

Вінницький національний технічний університет
Факультет інтелектуальних інформаційних технологій та автоматизації
Кафедра автоматизації та інтелектуальних інформаційних технологій

Бакалаврська кваліфікаційна робота на тему:

«Автоматизована система контролю якості повітря у автомобілях
представницького класу»

Виконав: студент IV курсу, групи АКІТР-23мс
спеціальності 174 – Автоматизація,
комп'ютерно-інтегровані технології та
робототехніка

(шифр і назва спеціальності)

Ілля КИРАКІВСЬКИЙ

(прізвище та ініціали)

Керівник: д.т.н., проф. кафедри АІТ

Олег БІСІКАЛО

(прізвище та ініціали)

« 16 » 06 2025 р.

Рецензент: к.т.н., доц. каф. САІТ

Олексій КОЗАЧКО

(прізвище та ініціали)

« 17 » 06 2025 р.

Допущено до захисту
завідувач кафедри АІТ
Олег БІСІКАЛО

« 18 » 06 2025 р.

Вінниця ВНТУ – 2025 рік

Вінницький національний технічний університет
(повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет інтелектуальних інформаційних технологій та автоматизації

Кафедра автоматизації та інтелектуальних інформаційних технологій

Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)

Галузь знань 17 – Електроніка, автоматизація та електронні комунікації

Спеціальність 174 – Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка

Освітньо-професійна програма Інтелектуальні комп'ютерні системи управління

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедри АІТ

д.т.н., проф. Бісікало О.В.

« » 2025 року

ЗАВДАННЯ

НА БАКАЛАВРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Кираківський Ілля Віталійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Автоматизована система контролю якості повітря у автомобілях представницького класу»

керівник роботи Бісікало О.В., д.т.н, проф.

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від «20» березня 2025 р. №97

2. Термін подання студентом роботи 10.06.2025 р.

3. Вихідні дані до роботи:

- Тип системи – автоматизована система контролю якості повітря;
- Метод контролю – сенсорний (температурний, газовий, оптичний);
- Об'єкт контролю – повітряне середовище салону автомобіля представницького класу.

4. Зміст текстової частини (перелік питань, які потрібно розробити) Вступ. Аналіз сучасного стану проблеми якості повітря у автомобілях представницького класу. Математико-фізичний аналіз методів вимірювання параметрів якості повітря у автомобілях представницького класу. Структурно-апаратне забезпечення автоматизованої системи контролю якості повітря у автомобілі представницького класу. Програмна реалізація системи контролю якості повітря у автомобілях представницького класу. Висновки.

5. Перелік ілюстративного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) Сенсорна організація системи. Розпіновка мікроконтролера RP2040. Будова мікроконтролера RP2040. Часові діаграми роботи сенсорів системи

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1-4	Бісікало О.В., д.т.н, проф.		

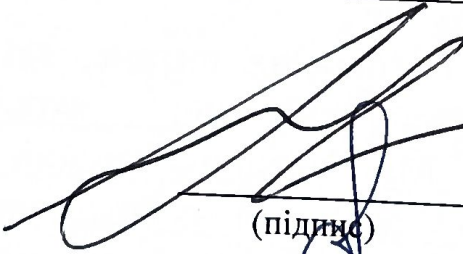
7. Дата видачі завдання 20.03.2025 р.

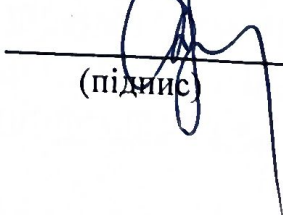
КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Термін виконання		Примітка
		початок	закінчення	
1	Вибір, узгодження та затвердження теми БКР	03.10.2024	09.10.2024	вик
2	Аналіз літературних джерел. Попередня розробка основних розділів	12.03.2025	29.03.2025	вик
3	Розробка технічного завдання (ТЗ)	01.04.2025	26.04.2025	вик
4	Аналіз вирішення поставленої задачі	29.04.2025	10.05.2025	вик
5	Розробка структурної схеми	13.05.2025	24.05.2025	вик
6	Електричні розрахунки	27.05.2025	31.05.2025	вик
7	Оформлення пояснювальної записки (ПЗ) та графічної частини	03.06.2025	07.06.2025	вик
8	Перевірка ПЗ на відповідність вимогам	10.06.2025	15.06.2025	вик
9	Попередній захист БКР, доопрацювання, рецензування БДР	15.06.2025	16.06.2025	вик
10	Захист БКР ЕК	16.06.2025	23.06.2025	вик

Студент

Керівник роботи


(підпис)


(підпис)

Ілля КИРАКІВСЬКИЙ
(прізвище та ініціали)

Олег БІСІКАЛО
(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Бакалаврська кваліфікаційна робота складається з 68 сторінок формату А4, на яких є 20 рисунків, 2 таблиці, список використаних джерел містить 17 найменувань.

У бакалаврській кваліфікаційній роботі досліджено проблему забезпечення високої якості повітря в салонах автомобілів представницького класу шляхом впровадження автоматизованих систем моніторингу та регулювання мікроклімату. Розглянуто основні параметри, що впливають на комфорт і безпеку пасажирів, зокрема температуру, вологість, концентрацію CO₂, PM2.5, озону, VOC та інші. Проведено аналіз сучасних сенсорів, методів вимірювання та алгоритмів управління. Запропоновано структурну модель автоматизованої системи контролю якості повітря з використанням мікроконтролера, систем зворотного зв'язку та інтелектуальних рішень. Робота спрямована на підвищення екологічної безпеки та комфорту у транспортних засобах преміум-сегменту.

Ключові слова: автоматизована система, якість повітря, мікроклімат, автомобіль представницького класу, сенсори, CO₂, VOC, PM2.5, клімат-контроль.

ANNOTATION

The bachelor's qualification work consists of 68 pages of A4 format, which include 20 figures, 2 tables, and the list of sources used contains 17 items.

The bachelor's qualification thesis investigates the issue of ensuring high air quality in the cabins of executive-class vehicles through the implementation of automated systems for microclimate monitoring and regulation. The main parameters affecting passenger comfort and safety are examined, including temperature, humidity, CO₂ concentration, PM_{2.5}, ozone, VOCs, and others. An analysis of modern sensors, measurement methods, and control algorithms has been conducted. A structural model of an automated air quality control system is proposed, utilizing a microcontroller, feedback mechanisms, and intelligent solutions. The work aims to enhance environmental safety and passenger comfort in premium-class vehicles.

Keywords: automated system, air quality, microclimate, executive-class vehicle, sensors, CO₂, VOC, PM_{2.5}, climate control

ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ПРОБЛЕМИ ЯКОСТІ ПОВІТРЯ У АВТОМОБІЛЯХ ПРЕДСТАВНИЦЬКОГО КЛАСУ	6
1.1 Особливості об'єкту дослідження	6
1.2. Параметри, що підлягають контролю в системі оцінювання якості повітря у автомобілях представницького класу.....	8
1.2.1 Температура повітря.....	8
1.2.2 Відносна вологість.....	9
1.2.3 Концентрація CO ₂ (вуглекислий газ).....	12
1.2.4 Наявність дрібнодисперсного пилу (PM _{2.5} , PM ₁₀)	14
1.2.5 Концентрація озону (O ₃).....	16
1.2.6 Запахи.....	18
1.3 Систематизація параметрів контролю системи якості повітря у автомобілях представницького класу.....	21
1.4 Висновки до розділу 1.....	21
2 МАТЕМАТИКО-ФІЗИЧНИЙ АНАЛІЗ МЕТОДІВ ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ЯКОСТІ ПОВІТРЯ У АВТОМОБІЛЯХ ПРЕДСТАВНИЦЬКОГО КЛАСУ	22
2.1 Метод та сенсор контролю температури повітря	22
2.2 Метод та сенсор контролю відносної вологості.....	23
2.3 Метод та сенсор контролю концентрації CO ₂	25
2.4 Метод та сенсор контролю PM _{2.5} / PM ₁₀	27
2.5 Метод та сенсор контролю запаху.....	29
2.6 Висновки до розділу 2.....	29
3 СТРУКТУРНО-АПАРATНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ ПОВІТРЯ У АВТОМОБІЛІ ПРЕДСТАВНИЦЬКОГО КЛАСУ.....	32
3.1 Структурна схема системи контролю якості повітря	32

3.2 Апаратні складові автоматизованої системи контролю якості повітря у автомобілі представницького класу	35
3.3 Висновки до розділу 3.....	45
4 ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ ПОВІТРЯ У АВТОМОБІЛЯХ ПРЕДСТАВНИЦЬКОГО КЛАСУ	47
4.1 Алгоритм роботи системи контролю якості повітря	47
4.2 Програмна реалізація системи контролю якості повітря.....	50
4.3 Висновки до розділу 4.....	52
ВИСНОВКИ.....	53
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	55
ДОДАТКИ.....	58
Додаток А (Обов’язковий) Автоматизована система контролю якості повітря у автомобілях представницького класу. Технічне завдання.....	59
Додаток Б (Обов’язковий) Автоматизована система контролю якості повітря у автомобілях представницького класу. Ілюстративна частина.....	62
Додаток В (Обов’язковий) Автоматизована система контролю якості повітря у автомобілях представницького класу. Лістинг програми.....	66
Додаток Г (Обов’язковий) Автоматизована система контролю якості повітря у автомобілях представницького класу. Протокол перевірки кваліфікаційної роботи на наявність текстових запозичень.....	68

ВСТУП

Актуальність теми. Удосконалення якості повітря в салонах автомобілів представницького класу є актуальним завданням сучасного автомобілебудування. З огляду на підвищені вимоги до комфорту, безпеки та здоров'я пасажирів, впровадження автоматизованих систем контролю мікроклімату є ключовим елементом розробки транспортних засобів преміум-сегменту.

У замкнутому просторі автомобіля якість повітря має прямий вплив на самопочуття, когнітивні функції водія та загальний рівень комфорту. Несвоєчасне виявлення високих концентрацій CO₂, VOC чи пилу може призвести до головного болю, втоми або навіть небезпеки для життя. Інтеграція з цифровими технологіями: Сучасні автомобілі використовують системи на базі штучного інтелекту, що дозволяє адаптивно керувати мікрокліматом. Розробка автоматизованої системи контролю якості повітря дозволяє легко інтегрувати її з іншими підсистемами авто.

Високий рівень комфорту, включно з якісним повітрям у салоні, є критерієм вибору автомобіля у преміальному сегменті. Таким чином, дослідження в напрямку автоматизації контролю якості повітря є важливою складовою безпечного, технологічного та конкурентоспроможного автомобіля.

Мета дослідження. Метою роботи є підвищення ефективності контролю мікроклімату в автомобілях представницького класу шляхом розробки автоматизованої системи моніторингу якості повітря на базі мікроконтролера.

Для досягнення поставленої мети в роботі сформульовані та вирішені такі **задачі**:

- аналіз сучасного стану проблеми якості повітря в салонах автомобілів;
- визначення ключових параметрів повітря, що підлягають моніторингу;
- обґрунтування вибору сенсорів і методів вимірювання (температура, вологість, CO₂, VOC, PM2.5 тощо);
- розробка структурної і функціональної схем системи;

- реалізація математичного моделювання залежностей між параметрами повітря та комфортом пасажирів;
- розробка програмного забезпечення для збору та аналізу даних з сенсорів;
- створення прототипу системи і перевірка її працездатності на основі експериментальних даних.

Об'єктом дослідження в роботі є процес моніторингу параметрів повітряного середовища у салонах автомобілів преміум-класу.

Предметом дослідження є сенсорні технології та алгоритми автоматизованого контролю якості повітря.

Практичне значення одержаних результатів. Результатом дослідження є створення структурно-функціональної моделі автоматизованої системи контролю якості повітря в автомобілі, що дозволяє забезпечити підвищення рівня безпеки та комфорту в салонах авто преміум-сегменту. Система може бути адаптована до умов експлуатації, індивідуальних вподобань користувачів і легко інтегрується у сучасні бортові цифрові технології.

Результати виконаної роботи доповідались та обговорювались на LIV Всеукраїнській науково-технічній конференції підрозділів Вінницького національного університету НТКП ВНТУ (2025) [11]

1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ПРОБЛЕМИ ЯКОСТІ ПОВІТРЯ У АВТОМОБІЛЯХ ПРЕДСТАВНИЦЬКОГО КЛАСУ

1.1 Особливості об'єкту дослідження

Автомобілі представницького класу (також відомі як люксовий або бізнес-клас) — це категорія транспортних засобів, що створені з урахуванням підвищених вимог до комфорту, безпеки, дизайну, технологічного оснащення та престижу. Ці автомобілі зазвичай орієнтовані на перевезення осіб, що займають керівні посади, публічних осіб, дипломатів або високопоставлених гостей.

До основних характеристик автомобілів представницького класу відносять:

- розширений простір салону з підвищеним комфортом для задніх пасажирів (використання крісел з масажем, підігрівом/вентиляцією, регулюванням положення тощо);
- високий рівень шумо- та віброізоляції для створення ізольованого акустичного середовища;
- інтеграція сучасних систем безпеки та комфорту, включаючи багатозонний клімат-контроль, іонізатори, фільтри повітря, маскування запахів тощо;
- використання дорогих матеріалів оздоблення — натуральна шкіра, дерево, метал;
- високотехнологічна електроніка — дисплеї для пасажирів, розумна навігація, підключення до мобільних пристроїв, системи штучного інтелекту.

Сучасні представницькі авто (рис. 1.1), як-от Mercedes-Benz S-Class, BMW 7 Series, Audi A8, Lexus LS, Genesis G90, Toyota Century, мають у своєму складі вбудовані системи моніторингу якості повітря, однак більшість з них обмежуються лише базовими функціями. В умовах зростання екологічної свідомості та уваги до здоров'я, актуальним стає впровадження розшире-

них автоматизованих систем контролю та підтримки якості повітря в салоні, що й визначає обґрунтованість вибору такого об'єкта для дослідження.



Рисунок 1.1 – Салон автомобіля представницького класу

У сучасному світі питання екологічної безпеки та комфорту стає дедалі актуальнішим, особливо в контексті автомобільного транспорту. Представницькі автомобілі, що позиціонуються як засоби підвищеного комфорту, повинні не лише забезпечувати високу якість їзди, а й гарантувати безпеку та здоров'я пасажирів. Одним з важливих чинників, що впливають на комфортність перебування в салоні автомобіля, є якість повітря.

Погіршення екологічної ситуації у містах, наявність викидів від транспортних засобів, пилу, алергенів і токсичних речовин у повітрі створюють потребу в розробці й впровадженні високоефективних систем контролю та фільтрації повітря в автомобілях. Особливо це актуально для автомобілів представницького класу, де пасажирів часто проводять тривалий час у дорозі, а рівень комфорту має відповідати найвищим стандартам.

1.2 Параметри, що підлягають контролю в системі оцінювання якості повітря у автомобілях представницького класу

Сучасні системи контролю якості повітря в автомобілях базуються на використанні спеціальних сенсорів (наприклад, MQ-135, CCS811, SGP30), які здатні визначати вміст вуглекислого газу, летких органічних сполук (VOC), рівень пилу тощо. Інформація з сенсорів обробляється мікроконтролером або вбудованою системою, яка приймає рішення про зміну режиму вентиляції, активацію фільтрації або подачу свіжого повітря ззовні.

У преміум-сегменті автомобільної промисловості дедалі частіше впроваджуються системи з елементами штучного інтелекту, які адаптивно реагують на зміни зовнішнього середовища та поведінку пасажирів.

Автоматизована система контролю якості повітря повинна забезпечувати комплексний моніторинг повітряного середовища всередині салону автомобіля з метою підтримання здорового та комфортного мікроклімату. Ефективність такої системи значною мірою залежить від точності та повноти збору даних, а також здатності оперативно реагувати на зміну параметрів. У цьому розділі наведено основні фізико-хімічні параметри, які необхідно контролювати, а також обґрунтовано доцільність їх моніторингу.

1.2.1 Температура повітря

Температура є ключовим фактором комфортного перебування пасажирів у салоні. Надто висока або низька температура спричиняє дискомфорт, впливає на самопочуття, знижує концентрацію уваги водія. Автоматизована система має контролювати температуру та автоматично регулювати кліматичні параметри, забезпечуючи підтримку в межах 20–24°C.

Температура повітря у салоні автомобіля є одним із ключових параметрів, що безпосередньо впливають на фізіологічний стан пасажирів і водія,

рівень їхньої концентрації, реакції та загального комфорту. Особливо це стосується автомобілів представницького класу, які часто використовуються для тривалих подорожей або як засоби корпоративного транспорту.

Оптимальна температура для комфортного перебування людини в закритому просторі варіюється в межах 20–24°C. Температури нижче 18°C або вище 26°C можуть спричинити дискомфорт, погіршення самопочуття, а в екстремальних випадках — стресові реакції організму. Наприклад, при перегріві в салоні виникає підвищене потовиділення, головний біль, зниження працездатності, що є особливо небезпечним для водія.

Усередині автомобіля температурні коливання можуть бути значними. Влітку температура в зачиненому автомобілі може швидко перевищувати 40°C, що становить ризик для здоров'я, особливо для дітей та людей похилого віку. Взимку, навпаки, температура може падати нижче 0°C, що створює дискомфорт до моменту прогрівання.

Крім того, у салоні автомобіля температура розподіляється нерівномірно: вона може відрізнятися між передніми та задніми сидіннями, а також між рівнями (наприклад, температура на рівні голови і ніг може бути різною). Це створює додаткову потребу в системах зонального клімат-контролю та динамічного регулювання температури.

Для вимірювання температури в салоні використовуються цифрові сенсори температури (наприклад, термістори, сенсори типу DHT22, DS18B20 або аналогічні). У сучасних автомобілях преміум-класу передбачено кілька сенсорів, розміщених у різних зонах салону, що дозволяє реалізувати:

- зональний клімат-контроль;
- інтелектуальне розподілення повітряних потоків;
- динамічне регулювання температури в залежності від присутності пасажирів.

Автоматизована система аналізує показники температури в режимі реального часу та взаємодіє з кліматичною установкою (кондиціонером, обі-

грівачем, вентилятором), щоб підтримувати оптимальні умови. Вона також може враховувати:

- температуру зовнішнього повітря;
- наявність та кількість пасажирів;
- сонячну активність (через фотодатчики);
- попередні уподобання користувачів.

Це дозволяє системі не лише реагувати на зміни, але й прогнозувати зміни мікроклімату та адаптуватися до них проактивно.

1.2.2 Відносна вологість

Оптимальний рівень вологості (40–60%) забезпечує комфортну терморегуляцію людини. При низькій вологості (менше 30%) пересушується слизова оболонка, що спричиняє подразнення очей і дихальних шляхів. Надлишкова вологість сприяє утворенню конденсату, розвитку цвілі та бактеріального забруднення. Система повинна включати гігрометри або комбінаційні сенсори для постійного контролю вологості.

Відносна вологість повітря у салоні автомобіля є важливим показником мікроклімату, що впливає як на комфорт пасажирів, так і на функціональність обладнання. Відносна вологість визначає, скільки водяної пари міститься в повітрі відносно максимально можливої кількості при певній температурі.

Для більшості людей комфортний рівень вологості повітря в межах 40–60%. Вихід за ці межі викликає дискомфорт і може мати негативні наслідки:

1. При низькій вологості (менше 30%):
 - пересихають слизові оболонки носа та горла;
 - виникає подразнення очей;
 - підвищується ризик захворювань верхніх дихальних шляхів;

- збільшується електростатичний заряд, що може зашкодити електроніці.

2. При високій вологості (понад 70%):

- з'являється відчуття духоти;
- сприяє росту плісняви, бактерій;
- можливе запотівання вікон, що знижує оглядовість;
- погіршується ефективність охолодження організму через зменшення випаровування поту.

Салон автомобіля — це обмежений простір з малою кількістю обміну повітря. У таких умовах навіть незначна зміна температури або дихання пасажирів швидко впливає на рівень вологості. У зимовий період салон часто пересушується внаслідок роботи обігрівача, тоді як улітку при вмиканні кондиціонера — надмірне охолодження також може призводити до зниження вологості.

Проблеми виникають і при перепадах температур, коли волога конденсується на скляних поверхнях. Це призводить до запотівання лобового скла, що особливо небезпечно під час руху.

У сучасних системах контролю мікроклімату використовуються комбіновані сенсори температури та вологості. Найпоширеніші типи:

DHT22 / AM2320 — для базових систем;

SHT31 / BME280 — для більш точного контролю;

Інфрачервоні або MEMS-сенсори — у висококласних авто.

Ці сенсори розміщуються в різних зонах салону, щоб вимірювати відносну вологість і дозволити зональне керування.

На основі показників вологості система може виконувати наступні функції:

- автоматично вмикати/вимикати кондиціонер або підігрів повітря;
- активувати вентиляцію ззовні для вирівнювання показників;
- включати систему осушення повітря або фільтрацію при виявленні надмірної вологості;

- подавати сигнали на запотівання вікон та здійснювати реакцію через кліматичну установку.

У сучасних автомобілях преміум-класу також реалізовано інтеграцію з датчиками запотівання лобового скла та інтелектуальними системами клімат-контролю, які прогнозують зміни вологості та запобігають небезпечним ситуаціям до їх виникнення.

1.2.3 Концентрація CO₂ (вуглекислий газ)

CO₂ — один з найважливіших показників якості повітря. В умовах обмеженого простору салону підвищення концентрації CO₂ до рівня понад 1000 ppm (частин на мільйон) призводить до сонливості, головного болю, зниження працездатності. Сучасні сенсори (наприклад, NDIR-датчики) дозволяють з високою точністю відслідковувати рівень CO₂ і активувати вентиляцію або фільтрацію повітря.

Вуглекислий газ (CO₂) — це безбарвний, без запаху газ, який постійно присутній у повітрі внаслідок дихання людини, згоряння палива та інших процесів. У контексті закритого простору, такого як салон автомобіля, рівень CO₂ може швидко зростати, особливо при вимкненій вентиляції або рециркуляції повітря. Надмірна концентрація CO₂ є одним з ключових індикаторів погіршення якості повітря та може істотно впливати на самопочуття пасажирів і водія.

Допустимі та критичні рівні CO₂:

- Нормальний рівень атмосферного CO₂: $\approx$ 400–450 ppm;
- Комфортний рівень у приміщеннях / транспорті: до 800–1000 ppm;
- 1000–1500 ppm: відчувається втома, зниження концентрації;
- Понад 2000 ppm: головний біль, сонливість, зниження когнітивних функцій;
- Понад 5000 ppm: граничне допустиме професійне значення (ГДК); тривале перебування є шкідливим.

Основним джерелом вуглекислого газу в салоні автомобіля є дихання пасажирів. У замкненому просторі без припливу свіжого повітря навіть дві особи можуть за кілька хвилин підняти рівень CO₂ до понад 1000 ppm. Іншим потенційним джерелом є вихлопні гази, якщо герметичність салону порушена або система вентиляції несправна.

Підвищена концентрація CO₂ безпосередньо впливає на самопочуття людей:

- у водія знижується швидкість реакції, з'являється сонливість;
- пасажирів відчують запаморочення, головний біль;
- в умовах високих температур ефект посилюється (так званий тепловий стрес);
- може стати небезпечним фактором при тривалих поїздках або в заторах.

Усе це знижує рівень безпеки та комфорту.

Для моніторингу рівня CO₂ використовуються NDIR-сенсори (non-dispersive infrared sensors) — інфрачервоні датчики, які забезпечують високу точність і стабільність:

- MH-Z19B, Sensirion SCD30, CM1106 — популярні моделі сенсорів;
- забезпечують вимірювання в діапазоні 0–5000 ppm і вище;
- підтримують калібрування, самодіагностику, цифрові інтерфейси.

Ці сенсори розміщуються в зоні дихання пасажирів або інтегруються в модулі клімат-контролю.

Автоматизована система реагує на зростання концентрації CO₂ наступним чином:

- увімкнення вентиляції з подачею зовнішнього повітря;
- перемикає з рециркуляції на свіже повітря;
- оповіщення користувача через інтерфейс або мобільний додаток;
- адаптивне регулювання інтенсивності роботи вентилятора;
- взаємодія з іншими параметрами, такими як вологість та температура, для комплексного управління мікрокліматом.

У новітніх автомобілях представницького класу контролю рівня CO₂ надається підвищена увага. Наприклад, системи розумного клімат-контролю з AI аналізують не лише CO₂, а й частоту дихання, розташування пасажирів та тип маршруту для динамічного управління середовищем.

1.2.4 Наявність дрібнодисперсного пилу (PM2.5, PM10)

PM2.5 і PM10 — це частинки пилу діаметром менше 2.5 мкм і 10 мкм відповідно, які можуть проникати в дихальні шляхи людини та спричиняти респіраторні захворювання. У міських умовах концентрація цих частинок часто перевищує допустимі норми, що особливо небезпечно для дітей і людей із захворюваннями легенів. Для контролю таких частинок застосовуються лазерні сенсори типу GP2Y1010AU0F або Plantower.

Дрібнодисперсний пил є одним з найнебезпечніших забруднювачів повітря в міських умовах. Він складається з частинок твердих або рідких речовин, що зависають у повітрі, мають діаметр менше 10 мікрометрів і здатні проникати глибоко в дихальну систему людини. Залежно від розміру частинок виділяють:

- PM10 (particulate matter ≤ 10 мкм) — частинки, що проникають у верхні дихальні шляхи.
- PM2.5 (particulate matter ≤ 2.5 мкм) — ультрадрібні частинки, що проникають у легені та кровотік.

Основні джерела пилу в міських умовах включають:

- вихлопні гази автомобілів (особливо дизельних);
- зношення шин, гальмівних колодок;
- будівельні майданчики;
- промислові підприємства;
- природні джерела — пил, пилок, попіл.

Навіть у закритому салоні автомобіля пил може потрапляти через вентиляцію, щілини або при відкриванні дверей/вікон.

Дрібнодисперсний пил вважається серйозною загрозою для здоров'я, оскільки:

- PM10 викликає подразнення носа, горла, очей, бронхіт;
- PM2.5 може проникати в легеневі альвеоли, потрапляти в кровообіг, спричиняти серцево-судинні та онкологічні захворювання;
- підвищує ризик інфарктів, астми, алергій;
- особливо небезпечний для дітей, літніх людей та людей із хронічними хворобами.

ВООЗ визначає добову норму PM2.5 не більше 15 мкг/м³, а PM10 — не більше 45 мкг/м³ (станом на оновлення 2021 року).

Для контролю концентрації пилу в салоні автомобіля використовують лазерні сенсори розсіяного світла, зокрема:

- Plantower PMS5003, PMS7003
- Sensirion SPS30
- Nova PM Sensor SDS011

Ці сенсори:

- визначають концентрації частинок у режимі реального часу;
- розділяють фракції (PM1.0, PM2.5, PM10);
- забезпечують цифровий вихід для інтеграції з мікроконтролерами;
- працюють за принципом лазерного розсіювання частинок.

Автоматизована система аналізує дані сенсорів і при виявленні перевищення допустимих рівнів:

- активує фільтрацію повітря через HEPA-фільтри або вугільні елементи;
- увімкнює рециркуляцію для блокування зовнішнього забруднення;
- оповіщає пасажирів через дисплей або мобільний застосунок;
- адаптує режим вентиляції відповідно до рівня забруднення.

У новітніх автомобілях представницького класу реалізовано:

- автоматичне закриття повітрозабору при високому рівні PM2.5 ззовні;

- зональні фільтраційні системи для кожного пасажирів;
- індикація повітряного індексу якості (AQI);
- інтеграція з навігацією для обходу забруднених ділянок.

1.2.5 Концентрація озону (O_3)

Озон у високих концентраціях шкідливий для органів дихання. У певних кліматичних зонах рівень озону в повітрі може сягати небезпечних значень. Системи контролю озону на основі електрохімічних сенсорів дозволяють своєчасно виявити перевищення норм.

Озон (O_3) — це газ, який складається з трьох атомів кисню. Він є потужним окисником і виконує важливу роль у захисті атмосфери від ультрафіолетового випромінювання. Проте на рівні земної поверхні озон є одним із небезпечних забруднювачів повітря, особливо в умовах замкненого простору, такого як салон автомобіля.

Озон утворюється внаслідок хімічних реакцій між оксидами азоту (NO_x) та леткими органічними сполуками (VOC) під дією ультрафіолетового світла. У контексті автомобіля можливі такі джерела озону:

зовнішнє повітря, особливо в умовах інтенсивного трафіку, влітку при високій сонячній активності;

іонізатори або озонатори повітря, якщо такі встановлені в автомобілі для дезінфекції;

витоки з вентиляційних установок, де використовуються озonoутворюючі компоненти.

Незважаючи на корисні дезінфекційні властивості озону, навіть у невеликих концентраціях він може бути небезпечним для здоров'я:

- подразнення очей, носа, горла;
- утруднене дихання, кашель;
- загострення астми, хронічних хвороб легень;
- зниження функцій легень навіть після нетривалого впливу;

- при тривалому впливі — підвищений ризик серцево-судинних захворювань.

Згідно з рекомендаціями ВООЗ, гранично допустимий рівень озону у повітрі для 8-годинного впливу не повинен перевищувати 100 ppb (0.1 ppm).

Для визначення рівня О₃ в салоні автомобіля використовують електрохімічні сенсори або сенсори на основі ультрафіолетової абсорбції. Найпопулярніші моделі:

- MiCS-OZONE, SPEC Sensors O3 968-042 — компактні електрохімічні датчики;

- можуть визначати концентрації від 10 ppb до 1000 ppb;

- відзначаються високою чутливістю, але потребують періодичного калібрування;

- забезпечують інтерфейс для інтеграції в мікроконтролерні системи.

При перевищенні безпечного рівня озону система контролю повинна:

- закривати зовнішній повітрязабірник, якщо джерело — зовнішнє середовище;

- відключати іонізатор або озонатор, якщо озон генерується всередині;

- активувати фільтрацію повітря через вугільні або комбіновані фільтри;

- виводити попередження на дисплей, у мобільний застосунок або на бортовий екран;

- взаємодіяти з іншими сенсорами (VOC, PM, CO₂) для комплексної оцінки безпеки повітря.

У новітніх представницьких автомобілях:

- реалізовано адаптивний захист від озону в режимі реального часу;

- використовуються сенсори з AI-модулями, які враховують погодні умови, рівень трафіку та режим експлуатації;

- у розробці — багатофункціональні системи, що одночасно аналізують та регулюють озон, CO₂, VOC та пил.

1.2.6 Запахи

Хоча запах не є фізичним параметром у традиційному розумінні, сучасні технології дозволяють виявляти певні хімічні компоненти, що відповідають за неприємні запахи. Це дозволяє системі адаптивно реагувати на ситуації, наприклад, активувати рециркуляцію чи ароматизацію повітря.

Запахи — це суб'єктивно відчутні характеристики повітря, які виникають унаслідок наявності летких органічних і неорганічних сполук. Хоча запахи не є фізично вимірюваними величинами у класичному сенсі, їх наявність часто свідчить про присутність шкідливих або небажаних речовин у повітрі, які можуть впливати на комфорт і безпеку пасажирів у салоні автомобіля.

Основні джерела запахів включають:

- Леткі органічні сполуки (VOC), що виділяються з обшивки, пластику, клею, текстилю;
- зовнішнє повітря, яке може містити запахи від вихлопних газів, промислових викидів, тварин, палива;
- потрапляння чадного газу або диму до салону;
- бактеріальне забруднення в системі кондиціювання або вентиляції, що викликає вологий, затхлий запах;
- залишки їжі, тютюновий дим, особливо в авто з тривалим використанням.

Запахи безпосередньо впливають на комфорт пасажирів. Навіть нетоксичні, але неприємні запахи можуть викликати:

- нудоту, запаморочення, головний біль;
- стрес, подразнення слизових;
- зниження концентрації уваги у водія;
- алергічні реакції при тривалому впливі.

У деяких випадках сильний запах може свідчити про витік технічних рідин (наприклад, антифризу) або несправності в системі вихлопу.

Хоча традиційні сенсори не можуть «відчувати» запахи так, як людина, сучасні технології дозволяють непрямо оцінити наявність запахів за концентрацією VOC або специфічних газів. Використовуються:

- газові сенсори (MOX, MEMS) — наприклад, SGP30, CCS811, BME680;
- електронні носи (e-noses) — комбінації сенсорів з алгоритмами штучного інтелекту для розпізнавання шаблонів запахів;
- VOC-індекси — інтегральна оцінка вмісту ароматичних і летких сполук у повітрі.

Ці сенсори аналізують спектр органічних сполук і дозволяють системі класифікувати повітря за рівнем свіжості або забрудненості.

1.3 Систематизація параметрів контролю системи якості повітря у автомобілях представницького класу

Автоматизована система контролю якості повітря може виконувати такі дії:

- увімкнення фільтрації через вугільні або фотокаталітичні фільтри;
- активація режиму рециркуляції повітря;
- використання автоматичних ароматизаторів з контролем інтенсивності;
- повідомлення водія через бортову систему або мобільний додаток;
- адаптивне керування вентиляцією залежно від джерела запаху.

У сучасних автомобілях представницького класу впроваджуються:

- AI-модулі, що ідентифікують тип запаху (дим, горіння, хімікати);
- індивідуальні налаштування ароматизації для кожного пасажирів;
- автоматичне увімкнення фільтрації при розпізнаванні шкідливих запахів.

Візуально систематизація контрольованих параметрів автомобілях представницького класу представлена на рис. 1.2 та у таблиці 1.1.



Рисунок 1.2 – Систематизація контрольованих параметрів

Таблиця 1.1 – Контрольовані параметри повітря у автомобілях представницького класу

Параметр	Опис	Нормативний діапазон / Рекомендації
Температура повітря	Визначає тепловий комфорт пасажирів	20–24°C
Відносна вологість	Впливає на здоров'я та комфорт слизових оболонок	40–60%
CO ₂ (вуглекислий газ)	Підвищений рівень викликає сонливість, головний біль	< 1000 ppm
VOC (леткі органічні сполуки)	Можуть бути токсичними, мають канцерогенну дію	≤ 500 ppb (залежно від складу)
PM _{2.5} / PM ₁₀ (дрібнодисперсний пил)	Викликають респіраторні захворювання при перевищенні норм	PM _{2.5} ≤ 25 µg/m ³ , PM ₁₀ ≤ 50 µg/m ³
CO (чадний газ)	Сильна токсичність, небезпечний для життя	< 9 ppm
O ₃ (озон)	Високий рівень шкідливий для дихання	< 100 ppb
Запахи	Неприємні запахи, спричинені присутністю VOC або інших речовин	Визначається суб'єктивно або індикаторами VOC

1.5 Висновки до розділу 1

У першому розділі було здійснено аналіз сучасного стану проблеми забезпечення якісного повітря в салонах автомобілів представницького класу. Визначено, що якість повітря в обмеженому просторі автомобіля значною мірою впливає на комфорт, безпеку та здоров'я пасажирів і водія, а також на загальне сприйняття преміального автомобільного продукту.

Детально розглянуто основні параметри, які необхідно контролювати в автоматизованій системі, зокрема: температуру та відносну вологість повітря;

концентрацію вуглекислого газу (CO_2), чадного газу (CO) та озону (O_3); наявність дрібнодисперсного пилу ($\text{PM}_{2.5}$, PM_{10}); рівень летких органічних сполук (VOC); неприємні запахи як індикатори забруднення.

Також було проаналізовано сенсорні технології, здатні забезпечити точне виявлення та моніторинг цих параметрів, і встановлено, що для досягнення високої ефективності система має працювати в режимі реального часу, бути адаптивною до умов експлуатації та інтегруватися з іншими елементами кліматичної системи.

Отже, сучасні вимоги до систем контролю якості повітря в автомобілях преміум-сегменту потребують використання інтелектуальних багатофункціональних рішень з високим рівнем автоматизації та чутливості. У наступних розділах буде запропоновано структурну та функціональну модель такої системи, обґрунтовано вибір компонентів та алгоритмів її роботи.

2 МАТЕМАТИКО-ФІЗИЧНИЙ АНАЛІЗ МЕТОДІВ ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ЯКОСТІ ПОВІТРЯ У АВТОМОБІЛЯХ ПРЕДСТАВНИЦЬКОГО КЛАСУ

2.1 Метод та сенсор контролю температури повітря

Метод вимірювання: термісторний або цифровий термодатчик (наприклад, DS18B20, DHT22). Математична модель (для термістора NTC):

$$T = \frac{1}{\frac{1}{T_0} + \frac{1}{\beta} \cdot \ln\left(\frac{R}{R_0}\right)} - 273.15, \quad (2.1)$$

де T — температура ($^{\circ}\text{C}$), T_0 — температура при R_0 (у К), R — опір термістора при вимірюваній температурі, R_0 — номінальний опір, β — температурний коефіцієнт матеріалу.

У системі автоматизованого контролю якості повітря температура є одним із базових параметрів, який не лише впливає на комфорт пасажирів, а й необхідний для коректної роботи інших сенсорів (наприклад, вологості, CO_2 , VOC). Саме тому температурні сенсори є обов'язковим елементом у будь-якій кліматичній або екологічній системі контролю.

Температурний сенсор в автомобільній системі служить для:

- постійного моніторингу температури повітря у салоні;
- забезпечення температурної компенсації даних інших сенсорів (наприклад, газових);
- передачі даних до кліматичної системи або блока керування для регулювання обігріву, вентиляції чи охолодження.

У автомобілях найчастіше використовуються такі типи температурних сенсорів:

Термістори (NTC/PTC) – це прості і чутливі елементи, які змінюють свій опір залежно від температури. Їх використовують у системах, де потрібна висока чутливість, але не обов’язкова цифрова точність.

Цифрові сенсори температури – сучасні компактні прилади, які містять мікроконтролер і передають значення температури вже в обробленому вигляді (наприклад, DS18B20, SHT31). Вони зручні для інтеграції в мікропроцесорні системи без додаткової обробки сигналу.

RTD (датчики опору) – точні, стабільні, але дорожчі елементи. Частіше використовуються у промислових системах або в преміум-класі авто.

Температурний сенсор у салоні авто повинен відповідати таким вимогам:

- бути компактным і енергоефективним;
- мати широкий робочий діапазон температур (зазвичай від -40°C до $+85^{\circ}\text{C}$ або більше);
- забезпечувати достатню точність ($\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ або краще);
- швидко реагувати на зміну температури повітря;
- бути сумісним із мікроконтролером або мережею автомобіля (CAN, I²C, UART).

Температурні сенсори розміщують у ключових зонах салону — поблизу повітряних дефлекторів, у зоні обличчя або ніг пасажирів, або в центральному модулі системи клімат-контролю. Важливо забезпечити, щоб сенсор вимірював саме повітря, а не нагріті елементи панелі.

2.2 Метод та сенсор контролю відносної вологості

Метод вимірювання: ємнісний гігрометр (наприклад, SHT31, BME280). Математичну модель сенсора можна представити у наступному вигляді:

$$RH = \frac{C}{C_0} \cdot 100\%, \quad (2.2)$$

де RH — відносна вологість (%), C — виміряна ємність сенсора, C_0 — ємність при 0% вологості.

Відносна вологість є одним із критично важливих параметрів для оцінки мікроклімату в салоні автомобіля. Порушення рівня вологості призводить до дискомфорту, запотівання вікон, розвитку бактерій або пересушування повітря. У сучасних автомобілях цей параметр постійно відстежується за допомогою спеціалізованих сенсорів.

Сенсор вологості виконує такі завдання: вимірює вміст водяної пари у повітрі; допомагає кліматичній системі автоматично підтримувати оптимальний рівень вологості; дозволяє уникати конденсації вологи на вікнах; використовується для температурної компенсації інших газових сенсорів.

У автомобільних системах найчастіше використовують ємнісні сенсори, які мають високу чутливість і компактні розміри. Їх принцип роботи базується на зміні ємності в залежності від вологості повітря.

Найпоширеніші моделі:

- SHT31, AM2320, BME280 — інтегровані цифрові сенсори температури та вологості з високою точністю;
- підтримують цифрові інтерфейси (I²C, SPI), що дозволяє легко інтегрувати їх у вбудовані системи.

Характеристики сенсорів вологості:

- Діапазон вимірювання: від 0% до 100% відносної вологості;
- Точність: зазвичай $\pm 2 \dots \pm 3\%$ RH у діапазоні 20–80%;
- Швидкість реакції: від кількох секунд до 1 хвилини залежно від моделі;
- Температурна компенсація: більшість сучасних сенсорів автоматично враховують температуру при обчисленні вологості.

Сенсор вологості повинен бути розташований у зоні активного повітрообміну — наприклад, поблизу вентиляційних отворів або в центральній консолі. Його потрібно захищати від прямого контакту з рідинами або пилом, оскільки це може викликати помилки вимірювання.

Багато сучасних сенсорів вологості поєднані з сенсором температури, що дозволяє виконувати додаткову функцію — визначення точки роси. Це особливо важливо для автоматичного включення антизапотівання вікон.

2.3 Метод та сенсор контролю концентрації CO₂

Метод вимірювання: NDIR (недисперсійна інфрачервона спектроскопія) — MH-Z19B, SCD30. Математичну модель сенсора можна представити у наступному вигляді (основа принципу Бугера–Ламберта–Бера):

$$I = I_0 \cdot e^{-k \cdot c \cdot l} \Rightarrow c = -\frac{1}{k \cdot l} \ln \left(\frac{I}{I_0} \right), \quad (2.3)$$

де c — концентрація CO₂, k — коефіцієнт поглинання, l — довжина оптичного шляху, I_0 , I — інтенсивності світла без та з CO₂.

Ось технічний опис параметра концентрація CO₂ (вуглекислий газ), зосереджений на особливостях його вимірювання сенсором у салоні автомобіля.

Вуглекислий газ (CO₂) — один із ключових показників якості повітря в закритому просторі, включаючи салон автомобіля. Його підвищення свідчить про погіршення вентиляції, накопичення видиханого повітря, а також про зниження концентрації кисню. Контроль CO₂ необхідний для своєчасного оновлення повітря та підтримання безпечного мікроклімату.

Сенсор CO₂ у системі повітряного контролю:

- відстежує концентрацію вуглекислого газу в реальному часі;

- дозволяє системі клімат-контролю автоматично перемикатися між рециркуляцією і зовнішньою вентиляцією;
- запобігає розвитку сонливості або втоми у водія через накопичення CO₂.

Найефективнішими та найпоширенішими в автомобільних системах є NDIR-сенсори (Non-Dispersive Infrared Sensors) — недисперсійні інфрачервоні сенсори.

Принцип роботи: сенсор пропускає інфрачервоне світло через повітряний канал. Молекули CO₂ поглинають світло на певній довжині хвилі, і на основі цього визначається концентрація газу. Найвідоміші моделі: MH-Z19B; Sensirion SCD30; CM1106SL-NS.

Характеристики сенсора CO₂:

- Діапазон вимірювання: від 0 до 5000 ppm або більше;
- Точність: $\pm(50 \text{ ppm} + 5\% \text{ показів})$;
- Калібрування: більш точні сенсори мають функцію автоматичного калібрування (ABC – Automatic Baseline Calibration);

Інтерфейс: UART, I²C або PWM для інтеграції з мікроконтролером.

При встановленні в салоні авто сенсор повинен бути встановлений у місці, де повітря активно циркулює, але не піддається впливу прямих потоків від кондиціонера чи нагрівачів.

Необхідно уникати розміщення поруч із джерелами пари, тепла або газів, які можуть заважати точності.

У закритому салоні без вентиляції рівень CO₂ може підвищуватися на сотні ppm щохвилини при наявності кількох пасажирів. Тому автоматична реакція системи на ці зміни є критично важливою для безпеки.

Сенсор CO₂ зазвичай працює у зв'язці з:

- температурним сенсором (для компенсації показників),
- вентиляційним модулем (для подачі свіжого повітря),
- бортовою системою повідомлень (попередження про перевищення порогу).

2.4 Метод та сенсор контролю PM2.5 / PM10

Метод вимірювання: лазерний розсіювальний сенсор (SDS011, PMS5003). Математичну модель сенсора можна представити у наступному вигляді (гравіметрична оцінка):

$$PM_x = \frac{M}{V}, \quad (2.4)$$

де PM_x — масова концентрація (мкг/м³), M — маса частинок, виявлена сенсором, V — об'єм повітря, який пройшов через сенсор.

PM2.5 та PM10 — це дрібнодисперсні частинки пилу діаметром менше 2.5 мкм та 10 мкм відповідно, які можуть становити серйозну загрозу для здоров'я. Вони проникають у дихальні шляхи, викликають алергії, респіраторні та серцево-судинні захворювання. У контексті салону автомобіля їх контроль є особливо важливим у міських умовах або під час руху через зони з підвищеним рівнем забруднення.

Сенсор дрібнодисперсного пилу виконує наступні функції:

- визначає концентрацію твердих частинок у повітрі;
- допомагає виявити рівень зовнішнього забруднення;
- активує фільтрацію або рециркуляцію повітря в салоні;
- інформує пасажирів про якість повітря через індикатор або дисплей.

Сенсори PM2.5 / PM10 зазвичай працюють за принципом лазерного розсіювання:

- всередині сенсора розташований лазерний діод і фотодетектор;
- коли частинки пилу проходять крізь світловий промінь, вони розсіюють світло;
- фотодетектор фіксує інтенсивність розсіяного світла, яка прямо пропорційна кількості та розміру частинок.

Це дозволяє визначати концентрацію частинок у мікрограмах на кубічний метр ($\text{мкг}/\text{м}^3$).

Популярні моделі сенсорів:

- Plantower PMS5003 / PMS7003
- Nova SDS011
- Sensirion SPS30 — преміальний сенсор із високою стабільністю.

Характеристики сенсора PM:

- Діапазон вимірювання: 0 – 1000+ $\text{мкг}/\text{м}^3$;
- Фракції: PM1.0, PM2.5, PM4.0, PM10;
- Точність: залежить від моделі, $\pm 10\text{--}20\%$;
- Час реакції: 1–10 секунд;
- Інтерфейси: UART, I²C, SPI — легко інтегруються з мікроконтролерами;

Калібрування: сенсори зазвичай заводськи відкалібровані, але можуть потребувати періодичного порівняння з еталонними приладами.

Слід зазначити що сенсор повинен бути розташований у місці з доброю циркуляцією повітря, захищений від вологи та конденсату а також надмірна вологість або бризки можуть заважати роботі фотодетектора. Бажано періодично продувати сенсор повітрям для очищення від осілих частинок.

При перевищенні допустимих рівнів (зазвичай понад 25–50 $\text{мкг}/\text{м}^3$ для PM2.5), система виконує:

- автоматичне перемикання в режим рециркуляції повітря;
- активацію фільтрації (HEPA, електростатичної або вугільної);
- попередження водія через інформаційну систему;
- адаптацію інтенсивності вентиляції.

2.5 Метод та сенсор контролю запаху

Метод вимірювання: непряма оцінка через VOC або електронний ніс. Математичну модель сенсора можна представити у наступному вигляді (умовна оцінка):

$$\text{Індекс запаху} = f(\text{TVOC}, \text{CO}, \text{газова сигнатура}). \quad (2.5)$$

Це може бути алгоритм на основі машинного навчання для класифікації запахів.

Запахи є складним і суб'єктивним параметром якості повітря, який не має чіткої фізичної одиниці вимірювання. Проте наявність неприємних запахів часто свідчить про забруднення повітря леткими органічними сполуками (VOC), димом, чадним газом, мікроорганізмами або іншими небажаними елементами. В автомобілях представницького класу якість запаху в салоні є важливим показником преміального комфорту.

Сучасні сенсори не здатні розрізняти запахи так, як людина, однак вони можуть:

- виявляти леткі хімічні сполуки, які найчастіше асоціюються із запахами;
- класифікувати «повітряне середовище» як свіже, забруднене чи токсичне;
- подавати сигнал кліматичній системі про потребу в очищенні або ароматизації повітря.

Основні типи технологій для виявлення запахів:

- MOX-сенсори (Metal Oxide Semiconductor):
- реагують на широкий спектр органічних речовин;
- змінюють електропровідність при контакті з певними газами;
- приклади: SGP30, CCS811, BME688.

Електронні носи (e-nose):

- набір сенсорів різного типу, які разом утворюють «профіль запаху»;
- використовуються алгоритми машинного навчання для класифікації;
- можуть розпізнавати шаблони запахів (наприклад, дим, бензин, їжа).

VOC-індекси:

- сенсор надає інтегральну оцінку рівня загальної забрудненості повітря органічними речовинами;
- чим вище рівень VOC, тим більша ймовірність наявності неприємного запаху.

Характеристики сенсорів запахів:

- Одиниці виміру: індекс TVOC або умовна шкала якості повітря;
- Точність: відносна, орієнтована на виявлення тенденцій, а не точних значень;
- Швидкість реакції: 1–15 секунд;
- Калібрування: потрібне для адаптації під типові повітряні умови салону.
- Встановлення та експлуатація:
- Сенсор зазвичай встановлюють поблизу повітрозабірників, у центрі панелі або біля дефлекторів;
- Уникають зон з прямим потоком від кондиціонера або обігрівача;
- Рекомендується захист від конденсату та пилу.

При виявленні високого рівня VOC або запаху: активується фільтрація повітря через вугільні або комбіновані фільтри; вмикається режим рециркуляції; у деяких системах — автоматична ароматизація салону; подається попередження водію або пасажиром через інтерфейс.

2.6 Висновки до розділу 2

У цьому розділі було розглянуто технічні аспекти ключових параметрів, що визначають якість повітря в салоні автомобіля представницького класу, та обґрунтовано способи їх вимірювання за допомогою сучасних сен-

сорів. Зокрема, досліджено фізичні принципи, типи сенсорів, діапазони вимірювання, умови розміщення, переваги та обмеження кожного виду датчиків.

До основних параметрів, що підлягають контролю, належать: температура, відносна вологість, концентрація CO₂, рівень летких органічних сполук (VOC), вміст дрібнодисперсного пилу (PM2.5 / PM10), наявність чадного газу (CO), озону (O₃), а також запахи. Для кожного з них визначено рекомендовані типи сенсорів (термістори, NDIR, MOX, лазерні розсіювальні, електрохімічні тощо), які забезпечують надійне й точне вимірювання в умовах експлуатації автомобіля.

Також акцентовано на тому, що для забезпечення високої ефективності роботи системи контролю якості повітря необхідно враховувати взаємний вплив параметрів (наприклад, температурна компенсація VOC і CO₂ сенсорів), а також забезпечити правильне розміщення і захист сенсорів від впливу навколишнього середовища (волога, пил, перегрів).

Результати аналізу підтверджують доцільність використання багатофункціональних сенсорних модулів у складі автоматизованої системи управління мікрокліматом, з урахуванням специфіки автомобільного середовища. У подальших розділах буде розроблено структурну схему системи, алгоритми її роботи та моделі взаємодії з іншими підсистемами автомобіля.

З СТРУКТУРНО-АПАРАТНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ ПОВІТРЯ У АВТОМОБІЛІ ПРЕДСТАВНИЦЬКОГО КЛАСУ

3.1 Структурна схема системи контролю якості повітря

Автоматизована система контролю якості повітря в автомобілях представницького класу (АСКЯПАПК) проєктується як інтелектуальна система зі зворотним зв'язком, яка інтегрує сенсорні модулі, обчислювальні блоки та виконавчі пристрої. Основне завдання системи — забезпечення постійного моніторингу параметрів повітря у салоні автомобіля та автоматичне регулювання кліматичних умов відповідно до заданих комфортних значень.

Узагальнена структурна схема АСКЯПАПК (рис. 3.1 та 3.2) базується на класичній моделі керування зі зворотним зв'язком, що включає:

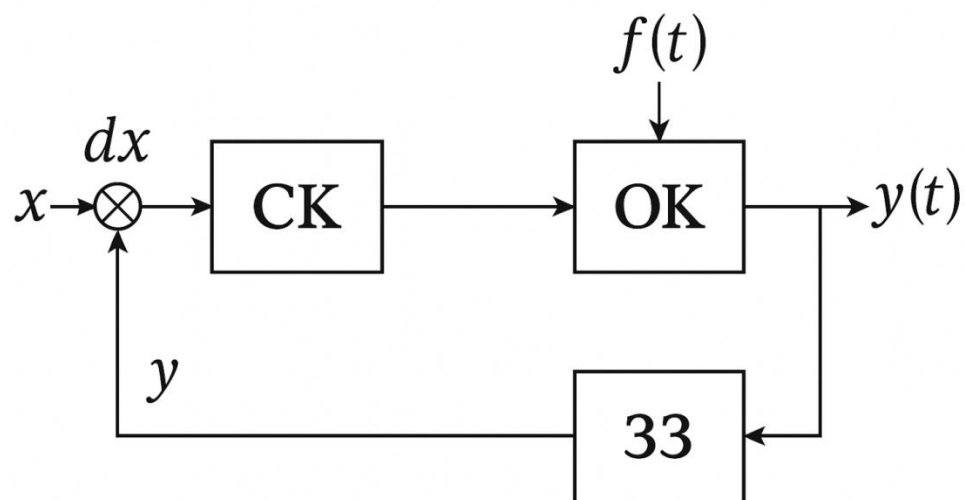


Рисунок 3.1 - Узагальнена структурна схема автоматизованої системи контролю якості повітря

На рис. 3.1 наведено наступні позначення: система керування (СК), об'єкт керування (ОК), зворотній зв'язок (ЗЗ).

СК представлена мікроконтролером (або мікрокомп'ютером), який приймає сигнали від сенсорів, аналізує дані та керує виконавчими елементами: вентиляторами, кондиціонерами, обігрівачами, іонізаторами тощо.

ОК у даному випадку — це салон автомобіля з його параметрами повітряного середовища, які змінюються під дією системи керування та зовнішніх факторів: пасажери, температура за межами авто, навколишній трафік.

Зворотній зв'язок реалізується через систему сенсорів: температури, вологості, CO₂, PM_{2.5}, VOC, CO, озону, а також умовної оцінки запахів. Дані від сенсорів повертаються до СК для оцінки відхилень і формування відповідного впливу.

У початковому стані система отримує задані користувачем або встановлені виробником порогові значення параметрів. Від сенсорів надходять поточні значення. Блок керування обчислює різницю Δx між заданим і виміряним значенням та приймає рішення про необхідність коригувального впливу.

Система працює у безперервному циклі:

- зчитування показників,
- аналіз відхилень,
- прийняття рішення (алгоритм логіки або PID-регуляція),
- керування виконавчими пристроями,
- моніторинг результату.

1. Температура — підтримується в межах 20–24°C. Керується за допомогою кліматичної установки, обігрівачів і кондиціонера. Вимірюється цифровими сенсорами температури.

2. Вологість — оптимальний діапазон 40–60%. Контролюється через кондиціонери, вентиляцію, зволожувачі або осушувачі. Вимірюється ємнісними гігрометрами.

3. PM_{2.5} / PM₁₀ — концентрація пилу контролюється лазерними сенсорами (PMS7003, SPS30). При перевищенні допустимого рівня активується рециркуляція, фільтрація або подається сигнал водію.

4. CO₂ — рівень CO₂ не повинен перевищувати 800–1000 ppm. Визначається NDIR-сенсором. Система вмикає подачу свіжого повітря або посилює вентиляцію.

5. VOC — леткі органічні сполуки виявляються MOX-сенсорами. При підвищеній концентрації активуються фільтри або змінюється режим повітряного обміну.

Запахи — оцінюються через значення VOC або електронний «ніс». Система подає сигнал або вмикає ароматизатор.

Озон (O₃) — контроль здійснюється електрохімічним сенсором. За перевищення рівня озону подається сигнал та вимикаються джерела його утворення (іонізатор тощо).

Чадний газ (CO) — визначається електрохімічним сенсором. Високий рівень CO є критичним і викликає аварійне провітрювання та попередження.

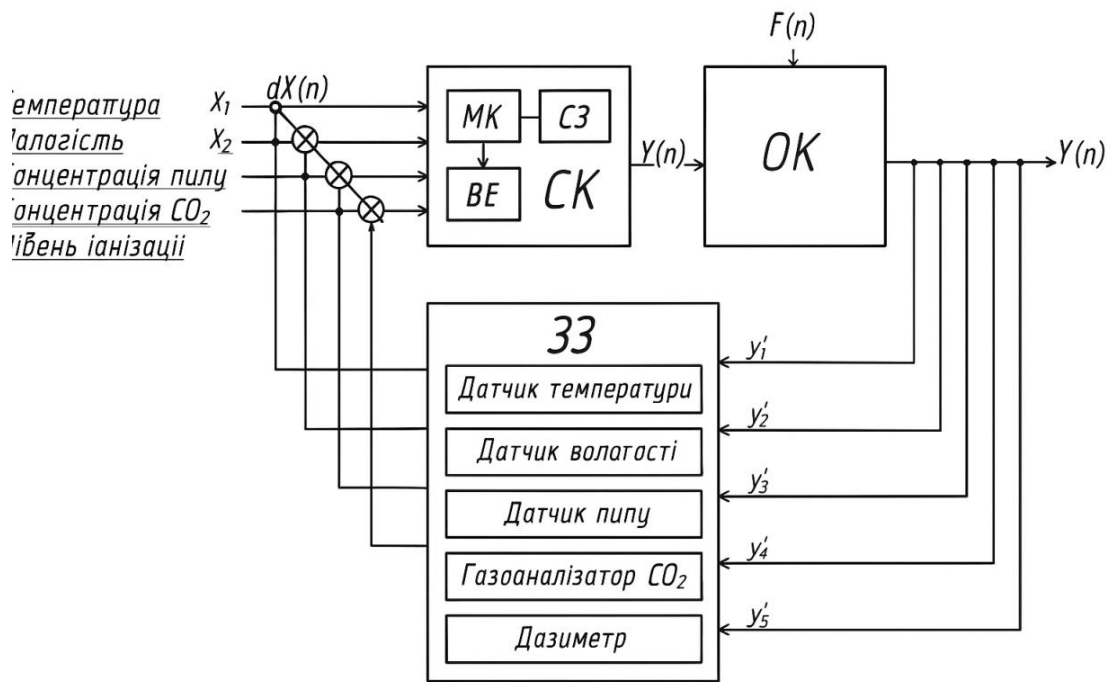


Рисунок 3.2 - Деталізована структурна схема АСКЯПОП

Якість повітря у салоні залежить від ряду зовнішніх чинників: погодні умови, кількість пасажирів, умови дорожнього руху, наявність поблизу про-

мислових зон. Ці фактори враховуються в алгоритмах адаптивного управління, що дозволяє системі динамічно реагувати на зміну умов експлуатації.

У наступному розділі буде представлено алгоритмічну структуру керування, а також технічні компоненти системи та схеми інтеграції у бортову електроніку автомобіля.

3.2 Апаратні складові автоматизованої системи контролю якості повітря у автомобілі представницького класу

Датчики температури відіграють ключову роль у сучасних системах контролю, особливо в автоматизованих рішеннях для моніторингу якості повітря в офісних приміщеннях. Вони дозволяють точно визначити температурний стан навколишнього середовища і передають числові дані, необхідні для аналізу та регулювання кліматичних умов.

Контроль вологості також є невід'ємною частиною забезпечення сприятливого мікроклімату в робочих просторах. Рівень вологості впливає не лише на комфорт і самопочуття працівників, але й на ефективність роботи, а також може запобігати поширенню шкідливих бактерій та мікроорганізмів.

Для таких завдань часто використовують комбінований датчик температури та вологості DHT21 або AM2301A, який здатен вимірювати обидва параметри з високою точністю. На рисунку 3.3 показано зовнішній вигляд цього пристрою.

Як зазначено в технічних джерелах, датчик DHT21/AM2301A має підвищену точність вимірювань та працює через однопровідний цифровий інтерфейс. Його конструкція передбачає захисний корпус, що робить можливим його використання не тільки в приміщеннях, але й на відкритому повітрі. Пристрій не потребує зовнішніх електронних компонентів для стабільної роботи.

Важливо враховувати, що довжина підключеного проводу не повинна перевищувати 30 метрів при живленні від 5 вольт або одного метра при жив-

ленні 3,3 вольт. Для забезпечення точності, згідно з технічною документацією, рекомендується використання підтягувального резистора з номіналом 5,1 кОм.

Датчик використовує три дроти для підключення. Має цифровий тип інтерфейсу з протоколом 1-wire. Точність вимірювання температури становить 0,1 градуса Цельсія. Діапазон вимірювання вологості охоплює значення від 0 до 100 відсотків, а температура вимірюється в межах від мінус 40 до плюс 80 градусів Цельсія. Похибка у визначенні вологості складає приблизно 2 відсотки відносної вологості, а точність температурних вимірювань має похибку до 0,5 градуса.



Рисунок 3.3 – Датчик вологості та температури DHT21/AM2301A

У джерелі [10] зазначено, що датчик DHT21 або AM2301A призначений для вимірювання температури й вологості з підвищеною точністю. Він функціонує через однопровідний цифровий інтерфейс. Виріб має захисний корпус, що дає змогу використовувати його не лише в середині приміщень, а й на відкритому повітрі. Його конструкція не передбачає необхідності у додаткових зовнішніх компонентах або обв'язці для стабільної роботи.

У рекомендаціях до використання зазначається, що довжина проводу не повинна перевищувати 30 метрів при живленні від джерела напругою 5 вольт. Якщо живлення здійснюється при напрузі 3,3 вольт, довжина проводу має бути не більше одного метра. Для забезпечення відповідності заявленим

у технічній документації параметрам точності, необхідно підключити підтягувальний резистор номіналом 5,1 кОм.

Датчик має три дроти для підключення, що забезпечують його живлення та передачу даних. Тип інтерфейсу — цифровий, з використанням технології 1-wire. Точність вимірювання температури складає 0,1 градуса Цельсія. Діапазон вимірювання вологості охоплює значення від нуля до ста відсотків. Температурний діапазон функціонування сенсора становить від мінус сорока до плюс вісімдесяти градусів за Цельсієм. Похибка при вимірюванні вологості становить приблизно два відсотки відносної вологості, а похибка у вимірюванні температури не перевищує пів градуса.

Датчики пилу є важливою складовою системою, що відповідають за моніторинг якості повітря. Їх широко застосовують у різних галузях, зокрема в промисловому секторі, медичній сфері, а також у побутових та офісних умовах. Вибір відповідного датчика має важливе значення для ефективної роботи автоматизованих систем, тому доцільно ознайомитися з найпоширенішими моделями та визначити найбільш оптимальні рішення.

Одним із таких рішень є модуль датчика пилу GP2Y1010AU0F, приклад якого зображено на рисунку 3.4. Як зазначено в джерелі [10], цей датчик здатен виявляти у повітрі частинки, розмір яких перевищує 0,8 мікрметра. Окрім цього, він реагує на сигаретний дим. Серед його переваг варто відзначити низький рівень енергоспоживання, що робить його ефективним у довготривалих системах контролю. Також пристрій оснащений вбудованим стабілізатором напруги, що дозволяє працювати в широкому діапазоні вхідної напруги.

Чутливість цього модуля становить пів вольт на кожні 100 мікрограмів частинок на кубічний метр. Максимальне значення, яке він здатен зафіксувати, дорівнює 500 мікрограмів на кубічний метр. Живлення датчика може здійснюватися в межах від 2,5 до 5,5 вольт. Пристрій споживає струм до 20 міліампер. Робочий температурний діапазон коливається від мінус десяти до плюс шістдесяти п'яти градусів за Цельсієм. Розміри модуля складають 63,2

на 41,3 на 21,1 міліметра. Отвір для забору повітря має діаметр дев'ять міліметрів.

Цей датчик можна використовувати окремо або як частину складніших систем очищення повітря, кондиціювання, моніторингу стану повітря чи у складі детектора твердих частинок типу PM2.5. З огляду на свої характеристики, GP2Y1010AU0F повністю відповідає вимогам для роботи як основний елемент підсистеми виявлення пилового забруднення та може ефективно застосовуватися в офісних автоматизованих системах контролю якості повітря.



Рисунок 3.4 – Модуль датчика пилу GP2Y1010AU0F

Газоаналізатори застосовуються для визначення хімічного складу газів, які можуть бути присутніми в повітрі. Їх використовують у багатьох галузях, зокрема в автоматизованих системах контролю якості повітря в офісних приміщеннях. Доцільно ознайомитися з різновидами таких пристроїв та умовами їх ефективного використання в системах автоматичного вимірювання.

Один із прикладів сучасних рішень — це комбінований модуль, що поєднує датчики якості повітря CCS811 та HDC1080, який може здійснювати вимірювання вмісту вуглекислого газу та летких органічних сполук, а також температури і вологості. Пристрій зображено на рисунку 3.5.

Датчик HDC1080 у складі модуля відповідає за вимірювання температури та відносної вологості повітря. Газоаналізатор CCS811, у свою чергу, є компактним цифровим сенсором, розробленим для контролю якості повітря. Він містить металоксидний сенсор (МОКС), здатний виявляти загальний вміст летких органічних сполук (eTVOC) та оцінювати рівень еквівалентного вуглекислого газу (eCO₂). Для підвищення точності, значення газового аналізу коригуються автоматично на основі даних про температуру та вологість, які зберігаються у внутрішніх регістрах пристрою.

Модуль є зручним для використання в автоматизованих системах, особливо завдяки низькому енергоспоживанню, що є важливим фактором для автономних або портативних рішень.

Щодо HDC1080, він функціонує в температурному діапазоні від мінус двадцяти до плюс сімдесяти градусів Цельсія. Його вологість визначається в межах від нуля до ста відсотків відносної вологості з похибкою $\pm 2\%$ при точності 14 біт. Повторюваність вимірювання вологості становить $\pm 0,1\%$, час відгуку — приблизно 15 секунд, а тривалість одного вимірювання змінюється залежно від роздільної здатності: від 2,5 мілісекунди для 8-бітного вимірювання до 6,5 мілісекунди для 14-бітного. Температура вимірюється з похибкою $\pm 0,4^{\circ}\text{C}$ у межах від $+5$ до $+60^{\circ}\text{C}$. Повторюваність вимірювання температури складає $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$. Пристрій працює через інтерфейс I2C на частоті 400 кілогерц, має стандартну адресу з контролем читання або запису та рекомендує живлення 3,3 вольт.

Датчик CCS811, у свою чергу, також працює при живленні 3,3 вольт і споживає до 60 міліват потужності. Він підтримує інтерфейс I2C з робочою частотою 400 кілогерц. Діапазон виявлення летких органічних сполук сягає від нуля до 32 768 частин на мільярд, а рівень еквівалентного вуглекислого газу — від 400 до 32 768 частин на мільйон. Автоматична корекція умов навколишнього середовища відбувається протягом 24 годин. Після увімкнення необхідно почекати щонайменше 20 хвилин перед початком вимірювання, щоб пристрій стабілізувався та забезпечив коректні показники.



Рисунок 3.5 – Комбінований модуль датчиків якості повітря CCS811 і
HDC1080

Одним із варіантів для інтеграції в систему моніторингу повітря в офісному приміщенні є модуль датчика якості повітря MICS-5524 TVOC. Його зовнішній вигляд наведено на рисунку 3.6.



Рисунок 3.6 – Модуль датчика якості повітря MICS-5524 TVOC

Цей датчик призначений для виявлення в повітрі пар низки летючих речовин, серед яких етанол, чадний газ, водень, аміак, а також газові суміші, що включають метан, бутан та ізопропан. Зокрема, він реагує на етанол у

межах від 10 до 500 частин на мільйон, на чадний газ — від 1 до 1000, на водень — від 1 до 1000, на аміак — від 1 до 500, а на вищезазначені газові суміші — при концентраціях понад 1000 частин на мільйон. Водночас пристрій не розрізняє, яку саме з речовин він зафіксував. Будь-яке виявлення інтерпретується як зниження якості повітря, що є підставою для подальших дій у системі контролю.

За своїм типом це електрохімічний сенсор, який працює при напрузі живлення +5 вольт та споживає струм у межах від 25 до 35 міліампер. Він має аналоговий вихід, що дозволяє інтегрувати його у прості автоматизовані системи. Незважаючи на те, що пристрій не забезпечує ідентифікацію конкретної речовини, його можна ефективно використовувати як детектор небезпечних газів. Його застосування дозволяє автоматизувати процес виявлення потенційно шкідливих компонентів у повітрі, сигналізувати про їхню наявність або ініціювати дії для їх усунення. Завдяки низькому енергоспоживанню цей датчик підходить і для автономних систем, де важлива енергоефективність.

Ще одним сучасним рішенням у сфері контролю якості повітря є датчик AGS02MA, який зображено на рисунку 3.7. Це високопродуктивний TVOC-сенсор, побудований на базі спеціалізованого інтегрального чіпа ASIC. Він використовує передову технологію для аналізу газових домішок, забезпечуючи надійну роботу, чутливість та ефективність при низькому споживанні енергії.



Рисунок 3.7 – Датчик якості повітря AGS02MA

Цей датчик здатен виявляти наявність етанолу, аміаку, сірководню, парів бензолу, а також диму. Робоча напруга сенсора знаходиться в діапазоні від 3,3 до 5,5 вольт постійного струму, при цьому споживання струму становить приблизно 28 міліампер з допустимим відхиленням у межах п'яти одиниць. Період між вибірками даних дорівнює не менше двох секунд, а час попереднього прогріву становить понад 120 секунд. Діапазон робочих температур — від нуля до п'ятдесяти градусів Цельсія, а допустима вологість повітря — від нуля до дев'яноста п'яти відсотків. Очікуваний термін служби сенсора перевищує п'ять років при температурі 25 градусів і в умовах чистого повітря. Він використовує інтерфейс I2C у веденому режимі з максимальною частотою до 30 кілогерц. Це напівпровідниковий сенсор із діапазоном вимірювання до 99 999 частин на мільярд, типова точність якого складає 25 відсотків при температурі 25 градусів і вологості 50 відсотків.

Оптимальні сенсори для контролю якості повітря для реалізації автоматизованої системи контролю якості повітря у автомобілі представницького класу представимо у таблиці 3.1

Таблиця 3.1 – Оптимальні сенсори для контролю якості повітря

Параметр	Оптимальний сенсор	Тип сенсора
Температура та вологість	DHT21 / AM2301A	Цифровий комбінований
Пил	GP2Y1010AU0F	Аналоговий оптичний
CO ₂ та VOC	CCS811 + HDC1080	Комбінований цифровий
TVOC і CO ₂ (альтернативно)	MICS-5524	Електрохімічний
VOC, дим, гази	AGS02MA	Напівпровідниковий
TVOC та гази	AGS02MA	Напівпровідниковий з I2C

Зв’язок обраних сенсорів з контролером RP2040 схемотехнічно представлено на рис. 3.8.

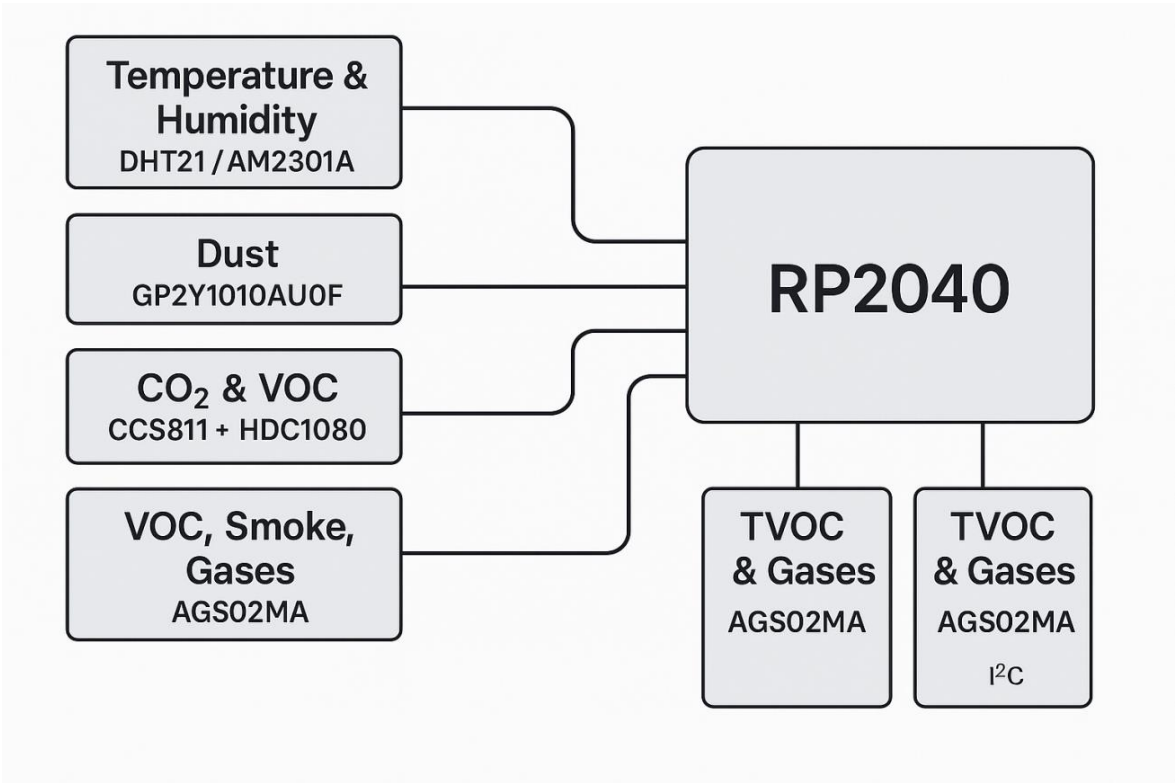


Рисунок 3.8 – Зв’язок сенсорів з контролером RP2040

На схемі(рис. 3.8) зображено оптимальні сенсори для контролю параметрів повітря в салоні автомобіля представницького класу, підключені до

контролера RP2040: температури та вологості (DHT21/AM2301A), пилу (GP2Y1010AU0F), CO₂ і VOC (CCS811 + HDC1080), а також газів і запахів (AGS02MA).

Система призначена для моніторингу якості повітря [13-15], включаючи температуру, вологість, рівень пилу, концентрації вуглекислого газу (CO₂), летких органічних сполук (VOC), диму та інших газів.

Передача сигналу від сенсорів до мікроконтролера здійснюється за допомогою як цифрових, так і аналогових інтерфейсів. Кожен сенсор має свій специфічний тип вихідного сигналу, який обробляється відповідними портами вводу/виводу мікроконтролера RP2040.

Сенсори температури та вологості DHT21 або AM2301A використовують однопровідний цифровий інтерфейс. Після подачі стартової команди з боку контролера сенсор ініціює серію цифрових імпульсів, які кодують значення температури і вологості в серійному форматі. Контролер RP2040 аналізує ці імпульси шляхом вимірювання ширини кожного з них, інтерпретуючи бітову послідовність для отримання точного значення параметрів.

Датчик пилу GP2Y1010AU0F працює на основі принципу розсіювання інфрачервоного випромінювання. Він генерує аналоговий сигнал, пропорційний кількості часток пилу у повітрі. Цей аналоговий вихід зчитується за допомогою вбудованого аналогово-цифрового перетворювача (ADC) мікроконтролера RP2040, який забезпечує перетворення напруги у цифрове значення.

Комбінація сенсорів CCS811 і HDC1080 використовується для отримання даних про рівень CO₂ та летких органічних сполук, а також для компенсації вимірювань за температурою та вологістю. Обидва сенсори обмінюються даними з мікроконтролером через шину I²C, яка дозволяє підключити кілька пристроїв до двох загальних ліній — SDA (Serial Data) і SCL (Serial Clock). Контролер ініціює обмін, відправляючи адресну команду та запит на читання відповідних регістрів, які містять виміряні значення.

Сенсори AGS02MA, що використовуються для вимірювання TVOC, диму та інших газів, можуть працювати як в аналоговому режимі, так і через

інтерфейс I²C (як показано на схемі). У випадку аналогового підключення дані передаються у вигляді напруги, що відображає концентрацію газів. У цифровому режимі сенсор передає значення безпосередньо через I²C, що забезпечує високу точність та зменшення електричних перешкод у лінії передачі.

Підключення кількох ідентичних сенсорів AGS02MA до однієї шини I²C [15-18] можливе завдяки індивідуальним адресам пристроїв або використанню окремих портів контролера для кожного сенсора. Це дозволяє системі зчитувати інформацію з кількох точок контролю у просторі, створюючи більш детальну картину стану повітря.

Таким чином, мікроконтролер RP2040 виступає як центральний вузол обробки інформації, що забезпечує синхронне опитування сенсорів, аналіз вхідних сигналів і подальше використання отриманих даних в системах управління або відображення. Завдяки широкій підтримці інтерфейсів вводу/виводу RP2040 є ефективною платформою для побудови систем екологічного моніторингу.

3.3 Висновок до розділу 3

У даному розділі було проведено комплексний аналіз сучасних сенсорів і модулів, призначених для вимірювання параметрів якості повітря в автоматизованих системах керування мікрокліматом. Розглянуто ключові типи датчиків для вимірювання температури, вологості, концентрації пилу, вуглекислого газу, летких органічних сполук та інших небезпечних газів. Особливу увагу приділено точності, діапазону роботи, енергоспоживанню, типу інтерфейсу та сумісності з мікроконтролерними платформами. У результаті огляду були відібрані найбільш оптимальні сенсори, які відповідають технічним вимогам для інтеграції у систему контролю якості повітря. Зокрема, комбіновані цифрові сенсори типу DHT22, AM2320 та SHT-31D рекомендовані для вимірювання температури та вологості; GP2Y1010AU0F —

для виявлення часток пилю; CCS811 та AGS02MA — для виявлення CO₂, TVOC та шкідливих газів.

Зроблені висновки дозволяють на наступному етапі перейти до формування апаратної структури автоматизованої системи контролю, забезпечуючи при цьому точність, енергоефективність та надійність роботи системи в реальних умовах експлуатації. Обґрунтований вибір компонентів також сприяє зниженню витрат на розробку та підвищенню масштабованості проекту. Подальші дослідження будуть спрямовані на оптимізацію взаємодії сенсорів з обчислювальним блоком і реалізацію ефективних алгоритмів обробки даних.

4 ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ ПОВІТРЯ У АВТОМОБІЛЯХ ПРЕДСТАВНИЦЬКОГО КЛАСУ

4.1 Алгоритм роботи системи контролю якості повітря

Система починає роботу автоматично після подачі живлення або запуску автомобіля. Після цього відбувається ініціалізація всіх підключених сенсорів і модулів зв'язку. У режимі реального часу система постійно зчитує дані з усіх сенсорів, що відповідають за контроль якості повітря в салоні.

Датчик температури, наприклад SHT-31D, вимірює температуру всередині автомобіля. Це важливо як для створення комфортних умов, так і для корекції показників інших сенсорів. Датчик вологості, який може бути вбудований у той самий модуль або використовуватися окремо (наприклад, AM2320), визначає рівень вологості у повітрі. Це впливає на загальне самопочуття пасажирів, запотівання вікон і можливу втому.

Датчик вуглекислого газу, такий як CCS811 або SCD30, стежить за рівнем CO₂. Його підвищення може свідчити про погіршення вентиляції, що здатне спричинити сонливість водія. Модулі для вимірювання дрібнодисперсного пилу, наприклад GP2Y1010AU0F, визначають концентрацію частинок PM_{2.5} або PM₁₀, що є шкідливими для органів дихання. Сенсори летких органічних сполук, такі як AGS02MA або MICS-5524, виявляють у повітрі формальдегід, бензол, пари лакофарбових матеріалів та інші шкідливі сполуки.

Рівень озону визначається за допомогою електрохімічного датчика, оскільки у високих концентраціях озон є небезпечним для здоров'я. Датчик чадного газу контролює наявність цього токсичного газу, який може проникати в салон через несправності в системі вихлопу. Запахи оцінюються непрямым способом через VOC-сенсори або систему «електронного носа», що складається з кількох сенсорів і штучного інтелекту.

Після зчитування значень система порівнює їх із нормативними межами. У разі виявлення відхилень визначається напрямок корекції для кожного параметра. Якщо деякі показники значно перевищують допустимі межі, наприклад, концентрація CO₂ перевищує 1500 ppm або CO — 10 ppm, система активує аварійний режим. У такому випадку вмикається вентиляція, сирена або подається попередження водієві.

Блок керування, що працює на основі мікроконтролера, аналізує отримані дані та приймає рішення щодо ввімкнення відповідних виконавчих пристроїв. Якщо виявлено підвищення рівня CO₂, VOC або частинок пилу, активується вентиляція. У разі зміни температури або вологості вмикається кондиціонер або обігрівач. При підвищенні рівня VOC або пилу може бути активовано іонізатор. У разі погіршення повітря за запахом вмикається ароматизатор.

Після цього система подає сигнали на виконавчі пристрої, які змінюють параметри повітря в салоні. Вони можуть охолоджувати, нагрівати, фільтрувати, вентилювати або ароматизувати повітря залежно від потреб. Після впливу система знову зчитує дані з сенсорів, аналізує нові значення, і цикл повторюється, забезпечуючи безперервний контроль.

Алгоритм роботи АСКЯПОП представлено на рисунку 4.1.

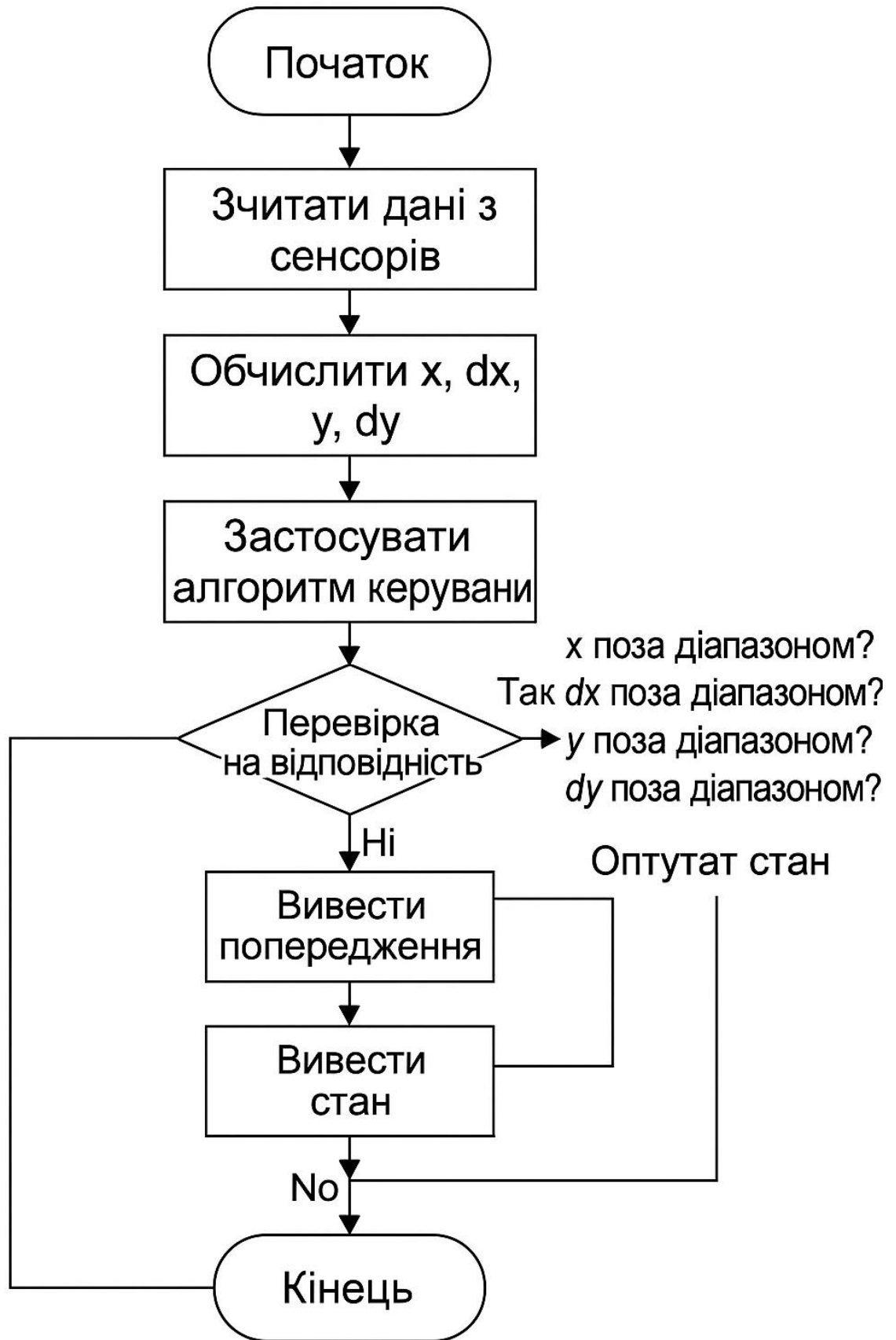


Рисунок 4.1 – Алгоритм роботи АСКЯПОП

4.2 Програмна реалізація системи контролю якості повітря

Програмна частина системи контролю якості повітря в автомобілі є центральним елементом, що забезпечує зв'язок між сенсорами, логікою обробки даних та виконавчими пристроями. Для реалізації програмної моделі було обрано мову програмування Python (лістинг програми представлено у додатку Б), яка завдяки своїй простоті, потужним бібліотекам та широкій підтримці роботи з мікроконтролерами та датчиками (через бібліотеки `smbus`, `pyserial`, `GPIO` тощо) є зручною для прототипування та тестування систем реального часу.

Програма реалізована як послідовний цикл, який зчитує дані з сенсорів, перетворює ці значення у фізичні величини (температура, вологість, `ppm` тощо), порівнює їх з нормативними межами та формує логіку керування кліматом у салоні автомобіля.

Етапи роботи програми. Ініціалізація параметрів норми. На початку програми задаються допустимі діапазони для всіх параметрів якості повітря: температура: 20–24°C; вологість: 40–60%; CO₂: 400–1000 `ppm`; PM2.5: до 12 мкг/м³; VOC: до 300 `ppb`; Озон: до 100 `ppb`; СО (чадний газ): до 10 `ppm`.

Ці значення базуються на рекомендаціях ВООЗ та санітарних нормах для комфортного та безпечного перебування в автомобільному просторі.

Отримання сирих значень від сенсорів. Імітуються або приймаються дані у вигляді: напруги з аналогових сенсорів (наприклад, CO₂, СО, озон); опору (МОХ-сенсори VOC); цифрових кодів з I2C/1-Wire інтерфейсів (температура/вологість).

Перетворення сирих даних у фізичні одиниці. Для кожного параметра застосовується відповідне рівняння, яке було наведено в попередніх розділах:

- для температури — шкалування сигналу з АЦП;

- для CO₂ — розрахунок через напругу інфрачервоного датчика (NDIR);
- для VOC — перетворення опору в умовну концентрацію;
- для пилу — фотометрична формула на основі інтенсивності розсіяного світла;
- для CO, озону — масштабування аналогової напруги.

Це дозволяє отримати точні значення, придатні для логічного аналізу. Для кожного значення обчислюється, чи входить воно у допустимий діапазон. Якщо так — програма повідомляє, що параметр у межах норми. У випадку відхилення повідомляється характер проблеми: «Нижче норми» — система, наприклад, активує обігрівач чи іонізатор; «Вище норми» — активується вентиляція, рециркуляція або подається сигнал водію.

На кожному циклі роботи система виводить поточне значення параметра та його статус: CO₂: Вище норми (значення: 1200 ppm); VOC: У межах норми (значення: 250 ppb).

Ці результати можуть бути передані на дисплей, у мобільний застосунок або використовуватись в логіці керування. У повноцінному рішенні програмний код буде реалізований на базі мікроконтролера (наприклад, ESP32 або Raspberry Pi), а зчитування значень — через драйвери реальних сенсорів з підключенням по I2C, SPI або аналоговим входам. Система також може:

- записувати історію змін у базу даних;
- працювати з алгоритмами машинного навчання для розпізнавання запахів;
- взаємодіяти з CAN-шиною автомобіля;
- здійснювати віддалене керування через Wi-Fi або Bluetooth.

Таким чином, програмна частина є критично важливою для забезпечення адаптивного й ефективного функціонування системи контролю якості повітря. Вона об'єднує функції аналізу, порівняння, прийняття рішень і керування пристроями, що робить її центральною логічною ланкою всієї автоматизованої системи.

4.3 Висновки до розділу 4

У межах програмної реалізації автоматизованої системи контролю якості повітря було розроблено алгоритм, що забезпечує повноцінну взаємодію між сенсорними елементами, логікою обробки даних та виконавчими механізмами. Було обрано мову програмування Python, яка забезпечує високу гнучкість, зручність обробки даних та сумісність з широким спектром сенсорних модулів і мікроконтролерів.

Розроблений програмний модуль виконує кілька ключових функцій:

- зчитує сирі значення з сенсорів (температури, вологості, CO₂, PM2.5, VOC, CO, озону);
- виконує математичне перетворення отриманих сигналів у фізичні одиниці вимірювання;
- порівнює отримані значення з нормативними діапазонами, рекомендованими для комфортного та безпечного перебування в салоні автомобіля;
- визначає характер відхилень та приймає рішення про необхідність активації тих чи інших виконавчих механізмів (вентиляція, кондиціювання, іонізація тощо);
- формує звіт про стан повітряного середовища.

Особливу увагу приділено реалізації зворотного зв'язку та автоматичного коригування параметрів відповідно до заданих меж. Завдяки цьому забезпечується стабільна робота системи навіть в умовах змін навколишнього середовища, кількості пасажирів, інтенсивності руху тощо.

Отримані результати демонструють ефективність програмного підходу до контролю мікроклімату в автомобілі та слугують основою для подальшої реалізації повноцінної інтегрованої системи з можливістю автономної роботи, виводу на дисплей або керування зі смартфона.

ВИСНОВКИ

У межах виконання бакалаврської кваліфікаційної роботи було розроблено та теоретично обґрунтовано концепцію автоматизованої системи контролю якості повітря для використання в автомобілях представницького класу. Розв’язання проблеми підтримання оптимального мікроклімату в салоні сучасного автомобіля є актуальним завданням, що має безпосередній вплив на безпеку, комфорт і здоров’я пасажирів.

У процесі роботи було виконано аналіз параметрів якості повітря, які необхідно контролювати у замкненому просторі автомобіля. До таких параметрів належать температура, вологість, рівень вуглекислого газу, кількість твердих частинок PM2.5, концентрація летких органічних сполук, озон, чадний газ та запахи.

Був обґрунтований вибір сенсорів, які здатні точно вимірювати ці параметри в режимі реального часу. Також створено структурну схему системи, яка демонструє, як взаємодіють між собою апаратні й програмні компоненти та як відбувається зворотний зв’язок у системі.

Розроблено алгоритм роботи системи, який включає безперервне спостереження за параметрами повітря, їх порівняння з нормативними значеннями, прийняття рішень на основі результатів аналізу та керування відповідними пристроями.

Також був створений програмний модуль мовою Python, який демонструє повний цикл роботи системи — від зчитування даних із сенсорів до логічного аналізу та виведення результатів.

Окрім цього, запропоновані шляхи адаптації системи до реальних умов. Зокрема, розглянуто можливість використання її на базі мікроконтролера, інтеграції з кліматичними системами автомобіля, а також відображення інформації на екрані або у мобільному застосунку.

Отримані результати підтверджують доцільність застосування автоматизованих технологій для контролю якості повітря в автомобільному середовищі. Система здатна не лише підвищити комфорт, а й сприяти зменшенню впливу шкідливих чинників на водія та пасажирів.

Розроблена концепція може бути вдосконалена та масштабована для інших типів транспортних засобів або приміщень, а також інтегрована в інтелектуальні системи керування.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Міжнародна система класифікації професійних офісних центрів [Електронний ресурс] - Режим доступу до ресурсу: <https://web.archive.org/web/20151019015405>
2. Міністерство охорони здоров'я України. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень ДСН 3.3.6.042-99. Постанова №42 від 01.12.99 м. Київ. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/>
3. В. В. Дячок, Я. М. Захарко, М. І. Гавришко. Дослідження якості та методів очищення повітря в сучасних офісних приміщеннях. Lviv Polytechnic National University Institutional Repository. – 2012. – С. 104–107.
4. Леві Л.І., Петровський О. М. Моделювання процесу роботи іонізаторного ультрафіолетового озонатора-знезаражувача повітря. Системи управління, навігації та зв'язку. Випуск 2 (34). 2015. С. 42-45.
5. Негативний вплив електромагнітних полів на організм людини [Електронний ресурс] // Головне управління держспоживслужби у львівській області. Самбірське управління. Режим доступу до ресурсу: <https://sambircity.gov.ua/2021/04/13/negativnij-vpliv-elektromagnitnix-poliv-na-organizm-lyudini>
6. Zaeem A., Waqas K., Tallal A., Daniyal M. Automated Control System for Indoor Air Quality Management. 2017 International Conference on Energy Conservation and Efficiency (ICECE). P. 85-88. DOI: 10.1109/ECE.2017.8248834.
7. T. Mehmet, G. Hayrettin. Real-Time Monitoring of Indoor Air Quality with Internet of Things-Based E-Nose. Appl. Sci., 9. 2019. P. 1-13. DOI: 10.3390/app9163435.
8. Контроль і керування хіміко-технологічними процесами: У 2 кн. Кн. 2. Керування хіміко-технологічними процесами [Текст] : навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл., які навчаються за напрямом: «Хімічна технологія та інженерія» / М. В. Лукінюк. – К.: НТУУ «КПІ», 2012. – 336 с.

9. Ayat Y., El Moussati A., Mir I. Revolutionizing Air Quality Monitoring: IoT-Enabled E-Noses and Low-Power Devices // IFAC-PapersOnLine. — 2024. — Vol. 57, №1. — P. 1234–1240. DOI: 10.1016/j.ifacol.2024.01.123
10. Johnson T., Woodward K. Enviro-IoT: Calibrating Low-Cost Environmental Sensors in Urban Settings // arXiv preprint. — 2025. — arXiv:2502.07596. DOI: 10.48550/arXiv.2502.07596
11. Кираківський І. В. Автоматизована система контролю якості повітря у автомобілях представницького класу [Електронний ресурс] / І. В. Кираківський, О. В. Бісікало, І. А. Дудатьєв // LIV Всеукраїнська науково-технічна конференція факультету інформаційних електронних систем . - Електрон. текст. дані. - 2025. - Режим доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fksa/all-fksa-2025/paper/view/24305>
12. Concas F., Mineraud J., Lagerspetz E., et al. Low-Cost Outdoor Air Quality Monitoring and Sensor Calibration: A Survey and Critical Analysis // arXiv preprint. — 2019. DOI: 10.48550
13. Zaeem A., Waqas K., Tallal A., Daniyal M. Automated Control System for Indoor Air Quality Management. Proceedings of the 2017 International Conference on Energy Conservation and Efficiency (ICECE). 2017. P. 85–88.
14. Mehmet T., Hayrettin G. Real-Time Monitoring of Indoor Air Quality with Internet of Things-Based E-Nose. Applied Sciences. 2019. Vol. 9. P. 1–13.
15. Серода М. О. Сенсорна IoT-мережа для моніторингу якості повітря. Матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих вчених, аспірантів і студентів «Інформаційні технології та інженерія». 2023. С. 123–130.
16. Мигаль В. Д., Шевченко І. О., Шуляк М. Л. Системи моніторингу ефективної експлуатації автомобілів: Навчальний посібник. Харків: ДБТУ. 2023. 288 с.

17. Valenzuela I. C., Tolentino L. K. S., Serfa Juan R. O. Development of Smart Air Quality Monitoring and Control System in Vehicles. *Journal of Cleaner Production*. 2021. Vol. 284. P. 124673.

Додатки

Вінницький національний технічний університет

(повне найменування вищого навчального закладу)

Кафедра автоматизації та інтелектуальних інформаційних технологій

(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри АІТ

д.т.н., професор Бісікало О. В.

(підпис)

«___» _____ 2025 р.

ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ

на бакалаврську кваліфікаційну роботу

«Автоматизована система контролю якості повітря у автомобілях

представницького класу»

08-31.БКР.008.02.000 ТЗ

Керівник бакалаврської кваліфікаційної роботи

д.т.н., проф. Бісікало О. В.

«___» _____ 2025 р.

Розробив студент гр. АКІТР-23мс

Кираківський І. В.

«___» _____ 2025 р.

Вінниця ВНТУ 2025

Додаток А
(обов'язковий)
Технічне завдання на бакалаврську кваліфікаційну роботу

1 Підстава для проведення робіт

Підставою для виконання бакалаврської кваліфікаційної роботи на тему: «Автоматизована система контролю якості повітря у автомобілях представницького класу» є наказ № 97 від 20.03.2025 р.

Термін виконання робіт:

початок 30. 09.2024 р.

кінець 10. 06.2025 р.

2 Мета та вихідні дані для проведення робіт

Метою бакалаврської кваліфікаційної роботи є підвищення ефективності контролю мікроклімату в автомобілях представницького класу шляхом розробки автоматизованої системи моніторингу якості повітря на базі мікроконтролера.

Вихідними даними для проведення робіт є індивідуальне завдання на бакалаврську кваліфікаційну роботу від 20.03.2025 р.

3 Етапи виконання робіт

Виконавцем всіх перерахованих в даному розділі етапів є: студент групи **АКІТР-23мс Кираківський Ілля Віталійович** факультету інтелектуальних інформаційних технологій та автоматизації Вінницького національного технічного університету, а замовником є кафедра автоматизації та інтелектуальних інформаційних технологій.

№ Етапу	Зміст етапу	Строки виконання
Е1	Аналіз сучасного стану проблеми якості повітря у автомобілях представницького класу	03.09 – 26.02
Е2	Математико-фізичний аналіз методів вимірювання параметрів якості повітря у автомобілях представницького класу	01.03 – 19.03
Е3	Структурно-апаратне забезпечення автоматизованої системи контролю якості повітря у автомобілі представницького класу	22.03 – 09.04
Е4	Програмна реалізація системи контролю якості повітря у автомобілях представницького класу	12.04 – 28.05

4 Призначення і галузь застосування

Автоматизована система контролю якості повітря призначена для моніторингу та регулювання параметрів мікроклімату в салонах автомобілів представницького класу з метою забезпечення комфорту, безпеки та здоров'я пасажирів. Система застосовується в автомобілебудуванні преміум-сегменту, транспорті для дипломатів, керівників і VIP-перевезень.

5 Технічні дані

- 5.1 Тип системи – автоматизована система контролю якості повітря;
- 5.2 Метод контролю – сенсорний (температурний, газовий, оптичний);
- 5.3 Об'єкт контролю – повітряне середовище салону автомобіля представницького класу.

6 Джерела розробки

1. SAE J3290:2025. Selection and Use of Technologies and Methods for Measuring Cabin Air Quality. Warrendale: SAE International, 2025
2. ISO 12219-1:2021. Interior air of road vehicles — Part 1: Whole vehicle test chamber — Specification and method for the determination of volatile organic compounds in cabin interiors. Geneva: International Organization for Standardization, 2021
3. ISO 12219-9:2019. Interior air of road vehicles — Part 9: Determination of volatile organic compounds in cabin air — Bag method. Geneva: International Organization for Standardization, 2019
4. ДСТУ 7013:2009. Автотранспортні засоби. Вимоги до мікроклімату в салоні. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2009.
5. Vehicle Interior Air Quality (VIAQ) Standards. SGS. URL: <https://www.sgs.com/en-ua/services/vehicle-interior-air-quality> (дата звернення: 07.06.2025)
6. Методичні вказівки до виконання бакалаврських кваліфікаційних робіт (проектів) для студентів спеціальностей: 126 «Інформаційні системи та технології», 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» [Електронний ресурс] / уклад. : К. В. Овчинников, О. В. Бісікало. – Вінниця : ВНТУ, 2023. – 50 с.

Здобувач ст. гр. АКІТР-23мс _____ Кираківський І. В.

Додаток Б
(обов'язковий)

ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА

**АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ ПОВІТРЯ У
АВТОМОБІЛЯХ ПРЕДСТАВНИЦЬКОГО КЛАСУ**

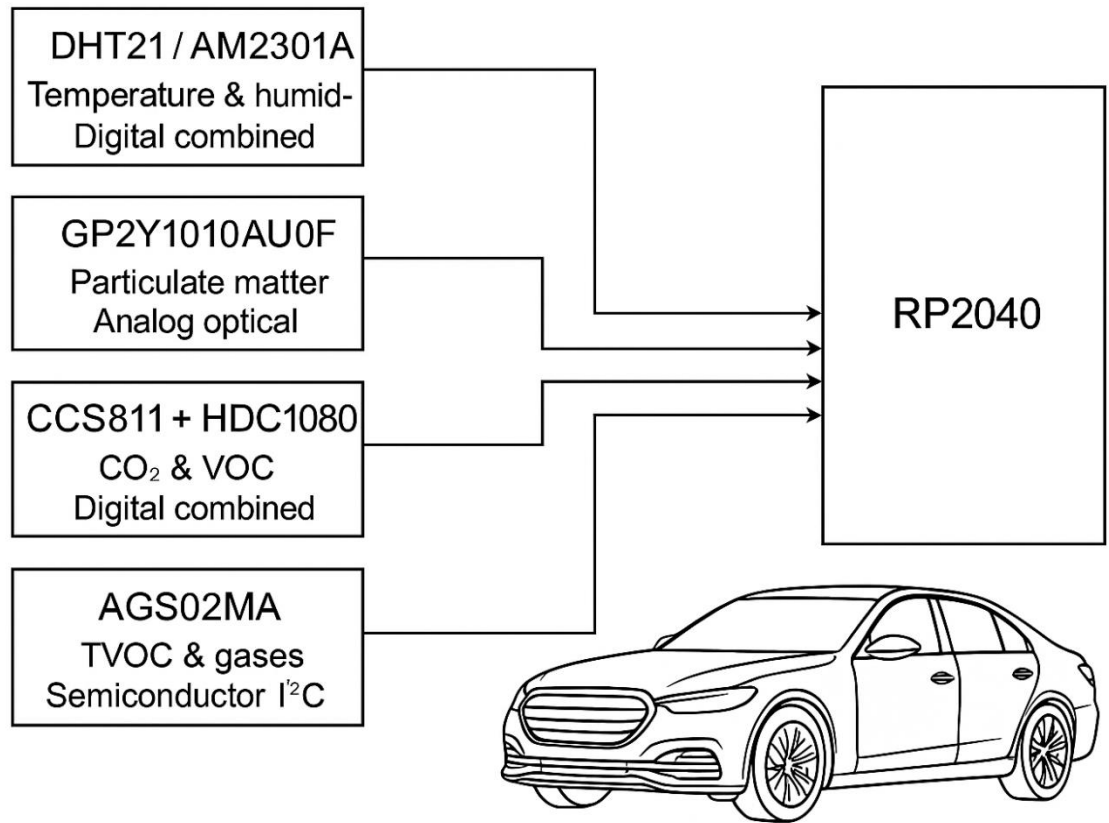


Рисунок Б.1 – Сенсорна організація системи

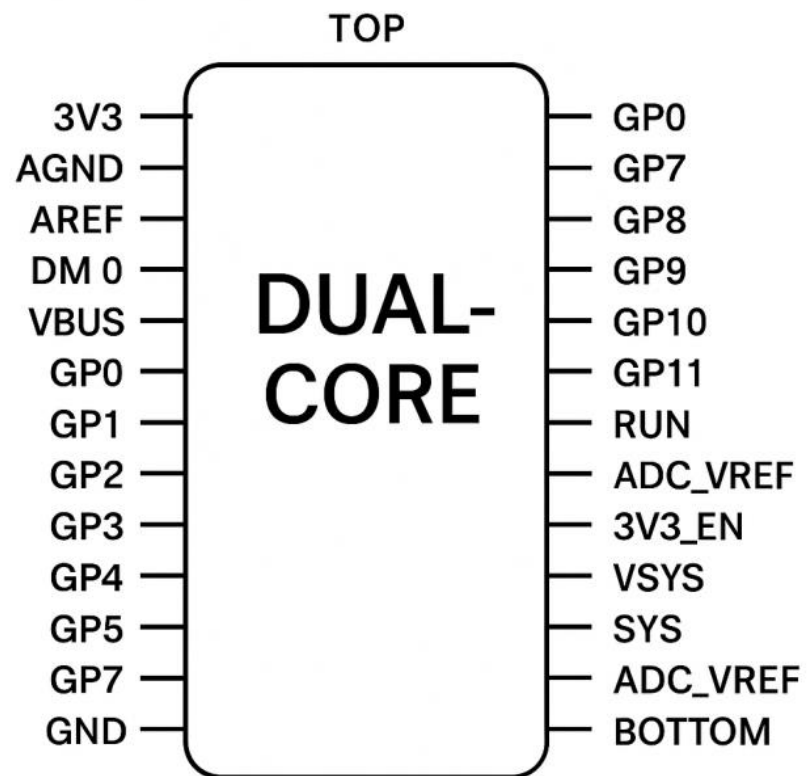


Рисунок Б.2 – Розпіновка мікроконтролера RP2040

RP2040

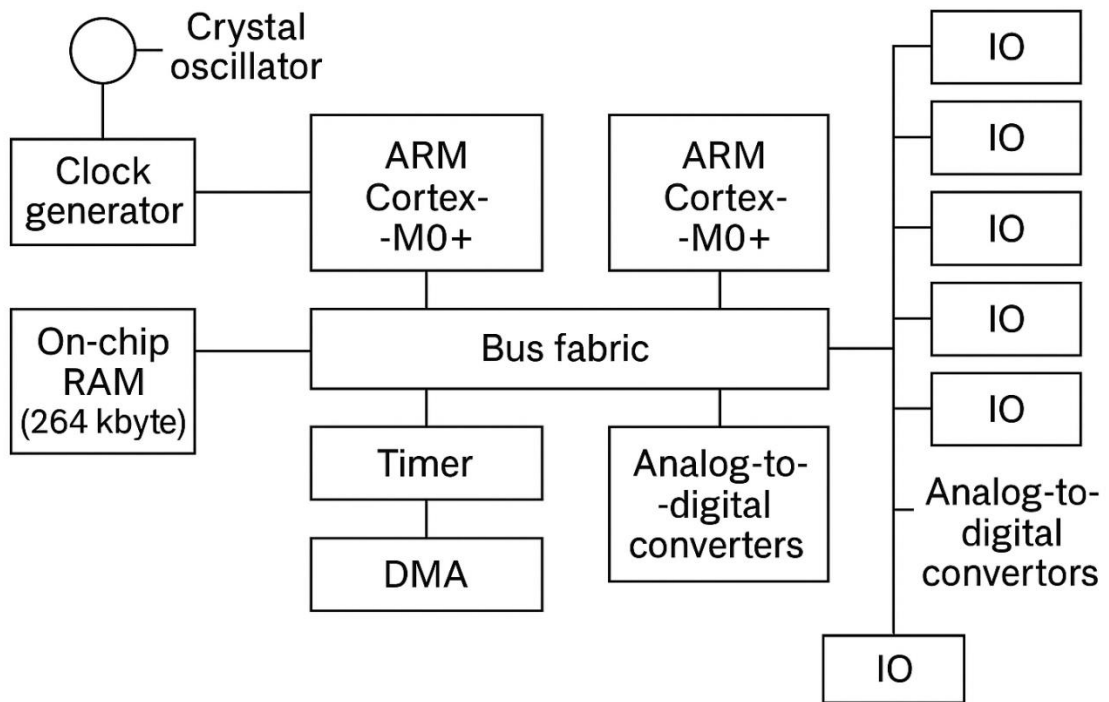


Рисунок Б.3 – Будова мікроконтролера RP2040

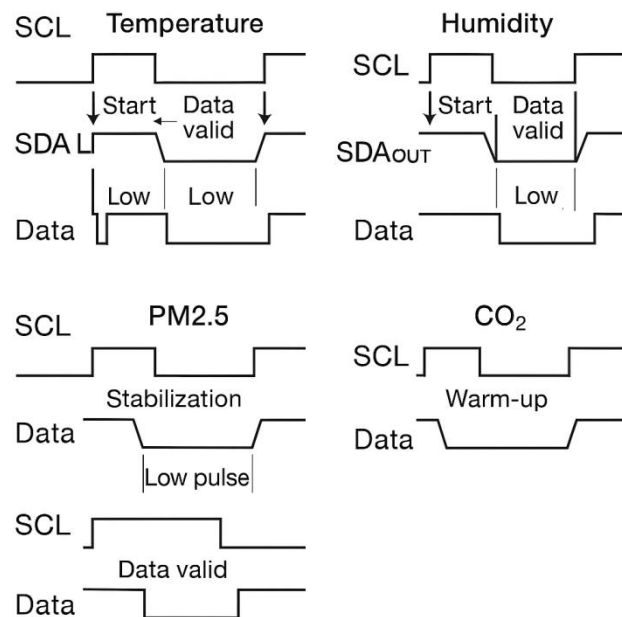


Рисунок Б.4 – Часові діаграми роботи сенсорів системи

Додаток В
(обов'язковий)
Лістинг програми

Програмна реалізація контролю якості повітря в автомобілі представницького класу з урахуванням перетворення значень

Граничні значення параметрів якості повітря (норми)

```
NORMALS = {
    "temperature": (20, 24),      # °C
    "humidity": (40, 60),        # %
    "co2": (400, 1000),          # ppm
    "pm25": (0, 12),             # мкг/м³
    "voc": (0, 300),             # ppb
    "ozone": (0, 100),           # ppb
    "co": (0, 10),              # ppm
}
```

Імітація сирих даних з сенсорів (напруга, цифрове значення тощо)

```
sensor_raw = {
    "temperature_raw": 520,      # наприклад, значення АЦП
    "humidity_raw": 380,         # умовна шкала 0-1023
    "co2_voltage": 1.5,          # напруга з NDIR датчика
    "pm25_voltage": 0.7,         # напруга з оптичного датчика пилу
    "voc_resistance": 30000,      # опір MOX-сенсора в Ом
    "ozone_voltage": 0.1,        # напруга з електрохімічного сенсора
    "co_voltage": 0.35           # напруга з електрохімічного сенсора
}
```

Формули перетворення сирих значень у фізичні величини

def convert_temperature(raw):

return (raw / 1023) * 125 - 40 # приклад для AM2320

def convert_humidity(raw):

return (raw / 1023) * 100 # умовна шкала 0-100%

def convert_co2(voltage):

return voltage * 1000 / 1.65 * 5 # просте масштабування для CO2 в ppm

def convert_pm25(voltage):

return (voltage - 0.1) * 1000 # умовна формула: 0.1В = 0, кожні 1В = 1000 мкг/м³

```

def convert_voc(resistance):
    return (resistance / 1000)    # умовна формула в ppb

def convert_ozone(voltage):
    return voltage * 200          # умовна градація

def convert_co(voltage):
    return voltage * 20           # умовна градація

# Перетворення сирих значень
sensor_data = {
    "temperature": round(convert_temperature(sensor_raw["temperature_raw"]), 2),
    "humidity": round(convert_humidity(sensor_raw["humidity_raw"]), 2),
    "co2": round(convert_co2(sensor_raw["co2_voltage"]), 2),
    "pm25": round(convert_pm25(sensor_raw["pm25_voltage"]), 2),
    "voc": round(convert_voc(sensor_raw["voc_resistance"]), 2),
    "ozone": round(convert_ozone(sensor_raw["ozone_voltage"]), 2),
    "co": round(convert_co(sensor_raw["co_voltage"]), 2)
}

# Функція для перевірки значень
def check_air_quality(data):
    results = {}
    for param, value in data.items():
        min_val, max_val = NORMALS.get(param, (None, None))
        if min_val is None:
            results[param] = "Немає норми"
        elif value < min_val:
            results[param] = f"Нижче норми (мін. {min_val})"
        elif value > max_val:
            results[param] = f"Вище норми (макс. {max_val})"
        else:
            results[param] = "У межах норми"
    return results

# Перевірка якості повітря
report = check_air_quality(sensor_data)

# Виведення звіту
for parameter, status in report.items():
    print(f'{parameter.upper()}: {status} (значення: {sensor_data[parameter]})')

```

Додаток Г
(обов'язковий)

ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Назва роботи: Автоматизована система контролю якості повітря у автомобілях представницького класу

Тип роботи: бакалаврська кваліфікаційна робота

(бакалаврська кваліфікаційна робота / магістерська кваліфікаційна робота)

Підрозділ АПТ, ФПТА, АКІТР-23мс

(кафедра, факультет, навчальна група)

Коефіцієнт подібності текстових запозичень, виявлених у роботі системою StrikePlagiarism 16 %

Висновок щодо перевірки кваліфікаційної роботи (відмітити потрібне)

- ☒ Запозичення, виявлені у роботі, є законними і не містять ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації. Роботу прийняти до захисту
- ☐ У роботі не виявлено ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації, але надмірна кількість текстових запозичень та/або наявність типових розрахунків не дозволяють прийняти рішення про оригінальність та самостійність її виконання. Роботу направити на доопрацювання.
- ☐ У роботі виявлено ознаки плагіату та/або текстових маніпуляцій як спроб укриття плагіату, фабрикації, фальсифікації, що суперечить вимогам законодавства та нормам академічної доброчесності. Робота до захисту не приймається.

Експертна комісія:

(прізвище, ініціали, посада)

(прізвище, ініціали, посада)

(підпис)

(підпис)

Особа, відповідальна за перевірку

(підпис)

Овчинников К. В.
(прізвище, ініціали)

З висновком експертної комісії ознайомлений(-на)

Керівник

(підпис)

Бісікало О. В.

(прізвище, ініціали, посада)

Здобувач

(підпис)

Кираківський І. В.

(прізвище, ініціали)