Результат впливу вуглекислого газу на організм людини (симптоми захворювань і захворювання)
Короткочасний вплив (кілька годин)	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Відчуття нестачі повітря</li> <li>– Головний біль, запаморочення</li> <li>– Утома</li> <li>– Погана концентрація уваги</li> <li>– Апатія</li> <li>– Відчуття жару</li> <li>– Роздратування очей, носоглотки</li> <li>– Поганий сон</li> </ul>
Тривалий вплив (регулярно, від декількох годин до декількох років)	Вплив на носоглотку і дихальну систему: <ul style="list-style-type: none"> <li>– Риніт</li> <li>– Загострення алергії</li> <li>– Сухий кашель</li> <li>– Приступи астми</li> <li>– Сухість слизових оболонок</li> </ul>
	Метаболічний ацидоз. Можливі наслідки: <ul style="list-style-type: none"> <li>– Захворювання крові</li> <li>– Діабет</li> <li>– Захворювання серцево-судинної системи</li> <li>– Збільшення маси тіла</li> <li>– Крихкість кісток</li> </ul>
	Порушення сну: <ul style="list-style-type: none"> <li>– Безсоння</li> <li>– Відсутність відчуття бадьорості</li> <li>– Посилення хропіння</li> </ul>
	Погіршення репродуктивної функції людини
	Негативні зміни в ДНК

## 3 ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ ДАТЧИКІВ ВУГЛЕКИСЛОГО ГАЗУ

### 3.1 Датчик TGS4161

TGS4161 – датчик для визначення концентрації вуглекислого газу від виробника FIGARO (рисунок 3.1). Використовується в системах контролю якості повітря.



Рисунок 3.1 - Датчик TGS4161

Твердотілий електролітичний датчик TGS4161 може визначати концентрацію діоксиду вуглецю в діапазоні від 350 ppm до 10000 ppm [15].

Елемент, чуттєвий до  $\text{CO}_2$ , складається з твердого електроліту, що знаходиться між двома електродами, і підкладки друкованого нагрівача з оксиду рутенію  $\text{Ru}_2$ . Відповідно до зміни електрорушійної сили, генерованої між електродами, можна визначити концентрацію  $\text{CO}_2$  у повітрі. Для того, щоб мінімізувати вплив інтерференційних газів, у верхній частині кришки датчика утримується адсорбент – цеоліт.

Датчик показує лінійну залежність між зміною електрорушійної сили та концентрацією  $\text{CO}_2$  у логарифмічній шкалі.

Нижче представлений графік залежності від вологості (рисунок 3.2) і графік чутливості (рисунок 3.3).

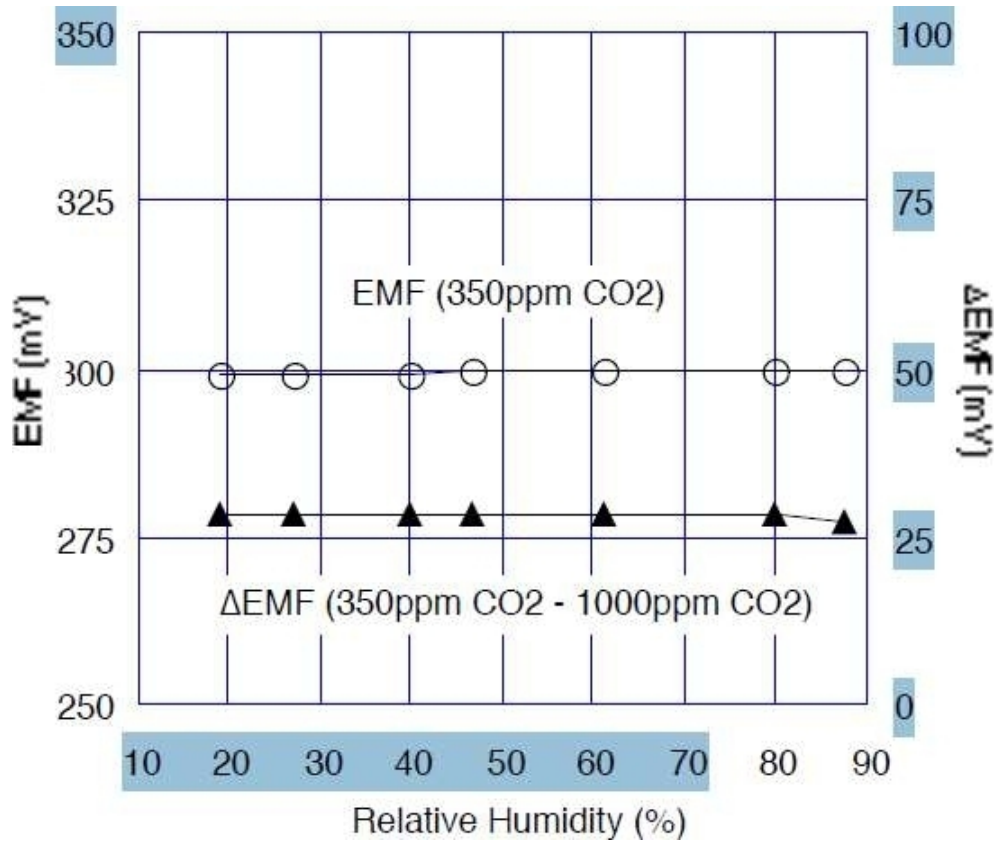


Рисунок 3.2 - Залежність від вологості

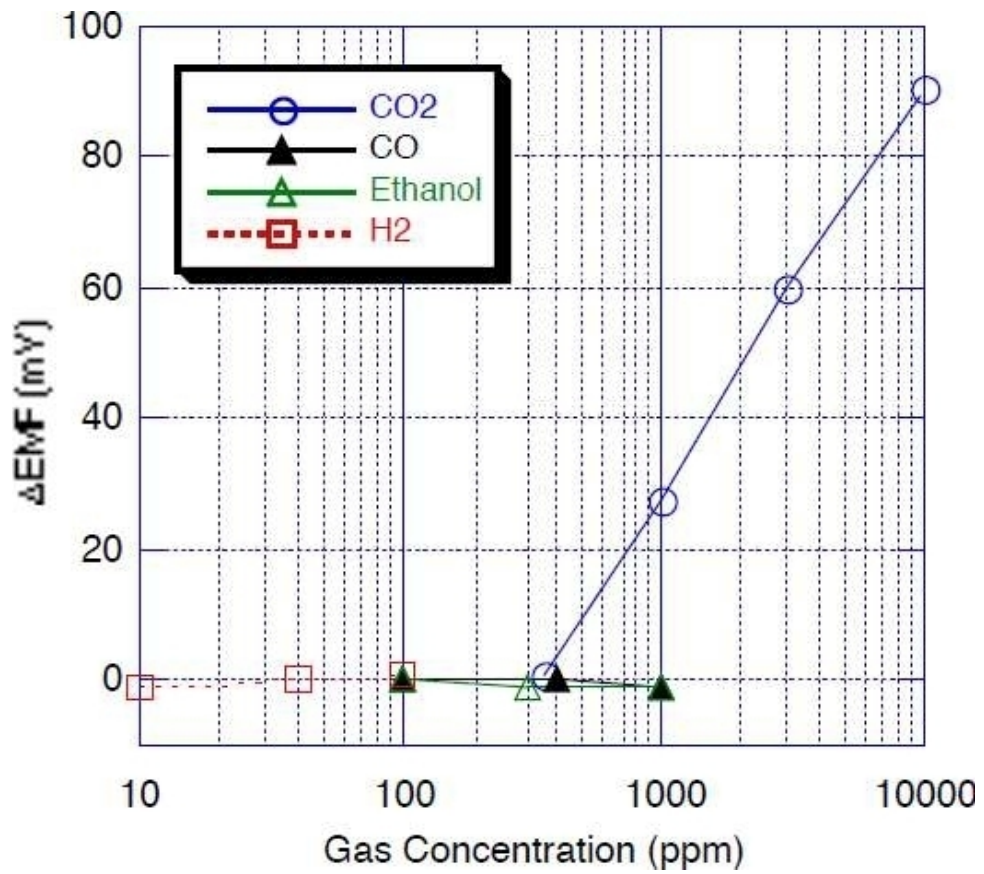


Рисунок 3.3 - Графік чутливості

У таблиці 3.1 приведені технічні характеристики датчика [15].

Таблиця 3.1 - Технічні характеристики TGS4161

Тип чуттєвого елемента		Твердий електроліт
Детектовані гази		Діоксид вуглецю
Типовий діапазон виявлення		350 ~ 10000 ppm
Електричні характеристики	Опір	70 ± 7 Ом при кімнатній температурі
	Струм нагрівача	Приблизно 50 мА
	Споживана потужність нагрівача	Приблизно 250 мВт
	Електрорушійна сила	220~490 мВ (350 ppm CO <sub>2</sub> )
	Чутливість	44~72 мВ
	Напруга нагрівача	5.0 ± 0.2 В (DC)
Характеристики датчика	Час відгуку	Приблизно 1,5 хвилини
	Точність виміру	Приблизно ±20 % від 1000ppm CO <sub>2</sub>
Умови експлуатації		-10~50 °С, 5~95 %
Умови збереження		-20~60 °С, 5~90 %
Стандартні умови іспитів	Стан випробуваного газу	CO <sub>2</sub> в повітрі при 20±2 °С, 65±5 % вологості
	Період кондиціонування перед тестом	12 годин або довше

Переваги:

- низьке споживання енергії;
- висока вибірковість по CO<sub>2</sub>;
- довгий термін служби.

Недоліки:

- висока вартість;
- залежність показань від вологості.

### 3.2 Датчик MG811

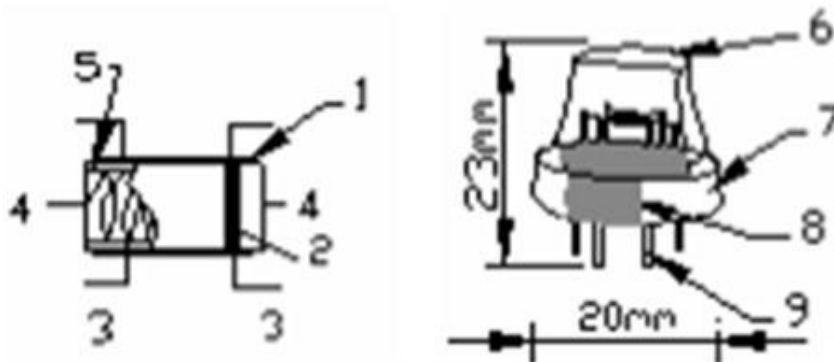
MG811 – датчик визначення концентрації CO<sub>2</sub> у повітрі від виробника Nanwei (рисунок 3.4). Має високу чутливість до вуглекислого газу й помірковано чуттєвий до етанолу та чадного газу.



Рисунок 3.4 – Датчик MG811

Принцип роботи цього датчика полягає в тому, що він повертає аналогову напругу, що падає при підвищенні концентрації  $\text{CO}_2$  [16]. Для одержання стабільних і точних результатів датчик повинний бути прогрітий. Для цього в його складі присутній нагрівальний елемент, що вимагає окремого живлення 5 В. Прогрів датчика рекомендується проводити протягом декількох годин перед використанням. Через те, що датчик споживає досить великий струм, потрібне підключення зовнішнього джерела живлення. MG811 також має потенціометр, яким можна відрегулювати до потрібного граничного значення. При досягненні цього порога на датчику загоряється світлодіод. Газосенсор має 3 виходи: аналоговий, цифровий вихід TTL, вихід температурної компенсації.

Структура MG811 показана на рисунку 3.5.



1 – шар твердого електроліту, 2 - золоті електроди, 3 - платиновий шар, 4 – нагрівач, 5 - порцелянова трубка, 6 – 100 м двошарова сітка з нержавіючої сталі, 7 - кільце, покрите нікелем і міддю, 8 – бакеліт, 9 - нікельований штифт.

Рисунок 3.5 - Структура сенсора MG811

На рисунку 3.6 показана крива чутливості датчика.

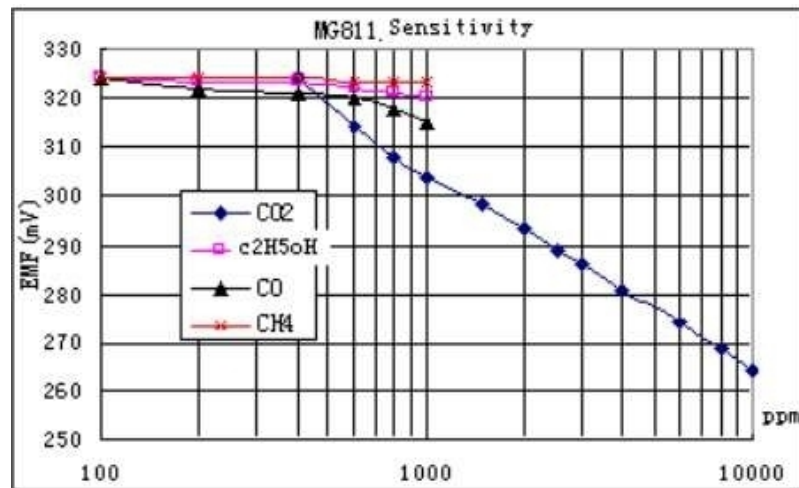


Рисунок 3.6 - Крива чутливості MG811

Нижче зображені залежності датчика від температури (рисунок 3.7) і вологості повітря (рисунок 3.8) [16].

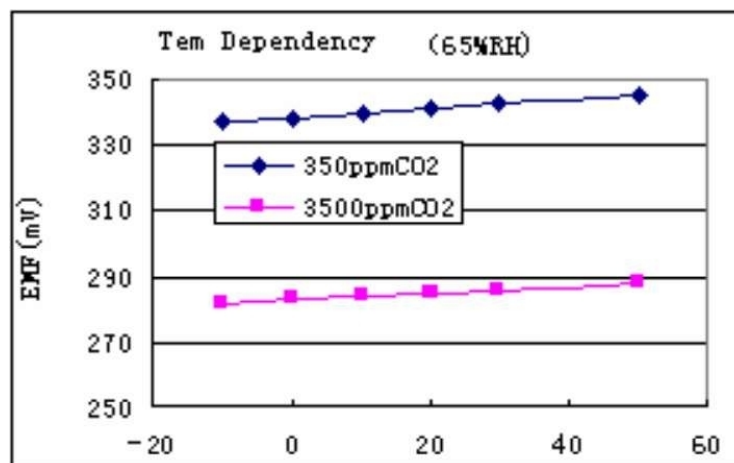


Рисунок 3.7 - Залежність MG811 від температури

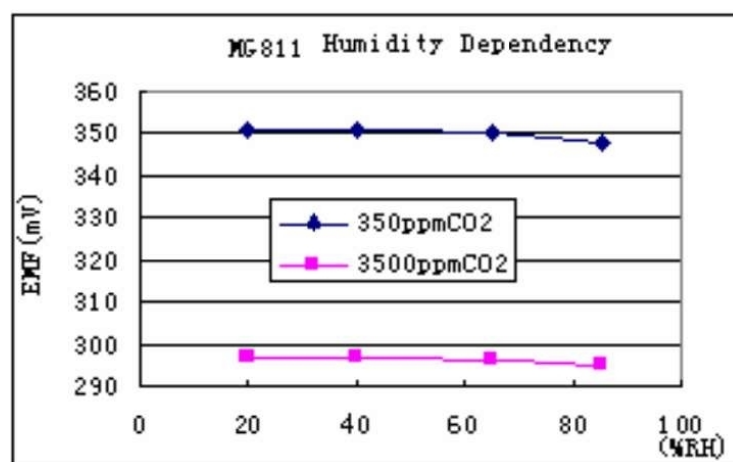


Рисунок 3.8 – Залежність MG811 від вологості

Переваги:

- висока чутливість і селективність стосовно CO<sub>2</sub>;
- низька залежність від вологості й температури.

Недоліки:

- необхідність тривалого прогріву перед використанням;
- висока вартість.

### 3.3 Датчик MQ135

MQ135 – газовий сенсор від виробника Waveshare Electronics (рисунок 3.9). Дозволяє виявляти різні гази (аміак, вуглекислий газ, азот, кисень, спирт), а також пил і дим.

Використовується в приладах для виміру якості повітря в будинках і офісах.

Застосування газового датчика MQ135:

- виявлення шкідливих газів;
- моніторинг якості повітря;
- виявлення забруднення повітря в приміщеннях;
- виявлення промислових забруднень;
- портативне виявлення забруднення повітря.



Рисунок 3.9 – Датчик MQ135

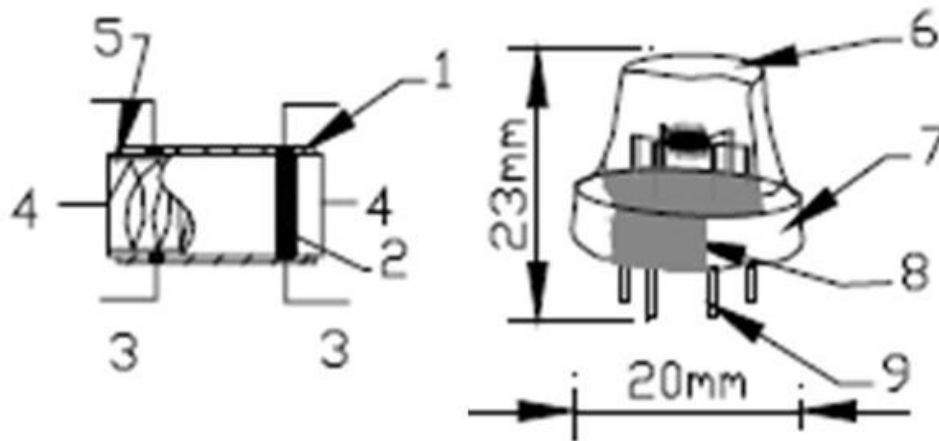
Основним елементом газових сенсорів даної серії є невеликий нагрівальний елемент. Завдяки електрохімічному датчику, що знаходиться усередині головного елемента, відбувається хімічна реакція, з її результатів виходять

дані про концентрації того чи іншого газу.

Робоча напруга цього датчика складає 5 В. Слід зазначити, що через нагрівальний елемент датчик споживає досить великий струм, тому необхідно, щоб блок живлення забезпечував 200 мА. Рекомендується використовувати зовнішнє джерело живлення. У датчика маються аналоговий і цифровий виходи [17].

Для одержання найбільш точних і стабільних результатів варто прогріти датчик, залишивши його включеним на добу. Так само, спираючись на технічні характеристики датчика, перед зняттям показників необхідний прогрів приладу близько однієї хвилини.

Структура газового датчика MQ135 зображена на рисунку 3.10.



1 – газочутливий шар, 2 – золотий електрод, 3 – платинова електродна лінія, 4 – нагрівальна обмотка зі сплаву нікель-хрому, 5 – керамічна трубка, 6 – мережа антивибуху, 7 – затискне кільце, 8 – бакелітова підстава, 9 – нікелеві контакти з мідним покриттям.

Рисунок 3.10 – Структура MQ135

При використанні даного датчика обов'язково робити регулювання чутливості. Величина опору MQ135 змінюється залежно від видів і концентрацій газів.

На рисунку 3.11 приведені характеристики чутливості MQ135 для декількох газів.

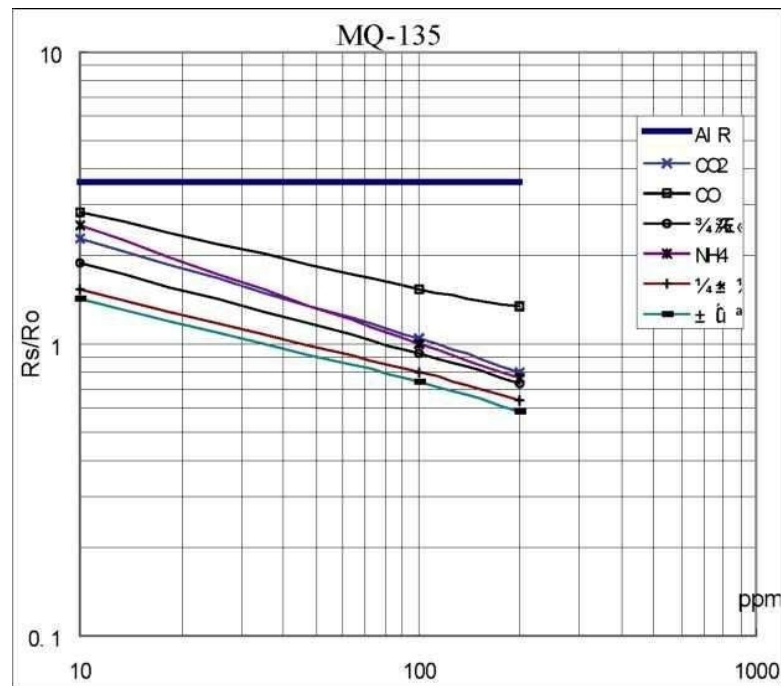


Рисунок 3.11 - Характеристики чутливості MQ135 для декількох газів

Газовий сенсор MQ135 – один з найдешевших на ринку подібних датчиків.

Технічні характеристики:

- напруга живлення: 5 В;
- споживаний струм: 150 мА;
- габарити: 32 x 20 x 22 мм (Д x Ш x В).

Переваги:

- швидкий відгук;
- наявність аналогового та цифрового виводів;
- низька ціна.

Недоліки:

- тривалий прогрів перед використанням;
- прогрів перед зняттям показників.

### 3.4 Датчик МН-Z19

МН-Z19 – інфрачервоний датчик CO<sub>2</sub> від китайського виробника Winsen Electronics (рисунок 3.12). Для визначення концентрації газу використовується

недисперсійний інфрачервоний метод (NDIR) [18].



Рисунок 3.12 - Датчик MH-Z19

Структурна схема датчика MH-Z19 приведена на рисунку 3.13.

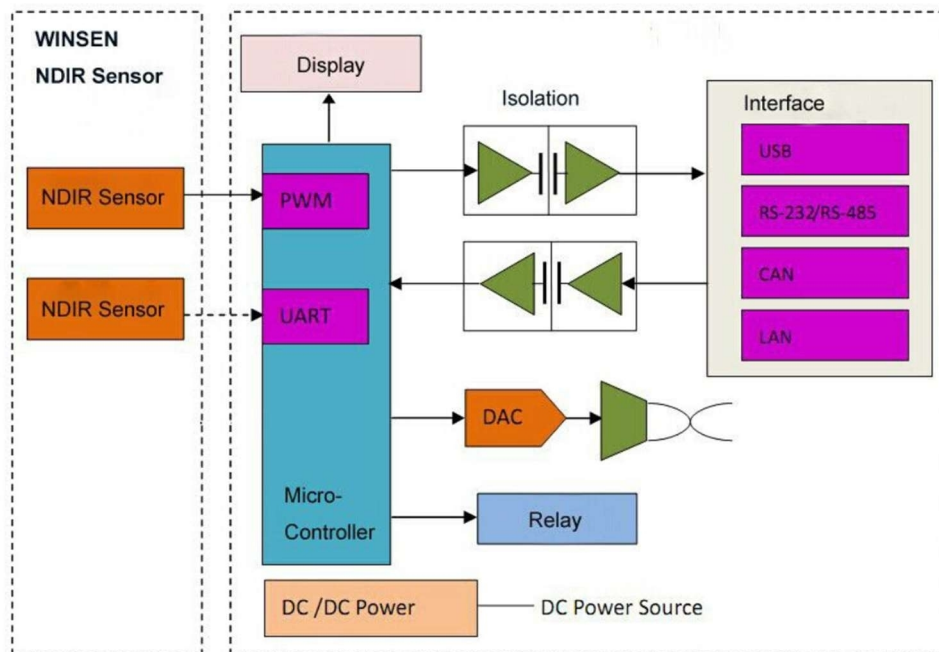


Рисунок 3.13 – Структурна схема датчика MH-Z19

Принцип роботи цього сенсора заснований на поглинанні ІЧ-випромінювання газом. Інфрачервоним детектором з визначеною чутливістю вимірюється інтенсивність інфрачервоного випромінювання до та після поглинання газом. Процес поглинання ІЧ-випромінювання не залежить від кисню й не вимагає використання хімічних речовин, є досить стійким до різного роду перешкод.

До складу MH-Z19 також входить температурний датчик, що дозволяє компенсувати температурну залежність.

Розміщення контактів датчика наведено на рисунку 3.14.

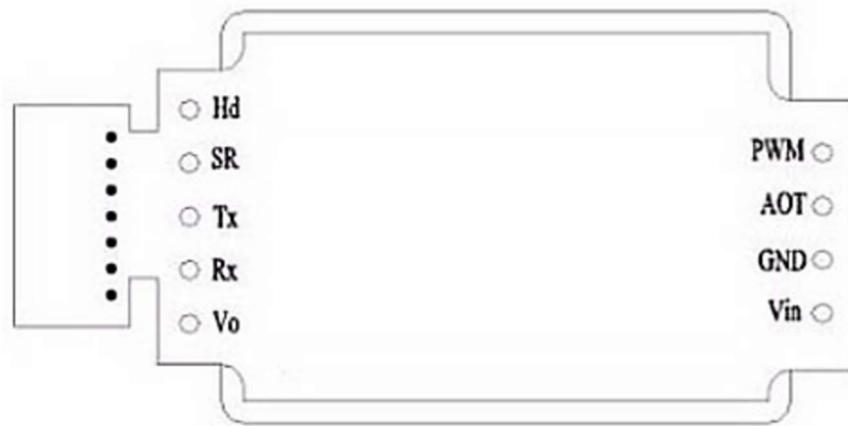


Рисунок 3.14 – Розміщення контактів датчика MH-Z19

Призначення виводів наведено в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Призначення виводів датчика MH-Z19

Pin	Визначення
Vin	Vin
GND	GND
SR	Не використовується
Vo	Аналоговий вихід (0.4~2 V) or (0~2.5V)
PWM	ШИМ
HD	Нульове калібрування, низький рівень триває понад 7 с (під низьким рівнем є ефективним)
AOT	Не використовується
Rx	Введення даних рівня UART(RXD)TTL
Tx	Виведення даних рівня UART(TXD)TTL

Області застосування датчика:

- системи контролю якості повітря в приміщеннях;
- холодильні системи HVAC;
- моніторинг рівня CO<sub>2</sub> у теплицях і шахтах;
- аналіз викидів у навколишнє середовище.

У таблиці 3.3 приведені технічні характеристики цього датчика.

Таблиця 3.3 – Технічні характеристики МН-Z19

Характеристики	Значення
Робоча напруга	3.6 ~ 5.5 В
Середній струм	< 18 мА
Рівень інтерфейсу	3,3 В
Діапазон вимірів	0 ~ 0,5 %
Вхідний сигнал	UART
	PWM
Час розігріву	3 хв
Час відгуку	$T_{90} < 1$ хв
Робоча температура	0 ~ 50 °С
Робоча вологість	0 ~ 95 % відносної вологості
Вага	21 г
Термін служби	> 5 років
Габарити	33 × 20 × 9 мм (Д × Ш × В)

Для виходу в робочий режим датчикові потрібно 3 хвилини на розігрів. Виміри концентрації CO<sub>2</sub> відбуваються з затримкою близько хвилини. Коли концентрація газу наближається до верхньої границі (5000 ppm), знижується точність, можливе одержання помилково занижених значень. Також, для стабільної роботи датчика виробник не рекомендує використовувати його в умовах запиленості. Через дану особливість сенсора обмежується його використання в деяких сферах [19].

Переваги:

- підходить для безперервної роботи з комп'ютером;
- можливість температурної компенсації;
- висока точність та чутливість;
- висока вибірковість;
- надійність.

Недоліки:

- відсутність самокалібрування;
- висока вартість.

### 3.5 Висновок

Провівши порівняльний аналіз усіх представлених датчиків, що визначають концентрацію вуглекислого газу, був зроблений вибір на користь датчика МН-Z19С.

Залежність від температури й вологості мається практично у всіх розглянутих сенсорів. В нашому випадку цей недолік можна буде скорегувати шляхом установки додаткового датчика температури й вологості DHT11.

## 4 РОЗРОБКА ПРИСТРОЮ

### 4.1 Контролер Arduino

Arduino – торговельна марка, що робить програмно-апаратні засоби для розробки простих цифрових пристроїв і автоматики. За допомогою комплексу продукції даної компанії будь-який користувач, що не займається програмуванням професійно, може створювати пристрої різної складності. Апаратна частина являє собою плату – контролер, що має безліч цифрових і аналогових входів та виходів.

Програмна оболонка Arduino IDE, призначена для програмування апаратури, безплатна й доступна для загального користування. У Arduino IDE використовується спрощена версія мови C++, що дозволяє легко навчитися програмування. Через відкритість програмного забезпечення існує безліч доступних бібліотек і готових програм, кількість яких постійно поповнюється. На відміну від більшості програмувальних плат попередників, Arduino не потрібний окремий програматор для завантаження нового коду, для цього використовується простий USB-кабель.

Компанія робить цілий ряд контролерів, відмінних по характеристиках і призначених для різних цілей та користувачів. Серед них самим популярним є Arduino UNO. Дана плата найкраще підходить для початківців. Arduino UNO заснований на мікроконтролері ATmega328P, має 14 цифрових входів/виходів, підключення USB, рознімання живлення й багато чого іншого. ArduinoUno може харчуватися від USB-з'єднання або від зовнішнього джерела живлення.

Вартість даного контролера на ринку коливається від 7 до 35\$, залежно від місця покупки.

На рисунку 4.1 зображений контролер Arduino UNO, у таблиці 4.1 приведені його технічні характеристики [20].

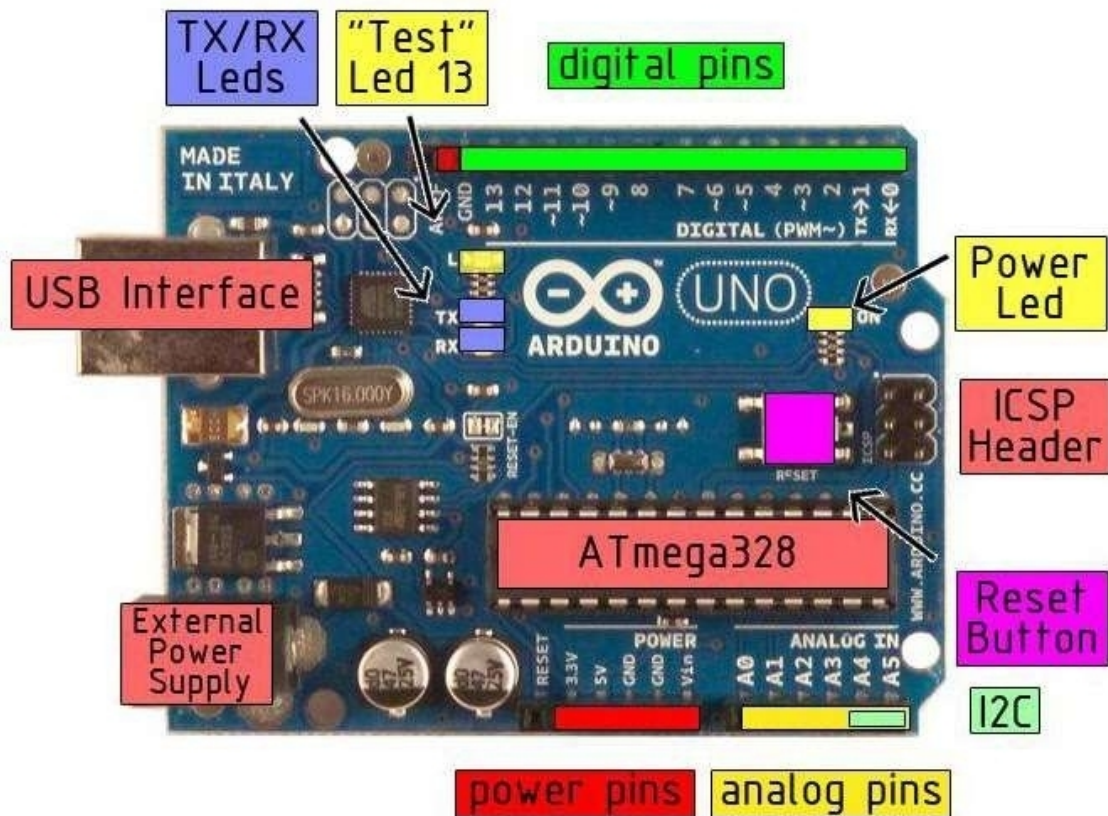


Рисунок 4.1 – ArduinoUno

Таблиця 4.1 – Технічні характеристики Arduino UNO

МК	ATmega328P
Напруга живлення	5 В
Флеш-пам'ять, КБ	32
EEPROM, КБ	1
SRAM, КБ	2
Двійкові входи/виходи	14
ШІМ	6
Аналогові входи	6
USB-інтерфейс	ATmega8U2, ATmega16U2
Розміри, мм	68,6 × 53,3

## 4.2 Вибір мережного модуля

### 4.2.1 Визначення типу мережного модуля

Для організації мережі між пристроями реєстрації вуглекислого газу й сервером необхідно вибрати мережний модуль, що буде забезпечувати цю

мережну взаємодію.

Для передачі даних з контролера Arduino у мережу використовуються додаткові плати розширення (Shield). На ринку мається велика кількість різних плат, тому на першому етапі необхідно визначитися, якого типу передача даних потрібна в майбутній системі моніторингу CO<sub>2</sub>.

Система моніторингу вуглекислого газу являє собою мережу взаємозалежних датчиків. Кожен пристрій, крім того, що повинен пересилати інформацію на сервер, повинен мати можливість зв'язатися з іншими, сусідніми детекторами. Така необхідність може виникнути в ситуації, коли в приміщенні один з датчиків знайшов велике перевищення норми газу, а інші – ні. Пристрій повинний «розбудити» інші детектори, дати їм команду негайно здійснити вимір показників. За допомогою подібної організації мережі можна буде виключати одиничні перебої у вимірі показань і, навпаки, швидко виявляти критичну ситуацію.

Центральний сервер, крім локальної взаємодії з датчиками, обов'язково повинен мати доступ до глобальної мережі Інтернет. Ця умова є обов'язковою, тому що доступ до програмного забезпечення, яке робить аналіз даних, повинний здійснюватися тільки при підключенні до хмарного сервісу. Установка програмного забезпечення в кожній організації можлива, але є досить витратною справою, тому що будь-які позаштатні ситуації будуть вимагати наявності в установі фахівця в даній сфері. А всі роботи з хмарним сервісом ніяк не торкнуться кінцевого користувача.

Для збереження логіки такої мережної взаємодії можна скористатися мережними технологіями, такими як Ethernet, Wi-Fi, Bluetooth, GSM/GPRS. За допомогою кожної з перерахованих технологій існує можливість організувати необхідну мережу, потрібно лише вибрати спосіб, найбільш зручний для організації.

Критерії, по яких потрібно оцінити можливості мережі:

1. Зв'язок детекторів з центральним сервером по локальному з'єднанню.
2. Взаємодія між датчиками через локальну мережу.

3. Доступ центрального сервера до глобальної мережі Інтернет.
4. Бездротове з'єднання.
5. Робота комп'ютерів по організованій локальній мережі.
6. Доступ комп'ютерів до інтернету по організованій локальній мережі.
7. Простий доступ ресурсів хмарного сервісу до конкретних датчиків за допомогою засобів мережної технології.

Оцінка мережних технологій по наведених критеріях зведена в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Оцінка мережних технологій по наведених критеріях

Технологія	Критерій						
	1	2	3	4	5	6	7
Ethernet	+	+	+	-	+	+	+
Wi-Fi	+	+	+	+	+	+	+
Bluetooth	+	+	-	+	+	-	-
GSM/GPRS	-	-	+	+	-	-	-

По описаному методі оцінювання мережних технологій очевидним лідером є технологія Wi-Fi. Мережна структура дозволить організувати надійну взаємодію датчиків з центральним сервером і між собою, а також дозволить створити зручну локальну мережу, в яку можна буде включити комп'ютери, або впровадитися в наявну мережу організації.

На наступному етапі необхідно вибрати модуль мережі Wi-Fi для детектора.

#### 4.2.2 Мережний модуль ESP8266 ESP-07

Під ESP8266 розуміється ціла лінійка модулів бездротового зв'язку, що розрізняються своїми характеристиками. Самим популярним Wi-Fi модулем на цей час є ESP8266 ESP-01. У 2014 році, коли був випущений цей Wi-Fi модуль, він зробив дійсний прорив у сфері створення інтернету речей, тому що в порівнянні з іншими модулями має невеликі розміри й відрізнявся вкрай низькою ціною. Але з появою на ринку інших модифікацій з даної лінійки стало ясно, що перший ESP-01 їм уступає. Також професіонали у сфері автоматизації

відзначають ряд конструктивних недоліків ESP-01:

- більшість виводів So ESP8266EX у модулі ESP-01 знаходяться в «вищачому» стані, тобто нікуди не підключені, що приведе до непередбачених станів і може привести до підвищеного споживання та перегріву чипа;
- модуль ESP-01 не підтримує режим «глибокого сну» (deep\_sleep);
- модуль ESP-01 не має жодного виводу, на якому немає сигналів при старті модуля, тобто керувати їм навіть включенням лампочки неможливо. Вона буде мигати при включенні.

Спираючись на дану інформацію, було прийняте рішення не використовувати дану модифікацію для детекторів.

У лінійці ESP8266 маються такі модулі: ESP-01, ESP-02, ESP-03, ESP-04, ESP-05, ESP-06, ESP-07, ESP-08, ESP-09, ESP-10, ESP-11, ESP-12, ESP-13, WROOM, WROOM-02.

Вивчивши технічні характеристики всіх перерахованих модулів, вибираємо модуль ESP-07 (рисунок 4.2) [21].

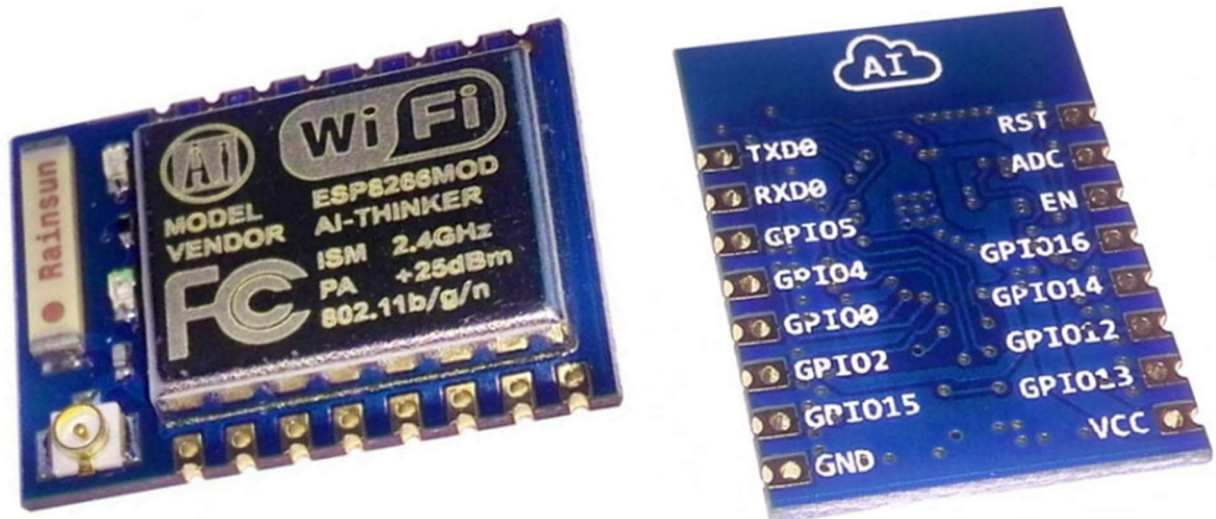


Рисунок 4.2 – ESP8266 ESP-07

Він є якісною заміною ESP-01, бо має подібні характеристики, але також оснащений металевим екраном, вбудованою керамічною антеною, антенним розніманням для зовнішньої антени, що дозволяє збільшити дальність Wi-Fi зв'язку до декількох сотень метрів.

ESP8266 ESP 07 – Wi-Fi послідовний модуль прийомопередавача, на основі ESP8266 So. So має убудований протокол TCP/IP, роблячи його дуже корисним у сфері інтернет речей. Діапазон роботи цього модуля складає до декількох кілометрів, що робить його відмінним рішенням для робототехнічних додатків, яким потрібне дистанційне керування.

ESP-07 має убудовану керамічну антену, 9 виводів GPIO, контакти UART (Rx, Tx) для зв'язку з іншими пристроями й можливість підключення зовнішньої антени.

Середня вартість даного модуля на ринку складає не більше 4\$. У таблиці 4.3 представлені його технічні характеристики [21].

Таблиця 4.3 – Технічні характеристики ESP8266 ESP-07

Категорія	Параметр	Значення
Параметри Wi-Fi	Протоколи Wi-Fi	802.11 b/g/n
	Діапазон частот	2.4GHz-2.5GHz (2400M-2483.5M)
Параметри устаткування	Периферійна шина	UART/HSPI/I2C/I2S/Ir Remote Contorl. GPIO/PWM
	Робоча напруга	3.0~3.6 В
	Робочий струм	Середнє значення: 80 мА
	Робочий діапазон температур	-40~125 °С
Параметри програмного забезпечення	Режим Wi-Fi	station/softAP/SoftAP+station
	Безпека	WPA/WPA2
	Шифрування	WEP/TKIP/AES
	Оновлення прошивки	UART Download / OTA (via network) /download and write firm- ware via host
	Розробка програмного забезпечення	Supports Cloud Server Development/ SDK for custom firmware development
	Мережеві протоколи	IPv4, TCP/UDP/HTTP/FTP
	Конфігурація користувача	AT Instruction Set, Cloud Server, Android/iOS App

Схема підключення ESP8266 ESP-07 до плати Arduino через UART-інтерфейс наведена на рисунку 4.3.



змінною напругою на виходах А та В. Залежно від моделі, подавши постійну напругу на виходи А та В, при вхідному сигналі реле може замкнутись, або чекати поки напруга на виходах А та В не стане нульовою для коректного ввімкнення. При знятті високого сигналу на вході, реле не вимкнеться, поки напруга між виходами А та В не перейде через нуль. Таким чином вони призначені для роботи зі змінною напругою.

Зважаючи на те, що в проектуваному пристрої необхідно буде під'єднати чотири вентилятори, доцільно застосувати 4-канальні реле, бажано з оптронною розв'язкою.

Модулі такого типу за логікою керування не відрізняються від одно-канальних, однак в цій схемі треба звертати увагу на вхід VCC. Напруга VCC не має перевищувати напругу живлення керівного пристрою (контролера) більше ніж на 2 В (пряме падіння напруги на світло діоді та оптопарі) невиконання цього правила призведе до пошкодження контролера. Напруга VCC має бути не нижчою за 5 В, інакше реле не спрацює. При знятті перемички між JD-VCC та VCC необхідно подати живлення 5 В на вхід JD-VCC при цьому на VCC необхідно подати напругу живлення кермового пристрою. GND не обов'язково з'єднувати з землею кермового пристрою.

Обираємо модуль твердотілого реле на 4 канали FLASH-I2C [23].

Модуль твердотілих реле на 4 канали, I2C, Flash - є пристроєм комутації, який дозволяє підключати та відключати пристрої до мережі змінного струму від 120В до 240В. При цьому пристрої, підключені через вихідні контакти модуля, не повинні споживати більше 2А змінного струму (на кожен канал).

Управління модулем здійснюється за шиною I2C. Модуль належить до лінійки «Flash», а значить до однієї шини I2C можна увімкнути понад 100 модулів, бо їх адресу на шині I2C (за замовчуванням 0x09), що зберігається в енергонезалежній пам'яті, можна змінювати програмно.

Модуль можна використовувати в будь-яких проектах де потрібно керувати пристроями з напругою живлення від 120В до 240В і споживанням змінного струму до 2А.

Специфікація даного реле:

- Напруга живлення: 5 В (постійний струм).
- Споживаний струм: до 20 мА.
- Комутована напруга: від 120 до 250 (змінного струму).
- Комутований струм: до 2 А (на кожний канал).
- Кількість каналів: 4.
- Інтерфейс: I2C.
- Швидкість шини I2C: 100 кбіт/с.
- Адреса на шині I2C: встановлюється програмно (за замовчуванням 0x09).
- Рівень логічної 1 на лініях шини I2C: 3,3 (толерантні до 5 В).
- Робоча температура: від -40 до +65 °С.
- Габарити із кріпленням: 55 x 55 мм.
- Габарити без кріплень: 55 x 45 мм.
- Вага: 30 г.

У лівій частині плати розташовано два роз'єми для підключення модуля до шини I2C. Шина підключається до будь-якого роз'єму I2C, а другий роз'єм можна використовувати для підключення наступного модуля твердотілих реле або інших пристроїв.

- SCL – вхід/вихід лінії тактування шини I2C.
- SDA – вхід/вихід лінії даних шини I2C.
- Vcc – вхід живлення модуля 5В.
- GND – загальне виведення живлення.

У правій частині плати розташовані чотири роз'єми: К1, К2, К3, К4, це виходи, через контакти яких підключаються силові пристрої до мережі змінного струму від 120 до 250В. Пристрої не повинні споживати більше 2А (кожний канал).

- К1 - роз'єм першого реле з нормально розімкненими NO (Normally Open) контактами.
- К2 - роз'єм другого реле з нормально розімкненими NO (Normally

Open) контактами.

- К3 - роз'єм третього реле з нормально розімкненими NO (Normally Open) контактами.

- К4 - роз'єм четвертого реле з нормально розімкненими "NO" (Normally Open) контактами.

Призначення контактів FLASH-I2C наведено на рисунку 4.5.

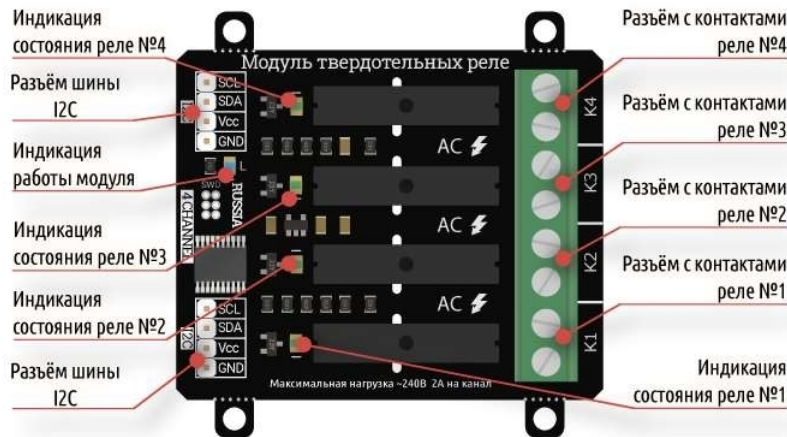


Рисунок 4.5 – Призначення контактів FLASH-I2C

Підключення:

За замовчуванням усі модулі FLASH-I2C мають встановлену адресу 0x09.

Перед підключенням 1 модуля до шини I2C настійно рекомендується змінити адресу модуля.

При підключенні 2 і більше модулів FLASH-I2C до шини необхідно в обов'язковому порядку попередньо змінити адресу кожного модуля, після чого вже підключати їх до шини.

#### 4.4 Вибір елемента живлення

Для того, щоб вибрати відповідне джерело живлення для детектора вуглекислого газу, необхідно зробити розрахунок сумарної потужності всіх компонентів.

У таблиці 4.4 представлені компоненти детектора з заявленими в документації споживаним струмом і напругою.

Таблиця 4.4 – Компонента пристрою, споживаний струм і напруга

Компонент пристрою	Споживаний струм (I)	Споживана напруга (U)
MH-Z19	150 мА	5 В
DHT 11	2.5 мА	5 В
ESP-07	80 мА	3.6 В
Arduino UNO	18 мА	5 В

Розрахунок споживаної потужності компонентів проводиться за формулою

$$P = U \cdot I, \quad (4.1)$$

де  $P$  – потужність, Вт;

$I$  – сила струму, А;

$U$  – напруга, В.

Розрахункові значення споживаної потужності компонентів зведені в таблиці 4.5.

Таблиця 4.5 – Компонента пристрою і споживана потужність

Компонента пристрою	Споживана потужність (P)
MH-Z19	0,75 Вт
DHT 11	0,0125 Вт
ESP-07	0,288 Вт
Arduino UNO	0,09 Вт
Сумарна споживана потужність пристрою ( $P_{\Sigma}$ )	1,1405 Вт

Ємність і напруга батарейки «Крона»

$$C_k = 0,5 \text{ А} \cdot \text{ч}, \quad (4.2)$$

$$U_k = 9 \text{ В}. \quad (4.3)$$

Струм, споживаний пристроєм

$$I_n = \frac{P_n}{U_k} \quad (4.4)$$

$$I_n = \frac{1.14}{9} = 0,13 \text{ А}.$$

Час, через яке батарея розрядиться

$$T = \frac{C_k}{I_n} \quad (4.5)$$

$$T = \frac{0,5}{0,13} = 3,85 \text{ ч.}$$

Для повної розрядки батареї «Крона» детекторів вуглекислого газу буде потрібно білизько чотирьох годин безперервної роботи. Тому що виміри на пристрої повинні здійснюватися тільки раз у 10 хвилин, тобто датчики МН-Z19 і DHT 11 будуть включатися з таким же періодом. Таким чином, шляхом короткочасної роботи двох датчиків сумарна споживана потужність пристрою знизиться. Через те, що контролер Arduino UNO й модуль ESP-07 будуть залишатися постійно в робочому стані, то, зрештою, батарея «Крона» буде виряджена протягом доби.

З приведенного обґрунтування випливає, що батарея як основний елемент живлення не доцільна. Варто зупинити вибір на підключенні пристрою до постійної мережі живлення за допомогою мережного USB-адаптера 5 В (рисунок 4.6).

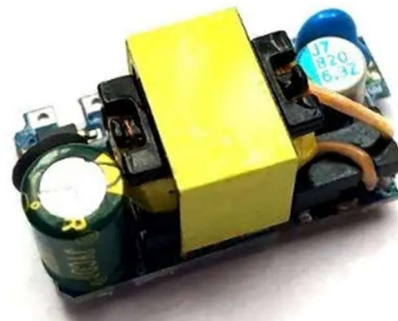


Рисунок 4.6 – Мережний USB-адаптера 5 В

У будь-якій установі існує можливість короткострокового відключення електроенергії. Для того, щоб виключити скидання налаштувань детекторів, а також щоб запобігти можливості виходу з ладу компонентів пристрою, необхідно передбачити резервне джерело живлення, у якості якого можна установити батарею «Крона».

#### 4.5 Розробка макету пристрою

Відповідно до завдання на кваліфікаційну роботу необхідно розробити пристрій моніторингу вуглекислого газу в трикімнатній квартирі. Отже, в проєктованому пристрої необхідно застосувати чотири датчики вуглекислого газу (три кімнати та кухня), та чотири вентилятори.

Як датчик вуглекислого газу було обрано MH-Z19. Але показання цього датчика залежать як від температури повітря, так і від його вологості. Тому, з метою корекції показань, в склад проєктованого пристрою додатково введено датчик температури та вологості типу DHT11.

Керування вентиляторами забезпечується за допомогою двох двоканальних твердотілих реле. Оскільки перед включенням того чи іншого вентилятора необхідно відкрити фрамугу в вікні, до складу проєктованого пристрою додатково було введено чотири сервоприводи.

Для виконання функції контролера було обрано плату Arduino Uno, а для забезпечення передачі показань пристрою на сервер було введено мережний модуль ESP8266 ESP-07.

Загальний вигляд макета наведено на рисунку 4.7.

#### 4.6 Вимоги до установки детекторів вуглекислого газу

Щільність навколишніх нас повітря  $1,2041 \text{ кг/м}^3$ , щільність видихуваного людиною вуглекислого газу  $1,913 \text{ кг/м}^3$ , отже,  $\text{CO}_2$  стає важчим і, в остаточному підсумку, опускається на нижній рівень в приміщенні. Виходячи з цього, можна зробити висновок, що для встановлення вірного значення концентрації вуглекислоти необхідно встановлювати детектори на відстані 0,5-1 метра від статі.

Оскільки  $\text{CO}_2$  – це газ, виходить, до нього застосовне поняття дифузії. Це значить, що через якийсь час газ рівномірно пошириться по всьому приміщенню й у будь-якій точці концентрація буде однаковою. Ґрунтуючись на

даному положенні можна зробити висновок, що детектор, установлений наприкінці приміщення на відстані 0,5-1 м від стіти, буде фіксувати реальну концентрацію CO<sub>2</sub> у всьому приміщенні.

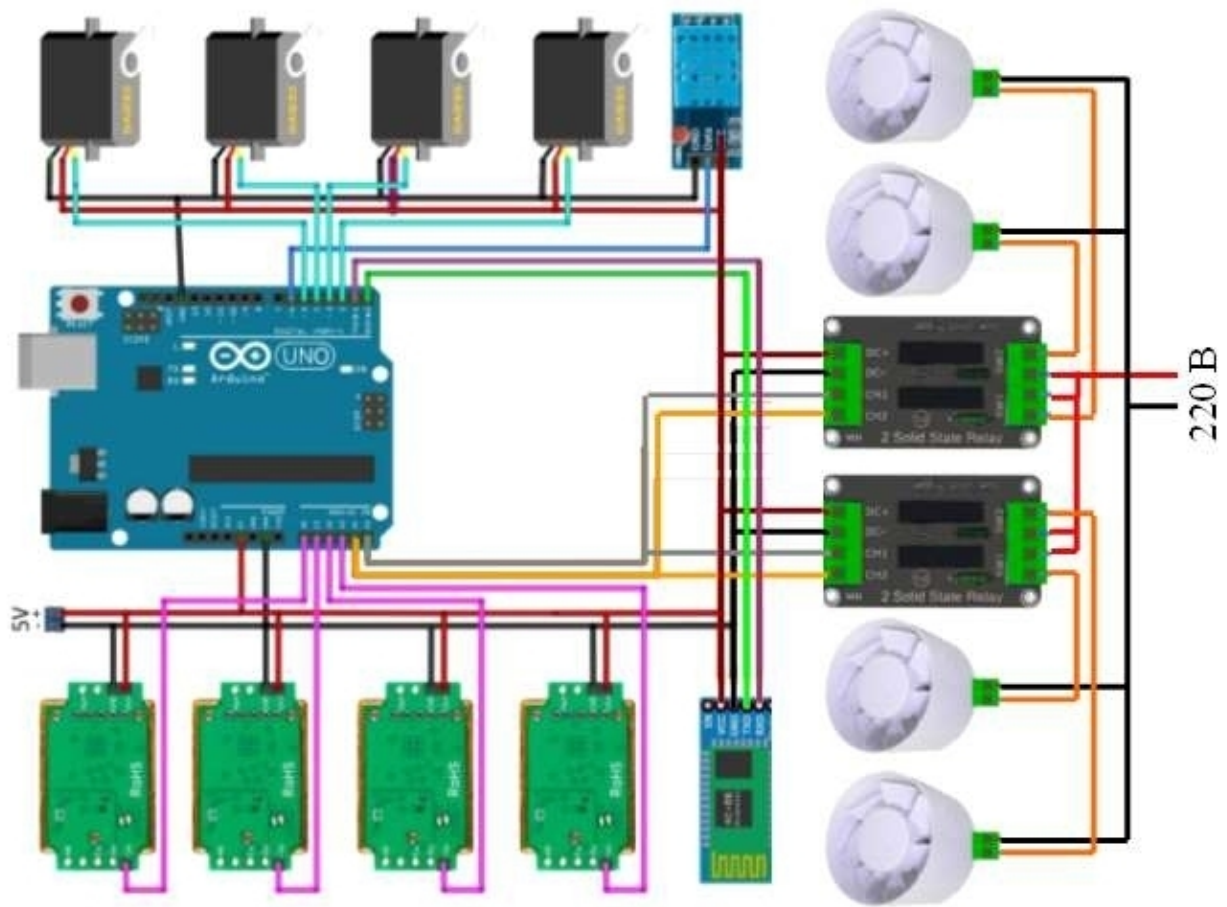


Рисунок 4.7 – Загальний вигляд макету

#### 4.7 Коректування датчика МН-Z19С

Оскільки в документації, прикладеної до датчика МН-Z19С, представлена залежність зміни величини  $R_s / R_0$  від температури й вологості навколишнього повітря, те необхідно зробити облік впливу даних параметрів на вимірювану величину.

Залежність МН-Z19С від температури та вологості представлена на (рисунку 4.7).

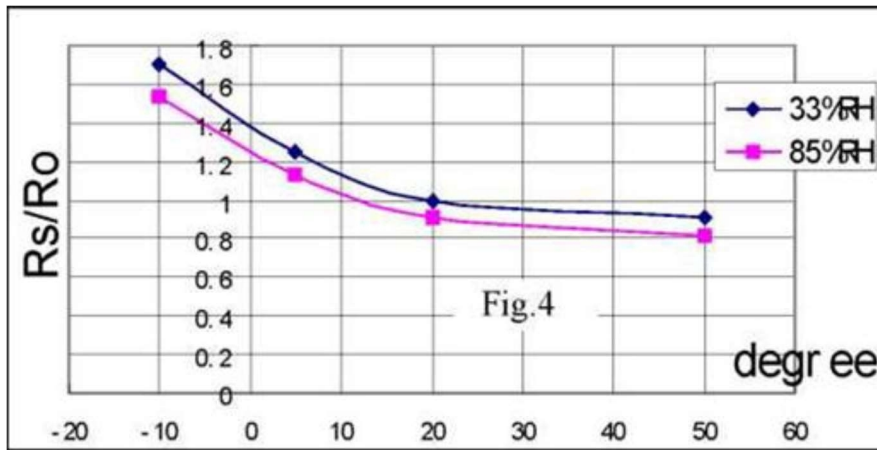


Рисунок 4.7 – Залежність МН-Z19С від температури і вологості

По осі абсцис розташовані значення температури, по осі ординат розташоване відношення  $R_s$  (вимірюваний опір на МН-Z19С) до  $R_0$  (задане каліброване значення). За нормальні умови прийнята температура 20 градусів Цельсія й 33 % вологості повітря, тому що в даній точці  $R_s / R_0$  дорівнює одиниці.

При зміні температури й вологості відношення  $R_s$  до  $R_0$  міняється. На рисунку видно, що при підвищенні вологості на 52 % (з 33 % до 85 %) другий графік зміщується вниз на 0,06. Це значить, що на кожен відсоток зміни вологості повинні вноситись коректування рівна (-0.06/52).

Спираючи на дані графіки, для виправлення вимірів були виведені наступні формули.

Облік вологості

$$\left(\frac{R_s}{R_0}\right) = \frac{R_s}{R_0} - \frac{0,06}{52}(h - 33), \quad (4.4)$$

де  $h$  – вологість у відсотках;

$R_s$  – вимірюваний опір на МН-Z19С;

$R_0$  – задане каліброване значення.

Облік температури

$$\left(\frac{R_s}{R_0}\right)' = \left(\frac{R_s}{R_0}\right) \cdot (0,0004t^2 - 0,027t + 1,3894), \quad (4.5)$$

де  $t$  – температура в градусах Цельсія;

$R_s$  – вимірюваний опір на МН-Z19С;

$R_0$  – задане каліброване значення.

Оскільки в розроблювальному детекторі вуглекислого газу встановлений датчик температури та вологості, то отримані виправлення можна занести в програмний код. Завдяки цьому, вироблені детектором виміри будуть виводитися користувачеві з урахуванням зміни температури й вологості.

## ВИСНОВКИ

Метою кваліфікаційної роботи бакалавра була розробка пристрою контролю вуглекислого газу в житлових приміщеннях.

В роботу було включено чотири розділи.

В першому розділі роботи було розглянуто аналогові та цифрові методи виміру концентрації газів. Проаналізовано принципи роботи хімічних, термохімічних, електрохімічних, електричних газоаналізаторів. Наведені їх переваги, недоліки та сфери застосування.

В другому розділі досліджено вплив вуглекислого газу на життєдіяльність людини, визначена гранично припустима його концентрація та медичне обґрунтування небезпеки CO<sub>2</sub>.

В третьому розділі проведено огляд та аналіз датчиків вуглекислого газу й обґрунтовано вибір датчика МН-Z19

Четвертий розділ присвячено розробці пристрою. Було обрано контролер Arduino мережний датчик, твердотіле реле для управління вентиляторами. Розглянуто питання коректування показань датчика МН-Z19С залежно від температури та вологості повітря.

Отже, всі поставлені задачі було виконано в повному обсязі.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

- 1 Аналіз складу газів. URL: <http://univer.nuczu.edu.ua/e-books/009/TA/index.htm>. (дата звернення 7.05.2024)
- 2 Визначення вмісту шкідливих газів [http://socrates.vsau.org/b04213/elbook/view\\_page.php?book\\_id=1&user=575&page\\_id=2](http://socrates.vsau.org/b04213/elbook/view_page.php?book_id=1&user=575&page_id=2). (дата звернення 7.05.2024)
- 3 Гігієна повітряного середовища. URL: <https://resource.odmu.edu.ua/chair/download/61557/LHsrBK2VRfcngUc4jfc0rQ/%D0%B4%D0%BB%D1%8F%206%20%D0%BA%D1%83%D1%80%D1%81%D1%83%20---%20%20%D0%97%D0%90%D0%93%D0%90%D0%9B%D0%AC%D0%9D%D0%90%20%D0%93%D0%86%D0%93%D0%86%D0%84%D0%9D%D0%90-%20%D0%BF%D0%BE%D1%81%D1%96%D0%B1%D0%BD%D0%B8%D0%BA%20%28%20%D0%94%D0%B0%D1%86%D0%B5%D0%BD%D0%BA%D0%BE%29.pdf>. (дата звернення 8.05.2024)
- 4 Газоаналітичні прилади для вимірювання хімічного складу газового середовища. URL: <https://studfile.net/preview/9094263/>. (дата звернення 10.05.2024)
- 5 Методи вимірювання концентрації газів. URL: [http://journals.khnu.km.ua/vestnik/pdf/tech/2011\\_6/19osa.pdf](http://journals.khnu.km.ua/vestnik/pdf/tech/2011_6/19osa.pdf) (дата звернення 10.05.2024)
- 6 Термокондуктометричні газоаналізатори. URL: <https://studfile.net/preview/9094263/page:2/> (дата звернення 10.05.2024)
- 7 Магнітні газоаналізатори. URL: <https://studfile.net/preview/7516745/page:60/> (дата звернення 10.05.2024)
- 8 Вольтамперометричні аналізатори (полярографи). URL: [https://labdepo.com.ua/elektrohimichne-obladnannja\\_ua/voltamperometriczni-analizatori-poljarografi\\_ua](https://labdepo.com.ua/elektrohimichne-obladnannja_ua/voltamperometriczni-analizatori-poljarografi_ua) (дата звернення 10.05.2024)
- 9 Курилов А. Ф. Теплотехнічні вимірювання і прилади : навч. посіб. / А. Ф. Курилов, В. М. Козін. – Суми : Сумський державний університет, 2015. –

189 с. ISBN 978-966-657-589-3

9 ДСТУ ISO 4226:2008 Якість повітря. Загальні положення. Одиниці вимірювання. [https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=95538](https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=95538)

10 Елисеєва О. В. К обоснованию ПДК двуокиси углерода в воздухе. О. В. Елисеєва. Гигиена и санитария. – 1964. – № 8.

11 Adrie van der Luijt. Management CO2 levels cause office staff to switch off. Director of Finance online. 11.19.2007.

12 Report of the research project on evaluation of environmental NO<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, benzene and lead exposures of Kolkata population by biological monitoring techniques / Dr. R. N. Chaudhuri, Dr. D. Sengupta.

13 Лукаш С.І. Проблеми діагностики деяких захворювань по видихаємому повітрю. С.І. Лукаш. Комп'ютерні засоби, мережі та системи. 2010, № 9 С. 62-71

14 П. Оле Фангер. Качество внутреннего воздуха в зданиях, построенных в холодном климате, и его влияние на здоровье, обучение и производительность труда людей. АВОК. – 2006. – № 2.

15 Figaro датчик углекислого газа CO<sub>2</sub> для контроля качества воздуха в помещении 350-10000 ppm TGS4161. URL: <https://www.alldatasheetru.com/datasheet-pdf/pdf/1266641/FIGARO/TGS4161.html>

16 MG811 CO<sub>2</sub> Sensor // eph.ccs.miami.edu. URL: <http://eph.ccs.miami.edu/precise/GasSensorSpecs/CO2.pdf> (10.03.2017).

17 MQ135 Semiconductor Sensor for Air Quality Control // china-total.com. URL: <http://www.china-total.com/Product/meter/gas-sensor/MQ135.pdf> (15.03.2017).

18 Датчик углекислого газа CO<sub>2</sub> MH-Z19C. URL: <https://www.mini-tech.com.ua/datchik-co2-mh-z19c>

19 Intelligent Infrared CO<sub>2</sub> Module (Model: MH-Z19) // winsen-sensor.com. URL: <http://www.winsensen-sor.com/d/files/PDF/Infrared%20Gas%20Sensor/NDIR%20CO2%20SENSOR/MH-Z19%20CO2%20Ver1.0.pdf> (12.03.2017).

20 Мікроконтролер Arduino UNO R3

<https://controller.od.ua/ua/p391423201-mikrokontroller-arduino-uno.html>

21 Wi-Fi модуль ESP8266 версія ESP-07 <https://ardushop.in.ua/arduino/wi-fi-module-esp8266-version-esp-07>

22 Твердотільні реле. <https://uamper.com/products/howto/Relay-howto.pdf>

23 Модуль твердотільне реле, 4 канали, FLASH-I2C  
<https://wiki.iarduino.ru/page/solid-rele-4ch-i2c-raspberry/>