

**МІНІСТЕРСТВО ВНУТРІШНІХ СПРАВ УКРАЇНИ
ЛЬВІВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ВНУТРІШНІХ СПРАВ
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ УПРАВЛІННЯ, ПСИХОЛОГІЇ
ТА БЕЗПЕКИ**

Кафедра інформаційних технологій

**РОЗРОБЛЕННЯ АНАЛІЗАТОРА ШКІДЛИВИХ ГАЗІВ ДЛЯ
ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БЕЗПЕКИ ПРАЦІВНИКІВ ПОЛІЦІЇ ПРИ
РОЗСЛІДУВАННІ ЗЛОЧИНІВ ПОВ'ЯЗАНИХ З ХІМІЧНИМИ
РЕЧОВИНАМИ**

Кваліфікаційна робота
здобувача вищої освіти
4 курсу денної форми навчання
Богдан МАСНИК

Науковий керівник:
доцент, кандидат технічних наук
Ігор ФАРМАГА

Рецензент:

Кваліфікаційна робота допущена до захисту
« ___ » _____ 2026 р., протокол № _____

Завідувач кафедри інформаційних технологій
_____ **Олег ЗАЧЕК**
(підпис)

Львів
2026

ЗМІСТ

ВСТУП.....	3
РОЗДІЛ 1. СТАН ПРОБЛЕМНОЇ ОБЛАСТІ.....	9
1.1. Одиниці вимірювання концентрації газів.....	9
1.2. Огляд сучасних технічних засобів ідентифікації шкідливих газів.....	14
РОЗДІЛ 2. ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПРОЦЕСУ РОЗРОБКИ ЦИФРОВОГО ДЕТЕКТОРА ШКІДЛИВИХ ГАЗІВ.....	24
2.1. Функціональні можливості САПР Proteus VSM при розробці цифрових пристроїв.....	24
2.2. Програмний інструментарій WinAVR у проектуванні AVR-систем.....	26
РОЗДІЛ 3. АПАРАТНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЦИФРОВОГО ДЕТЕКТОРА ШКІДЛИВИХ ГАЗІВ.....	29
3.1. Технічні параметри та архітектурні особливості МК ATmega32.....	29
3.2. Огляд датчиків концентрації газів сімейства MQ.....	40
3.3. Параметри та особливості підключення РК-дисплея формату 2004.....	53
3.4. Проектування цифрового детектора шкідливих газів.....	56
РОЗДІЛ 4. АЛГОРИТМІЧНЕ ТА ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЦИФРОВОГО ДЕТЕКТОРА ШКІДЛИВИХ ГАЗІВ.....	59
4.1. Методика калібрування газових датчиків MQ.....	59
4.2. Алгоритм функціонування аналізатора шкідливих газів.....	65
4.3. Програмна реалізація взаємодії з датчиком газів серії MQ.....	71
4.4. Програмне забезпечення для керування рідкокристалічним індикатором LCD2004A.....	72
4.5. Програмне забезпечення центрального алгоритму функціонування аналізатора шкідливих газів.....	73
4.6. Симуляція та верифікація функціонування аналізатора шкідливих газів у середовищі Proteus ISIS.....	74
ВИСНОВКИ.....	80
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ.....	81
ДОДАТКИ.....	83

СПИСОК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ПК – персональна обчислювальна машина (комп'ютер);
МК – однокристальний мікроконтролер;
ЕК – принципова електрична схема;
АЗ – апаратний комплекс (апаратне забезпечення);
ПЗ – програмний комплекс (програмне забезпечення);
LPG (Liquefied Petroleum Gas) – зріджений/скраплений нафтовий газ;
AVR – сімейство 8-бітних мікроконтролерів виробництва корпорації Microchip (раніше Atmel);
RISC (Reduced Instruction Set Computing) – процесорна архітектура зі спрощеною (скороченою) системою команд;
АЦП (ADC) (Analog-to-Digital Converter) – аналого-цифровий перетворювальний модуль;
RAM (ОЗП) (Random-Access Memory) – оперативний запам'ятовуючий пристрій (оперативна пам'ять);
FLASH – тип енергонезалежної флеш-пам'яті для зберігання програмного коду;
EEPROM (Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory) – електрично стираєма перепрограмована постійна пам'ять;
USART (Universal Synchronous-Asynchronous Receiver-Transmitter) – універсальний прийомопередавач синхронно-асинхронного типу;
РКІ/РКД (LCD) (Liquid Crystal Display) — рідкокристалічний індикаторний модуль (монітор/дисплей);
DDRAM (Display Data RAM) – внутрішня пам'ять РК-контролера для збереження кодів відображуваних символів;
СGRAM (Character Generator RAM) — оперативна пам'ять знакогенератора для запису користувацьких символів РК-дисплея;
САПР (CAD) – система автоматизації інженерного проектування;
WinAVR – програмний інструментарій (компілятор та середовище) для розробки софту під архітектуру AVR;
ISR (Interrupt Service Routine) – підпрограма (вектор) обробки апаратних або програмних переривань.

АНОТАЦІЯ

Масник Б., Фармага І. (керівник). Розроблення аналізатора шкідливих газів для забезпечення безпеки працівників поліції при розслідуванні злочинів пов'язаних з хімічними речовинами. Бакалаврська кваліфікаційна робота. – Львівський державний університет внутрішніх справ, Львів, 2026.

У кваліфікаційній роботі представлено проектування та реалізацію портативного аналізатора токсичних речовин, призначеного для захисту особового складу поліції під час проведення слідчих дій у зонах хімічного зараження. Пристрій здійснює безперервний експрес-аналіз повітряного середовища. За умов нормальної екологічної ситуації або в межах гранично допустимих концентрацій (ГДК), система функціонує у штатному режимі, що візуалізується зеленим світловим індикатором. У разі фіксації небезпечного рівня забруднення активується режим оповіщення: спрацьовує звуковий зумер, вмикається червоний світлодіод, а деталізована інформація про загрозу дублюється на рідкокристалічному екрані та передається на монітор послідовного порту. Елементну базу спроектованого пристрою становлять МК AVR ATmega32, мультисенсорна система на основі датчиків газу/диму MQ-серії та комбінованого сенсора DHT22 (температура і вологість). Виведення даних здійснюється на дисплей типу LCD 2004 з інтегрованим чіпом керування HD44780. Засобами САПР Proteus VSM спроектовано базову електричну схему та виконано комп'ютерне моделювання цифрового аналізатора повітря. Для забезпечення логіки роботи мікроконтролера AVR ATmega32 створено відповідний алгоритм та написано прошивку на мові С (середовище WinAVR). Аналіз динаміки роботи та тестування пристрою в умовах, наближених до реальних, проведено в емуляторі Proteus ISIS.

Ключові слова: моніторинг повітряного середовища, токсичні гази, аналізатор шкідливих газів, датчики серії MQ, мікропроцесорна техніка, архітектура AVR, МК ATmega32, система комп'ютерного проектування та моделювання Proteus VSM, крос-компілятор WinAVR, програмування вбудованих систем на С.

ABSTRACT

Masnyk B., Farmaha I. (supervisor). Development of a harmful gas analyzer to ensure the safety of police officers when investigating crimes involving chemicals. Bachelor's thesis. – Lviv State University of Internal Affairs, Lviv, 2026.

The qualification work presents the design and implementation of a portable toxic substance analyzer designed to protect police personnel during investigative actions in areas of chemical contamination. The device performs continuous express analysis of the air environment. Under normal environmental conditions or within the maximum permissible concentrations (MPC), the system operates in normal mode, which is visualized by a green light indicator. In the event of a dangerous level of contamination, the alert mode is activated: an audible buzzer sounds, a red LED turns on, and detailed information about the threat is duplicated on the liquid crystal screen and transmitted to the serial port monitor.

The element base of the designed device is made up of MK AVR ATmega32, multi-sensor system based on MQ-series gas/smoke sensors and combined sensor DHT22 (temperature and humidity). Data output is carried out on a display of type LCD 2004 with integrated control chip HD44780.

Using Proteus VSM CAD tools, a basic electrical circuit was designed and computer simulation of a digital air analyzer was performed. To ensure the logic of the AVR ATmega32 microcontroller, an appropriate algorithm was created and the firmware was written in C language (WinAVR environment). Analysis of the dynamics of operation and testing of the device in conditions close to real ones was carried out in the Proteus ISIS emulator.

Keywords: air environment monitoring, toxic gases, harmful gas analyzer, MQ series sensors, microprocessor technology, AVR architecture, ATmega32 microcontroller, Proteus VSM computer-aided design and modeling system, WinAVR cross-compiler, embedded systems programming in C.

ВСТУП

Сучасна криміногенна ситуація та зростання ризиків техногенного характеру ставлять перед правоохоронними органами нові виклики. Під час розслідування злочинів, пов'язаних із незаконним виробництвом наркотичних засобів (нарколабораторії), порушенням правил поводження з небезпечними речовинами або терористичними актами, працівники поліції нерідко опиняються в зоні дії невидимих, але смертельно небезпечних хімічних чинників. Більшість токсичних газів не мають кольору чи запаху, що робить їх виявлення органами чуття неможливим. Відсутність оперативного контролю за станом повітря може призвести до гострих отруень, професійних захворювань або навіть летальних випадків серед особового складу. Існуючі промислові газоаналізатори часто є або занадто громіздкими для оперативної роботи, або мають вузьку спеціалізацію, що не дозволяє виявляти специфічний спектр речовин, характерних для кримінальних правопорушень. Існує гостра потреба у портативному, високоточному та цифровому пристрої, який здатний у режимі реального часу моніторити концентрацію шкідливих газів та миттєво оповіщати про небезпеку.

Сучасні досягнення у сфері мікроелектроніки сприяли появі високотехнологічних мікроконтролерів та сенсорів, що дозволяє проектувати бюджетні інформаційно-вимірювальні комплекси. Одним із прикладів застосування таких систем є розробка цифрових газоаналізаторів. Ці пристрої є критично важливими для захисту особового складу поліції під час проведення слідчих дій на місцях злочинів, де можлива наявність небезпечних хімічних сполук.

Цифровий аналізатор шкідливих газів, адаптований під специфіку поліцейської діяльності, має забезпечувати: високу чутливість до специфічних компонентів (наприклад, аміаку, хлору, чадного газу, летких органічних сполук); мобільність та ергономічність для використання в польових умовах.

Інтуїтивно зрозумілий інтерфейс із системою звукового та візуального сповіщення; цифрову обробку даних для збереження показників, що можуть бути використані як доказова база в суді.

Мета роботи полягає у проектуванні апаратно-програмного комплексу цифрового газоаналізатора, призначеного для моніторингу безпеки правоохоронців під час слідчих дій на об'єктах із хімічним забрудненням. Пристрій має здійснювати безперервний контроль складу повітря на наявність токсичних домішок і, у разі виходу за межі ГДК, активувати комплексну систему оповіщення, що включає акустичний сигнал, світлодіодну індикацію та текстове попередження на дисплеї.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі **завдання**:

- проаналізувати теоретичні основи та виконати огляд існуючих технічних рішень та сучасних пристроїв для виявлення шкідливих газів;
- обґрунтувати вибір програмного інструментарію для розробки аналізатора шкідливих газів;
- розробити апаратне забезпечення аналізатора (детектора) шкідливих газів на базі МК AVR ATmega32 та датчиків концентрації газів сімейства MQ;
- створити алгоритмічне та програмне забезпечення аналізатора шкідливих газів;
- провести комплексну комп'ютерну симуляцію розробленого пристрою в середовищі Proteus ISIS та верифікувати коректність роботи алгоритмів і схемотехнічних рішень у реальному часі.

Об'єкт дослідження – процеси моніторингу та ідентифікації небезпечних газових домішок у повітрі під час проведення слідчих дій.

Предмет дослідження – методи та засоби цифрового аналізу концентрації шкідливих газів у режимі реального часу.

Методи дослідження. Для досягнення поставленої мети та вирішення визначених завдань у роботі використано комплекс наукових, інженерних та програмно-апаратних методів дослідження, зокрема: методи системного

аналізу, порівняння та узагальнення, методи теорії кібернетики та системного програмування (структурне програмування) методи математичного моделювання та апроксимації, методи схемотехнічного проєктування цифрових пристроїв методи комп'ютерного (імітаційного) моделювання та віртуального інжинірингу.

Структура роботи. Кваліфікаційна робота складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел, додатків. Обсяг основного тексту роботи складає 80 сторінок, 36 рисунків, 12 таблиць, 3 додатки і 22 бібліографічних джерела. Загальний обсяг роботи – 90 сторінок.

РОЗДІЛ 1

СТАН ПРОБЛЕМНОЇ ОБЛАСТІ

1.1. Одиниці вимірювання концентрації газів

Для вимірювання вмісту домішок у повітрі використовується величина ppm (від англ. parts per million – часток на мільйон). Ця одиниця є аналогом відсотка чи проміле, проте відображає значно менші концентрації. Співвідношення 1 ppm до інших величин виглядає наступним чином: 10^{-6} від загального об'єму; 0,0001%; 0,001%.

Для наочності розглянемо показник у 15 ppm: це свідчить про те, що в кожному кілограмі досліджуваної суміші міститься 15 мг цільової речовини. У більшому масштабі це співвідношення еквівалентне 15 грамам на одну тонну загальної маси об'єкта.

У випадку аналізу об'ємних часток величина 1 ppm відповідає співвідношенню одного кубічного сантиметра (cm^3) газу до одного кубічного метра (m^3) суміші. Як приклад, поточний вміст діоксиду вуглецю (CO_2) в земній атмосфері становить приблизно 380 ppm. Це означає, що на кожен кубометр повітряного простору припадає 380 мл вуглекислого газу, що за об'ємом приблизно дорівнює двом стандартним склянкам.

Іноді показник мг на кубічний метр (m^3) за нормальних умов ототожнюють із ppm, проте таке твердження є лише умовно коректним. Це припустимо для повітряного середовища, де маса 1 m^3 повітря наближена до 1 кг, але стає помилковим при роботі з газами іншої густини. Аналогічна методологічна помилка виникає при спробі прирівняти ppm до міліграма на літр (мг/л). Хоча для водних розчинів ці величини майже збігаються, при аналізі вуглеводнів із густиною 0,5 – 1 кг/л виникає значна похибка, що робить таку заміну неприпустимою.

Таблиця 1.1. Співвідношення та формули перерахунку одиниць концентрації

Одиниця (Сх) → Вихідна (Са) ↓	г/м ³	мг/м ³	моль/дм ³
г/м ³	1	$10^3 \cdot C_a$	$(10^{-3} \cdot C_a) / M$

мг/м ³	$10^{-3} \cdot C_a$	1	$(10^{-6} \cdot C_a)/M$
моль/дм ³	$10^3 \cdot C_a M$	$10^6 \cdot C_a M$	1
% (об.)	$(0,12 \cdot 10^{-2} \cdot C_a MP)/T$	$(0,12 \cdot 10^1 \cdot C_a MP)/T$	$(0,12 \cdot 10^{-5} \cdot C_a \cdot MP)/T$
дм ³ /м ³	$(0,12 \cdot 10^{-3} \cdot C_a \cdot MP)/T$	$(0,12 \cdot C_a \cdot MP)/T$	$(0,12 \cdot 10^{-6} \cdot C_a \cdot MP)/T$
ppm	$(0,12 \cdot 10^{-6} \cdot C_a \cdot MP)/T$	$(0,12 \cdot 10^{-3} \cdot C_a MP)/T$	$(0,12 \cdot 10^{-9} \cdot C_a MP)/T$
ppb	$(0,12 \cdot 10^{-9}) \cdot C_a \cdot MP)/T$	$(0,12 \cdot 10^{-6} \cdot C_a MP)/T$	$(0,12 \cdot 10^{-12} \cdot C_a MP)/T$

Для коректного використання формул перерахунку концентрацій (Табл. 1.1) прийняті наступні позначення: C_a – кількісне значення концентрації речовини у вихідних (заданих) одиницях вимірювання; C_x – кількісне значення концентрації речовини, приведене до шуканих одиниць вимірювання; M – молярна (молекулярна) маса досліджуваного газу, г/моль; P – абсолютний тиск газового середовища (суміші), Па; T – термодинамічна температура середовища, К.

При виконанні розрахунків слід враховувати наступні тотожності, що базуються на метричній системі одиниць: Для масової концентрації: $1 \text{ г/м}^3 = 1 \text{ мг}$; $1 \text{ мг/м}^3 = 1 \text{ мкг/дм}^3 = 1 \text{ мкг/л}$. Для молярної концентрації: $1 \text{ моль/дм}^3 = 1 \text{ моль/л}$. Для об'ємної концентрації: $1 \text{ см}^3/\text{м}^3 = 1 \text{ мл/м}^3 = 1 \text{ ppm}$.

В Україні стандартною практикою є кількісне оцінювання концентрації газів у відсотковому еквіваленті (%) або через масовий вміст речовини в одиниці об'єму (мг/м³). Водночас у міжнародній практиці широкого розповсюдження набула одиниця ppm (*parts per million*). За своєю фізичною суттю показник ppm ідентичний відсотку, проте відрізняється масштабом розмірності: 1 ppm відповідає 0,0001%. Таким чином, концентрація у 3% за об'ємом еквівалентна 30,000 ppm.

Конвертація значень з відсотків або одиниць ppm у масову концентрацію (мг/м³) є складнішим обчислювальним завданням. Ця процедура вимагає обов'язкового врахування термодинамічних параметрів (тиску та температури), а також фізико-хімічних властивостей конкретної речовини (її молярної маси). Взаємозв'язок між фізичними параметрами газу описується фундаментальним рівнянням стану ідеального газу (рівнянням Менделєєва-Клапейрона):

$$P \times V_M = R \times T \quad (1.1)$$

де: P – абсолютний тиск газового середовища, Па; V_M – молярний об'єм досліджуваного газу, м³/моль; R – універсальна газова стала (8,314 Дж/(моль·К)); T – абсолютна термодинамічна температура, виражена в Кельвінах (К).

Для верифікації розрахунків існують спеціалізовані програмні засоби та обчислювальні алгоритми. Як приклад, розглянемо порівняння концентрацій монооксиду вуглецю (CO) та діоксиду вуглецю (CO₂) за нормального атмосферного тиску та кімнатної температури. При однаковій об'ємній частці у 3% (30,000 ppm), масові концентрації цих газів суттєво різняться: для CO цей показник становить приблизно 34,932 мг/м³, тоді як для CO₂ він сягає 54,513 мг/м³. Така розбіжність зумовлена різною молярною масою: молекула CO₂ має додатковий атом кисню, що робить цей газ значно щільнішим за повітря. Внаслідок вищої густини вуглекислий газ зазвичай зосереджується в нижніх ярусах приміщень або низинах. Натомість чадний газ (CO), питома вага якого дещо менша за повітряну суміш, має тенденцію до накопичення у верхніх зонах (під стелею).

Примітка 1. При конвертації одиниць об'ємної частки слід враховувати співвідношення: 1% об.=10,000 ppm. Примітка 2. У випадку аналізу рідких середовищ (наприклад, концентрації сульфату міді Cu₂SO₂ у водному розчині), прийнято вважати, що 1 ppm еквівалентний 1 мг/дм³. Для перерахунку концентрацій газоподібних речовин між різними системами одиниць доцільно використовувати верифіковані матриці перевідних коефіцієнтів (Табл. 1.1) або здійснювати самостійний розрахунок. В останньому випадку математична модель повинна базуватися на рівнянні стану ідеального газу з урахуванням молярної маси компонента, універсальної газової сталої, а також термодинамічних параметрів середовища (тиску та температури).

Для приведення вимірних значень до нормальних умов (при $T=293,15$ К та $P=101325$ Н/м²) використовується рівняння стану ідеального газу (рівняння Менделєєва-Клапейрона):

$$P \times V_M = R \times T \quad (1.2)$$

де: P – абсолютний тиск газу, Па (або Н/м²); V_M – молярний об'єм, м³/моль; R - універсальна газова стала (8,314 Дж/(моль·К)); T – абсолютна температура, К.

Для довільної маси газу m рівняння записується у розгорнутому вигляді:

$$P \cdot V = \frac{m}{M} \cdot R \cdot T \quad (1.3)$$

де m – маса газу, а M – його молярна маса.

Враховуючи, що одиниця ppm за визначенням є мільйонною часткою об'єму (10⁻⁶), кінцева формула для визначення масової концентрації (С_{мг/м³}) через об'ємну частку (С_{ppm}) набуває такого вигляду:

$$C_{\text{мг/м}^3} = \frac{M \cdot C_{\text{ppm}}}{\left(\frac{R \cdot T}{P}\right)} \quad (1.4)$$

Наприклад, виконаємо розрахунок для СО в 1 ppm:

$$C_{\text{мг/м}^3} = (12+16) \cdot 10^{-3} \cdot 1 \text{ ppm} / (8.314472 \cdot 293,15 / 101325)$$

$$C_{\text{мг/м}^3} = 28 \cdot 10^{-3} \cdot 1 \text{ ppm} / (8,3145 \cdot 293,15 / 10133)$$

$$C_{\text{мг/м}^3} = 1,164 \text{ мг/м}^3$$

$$C_{\text{мг/м}^3} = 1,16 \text{ мг/м}^3$$

Одиниці ppm (parts-per-million) та ppt (parts-per-trillion) визначаються як відповідні частки цілого:

$$1 \text{ ppm} = \frac{1}{10^6} = 10^{-6}, \quad 1 \text{ ppt} = \frac{1}{10^{12}} = 10^{-12}$$

Виходячи з наведених значень, співвідношення між ними становить:

$$1 \text{ ppm} = 10^6 \text{ ppt}$$

Для конвертації кількісного значення з мільйонних часток (x_{ppm}) у трильйонні (x_{ppt}), необхідно вихідне число помножити на коефіцієнт 10⁶:

$$x_{\text{ppt}} = x_{\text{ppm}} \cdot 10^6$$

Приклад розрахунку: Якщо концентрація речовини становить 7 ppm, то її значення у трильйонних частках (x_{ppt}) буде дорівнювати: $x_{\text{ppt}} = 7 \text{ ppm} \cdot 10^6 = 7000000 \text{ ppt}$.

Таблиця 1.2. Співвідношення між одиницями ppm та ppt

Концентрація в ppm (част. на мільйон)	Концентрація в ppt (част. на трильйон)	Формат запису в ppt (для розрахунків)
0,000001 (10^{-6})	1	1
0,00001	10	10^1
0,0001	100	10^2
0,001	1000	10^3
0,01	10000	10^4
0,1	100000	10^5
1	1000000	10^6
10	10000000	10^7
100	100000000	10^8
1000	1000000000	10^9

Співвідношення між одиницями ppt та ppb. Для коректного представлення мікроконцентрацій речовин використовуються одиниці ppm (частин на мільйон) та ppb (частин на мільярд). Їхні математичні визначення мають наступний вигляд:

$$1 \text{ ppm} = \frac{1}{10^6} = 10^{-6}$$

$$1 \text{ ppb} = \frac{1}{10^9} = 10^{-9}$$

З наведених дефініцій випливає, що один мільйонний складник відповідає одній тисячі мільярдних складників: $1 \text{ ppm} = 1000 \text{ ppb}$.

Для конвертації кількісного показника з одиниць ppb (x_{ppb}) у одиниці ppm (x_{ppm}) необхідно значення в мільярдах поділити на коефіцієнт 1000:

$$x_{\text{ppm}} = \frac{x_{\text{ppb}}}{1000}$$

Приклад розрахунку: Якщо концентрація зафіксована на рівні 7000 ppb, то її еквівалент у мільйонних частках становитиме:

$$x_{\text{ppm}} = \frac{7000 \text{ ppb}}{1000} = 7 \text{ ppm}$$

Таблиця 1.3. Співвідношення між одиницями ppb та ppt

Концентрація в ppb (частин на мільярд)	Концентрація в ppt (частин на мільйон)	Математичне співвідношення
1	0,001	10^{-3}
10	0,01	10^{-2}
100	0,1	10^{-1}
1000	1	10^0
10000	10	10^1

100000	100	10 ²
1000000	1000	10 ³

1.2. Огляд сучасних технічних засобів ідентифікації шкідливих газів

Газоаналізатори представляють собою спеціалізовані вимірювальні пристрої, призначені для ідентифікації компонентів газу та встановлення їхньої концентрації у суміші. За методом функціонування їх поділяють на ручні та автоматизовані. До ручних моделей належать популярні абсорбційні прилади, принцип роботи яких базується на вибіркового поглинанні складників газу хімічними реагентами. Натомість автоматичні системи здійснюють постійний моніторинг фізичних чи фізико-хімічних параметрів досліджуваного середовища в режимі реального часу.

Газоаналізатори – це технічні засоби вимірювання, які інтегруються у промислові та дослідницькі системи для визначення складу газових середовищ. Впровадження автоматизованого та безперервного моніторингу газових сумішей є критично важливим для управління складними хіміко-технологічними циклами. Це особливо актуально для таких галузей, як нафтопереробка, металургія, газовий сектор та коксохімічне виробництво, де точність складу газу безпосередньо впливає на ефективність виробництва та використання енергоресурсів.

Функціонування теплових електростанцій потребує використання автоматичних газоаналізаторів для моніторингу процесів спалювання палива та оптимізації коефіцієнта надлишку повітря. Окрім технологічного контролю, дані пристрої відіграють критичну роль у забезпеченні промислової безпеки складних об'єктів. Зокрема, вони застосовуються для вимірювання вмісту водню в контурах охолодження турбогенераторів, а також для аналізу складу газів у системах продувки апаратів на атомних електростанціях, де використовуються радіоактивні теплоносії.

Зростання вимог до екологічної безпеки зумовило інтенсифікацію розробки та впровадження систем газового аналізу. Сучасні газоаналізатори активно застосовуються для моніторингу техногенного навантаження: від

контролю промислових емісій і викидів ТЕС до аналізу стану повітряного середовища безпосередньо у робочих зонах та міських агломераціях. Зокрема, згідно з нормативними вимогами щодо якості атмосферного повітря в населених місцях, обов'язковому регулярному контролю підлягають концентрації ключових поллютантів: діоксиду сірки, монооксиду вуглецю, азотних сполук (NO та NO₂), а також зважених часток (пилу).

Принцип дії приладів газового аналізу базується на використанні специфічних фізико-хімічних параметрів конкретного компонента, які суттєво відрізняються від характеристик інших складників суміші. Ефективність та чутливість вимірювального методу безпосередньо залежать від ступеня цієї відмінності: чим вона виразніша, тим простішою стає процедура підготовки газової проби. Сучасний арсенал методів газоаналізу є надзвичайно широким, що пояснюється великою кількістю досліджуваних речовин та значним діапазоном концентрацій, які необхідно фіксувати.

Основна частина сучасних автоматизованих газоаналізаторів промислового призначення спроектована для детектування лише одного цільового складника. У такому контексті багатоконпонентну систему умовно приймають за бінарну суміш. При цьому передбачається, що лише досліджуваний елемент суттєво змінює фізико-хімічні параметри середовища, тоді як сукупність усіх інших інгредієнтів розглядається як єдиний фоновий компонент, що не справляє значного впливу на результати вимірювань.

Для дослідження складних багатоконпонентних газових середовищ застосовуються спеціалізовані газоаналізатори, які найчастіше знаходять використання в лабораторних умовах. Основними одиницями градування таких приладів є об'ємні відсотки (%), а також масові концентрації (г/м³, мг/л). Використання відсоткового вмісту вважається більш раціональним, оскільки цей показник залишається стабільним незалежно від коливань тиску та температури. Для детектування мікроконцентрацій впроваджено одиниці ppm (одна мільйонна частка, що відповідає 0,0001%) та ppb (одна мільярдна частка). Точність вимірювань та відтворення одиниць забезпечується шляхом

калібрування приладів за допомогою сертифікованих еталонних газових сумішей.

Система класифікації сучасних газоаналізаторів базується на фізико-хімічних принципах, що використовуються для детектування та кількісного оцінювання компонентів суміші. Відповідно до цієї ознаки, прилади поділяють на кілька фундаментальних груп, а саме: механічні, магнітні, теплові, електричні та оптичні. Окрему категорію становлять складні аналітичні системи – мас-спектрометричні та хроматографічні пристрої.

На відміну від датчиків тиску чи температури, газоаналізатори є складними вимірювальними комплексами. Крім самого первинного перетворювача (сенсора), вони включають систему допоміжних вузлів для забору, фільтрації, підготовки та транспортування газової проби до вимірювальної камери. За функціональним призначенням такі пристрої поділяють на дві основні категорії: власне вимірювальні прилади (аналізатори) та допоміжні засоби контролю — індикатори, сигналізатори й течешукачі. Обладнання другої групи зазвичай має компактне виконання, спрощену архітектуру та мінімальну кількість додаткових механізмів.



Рис. 1.1. Бездротовий сповіщувач витоку газу “Страж М-502”

Бездротовий сповіщувач “Страж М-502” розроблений для моніторингу концентрації горючих газів, таких як пропан, бутан та природний газ. Пристрій відрізняється простотою інсталяції завдяки відсутності сигнальних кабелів. У разі виявлення загрози датчик активує локальну звукову індикацію (сирену) та транслює тривожний радіосигнал на центральний блок керування.

Максимальний радіус дії бездротового каналу становить 100 метрів у зоні прямої видимості. Модель повністю сумісна з екосистемою централей “Страж” і потребує підключення до стандартної електромережі з напругою 220 В змінного струму.

Функціонування бездротового детектора “Страж М-502” базується на термохімічному методі детектування горючих газів (метану, пропану, бутану тощо). Основним чутливим елементом приладу є каталітична пластина. При взаємодії з молекулами газу на її поверхні виникає екзотермічна реакція, що призводить до підвищення температури сенсора. Як тільки рівень нагріву досягає встановленого порогового значення (що корелює з критичною концентрацією газу в повітрі), електронна схема ініціює тривожний стан. Це супроводжується активацією локального звукового оповісника та трансляцією сигналу на центральний модуль керування. Завдяки своїй універсальності пристрій ефективно використовується для забезпечення безпеки на об’єктах житлового, комерційного та адміністративного призначення.

Система моніторингу “Страж” має ряд конструктивних переваг, що спрощують її впровадження на об’єктах різного призначення. Ключовою особливістю є повна відсутність дротових комунікацій, що дозволяє виконувати монтаж без втручання в існуючий інтер’єр приміщення. Прилад оснащений вбудованим звуковим сповісником із рівнем тиску 85 дБ, що активується автоматично у разі детектування небезпеки. Передача тривожних сповіщень на базові станції (зокрема серій Avizor та Evolution) здійснюється радіоканалом на відстані до 100 метрів у межах прямої видимості. Пристрій використовує неліцензований частотний діапазон загального призначення та потребує підключення до мережі живлення 220 В змінного струму.

На Рис. 1.2 представлено модель бездротового датчика Tecsar Alert SENS-CO, призначеного для виявлення чадного газу.



Рис. 1.2. Бездротовий сповіщувач концентрації монооксиду вуглецю Tecsar Alert SENS-CO

Основні переваги Tecsar Alert SENS-CO: Давач забезпечує надійний контроль концентрації CO в приміщенні. Завдяки бездротовому протоколу (433 МГц) та живленню від звичайних батарейок, він не потребує прокладання кабелів. Пристрій обладнаний дисплеєм для моніторингу стану повітря та здатен передавати тривожний сигнал на відстань до 100 метрів. Низький рівень енергоспоживання гарантує тривалу роботу без заміни джерел живлення.

Функціонування пристрою базується на постійному моніторингу вмісту оксиду вуглецю (CO) у повітряному середовищі приміщення. При виявленні концентрацій, що виходять за межі допустимих значень, система активує комплексне світло-звукове сповіщення. Одночасно з локальною індикацією небезпеки, датчик транслює радіосигнал на центральний пульт сигналізації для ініціації загального режиму тривоги. Застосування таких аналізаторів є критично важливим для об'єктів із підвищеним ризиком накопичення продуктів неповного згорання, зокрема в підземних паркінгах, котельнях, гаражних комплексах та промислових зонах, де експлуатуються двигуни внутрішнього згорання.

Даний пристрій поєднує в собі ергономічний дизайн та високу функціональність. В основі його роботи лежить енергоефективний мікроконтролер, що забезпечує тривалий термін експлуатації. Для ідентифікації оксиду вуглецю (CO) інтегровано високоточний

електрохімічний сенсор. Візуалізація результатів вимірювання здійснюється за допомогою контрастного світлодіодного дисплея. Бездротова архітектура дозволяє інстальювати прилад без спеціальних навичок, а обмін даними з центральними блоками Tecsar Alert відбувається на неліцензованій частоті 433 МГц. За умови прямої видимості радіус дії радіоканалу сягає 100 метрів.

На Рис.1.3 представлено конструктивне виконання інтелектуального детектора, що спеціалізується на виявленні небезпечних концентрацій чадного газу. Модель LifeSOS CO-M330 інтегрується у бездротові системи безпеки та забезпечує високу точність моніторингу повітряного середовища.



Рис. 1.3. Зовнішній вигляд сповіщувача оксиду вуглецю LifeSOS CO-M330

Газоаналізатор LifeSOS CO-M330 призначений для інтеграції в бездротові мережі безпеки LifeSOS. Прилад відрізняється легкістю інсталяції та високим рівнем автономності. Безпека передачі інформації гарантується використанням складного бездротового протоколу з високим ступенем кодування (4 мільярди комбінацій). Пристрій здійснює постійний самоконтроль, інформуючи центральний блок про свій працездатний стан та рівень напруги живлення. Завдяки розширеному радіусу дії (до 300 м) та вбудованій потужній сирені, дана модель є ефективною для охорони великих об'єктів.

Функціонування бездротового детектора LifeSOS CO-M330 базується на термокаталітичному методі аналізу газового середовища. Основним робочим елементом приладу є спеціалізована каталітична пластина, яка вступає в екзотермічну реакцію при контакті з молекулами оксиду вуглецю (CO). Підвищення температури пластини, що пропорційне концентрації газу,

реєструється вимірювальною схемою; при досягненні встановленого порогу пристрій переходить у режим тривоги. Безпека передачі даних забезпечується використанням пропрієтарного радіопротоколу з технологією “плаваючого коду” (понад 4 млрд комбінацій), що робить неможливим перехоплення або дублювання сигналу. Прилад інтегрується в систему на базі централі LS-30LR, підтримуючи стабільний зв’язок на відстані до 300 метрів. Використання частотного діапазону 868 МГц дозволяє експлуатувати систему без отримання додаткових ліцензій.



Рис. 1.4. Моделі детекторів для виявлення концентрації горючих газів: testo 317-2 та Center 383

Портативний газоаналізатор testo 317-2 (а). Даний малогабаритний пристрій призначений для оперативного виявлення локацій витоку таких вуглеводнів, як метан (CH_4) та пропан (C_3H_8). Завдяки компактному виконанню прилад забезпечує високу мобільність при проведенні інспекцій

Таблиця 1.4. Технічні параметри газоаналізатора testo 317-2

Найменування показника	Значення та одиниці виміру
Межі детектування метану (CH_4)	0...20 000 ppm
Межі детектування пропану (C_3H_8)	0...10 000 ppm
Поріг чутливості ($\text{CH}_4/\text{C}_3\text{H}_8$)	від 100 ppm/від 50 ppm
Температурний режим експлуатації	-5...+45 °C
Елементи живлення	2xAAA (мізинчикові)
Розміри корпусу	190x25x26 мм
Вага пристрою	0,16 кг

Детектор горючих газів Center 383 – це високочутливий портативний прилад, призначений для виявлення метану та інших вуглеводнів. Ключовою особливістю пристрою є наявність 40-сантиметрового гнучкого зонда з нержавіючої сталі, що дозволяє проводити моніторинг у важкодоступних місцях. Прилад забезпечує граничну чутливість на рівні 5 ppm та оснащений дворівневим селектором налаштування чутливості (High/Low). Візуалізація рівня концентрації газу реалізована за допомогою триколірної світлодіодної шкали, яка доповнюється акустичною сигналізацією з регульованою інтенсивністю звуку. Для забезпечення точності вимірювань передбачена функція скидання фонових значень концентрації. Енергозабезпечення приладу здійснюється від чотирьох лужних елементів типу АА, що гарантують до 40 годин безперервної експлуатації.

На Рис.1.5 представлено приклади реалізації газосигналізаторів, побудованих на базі одноплатного комп'ютера Raspberry Pi та мікроконтролерів сімейства AVR.

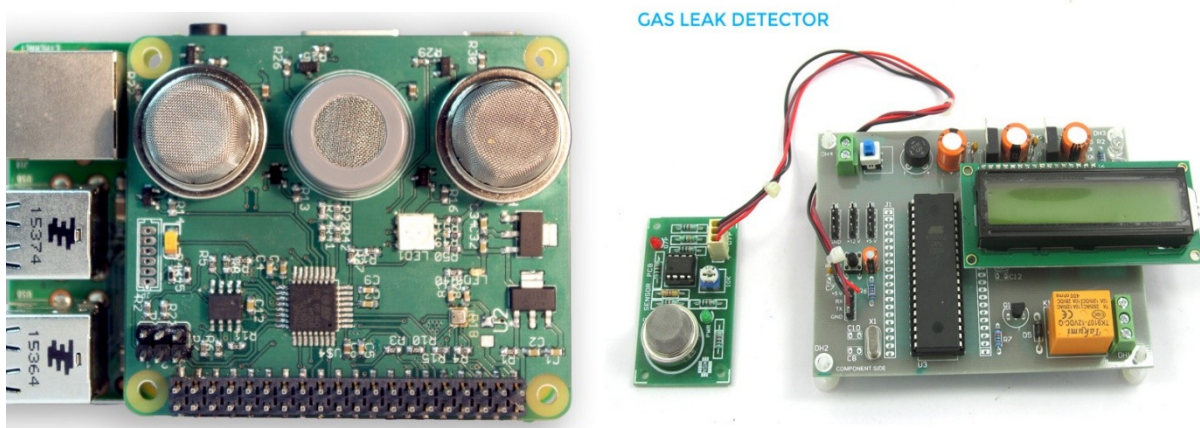


Рис. 1.5. Технічна реалізація систем детектування газів на базі платформ Raspberry Pi та мікроконтролерів AVR

На Рис.1.6 показано багатокомпонентні газоаналізатори QRAE II (а) і QRAE 3 (б) американської фірми RAE Systems. Модель QRAE II являє собою програмований багатоканальний пристрій, розроблений для безперервного контролю складу повітря в зонах підвищеної небезпеки. Система забезпечує моніторинг концентрації кисню, сірководню, чадного газу та

вибухонебезпечних пальних сумішей. Вимірювальний блок базується на комбінації сенсорів: каталітичних – для детектування горючих газів, та електрохімічних – для аналізу вмісту O_2 , H_2S і CO . Наступне покоління приладів, QRAE 3, вирізняється підвищеною надійністю та здатністю одночасно відстежувати до чотирьох видів газових домішок. Виробник пропонує два варіанти виконання: з дифузійним забором проб або з примусовим (за допомогою вбудованого насоса). Окрім стандартного набору газів (O_2 , H_2S , CO), прилад здатен фіксувати діоксид сірки (SO_2) та пари синильної кислоти (HCN). Поточні показники відображаються на моніторі у ppm для токсичних газів та у відсотках для кисню.

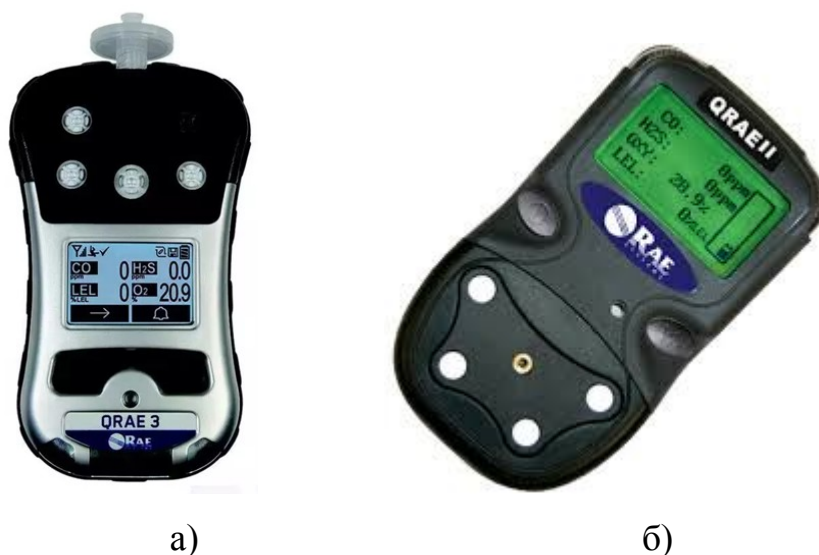


Рис. 1.6. Багатокомпонентні газоаналізатори QRAE II (а) та QRAE 3 (б) від виробника RAE Systems (США)

На Рис.1.7 представлено пристрої різного функціонального призначення. Модель BW GasAlertMicroClip XT забезпечує одночасний моніторинг концентрацій кисню (O_2), оксиду вуглецю (CO) та сірководню (H_2S). Поруч зображено інтелектуальний аналізатор AR8800B, що спеціалізується на детектуванні широкого спектра горючих сумішей, зокрема метану, пропану та природного газу.



Рис. 1.7. Приклади портативних засобів газового аналізу:
багатокомпонентний детектор BW GasAlertMicroClip XT та смарт-сенсор
AR8800B

РОЗДІЛ 2

ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПРОЦЕСУ РОЗРОБКИ ЦИФРОВОГО ДЕТЕКТОРА ШКІДЛИВИХ ГАЗІВ

2.1. Функціональні можливості САПР Proteus VSM при розробці цифрових пристроїв

Програмний пакет Proteus від Labcenter Electronics являє собою потужне середовище для схемотехнічного проєктування та моделювання. Основною особливістю платформи є підтримка віртуального налагодження апаратного забезпечення у поєднанні з програмним кодом. Завдяки широкій бібліотеці віртуальних аналогів реальних радіодеталей, Proteus дозволяє всебічно тестувати роботу мікропроцесорних систем, DSP та контролерів ще до етапу їх фізичного виготовлення.

Proteus забезпечує повний цикл розробки електронних пристроїв, починаючи від створення принципів електричних схем і закінчуючи налагодженням програмного коду вбудованих систем. Завдяки широкому арсеналу віртуальних контрольно-вимірювальних приладів, користувач може проводити комплексне моделювання роботи схеми. Додатково пакет містить інструментарій для проєктування топології друкованих плат, що підтримує функцію об'ємної (3D) візуалізації готового виробу.

Proteus підтримує моделювання широкого спектра мікроконтролерних архітектур, серед яких: ARM7, AVR, PIC, 8051, а також сімейства Motorola та Basic Stamp. Велика вбудована бібліотека містить вичерпну довідкову інформацію та охоплює популярні серії процесорів, зокрема LPC2000 та HC11. Окрім обчислювальних компонентів, програмний комплекс пропонує понад 6000 верифікованих моделей аналогових і цифрових пристроїв, що дозволяє створювати складні змішані системи.

Proteus VSM характеризується високим рівнем сумісності з більшістю сучасних компіляторів та асемблерів. Пакет дозволяє проводити достовірне моделювання складних мікропроцесорних систем, зокрема

мультиконтролерних конфігурацій, де в межах одного проекту взаємодіють чіпи різних архітектур. Слід зауважити, що попри високу точність, віртуальна симуляція не може ідентично відтворити всі фізичні процеси реального обладнання. Проте можливостей Proteus цілком достатньо для верифікації алгоритмів роботи МК та загального налагодження логіки функціонування пристрою.

Програмний комплекс підтримує гнучку систему менеджменту компонентів: за відсутності необхідної моделі в стандартному наборі, користувач може реалізувати її самостійно. Завдяки повній сумісності зі стандартом SPICE, у Proteus можна імпортувати файли параметризації від виробників компонентів. Таким чином, навіть для рідкісних або специфічних елементів можна сконструювати повноцінну симуляційну модель, поєднавши отримані дані про фізичні властивості з відповідним графічним представленням.

До структури пакета Proteus входять два функціональні блоки:

1. ISIS – редактор схем, що забезпечує введення принципів електричних з'єднань та імітаційне моделювання роботи пристрою.
2. ARES – інструмент для проектування топології друкованих плат, що підтримує автоматизацію трасування за допомогою алгоритмів ELECTRA та автоматичне розташування корпусів деталей за заданою сіткою.

На Рис.2.1 продемонстровано інтерфейс модуля ISIS, який використовується для розробки принципової електричної схеми пристрою та проведення імітаційного моделювання (VSM). Середовище дозволяє візуалізувати взаємодію мікроконтролера з периферійними компонентами в режимі реального часу.

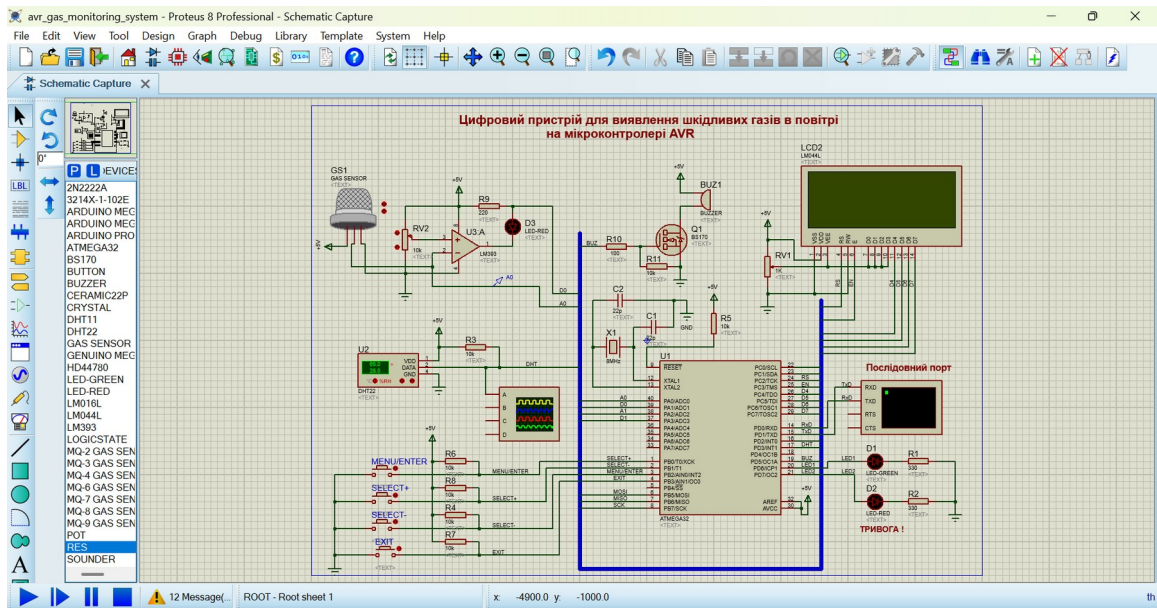


Рис. 2.1. Робоча область середовища Proteus ISIS

2.2. Програмний інструментарій WinAVR у проєктуванні AVR-систем

Для створення програмного забезпечення мікроконтролерів архітектури AVR широке застосування знайшов пакет WinAVR. Це відкритий набір інструментів, ключовим компонентом якого є комерційно незалежний компілятор GCC (GNU Compiler Collection). Пакет дозволяє працювати з мовами C і C++, забезпечуючи високу ефективність генерованого машинного коду. Крім засобів компіляції, WinAVR інтегрує в собі специфічні бібліотеки (AVR-Libc), програматори (avrdude) та засоби налагодження, що в сукупності формують цілісну екосистему для розробника вбудованих систем.

Структура пакету WinAVR включає наступні функціональні модулі:

1. Засоби редагування: Programmers Notepad, що є основним середовищем для написання вихідних текстів програм.
2. Бібліотечна підтримка: AVR-LibC, яка реалізує стандартні мовні конструкції та драйвери для апаратних ресурсів МК.
3. Засоби прошивки: AVRDUDE — інструмент для завантаження двійкових файлів у пам'ять мікроконтролера через послідовний інтерфейс програмування.

4. Аналіз та відлагодження: комбінація відладчика GDB (командний рядок) та Insight (графічний інтерфейс), а також симулятор Simulavr для верифікації коду без використання реального заліза.
5. Робота з образами пам'яті: набір утиліт SRecord, що дозволяє обробляти, об'єднувати та змінювати формати файлів прошивок.

```

Project : Цифровий аналізатор шкідливих газів для забезпечення безпеки працівників поліції
при розслідуванні злочинів пов'язаних з хімічними речовинами

Version :
Date    : 2026
Author  : (C) Богдан Масник
Comments:

Chip type      : ATmega32
Program type   : Application
Clock frequency : 8,000000 MHz
Memory model   : Small
External SRAM size : 0
Data Stack size : 512
***** /

#include <avr/io.h>
#include <util/delay.h>
#include <stdio.h> // стандартна бібліотека вводу/виводу
#include <stdlib.h>
#include <string.h>
#include <math.h> //include libm
#include <avr/interrupt.h>
  
```

```

----- end -----
> Process Exit Code: 0
> Time Taken: 00:03
  
```

Рис. 2.2. Інтерфейс середовища написання програмного коду пакета WinAVR

Інструментарій WinAVR вирізняється доступністю в опануванні завдяки наявності вичерпної технічної документації. Компілятор генерує оптимізований машинний код, синтаксис якого повністю відповідає стандартам класичної мови C. Серед функціональних обмежень слід виділити відсутність інтегрованих засобів автоматизованої конфігурації апаратної периферії МК та інтерфейсів взаємодії через графічний інтерфейс. Проте WinAVR підтримує повну інтеграцію з пропрієтарним середовищем Atmel Studio (нині Microchip Studio). Синергія цих програмних пакетів забезпечує розробнику комплексний інструментарій для проектування та налагодження ПЗ, що охоплює весь спектр апаратних можливостей мікроконтролерів сімейства Atmel.

WinAVR постачається на умовах ліцензії GNU GPL, що передбачає вільне розповсюдження та можливість модифікації вихідного коду користувачем. Програмний комплекс доступний і у портативному форматі (portable), що дозволяє запускати його із зовнішніх накопичувачів без попередньої інсталяції в систему. При встановленні важливо дотримуватися правила: шлях до каталогу WinAVR не повинен містити кириличних знаків або пробілів. Після завершення інсталяції стає доступним набір утиліт, ключовою серед яких є редактор Programmers Notepad. Технічна документація та програмні приклади розташовані в директорії \doc\avr-libc. Програмне забезпечення має англomовний інтерфейс і сумісне з 32-бітними версіями ОС Windows, а також має версії для ОС Linux. У Табл.2.1 наведено функціональні складові програмного комплексу WinAVR

Таблиця 2.1. Функціональні складові програмного комплексу WinAVR

Категорія	Назва модуля	Призначення
Розробка	Programmers Notepad	Основний текстовий редактор та IDE.
Компіляція	GNU GCC/Binutils	Трансляція коду (C/C++, Asm) та лінування об'єктних файлів.
Бібліотеки	avr-libc	Набір драйверів та функцій для периферії AVR.
Відлагодження	GDB/Insight	Командний та графічний інтерфейси для пошуку помилок.
Емуляція	simulavr/AVaRICE	Програмна симуляція МК та зв'язок з JTAG-адаптерами.
Програмування	avrdude (gui)	Завантаження бінарного коду в пам'ять контролера.
Конфігурація	MFile/SRecord	Створення Makefile та редагування форматів прошивки.

РОЗДІЛ 3

АПАРАТНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЦИФРОВОГО ДЕТЕКТОРА ШКІДЛИВИХ ГАЗІВ

При розробці цифрового детектора, що має на меті захист особового складу поліції від впливу хімічних загроз, було визначено оптимальний набір комплектуючих. Керування системою здійснюється через 8-бітний контролер ATmega32, а вивід даних забезпечує символьний екран 20x4. Для безпосереднього аналізу повітряного середовища застосовуються сенсори MQ-типу разом із компаратором LM393. Додатково передбачено елементи оповіщення (світлодіоди, зумер) та органи ручного керування.

3.1. Технічні параметри та архітектурні особливості МК ATmega32

Вибір мікроконтролерів сімейства AVR від Atmel зумовлений їхньою високою ефективністю у вирішенні завдань автоматизації та керування. Порівняно з аналогами, дані 8-розрядні RISC-мікроконтролери вирізняються кращою продуктивністю та простотою інтеграції. Важливою перевагою є можливість перепрограмування МК безпосередньо у складі готового модуля, що разом із високим ресурсом циклів перезапису пам'яті робить їх раціональним вибором за критерієм “ціна-функціональність”.

Сімейство AVR представлено трьома підгрупами: мініатюрними TinyAVR, універсальними ClassicAVR та високоефективними MegaAVR. Останні орієнтовані на складні завдання, пропонуючи до 128 Кбайт Flash-пам'яті, розвинену периферію (АЦП, апаратне множення) та збільшений обсяг SRAM. Уніфікація системи команд у межах архітектури гарантує легку адаптацію розробленого ПЗ при переході від молодших моделей до старших, що забезпечує високу гнучкість розробки.

Мікроконтролери ATmega32 та його низьковольтна модифікація ATmega32L належать до категорії високоефективних 8-бітних обчислювальних пристроїв архітектури AVR. Завдяки вдосконаленій RISC-

структурі, ці компоненти забезпечують оптимальне поєднання продуктивності та енергоощадності. Основні параметри обчислювального ядра:

- Система команд: Налічує 131 інструкцію, більшість з яких реалізується за один такт генератора, що дозволяє досягти швидкодії на рівні 16 MIPS при частоті 16 МГц.
- Регістрова структура: Наявність 32 робочих регістрів загального призначення та інтегрованого апаратного помножувача (2-тактового) прискорює обробку даних.
- Режими роботи: Повністю статична архітектура підтримує стабільне функціонування в широкому діапазоні частот.
- Конфігурація пам'яті: 1. Flash-пам'ять (32 Кбайт): Призначена для зберігання програмного коду; підтримує внутрішньосистемне програмування (ISP) та гарантує до 10 000 циклів перезапису. Передбачена виділена Boot-область із захисними бітами. 2. EEPROM (1024 байт): Енергонезалежна пам'ять для зберігання налаштувань та критичних даних (ресурс — до 100 000 циклів). 3. SRAM (2 Кбайт): Оперативна пам'ять для оперативної обробки змінних.
- Периферійний функціонал: Таймерна система: Включає два 8-бітні та один 16-бітний таймери/лічильники з функціями порівняння, захоплення та програмованими подільниками частоти. Додатково реалізовано лічильник реального часу (RTC) та чотири канали ШІМ (PWM). Інтерфейси зв'язку: На борту інтегровані послідовні інтерфейси USART, SPI (Master/Slave) та двопровідний інтерфейс (TWI/I2C). Аналоговий блок: 8-канальний АЦП з роздільною здатністю 10 біт та вбудований аналоговий компаратор.
- Налагодження та захист: Підтримка інтерфейсу JTAG (IEEE 1149.1) для граничного сканування, внутрішньосхемного налагодження та програмування.

- Експлуатаційні особливості: Живлення та частота: АТмега32 працює в діапазоні 4,5–5,5 В (до 16 МГц), тоді як версія “L” адаптована для низьковольтного живлення 2,7–5,5 В (до 8 МГц).
- Енергозбереження: Підтримка шести режимів зниженого енергоспоживання (Idle, Power-down, Standby тощо) та наявність Watchdog-таймера для підвищення надійності.
- Фізичне виконання: Випускається у корпусах типів PDIP (40 виводів), TQFP (44 виводи) та MLF (44 контакти), пропонуючи 32 програмовані лінії введення/виведення.

На Рис. 3.1 продемонстровано конфігурацію виводів мікроконтролера архітектури AVR АТмега32 у двох варіантах корпусів: DIP (з двостороннім розташуванням контактів) та TQFP (планарний корпус).

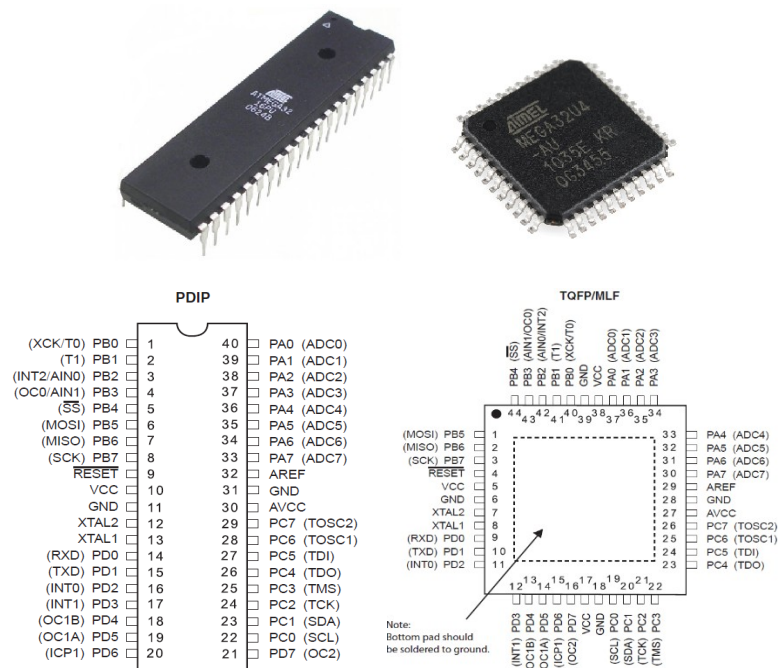


Рис.3.1. Схема розташування та функціональне призначення виводів мікроконтролера АТмега32 у корпусах типів PDIP та TQFP

В основі обчислювального ядра AVR лежить розширена система команд, інтегрована з блоком із 32 робочих регістрів загального призначення (РЗП). Особливістю архітектури є пряме сполучення всіх РЗП з арифметико-логічним пристроєм (АЛП). Це дозволяє за один машинний такт виконувати операції одночасно над двома незалежними регістрами. Така апаратна

реалізація забезпечує значну перевагу у швидкодії, що в середньому вдесятеро перевищує показники мікроконтролерів із CISC-архітектурою.

Апаратні ресурси ATmega32/L включають: пам'ять: 32 Кбайт Flash-пам'яті з підтримкою технології Read-While-Write, 1024 байт EEPROM та 2 Кбайт статичної оперативної пам'яті (SRAM); периферія та інтерфейси: три конфігуровані таймери-лічильники, модулі USART, SPI та TWI (двопровідний інтерфейс); аналоговий блок: 8-канальний 10-бітний АЦП. Варто зазначити, що функція програмованого підсилення диференціальних каналів доступна лише у корпусах типу TQFP; безпека та налагодження: Watchdog-таймер із власним генератором, інтерфейс JTAG для моніторингу внутрішніх регістрів та вбудована система відладки.

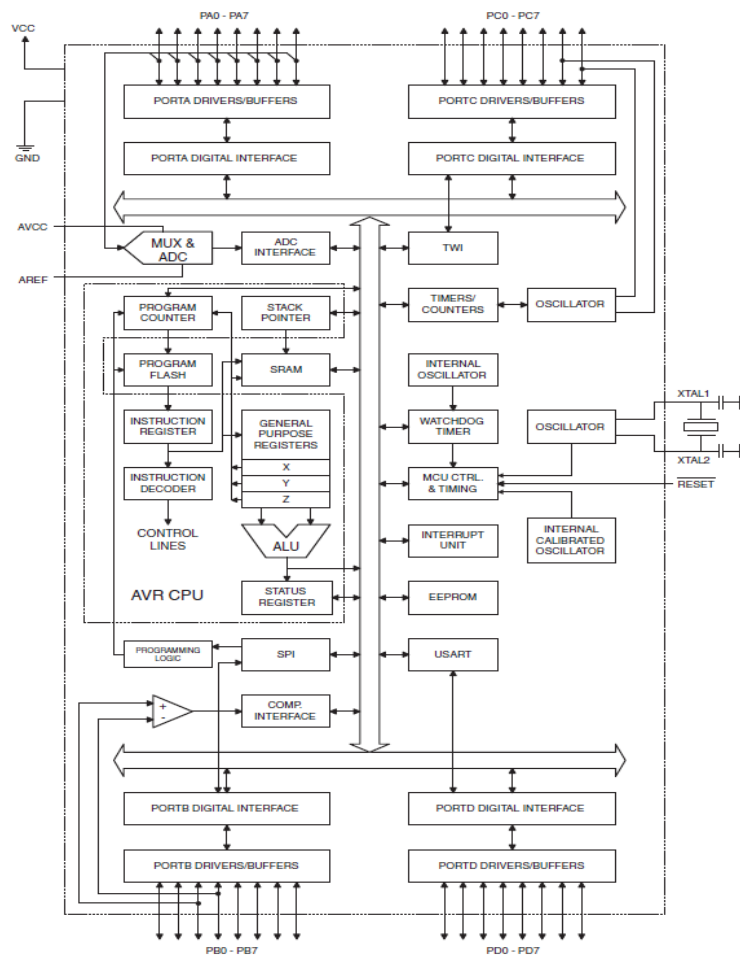


Рис.3.2. Структурна організація внутрішніх модулів та вузлів МК ATmega32

Для оптимізації енергоспоживання в ATmega32 передбачено кілька сценаріїв роботи периферії. У режимі Idle зберігається активність інтерфейсів

зв'язку (USART, SPI, TWI), таймерів та пам'яті SRAM. Для підвищення точності вимірювань використовується режим ADC Noise Reduction, у якому відключаються цифрові блоки, що створюють шум, залишаючи активними лише АЦП та асинхронний таймер. Найглибший рівень енергозбереження — режим Power-down, за якого стан системи фіксується у регістрах, а тактування повністю припиняється. Вихід із цього стану можливий лише за зовнішнім сигналом або апаратним скиданням.

У режимі очікування (Standby) активним залишається лише один тактовий генератор, тоді як інші функціональні блоки мікроконтролера тимчасово вимикаються. Висока швидкість відновлення працездатності, зокрема при реакції на зовнішні переривання, дозволяє ATmega32 ефективно адаптуватися до динамічних умов експлуатації, забезпечуючи мінімальний рівень енергоспоживання. Додатково передбачено розширений режим очікування (Extended Standby), який характеризується одночасною роботою основного та асинхронного генераторів.

При виготовленні даних мікросхем застосовується фірмова технологія енергонезалежної пам'яті високої щільності від Atmel. Інтегрована Flash-пам'ять з підтримкою ISP (In-System Programming) відкриває можливість модернізації програмного коду безпосередньо у складі пристрою. Це реалізується як через стандартний послідовний інтерфейс SPI за допомогою програматора, так і шляхом використання завантажувача (Bootloader), що функціонує в ядрі AVR. Поєднання продуктивної 8-бітної RISC-архітектури та гнучкої системи пам'яті робить ATmega32 раціональним та економічно виправданим вибором для розробки сучасних вбудованих систем керування.

Аналого-цифровий перетворювач МК ATmega32. Мікроконтролери сімейства AVR, включаючи ATmega32, здійснюють обмін даними через лінії введення-виведення, які штатно працюють із бінарною логікою. Оскільки цифрові входи сприймають напругу лише як дискретні стани (0 або 1 з відповідними порогами спрацювання), для зчитування неперервних (аналогових) сигналів використовується спеціальний внутрішній блок – АЦП.

Він дозволяє пристрою “бачити” будь-які проміжні значення напруги в межах діапазону живлення, що критично важливо для сенсорів та вимірювальних систем.

На Рис. 3.3 наведено схему виводів АТmega32, що задіяні в роботі модуля АЦП. До них належать вісім каналів аналогового введення (порт А), а також виводи живлення аналогової частини (AVCC), опорної напруги (AREF) та загальний вивід (AGND).

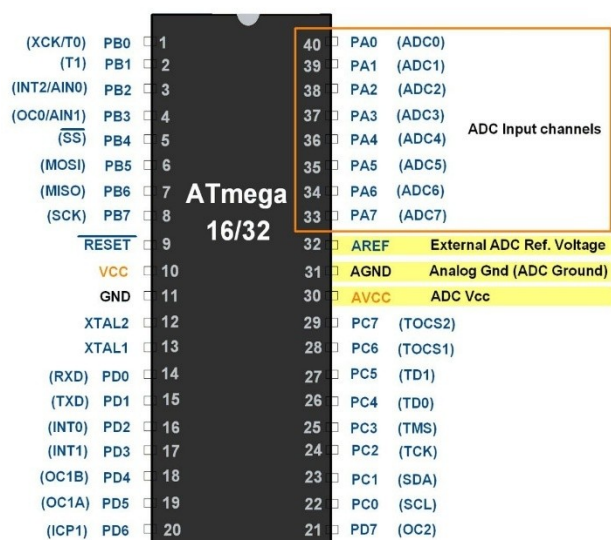


Рис. 3.3. Конфігурація входних ліній аналого-цифрового перетворювача та виводів опорної напруги для МК АТmega32

Взаємодія з інтегрованим АЦП у мікроконтролері АТmega32 реалізується через порти загального призначення порту А. Програмне керування процесом квантування базується на конфігуруванні наступних службових регістрів: Для вибору конкретного виводу та налаштування опорної напруги служить регістр ADMUX. Режим роботи, швидкість перетворення та контроль завершення циклу вимірювання визначаються через регістр ADCSRA. Додаткові налаштування джерел переривань для АЦП доступні в регістрі SFIOR. Оскільки результат перетворення є 10-розрядним, він зберігається у двох 8-бітних регістрах – ADCH (старша частина) та ADCL (молодша частина).

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0	
	ADMUX								
	REFS1	REFS0	ADLAR	MUX4	MUX3	MUX2	MUX1	MUX0	
Read/Write	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	
Initial Value	0	0	0	0	0	0	0	0	

Таблиця 3.1. Режими вибору опорної напруги через біти регістру ADMUX

REFS1:0	Обране джерело опорної напруги	Примітка
00	AREF	Використовується зовнішнє джерело.
01	AVCC	Необхідна зовнішня ємність на AREF для стабілізації.
10	-	Зарезервовано виробником.
11	Internal (2,56 В)	Внутрішнє джерело, рекомендовано конденсатор на AREF.

Вибір U_{ref} є ключовим етапом налаштування АЦП, оскільки саме цей параметр встановлює масштаб перетворення. Якщо вхідна напруга виходить за межі U_{ref} , АЦП видає граничне значення $0x3FF$. Фізична реалізація вузла дозволяє гнучко перемикатися між внутрішніми та зовнішніми джерелами. Наприклад, вбудований стабілізатор на 2,56 В проходить через буферний підсилювач перед подачею на схему порівняння. Важливою практичною рекомендацією є захист лінії AREF від високочастотних шумів за допомогою шунтувального конденсатора. З огляду на високий імпеданс джерела опорної напруги, слід уникати підключення низькоомних споживачів до контакту AREF, щоб не порушити точність роботи всього модуля.

Оскільки АЦП мікроконтролера ATmega32 має 10-розрядну роздільну здатність, результат перетворення зберігається у двох 8-бітних регістрах: ADCH (старший байт) та ADCL (молодший байт). Спосіб розташування бітів у цих регістрах визначається станом прапорця ADLAR у регістрі ADMUX:

1. Праве вирівнювання (ADLAR=0): Це стандартний режим, де 10 біт результату займають весь регістр ADCL та два молодші біти регістру ADCH. Цей варіант зручний для повнотекстового зчитування всього 10-бітного значення.
2. Ліве вирівнювання (ADLAR=1): Результат зсувається ліворуч так, що 8 старших біт (ADC9–ADC2) повністю заповнюють регістр ADCH. Це дозволяє розробнику зчитувати лише старший байт, якщо достатньо 8-бітної точності, що спрощує обробку даних.

Аналого-цифровий перетворювач видає 10-бітне значення, що записується у два регістри: ADCH та ADCL. Стандартно дані вирівнюються за правим краєм, займаючи молодші розряди 16-бітного слова. Проте користувач може активувати вирівнювання ліворуч, встановивши прапорець ADLAR у регістрі ADMUX. Важливо дотримуватися послідовності зчитування: звернення до ADCL тимчасово блокує оновлення обох регістрів. Якщо за цей час відбудеться нове перетворення, його результат буде проігноровано. Повне розблокування та дозвіл АЦП на запис нових даних відбувається лише після зчитування регістра ADCH.

У Таблиці 3.2 наведено алгоритм вибору вхідних ліній мультиплексора за допомогою бітів MUX4..0. Система підтримує як стандартні недиференційні вимірювання (канали ADC0–ADC7), так і роботу в диференційному режимі з можливістю апаратного підсилення сигналу в 10 або 200 разів. Окремі комбінації керуючих бітів дозволяють підключати до АЦП внутрішнє джерело опорної напруги ($V_{BG}=1,22$ В) або лінію заземлення для калібрування системи та перевірки нульового рівня.

Таблиця 3.3. Конфігурація вхідних каналів АЦП та параметри підсилення

Селектор MUX4..0	Однополярний вхід	Диференційний (+)	Диференційний (-)	Коефіцієнт підсилення (G)
00000-00111	ADC0 – ADC7	-	-	1x
01000	-	ADC0	ADC0	10x
01001	-	ADC1	ADC0	10x
01010	-	ADC0	ADC0	200x
01011	-	ADC1	ADC0	200x
01100	-	ADC2	ADC2	10x
01101	-	ADC3	ADC2	10x
01110	-	ADC2	ADC2	200x
01111	-	ADC3	ADC2	200x
10000-10111	-	ADC0 – ADC7	ADC1	1x
11000-11101	-	ADC0 – ADC5	ADC2	1x
11110	V_{BG} (1,22 В)	-	-	1x
11111	GND (0 В)	-	-	1x

Вибір каналу та налаштування каскаду підсилення здійснюється через зміну значень бітів MUX у керуючому регістрі ADMUX. У режимі одиничних

вимірювань розробнику доступні порти ADC0...ADC7, а також внутрішні опорні точки: потенціал “землі” (GND) та джерело стабільної напруги 1,22 В. При активації диференційного режиму система дозволяє гнучко призначати інвертуючі та неінвертуючі входи. У цьому випадку диференційний підсилювач масштабує різницю потенціалів на обраний коефіцієнт перед подачею сигналу на вхід АЦП. Якщо ж обрано однополярний режим, блок підсилення виключається з вимірювального тракту.

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0	
	ADEN	ADSC	ADATE	ADIF	ADIE	ADPS2	ADPS1	ADPS0	ADCSRA
Read/Write	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	
Initial Value	0	0	0	0	0	0	0	0	

Таблиця 3.4. Конфігурація дільника частоти (прескалера) АЦП

ADPS2	ADPS1	ADPS0	Коефіцієнт ділення (N)
0	0	0	2
0	0	1	2
0	1	0	4
0	1	1	8
1	0	0	16
1	0	1	32
1	1	0	64
1	1	1	128

Швидкість роботи аналого-цифрового перетворювача залежить від тактової частоти, яка формується шляхом ділення системної частоти процесора на певний коефіцієнт. У Табл.3.4 наведено відповідність між станом бітів ADPS2:0 у регістрі керування та результируючим значенням дільника. Оскільки для коректної роботи АЦП архітектури AVR потребує вхідної частоти в межах 50–200 кГц, правильний вибір прескалера є критичним для забезпечення точності вимірювань та стабільності результату.

Формула розрахунку частоти АЦП:

$$f_{ADC} = \frac{f_{CPU}}{N}$$

де f_{CPU} – тактова частота мікроконтролера, а N – обраний коефіцієнт із таблиці. Це додасть вашій роботі наукового вигляду.

Внутрішня структура АЦП передбачає наявність власного джерела тактування, що отримується шляхом ділення основної частоти процесора.

Коефіцієнт ділення вибирається програмно в регістрі ADCSRA. Варто зауважити, що скидання біта ADEN призводить до зупинки та обнулення подільника. При проєктуванні системи важливо дотримуватися частотного режиму: для отримання достовірних 10-розрядних даних частота тактування АЦП не повинна виходити за межі 200 кГц. Якщо ж завдання припускає меншу точність, частоту можна збільшити. Слід враховувати, що тривалість одного вимірювання (за виключенням першого ввімкнення) завжди дорівнює 13 циклам тактового сигналу модуля.

Процес оцифрування розпочинається встановленням біта ADEN, причому перший цикл є подовженим (25 тактів) для стабілізації аналогової частини. Результат фіксується підняттям прапорця ADIF. Якщо обрано режим одиничного вимірювання, біт ADSC скидається автоматично, вимагаючи програмного перезапуску для кожної нової ітерації. У режимі автозапуску перетворення йдуть безперервним потоком, а статусний біт ADSC залишається в одиничному стані протягом усього часу роботи модуля.

Робота з бітом ADSC та режимами перетворення. Ініціалізація одиничного перетворення Процес оцифрування сигналу активується шляхом встановлення логічної одиниці в біті ADSC регістра керування АЦП. Протягом усього циклу перетворення цей біт зберігає високий рівень, а після завершення операції автоматично скидається апаратним забезпеченням. Важливо зауважити: якщо під час активної фази перетворення відбудеться зміна аналогового каналу, контролер спочатку завершить поточну ітерацію і лише після цього виконає перемикання на новий вхід. Режим безперервного перетворення (Free Running Mode) Для забезпечення постійного моніторингу аналогового сигналу та автоматичного оновлення результатів у регістрах даних використовується режим автозапуску. Його активація здійснюється записом логічної “1” у біт ADFR (регістр ADCSRA). Особливості функціонування: Первинний запуск: Навіть у режимі автозапуску перше оцифрування необхідно ініціювати вручну через біт ADSC. Циклічність: Подальші цикли перетворення виконуються послідовно та безперервно.

Автономність: Робота АЦП у цьому режимі не залежить від стану прапорця переривання ADIF (його скидання не є обов'язковим для старту наступного циклу).

Для переведення АЦП у режим безперервного або автоматичного перезапуску використовується біт ADATE. Якщо цей прапор піднято, система починає кожне нове перетворення щойно з'являється висхідний фронт на призначеному керуючому сигналі. Користувач може налаштувати, який саме сигнал буде ініціювати запуск, сконфігурувавши біти ADTS у регістрі SFIOR.

Прапорець ADIF сигналізує про завершення аналого-цифрового перетворення та готовність даних у регістрах ADCH:ADCL. Якщо активовано біти ADIE та SREG.I, контролер викликає обробник переривання. Скидання біта ADIF здійснюється або апаратно (при виконанні вектора переривання), або програмно (записом "1"). При роботі з регістром ADCSRA варто уникати необережного використання команд SBI та CBI, оскільки вони працюють за принципом «читання-модифікація-запис», що може заблокувати обробку поточного переривання.

Для того, щоб мікроконтролер міг автоматично реагувати на завершення роботи АЦП через механізм переривань, необхідно програмно встановити біт ADIE. Це програмне налаштування працює у зв'язці з бітом глобального дозволу I, відкриваючи доступ до обробки події закінчення перетворення.

Таблиця 3.5. Конфігурація джерел автозапуску АЦП через біти ADTS2:0

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0	SFIOR
	ADTS2	ADTS1	ADTS0	-	ACME	PUD	PSR2	PSR10	
Read/Write	R/W	R/W	R/W	R	R/W	R/W	R/W	R/W	
Initial Value	0	0	0	0	0	0	0	0	

Вибір сигналу, що ініціює автоматичне перетворення АЦП, здійснюється шляхом встановлення відповідної комбінації значень у бітах ADTS2:0 (регістр SFIOR). Зокрема, при нульових значеннях усіх трьох бітів система функціонує в режимі Free Running, де кожне наступне перетворення стартує відразу після завершення попереднього. Окрім цього, доступна синхронізація з подіями внутрішніх таймерів (наприклад, переповнення або

співпадіння для таймерів 0 та 1), зовнішнім перериванням INTO або сигналом від аналогового компаратора».

Конфігурація джерела автоматичного тригерування АЦП через біти ADTS можлива лише при активованому біті ADATE. У режимі автозапуску ініціація перетворення відбувається по позитивному фронту вибраного сигналу. Будь-яка зміна налаштувань, що призводить до появи висхідного фронту на вході тригера, викликає початок перетворення (якщо ADEN=1). Винятком є активація режиму Free Running, яка не генерує сигнал запуску самостійно, незалежно від поточного стану прапорця переривання ADC.

3.2. Огляд датчиків концентрації газів сімейства MQ

Нині глобальний ринок електронних компонентів представлений величезним вибором сенсорних пристроїв. Серед рішень для моніторингу газового складу та виявлення випарів особливе місце посідає лінійка датчиків серії MQ. Їхня популярність зумовлена насамперед економічною доступністю та широким асортиментом. Ці пристрої є бюджетним рішенням для ідентифікації різноманітних побутових і промислових газів у навколишньому середовищі. Перелік датчиків газів згрупованих за їх функціональним призначенням:

1. Датчики горючих газів та метану: Сюди відносяться моделі MQ-2, MQ-4, MQ-214, MQ-216. Вони спеціалізуються на виявленні витоків природного газу та задимлення.
2. Детектори токсичних газів (CO та CO₂): Для моніторингу безпеки життєдіяльності використовуються MQ-7, MQ-307A (чадний газ) та спеціалізований сенсор MG-811 (вуглекислий газ).
3. Аналізатори спиртів та органічних сполук: Серії MQ-3, MQ-303A орієнтовані на пари етанолу, тоді як MQ-135 та MQ-138 мають ширшу чутливість до бензолу, ацетону та толуолу.
4. Спеціалізовані промислові сенсори: Для виявлення специфічних речовин, таких як аміак (MQ-137), озон (MQ-131) або сірководень (MQ-136).

В основі функціонування датчиків лінійки MQ лежить вимірювання опору електрохімічного елемента, який змінюється внаслідок реакції з молекулами газу в повітрі. Датчики розраховані на експлуатацію всередині приміщень і мають високу чутливість до різних домішок. Для коректного проходження хімічної реакції та очищення сенсорної поверхні від продуктів взаємодії конструкція передбачає наявність внутрішнього нагрівача. Він підтримує необхідний температурний режим чутливої частини, що робить пристрій придатним для тривалої та багаторазової роботи. Датчики сімейства MQ працюють за принципом зміни електричних параметрів напівпровідникового матеріалу при контакті з газовим середовищем. Внутрішня структура пристрою містить нагрівальну нитку та електрохімічну підкладку. Хімічна взаємодія між газом та матеріалом датчика змінює його провідність, що і фіксується вимірювальною схемою. Нагрівальний елемент відіграє ключову роль: він забезпечує оптимальну температуру для проходження реакції та сприяє десорбції молекул газу, завдяки чому датчик зберігає працездатність протягом тривалого часу. Типова структура датчика включає підкладку з чутливим покриттям, нагрівальний модуль та виводи (Рис. 3.4). Для захисту від вибуху при роботі з горючими газами корпус датчика оснащений сталеву сіткою. Вона запобігає займанню газоповітряної суміші від розігрітого внутрішнього елемента. Ця інженерна ідея походить від винаходу Гемфрі Деві (початок ХІХ століття), який створив безпечну лампу для роботи у вибухонебезпечному середовищі шахт.

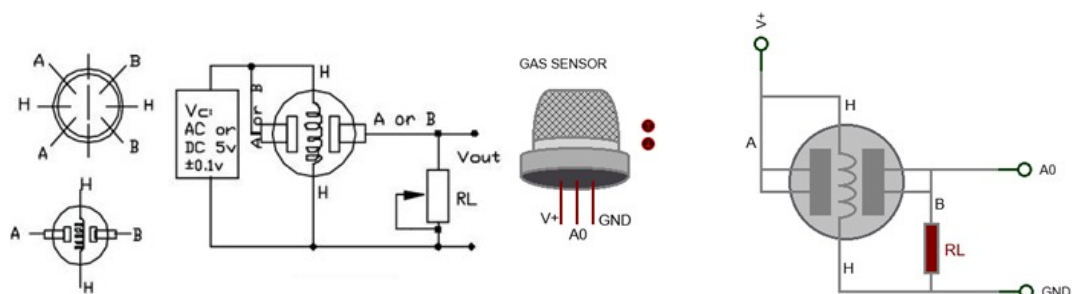


Рис.3.4. Внутрішня будова та схема підключення газового датчика MQ

Хоча готові плати з датчиками MQ випускаються численними брендами, першоджерелом і виробником самих сенсорів є корпорація Hanwei Electronics

Group. Ця компанія є лідером у сегменті засобів виявлення газів, пропонуючи розгалужену номенклатуру датчиків для різноманітних прикладних задач.

Узагальнені технічні дані щодо номенклатури датчиків MQ, типу використовуваної підкладки та цільових газів, згідно з офіційними специфікаціями компанії Hanwei, представлені у Табл.3.6. Більшість сенсорів цієї лінійки базується на діоксиді олова (SnO_2), що забезпечує стабільні показники чутливості при детектуванні різних домішок.

Таблиця 3.6. Класифікація датчиків MQ за типом підкладки та детектувальними властивостями

Модель датчика	Цільовий газ/Спектр чутливості	Матеріал підкладки
MQ-2	Зріджений нафтовий газ (LPG)	SnO_2
MQ-3	Спиртові пари (Alcohol)	SnO_2
MQ-4	Метан (CH_4)	SnO_2
MQ-5	Зріджений газ, природний газ	SnO_2
MQ-6	LPG, пропан	SnO_2
MQ-7	Монооксид вуглецю (CO)	SnO_2
MQ-9	Метан, LPG	SnO_2
MQ-131	Озон (O_3)	SnO_2
MQ-135	Моніторинг якості повітря (NH_3 , бензол)	SnO_2
MQ-136	Сульфід водню (H_2S)	SnO_2
MQ-137	Аміак (NH_3)	SnO_2
MQ-138	Органічні розчинники (мультицільовий)	SnO_2
MQ-303A	Пари етанолу	SnO_2 /Кераміка
MQ-306A	Зріджений та природний газ	SnO_2 /Кераміка

Конструктивна основа датчиків MQ є стандартизованою: у переважній більшості моделей застосовується однотипна підкладка, що виконує функцію первинного перетворювача. Принцип дії базується на зміні її опору залежно від газового складу навколишнього середовища. Винятком є 300-та серія, специфікації якої не містять конкретної інформації про хімічну структуру адсорбційного шару, на відміну від інших представників сімейства.

Хоча в основі більшості датчиків MQ лежить єдиний фізичний принцип, вони мають значні розбіжності у технічних характеристиках. Крім зовнішніх форм, суттєві відмінності стосуються енергоспоживання та напруги підігрівача. Пряме знімання даних можливе шляхом вимірювання активного опору, який корелює з рівнем концентрації домішок у повітрі. Для

практичного застосування в мікропроцесорних пристроях зазвичай створюється подільник напруги шляхом додавання зовнішнього резистора навантаження. Таке схемне рішення дозволяє отримувати аналоговий сигнал, придатний для обробки АЦП.

Ресурс газових датчиків серії MQ обмежений п'ятирічним терміном, причому деградація матеріалів відбувається навіть під час зберігання. Порушення умов пакування прискорює процес псування чутливого елемента. Основна причина полягає в насиченні SnO_2 вуглецем, що за низьких температур руйнує структуру активного шару. Для відновлення номінальних характеристик нові модулі підлягають обов'язковій термічній підготовці: безперервному живленню нагрівача протягом однієї або двох діб. Ця процедура забезпечує десорбцію та вигорання сторонніх домішок, що критично важливо для отримання достовірних результатів газоаналізу.

Функціональне призначення більшості датчиків MQ тісно пов'язане з детектуванням сполук вуглецю, від горючих вуглеводнів (CH_4 , C_3H_8) до токсичного монооксиду вуглецю (CO) та спиртів. Універсальність матеріалу SnO_2 дозволяє використовувати його як базу для широкого спектра газоаналізаторів. Проте датчик озону MQ-131 стоїть окремо в цій номенклатурі, оскільки його цільовим газом є O_3 – активний окислювач, що не містить вуглецю, попри використання аналогічної технології виробництва чутливого шару.

Функціонування датчиків серії MQ критично залежить від стабільності концентрації кисню в навколишньому середовищі. Згідно з технічними специфікаціями, номінальні характеристики пристроїв розраховані на вміст кисню на рівні 21%. Будь-які суттєві відхилення від цього показника призводять до дестабілізації вихідного сигналу. Зокрема, при зниженні концентрації кисню до 2% і менше, датчик втрачає здатність до коректних вимірювань. Це пояснюється тим, що за дефіциту окиснювача хімічні реакції на поверхні напівпровідника (зокрема вигорання вуглецевих сполук)

припиняються. Ймовірно, саме на принципах взаємодії з активними окиснювачами базується і механізм детектування озону в датчиках MQ-131.

Калібрування датчиків MQ і перетворення показів в ppm. Для перетворення аналогового сигналу датчиків серії MQ у фізичні одиниці концентрації (ppm) необхідно виконати калібрування системи. На прикладі розробок Davide Gironi для сенсора MQ-135, було продемонстровано можливість розрахунку параметрів схеми на основі відомих атмосферних показників. Використовуючи глобальні дані про концентрацію CO₂ як базову точку, можна визначити необхідний номінал резистора для коректного масштабування кривої чутливості. Після визначення опорних значень під час калібрування, обчислення концентрації проводиться за емпіричною формулою. Наприклад, для датчика MQ-4 з інтерфейсом I2C та 12-бітним АЦП, апроксимаційна формула має наступний вигляд:

$$ppm = \left(\frac{10000,0}{4096,0} \cdot raw_adc \right) + 200$$

Цей підхід дозволяє отримати наближені до реальних показники концентрації газу в автоматизованих системах моніторингу.

Конструкція датчиків MQ дозволяє гнучко налаштовувати їх для вимірювання питомої концентрації домішок у повітрі. Оскільки сенсор є пасивним компонентом, він генерує аналоговий сигнал, придатний для обробки стандартними засобами мікроконтролерних систем. Універсальність внутрішньої структури дозволяє використовувати різні типи живильної напруги (AC/DC). При проектуванні пристрою доцільно використовувати готові інтерфейсні рішення, що постачаються в комплекті. Згідно з рекомендаціями виробника, для мінімізації перехідного опору та підвищення надійності контактів, виводи одного типу (А-А та В-В) слід об'єднувати між собою (Рис. 3.4).

Згідно з представленою схемою (Рис. 3.4), на нагрівальний елемент подається напруга живлення +5 В, яка паралельно підключена до обох виводів групи "А". Для налаштування необхідного діапазону чутливості у

вимірювальному колі використано змінний резистор, що виконує роль навантажувального елемента (R_L). Варто зауважити, що в серійних пристроях після етапу калібрування змінний резистор зазвичай замінюють на постійний з відповідним номіналом. Отриманий вихідний сигнал V_{OUT} подається на аналоговий вхід мікроконтролера AVR для подальшої цифрової обробки.

У межах даної роботи спроектовано та реалізовано цифровий аналізатор шкідливих газів, призначений для підвищення рівня техногенної безпеки працівників правоохоронних органів під час проведення слідчих дій у середовищах із невідомими хімічними речовинами. Система базується на використанні напівпровідникових сенсорів серії MQ, що забезпечують детектування широкого спектра горючих газів та задимлення. Пристрій оснащений вузлом звукової сигналізації (п'єзоелектричним зумером), який активується у разі перевищення гранично допустимих концентрацій (ГДК) небезпечних сполук.

На Рис.3.5 представлено напівпровідниковий датчик серії MQ-2, призначений для детектування диму, зрідженого нафтового газу (LPG), бутану, пропану та інших горючих сумішей. Конструкція включає сталеву захисну сітку (фільтр-полум'ягасник), бакелітову або керамічну основу та шість вивідних контактів для інтеграції у вимірювальну схему.

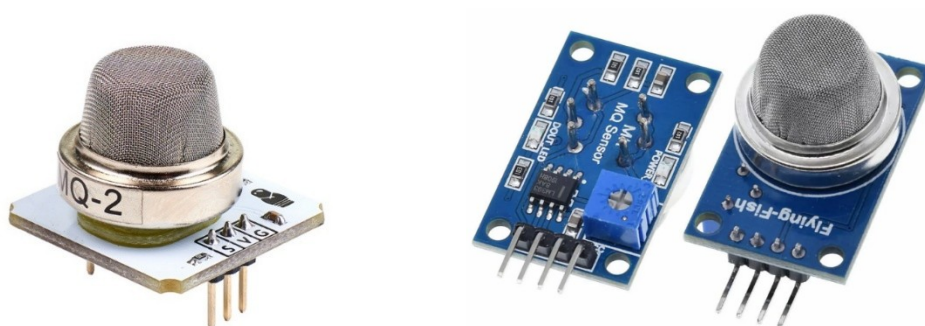


Рис. 3.5. Комбінований датчик горючих газів та диму серії MQ-2

Напівпровідниковий датчик MQ-2 характеризується високою чутливістю до продуктів горіння (диму) та широкого спектра горючих і вибухонебезпечних газів. До переліку цільових сполук, що підлягають детектуванню, належать: зріджені вуглеводневі гази (LPG): пропан, бутан;

природний газ: метан (CH_4); легкозаймісті пари та гази: водень (H_2), випари етилового спирту; аерозольні частки: дим різного походження.

Електричний опір сенсора варіюється залежно від хімічної природи та концентрації детектованого газу. Модуль датчика оснащений інтегрованим потенціометром, який дозволяє регулювати поріг чутливості цифрового виходу (D0). Це забезпечує можливість точного налаштування моменту спрацювання компаратора відповідно до встановлених вимог щодо реєстрації газових сумішей у навколишньому середовищі.

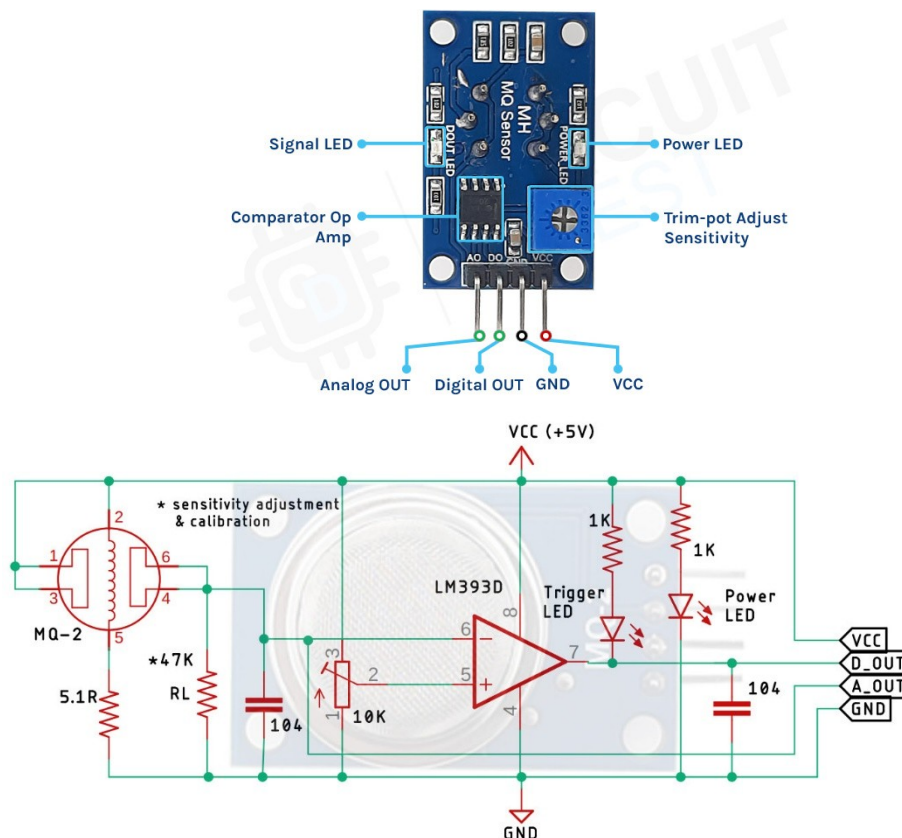


Рис. 3.6. Типовий інтерфейсний модуль для датчиків серії MQ

На Рис.3.6 представлено друковану плату модуля, що забезпечує коректну роботу газоаналізатора. До складу інтерфейсного модуля входять: 1. компаратор (на базі LM393): для формування дискретного сигналу на цифровому виході (D0); 2. підлаштовний резистор (потенціометр): для регулювання порогу спрацювання сигналізації; 3. світлодіодна індикація: відображає наявність живлення та стан детектування газу; вихідні контакти: VCC, GND, аналоговий (AO) та цифровий (DO) виходи.

Вихідна напруга датчика серії MQ є функцією від концентрації газу в повітрі. В системі реалізована пряма пропорційна залежність: чим вищий вміст досліджуваного газу в атмосфері, тим більшим є значення напруги, що знімається з аналогового виходу. Це дозволяє мікроконтролеру точно інтерпретувати рівень небезпеки на основі зчитаних даних АЦП.

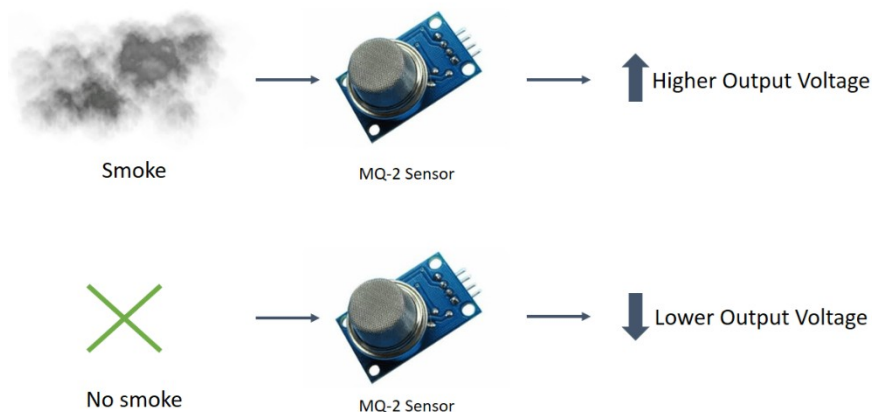


Рис. 3.7. Залежність рівня вихідної напруги від концентрації газу в навколишньому середовищі

Для взаємодії з мікроконтролером AVR модуль має чотири виводи: два для живлення та два для передачі сигналу. Вивід A0 генерує аналогову напругу, пропорційну концентрації газу, тоді як вивід D0 забезпечує дискретний сигнал залежно від налаштувань потенціометра. Призначення контактів інтерфейсного роз'єму наведено в Табл.3.7.

Таблиця 3.7. Спряження сенсора MQ-2 з МК архітектури AVR

Назва виводу (піна)	Тип сигналу	Підключення до МК AVR (на прикладі ATmega328P/Arduino)	Призначення
VCC	Живлення	Вивід 5V	Подача напруги живлення на датчик та нагрівач
GND	Живлення	Вивід GND	Спільний провід ("земля")
A0	Аналоговий	Аналогові входи (A0-A5)	Передача рівня напруги, пропорційного концентрації газу
D0	Цифровий	Цифрові входи (D0-D13)	Передача логічного сигналу про перевищення порогу
Назва виводу (піна)	Тип сигналу	Підключення до МК AVR (на прикладі ATmega328P/Arduino)	Призначення

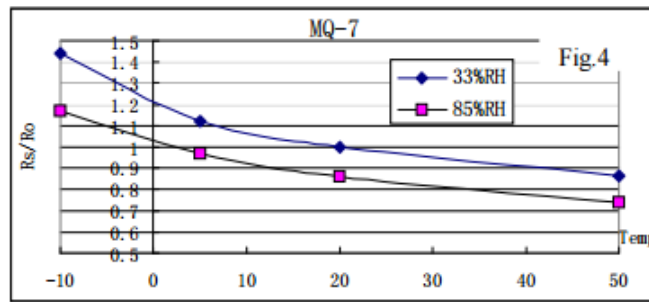


Рис. 3.8. Вплив температури та відносної вологості повітря на характеристики чутливості датчика

На графіку представлено залежність відносного опору датчика від кліматичних умов навколишнього середовища. Оскільки напівпровідниковий шар SnO_2 чутливий до вмісту водяної пари та теплового режиму, для отримання прецизійних результатів вимірювання шкідливих газів необхідно впроваджувати алгоритми температурної корекції. Це критично важливо для роботи пристрою в польових умовах, де коливання температури та вологості можуть призводити до появи додаткової похибки.

Точність газоаналізатора на базі MQ-датчиків залежить від температурно-вологісного режиму. Номінальні параметри визначені для температури 20°C та вологості 65%. Критичне значення вологості (понад 95%) унеможлиблює коректну реєстрацію показів. Оскільки специфікація не містить чіткого визначення типу вологості, для забезпечення високої точності в польових умовах рекомендується використовувати додаткову температурну компенсацію. На точність системи моніторингу впливає часовий дрейф параметрів датчиків MQ. Забруднення чутливого елемента та знос нагрівача призводять до відхилення показів від номінальних значень. Відповідно до рекомендацій виробника, після етапу попереднього прогріву слід провести калібрування, а надалі – регулярно коригувати робочі коефіцієнти. Корекція здійснюється шляхом порівняння результатів вимірювань із показниками еталонного обладнання.

Переведення напруги, виміряної датчиком MQ, у реальні показники концентрації (ppm або %) здійснюється на основі характеристик, зафіксованих у даташиті пристрою. Оскільки вихідний сигнал залежить від опору чутливого

шару, користувачу необхідно використовувати графічні залежності зі специфікації, щоб вивести математичну модель для обчислень.

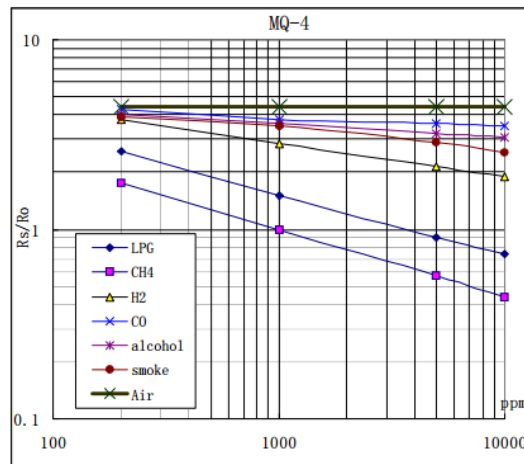


Рис. 3.9. Графік залежності резистивних характеристик датчика від рівня концентрації досліджуваних газів

Графічні дані з даташиту демонструють логарифмічну природу залежності та підтверджують здатність датчика реагувати на широкий спектр вуглецевмісних газів. Обчислення значень ppm на основі опору ускладнене нелінійністю робочої характеристики: оскільки графік перетинає кілька логарифмічних областей, реальна залежність значно відрізняється від спрощеної прямої лінії.

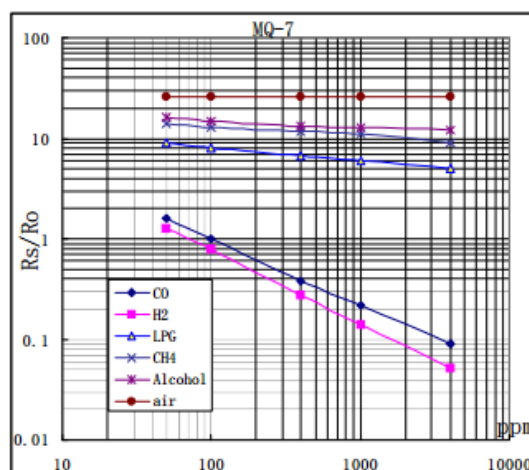


Рис. 3.10. Зміна вихідного опору датчика залежно від рівня концентрації досліджуваних сполук

Аналіз характеристик датчиків серії MQ дозволяє виділити їхні основні переваги та недоліки. Головним плюсом є їхня бюджетність. Проте експлуатація супроводжується такими мінусами:

1. Уніфікація бази: використання однакових матеріалів підкладки для різних типів газів.
2. Метеозалежність: сильний дрейф показів залежно від вологості та температури повітря.
3. Слабка селективність: пристрій реагує на сторонні газові домішки, що знижує точність ідентифікації конкретного газу.
4. Енерговитратність: високий струм споживання через постійну роботу нагрівального елемента.
5. Нестабільність: необхідність частого обслуговування, калібрування та врахування “старіння” сенсора.
6. Математична складність: відсутність лінійної залежності ускладнює програмне перетворення сигналу у фізичні величини.

Для мінімізації витрат можна використовувати датчик у чистому вигляді (без обв'язки). У такому разі розробник має самостійно додати навантажувальний резистор у схему вимірювання напруги. Для забезпечення гнучкості калібрування найкраще підійде підстроювальний компонент, номінал якого визначається згідно з характеристиками, зазначеними у даташиті приладу.



Рис. 3.11. Загальний вигляд електрохімічного датчика газу серії MQ

Альтернативний спосіб передбачає безпосереднє вимірювання резистивних параметрів датчика за допомогою омметра. Надалі ці значення трансформуються у необхідні одиниці вимірювання відповідно до аналітичних залежностей, вказаних у документації до пристрою.

Аналоговий датчик MQ у складі модуля. Постачається у вигляді плати із вмонтованим резистором, що спрощує підключення до мікроконтролерних систем. Схема функціонує як подільник напруги, тому доступним залишається

лише метод вимірювання напруги. Додаткові проміжні елементи при підключенні до аналогових входів не потрібні.



Рис. 3.12. Модуль датчика MQ, адаптований для підключення до АЦП

Готові модулі з аналоговим інтерфейсом є зручними завдяки попередньо встановленим компонентам обв'язки. Наявність на платі потенціометра дозволяє користувачу самостійно проводити калібрування вихідного сигналу. Оскільки існують версії як із можливістю регулювання, так і без неї, перевагу слід надавати моделям, що дозволяють здійснювати підстроювання під конкретні умови експлуатації.

Цифрові модифікації датчиків MQ. Цифрові версії датчиків MQ не передають числові дані про концентрацію. Слово “цифровий” означає лише наявність порогового виходу (дискретного сигналу), який спрацьовує як тригер при перевищенні заданого рівня. Фактичне зняття вимірювальних показів проводиться аналоговим шляхом, аналогічно до базових версій цих пристроїв.



Рис. 3.12. Модуль газового датчика MQ, оснащений виходами для порогового контролю та безперервного моніторингу

Апаратне забезпечення цифрового модуля датчика містить повний набір необхідних резисторів. У покращених модифікаціях передбачено два потенціометри: для калібрування чутливості сенсора та для налаштування порогу спрацювання цифрового сигналу. Наявність підсилювача у

преміальних версіях модулів дозволяє виносити датчик на значну відстань від контролера, забезпечуючи високу завадостійкість передачі аналогового сигналу.

Цифровий модуль датчика MQ з шиною I2C. Найбільш технологічним варіантом є сенсори MQ з підтримкою протоколу I2C. Вони дозволяють зчитувати дані в цифровому коді та створювати розгалужені вимірювальні мережі з багатьма вузлами на одній шині. Головною особливістю експлуатації таких систем є необхідність підведення окремої лінії живлення через високу енергозатратність термоелементів. Схематично модулі вже оснащені відповідними конфігураційними резисторами для коректної роботи сенсора.



Рис. 3.14. Модуль газоаналізатора серії MQ з інтегрованою підтримкою цифрового протоколу передачі даних

Приклади коду від виробника підтверджують, що пристрій видає необроблені дані, які переводяться в показники ppm програмним шляхом. Основна відмінність такої версії від базових аналогових моделей полягає лише в способі підключення через цифрову шину, тоді як алгоритми інтерпретації результатів залишаються спільними для всієї серії.

Організація живлення датчиків MQ. При проектуванні систем на базі MQ-сенсорів слід приділяти особливу увагу потужності джерела живлення. Через струм споживання нагрівача (близько 150 мА) не рекомендується використовувати для живлення вихідні піни МК, оскільки це спричиняє падіння напруги. Робочий самонагрів датчика до 40°C є допустимим, проте варто враховувати високе теплове навантаження на регулятор напруги, температура якого може підійматися до 70°C, що вимагає належного

Стабілізація робочих характеристик датчиків MQ потребує відокремленого живлення нагрівальних контурів. Це може бути реалізовано за допомогою окремого адаптера на 5 В (з номінальним струмом від 1 А) або через проміжний перетворювач напруги з 9-12 В до 5 В. Незалежно від обраної схеми, джерело живлення повинно мати достатню навантажувальну здатність для забезпечення коректної роботи термоелементів.

3.3. Параметри та особливості підключення РК-дисплея формату 2004

Символьні рідкокристалічні індикатори поєднують у собі низьку вартість, простоту впровадження та мале енергоспоживання. Такі модулі здатні відображати значні обсяги інформації та оснащені підсвіткою для роботи в темряві. Завдяки здатності функціонувати в межах $-20\text{ }^{\circ}\text{C} \dots +70\text{ }^{\circ}\text{C}$, вони ідеально підходять для складних умов експлуатації, зокрема в переносних та спеціалізованих бортових системах.

Мікросхема HD44780 здатна керувати масивом до 80 символів, що найчастіше реалізується у форматі 2 рядків по 40 знаків. При побудові дисплеїв 40x4 використовується пара таких контролерів. Підтримуються два типи знакогенераторів: зі структурою символу 5x7 або 5x10 точок. Попри велику кількість стандартизованих моделей (16x2, 20x4, 40x2 тощо), гнучкість контролера дозволяє створювати модулі з будь-якою кількістю символів у заданих межах пам'яті, що пояснює наявність на ринку нестандартних рішень на кшталт 8x1 або 32x2.

LCD2004A – це модуль відображення символьної інформації, що включає РК-матрицю та контролер, сумісний із популярними чіпами HD44780 (Hitachi) та KS0066 (Samsung). Модель має інтегровану світлодіодну систему підсвічування. Робоча область екрана дозволяє розмістити 80 символів (формат 20x4). Кожен символ генерується у полі 5x8 пікселів, а для чіткого візуального розділення між ними залишено інтервал в одну точку.

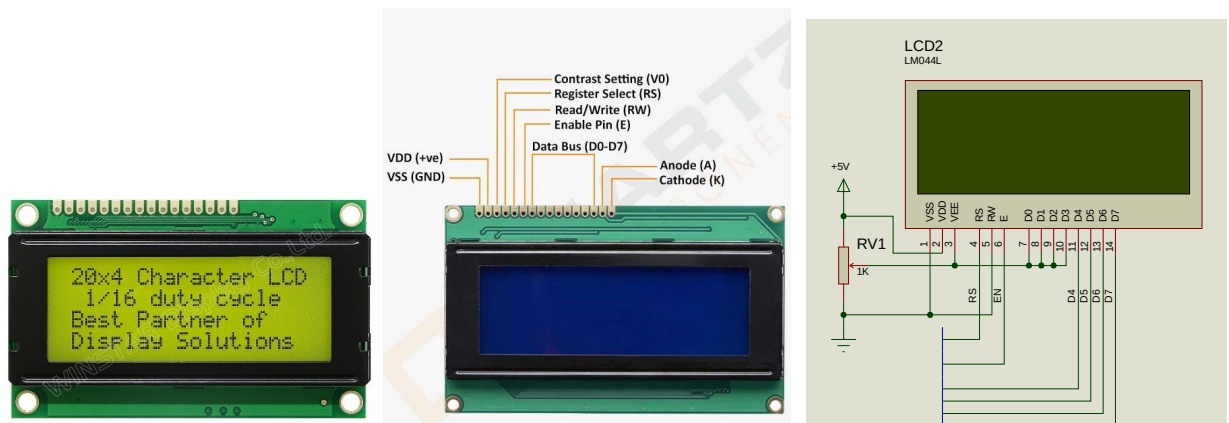


Рис. 3.15. Рідкокристалічний індикатор LCD2004A з можливістю відображення 4 рядків по 20 символів

Для виведення інформації на РКІ кожне знакомісце прив'язане до відповідної комірки оперативної пам'яті модуля. Апаратна частина пристрою включає блоки пам'яті для стандартних кодів та сегмент для створення унікальних символів користувача. Ці компоненти працюють у поєднанні з керуючою логікою, що забезпечує візуалізацію даних на панелі.

Функціональні параметри РКІ-модуля:

- Вбудована підтримка кириличного та англійського алфавітів із програмним вибором кодової сторінки.
- Вибір розрядності шини даних (4 або 8 біт) на етапі програмного запуску.
- Можливість зчитування та запису даних в оперативну пам'ять модуля.
- Інтерфейс дозволяє отримувати інформацію про поточний статус готовності пристрою.
- Наявність області пам'яті для 8 власних графічних об'єктів (символів користувача).
- Налаштовувані параметри відображення курсору та керування яскравістю екрана.

Програмне керування РКІ. Для ефективної розробки керуючих алгоритмів слід розглянути внутрішню будову чипа HD44780, що є стандартом для більшості символічних дисплеїв. Оскільки такі вузли, як драйвери сегментів, регістри зсуву та генератори знаків і курсору, працюють в автономному

режимі для підтримки стабільного зображення, вони не є об'єктами безпосереднього маніпулювання з боку керуючої програми.

Процес керування контролером базується на обміні даними між зовнішньою системою та внутрішніми регістрами IR і DR. Керуюча лінія RS слугує для вибору об'єкта звернення: логічний нуль адресує регістр команд, тоді як логічна одиниця – регістр даних. Залежно від встановленої конфігурації, дані через DR спрямовуються до відповідних областей пам'яті (DDRAM або CGRAM). Точне місце запису визначається автоматично за допомогою вбудованого лічильника адреси (AC). Всі команди, що потрапляють до регістра IR, проходять стадію інтерпретації апаратним блоком виконання. Для збереження інформації, що підлягає візуалізації на РК-панелі, передбачено область відеопам'яті загальною ємністю 80 байтів. Апаратна організація DDRAM передбачає поділ на два сегменти по 40 комірок у кожному. Цей принцип адресації залишається незмінним для будь-якого типу символного дисплея (від 80x1 до 20x4), що необхідно враховувати під час програмної розробки інтерфейсу користувача. Для підтримки стабільного зображення на РКІ контролер виконує постійну регенерацію інформації методом динамічного сканування. Рідкокристалічна матриця, залежно від конфігурації знакогенератора та кількості активних рядків, може мати 8, 11 або 16 рядів електродів. Кожен ряд об'єднує 200 сегментних електродів (виходячи з розрахунку 40 знакомісць на рядок), що дозволяє керувати великою кількістю пікселів при обмеженій кількості виводів.

Вбудований драйвер контролера HD44780 оснащений лише 40 виходами для керування сегментами (SEG1...SEG40), що дозволяє йому автономно обслуговувати дисплеї місткістю до 8 символів. Саме тому РК-модулі компактних форматів (наприклад, до 8x2) базуються на одному чипі. У пристроях із більшою кількістю знакомісць використовуються допоміжні мікросхеми драйверів (зокрема HD44100), кожна з яких забезпечує керування додатковими 40 сегментами. Логіка функціонування контролера HD44780 базується на системі внутрішніх прапорців, які визначають режими роботи

його окремих вузлів. Спеціалізовані функції для роботи з РКІ слугують програмним інтерфейсом між прикладним ПЗ на мові С та дисплейними модулями, що базуються на чипах Hitachi HD44780 або їхніх функціональних аналогах.

3.4. Проектування цифрового детектора шкідливих газів

Проектований цифровий аналізатор призначений для оперативного моніторингу концентрації токсичних газів і випарів з метою захисту особового складу поліції під час слідчих дій на об'єктах із хімічною загрозою. Система забезпечує безперервний вимір показників повітряного середовища, активуючи звукове та світлове сповіщення у разі фіксації небезпечних рівнів забруднення. Візуалізація даних здійснюється на локальному дисплеї та передається через послідовний порт для подальшого аналізу. Структурна схема пристрою, що поєднує апаратний та програмний комплекси, наведена на Рис. 3.16. Основу апаратної частини складає мікроконтролер AVR ATmega32, який здійснює обробку сигналів від датчиків серії MQ (газ/дим) та DHT22 (температура/вологість) з подальшим виведенням результатів на символічний РК-індикатор формату 20x4.

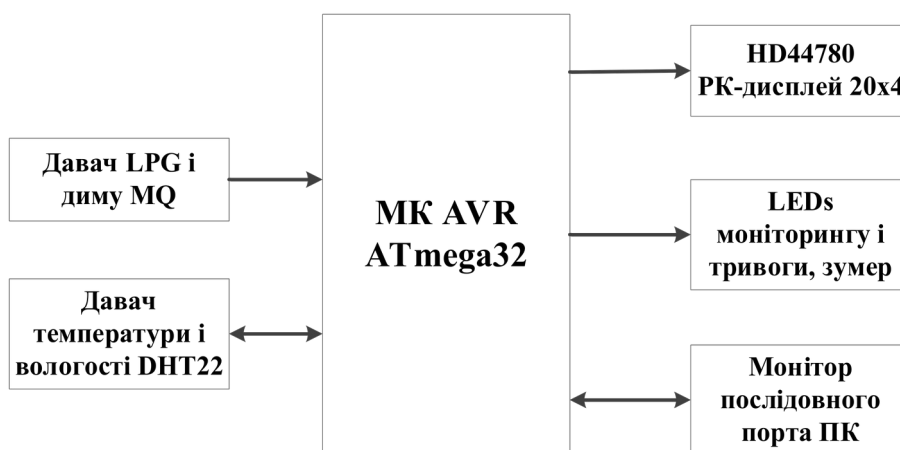


Рис. 3.16. Блок-схема розробленого газоаналізатора на базі мікроконтролера архітектури AVR

Основним завданням мікроконтролера AVR ATmega32 є збір та аналіз інформації, що надходить від датчиків. Після обробки дані транслюються на

рідкокристалічний екран та передаються у термінал через послідовний інтерфейс. У разі детектування критичного рівня концентрації токсичних речовин система автоматично активує засоби тривожної сигналізації: червоний світлодіодний індикатор та звуковий зумер. На рис. 3.18 представлено результати проектування апаратної складової газоаналізатора у середовищі моделювання Proteus ISIS.

Для первинної обробки сигналу з датчика серії MQ (газодетектора) використано компаратор на базі ОП LM393, увімкнений за інвертуючою схемою. Вхідний сигнал із датчика MQ під'єднано до інвертуючого входу підсилювача та паралельно до порту PA0 МК ATmega32 для подальшого аналого-цифрового перетворення. Неінвертуючий вхід слугує для встановлення порогу спрацювання за допомогою потенціометра RV2. Логіка роботи вузла полягає в наступному: якщо напруга датчика нижча за опорну, вихідний сигнал відповідає рівню напруги живлення. У протилежному випадку, коли вхідний сигнал стає більшим за опорний, потенціал на виході падає до 0 В, ініціюючи світлову індикацію за допомогою світлодіода D3.

Апаратна конфігурація пристрою передбачає підключення виходу DATA цифрового гігрометра-термометра DHT22 до виводу PD3 мікроконтролера. Візуальне сповіщення про поточний статус (моніторинг/тривога) реалізовано за допомогою світлодіодних індикаторів на портах PD6 та PD7. Взаємодія з ПК або іншим терміналом по послідовному каналу UART забезпечується через перехресне підключення ліній до виводів PD0 та PD1. Окрему увагу приділено вузлу звукової сигналізації: для посилення сигналу зумер BUZ1 підключено до піна PD5 через польовий транзистор BS170, що працює в режимі ключа.

Для візуалізації даних у пристрої використано символічний РК-дисплей, підключений за 4-бітною схемою до порту С (піни PC2–PC7). Програмне керування меню реалізовано за допомогою чотирьох функціональних кнопок, підключених до порту В. Зокрема, кнопка MENU/ENTER задіяна на піні PB2, що дозволяє використовувати апаратні переривання. Навігаційні кнопки

SELECT+, SELECT- та клавіша виходу EXIT підключені до ліній PB0, PB1 та PB3 відповідно, що забезпечує повний цикл керування параметрами аналізатора.

На Рис. 3.17 представлено повну принципову схему апаратної складової цифрового аналізатора токсичних газів. Проектування та верифікація роботи пристрою, призначеного для оперативного хімічного контролю під час розслідування правопорушень, здійснювалися з використанням інструментів САПР Proteus VSM (ISIS).

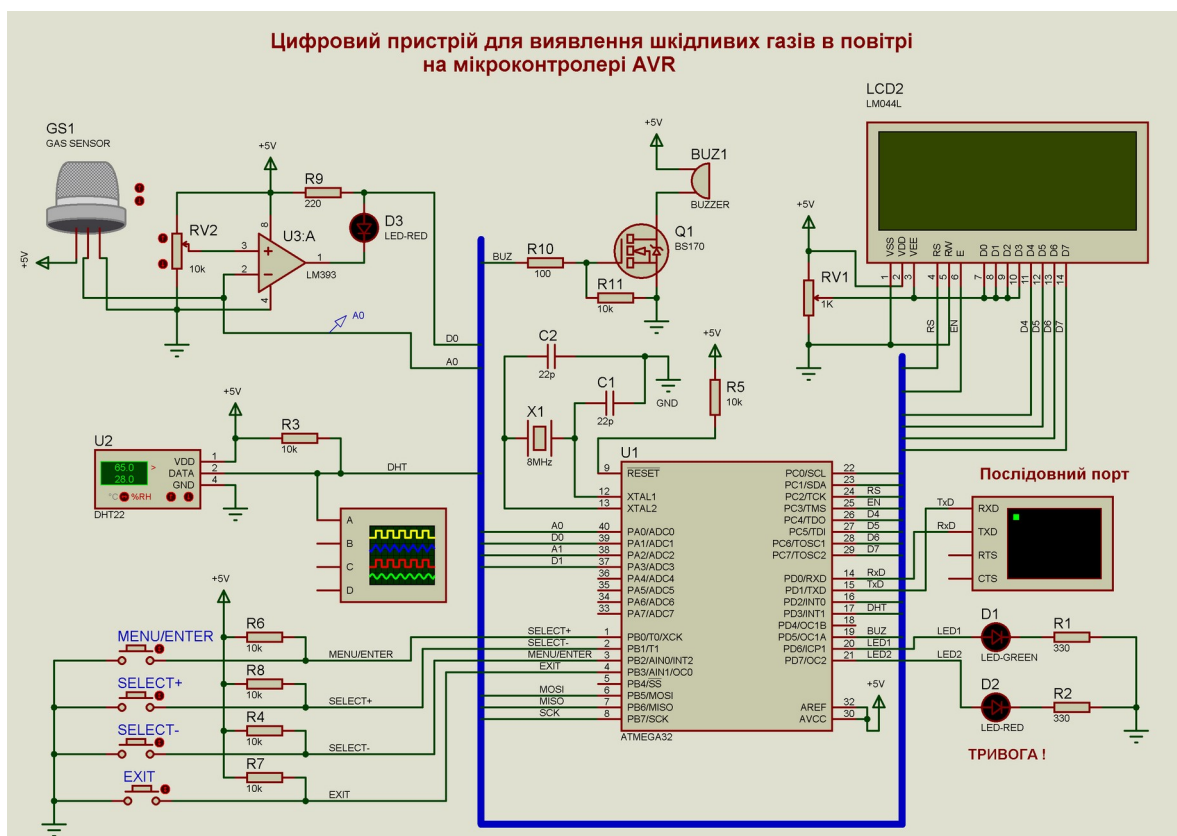


Рис. 3.17. Схемотехнічна модель апаратного забезпечення газоаналізатора в середовищі Proteus VSM

РОЗДІЛ 4

АЛГОРИТМІЧНЕ ТА ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЦИФРОВОГО ДЕТЕКТОРА ШКІДЛИВИХ ГАЗІВ

4.1. Методика калібрування газових датчиків MQ

Процедура калібрування є критичним етапом налаштування аналізатора, оскільки вона дозволяє адаптувати вихідний сигнал сенсора до реальних значень концентрації газу. На Рис. 4.1 наведено графік чутливості, який слугує базою для розрахункового алгоритму. Алгоритм включає такі кроки:

1. Прогрівання: Досягнення стабільної температури нагрівального елемента.
2. Балансування: Вимірювання базового опору в умовах відсутності сторонніх газів.
3. Екстраполяція: Використання значень з графічної характеристики для обчислення фактичного рівня ppm на основі вихідної напруги.

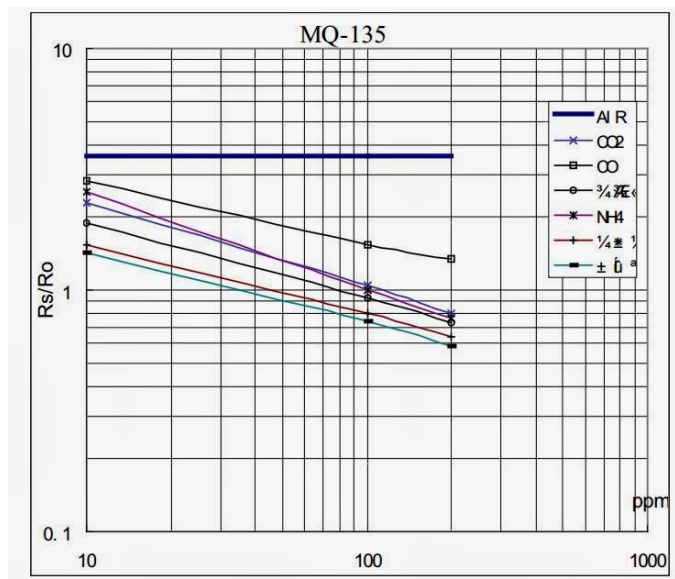


Рис. 4.1. Графік залежності відносного опору датчика від концентрації детектованих газів (у частках на мільйон, ppm).

Алгоритм апроксимації кривої чутливості. Оскільки графік чутливості датчиків MQ має нелінійний характер, для обчислень використовується

степенева апроксимація. Основне рівняння для визначення концентрації в одиницях ppm базується на відношенні поточного опору R_s до базового R_0 :

$$ppm = a \cdot \left(\frac{R_s}{R_0} \right)^b$$

Коефіцієнти a та b є специфічними для кожного газу та знаходяться шляхом логарифмічного вирівнювання кривої. Звідси, значення базового опору R_0 , необхідне для подальшої роботи алгоритму, розраховується як:

$$R_0 = R_s \cdot \left(\frac{a}{ppm} \right)^{\frac{1}{b}}$$

Що в програмній реалізації для мікроконтролера AVR зручно подати через логарифмічну функцію:

$$R_0 = R_s \cdot e^{\frac{\ln(a/ppm)}{b}} \quad (4.1)$$

Перед використанням формули (4.1) потрібно розрахувати поточний опір R_s через значення АЦП:

$$R_s = R_L \cdot \frac{1023 - ADC_{val}}{ADC_{val}} \quad (4.2)$$

Алгоритм отримання еталонних значень для датчиків MQ. Процес калібрування передбачає порівняння реальних показників опору сенсора з відомим рівнем забруднення повітря. Визначення R_s : Вимірювання вихідного опору датчика в поточних умовах. Отримання опорних даних: Запит актуального рівня концентрації газів (наприклад, CO_2) через спеціалізовані онлайн-платформи моніторингу атмосфери. Обчислення R_0 : Розрахунок калібрувальної константи за отриманим еталонним значенням. Використання зовнішніх верифікованих даних дозволяє мінімізувати похибку вимірювань та забезпечити достовірність роботи газоаналізатора.

Метрологічні характеристики датчиків серії MQ обмежують діапазон детектування певними рамками, вказаними у специфікації. Для математичного опису цих меж у кодї прошивки використовується зворотне перетворення степеневі функції. Таким чином, граничний рівень відношення опору сенсора

до його базового значення (R_s/R_0) визначається на основі цільового рівня концентрації (ppm) та коефіцієнтів регресії:

$$R_s / R_{0_limit} = \sqrt[b]{\frac{ppm}{a}} \quad (4.3)$$

Межі (R_s/R_{0_limit}) використовуються для перевірки валідності даних, щоб уникнути помилкових спрацювань тривоги, коли значення виходять за рамки лінійності датчика. Де: ppm – межа реєстрації газу (наприклад, для MQ-135 по NH_3 це 10–300 ppm); a , b – коефіцієнти апроксимації для конкретної кривої чутливості. Використання формули (4.3) дозволяє реалізувати в кодї МК АТmega32 алгоритм перевірки: якщо виміряне значення R_s/R_0 виходить за межі розрахованих значень, пристрій інформує користувача про вихід за межі діапазону вимірювання.

Приклад розрахунку параметрів для детектування CO_2 . Розглянемо процес калібрування сенсора для вимірювання концентрації вуглекислого газу (CO_2). На основі результатів степеневої регресії графічних характеристик датчика було отримано наступну залежність:

$$ppm = 116,602 \cdot (R_s / R_0)^{-2.769} \quad (4.4)$$

Для проведення точного налаштування пристрій пройшов етап попереднього прогрівання протягом 24 годин на відкритому повітрі. Враховуючи, що середня фоновая концентрація CO_2 в атмосфері на момент вимірювання становить 392 ppm, а отримане значення вихідного опору сенсора R_s дорівнює 26954 Ом, розрахункове значення базового опору R_0 становить 41763 Ом.

Для нашого проекту важливо мати конкретні цифри, щоб підкріпити результати моделювання в Proteus. Оскільки згадано MQ-135 (поширений для вуглекислого газу та аміаку) та MQ-2 (димув та горючих газів), розрахуємо граничні значення для одного з найпопулярніших сенсорів у таких системах – MQ-135. Нижче наведено таблицю з розрахованими коефіцієнтами та межами відношення R_s/R_0 .

Таблиця 4.1. Коефіцієнти та межі реєстрації для датчика MQ-135

Газ	Масштабний коефіцієнт (a)	Експонента (b)	Межа концентрації (ppm)	Розрахункова межа R_s/R_0
Аміак (NH ₃)	102,2	-2,47	10 – 300	2,54 – 0,65
Бензол (C ₆ H ₆)	47,5	-2,86	10 – 200	1,72 – 0,58
Вуглекислий газ (CO ₂)	110,5	-2,89	10 – 1000	2,29 – 0,46

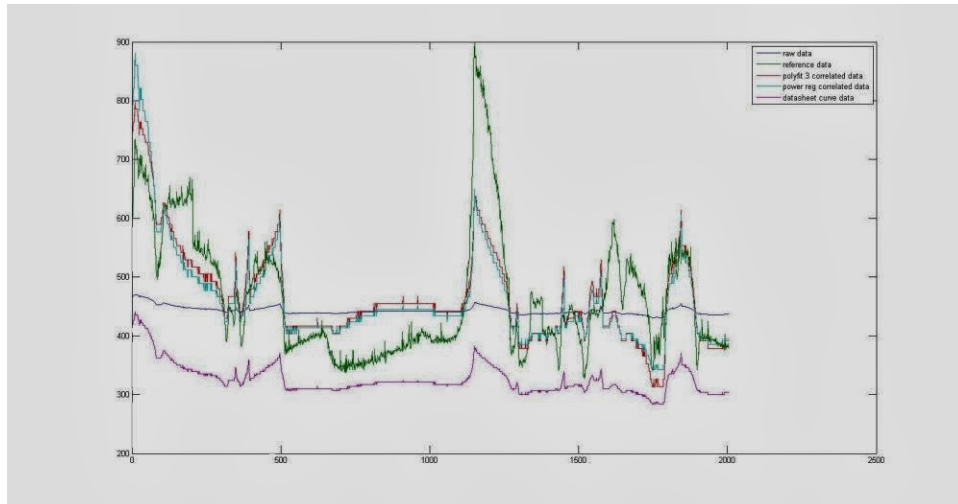


Рис. 4.2. Результати кореляції

Аналіз результатів кореляції та параметризація моделі. На Рис. 4.2 представлено результати кореляційного аналізу, проведеного в середовищі MATLAB. Для апроксимації отриманих даних було застосовано степеневу регресію та метод підгонки поліноміальної кривої. Основною метою цього етапу є перетворення вихідних сигналів сенсора у значення опору з подальшим визначенням масштабного коефіцієнта та експоненти для обчислювальних алгоритмів мікроконтролера. Для забезпечення високої точності відгуку було прийнято базове значення опору $R_0=41000$ Ом. В ході експерименту встановлено наступні параметри: масштабний коефіцієнт $a=56,0820$ та показник степеня (експонента) $b=-5,9603$. Індивідуальне калібрування параметра R_0 є критично важливим, оскільки фізичні характеристики напівпровідникових сенсорів мають значний технологічний розкид. При виміряному значенні опору $R_s=26954$ Ом використання уточнених коефіцієнтів у математичній моделі (4.5) дозволяє мінімізувати похибку визначення концентрації:

$$ppm = a \cdot (R_s / R_0)^b \quad (4.5)$$

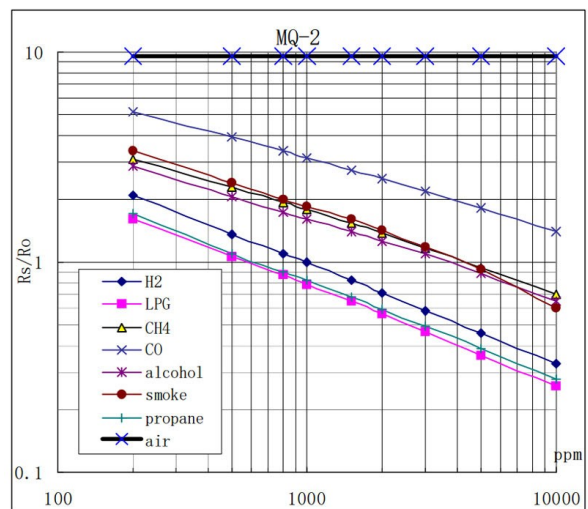
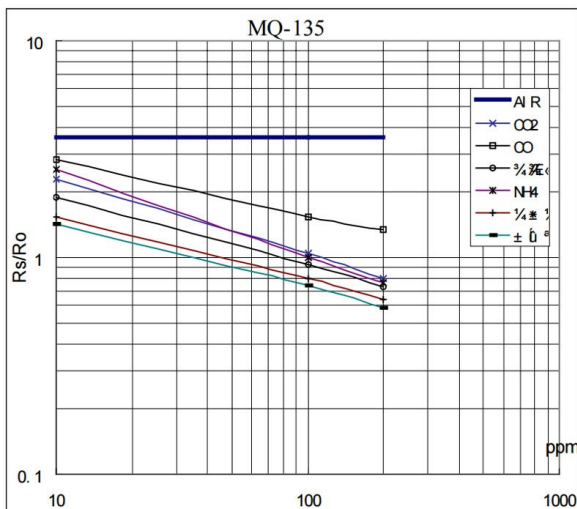
Таблиця 4.2. Кореляційні коефіцієнти та динамічний діапазон відгуку датчиків серії MQ

Датчик	Цільовий газ	Коефіцієнт a	Експонента b	$\min R_s/R_0$	$\max R_s/R_0$
MQ-2	LPG (Зріджений газ)	591,2830	-2,0765	0,2562	1,6854
MQ-3	Alcohol (Спирт)	0,3923	-1,4932	0,1143	2,4978
MQ-4	CH ₄ (Метан)	1041,3330	-2,7290	0,4365	1,8305
MQ-5	CH ₄ (Метан)	217,4972	-2,4221	0,2059	1,0352
MQ-6	LPG (Зріджений газ)	940,2178	-2,5216	0,3916	1,8475
MQ-7	H ₂ (Водень)	64,8652	-1,4053	0,0532	1,2035
MQ-8	H ₂ (Водень)	1079,6830	-0,6417	0,0312	13,8407
MQ-135	CO ₂ (Вуглекислий газ)	110,3794	-2,7217	0,8038	2,4164

Методика визначення електричних параметрів сенсора. Для розрахунку поточного опору напівпровідникового шару датчика (R_s) використовується схема дільника напруги з відомим навантажувальним резистором (R_L). Значення опору обчислюється на основі вимірної напруги на навантаженні (V_{RL}) та напруги живлення кола (V_c) за формулою:

$$R_s = \left(\frac{V_c}{V_{RL}} - 1 \right) \cdot R_L \quad (4.6)$$

Для практичного застосування кореляційної функції необхідно попередньо визначити базовий опір R_0 , який є індивідуальною константою конкретного екземпляра сенсора. Це значення розраховується шляхом зчитування опору R_s в умовах відомої концентрації цільового газу (ppm) за наступною залежністю:



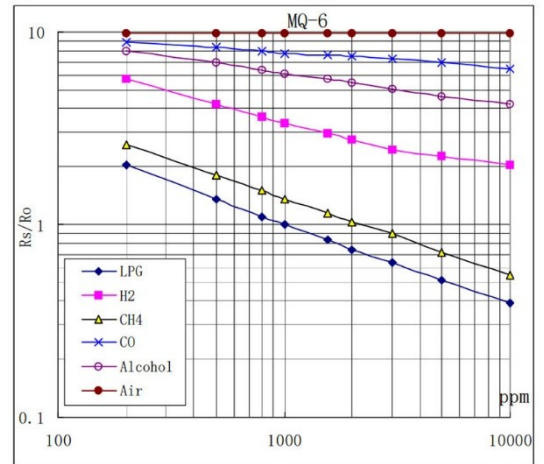
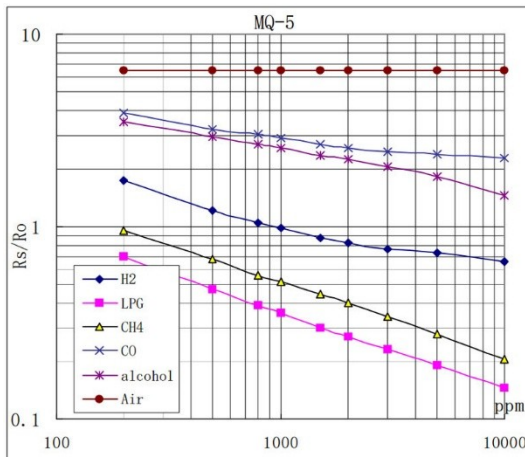
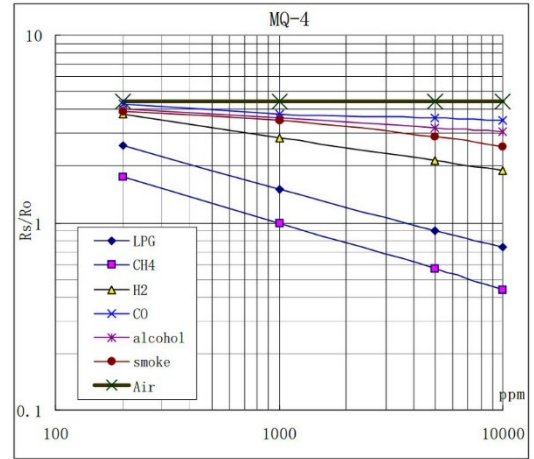
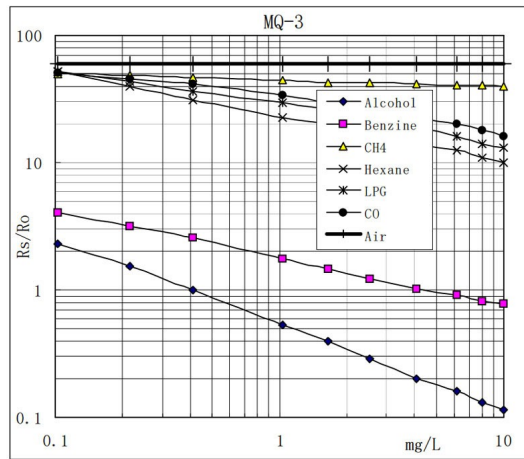


Рис. 4.3. Характеристики чутливості напівпровідникових датчиків:
залежність відношення опорів R_s/R_0 від концентрації газу (ppm)

На Рис. 4.4 представлена блок-схема алгоритму калібрування датчиків серії MQ, який інтегрований у загальну структуру програмного забезпечення аналізатора. Процес калібрування є обов'язковим етапом після кожного ввімкнення пристрою для забезпечення метрологічної точності вимірювань.

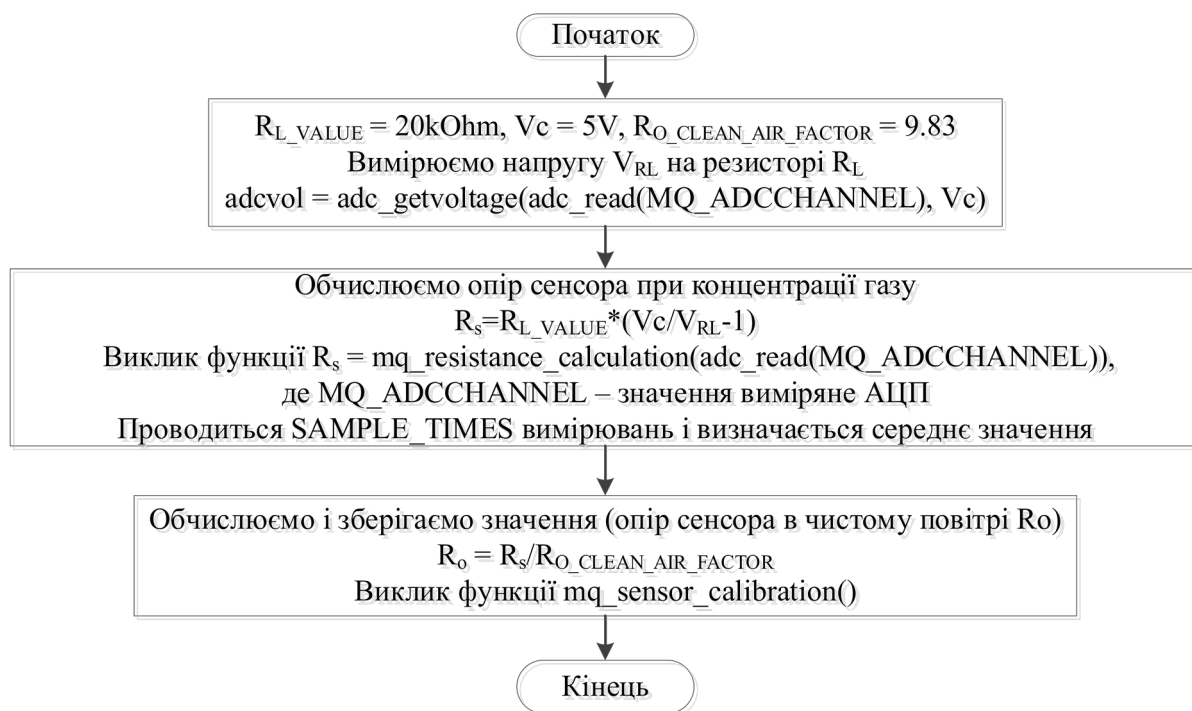


Рис. 4.4. Логічна структура алгоритму процедури калібрування датчиків MQ

4.2. Алгоритм функціонування аналізатора шкідливих газів

Основними компонентами програмного забезпечення є алгоритми опитування датчиків та логіка прийняття рішень щодо активації тривожного сповіщення. На Рис. 4.5 представлено загальну блок-схему головного циклу роботи пристрою. Алгоритм включає ініціалізацію периферії (LCD, ADC, UART, порти введення-виведення) та перехід до безперервного моніторингу повітряного середовища. На Рис. 4.6 деталізовано логіку обробки подій. Програма виконує циклічне зчитування даних з датчиків серії MQ та термогігрометра DHT22, що дозволяє динамічно коригувати результати вимірювань залежно від параметрів довкілля. Алгоритм працює за принципом порівняння поточного значення концентрації газу (ppm) із встановленим програмним порогом (ppm_{limit}).

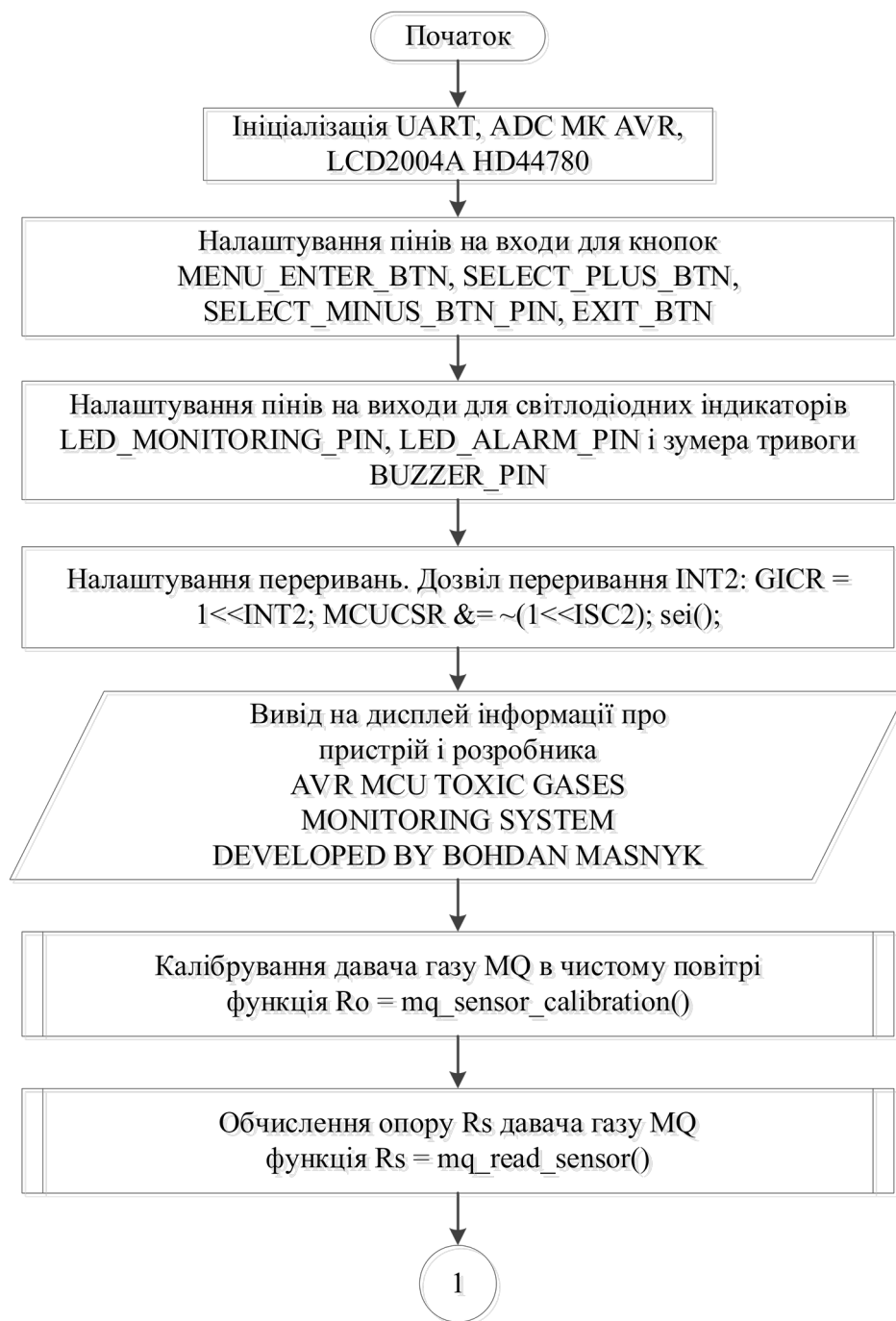


Рис. 4.5. Блок-схема функціонування цифрового аналізатора (ініціалізація периферії та калібрування датчика газу)

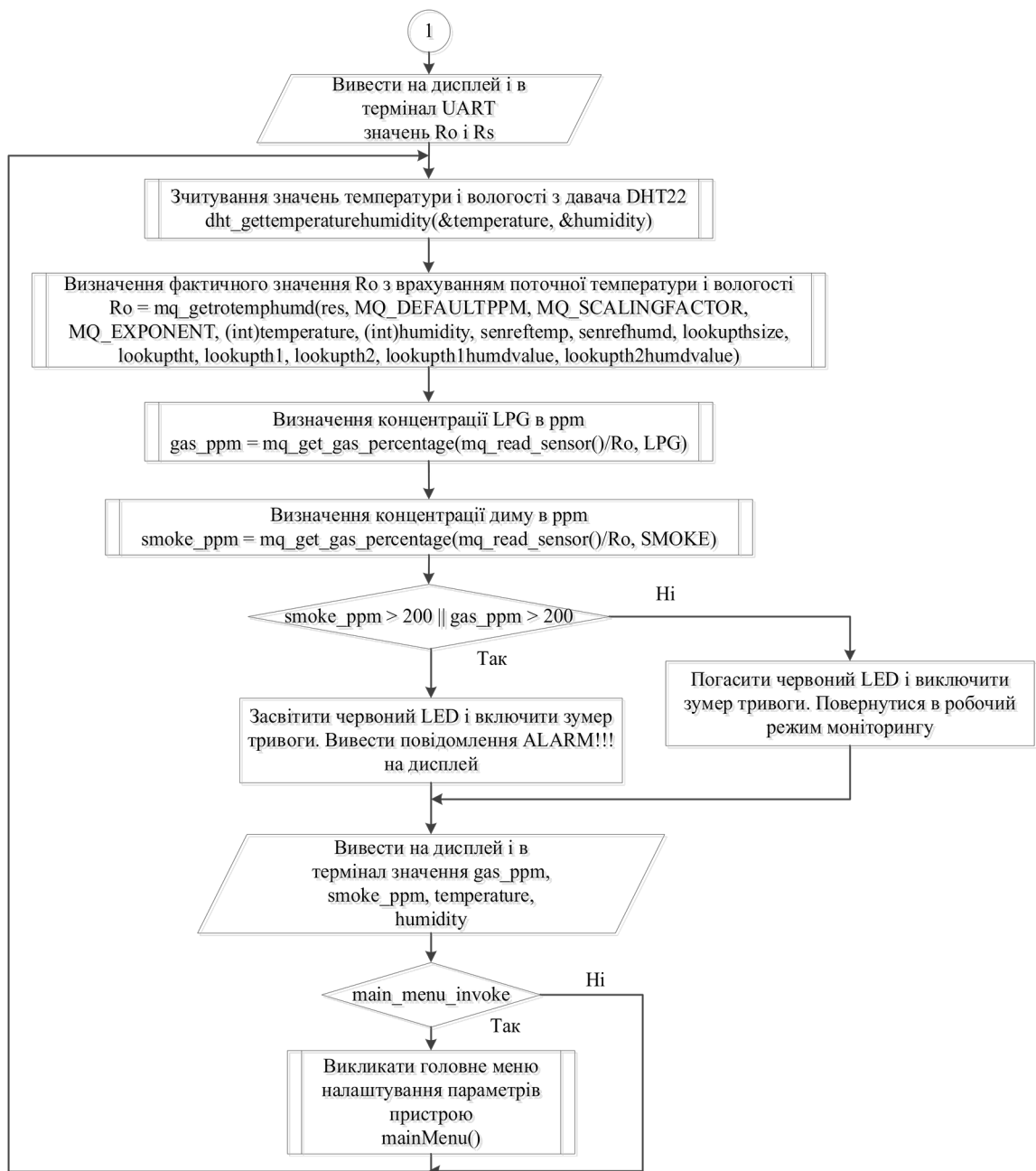


Рис. 4.6. Алгоритм опитування датчиків, визначення концентрації LPG та диму, обробки критичних станів та активації системи екстреного сповіщення

Процедура стартової конфігурації апаратної частини. Після активації МК AVR ATmega32 виконується послідовна підготовка периферійних вузлів до роботи. Програмний код ініціалізує інтерфейс UART для зв'язку з терміналом та модуль АЦП для оцифрування даних. Паралельно здійснюється ініціалізація драйвера РК-індикатора та встановлення напрямку передачі даних для портів (GPIO): кнопки керування визначаються як входи, а

індикатори стану та звуковий оповіщувач – як виходи. Особлива увага приділяється налаштуванню регістра GICR та MCUCSR для активації переривання INT2, що забезпечує миттєву реакцію системи на дії користувача. Глобальний дозвіл переривань активується прапорцем I в регістрі статусу.

Алгоритм початкового моніторингу та калібрування датчика. Після успішного завершення етапу ініціалізації на рідкокристалічний дисплей виводиться сервісна інформація про назву пристрою та його розробника. Далі мікропрограма переходить до критично важливого етапу – калібрування газового датчика серії MQ. Процедура виконується за допомогою спеціалізованої функції mq_sensor_calibration(), результатом роботи якої є визначення базового опору R_0 . В основі цього процесу лежить зчитування поточного опору чутливого елемента (R_s) через функцію mq_read_sensor(). Для забезпечення точності подальших обчислень у програмному забезпеченні заздалегідь визначено набір констант та розрахункових коефіцієнтів, що відповідають фізичним характеристикам обраного типу газу.

```
/* Визначення інтерфейсу кнопок керування (Port B) */
#define BTN_INT_PORT PORTB
#define BTN_INT_PIN PINB
#define BTN_INT_DDR DDRB
#define BTN_MENU 2
#define BTN_PLUS 0
#define BTN_MINUS 1
#define BTN_EXIT 3

/* Конфігурація системи візуальної та звукової сигналізації (Port D) */
#define INDICATOR_DDR DDRD
#define INDICATOR_PORT PORTD
#define PIN_LED_WORK 6
#define PIN_LED_WARN 7
#define PIN_BUZZER 5

/* Налаштування обробки даних з сенсора MQ */
#define BAUD_RATE 9600 // Швидкість послідовного порту
#define MQ_ADC_IN 0 // Вхідний канал сенсора
#define MQ_RL_RESISTOR (20.0) // Опір навантаження (кОм)
#define MQ_AIR_RATIO (9.83) // Базова константа чистого середовища

/* Параметри апроксимації характеристичних кривих (LPG та SMOKE) */
// Дані зберігаються у вигляді: {логарифм_X, логарифм_Y, нахил_прямої}
float LPGCurve[3] = {2.3, 0.20, -0.45};
float SmokeCurve[3] = {2.3, 0.53, -0.43};
```

Програмний код містить блок дефініцій, що описують фізичне підключення елементів системи до мікроконтролера. Порт В відведено під вхідні сигнали від клавіш керування (меню, вихід, зміна значень). Порт D відповідає за вихідні сигнали: роботу світлодіодів моніторингу та тривоги, а також активацію звукового випромінювача. Особлива увага приділена обробці даних з газоаналізатора. Використовується канал АЦП 0. Для перетворення отриманої напруги в реальні показники концентрації (PPM) введено константи опору та масиви значень для апроксимації кривих LPG та диму. Розрахунок ведеться через логарифмічну залежність, де масиви LPGCurve та SmokeCurve зберігають параметри нахилу прямої, що дозволяє отримати точні результати вимірювань у широкому діапазоні концентрацій.

Після завершення ініціалізації периферійних вузлів та успішного калібрування датчика серії MQ, пристрій переходить до основного робочого режиму. У цьому режимі здійснюється безперервний контроль вмісту токсичних домішок у повітрі. При зафіксованому перевищенні гранично допустимих концентрацій (ГДК) програмне забезпечення ініціює перехід системи в режим тривожного оповіщення. Процес моніторингу реалізовано у вигляді нескінченного циклу, що забезпечує стабільну роботу аналізатора. У межах кожного ітераційного кроку циклу виконується опитування цифрового датчика DHT22 для отримання актуальних показників температури та відносної вологості середовища:

```
if(dht_gettemperaturehumidity(&temperature, &humidity) != -1) {  
    sprintf(printbuff, "Temp: %.1f°C\r\nHumi: %.1f%%\r\n", temperature, 0xb0, humidity);  
    uart_puts(printbuff); }
```

У межах основного циклу програма здійснює вимірювання напруги V_{RL} на навантажувальному резисторі R_L за допомогою вбудованого АЦП мікроконтролера. На основі отриманого цифрового коду, значень V_{RL} , R_L та напруги живлення V_c розраховується поточний опір сенсора R_s . Для мінімізації похибки, спричиненої впливом зовнішнього середовища, реалізовано алгоритм динамічного уточнення базового опору R_0 . За допомогою функції

`mq_getrotemphumd()` виконується корекція значення R_0 з урахуванням актуальних показників температури та вологості, отриманих від сенсора DHT22. Програма використовує метод табличної апроксимації (lookup tables), порівнюючи поточні умови з еталонними значеннями (`senreftemp`, `senrefhumd`), що дозволяє отримати максимально точне значення R_0 для поточного стану атмосфери.

Обчислювальне ядро мікроконтролера використовує отримане значення R_s та калібрувальну константу R_0 для визначення фактичного рівня ppm. Процедура базується на виклику функції `mq_get_gas_percentage()`, яка апроксимує криву чутливості сенсора для конкретного типу газу. В основному циклі програми реалізовано зчитування показників для зрідженого газу (`gas_ppm`) та диму (`smoke_ppm`). Функція приймає як аргумент нормоване значення опору (`mq_read_sensor()/R_0`) та константу типу газу, що дозволяє системі оперативно реагувати на появу специфічних хімічних сполук у зоні проведення слідчих дій.

Завершальним етапом циклу обробки даних є виведення параметрів навколишнього середовища на РК-індикатор та передача звіту через інтерфейс UART. Паралельно з візуалізацією пристрій виконує логічну перевірку стану вимірювального тракту. Режим тривоги активується при детектуванні небезпечних концентрацій шкідливих газів, що супроводжується світловою та звуковою індикацією. Алгоритм передбачає автоматичне скидання стану тривоги (“hysteresis-like behavior”), якщо виміряні параметри повертаються в межі норми. Це забезпечує автономність роботи аналізатора та дозволяє використовувати його як елемент системи безпеки для правоохоронців під час роботи в польових умовах.

Програмний код реалізує функцію компаратора, що порівнює виміряні величини з константою безпеки. Керування периферійними пристроями здійснюється через маніпуляції з регістрами вихідних портів (`PORTD` або `PORTB`):

```
if (smoke_ppm > 200 || gas_ppm > 200) // Перевірка умови перевищення порогу
```

```

{
  // Активація засобів оповіщення
  LED_PORT &= ~(1 << LED_MONITORING_PIN); // Вимкнути "Норма"
  LED_PORT |= 1 << LED_ALARM_PIN;      // Увімкнути "Тривога"
  BUZZER_PORT |= 1 << BUZZER_PIN;      // Активувати зумер
  LCDGotoXY(13, 3); LCDstring("ALARM!"); // Вивід на дисплей
  uart_puts("ALARM!!!\r\n");          // Передача через UART
}
else
{
  // Повернення до штатного режиму
  LED_PORT &= ~(1 << LED_ALARM_PIN); // Вимкнути "Тривога"
  BUZZER_PORT &= ~(1 << BUZZER_PIN); // Вимкнути зумер
  LED_PORT ^= (1 << LED_MONITORING_PIN); // Індикація активності системи
  LCDGotoXY(13, 3); LCDstring("  "); // Очищення повідомлення на РКД
}

```

Керування інтерфейсом пристрою побудоване на використанні зовнішніх переривань, що гарантує миттєву реакцію системи на дії оператора. Обробник переривання ISR(INT2_vect) виступає в ролі ініціатора події, встановлюючи службу змінну-прапорець. Такий підхід дозволяє винести ресурсомісткі операції, як-от оновлення графічної інформації на дисплеї (LCDclr()) та виконання логіки меню (mainMenu()), за межі критичного сектора переривання. Це запобігає затримкам у роботі фонових процесів (моніторингу концентрації газів) та переповненню стека. Після завершення сеансу налаштувань програма автоматично повертається до виконання основного вимірювального циклу.

4.3. Програмна реалізація взаємодії з датчиком газів серії MQ

Для забезпечення коректного зчитування та обробки даних з датчика MQ було спроектовано спеціалізований програмний модуль. До його складу входять наступні функціональні компоненти:

- `mq_sensor_calibration()`: процедура визначення базового опору сенсора (R_0) у середовищі чистого повітря. Алгоритм базується на обчисленні поточного опору R_s через функцію `mq_resistance_calculation` з подальшим нормуванням на коефіцієнт `RO_CLEAN_AIR_FACTOR` (становить 9,83 відповідно до технічної документації).

- `mq_resistance_calculation(int raw_adc)`: математична модель для знаходження опору сенсора R_s . Розрахунок виконується на основі отриманого цифрового коду АЦП, розглядаючи схему підключення як дільник напруги між датчиком та еталонним навантажувальним резистором R_L .
- `mq_read_sensor()`: функція для збору первинних даних. Вона забезпечує вимірювання опору R_s із можливістю налаштування кількості ітерацій та часових проміжків між ними через макроси для фільтрації шумів.
- `mq_get_percentage(float rs_ro_ratio, float *pcurve)`: ядро обчислювальної логіки, що перетворює відношення R_s/R_0 у фізичну концентрацію газу (ppm). Метод використовує апроксимацію логарифмічної характеристики сенсора за допомогою координат опорних точок та кутового коефіцієнта (slope). Остаточний результат отримується шляхом потенціювання логарифмічного значення.
- `mq_get_gas_percentage(float rs_ro_ratio, int gas_id)`: функція-селектор, яка залежно від типу цільового газу передає відповідні масиви кривих у загальну функцію обчислення ppm.

Детальний програмний лістинг модуля представлено у додатку 1.

4.4. Програмне забезпечення для керування рідкокристалічним індикатором LCD2004A

Взаємодія з символьним дисплеєм формату 20x4, побудованим на базі драйвера HD44780, реалізована за допомогою набору функцій спеціалізованої бібліотеки `lcd_lib`. Даний програмний модуль забезпечує повний цикл керування пристроєм – від ініціалізації до виводу складних графічних символів. До складу модуля входять такі функції:

- Керування станом дисплея та ініціалізація: `LCDinit()` – виконує первинне налаштування робочих параметрів РКД; `LCDclr()` – повністю очищує екранну область; `LCDblank()` – приховує відображувану інформацію без її видалення з пам'яті; `LCDvisible()` – відновлює видимість даних на екрані.

- Робота з текстом та символами: `LCDsendChar()` – здійснює вивід одиничного символу в поточне місце розташування курсора; `LCDstring()` – виводить текстовий рядок на екран; `LCDstrlen()` – обчислює кількість знаків у переданому рядку; `CopyStringtoLCD()` – забезпечує копіювання текстових даних безпосередньо з енергонезалежної пам'яті (Flash) у задані координати дисплея; `LCDdefinechar()` – дозволяє програмувати та зберігати в пам'яті контролера власні графічні символи користувача.
- Навігація та керування курсором: `LCDGotoXY()` – встановлює курсор у точку з визначеними координатами X та Y; `LCDhome()` – повертає курсор у початкову позицію (верхній лівий кут); `LCDcursorLeft()/LCDcursorRight()` – зміщують курсор на задану кількість позицій вліво або вправо відповідно.
- `LCDcursorOn()/LCDcursorOnBlink()` – активують відображення курсора (статичне підкреслення або режим миготіння); `LCDcursorOFF()` – робить курсор невидимим.
- Системні функції та ефекти: `LCDsendCommand()` – передає низькорівневі інструкції (команди) до контролера дисплея; `LCDshiftLeft()/LCDshiftRight()` – реалізують зсув усього вмісту екрана на вказану кількість знакомісць у відповідну сторону.

Детальний програмний код бібліотеки `lcd_lib` із реалізацією переліченого функціоналу представлено у Додатку 2.

4.5. Програмне забезпечення центрального алгоритму функціонування аналізатора шкідливих газів

Основна логіка роботи пристрою, розробленого для моніторингу безпечного середовища під час проведення слідчих дій працівниками поліції, реалізована у вигляді головного програмного модуля. Алгоритм координує процеси збору даних з сенсорів, їх математичну обробку та систему оперативного сповіщення про хімічну небезпеку. Структурна схема алгоритму відповідає логіці, викладеній у графічній частині роботи (Рис. 4.4 – 4.7).

Повний текст програми (лістинг), що забезпечує функціонування системи у реальному часі, наведено у додатку 3.

4.6. Симуляція та верифікація функціонування аналізатора шкідливих газів у середовищі Proteus ISIS

Результатом компіляції програмного забезпечення для мікроконтролерів сімейства AVR є файл формату .hex (або .sof для налагодження), який призначений для завантаження в пам'ять пристрою. Перевірка працездатності спроектованої схеми газоаналізатора та верифікація алгоритмів керуючої прошивки здійснюється за допомогою інтерактивного симулятора Proteus ISIS.

САПР Proteus VSM від Labcenter Electronics забезпечує можливість комплексного моделювання електронних вузлів, що базуються на програмованих пристроях: мікроконтролерах, мікропроцесорах та DSP. Особливістю середовища є підтримка змішаних схем із кількома МК різних родин. Процес симуляції та відлагодження алгоритмів керування цифровим пристроєм відображено на рисунках у цьому підрозділі.

Архітектура пакета Proteus базується на взаємодії двох програмних модулів: ISIS, який відповідає за створення схем та моделювання роботи пристроїв у реальному часі, та ARES, що забезпечує перехід від віртуальної моделі до розробки конструкторської документації для виготовлення друкованих плат.

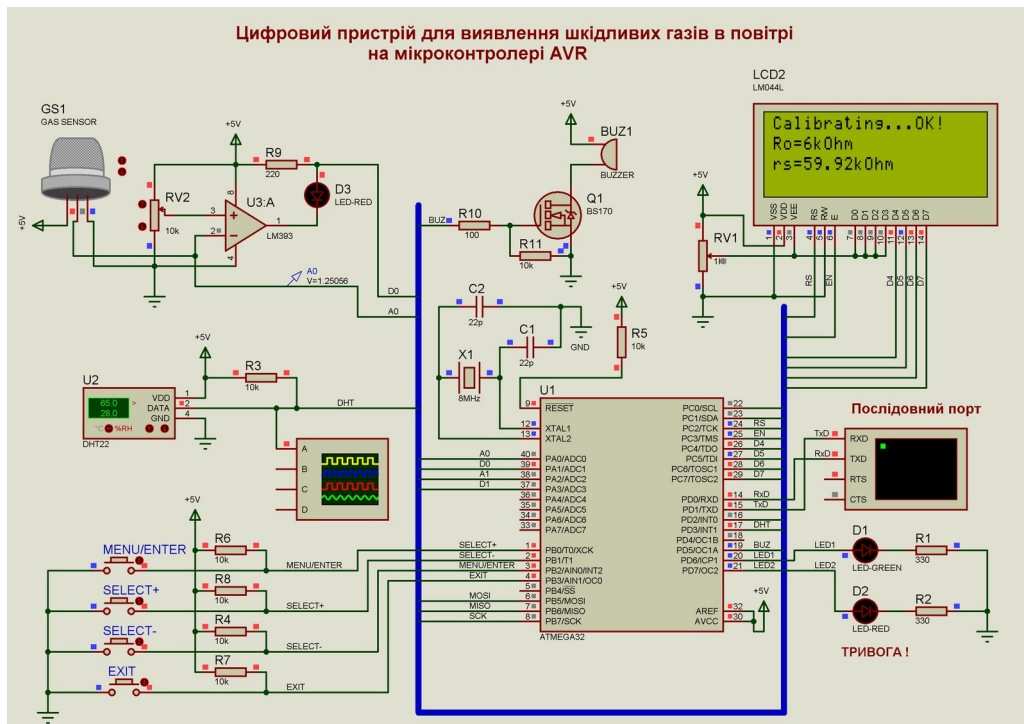
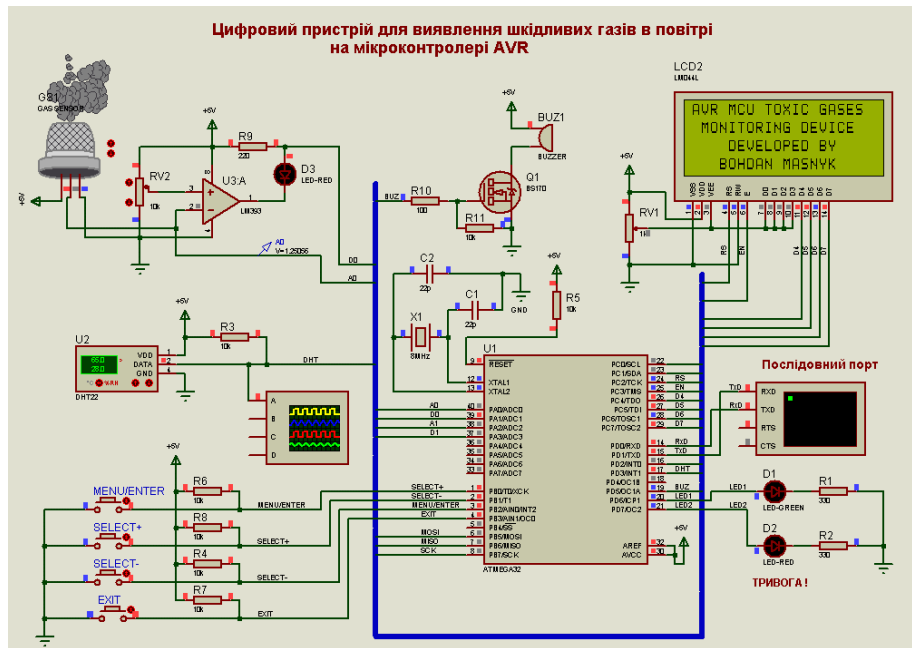
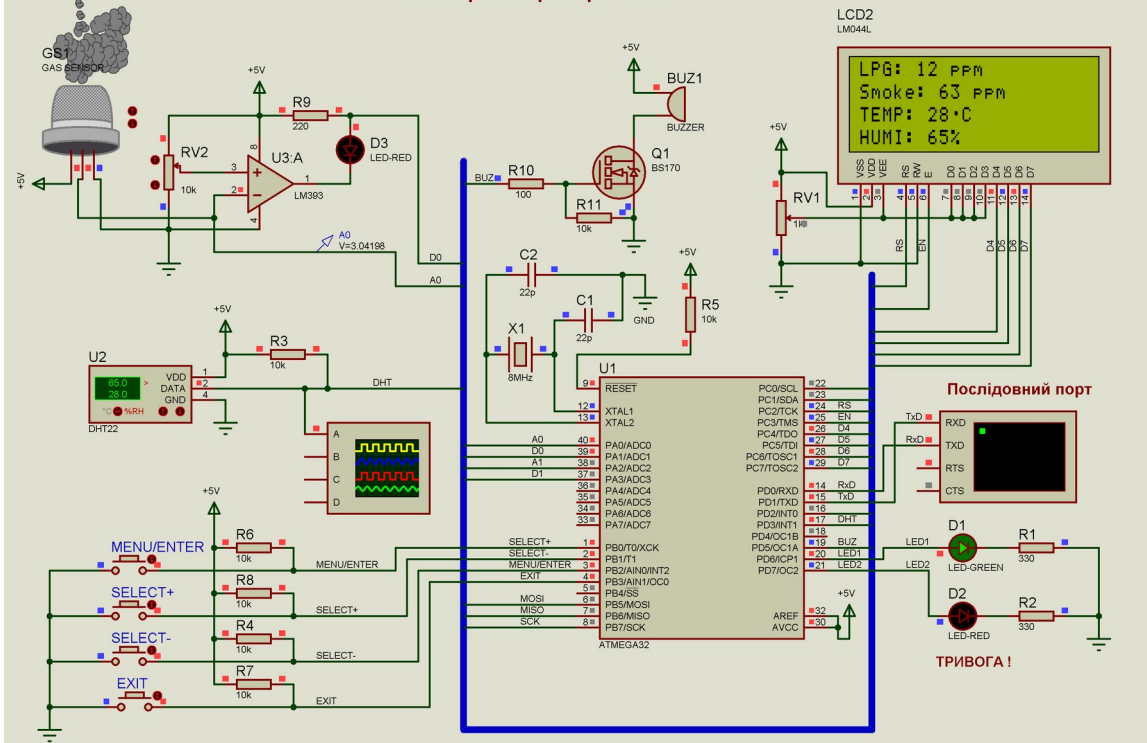
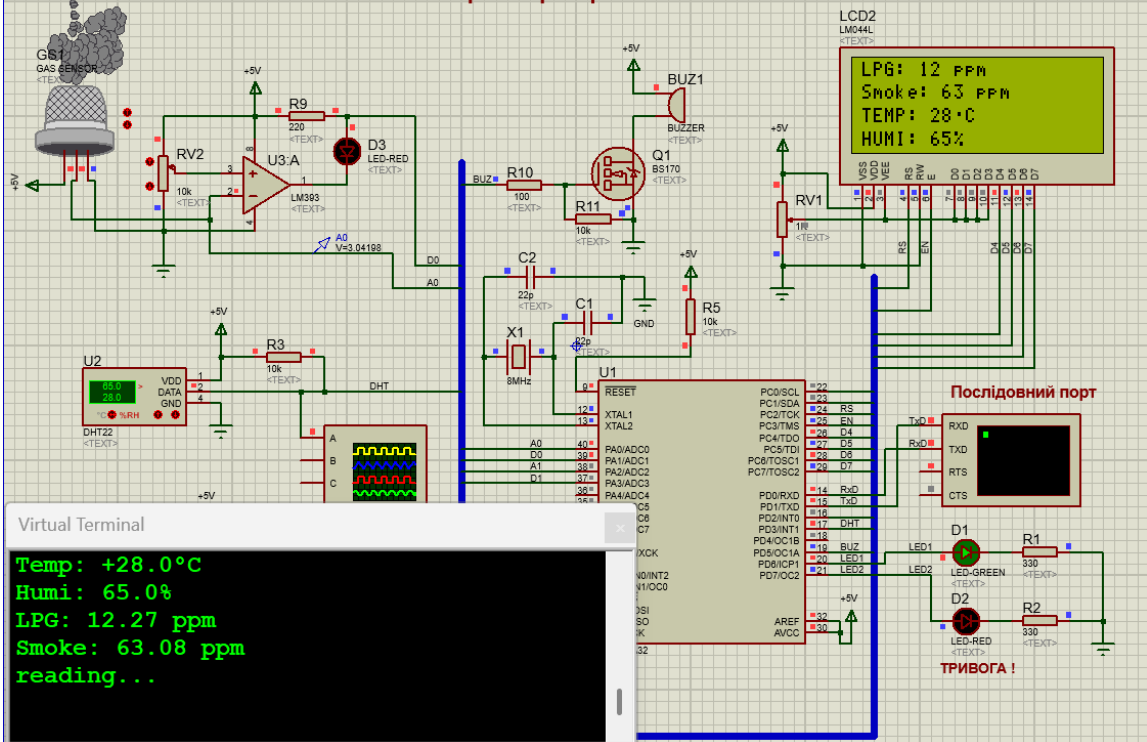


Рис. 4.7. Візуалізація процесу калібрування датчика серії MQ під час моделювання роботи пристрою в середовищі Proteus ISIS

Цифровий пристрій для виявлення шкідливих газів в повітрі на мікроконтролері AVR



Цифровий пристрій для виявлення шкідливих газів в повітрі на мікроконтролері AVR



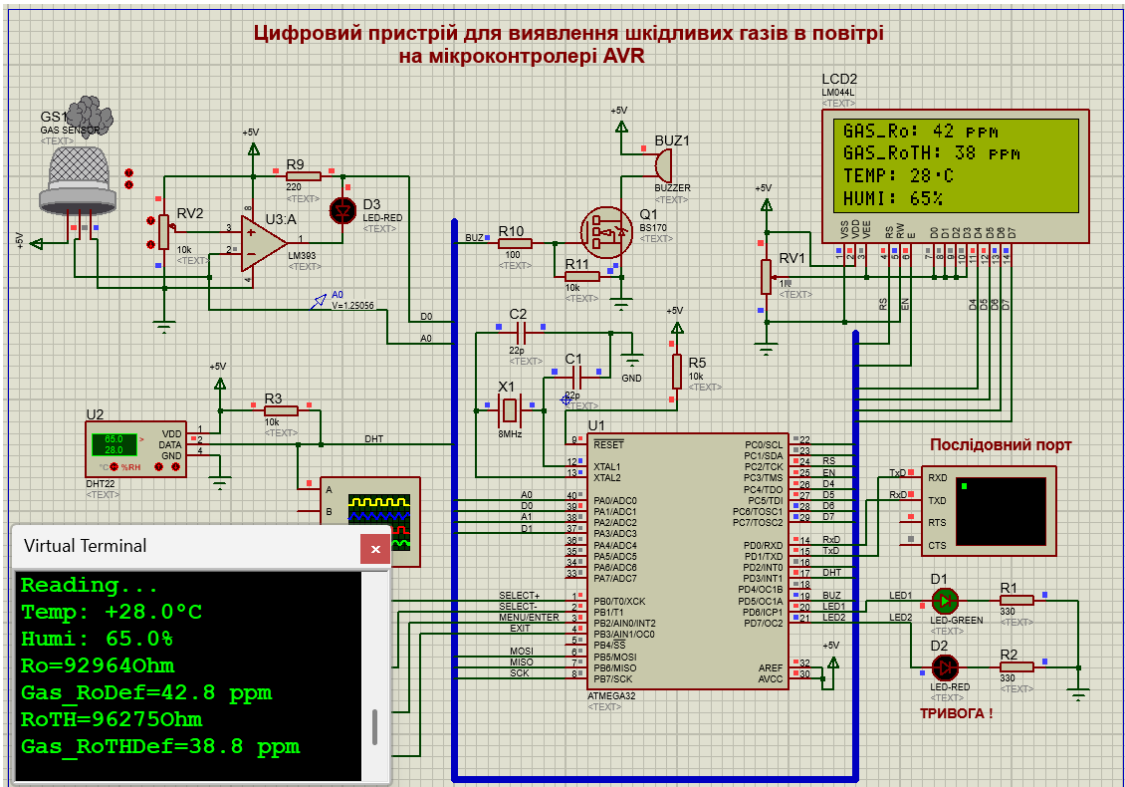
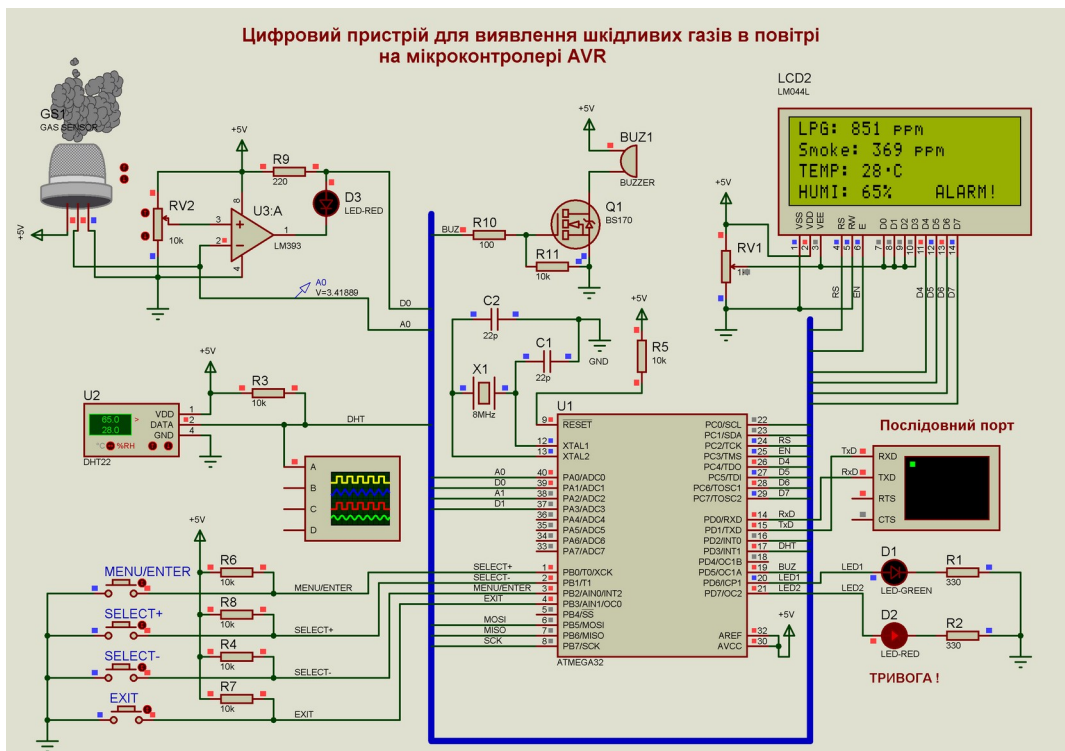


Рис. 4.8. Результати моделювання роботи газоаналізатора в основному режимі вимірювання концентрації шкідливих газів



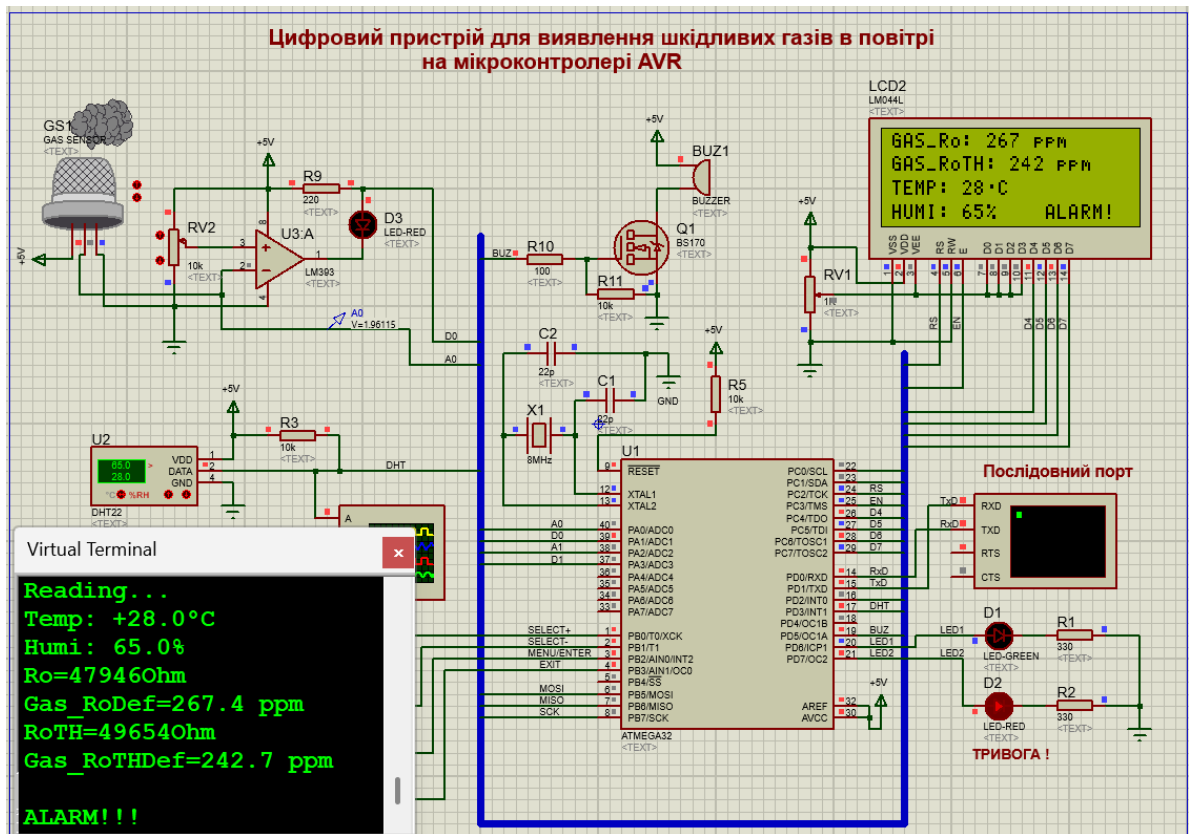
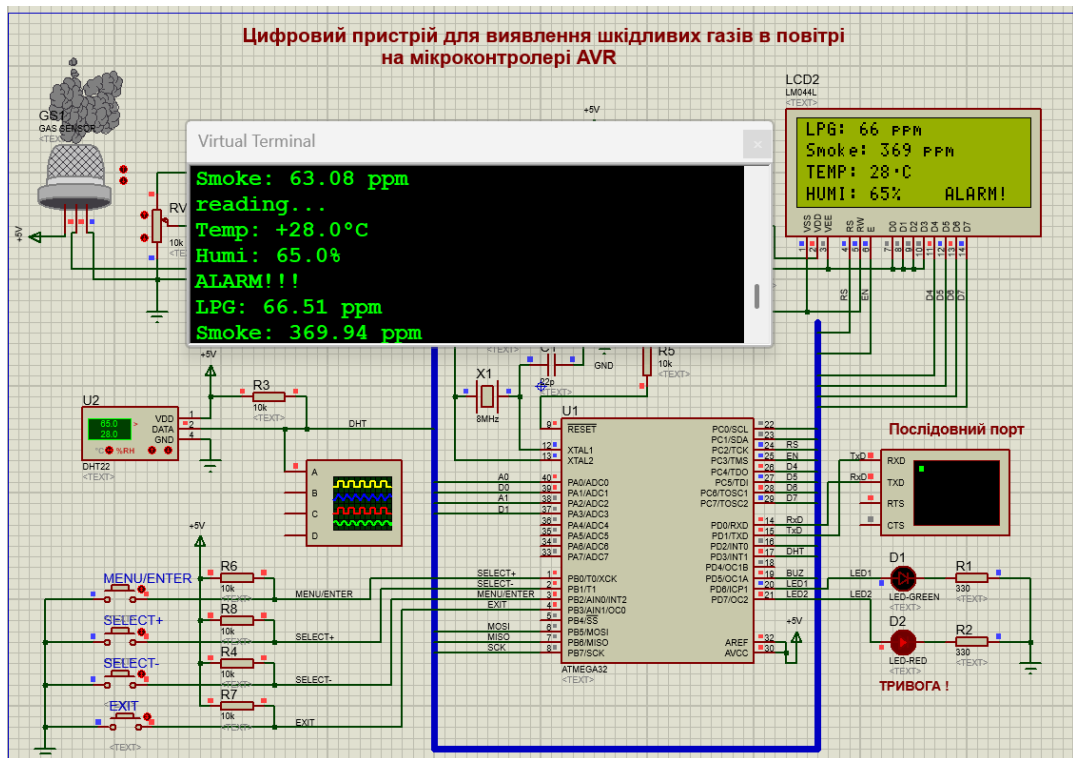


Рис. 4.9. Візуалізація спрацювання світло-звукової сигналізації в режимі тривоги при перевищенні граничної концентрації газів в Proteus ISIS

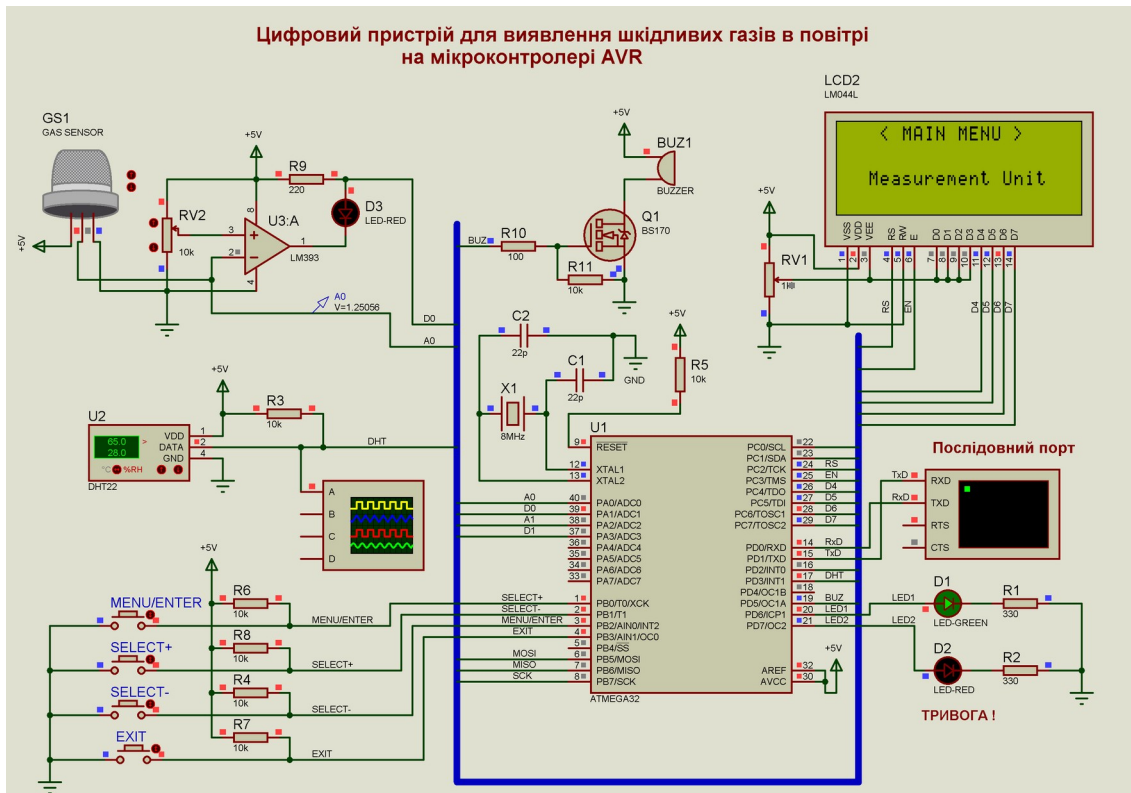
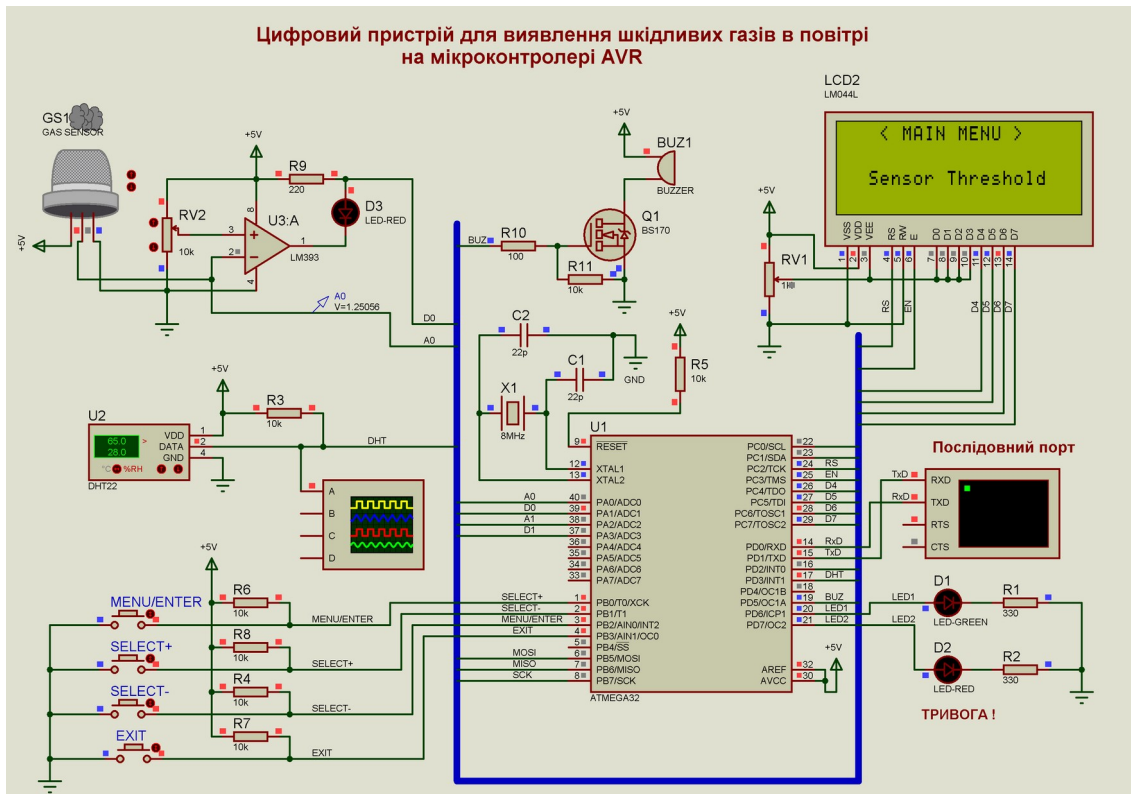


Рис .4.10. Візуалізація інтерфейсу меню налаштувань цифрового аналізатора в середовищі моделювання Proteus

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі спроектовано та реалізовано програмно-апаратний комплекс цифрового аналізатора, призначений для гарантування безпечної діяльності особового складу поліції під час роботи з токсичними хімічними сполуками. Система забезпечує безперервний моніторинг повітряного середовища в режимі реального часу. Функціонування пристрою базується на дворівневій логіці індикації: за умови безпечного фону система перебуває в режимі очікування, що візуалізується миготінням зеленого світлодіода. У разі детектування критичного рівня концентрації шкідливих газів або парів, пристрій миттєво переходить у режим тривоги, активуючи акустичне сповіщення (зумер), червону світлову індикацію та транслюючи попереджувальні повідомлення на РК-дисплей і через послідовний інтерфейс зв'язку. Для реалізації цифрового аналізатора шкідливих газів, спрямованого на захист особового складу поліції під час слідчих дій із хімічними речовинами, обрано сучасну елементну базу. Вона базується на МК архітектури AVR ATmega32, датчиках детектування газів серії MQ, цифровому вимірювачі температури й вологості DHT22, а також алфавітно-цифровому РК-модулі формату LCD2004A (4 рядки по 20 символів).

У ході роботи розроблено електричну принципову схему та створено віртуальну модель цифрового газоаналізатора в середовищі Proteus VSM. На основі запропонованого алгоритму функціонування реалізовано ПЗ пристрою мовою C із використанням інструментарію WinAVR. Окрему увагу приділено розробці спеціалізованих програмних модулів: драйвера для взаємодії із датчиками MQ та бібліотеки для виведення даних на символічний РК-дисплей.

Етап віртуальної апробації пристрою було реалізовано шляхом комплексного моделювання в середовищі Proteus ISIS. Отримані результати підтвердили повну працездатність цифрового аналізатора та валідність розроблених програмних алгоритмів. Симуляція продемонструвала стабільну взаємодію МК з периферійними пристроями в усіх передбачених режимах експлуатації.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Joe Pardue. C Programming for Microcontrollers: Featuring ATMEL's AVR Butterfly and the Free WinAVR Compiler. – Smiley Micros Publisher, 2005. – 304 p.
2. Steven F. Barrett, Daniel Pack, Mitchell Thornton. Atmel AVR Microcontroller Primer: Programming and Interfacing. – Morgan & Claypool Publishers, 1st ed., 2007. – 180 p.
3. Steven F. Barrett and Daniel J. Pack. Atmel AVR Microcontroller Primer: Programming and Interfacing. – Morgan & Claypool Publishers, 2nd ed., 2007. – 194 p.
4. Elliot Williams. Make: AVR Programming: Learning to Write Software for Hardware. – Maker Media, LLC, 2014. – 472 p.
5. Alan Trevennor. Experimenting with AVR Microcontrollers (Technology in Action). – Apress, 1st ed., 2014. – 206 p.
6. Bert van Dam. Microcontroller Systems Engineering: 45 Projects for PIC, AVR and ARM. – Elektor Publishing, 2009. – 330 p.
7. Dhananjay V. Gadre. Programming and Customizing the AVR Microcontroller. – McGraw-Hill Education TAB, 2000. – 336 p.
8. Muhammad Ali Mazidi, Sarmad Naimi, Sepehr Naimi. The AVR Microcontroller and Embedded Systems: Using Assembly and C. – Pearson, 1st ed., 2015. – 752 p.
9. Datasheet: AVR Instruction Set Manual.–Microchip Technology,2021 – 166 p.
10. Datasheet AN2519: AVR Microcontroller Hardware Design Considerations. – Microchip Technology, 2017. – 27 p.
11. Elecia White. Making Embedded Systems: Design Patterns for Great Software. – O'Reilly Media, 2nd ed., 2024. – 425 p.
12. Richard H. Barnett, Sarah A. Cox, Larry O'Cull. Embedded C Programming and the Atmel AVR. – Cengage Learning, 2nd ed., 2006. – 560 p.

13. Sepehr Naimi, Sarmad Naimi, Muhammad Ali Mazidi. The AVR Microcontroller and Embedded Systems Using Assembly and C: Using Arduino Uno and Atmel Studio. – MicroDigitalEd, 1st ed., 2017. – 630 p.
14. John Boxall. AVR Workshop: A Hands-On Introduction with 60 Projects. – No Starch Press, 2022. – 368 p.
15. Cefn Hoile et al. Raspberry Pi and AVR Projects: Augmenting the Pi's ARM with the Atmel Atmega, ICs, and Sensors.–Maker Media, 1st ed., 2014.–301p.
16. Alan Trevennor. Practical AVR Microcontrollers: Games, Gadgets, and Home Automation (Technology in Action). – Apress, 1st ed., 2012. – 443 p.
17. Anbazhagan K., Ambika Parameswari K. AVR Microcontroller and Atmega32 Microcontroller Projects Hands-on.–Kindle Edition, 2020.–145 p.
18. MySensors. Gas Sensors Build Guide [Electronic resource]. – URL: <https://www.mysensors.org/build/gas>.
19. Davide Gironi. Cheap CO2 meter using MQ135 sensor with AVR [Electronic resource]. – URL: <http://davidegironi.blogspot.com/2014/01/cheap-co2-meter-using-mq135-sensor-with.html>.
20. Aritro Mukherjee. Smoke Detection using MQ-2 Gas Sensor [Electronic resource]. – URL: <https://www.hackster.io/Aritro/smoke-detection-using-mq-2-gas-sensor-79c54a>.
21. Instructables. How to use MQ2 Gas Sensor – Arduino Tutorial [Electronic resource]. – URL: <http://www.instructables.com/id/How-to-use-MQ2-Gas-Sensor-Arduino-Tutorial/>.
22. Навчальні ресурси по МК AVR [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.tpointtech.com/what-is-avr-microcontroller>, https://explorembedded.com/wiki/Basics_of_AVR_'C', <https://controllerstech.com/avr-tutorials/>, <https://www.electronicwings.com/avr-atmega/getting-started-with-atmel-studio>.

ДОДАТКИ

Додаток 1

Програмний модуль для взаємодії з газовим датчиком серії MQ

```
// Обчислення опору сенсора Rs на основі коду АЦП
float mq_resistance_calculation(int raw_adc) {
    // Розрахунок базується на формулі подільника напруги.
    // Опір навантаження RL_VALUE множиться на відношення напруг.
    float resistance = (float)RL_VALUE * (1023.0 - raw_adc) / raw_adc;
    return resistance;
}

// Процедура калібрування сенсора в чистому повітрі
float mq_sensor_calibration() {
    float sensor_ro = 0;  char log_msg[64];
    // Попереднє зчитування для діагностики
    uint16_t initial_adc = adc_read(MQ_ADCCHANNEL);
    double initial_voltage = adc_getvoltage(initial_adc, 5.0);
    // Вивід технічної інформації про поточний стан через UART
    itoa(initial_adc, log_msg, 10);
    uart_puts("ADC_RAW: "); uart_puts(log_msg); uart_puts("\r\n");
    dtostrf(initial_voltage, 4, 3, log_msg);
    uart_puts("VOLTAGE: "); uart_puts(log_msg); uart_puts("\r\n");
    // Цикл накопичення даних для отримання середнього значення опору
    for (int sample = 0; sample < 10; sample++) {
        sensor_ro += mq_resistance_calculation(adc_read(MQ_ADCCHANNEL));
        _delay_ms(100);
    }
    // Обчислення фінального значення Ro згідно з документацією (коефіцієнт повітря)
    sensor_ro = (sensor_ro / 10.0) / RO_CLEAN_AIR_FACTOR;
    return sensor_ro;
}

// Зчитування поточного опору датчика Rs
float mq_read_sensor() {
    float rs_sum = 0;
    int count = 0;
    // Виконуємо серію з 5 вимірювань для мінімізації похибки
    while (count < 5) {
        rs_sum += mq_resistance_calculation(adc_read(MQ_ADCCHANNEL));
        _delay_ms(50);  count++;
    }
    return (rs_sum / 5.0);
}

// Отримання концентрації газу залежно від його ідентифікатора
float mq_get_gas_percentage(float rs_ro_ratio, int gas_id) {
    // Вибір відповідної кривої залежно від цільового газу
    switch (gas_id) {
        case LPG: return mq_get_percentage(rs_ro_ratio, LPGCurve);
        case SMOKE: return mq_get_percentage(rs_ro_ratio, SmokeCurve);
        default: return 0.0;
    }
}

// Математичне обчислення концентрації в ppm
float mq_get_percentage(float rs_ro_ratio, float *pcurve) {
    /* Алгоритм використовує логарифмічну апроксимацію.
```

Обчисляємо значення за формулою: $10^{((\log(y) - b) / m) + x1}$

```
*/  
double log_ratio = log(rs_ro_ratio);  
float result_ppm = pow(10, ((log_ratio - pcurve[1]) / pcurve[2]) + pcurve[0]);  
return (float)result_ppm;  
}
```

Додаток 2

Реалізація функцій бібліотеки `lcd_lib` для керування модулем LCD2004A

```
// Визначення кількості символів у текстовому рядку
uint8_t LCDstrLen(char *s){
    uint8_t length = 0;
    // Цикл триває, поки не буде досягнуто символ кінця рядка
    for (length = 0; s[length] != '\0'; length++);
    return length;
}

// Передача одного символу для відображення на РКД
void LCDsendChar(uint8_t ch) {
    // Відправка старшого нібла (старші 4 біти)
    LDP = (ch & 0xF0); LCP |= (1 << LCD_RS) | (1 << LCD_E);
    _delay_ms(1); LCP &= ~(1 << LCD_E) | (1 << LCD_RS);
    _delay_ms(1);
    // Відправка молодшого нібла (молодші 4 біти з позиційним зсувом)
    LDP = ((ch & 0x0F) << 4);
    LCP |= (1 << LCD_RS) | (1 << LCD_E); _delay_ms(1);
    LCP &= ~(1 << LCD_E) | (1 << LCD_RS); _delay_ms(1);
}

// Передача керуючої команди до контролера дисплея
void LCDsendCommand(uint8_t cmd){
    // Обробка старшої частини байта команди
    LDP = (cmd & 0xF0); LCP |= (1 << LCD_E); _delay_ms(1);
    LCP &= ~(1 << LCD_E); _delay_ms(1);
    // Обробка молодшої частини байта команди
    LDP = ((cmd & 0x0F) << 4); LCP |= (1 << LCD_E); _delay_ms(1);
    LCP &= ~(1 << LCD_E); _delay_ms(1);
}

// Конфігурація та ініціалізація дисплея (4-бітний режим)
void LCDinit(void){
    _delay_ms(20); // Пауза для стабілізації живлення
    LDP = 0x00; LCP = 0x00;
    // Налаштування напрямку роботи портів
    LDDR |= (1 << LCD_D7) | (1 << LCD_D6) | (1 << LCD_D5) | (1 << LCD_D4);
    LCDR |= (1 << LCD_E) | (1 << LCD_RW) | (1 << LCD_RS);

    // Послідовність перемикання у 4-бітний інтерфейс
    for (int k = 0; k < 2; k++) {
        LDP = 0x30; // Команда ініціалізації
        LCP |= (1 << LCD_E);
        _delay_ms(2); LCP &= ~(1 << LCD_E); _delay_ms(2);
    }
    LDP = 0x20; // Встановлення 4-бітного режиму
    LCP |= (1 << LCD_E); _delay_ms(2); LCP &= ~(1 << LCD_E);
    _delay_ms(2); LCDsendCommand(0x28); // 2 рядки, шрифт 5x8
    LCDsendCommand(0x0E); // Дисплей увімкнено, курсор активний
}
```

```

void LCDclr(void) { LCDsendCommand(1 << LCD_CLR); }
void LCDhome(void) { LCDsendCommand(1 << LCD_HOME); }
// Вивід повного рядка на екран
void LCDstring(char* data){
    if (!data) return;
    uint8_t pos = 0;
    while (data[pos] != '\0') {
        // Обробка керуючого символу переходу на новий рядок
        if (data[pos] == '\n') {
            LCDGotoXY(0, 1);
        } else {
            LCDsendChar(data[pos]);
        }
        pos++;
    }
}

// Встановлення курсора за заданими координатами
void LCDGotoXY(uint8_t x, uint8_t y){
    uint8_t address;
    // Визначення базової адреси пам'яті DDRAM для кожного рядка
    switch(y) {
        case 0: address = LCD_LINE0_DDRAMADDR + x; break;
        case 1: address = LCD_LINE1_DDRAMADDR + x; break;
        case 2: address = LCD_LINE2_DDRAMADDR + x; break;
        case 3: address = LCD_LINE3_DDRAMADDR + x; break;
        default: address = LCD_LINE0_DDRAMADDR + x; }
    LCDsendCommand(0x80 | address);
}
// Відображення статичного рядка, збереженого у Flash-пам'яті
void CopyStringtoLCD(const uint8_t *FlashLoc, uint8_t x, uint8_t y){
    LCDGotoXY(x, y);
    for (uint8_t idx = 0; pgm_read_byte(&FlashLoc[idx]); idx++)
    {
        LCDsendChar(pgm_read_byte(&FlashLoc[idx]));
    }
}

// Створення користувацького символу в пам'яті CGRAM
void LCDdefinechar(const uint8_t *pc, uint8_t char_code){
    uint8_t mem_addr = (char_code << 3) | 0x40;
    for (uint8_t line = 0; line < 8; line++) {
        LCDsendCommand(mem_addr++);
        LCDsendChar(pgm_read_byte(&pc[line]));
    }
}

```

Додаток 3

Лістинг основного програмного модуля цифрового аналізатора шкідливих газів на базі мікроконтролера ATmega32

```
/******  
Проект: Цифровий аналізатор шкідливих газів для забезпечення безпеки працівників  
поліції при розслідуванні злочинів пов'язаних з хімічними речовинами  
Об'єкт розробки: Головний модуль управління аналізатором  
Платформа: ATmega32 (AVR) | Частота: 8.0 MHz  
Author : (C) Богдан Масник  
Дата: 2026 рік  
*****/  
  
#include <avr/io.h>  
#include <util/delay.h>  
#include <stdio.h>  
#include <stdlib.h>  
#include <string.h>  
#include <math.h>  
#include <avr/interrupt.h>  
#include <avr/pgmspace.h>  
// Підключення периферійних модулів  
#include "adc/adc.h"  
#include "uart/uart.h"  
#include "lcd_lib.h"  
#include "dht/dht.h"  
#include "mq.h"  
// Конфігурація портів введення (Кнопки управління)  
#define BUTTON_PORT PORTB  
#define BUTTON_PIN PINB  
#define BUTTON_DDR DDRB  
#define MENU_ENTER_BTN_PIN 2  
#define SELECT_PLUS_BTN_PIN 0  
#define SELECT_MINUS_BTN_PIN 1  
#define EXIT_BTN_PIN 3  
// Конфігурація портів виведення (Індикація та звук)  
#define LED_DDR DDRD  
#define LED_PORT PORTD  
#define LED_MONITORING_PIN 6  
#define LED_ALARM_PIN 7  
#define BUZZER_PORT PORTD  
#define BUZZER_DDR DDRD  
#define BUZZER_PIN 5  
// Параметри обміну даними  
#define UART_BAUD_RATE 9600  
// Технічні параметри сенсорів серії MQ  
#define MQ_ADCCCHANNEL 0  
#define MQ_PULLDOWNRES 20000  
#define MQ_DEFAULTPPM 392  
#define MQ_DEFAULTRO 41763  
#define MQ_SCALINGFACTOR 116.6020682  
#define MQ_EXPONENT -2.769034857
```

```

#define MQ_MAXRSRO 2.428
#define MQ_MINRSRO 0.358
// Константи калібрування (навантаження та чисте повітря)
#define RL_VALUE (20.0)
#define RO_CLEAN_AIR_FACTOR (9.83)
// Глобальні змінні та характеристики газу
#define LPG (0) #define SMOKE (1)
float LPGCurve[3] = {2.3, 0.20, -0.45};
float SmokeCurve[3] = {2.3, 0.53, -0.43};
float R0 = 20.0;
volatile uint8_t main_menu_invoke = 0;

// Прототипи функцій (збережені назви)
float mq_get_percentage(float rs_ro_ratio, float *pcurve);
float mq_get_gas_percentage(float rs_ro_ratio, int gas_id);
float mq_read_sensor();
float mq_resistance_calculation(int raw_adc);
float mq_sensor_calibration();

unsigned char PREV_BUTTON_PIN = 0xFF;
char text_buffer[81]; int temp_unit_ind = 0, press_unit_ind = 0;
// Функція опитування стану кнопок
unsigned char getBtnStatus(unsigned char btn_id) {
    return (!(BUTTON_PIN & (1 << btn_id)));
}

unsigned char getPrevBtnStatus(unsigned char btn_id) {
    return (!(PREV_BUTTON_PIN & (1 << btn_id)));
}

// Налаштування формату одиниць вимірювання температури
void setTempUnitFormat(void) {
    char units[] = {'C', 'F', 'K'};
    int cursor_x = 0;

    LCDclr();
    LCDGotoXY(0,0);
    LCDstring("TEMP UNITS");
    LCDGotoXY(0,1);
    for (int k = 0; k < 3; k++) {
        LCDsendChar(units[k]);
        LCDsendChar(' ');
    }
    while(1) {
        PREV_BUTTON_PIN = BUTTON_PIN;
        LCDGotoXY(cursor_x, 2);
        LCDsendChar('^');
        if (getBtnStatus(SELECT_PLUS_BTN_PIN) && !getPrevBtnStatus(SELECT_PLUS_BTN_PIN)) {
            LCDGotoXY(cursor_x, 2); LCDsendChar(' ');
            cursor_x = (cursor_x < 4) ? cursor_x + 2 : 0;
        }
        if (getBtnStatus(MENU_ENTER_BTN_PIN) && !getPrevBtnStatus(MENU_ENTER_BTN_PIN)) {

```

```

    temp_unit_ind = cursor_x / 2;
    return;
}
if (getBtnStatus(EXIT_BTN_PIN) && !getPrevBtnStatus(EXIT_BTN_PIN)) return;
_delay_ms(30);
}
}
// Заглушки для функцій налаштування (Threshold та Units)
void SetThreshold() { /* Реалізація порогів спрацювання */ }
void SetMeasurementUnit() { setTempUnitFormat(); }
// Головне меню пристрою
void mainMenu(void) {
    char *items[] = {"Set Threshold", "Set Units", "Back to Monitor"};
    int current_selection = 0;
    uint8_t needs_refresh = 1;
    while(1) {
        PREV_BUTTON_PIN = BUTTON_PIN;
        if (needs_refresh) {
            needs_refresh = 0;
            LCDclr();
            LCDGotoXY(3,0); LCDstring("< MAIN MENU >");
            LCDGotoXY(2,2); LCDstring(items[current_selection]);
        }
        if (getBtnStatus(SELECT_PLUS_BTN_PIN) && !getPrevBtnStatus(SELECT_PLUS_BTN_PIN)) {
            current_selection = (current_selection == 2) ? 0 : current_selection + 1;
            needs_refresh = 1;
        }
        if (getBtnStatus(SELECT_MINUS_BTN_PIN) && !getPrevBtnStatus(SELECT_MINUS_BTN_PIN)) {
            current_selection = (current_selection == 0) ? 2 : current_selection - 1;
            needs_refresh = 1;
        }
        if (getBtnStatus(MENU_ENTER_BTN_PIN) && !getPrevBtnStatus(MENU_ENTER_BTN_PIN)) {
            if (current_selection == 2) return;
            if (current_selection == 0) SetThreshold();
            if (current_selection == 1) SetMeasurementUnit();
            needs_refresh = 1;
        }
        if (getBtnStatus(EXIT_BTN_PIN) && !getPrevBtnStatus(EXIT_BTN_PIN)) return;
    }
}

// Обробка зовнішнього переривання (виклик меню)
ISR(INT2_vect) {
    main_menu_invoke = 1;
}

int main(void) {
    float cur_rs, lpg_val, smoke_val, t_val, h_val;
    // Ініціалізація периферії
    uart_init(UART_BAUD_SELECT(UART_BAUD_RATE, F_CPU));
    adc_init();
    LCDinit();
}

```

```

LCDcursorOFF();
// Конфігурація портів I/O
BUTTON_DDR &= ~(1<<MENU_ENTER_BTN_PIN) | (1<<SELECT_PLUS_BTN_PIN) |
(1<<SELECT_MINUS_BTN_PIN) | (1<<EXIT_BTN_PIN));
LED_DDR |= (1 << LED_MONITORING_PIN) | (1 << LED_ALARM_PIN);
BUZZER_DDR |= (1 << BUZZER_PIN);
// Налаштування переривань
GICR |= (1 << INT2);
MCUCSR &= ~(1 << ISC2);
sei();
// Стартове вікно
LCDGotoXY(0,0); LCDstring("GAS ANALYZER SYSTEM");
LCDGotoXY(1,1); LCDstring("POLICE SAFETY UNIT");
LCDGotoXY(4,3); LCDstring("Ver 2026.1");
_delay_ms(1500);
LCDclr();
// Процес калібрування
LCDstring("Calibration...");
uart_puts("MQ Calibration started...\r\n");
R0 = mq_sensor_calibration();
LCDstring(" ОК!");
sprintf(text_buffer, "R0 Base: %.1f kOhm", R0);
LCDGotoXY(0,1); LCDstring(text_buffer);
_delay_ms(1000);
LCDclr();
// Основний цикл моніторингу
for (;;) {
    // Опитування датчика DHT22
    if (dht_gettemperaturehumidity(&t_val, &h_val) != -1) {
        sprintf(text_buffer, "T:%+.1fC H:%.1f%%", t_val, h_val);
        uart_puts(text_buffer); uart_puts("\r\n");
    }
    // Обчислення концентрації газів
    cur_rs = mq_read_sensor();
    lpg_val = mq_get_gas_percentage(cur_rs/R0, LPG);
    smoke_val = mq_get_gas_percentage(cur_rs/R0, SMOKE);
    // Перевірка перевищення небезпечних порогів
    if (smoke_val > 200 || lpg_val > 200) {
        LED_PORT &= ~(1 << LED_MONITORING_PIN);
        LED_PORT |= (1 << LED_ALARM_PIN);
        BUZZER_PORT |= (1 << BUZZER_PIN);
        LCDGotoXY(14,3); LCDstring("ALARM!");
    } else {
        LED_PORT &= ~(1 << LED_ALARM_PIN);
        BUZZER_PORT &= ~(1 << BUZZER_PIN);
        LED_PORT ^= (1 << LED_MONITORING_PIN); // Блимання при нормі
        LCDGotoXY(14,3); LCDstring(" ");
    }
    // Відображення даних на LCD
    sprintf(text_buffer, "LPG: %d ppm", (int)lpg_val);
    LCDGotoXY(0,0); LCDstring(text_buffer);
    sprintf(text_buffer, "Smoke: %d ppm", (int)smoke_val);
}

```

```
LCDGotoXY(0,1); LCDstring(text_buffer);
sprintf(text_buffer, "Temp: %d C", (int)t_val);
LCDGotoXY(0,2); LCDstring(text_buffer);
sprintf(text_buffer, "Hum: %d %%", (int)h_val);
LCDGotoXY(0,3); LCDstring(text_buffer);
// Перехід до меню за запитом через переривання
if (main_menu_invoke) {
    main_menu_invoke = 0;
    mainMenu();
    LCDclr();
}
_delay_ms(500);
}
return 0;
}
```