

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»**  
**Факультет комп'ютерно-інтегрованих технологій, мехатроніки і робототехніки**  
**Кафедра інформаційно-вимірювальних технологій**

**ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА**

до кваліфікаційної роботи  
бакалавра

на тему: **Мікропроцесорний прилад для визначення вмісту небезпечних газів у повітрі**

Виконав: студент 4 курсу, групи ЗМТ-22

Спеціальності: 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка»

Тимошенко Тарас В`ячеславович

(прізвище та ініціали)

Керівник: професор кафедри ІВТ

Д.с.Н., К.Т.Н., професор

Єфіменко Н.А.

(науковий ступінь, вчене звання, посада, прізвище та ініціали)

Рецензент: \_\_\_\_\_

(науковий ступінь, вчене звання, посада, прізвище та ініціали)

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»**  
**Факультет комп'ютерно-інтегрованих технологій, мехатроніки і робототехніки**  
**Кафедра інформаційно-вимірювальних технологій**

**Спеціальність 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка»**

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри інформаційно-  
вимірювальних технологій

д.т.н., професор Подчашинський Ю.О.

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2026 р.

**ЗАВДАННЯ**  
на кваліфікаційну роботу бакалавра

Студент \_\_\_\_\_ Тимошенко Тарас В`ячеславович

1. Тема роботи: \_\_\_\_\_ Мікропроцесорний прилад для визначення вмісту небезпечних газів у повітрі

Керівник роботи: професор, доктор економічних наук, кандидат технічних наук,  
професор кафедри ІВТ Єфіменко Н.А.

затверджена наказом по університету від \_\_\_\_\_ « 06 » \_\_\_\_\_ травня 2026 р. № 221/с

2. Термін здачі закінченої роботи на кафедру \_\_\_\_\_ « 10 » \_\_\_\_\_ червня 2025р.

3. Вихідні дані до роботи: об'єкт розробки – мікропроцесорний прилад, параметр вимірювання: вміст метану та чадного газу в повітрі, діапазон вимірювання концентрації метану 0,01 % – 0,5 % (1000–5000 ppm); діапазон вимірювання концентрації чадного газу 0,003 % – 0,01 % (30–100 ppm); похибка вимірювання  $\pm 0,4$  %, час вимірювання – не більше 35 с.

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які підлягають розробці): загальний огляд базових етапів функціонування газоаналізаторів: пробовідбір, сенсорне детектування та перетворення сигналів, аналіз сучасних сигналізаторів небезпечних газів, розробка структурної та принципової схем, вибір елементної бази пристрою, розробка алгоритму роботи, метрологічні розрахунки, оцінка похибок, оцінка надійності, питання безпеки та охорони праці.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним визначенням обов'язкових креслень) структурна схема, електрична принципова схема, конструкція приладу, блок-схема алгоритму роботи приладу

6. Консультанти з кваліфікаційної роботи бакалавра із зазначенням розділів роботи, що їх стосуються

| Розділ | Консультант | Підпис, дата   |                  |
|--------|-------------|----------------|------------------|
|        |             | Завдання видав | Завдання прийняв |
|        |             |                |                  |
|        |             |                |                  |
|        |             |                |                  |

7. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_

### Календарний план

| № з/п | Назва етапів кваліфікаційної роботи                           | Термін виконання етапів роботи | Примітка |
|-------|---------------------------------------------------------------|--------------------------------|----------|
| 1     | Узгодження технічного завдання                                | 25.02.26 – 15.03.26            | Виконано |
| 2     | Огляд та аналіз сучасних сигналізаторів небезпечних газів     | 25.02.26 – 15.03.26            | Виконано |
| 3     | Розробка структурної схеми                                    | 16.03.26 – 15.04.26            | Виконано |
| 4     | Розрахунок елементів приладу                                  | 16.04.26 – 24.04.26            | Виконано |
| 5     | Розробка електричної принципової схеми                        | 25.04.26 – 09.05.26            | Виконано |
| 6     | Розробка алгоритму та програми приладу                        | 10.05.26 – 24.05.26            | Виконано |
| 7     | Розрахунок метрологічних характеристик                        | 25.05.26 – 03.06.26            | Виконано |
| 8.    | Розрахунок надійності                                         | 04.06.26 – 15.06.26            | Виконано |
| 9     | Оформлення пояснювальної записки та презентаційного матеріалу | 03.06.26– 17.06.26             | Виконано |

Студент

Тимошенко Т.В.

\_\_\_\_\_  
(підпис)

\_\_\_\_\_  
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

Єфіменко Н.А.

\_\_\_\_\_  
(підпис)

\_\_\_\_\_  
(прізвище та ініціали)

## **АНОТАЦІЯ**

В даній кваліфікаційній роботі розроблено мікропроцесорний прилад для визначення вмісту небезпечних газів у повітрі.

Розроблено структурна та електрична принципова схема приладу, підібрано датчик з урахуванням його метрологічних характеристик і експлуатаційних властивостей. Розроблено алгоритм роботи приладу, який забезпечує збір, обробку, відображення та збереження даних.

Прилад може бути застосована для контролю вмісту метану та чадного газу в повітрі. Розробка вирізняється простотою, доступністю, та високою точністю, що робить її перспективною для подальшого вдосконалення та модернізації.

Ключові слова: мікропроцесор, вимірювання, небезпечні гази, метан, вуглецевий газ.

## **ABSTRACT**

In this qualification work was developed a microprocessor device for determining the content of hazardous gases in the air.

The structural and electrical schematic diagram of the device was developed, the sensor was selected taking into account its metrological characteristics and operational properties. An algorithm for the operation of the device has been developed, which ensures the collection, processing, display and storage of data.

The device can be used to monitor the content of methane and carbon dioxide in the air. The development is characterized by simplicity, accessibility and high accuracy, which makes it promising for further improvement and modernization.

Key words: microprocessor, measurement, hazardous gases, methane, carbon dioxide.

## РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота представлена пояснювальною запискою в обсязі 69 сторінок формату А4, записка містить вступ, основну частину, що складає вісім розділів, висновки, список використаних джерел та додатків. Темою роботи є розробка мікропроцесорного приладу для визначення вмісту небезпечних газів у повітрі.

Перший розділ містить основні завдання та вимоги до виробу, а саме: умови експлуатації, технічні характеристики, надійність та конструктивне оформлення.

Другий розділ містить загальний огляд базових етапів функціонування газоаналізаторів: пробовідбір, сенсорне детектування та перетворення сигналів.

Третій розділ містить аналіз сучасних сигналізаторів небезпечних газів.

У четвертому розділі виконано розробку структурної схеми мікропроцесорного приладу для визначення вмісту небезпечних газів у повітрі.

У п'ятому розділі виконано обґрунтування вибору та виконано розрахунок основних елементів приладу.

У шостому розділі виконано проектування апаратних і програмних засобів мікропроцесорного приладу для визначення вмісту небезпечних газів у повітрі.

Сьомий розділ містить розрахунок основних метрологічних характеристик приладу.

Восьмий розділ містить розрахунок показників надійності мікропроцесорного приладу для визначення вмісту небезпечних газів у повітрі.

Дев'ятий розділ містить аналіз питань безпеки життєдіяльності та охорони праці при роботі з приладом.

## ЗМІСТ

|                                                                                                                                                                             |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ВСТУП .....                                                                                                                                                                 | 9  |
| 1. ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ .....                                                                                                                                                  | 12 |
| 1.1. Підстава для розробки, призначення та галузь застосування ...                                                                                                          | 12 |
| 1.2. Умови експлуатації .....                                                                                                                                               | 12 |
| 1.3. Вимоги до технічних характеристик.....                                                                                                                                 | 12 |
| 1.4. Вимоги до надійності.....                                                                                                                                              | 12 |
| 2. БАЗОВІ ЕТАПИ ФУНКЦІОНУВАННЯ ГАЗОАНАЛІЗАТОРІВ:<br>ПРОБОВІДБІР, СЕНСОРНЕ ДЕТЕКТУВАННЯ ТА ПЕРЕТВОРЕННЯ<br>СИГНАЛІВ.....                                                     | 13 |
| 2.1. Алгоритм детектування: від реакції на чутливому шарі до<br>формування аварійного сповіщення .....                                                                      | 14 |
| 2.2. Роль контролерів та систем безперервного дистанційного<br>спостереження .....                                                                                          | 14 |
| 2.3. Типові об'єкти газового аналізу та супутні фахові загрози.<br>Токсичні, займисті та інертні компоненти: джерела ризику й<br>обґрунтування безперервного контролю ..... | 17 |
| 2.4 Роль газоаналітичної техніки в системі охорони праці та<br>дотримання регуляторних норм. Запобігання позаштатних<br>ситуацій на промислових об'єктах.....               | 19 |
| 2.5 Практична ефективність превентивної діагностики загроз.....                                                                                                             | 20 |
| 2.6 Метрологічне забезпечення, сервісне обслуговування та<br>стратегії підвищення відмовостійкості. Процедури калібрування<br>та функціонального тестування .....           | 21 |

|           |      |                 |        |      |                                                                                                   |  |  |  |                                                           |      |        |
|-----------|------|-----------------|--------|------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|--|--|--|-----------------------------------------------------------|------|--------|
|           |      |                 |        |      | МІМТ.480.004.082 – ПЗ                                                                             |  |  |  |                                                           |      |        |
|           |      |                 |        |      |                                                                                                   |  |  |  |                                                           |      |        |
| Вим       | Лист | № докум.        | Підпис | Дата | Мікропроцесорний прилад для визначення вмісту небезпечних газів у повітрі<br>Пояснювальна записка |  |  |  | Лім.                                                      | Лист | Листів |
| Розроб.   |      | Тимошенко Т.В.  |        |      |                                                                                                   |  |  |  |                                                           |      |        |
| Перевір.  |      | Єфіменко Н.А    |        |      |                                                                                                   |  |  |  |                                                           | 7    | 69     |
| Реценз.   |      |                 |        |      |                                                                                                   |  |  |  | Державний університет «Житомирська політехніка», гр. МТ-5 |      |        |
| Н. Контр. |      | Єфіменко Н.А    |        |      |                                                                                                   |  |  |  |                                                           |      |        |
| Затверд.  |      | Подчашинський Ю |        |      |                                                                                                   |  |  |  |                                                           |      |        |

|                                                                   |    |
|-------------------------------------------------------------------|----|
| 3. АНАЛІЗ СУЧАСНИХ СИГНАЛІЗАТОРІВ                                 |    |
| НЕБЕЗПЕЧНИХ ГАЗІВ .....                                           | 24 |
| 3.1. Стаціонарний детектор діоксиду вуглецю                       |    |
| Walcom W-K 600 CO <sub>2</sub> .....                              | 24 |
| 3.2. Мультигазовий детектор Walcom HT-1805.....                   | 28 |
| 3.3 Мультигазовий детектор-термогігрометр СЕМ GD-3803 .....       | 33 |
| 3.4. Узагальнення результатів аналізу сучасних аналогів .....     | 36 |
| 4. РОЗРОБКА СТРУКТУРНОЇ СХЕМИ ПРИЛАДУ .....                       | 38 |
| 5. ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ ТА РОЗРАХУНОК ОСНОВНИХ                    |    |
| ЕЛЕМЕНТІВ ПРИЛАДУ .....                                           | 40 |
| 5.1. Обґрунтування вибору мікроконтролера .....                   | 40 |
| 5.2. Підбір бездротового модуля .....                             | 42 |
| 5.3. Визначення типу газового сенсора.....                        | 42 |
| 5.4 Аналіз нелінійності та визначення поправочних коефіцієнтів .. | 44 |
| 5.5 Проектування вимірювальної схеми датчика .....                | 52 |
| 5.6 Вибір терморезистора.....                                     | 52 |
| 6. ПРОЕКТУВАННЯ АПАРАТНИХ І ПРОГРАМНИХ ЗАСОБІВ .                  | 54 |
| 7. РОЗРАХУНОК МЕТРОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК.....                    | 55 |
| 7.1 Канал вимірювання концентрації метану.....                    | 55 |
| 7.2 Визначення коефіцієнтів перетворення.....                     | 56 |
| 7.3 Рівняння похибок каналу вимірювання концентрації метану....   | 56 |
| 7.4 Розподілення похибок між структурними елементами .....        | 56 |
| 8. ОЦІНКА ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ РОБОТИ ПРИЛАДУ ...                | 58 |
| 9. БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ ТА ОХОРОНА ПРАЦІ.....                  | 60 |
| 9.1. Місце охорони праці в системі управління житлово-комунальним |    |
| господарством.....                                                | 60 |
| 9.2 Структура державного регулювання охорони праці.....           | 61 |
| 9.3 Стратегічні завдання Кабінету Міністрів України .....         | 61 |
| 9.4 Компетенція та повноваження наглядового органу .....          | 62 |

|     |                                                                |    |
|-----|----------------------------------------------------------------|----|
| 9.5 | Обов'язковість виконання рішень і відповідальність суб'єктів.. | 63 |
| 9.6 | Висновки та перспективи вдосконалення системи .....            | 63 |
|     | ВИСНОВКИ .....                                                 | 65 |
|     | СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....                                | 67 |
|     | ДОДАТКИ.....                                                   | 69 |

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | МІМТ.480.004.082 – ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       | 8    |

## ВСТУП

У сучасній енергетичній інфраструктурі як побутового, так і промислового рівня природний газ виступає одним із домінуючих видів палива. Його застосування охоплює широкий спектр споживачів: від комунально-побутових плит для термічної обробки їжі та проточних водонагрівачів до потужних опалювальних котлів автономних систем тепlopостачання. Однак паралельно зі зручністю та економічною доцільністю експлуатації газового обладнання суттєво зростає рівень потенційних техногенних ризиків, пов'язаних із неконтрольованою емісією горючих газів та утворенням токсичних продуктів їх спалювання. Саме тому питання розробки прецизійних інформаційно-вимірювальних систем для безперервного моніторингу концентрацій газових компонентів та оперативної ідентифікації небезпечних ситуацій набуває першочергової актуальності в галузі метрології та приладобудування.

Найбільш критичним із токсикологічної точки зору продуктом неповного окиснення вуглеводнів є моно оксид вуглецю (CO). Ця сполука, не маючи кольору та запаху, проявляє виражену гемо токсичну дію: вона приблизно у 250 разів активніше зв'язується з гемоглобіном крові, ніж кисень, утворюючи стійкий карбоксигемоглобін. Внаслідок цього навіть за об'ємної частки CO у повітрі на рівні 0,1 % (1000 ppm) протягом кількох хвилин настає втрата свідомості, а концентрація 1 % є летальною за лічені хвилини. Саме ці обставини обґрунтовують жорсткі вимоги міжнародних стандартів до гранично допустимих концентрацій (ГДК) CO у робочій зоні, які не повинні перевищувати 20 мг/м<sup>3</sup> (приблизно 17 ppm) для восьмигодинної експозиції. Виявити присутність чадного газу без застосування спеціалізованих газоаналітичних засобів неможливо, що підкреслює необхідність безперервного апаратного моніторингу повітряного середовища в приміщеннях із газовим обладнанням.

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | MIMT.480.004.082 – ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       | 9    |

Основний компонент природного газу – метан ( $\text{CH}_4$ ) – становить небезпеку іншого характеру. При досягненні об'ємної частки в повітрі від 5 % (нижня концентраційна межа поширення полум'я, НКПП) до 15 % (верхня КПП) формується вибухонебезпечна газоповітряна суміш. За наявності джерела ініціювання – відкритого вогню, електричної іскри або навіть розряду статичної електрики – може статися об'ємний вибух із катастрофічними наслідками. Особливо високий рівень небезпеки фіксується в замкнених або недостатньо вентильованих просторах, де через обмежений повітрообмін концентрація метану здатна стрімко досягати критичних значень за короткий проміжок часу.

З огляду на викладене, алгоритм дій персоналу та мешканців при виявленні специфічного запаху одоранту (етилмеркаптану), що додається до природного газу, має бути чітко регламентованим і безумовним. Передусім слід негайно припинити експлуатацію будь-яких електроприладів, здатних генерувати іскру (вимикачі, розетки, дзвінки), виключити всі потенційні джерела відкритого вогню, організувати інтенсивне наскрізне провітрювання загазованого приміщення шляхом відкриття віконних та дверних прорізів. Після цього необхідно терміново сповістити аварійну газову службу за номером 104 та залишити небезпечну зону до прибуття фахівців, які проведуть інструментальне обстеження та локалізацію витoku.

Коректна експлуатація газо споживаючого обладнання передбачає суворе дотримання нормативно-технічної документації. Це включає візуальний контроль характеру полум'я (рівномірне синє горіння свідчить про нормальне співвідношення газ/повітря, тоді як поява жовтих язиків полум'я та кіптяви сигналізує про неповне згоряння з підвищеним утворенням  $\text{CO}$ ), заборону на використання технічно несправних пальників, регулярну перевірку тяги в димових та вентиляційних каналах, а також своєчасне проведення регламентних робіт із технічного обслуговування. Окрему увагу слід приділяти духовим шафам та варильним поверхням, які

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | МІМТ.480.004.082 – ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                       | 10   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       |      |

повинні експлуатуватися виключно за прямим функціональним призначенням, а не як джерела обігріву приміщень.

З позицій сучасної вимірювальної техніки найбільш перспективним напрямком мінімізації газових ризиків є широке впровадження автоматичних сигналізаторів витоку газу. Такі пристрої реалізують функцію неперервного контролю концентрацій цільових компонентів газової суміші в режимі реального часу. Вимоги до сучасних газоаналізаторів охоплюють: високу селективність до визначуваного компонента на тлі можливих перехресних впливів, достатню чутливість для фіксації до критичних концентрацій, мінімальну інерційність (час спрацьовування сигналізації не повинен перевищувати десятків секунд), наявність автономного джерела резервного живлення для функціонування в умовах перебоїв електропостачання, а також інтеграцію цифрових інтерфейсів бездротової передачі даних (Wi-Fi, Bluetooth, Zigbee) для побудови розподілених систем телеметричного моніторингу. Крім того, конструктивне виконання корпусу повинно забезпечувати захист від зовнішніх впливів на рівні не нижче IP54, гарантуючи працездатність у широкому діапазоні температур та вологості.

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | МІМТ.480.004.082 – ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                       | 11   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       |      |

## 1.ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ

### 1.1 Підстава для розробки, призначення та галузь застосування

Підставою для розробки є завдання на дипломне проектування.

Прилад призначено для визначення вмісту небезпечних газів у повітрі.

Потрібно розробити структурну схему приладу та вибрати елементну базу, розробити електричну принципову схему мікропроцесорного приладу для визначення вмісту небезпечних газів у повітрі. Розробити програмно-алгоритмічне забезпечення та оцінити точність вимірювання.

Початок розробки – лютий 2026 р. Кінець розробки – червень 2026 року.

### 1.2 Умови експлуатації

1.2.1. Температура зовнішнього середовища від 0 до +45 °С

1.2.2. Відносна вологість не більше 80%

1.2.3. Атмосферний тиск 600-800 мм. рт. ст.

1.2.4. Хімічно активних речовин немає

1.2.5. Характер роботи неперервний

### 1.3 Вимоги до технічних характеристик

1.3.1. Об'єкт розробки – мікропроцесорний прилад.

1.3.2. Параметри вимірювання – вміст метану та чадного газу в повітрі.

1.3.3. Діапазон вимірювання концентрації

– метану 0,01 % – 0,5 % (1000–5000 ppm),

– чадного газу 0,003 % – 0,01 % (30–100 ppm).

1.3.4. Похибка вимірювання  $\pm 0,4 \%$ ,

1.3.5. Час вимірювання, не більше 35 с.

### 1.4 Вимоги до надійності

Система є така, що відновлюється, не резервується, ремонтпридатною.

Наробіток на відмову складає не менше 35000 годин.

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | MIMT.480.004.082 – ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       | 12   |

## 2. БАЗОВІ ЕТАПИ ФУНКЦІОНУВАННЯ ГАЗОАНАЛІЗАТОРІВ: ПРОБОВІДБІР, СЕНСОРНЕ ДЕТЕКТУВАННЯ ТА ПЕРЕТВОРЕННЯ СИГНАЛІВ

Робота переважної кількості актуальних моделей газоаналітичної апаратури реалізується через три ключові стадії: відбір газоповітряної суміші, контакт її складових із сенсорними елементами та подальшу електронну обробку зареєстрованих даних. Потрапляння досліджуваного середовища у вимірювальний тракт може відбуватися пасивно, внаслідок дифузійних процесів, або активно – за рахунок функціонування інтегрованої помпи, що визначається інженерним виконанням конкретного зразка.

Опинившись у внутрішній порожнині приладу, хімічні компоненти газової суміші вступають у взаємодію з первинними перетворювачами. Наприклад, електрохімічні комірки при контакті з такими токсикантами, як монооксид вуглецю, продукують електричний відгук. Водночас оптичні сенсори, що працюють в інфрачервоному діапазоні, оцінюють рівень вмісту цільового компонента через вимірювання ступеня ослаблення потоку випромінювання, демонструючи високу результативність під час моніторингу діоксиду вуглецю.

Через те що первинні сигнали характеризуються малою потужністю, вони підлягають попередньому масштабуванню та очищенню від шумів за допомогою апаратних засобів пристрою. Після процедури заводозахисту оброблені величини трансформуються в цифровий код, який візуалізується на дисплеї оператора. В умовах каліброваної лабораторної експлуатації рівень достовірності таких вимірювальних комплексів може досягати орієнтовно 95%, що уможливорює вчасну ідентифікацію загрозливих концентрацій.

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | MIMT.480.004.082 – ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                       | 13   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       |      |

## **2.1. Алгоритм детектування: від реакції на чутливому шарі до формування аварійного сповіщення**

У момент адсорбції молекул газу на активній поверхні сенсора майже без затримки ініціюється відповідне фізико-хімічне перетворення. У термо каталітичних сенсорах горючі сполуки зазнають безполуменового окислення на нагрітій спіралі, наслідком чого є тепловиділення та кореляція електричного опору схеми.

Принцип дії електрохімічних перетворювачів інший: вони виробляють електричний сигнал, чия сила знаходиться в лінійній залежності від концентрації аналізованої речовини. Зафіксовані параметри передаються в обчислювальний модуль, де здійснюється їх порівняння з гранично допустимими порогоми, регламентованими чинними нормативними документами.

При фіксації перевищення критичних рівнів вмісту шкідливих домішок (наприклад, сірководню понад 50 ppm або досягнення метаном позначки 10% нижньої концентраційної межі поширення полум'я) мікроконтролер ініціює активацію сигнальних пристроїв. Застосування мульти сенсорного оповіщення (звук, світлова індикація, тактильна вібрація) гарантує надійне інформування персоналу незалежно від рівня виробничих шумів чи освітленості.

## **2.2. Роль контролерів та систем безперервного дистанційного спостереження**

Ядром архітектури виступає мікропроцесорний модуль, функціонал якого охоплює цифрову фільтрацію вимірювальної інформації, аналого-цифрове перетворення сигналів, що надходять від первинних перетворювачів, та підготовку даних для подальшої аналітики. Також він

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | MIMT.480.004.082 – ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                       | 14   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       |      |

виконує наглядову функцію, визначаючи актуальність метрологічних характеристик і потреби в калібруванні.

Актуальні зразки обладнання комплектуються вбудованими процедурами самоперевірки, які дозволяють ідентифікувати деградацію параметрів чутливих елементів або помилкове спрацьовування на нецільові хімічні сполуки. При виникненні подібних інцидентів генерується запит на проведення позачергової повірки.

Оснащення систем телеметричними модулями забезпечує постійний потік даних до централізованих пультів керування на великих виробничих майданчиках, уможливлуючи оперативний аналіз повітряного середовища. Згідно з даними Національного інституту охорони праці (NIOSH), впровадження подібних рішень забезпечує скорочення тривалості реакції на інциденти в середньому на три чверті. Для підвищення відмовостійкості до структури також інтегруються дублюючі обчислювачі, що відстежують справність основної апаратури.

*Класифікація газодетекторів та специфіка сенсорних технологій*  
*Однокомпонентні та багатоконпонентні моделі: особливості застосування*

Пристрої, орієнтовані на реєстрацію одного параметра, затребувані там, де достатньо контролю єдиного критичного показника, наприклад, рівня кисню в замкнених об'ємах. Їх вирізняє легкість в обслуговуванні та помірна ринкова ціна.

Мультигазові аналізатори уможливлують паралельне відстеження відразу декількох параметрів безпеки. Вони дозволяють фіксувати вибухонебезпечні концентрації, стежити за кисневим балансом та визначати наявність токсичних компонентів (зокрема CO та H<sub>2</sub>S). Подібне обладнання критично необхідне на об'єктах нафтохімічного, металургійного та лакофарбового циклів, де присутній комплекс небезпечних факторів.

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | MIMT.480.004.082 – ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       | 15   |

### *Мобільний та стаціонарний форм-фактори*

Переносні газоаналізатори розраховані на індивідуальне використання спеціалістами під час інспекції обмежених чи підземних просторів. Їх цінність полягає у здатності проводити миттєву локальну оцінку складу атмосфери.

На відміну від них, стаціонарні комплекси являють собою розгалужену мережу розміщених по об'єкту вимірювальних перетворювачів, змонтованих біля фланцевих з'єднань, компресорних станцій та ємностей зберігання. Вони функціонують у режимі 24/7 та здатні без участі людини активувати аварійну вентиляцію, блокувати технологічні лінії та розсилати тривожну інформацію.

### *Електрохімічний метод контролю токсичних компонентів*

В основу функціонування електрохімічних комірок покладено окисно-відновні процеси, наслідком яких стає направлений потік електронів. Так, в результаті окислення монооксиду вуглецю на робочому електроді генерується електричний струм, пропорційний його масовій частці.

Ключовою перевагою є висока роздільна здатність, що дозволяє ідентифікувати навіть мікродози забруднювачів. Однак часовий ресурс таких датчиків є скінченним через поступову деградацію електролітичного розчину. Усереднений термін придатності зазвичай варіюється в діапазоні від 12 до 36 місяців.

### *Термокаталітичні та оптичні (NDIR) технології*

Пелісторні (термокаталітичні) сенсори орієнтовані на визначення горючих газоподібних речовин, зокрема метану та пропану. Їх дія ґрунтується на ефекті безполуменового спалювання на поверхні каталізатора.

Не дисперсійні інфрачервоні датчики функціонують завдяки вибіркового поглинання молекулами газу випромінювання в ІЧ-спектрі. Суттєвою перевагою цього підходу є відсутність потреби в кисневому середовищі для коректної роботи та висока завадостійкість до агресивних впливів.

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | MIMT.480.004.082 – ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                       | 16   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       |      |

### *Фото іонізаційний метод для виявлення летких органічних сполук*

Робота фото іонізаційних детекторів (PID) передбачає використання високоенергетичного ультрафіолетового випромінювання для іонізації молекул летких органічних сполук, таких як ароматичні вуглеводні (бензол, толуол) та широкий спектр промислових розчинників.

Утворений у процесі іонізації струм слугує мірою концентрації забруднювача. Такі прилади забезпечують блискавичний відгук та чутливість до мінімальних протікань, хоча на прецизійність їх показів можуть впливати кліматичні фактори (зокрема відносна вологість), що іноді потребує застосування додаткових селективних методик.

### **2.3. Типові об'єкти газового аналізу та супутні фахові загрози** **Токсичні, займисті та інертні компоненти: джерела ризику й обґрунтування безперервного контролю**

Перебуваючи в умовах промислового майданчика, персонал потенційно наражається на вплив трьох ключових груп шкідливих речовин: отруйних, вибухопожежонебезпечних та хімічно нейтральних, здатних витіснити кисень із навколишньої атмосфери. Кожен із зазначених класів формує суттєву загрозу для фізіологічного стану та життєдіяльності людини.

До категорії особливо небезпечних токсикантів належить монооксид вуглецю (CO), котрий уже в мінімальних дозах блокує киснево-транспортну функцію гемоглобіну. Згідно із санітарно-гігієнічними регламентами, поріг гранично допустимої експозиції протягом стандартної восьмигодинної зміни обмежений рівнем 50 ppm.

Не менш загрозливим є сірководень ( $H_2S$ ), вплив якого на рівні близько 20 ppm здатен викликати критичні дисфункції респіраторної системи. Горючі газоподібні сполуки, зокрема метан, створюють передумови для об'ємних вибухів у разі накопичення до вибухонебезпечних пропорцій.

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | MIMT.480.004.082 – ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                       | 17   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       |      |

Окрему проблему становить киснева недостатність у повітрі робочої зони. При падінні концентрації  $O_2$  нижче позначки 19,5 % існує висока ймовірність раптової втрати свідомості без попередніх симптомів гіпоксії. Узагальнені статистичні вибірки демонструють, що вагома частка летальних інцидентів у замкнутих об'ємах спричинена саме запізнілою ідентифікацією небезпечних газоповітряних сумішей. Це обґрунтовує необхідність організації перманентного апаратного нагляду як одного з базових стовпів промислової безпеки.

*Пріоритетні для детектування газу на виробничих майданчиках*

У виробничій практиці найбільш затребуваним є контроль за вмістом таких речовин:

| Газ                           | Походження / джерело емісії              | Небезпечний поріг                                      | Метод детектування               |
|-------------------------------|------------------------------------------|--------------------------------------------------------|----------------------------------|
| Метан ( $CH_4$ )              | Гірничі виробки, водоочисні споруди      | 5 % НКПП (нижня концентраційна межа поширення полум'я) | Термо каталітичні сенсори        |
| Монооксид вуглецю ( $CO$ )    | Вихлопні гази двигунів, продукти горіння | 50 ppm                                                 | Електрохімічні комірки           |
| Леткі органічні сполуки (ЛОС) | Фарбувальні камери, цехи розчинників     | 0,1–10 ppm                                             | Фото іонізаційні детектори (PID) |

Окремий акцент робиться на відстеженні рівня кисню. Згідно з аналізом інцидентів, значна кількість техногенних подій трапляється внаслідок виходу вмісту  $O_2$  за межі безпечного діапазону 19,5–23,5 %, що додатково підкріплює тезу про критичність безперервного вимірювання цього параметра.

### *Специфіка кисневого моніторингу в ізольованих об'ємах*

В умовах замкнених технологічних ємностей та колодязів рівень кисню здатен динамічно знижуватися через перебіг окислювальних реакцій або витіснення повітря іншими газами. Зокрема, акумуляція діоксиду вуглецю може стрімко спричинити кисневий дефіцит.

Результативність моніторингу істотно залежить від коректного просторового позиціонування первинних перетворювачів. Датчики, орієнтовані на важкі гази (наприклад, пропан), раціонально монтувати в нижніх зонах, тоді як сенсори для легших фракцій (метан) слід розміщувати під перекриттям.

Перед допуском персоналу в замкнений простір обов'язковою процедурою є попереднє тестування атмосфери з витримкою щонайменше 15 хвилин для стабілізації показників. Експериментальні дані засвідчують, що неухильне виконання цього регламенту дозволяє кардинально зменшити ймовірність летальних наслідків.

#### **2.4. Роль газоаналітичної техніки в системі охорони праці та дотримання регуляторних норм. Запобігання позаштатних ситуацій на промислових об'єктах**

На виробничих комплексах підвищеної категорії небезпеки, включаючи нафтопереробні заводи, хімічні комбінати та станції біологічного очищення, газоаналізатори *de facto* слугують первинним бар'єром захисту персоналу від латентних загроз.

Прилади здійснюють перманентне сканування повітряного середовища та інформують працівників про досягнення небезпечних концентрацій задовго до появи візуальних індикаторів аварії. Новітні комплекси інтегруються в єдину цифрову інфраструктуру підприємства та здатні в

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | МІМТ.480.004.082 – ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       | 19   |

автоматичному режимі ініціювати примусову вентиляцію, зупиняти виробничі лінії або ізолювати аварійні ділянки.

Впровадження таких систем дає змогу значно зменшити частоту виникнення інцидентів та мінімізувати прямі й опосередковані матеріальні втрати.

Ключовими завданнями комплексів газового контролю виступають:

- оперативне фіксування накопичення метану в закритих боксах;
- картографування зон із критично низьким вмістом кисню;
- запобігання інтоксикації сірководнем на технологічних установках;
- автоматизоване оповіщення виробничого персоналу про виникнення критичної ситуації.

## 2.5. Практична ефективність превентивної діагностики загроз

На одному з об'єктів нафтохімічного профілю стаціонарна система оптичного (NDIR) моніторингу зафіксувала виток етилену, рівень якого сягнув 45 % від нижньої межі вибуховості безпосередньо в зоні резервуарного парку.

Після ідентифікації загрози автоматика менш ніж за дві хвилини реалізувала цикл захисних дій: увімкнулись сирени та світлові маяки, спрацювала запірна арматура на трубопроводах, а також було задіяно аварійну вентиляційну систему для розсіювання газової хмари.

Завдяки мінімальній затримці між детектуванням і реагуванням вдалося уникнути масштабної техногенної аварії та значних фінансових збитків. Подібні приклади наочно підтверджують важливість застосування сучасних засобів газоаналітичного контролю.

*Забезпечення відповідності міжнародним безпековим стандартам*

Коректне функціонування систем газового аналізу є ключовим фактором дотримання вимог міжнародної нормативно-правової бази.

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | MIMT.480.004.082 – ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       | 20   |

Положення стандарту OSHA 29 CFR 1910.146 вимагають обов’язкового застосування газового моніторингу під час виконання робіт у замкнених просторах. У свою чергу, документ ANSI/ISA 92.0.01-2010 встановлює технічні критерії до метрологічної точності, експлуатаційної надійності та функціональних характеристик газових сенсорів.

Досвід свідчить, що суб’єкти господарювання, які суворо дотримуються регламентованих процедур, суттєво рідше зазнають фінансових санкцій з боку регуляторів та демонструють вищий рівень культури промислової безпеки.

Базові регулюючі документи наведено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 Базові регулюючі стандарти безпеки

| Стандарт      | Ключова регламентована вимога                                                            | Періодичність виконання      |
|---------------|------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|
| OSHA 1910.119 | Моніторинг горючих газів у межах систем управління безпекою технологічних процесів (PSM) | Безперервно                  |
| NIOSH 2024    | Відстеження концентрацій токсичних речовин                                               | Не рідше ніж кожні 15 хвилин |
| API RP 500    | Класифікація вибухонебезпечних зон та вимоги до розміщення сенсорів                      | Відповідно до категорії зони |

Проведення своєчасної повірки та незалежної сертифікації є запорукою підтримання метрологічних характеристик обладнання на рівні, що відповідає встановленим вимогам.

## 2.6. Метрологічне забезпечення, сервісне обслуговування та стратегії підвищення відмовостійкості Процедури калібрування та функціонального тестування

Для гарантування єдності та достовірності вимірювань критично важливо дотримуватися регламентів періодичного калібрування та перевірки працездатності газоаналітичних приладів.

Процес калібрування полягає в подачі на вхід сенсора повітряних газових сумішей із атестованими значеннями концентрації для коригування градууювальної характеристики. Натомість функціональний тест (bump test) виконується для підтвердження коректності спрацьовування порогових пристроїв сигналізації.

Нехтування регламентним технічним обслуговуванням призводить до поступової деградації точності, причому дрейф показників може перевищувати 15 % на рік. Така ситуація підвищує ризик хибно-негативних спрацьовувань під час реальної загрози.

Суттєвим аспектом є документування всіх сервісних операцій, що уможлиблює відстеження історії експлуатації кожного приладу та підтвердження його відповідності нормативним вимогам під час аудиту.

#### *Графік калібрування для різних типів первинних перетворювачів*

Електрохімічні комірки, що застосовуються для визначення монооксиду вуглецю та сірководню, як правило, потребують калібрування щомісяця або щокварталу через поступову деградацію електроліту.

Не дисперсійні інфрачервоні сенсори (NDIR) відрізняються вищою часовою стабільністю і можуть утримувати паспортну точність упродовж інтервалу від шести до дванадцяти місяців.

На кратність проведення перевірок впливають зовнішні умови, з-поміж яких варто виокремити:

- високий відсоток відносної вологості;
- різкі перепади температурного фону;
- значну концентрацію аерозолів та пилу;
- присутність у повітрі хімічно активних домішок.

#### *Експлуатаційний ресурс сенсорів та запобігання передчасній деградації*

За паспортних умов застосування середній ресурс чутливих елементів становить від двох до трьох років. Водночас контакт із деякими хімічними реагентами здатен різко скоротити цей термін.

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | MIMT.480.004.082 – ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       | 22   |

Особливо виражену отруйну дію чинять:

- кремнійорганічні сполуки (силікони);
- сульфіді;
- речовини, що містять свинець.

Крім того, на довговічність апаратури негативно впливають несприятливі кліматичні та механічні чинники, зокрема тривалий вплив конденсату, від'ємні температури та постійні вібраційні навантаження.

Для вчасної ідентифікації несправностей необхідно систематично здійснювати візуальну інспекцію корпусів датчиків на предмет виявлення корозійних уражень, механічних забруднень та інших ознак дефектів.

*Практичні рекомендації з експлуатації та скорочення періодів непрацездатності*

Для підтримання максимальної ефективності газоаналізаторів доцільно дотримуватися наведених нижче правил:

- утримувати обладнання в чистих приміщеннях із нормованими показниками мікроклімату;
- використовувати окремі магістралі для подачі калібрувальних сумішей, щоб уникнути перехресного забруднення;
- виконувати заміну повітряних фільтруючих елементів з періодичністю не рідше одного разу на квартал;
- обов'язково проводити функціональний тест перед кожним застосуванням приладу у вибухонебезпечних або замкнених зонах.

Дотримання зазначених протоколів забезпечує високий коефіцієнт технічної готовності обладнання, що може перевищувати 99 %, а також сприяє безумовному виконанню директив міжнародних стандартів ANSI/ISA та ATEX.

|      |      |           |        |      |                       |      |
|------|------|-----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |           |        |      | MIMT.480.004.082 – ПЗ | Арк. |
|      |      |           |        |      |                       | 23   |
| Змн. | Арк. | № док.ум. | Підпис | Дата |                       |      |

## 3 АНАЛІЗ СУЧАСНИХ СИГНАЛІЗАТОРІВ НЕБЕЗПЕЧНИХ ГАЗІВ

### 3.1. Стационарний детектор діоксиду вуглецю Walcom W-K 600 CO<sub>2</sub>

*Застосування та галузі промисловості для використання сигналізатора*

Walcom W-K 600 CO<sub>2</sub> є стаціонарним газоаналізатором, призначеним для автоматичного безперервного контролю об'ємної частки діоксиду вуглецю в повітрі робочої зони [12]. Прилад орієнтований на застосування на виробничих майданчиках, де існує ймовірність накопичення CO<sub>2</sub> до рівнів, здатних спричинити кисневу недостатність або інтоксикацію персоналу. Типовими об'єктами впровадження виступають цехи харчової промисловості (зокрема бродильні відділення, лінії розливу газованих напоїв, склади з регульованим газовим середовищем), тепличні господарства, лабораторні комплекси, офісні центри, підземні паркінги, а також підвальні та напівпідвальні приміщення комунально-побутового призначення.

У випадку перевищення запрограмованого порогового рівня концентрації CO<sub>2</sub> прилад активує світлову та звукову сигналізацію безпосередньо на місці встановлення. Крім того, завдяки наявності вбудованого релейного виходу, детектор здатен комутувати зовнішні виконавчі пристрої, зокрема запускати примусову вентиляцію, активувати електромагнітні запірні клапани або передавати тривожне сповіщення на пульт диспетчеризації. Зовнішній вигляд стаціонарного газоаналізатора Walcom W-K 600 CO<sub>2</sub> представлено на рис. 3.1

Особливості конструкції, живлення та варіанти виконання На відміну від портативних або батарейних сигналізаторів, модель Walcom W-K 600 CO<sub>2</sub> розроблена для стаціонарного монтажу та живиться безпосередньо від однофазної мережі змінного струму 220 В. Виробником реалізовано схему з внутрішнім імпульсним блоком живлення, що виключає потребу в громіздких зовнішніх адаптерах. У контексті аналізу надійності слід

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | MIMT.480.004.082 – ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       | 24   |

зазначити відсутність вбудованого резервного акумулятора (ДБЖ), що робить доцільним підключення приладу до загально об'єктової мережі гарантованого електропостачання для запобігання втраті контролю під час аварійних вимкнень.



Рис 3.1 Газоаналізатор Walcom W-K 600 CO<sub>2</sub>

Конструктивно детектор виконано в пластиковому корпусі, призначеному для настінного монтажу. Така конфігурація спрощує процедуру встановлення та підключення зовнішніх сигнальних ліній через кабельні вводи. Прилад належить до категорії одно каналних вимірювачів, тобто сенсорний тракт оптимізовано виключно під фізико-хімічні властивості діоксиду вуглецю, що забезпечує високу селективність аналізу без перехресних впливів з боку інших атмосферних газів (за винятком водяної пари, вплив якої компенсується схемо технічно).

#### *Умови експлуатації сигналізатора*

Для забезпечення паспортної точності та довговічності чутливого елемента виробник встановлює такі вимоги до навколишнього середовища під час експлуатації:

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | МІМТ.480.004.082 – ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                       | 25   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       |      |

– діапазон робочих температур повітря, в межах якого гарантується коректна робота із заданою метрологічною похибкою, становить від 0 до +50 °С;

– максимальний показник відносної вологості не повинен перевищувати 95 % (без утворення конденсату) за температури 25 °С;

– атмосферний тиск має відповідати нормальним умовам експлуатації закритих приміщень (орієнтовно 84,0–106,7 кПа);

– номінальна напруга електроживлення – 220 В змінного струму.

Режим роботи приладу – безперервний. Залежно від модифікації та вимог об'єкта, газоаналізатор може використовуватись як автономний сигналізатор, так і як компонент розгалуженої системи безпеки.

#### Технічні характеристики аналізатора

Контрольований компонент: діоксид вуглецю (CO<sub>2</sub>).

Принцип детектування: не дисперсійна інфрачервона абсорбціометрія (NDIR), яка вирізняється високою селективністю та стабільністю в умовах відсутності кисню.

Діапазон вимірювання об'ємної частки CO<sub>2</sub>: від 0 до 5000 ppm (0–0,5 %), що цілком відповідає завданням контролю повітря робочої зони та перекриває ГДК р.з. (0,5 % або 5000 ppm згідно з ГОСТ 12.1.005-88).

Кількість порогів спрацьовування сигналізації: можливість програмування одного або кількох рівнів (як правило, попереджувальний та аварійний порогови), що дозволяє диференціювати ступінь небезпеки.

Номінальне значення порогів спрацьовування:

Стандартно встановлюються на рівнях 1000 ppm (сигнал «Увага» – типова межа якості повітря в приміщеннях) та 5000 ppm (аварійний рівень, що потребує негайної евакуації або вентиляції).

Границі допустимої основної абсолютної похибки: типова точність для NDIR-сенсорів становить  $\pm (50 \text{ ppm} + 5 \% \text{ від виміряного значення})$ , що є достатнім для промислової безпеки.

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | MIMT.480.004.082 – ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       | 26   |

Час спрацьовування сигналізації ( $t_{90}$ ): не перевищує 60 секунд, що забезпечує швидку реакцію на критичну зміну складу атмосфери.

Термін служби сенсора: завдяки безконтактному оптичному методу вимірювання ресурс інфрачервоного джерела та фотоприймача складає понад 5 років, що значно перевищує показники електрохімічних аналогів.

Вихідні інтерфейси: релейний вихід для керування зовнішніми колами (нормально розімкнені/замкнені контакти), що дозволяє комутувати навантаження до 250 В / 5 А.

Індикація: цифровий дисплей для відображення поточної концентрації в реальному часі, світлодіодна індикація стану (живлення, попередження, аварія) та вбудований п'єзоелектричний випромінювач.

Ступінь захисту корпусу: IP30, що передбачає монтаж усередині чистих приміщень без прямого потрапляння води.

Габаритні розміри: компактне виконання, адаптоване під настінний монтаж.

Споживана потужність: не перевищує 3–5 ВА, що робить прилад енерго ефективним.

#### *Переваги та недоліки*

До ключових переваг газоаналізатора Walcom W-K 600 CO<sub>2</sub> слід віднести:

- застосування оптичного NDIR-сенсора, який не схильний до «отруєння» сторонніми речовинами та не потребує частого калібрування;
- тривалий експлуатаційний ресурс без необхідності заміни електрохімічних комірок;
- наявність цифрової індикації, що дозволяє візуально оцінювати динаміку концентрації газу;
- потужний релейний вихід для безпосереднього керування виконавчими пристроями без додаткових контролерів;

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | MIMT.480.004.082 – ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                       | 27   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       |      |

– висока стабільність показників, обумовлена фізичним принципом вимірювання.

Водночас, об'єктивний аналіз дозволяє виокремити низку функціональних обмежень та недоліків, що є критичними в контексті розробки нового приладу:

– відсутність автономного джерела живлення: прилад не функціонує при зникненні напруги в мережі, що робить його вразливим в аварійних ситуаціях;

– відсутність модулів бездротової передачі даних: відсутність інтегрованих інтерфейсів Wi-Fi або Bluetooth унеможлиблює побудову гнучких телеметричних мереж без додаткового обладнання;

– обмежена номенклатура контрольованих газів: однокомпонентне виконання звужує сферу застосування порівняно з мультигазовими системами;

– низький рівень пиловологозахисту (IP30): не дозволяє використовувати детектор у запилених цехах або на відкритих майданчиках без додаткового захисного кожуха.

### 3.2 Мультигазовий детектор Walcom HT-1805

*Застосування та галузі промисловості для використання сигналізатора*

Walcom HT-1805 є портативним мультигазовим аналізатором, що поєднує в собі функції контролю одразу чотирьох критичних параметрів повітряного середовища [13]. Прилад призначений для індивідуального захисту персоналу під час виконання робіт у замкнених просторах, на об'єктах нафтогазового комплексу, у каналізаційних колодязях, резервуарах, шахтах, а також під час проведення аварійно-рятувальних операцій. Його ключове завдання – одночасне виявлення вибухонебезпечних концентрацій

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | MIMT.480.004.082 – ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       | 28   |

горючих газів (зокрема метану), токсичних рівнів чадного газу та сірководню, а також фіксація кисневої недостатності чи надлишку.

У випадку перевищення будь-яким із чотирьох каналів запрограмованих порогів безпеки прилад активує потужну світлозвукову та вібраційну сигналізацію, що дозволяє оперативно попередити користувача навіть в умовах підвищеного виробничого шуму. Зовнішній вигляд портативного газоаналізатора Walcom HT-1805 представлено на рисунку 3.2.



Рис. 3.2 Газоаналізатор Walcom HT-1805

#### *Особливості конструкції, живлення та варіанти виконання*

Прилад виконано в міцному ергономічному корпусі з ударостійкого полімеру, що забезпечує надійний захист від механічних впливів, пилу та водяних бризок. Живлення здійснюється від вбудованого літій-іонного акумулятора високої ємності, який забезпечує тривалу автономну роботу (орієнтовно до 12–15 годин безперервного контролю). Для заряджання використовується стандартний USB-інтерфейс, що спрощує експлуатацію в польових умовах, оскільки заряджання може здійснюватися від мережевого адаптера, павербанка або бортової мережі транспортного засобу.

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | MIMT.480.004.082 – ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                       | 29   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       |      |

Інформація про поточні концентрації газів виводиться на кольоровий рідкокристалічний дисплей високої роздільної здатності. Інтуїтивно зрозумілий інтерфейс дозволяє оператору миттєво оцінити газову обстановку за всіма чотирма каналами одночасно. Додатково пристрій оснащено світлодіодними індикаторами тривоги, розташованими по периметру корпусу для забезпечення кругової видимості, та вібромотором, що реалізує тактильне сповіщення – критично важливу функцію при використанні в шумних середовищах.

#### *Умови експлуатації сигналізатора*

Виробником встановлено такі вимоги до навколишнього середовища для коректного функціонування:

- температурний діапазон: робочий інтервал становить від -10 °C до +50 °C, що розширює можливості використання в холодну пору року на відкритих майданчиках;
- відносна вологість: допускається експлуатація при вологості до 95 % без утворення конденсату;
- атмосферний тиск: нормальні умови експлуатації закритих та відкритих просторів;
- напруга живлення: вбудований акумулятор 3,7 В, заряджання через USB-порт (5 В постійного струму).

Режим роботи – безперервний, із можливістю циклічного опитування всіх вимірювальних каналів у реальному часі.

#### *Технічні характеристики аналізатора*

- Контрольовані компоненти: одночасно чотири гази – горючі гази (каталітичний сенсор, калібрований за метаном  $\text{CH}_4$ ), чадний газ (CO), сірководень ( $\text{H}_2\text{S}$ ) та кисень ( $\text{O}_2$ ).
- Принципи детектування:
  - *Горючі гази ( $\text{CH}_4$ ):* термокаталітичний метод (пелістор), що забезпечує високу чутливість до вуглеводнів;

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | MIMT.480.004.082 – ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                       | 30   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       |      |

- CO та H<sub>2</sub>S: електрохімічні комірки з високою селективністю до цільових компонентів;
- O<sub>2</sub>: електрохімічний сенсор на основі паливного елемента.
- Діапазони вимірювання:
  - Горючі гази (CH<sub>4</sub>): 0–100 % НКПР;
  - Вуглецевий (чадний) газ (CO): 0–1000 ppm;
  - Сірководень (H<sub>2</sub>S): 0–100 ppm;
  - Кисень (O<sub>2</sub>): 0–30 % об'ємних.
- Кількість порогів спрацьовування: два незалежних рівні по кожному з чотирьох каналів (нижній та верхній пороги), що дозволяє диференціювати ступінь небезпеки.
- Номінальне значення порогів спрацьовування (стандартні заводські налаштування):
  - CH<sub>4</sub>: 20 % НКПР (попередження), 50 % НКПР (аварія);
  - CO: 35 ppm (попередження), 200 ppm (аварія);
  - H<sub>2</sub>S: 10 ppm (попередження), 20 ppm (аварія);
  - O<sub>2</sub>: 19,5 % (нижній поріг), 23,5 % (верхній поріг).
- Границі допустимої основної похибки:
  - CH<sub>4</sub>: ± 5 % НКПР;
  - CO: ± 5 % від виміряного значення;
  - H<sub>2</sub>S: ± 5 % від виміряного значення;
  - O<sub>2</sub>: ± 0,5 % об'ємних.
- Час спрацьовування сигналізації (t<sub>90</sub>): не перевищує 30 секунд для більшості каналів, що відповідає вимогам до приладів індивідуального захисту.
- Термін служби сенсорів: електрохімічні комірки (CO, H<sub>2</sub>S, O<sub>2</sub>) мають типовий ресурс 2–3 роки; термокаталітичний сенсор — понад 4 роки за умови відсутності отруєння силіконами або сульфідами.

- Інтерфейси та сигналізація: кольоровий РК-дисплей, світлодіодна індикація тривоги, звуковий випромінювач (>85 дБ на відстані 1 м), вібромотор.

- Ступінь захисту корпусу: IP65, що гарантує повну пилонепроникність та захист від водяних струменів.

- Масогабаритні показники: компактний корпус, маса орієнтовно 0,25–0,30 кг, що забезпечує зручність носіння на поясі або в нагрудній кишені.

#### *Переваги та недоліки*

До ключових переваг мультигазового детектора Walcom HT-1805 слід віднести:

- мультисенсорну архітектуру, що забезпечує одночасний контроль чотирьох найбільш критичних параметрів безпеки одним приладом;
- високий ступінь автономності завдяки акумулятору великої ємності та USB-заряджанню;
- надійний захист корпусу (IP65), що дозволяє експлуатувати детектор у важких виробничих умовах;
- комбіноване оповіщення (звукове, світлове та вібраційне), яке гарантує сприйняття сигналу тривоги за будь-яких зовнішніх умов.

Водночас, з точки зору завдань даного дипломного проекту, виявлено низку суттєвих функціональних обмежень:

- відсутність контролю аміаку ( $\text{NH}_3$ ): попри мультигазову конфігурацію, прилад не оснащено сенсором аміаку;
- обмежені телеметричні можливості: відсутність вбудованих модулів бездротової передачі даних не дозволяє інтегрувати прилад у централізовані системи моніторингу;
- залежність від періодичного метрологічного обслуговування: електрохімічні сенсори потребують регулярного калібрування та заміни;
- портативний форм-фактор: прилад не призначений для стаціонарного цілодобового моніторингу без участі оператора

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | MIMT.480.004.082 – ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                       | 32   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       |      |

### 3.3 Мультигазовий детектор-термогігрометр CEM GD-3803

Застосування та галузі промисловості для використання сигналізатора

CEM GD-3803 є багатофункціональним вимірювальним приладом, що об'єднує в собі можливості мультигазового аналізатора, прецизійного термометра та гігрометра в одному портативному корпусі [14]. Пристрій орієнтований на комплексну оцінку параметрів мікроклімату та якості повітря в приміщеннях різного призначення. Типовими сферами застосування виступають: системи вентиляції та кондиціонування (HVAC), офісні центри, навчальні заклади, складські комплекси, виробничі цехи з нормованими параметрами повітряного середовища, а також лабораторії різного профілю.

Прилад здійснює безперервний моніторинг концентрації діоксиду вуглецю ( $\text{CO}_2$ ), чадного газу ( $\text{CO}$ ), вмісту кисню ( $\text{O}_2$ ), а також температури та відносної вологості повітря. При перевищенні допустимих рівнів активується звукова та світлова сигналізація. Зовнішній вигляд приладу CEM GD-3803 представлено на рисунку 3.3.



Рис. 3.3 Мультигазовий детектор-термогігрометр CEM GD-3803

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | MIMT.480.004.082 – ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       | 33   |

## Особливості конструкції, живлення та варіанти виконання

СЕМ GD-3803 виконано в ергономічному пластиковому корпусі з прогумованими вставками, що забезпечує зручність утримання в руці під час проведення інспекційних замірів. Живлення приладу реалізовано від вбудованого літій-іонного акумулятора, який заряджається через стандартний USB-порт. Така схема забезпечує тривалу автономну роботу (орієнтовно до 8–10 годин безперервних вимірювань) та сумісність із поширеними джерелами живлення.

Інформація виводиться на великий рідкокристалічний дисплей із підсвічуванням, який одночасно відображає всі п'ять вимірюваних параметрів. Передбачено функцію автоматичного запису даних у внутрішню пам'ять із можливістю подальшого перенесення на ПК через USB-інтерфейс, що робить прилад зручним інструментом для документування результатів інспекцій.

### *Умови експлуатації сигналізатора*

Для забезпечення паспортної точності встановлено такі вимоги до навколишнього середовища:

- температурний діапазон: робочий інтервал від 0 °C до +50 °C;
- відносна вологість: до 95 % без утворення конденсату;
- атмосферний тиск: нормальні умови закритих приміщень;
- напруга живлення: вбудований акумулятор, заряджання 5 В постійного струму через USB.

Режим роботи — безперервний, із можливістю ручного або автоматичного логування даних із заданим інтервалом.

### *Технічні характеристики аналізатора*

Контрольовані компоненти та параметри: діоксид вуглецю (CO<sub>2</sub>), чадний газ (CO), кисень (O<sub>2</sub>), температура повітря (T), відносна вологість повітря (RH).

Принципи детектування:

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | MIMT.480.004.082 – ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                       | 34   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       |      |

CO<sub>2</sub>: недисперсійна інфрачервона абсорбціометрія (NDIR);

CO: електрохімічний сенсор;

O<sub>2</sub>: електрохімічний сенсор;

Температура та вологість: напівпровідниковий сенсор із цифровим виходом.

Діапазони вимірювання:

CO<sub>2</sub>: 0–5000 ppm;

CO: 0–1000 ppm;

O<sub>2</sub>: 0–25 % об'ємних;

Температура: від -10 °C до +60 °C;

Відносна вологість: 0–99,9 %.

Кількість порогів спрацьовування: програмовані рівні тривоги для газових каналів (як правило, один або два порогови для кожного компонента).

Номінальне значення порогів спрацьовування (типів налаштування):

CO<sub>2</sub>: 1000 ppm (попередження), 5000 ppm (аварія);

CO: 35 ppm (попередження), 200 ppm (аварія);

O<sub>2</sub>: 19,5 % (нижній поріг).

Границі допустимої основної похибки:

CO<sub>2</sub>:  $\pm (50 \text{ ppm} + 5 \% \text{ від виміряного значення})$ ;

CO:  $\pm 5 \% \text{ від виміряного значення}$ ;

O<sub>2</sub>:  $\pm 0,5 \% \text{ об'ємних}$ ;

Температура:  $\pm 0,5 ^\circ\text{C}$ ;

Вологість:  $\pm 3 \% \text{ RH}$ .

Час спрацьовування сигналізації ( $t_{90}$ ): не перевищує 60 секунд для більшості газових каналів.

Термін служби сенсорів: NDIR-сенсор CO<sub>2</sub> – понад 5 років; електрохімічні сенсори CO та O<sub>2</sub> – 2–3 роки; сенсор температури/вологості – понад 5 років.

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | MIMT.480.004.082 – ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       | 35   |

Інтерфейси та функції: USB-порт для заряджання та передачі даних на ПК, внутрішня пам'ять для запису вимірювань, звукова та світлова сигналізація, РК-дисплей із підсвічуванням.

Ступінь захисту корпусу: IP30, що обмежує сферу застосування чистими приміщеннями без ризику потрапляння води.

Масогабаритні показники: портативний корпус, маса орієнтовно 0,3–0,4 кг.

#### Переваги та недоліки

До ключових переваг мультигазового детектора-термогігрометра CEM GD-3803 слід віднести:

- комплексний підхід до оцінки якості повітря, що поєднує газовий аналіз із вимірюванням температури та вологості;
- функцію реєстрації даних із можливістю перенесення на ПК;
- автономне живлення через USB;
- застосування NDIR для CO<sub>2</sub>, що гарантує довготривалу стабільність каналу вуглекислого газу.

Водночас, виявлено низку функціональних обмежень:

- відсутність контролю аміаку (NH<sub>3</sub>) та сірководню (H<sub>2</sub>S);
- низький ступінь захисту корпусу (IP30), що унеможливорює застосування в умовах підвищеної запиленості та вологості;
- відсутність телеметричних інтерфейсів для інтеграції в централізовані системи моніторингу;
- портативне виконання, орієнтоване на періодичні інспекційні заміри, а не на стаціонарне цілодобове чергування.

### 3.4. Узагальнення результатів аналізу сучасних аналогів

Проведений аналіз трьох сучасних газоаналітичних приладів – Walcom W-K 600 CO<sub>2</sub>, Walcom HT-1805 та CEM GD-3803 – дозволив скласти цілісне

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | MIMT.480.004.082 – ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                       | 36   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       |      |

уявлення про поточний стан ринку в контексті завдання розробки сигналізатора небезпечних газів.

Узагальнені результати аналізу свідчать, що більшість представлених на ринку приладів орієнтована на контроль класичних небезпечних факторів: метану (вибухонебезпека), чадного газу (токсичність), кисню (задуха), вуглекислого газу (якість повітря) та сірководню (токсичність).

До спільних недоліків більшості аналогів слід віднести: відсутність або обмежену ємність автономних джерел живлення в стаціонарних моделях, брак вбудованих модулів бездротової передачі даних, а також недостатній рівень пиловологозахисту для експлуатації в агресивних виробничих умовах. Портативні моделі, попри високу автономність, не пристосовані для стаціонарного цілодобового моніторингу.

Виявлені обмеження обґрунтовують необхідність створення спеціалізованого сигналізатора небезпечних газів, який поєднає в собі селективний сенсор, автономне резервне живлення, підвищений ступінь захисту корпусу (не нижче IP54), а також модуль бездротової передачі даних для інтеграції в автоматизовані системи управління безпекою.

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | МІМТ.480.004.082 – ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       | 37   |

#### 4. РОЗРОБКА СТРУКТУРНОЇ СХЕМИ ПРИЛАДУ

Структурну схему, яка описує функцію перетворення сигналу, наведено на рисунку 4.1.

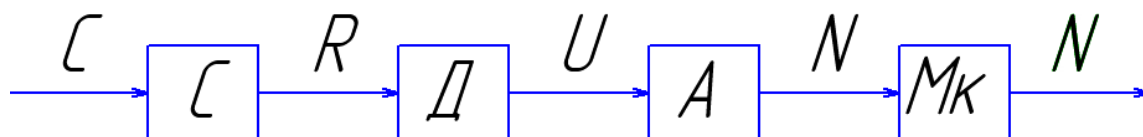


Рис. 4.1 – Структурна схема функції перетворення:

Графічне представлення перетворювального каналу сигналізатора у вигляді структурної схеми наведено на рисунку 4.2. До складу схеми входять такі основні компоненти: С – чутливий елемент TGS3870; Д – резистивний подільник напруги; А – АЦП (аналого-цифровий перетворювач); МК – керувальний мікроконтролер.

Функціонування вимірювального каналу ґрунтується на залежності електричного опору газового сенсора TGS3870 від рівня концентрації цільового газу в повітрі. При підвищенні вмісту газу опір чутливого елемента знижується. Сенсор інтегровано в схему дільника напруги як нижнє плече, завдяки чому вихідна напруга дільника змінюється пропорційно до концентрації. Цей аналоговий сигнал подається на вхід АЦП, де перетворюється на цифровий еквівалент, що чисельно відповідає рівню вхідної напруги. Отриманий цифровий код надходить до мікроконтролера, який здійснює його математичну обробку, застосовуючи поправні коефіцієнти, що зберігаються у флеш-пам'яті, та обчислює дійсне значення концентрації газової суміші.

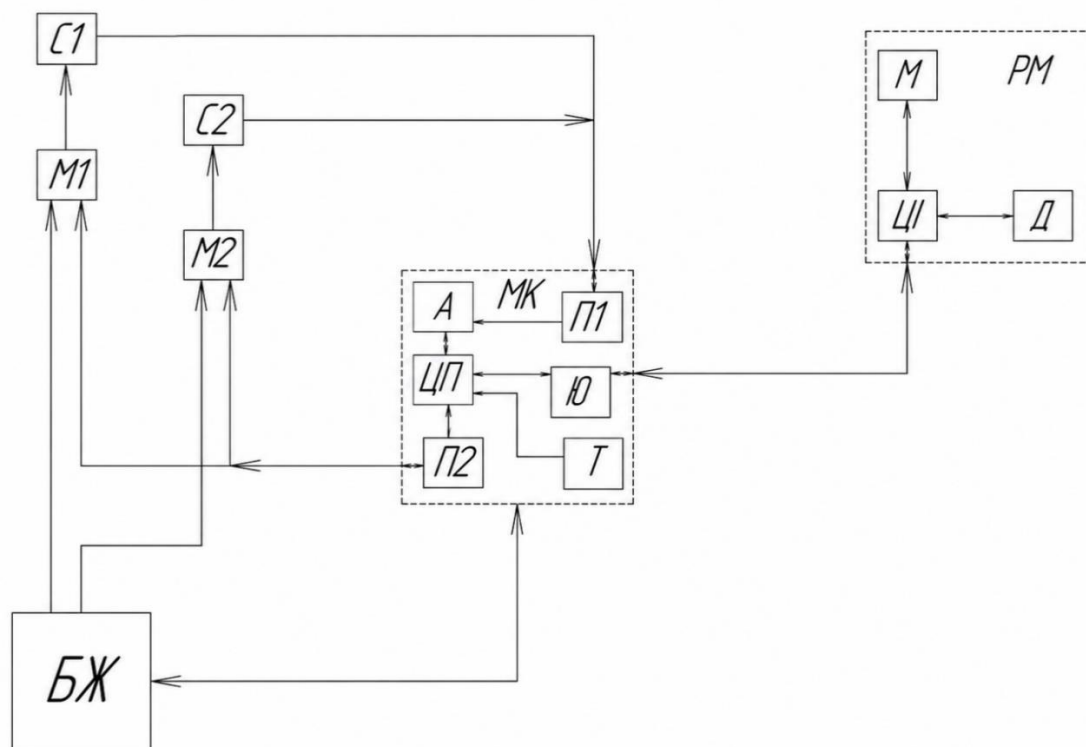


Рис. 4.2 Графічне представлення перетворювального каналу сигналізатора

На схемі використано такі умовні позначення: С1 – модуль вимірювання концентрацій; С2 – модуль температурних вимірювань; М1, М2 – мультиплексори для комутації сенсорів С1 та С2; МК — мікроконтролер; А – АЦП; ЦП – центральний процесор; П1, П2 – порти вводу/виводу; Ю – шина SPI; Т – система тактування; РМ — радіомодем [12]; М – модулятор; Д – демодулятор; ЦІ – цифровий інтерфейс; БЖ – блок живлення.

Після активації системи живлення мікроконтролер запускає процедуру ініціалізації вбудованого програмного забезпечення та генерує сигнал, що надходить на мультиплексорний блок М1 для завдання необхідного режиму роботи нагрівача сенсора С1. Газовий чутливий елемент функціонує в імпульсному циклі й формує аналоговий вихідний сигнал, який через порт П1 скеровується на вхід АЦП. Центральний процесор мікроконтролера обробляє оцифровані дані з урахуванням калібрувальних поправок, а потім

звіряє розраховане значення з пороговими рівнями, заздалегідь записаними до внутрішньої пам'яті пристрою.

В інтервалах між циклами вимірювання концентрації газу мікроконтролер перемикає мультиплексор М2, під'єднуючи до вимірювального каналу температурний сенсор С2. Аналоговий сигнал від нього також надходить через порт П1 на АЦП, де зазнає аналогічного перетворення. Отримані температурні показники використовуються для температурної компенсації результатів вимірювання газу, що суттєво підвищує загальну точність роботи сигналізатора.

У разі перевищення обчисленим значенням концентрації гранично допустимого рівня, мікроконтролер активує підпрограму передачі сформованих даних через інтерфейс SPI на радіомодем для відправлення сповіщення або формування тривожного сигналу.

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | МІМТ.480.004.082 – ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                       | 40   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       |      |

## 5 ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ ТА РОЗРАХУНОК ОСНОВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ПРИЛАДУ

### 5.1. Обґрунтування вибору мікроконтролера

Спираючись на огляд світового ринку мікроконтролерної техніки та специфікацію завдання, було визначено перелік ключових критеріїв до обчислювального ядра системи. До них увійшли: апаратна підтримка SPI для взаємодії з бездротовим модулем, можливість роботи з перериваннями, наявність вбудованих таймерів, аналогово-цифрового перетворювача, обсяг Flash-пам'яті не менше 8 кілобайт та висока енергоефективність. Зважаючи на ці параметри, для реалізації проекту було обрано мікросхему MSP430G2233 виробництва Texas Instruments із сімейства MSP430, яка цілком відповідає висунутим вимогам. Вигляд мікроконтролера (рис. 5.1) та його схема (рис. 5.2) наведено нижче [15,16].

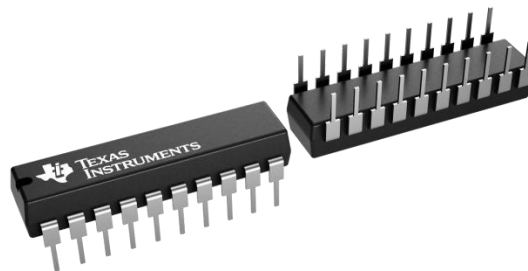
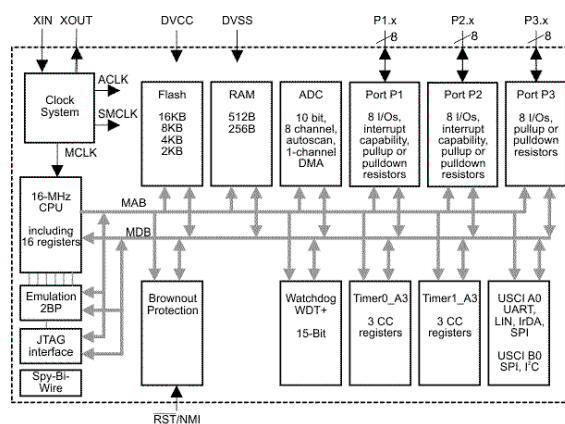


Рис. 5.1 Мікроконтролер MSP430G2233



Copyright © 2016, Texas Instruments Incorporated

Рис. 5.2 Схема Мікроконтролера MSP430G2233

## 5.2. Підбір бездротового модуля

Будемо використовувати приймач-передавач з такими характеристиками: робоча частота 2,4 ГГц, мінімальна дальність дії 80 метрів, рівень вихідної потужності до 10 мВт та низьке споживання струму. Переліченим критеріям повністю задовольняє мікросхема CC2420 (рис. 5.3), що орієнтована на стандарт IEEE 802.15.4/ZigBee [17]. Цей чіп було інтегровано в систему, оскільки його технічні показники збігаються з початковими умовами проектування.

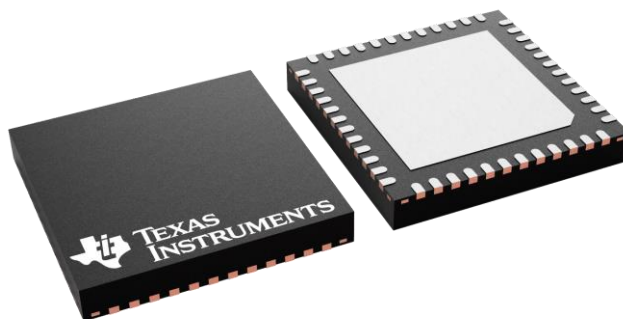


Рис. 5.3. Приймач-передавач CC2420

## 5.3. Визначення типу газового сенсора

Аналіз технологій детектування метану та монооксиду вуглецю (див. розділ 2) показав перспективність застосування абсорбційного принципу, зокрема методу з використанням тонкоплівкових напівпровідникових чутливих елементів (НПЧЕ). Світовий ринок пропонує широкий асортимент датчиків для визначення цих газів. Однак, з метою мінімізації енергоспоживання та зменшення габаритів друкованого вузла порівняно з конкурентними рішеннями, було прийнято рішення застосувати комбінований сенсор. Вибір зупинився на продукті компанії Figaro [18] –

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | MIMT.480.004.082 – ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       | 42   |

моделі TGS3870, яка здатна одночасно фіксувати наявність обох типів газів -  
рис. 5.4



3

Рис. 5.4 Сенсор TGS3870

#### *Обчислення номіналів резисторів для ланцюга нагрівача TGS3870*

Відповідно до закону Ома та співвідношень для електричної потужності виконується визначення робочих струмів і необхідних опорів для забезпечення заданих рівнів напруги на нагрівальному елементі сенсора.

Базові залежності описуються виразами: (5.1) та (5.2)

$$R = \frac{U}{I} \quad (5.1)$$

$$I = \frac{P}{U} \quad (5.2)$$

Для роботи нагрівача сенсора необхідні два режими живлення: 0,9 В та 0,2 В. Живлення схеми здійснюється від джерела напругою 3 В. При цьому для режиму 0,9 В споживана потужність становить 120 мВт.

Спочатку визначимо струм нагрівача:

$$I = \frac{P}{U} = \frac{120 \times 10^{-2}}{0.9} = 133.3 \text{ мА} \quad (5.3)$$

Далі розраховуємо опір обмежувального елемента, який забезпечує зниження напруги з 3 В до 0,9 В:

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | MIMT.480.004.082 – ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                       | 43   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       |      |

$$R = \frac{U_{\text{ж}} - U_{\text{п}}}{I} = \frac{3 - 0.9}{0.1333} = 16 \text{ Ом} \quad (5.4)$$

Аналогічно виконуємо розрахунок для другого режиму роботи (0,2 В), де споживана потужність становить 11 мВт.

Струм та Опір:

$$I = \frac{P}{U} = \frac{11 \times 10^{-2}}{0.2} = 55 \text{ Ом} \quad (5.5)$$

$$R = \frac{U_{\text{ж}} - U_{\text{п}}}{I} = \frac{3 - 0.2}{0.1333} = 45 \text{ Ом} \quad (5.6)$$

#### 5.4. Аналіз нелінійності та визначення поправочних коефіцієнтів

Відомо, що напівпровідникові газові сенсори мають суттєво нелінійну залежність між електричним опором чутливого елемента та концентрацією газу. Через це пряма інтерпретація сигналу без корекції може призводити до значних похибок.

Для забезпечення коректності вимірювань використовуються методи лінеаризації. Вони можуть реалізовуватись апаратно (через схемотехнічні рішення) або програмно – шляхом застосування коефіцієнтів корекції в мікроконтролері.

У даній роботі обрано програмний підхід, оскільки він є більш гнучким та не ускладнює апаратну частину пристрою. Отримані коефіцієнти зберігаються у пам'яті мікроконтролера та застосовуються алгоритмічно після кожного вимірювання.

##### *Вихідні дані сенсора TGS3870*

Згідно з технічною документацією виробника, залежність відносного опору сенсора  $R_s/R_0$  від концентрації газу подається у логарифмічному масштабі.

Типовий опір  $R_0$  для обраних режимів становить приблизно 3000 Ом (використовується як базове значення для калібрування).

Розглядаються такі робочі діапазони:

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | MIMT.480.004.082 – ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                       | 44   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       |      |

- метан: 0,01 % – 0,5 % (1000–5000 ppm)
- Вуглецевий (чадний) газ: 0,003 % – 0,01 % (30–100 ppm)

На рис. 5.5 зображена логарифмічна залежність між опором сенсора TGS3870 та концентрацією метану і інших газів.

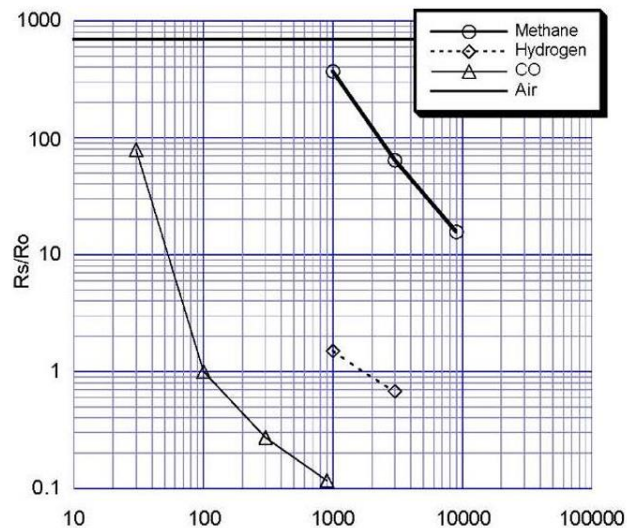


Рис. 5.5 Логарифмічна залежність між опором сенсора TGS3870 та концентрацією метану і інших газів.

На рис. 5.6 зображена логарифмічна залежність опору сенсору TGS3870 від концентрації метану та інших газів.

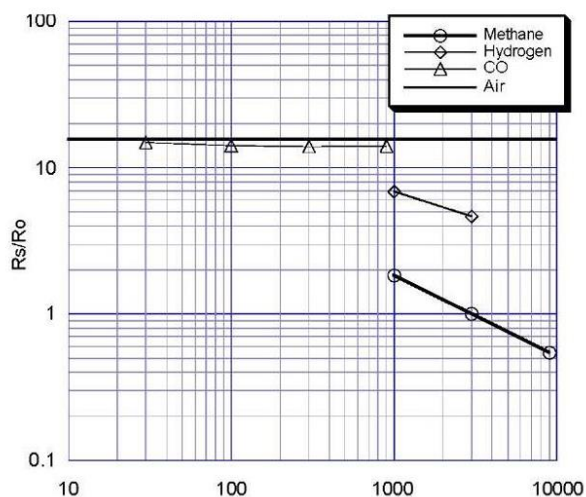


Рис. 5.6 Логарифмічна залежність опору сенсору TGS3870 від концентрації метану та інших газів

Інформацію, подану на рис. 5.5 та 5.6, варто впорядкувати в таблицю 5.1, враховуючи логарифмічний характер залежності та вибраний базовий опір чутливого елемента. При цьому розгляд обмежується лише тими концентраційними діапазонами, які передбачені технічним завданням.

Таблиця 5.1 Залежність опору сенсора від концентрації газів

| $R_s(CH_4)$<br>Ом | $R_s(CO)$ Ом | $CCH_4$ , ppm | $CCO$ , ppm |
|-------------------|--------------|---------------|-------------|
| 5400              | 240000       | 1000          | 30          |
| 3750              | 90000        | 2000          | 40          |
| 3000              | 37500        | 3000          | 50          |
| 2550              | 18750        | 4000          | 60          |
| 2250              | 11250        | 5000          | 70          |
|                   | 6750         |               | 80          |
|                   | 4800         |               | 90          |
|                   | 3000         |               | 100         |

Спираючись на закон Ома (5.1), а також беручи до уваги падіння напруги на компонентах кола та припущення про сталість струму в плечах подільника напруги, отримуємо аналітичну залежність (5.7), яка описує зв'язок вихідної напруги з концентрацією вимірюваного газу.

$$U_{\text{вих}} = \frac{5 \times R_s}{R_j + R_s} \quad (5.7)$$

Перерахувавши величини з таблиці 5.1 за виразом (5.7), формуємо оновлену таблицю 5.2, де представлено вихідну напругу сенсора як функцію концентрації досліджуваних газів.

Таблиця 5.2 Залежність вихідної напруги сенсора від концентрації газів

| U <sub>вих</sub> (CH <sub>4</sub> )<br>В | U <sub>вих</sub> (CO)<br>В | CCH <sub>4</sub> , ppm | CCO, ppm |
|------------------------------------------|----------------------------|------------------------|----------|
| 2,5                                      | 2,5                        | 1000                   | 30       |
| 2,04918                                  | 1,363636                   | 2000                   | 40       |
| 1,785714                                 | 0,675676                   | 3000                   | 50       |
| 1,603774                                 | 0,362319                   | 4000                   | 60       |
| 1,470588                                 | 0,223881                   | 5000                   | 70       |
|                                          | 0,136778                   |                        | 80       |
|                                          | 0,098039                   |                        | 90       |
|                                          | 0,061728                   |                        | 100      |

Далі результати таблиці 5.2 візуалізуються графічно: залежність вихідної напруги від концентрації метану (рис. 5.5) та чадного газу (рис. 5.6). Для подальшої лінеаризації цих характеристик підбираються апроксимаційні функції – для чадного газу (5.7) і для метану (5.8). Після побудови графіків та аналізу отриманих кривих визначаються поправочні коефіцієнти лінеаризації, які зводять до таблиці 5.3.

$$U_{\text{вих}} = 3,55 - 0,035 \cdot C(\text{CO}) \quad (5.8)$$

$$U_{\text{вих}} = 2,77 - 0,00026 \cdot C(\text{CO}) \quad (5.9)$$

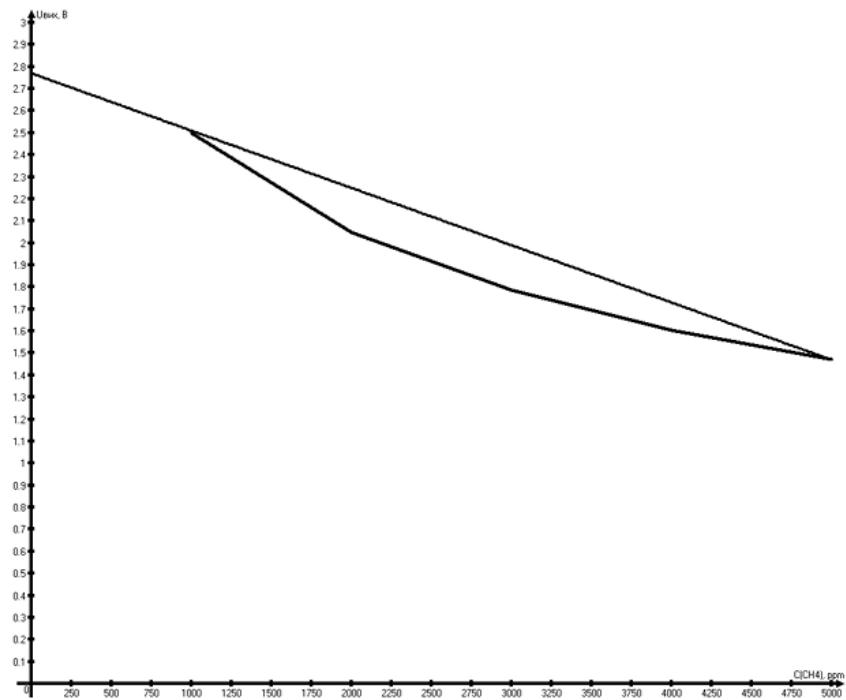


Рис 5.7 Залежність вихідної напруги від концентрації метану

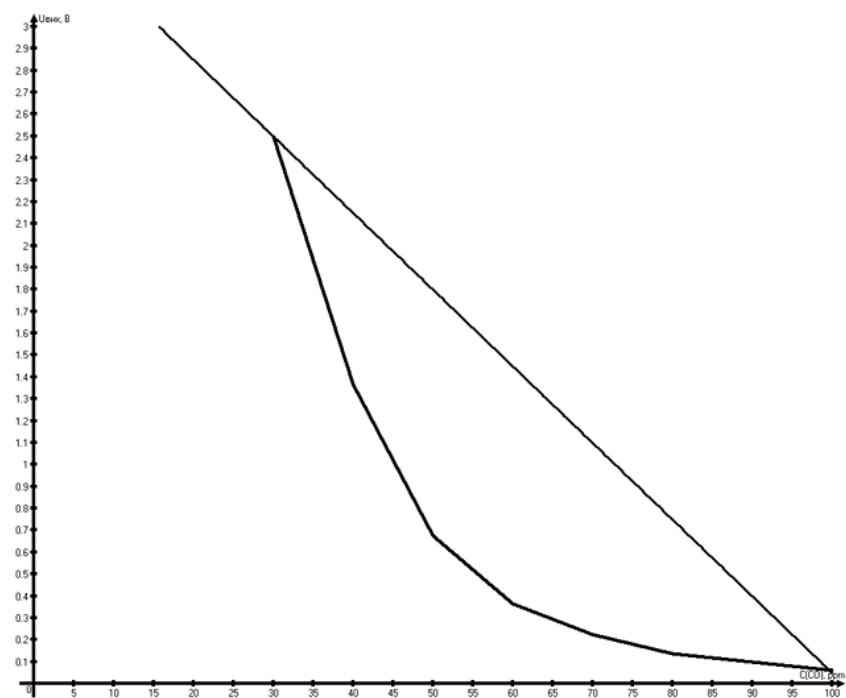


Рис. 5.8 Залежність вихідної напруги від концентрації чадного газу

Таблиця 5.3 Коефіцієнти корекції для лінеаризації функції залежності вихідної напруги від концентрації газів.

| U <sub>вих</sub> (CH <sub>4</sub> ) В | ССН <sub>4</sub> , ppm | U <sub>вих</sub> (CO) В | ССО, ppm |
|---------------------------------------|------------------------|-------------------------|----------|
| 0                                     | 0                      | +0,25082                | 30       |
|                                       | 1000                   | +0,78636                |          |
|                                       | 2000                   | +0,11429                | 40       |
|                                       | 3000                   | +1,12432                | 50       |
|                                       | 4000                   | 0                       | 60       |
|                                       | 5000                   | +0,87612                | 70       |
|                                       |                        | +0,66322                | 80       |
|                                       |                        | +0,35196                | 90       |
|                                       |                        | 0                       | 100      |

Отримані в такий спосіб коефіцієнти для лінеаризації функціональної залежності вихідної напруги від концентрації газів наведено в таблиці 5.3.

Обчислення температурних поправочних коефіцієнтів сенсора проводиться на підставі технічної документації виробника TGS3870, де зазначено, що вихідний сигнал істотно залежить від температурних умов. На рис. 5.9 зображено графічну залежність зміни опору датчика від температури за різних концентрацій метану, а аналогічні характеристики для чадного газу подано на рис. 5.10

#### *Обчислення температурних поправочних коефіцієнтів датчика*

Спираючись на технічну документацію, надану виробником сенсора TGS3870, встановлено, що вихідна напруга залежить від температурного режиму. На рисунку 5.9 подано графік зміни опору при різних рівнях метану залежно від температури; аналогічну характеристику для чадного газу наведено на рисунку 5.10

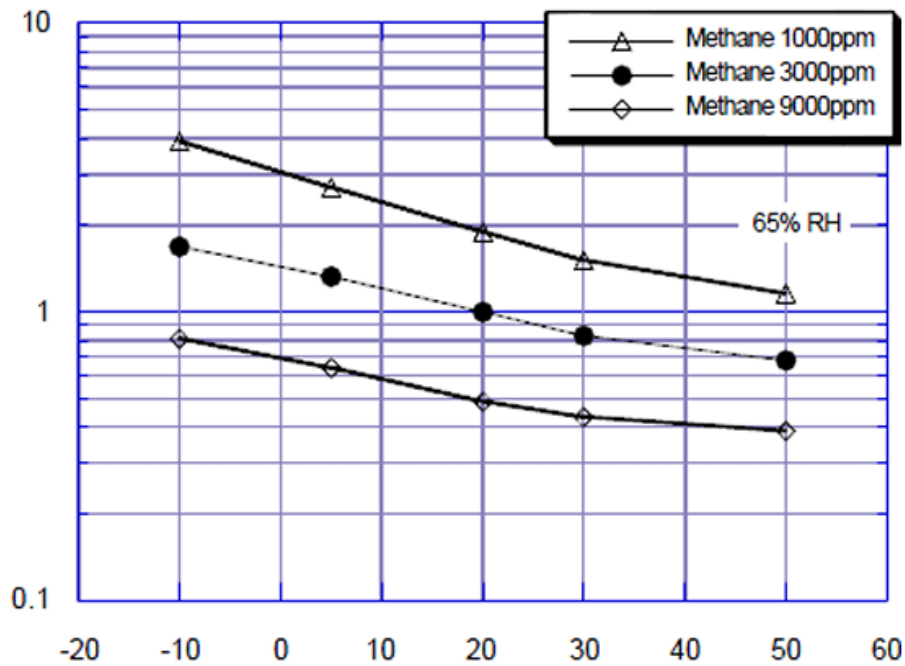


Рис. 5.9 Залежність зміни опору від температури(CH<sub>4</sub>)

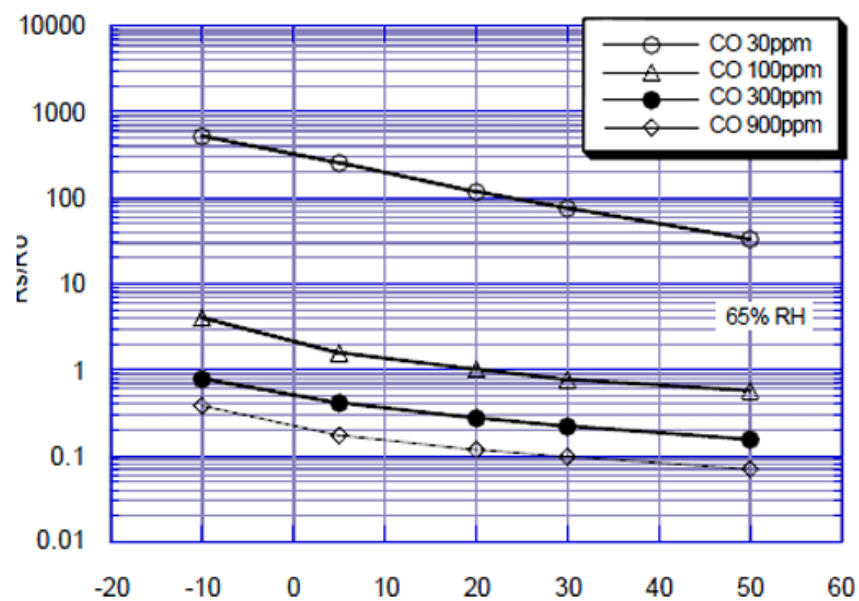


Рис. 5.10 Залежність зміни опору від температури(CO)

Інформацію, подану на рисунках 5.9 і 5.10, опрацьовано шляхом урахування опорів за однакової концентрації для стандартних умов експлуатації датчика (20 °C). Обчислення виконувалися лише для тих значень концентрації, які передбачені технічним завданням. Одержані результати зведено до таблиці 5.4.

Таблиця 5.4 – Коефіцієнти поправки для лінеаризації функціональної залежності опору від концентрації газів

| T   | C (CH <sub>4</sub> ) ppm |       | C (CO) ppm |       |
|-----|--------------------------|-------|------------|-------|
|     | 1000                     | 3000  | 30         | 100   |
|     | Kst Ом Утп В             |       |            |       |
| -10 | -6600                    | -2400 | -1260000   | -9000 |
| 0   | -3600                    | -1500 | -660000    | -3600 |
| 10  | -1800                    | -750  | -360000    | -1500 |
| 20  | 0                        | 0     | 0          | 0     |
| 30  | +600                     | +750  | +15000     | +900  |
| 40  | +1200                    | +1050 | +90000     | +1200 |
| 50  | +1380                    | +1200 | +135000    | +1350 |

Відомості з таблиці 5.4 перераховуються згідно з виразом (5.7) з додаванням константи 1350, після чого заносяться до таблиці 5.5.

Таблиця 5.5 – Температурні поправочні коефіцієнти для лінеаризації залежності вихідної напруги від температури

| U <sub>вих</sub> (CH <sub>4</sub> ) В | U <sub>вих</sub> (CO)В | CCH <sub>4</sub> , ppm | CCO, ppm |
|---------------------------------------|------------------------|------------------------|----------|
| 0                                     | 0                      | 1000                   | 30       |
| +0,25082                              | +0,78636               | 2000                   | 40       |
| +0,11429                              | +1,12432               | 3000                   | 50       |
| +0,12123                              | +1,08768               | 4000                   | 60       |
| 0                                     | +0,87612               | 5000                   | 70       |
|                                       | +0,66322               |                        | 80       |
|                                       | +0,35196               |                        | 90       |
|                                       | 0                      |                        | 100      |

## 5.5. Проектування вимірювальної схеми датчика

Для вимірювання концентрації метану та чадного газу використано схему на основі резистивного подільника напруги, в якій нижнім плечем виступає сенсор TGS3870. Компенсація впливу температури реалізується за допомогою додаткового подільника напруги, де як чутливий елемент застосовано терморезистор.

З метою недопущення перевищення максимально допустимої потужності розсіювання сенсора (15 мВт), опір верхнього плеча вимірювального кола обирається рівним максимальному опору чутливого елемента. Такий підхід пояснюється тим, що за умов рівності опорів досягається найбільше енергорозсіювання на елементі.

У результаті для режиму вимірювання метану використовується резистор із номіналом 5,4 кОм, тоді як для вимірювання чадного газу застосовується резистор із опором 240 кОм.

## 5.6. Вибір терморезистора

Оскільки електричні характеристики напівпровідникового газового сенсора залежать від температури, вимірювальна система потребує врахування або компенсації температурного впливу. Реалізація цього завдання можлива двома способами: апаратним – із використанням терморезистивних елементів для безпосередньої компенсації, або програмним — шляхом вимірювання температури та подальшої корекції результатів у мікроконтролері.

З урахуванням наявності в системі вбудованого АЦП та необхідності зменшення габаритів пристрою обрано програмний метод компенсації. Для вимірювання температури сформовано окремий подільник напруги, у якому нижнім плечем є терморезистор із номіналом 5400 Ом при 20 °С, а верхнім –

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | MIMT.480.004.082 – ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                       | 52   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       |      |

постійний резистор такого ж значення (5400 Ом). Живлення цього кола здійснюється від тієї ж лінії живлення, що й основний сенсор.

У даному розділі виконано обґрунтований вибір основних компонентів системи, зокрема мікроконтролера MSP430G2233, радіомодуля CC2420 та газового сенсора TGS3870. Проведено розрахунок номіналів резисторів для кола живлення нагрівального елемента, визначено параметри кола вимірювання температури, а також підібрано елементи вимірювальної схеми.

Крім того, встановлено поправочні коефіцієнти, які забезпечують лінеаризацію залежності вихідної напруги від концентрації газів та дозволяють компенсувати похибки, зумовлені змінами температури навколишнього середовища.

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | МІМТ.480.004.082 – ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                       | 53   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       |      |

## 6. ПРОЕКТУВАННЯ АПАРАТНИХ І ПРОГРАМНИХ ЗАСОБІВ

Стабільне функціонування чутливого елемента потребує періодичного ввімкнення нагрівача. У розробленій системі реалізовано два режими живлення: 0,9 В тривалістю 5 с та 0,2 В упродовж 15 с. Комутацію цих напруг виконує мультиплексор із цифровим управлінням.

Такий самий метод використано для вибору опору навантаження датчика, що дає змогу підлаштовувати вимірювальну схему під поточний режим. Імпульси напруги 5 В, призначені для чутливого шару, формуються за допомогою підсилювача спільно з керованим мультиплексором.

Далі описано роботу сигналізатора за його принциповою електричною схемою.

Після ввімкнення напруги живлення мікроконтролер DD3 починає виконувати запрограмований алгоритм. Спочатку через мультиплексор DD2 обирається потрібний режим роботи нагрівача.

Вимірювання концентрації газів відбувається періодично; в обох циклах (5-секундному для метану та 15-секундному для чадного газу тривалість одного вимірювального такту становить приблизно 5 мс.

Під час вимірювання мікроконтролер DD3 видає керуючий імпульс на перемикання мультиплексора DD2, подаючи таким чином відповідну напругу на датчик DD4. Потім за допомогою внутрішнього АЦП мікроконтролер перетворює аналоговий сигнал у цифровий код, обробляє його та зіставляє з наперед заданими пороговими значеннями.

Коли виявлена концентрація залишається в межах норми, програма продовжує звичайний цикл. Якщо ж рівень газу перевищує допустимий поріг, викликається підпрограма тривоги, яка вмикає радіомодуль і надсилає сповіщення про небезпеку.

Алгоритм опитування датчика та креслення корпусу пристрою наведено у графічній частині роботи.

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | МІМТ.480.004.082 – ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                       | 54   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       |      |

## РОЗДІЛ 7. РОЗРАХУНОК МЕТРОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК

### 7.1. Канал вимірювання концентрації метану

Як первинний вимірювальний перетворювач (ПВП) використовується датчик концентрації метану, передавальна характеристика якого описується співвідношенням:

$$U_T = K \cdot Q,$$

де  $U_T$  – вихідна напруга датчика;

$K$  – коефіцієнт передачі датчика;

$Q$  – вимірювана концентрація метану.

Загальне рівняння перетворення для каналу вимірювання концентрації метану має вигляд:

$$N_Q = U_Q \cdot K_D \cdot K_{НП} \cdot K_{АЦП},$$

де  $K_D$  – коефіцієнт перетворення датчика;

$K_{НП}$  – коефіцієнт підсилення нормуючого перетворювача;

$K_{АЦП}$  – коефіцієнт передачі аналого-цифрового перетворювача.

### 7.2. Визначення коефіцієнтів перетворення

#### Коефіцієнт перетворення датчика концентрації метану

За умови, що вхідний сигнал датчика становить 30 мг/м<sup>3</sup>, а вихідна напруга сягає 5 В, коефіцієнт перетворення датчика розраховується як:

$$K_D = \frac{X_{\text{вих}}}{X_{\text{вх}}} = \frac{\pm 5 \text{ В}}{30 \text{ мг/м}^3} = 1,7 \frac{\text{В}}{\text{мг/м}^3}.$$

#### Коефіцієнт підсилення нормуючого перетворювача.

На вхід нормуючого підсилювача подається напруга 5 В. Вихідна напруга цього блоку має відповідати номінальному вхідному діапазону АЦП, що становить 5,5 В. Отже, коефіцієнт підсилення дорівнює:

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | МІМТ.480.004.082 – ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                       | 55   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       |      |

$$K_{\text{НП}} = \frac{X_{\text{вих}}}{X_{\text{вх}}} = \frac{5,5 \text{ В}}{5 \text{ В}} = 1,1.$$

### 7.3. Рівняння похибок каналу вимірювання концентрації метану

З урахуванням похибок, що вносяться окремими блоками вимірювального тракту, рівняння перетворення набуває вигляду:

$$N_Q = U_Q \cdot K_D \cdot (1 + \gamma_D) \cdot K_{\text{НП}} \cdot (1 + \gamma_{\text{НП}}) \cdot K_{\text{АЦП}} \cdot (1 + \gamma_{\text{АЦП}}),$$

де  $\gamma_D$ ,  $\gamma_{\text{НП}}$ ,  $\gamma_{\text{АЦП}}$  – зведені похибки відповідних елементів.

Тоді сумарна зведена похибка каналу визначається як:

$$\gamma_{\Sigma} = \gamma_D + \gamma_{\text{НП}} + \gamma_{\text{АЦП}},$$

де  $\gamma_{\Sigma}$  – допустима сумарна зведена похибка каналу;

$\gamma_D$  – зведена похибка датчика;

$\gamma_{\text{НП}}$  – зведена похибка нормуючого перетворювача;

$\gamma_{\text{АЦП}}$  – зведена похибка АЦП.

### 7.4. Розподілення похибок між структурними елементами

Загальна похибка вимірювального каналу концентрації метану формується як сума похибок усіх складових, що беруть участь у вимірювальному процесі:

$$\gamma_{\Sigma} = \gamma_D + \gamma_{\text{НП}} + \gamma_{\text{АЦП}}.$$

Відповідно до вимог до точності, зведена похибка вимірювального приладу не повинна перевищувати:

$$\gamma_{\text{max}} = \frac{\Delta_{\text{max}}}{X} \cdot 100\% = \frac{0,1}{25} \cdot 100\% = 0,4\%.$$

Приймаємо, що похибка, яку вносить АЦП, становить:

$$\gamma_{\text{АЦП}} = \gamma_{\text{кв}} + \gamma_{\text{нел}} \approx 0,1\%.$$

Розрахунок необхідної розрядності АЦП виконується за умови максимального значення вхідного сигналу. Похибка квантування визначається як:

$$\gamma_{\text{кв}} = \frac{1}{N} \cdot 100\% = 0,1\%,$$

звідки:

$$N = 1000.$$

Тоді розрядність АЦП:

$$n = \log_2 N = \log_2 1000 \approx 10.$$

При розрядності  $n = 10$  кількість рівнів квантування становить:

$$N = 2^{10} = 1024.$$

Відповідно, похибка квантування АЦП дорівнюватиме:

$$\gamma_{\text{кв}} = \frac{1}{N} \cdot 100\% = \frac{1}{1024} \cdot 100\% \approx 0,098\% \approx 0,1\%.$$

Таким чином, передбачено використання одного 10-розрядного АЦП. Похибка датчика приймається на рівні  $\gamma_{\text{д}} = 0,1\%$ . Тоді похибка нормуючого перетворювача не повинна перевищувати:

$$\gamma_{\text{нп}} = 0,4 - 0,2 - 0,1 = 0,1 \, \%.$$

Остаточний розподіл похибок:

- датчик:  $\gamma_{\text{д}} = 0,1\%$ ;
- нормуючий перетворювач:  $\gamma_{\text{нп}} = 0,1 \, \%$ ;
- АЦП:  $\gamma_{\text{АЦП}} = \gamma_{\text{кв}} + \gamma_{\text{нел}} = 0,1 + 0,1 = 0,2\%$ .

За результатами попередніх розрахунків, основні параметри АЦП такі:

- розрядність:  $n = 10$ ;
- кількість рівнів квантування:  $N = 1024$ .

Сумарна похибка вимірювального каналу становитиме:

$$\gamma_{\Sigma} = 0,1 + 0,1 + 0,2 = 0,4 \, \%,$$

що повністю відповідає встановленим вимогам до точності.

## 8. ОЦІНКА ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ РОБОТИ ПРИЛАДУ

Розрахунок надійності проводився у відповідності зі схемою електричного принципової і з врахуванням заданої кліматичної категорії і виконання виробу.

Параметр потоку відмов визначається по формулі:

$$\lambda_{\text{сис}} = \sum N_i \lambda \quad (7.1)$$

де  $N$  - число груп комплектуючих, що входять до складу системи;

$N_i \lambda$  - кількість і інтенсивність відмов комплектуючих  $i$ -ої групи.

Інтенсивність відмови комплектуючих  $i$ -ої групи в робочому режимі визначається як:

$$\lambda_i = \lambda_{0i} * a_1 \dots a_n \quad (7.2)$$

де  $\lambda_{0i}$  - інтенсивність відмови комплектуючого виробу в номінальному режимі і нормальних умовах;

$a_1 \dots a_n$  — коефіцієнти, що враховують умови роботи.

Коефіцієнт  $a_1$  визначається за довідниковими даними:

$$a_1 = k_{11} * k_{12} * \dots k_{15} \quad (7.3)$$

з огляду на умови експлуатації, вибираємо  $k_{11}=2$ ,  $k_{12}=1$ ,  $k_{13}=1$ ,  $k_{14}=2$ ,  $k_{15}$ ; таким чином,  $a_1=2$ . Зробимо розрахунок, скориставшись таблицею 7.1.

Інтенсивність потоку відмов елементів системи :

$$\lambda_{\text{сис}} = 24,453 * 10^{-6} \text{ 1/год.}$$

Можливість безвідмовної роботи протягом часу  $t$ :

$$P(t) = e^{-\lambda T} \quad (7.4)$$

де  $T$  - час роботи системи, години,

$\lambda_{\text{сис}}$  - інтенсивність потоку відмов.

Середній час наробітку на відмову

$$T_0 = \lambda_{\text{сис}}^{-1} \quad (7.5)$$

$$T_0 = 40895 \text{ год.}$$

Ймовірність безвідмовної роботи за час  $T = 1000$  год. визначимо по формулі (7.4). Вона склала 0,9758.

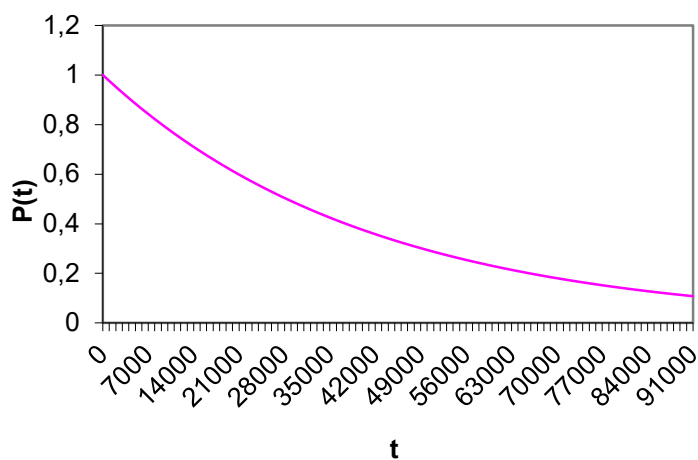


Рис. 7.1 Ймовірність безвідмовної роботи виробу протягом часу  $t$

Таблиця 7.2 Перелік комплектуючих виробів

| Поз. | Найменування        | Кіл | $\lambda_{i0} \cdot 10^6$<br>год <sup>-1</sup> | Формула<br>розрахунку $\lambda_i$                   | Коефіцієнти |       |     | $\Sigma \lambda_i \cdot 10^6$<br>год <sup>-1</sup> |
|------|---------------------|-----|------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-------------|-------|-----|----------------------------------------------------|
| 1    | Мікроконтролер      |     |                                                |                                                     | $a_1$       | $a_2$ |     |                                                    |
|      | MSP430G2203         | 1   | 3,2                                            | $\lambda_0 \cdot a_1 \cdot a_2$                     | 2,1         | 0,8   |     | 5,376                                              |
| 2    | Датчик              |     |                                                |                                                     |             |       |     |                                                    |
|      | TGS3870             | 1   | 5,2                                            | $\lambda_0 \cdot a_1 \cdot a_2$                     | 2,1         | 0,8   |     | 8,736                                              |
| 3    | Радіомодуль         |     |                                                |                                                     |             |       |     |                                                    |
|      | CC2420              | 1   | 3,8                                            | $\lambda_0 \cdot a_1 \cdot a_2$                     | 2,1         | 0,8   |     | 6,384                                              |
| 4    | Мультиплексор       |     |                                                |                                                     |             |       |     |                                                    |
|      | MAX4782             | 4   | 0,3                                            | $\lambda_0 \cdot a_1 \cdot a_2$                     | 2,1         | 0,8   |     | 2,016                                              |
| 5    | Кварцовий резонатор |     |                                                |                                                     |             |       |     |                                                    |
|      | НС-49U              | 1   | 0,2                                            | $\lambda_0 \cdot a_1 \cdot a_4$                     | 2,1         |       | 1   | 0,42                                               |
| 6    | Резистори           | 12  | 0,01                                           | $\lambda_0 \cdot a_1 \cdot a_2 \cdot a_4 \cdot a_5$ | 2,1         | 1     | 1,3 | 0,328                                              |
| 7    | Конденсатори        | 17  | 0,02                                           | $\lambda_0 \cdot a_1$                               | 2,1         | 1     | 1,3 | 0,928                                              |
| 8    | Роз'єми             | 80  | 0,001                                          | $\lambda_0 \cdot a_1 \cdot a_2 \cdot a_4$           | 2,1         | 1     | 1,3 | 0,218                                              |
| 9    | Пайки               | 470 | 0,0001                                         | $\lambda_0 \cdot a_{a21}$                           | 2,1         |       |     | 0,047                                              |
|      | Разом               |     |                                                |                                                     |             |       |     | 24,453                                             |

## 9. БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ ТА ОХОРОНА ПРАЦІ

### 9.1. Місце охорони праці в системі управління житлово-комунальним господарством

У сучасних умовах питання охорони праці набувають особливої актуальності, оскільки вони безпосередньо пов'язані не лише зі збереженням життя та здоров'я працівників, але й із загальною ефективністю виробничої діяльності підприємств. Житлово-комунальне господарство є однією з найбільш багатoproфільних галузей економіки, яка охоплює широкий спектр видів діяльності — від експлуатації житлового фонду до благоустрою територій. Кожен із цих напрямів пов'язаний із численними професійними ризиками, що зумовлює необхідність створення дієвої системи управління охороною праці на всіх рівнях.

Управління охороною праці на підприємствах ЖКГ не може розглядатися відокремлено від загальнодержавних механізмів регулювання, оскільки саме держава встановлює єдині нормативні вимоги та стандарти безпеки. Водночас галузеві особливості потребують адаптації цих підходів до специфічних умов роботи, що передбачає тісну взаємодію центральних органів влади з галузевими структурами та безпосередньо з підприємствами.

Таким чином, система управління охороною праці в ЖКГ виступає сполучним елементом між загальнодержавною політикою та практичними заходами на рівні окремих комунальних підприємств. Ефективність цієї системи визначається чіткістю розподілу повноважень, прозорістю контролю та належним ресурсним забезпеченням.

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | МІМТ.480.004.082 – ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                       | 60   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       |      |

## 9.2. Структура державного регулювання охорони праці

Державне регулювання охорони праці являє собою багаторівневу систему, у межах якої кожен орган влади виконує визначені функції. До основних суб'єктів, які впливають на стан охорони праці в ЖКГ, належать:

Кабінет Міністрів України – вищий орган виконавчої влади, що формує стратегічні напрями державної політики та забезпечує їх законодавче супроводження;

Державний комітет України з питань ЖКГ – галузевий орган, який реалізує державну політику з урахуванням технологічних та економічних особливостей сфери;

Державний орган нагляду за охороною праці – центральний виконавчий орган, на який покладено функції контролю за дотриманням законодавчих вимог;

Органи місцевого самоврядування – адміністрації та ради, які забезпечують адаптацію загальнодержавних вимог до умов конкретних територій та контролюють стан охорони праці на комунальних підприємствах.

Взаємодія цих суб'єктів забезпечує цілісність системи управління охороною праці в галузі ЖКГ та дає змогу своєчасно реагувати на виклики, що виникають у процесі трудової діяльності.

## 9.3. Стратегічні завдання Кабінету Міністрів України

Кабінет Міністрів України визначає загальні правила для всіх учасників ринку праці, включно з підприємствами ЖКГ. До основних стратегічних завдань Уряду в цій галузі належать:

- забезпечення практичного втілення державної політики у сфері безпеки праці;

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | МІМТ.480.004.082 – ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                       | 61   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       |      |

- затвердження довгострокових національних програм поліпшення умов безпеки, гігієни праці та виробничого середовища;
- чіткий розподіл повноважень між міністерствами та іншими центральними органами виконавчої влади у питаннях створення безпечних умов праці;
- регулювання порядку утворення та використання коштів державних, галузевих та регіональних фондів охорони праці.

Для координації діяльності органів влади у цій сфері при Кабінеті Міністрів створено Національну раду з питань безпечної життєдіяльності населення, до складу якої входять представники різних міністерств, профспілок та наукових установ. Керівництво Радою здійснює віце-прем'єр-міністр України, що засвідчує високий рівень значущості питань охорони праці для держави.

#### **9.4. Компетенція та повноваження наглядового органу**

Центральний орган з нагляду за охороною праці відіграє провідну роль у забезпеченні дотримання вимог безпеки на всіх підприємствах, зокрема в житлово-комунальній сфері. До ключових функцій цього органу належать:

- комплексне управління охороною праці на державному рівні та реалізація єдиної політики в цій галузі;
- розробка за участю заінтересованих сторін національних програм поліпшення безпеки та гігієни праці, а також контроль за їх виконанням;
- координація діяльності міністерств, місцевих адміністрацій та об'єднань підприємств у питаннях забезпечення безпечних умов праці;
- розробка та періодичний перегляд спільно з органами статистики, праці та охорони здоров'я системи показників обліку умов і безпеки праці;

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | МІМТ.480.004.082 – ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       | 62   |

- участь у міжнародному співробітництві, вивчення та поширення передового зарубіжного досвіду, організація виконання міжнародних угод з питань безпеки праці;

- безоплатне отримання від міністерств, місцевих адміністрацій та підприємств інформації, необхідної для виконання покладених завдань.

### **9.5. Обов'язковість виконання рішень і відповідальність суб'єктів**

Рішення, прийняті наглядовим органом у межах його компетенції, є обов'язковими для виконання всіма суб'єктами — міністерствами, іншими центральними органами виконавчої влади, місцевими адміністраціями, радами, а також підприємствами, установами та організаціями незалежно від форми власності, включно з комунальними підприємствами ЖКГ.

Такий підхід забезпечує верховенство закону у сфері охорони праці, створює рівні умови для всіх учасників ринку та посилює відповідальність керівників за створення безпечних умов праці.

### **9.6. Висновки та перспективи вдосконалення системи**

Проведений аналіз засвідчує, що державна система управління охороною праці має багаторівневий, системно організований характер. Водночас житлово-комунальне господарство як специфічна галузь потребує додаткової уваги. До найбільш актуальних напрямів удосконалення можна віднести:

- посилення профілактичної спрямованості наглядової діяльності;
- впровадження сучасних інформаційних технологій для автоматизації моніторингу та звітності;
- підвищення кваліфікації керівників та працівників комунальних підприємств;

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | МІМТ.480.004.082 – ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                       | 63   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       |      |

- удосконалення механізмів фінансового стимулювання підприємств із високим рівнем безпеки праці;

- активізацію соціального діалогу між роботодавцями, працівниками та профспілками.

Таким чином, ефективна система управління охороною праці в ЖКГ є запорукою не лише збереження життя та здоров'я працівників, але й стабільного функціонування всієї галузі. Подальше вдосконалення цієї системи має здійснюватися на засадах комплексності, системності та постійного діалогу між усіма заінтересованими сторонами.

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | МІМТ.480.004.082 – ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                       | 64   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       |      |

## ВИСНОВКИ

У сучасних умовах широкого використання природного газу в побутовій та промисловій сферах особливої актуальності набуває розроблення засобів контролю його концентрації та продуктів згоряння. Підвищену небезпеку становить чадний газ (CO), який не має кольору та запаху, а його навіть незначні концентрації можуть негативно впливати на організм людини та створювати загрозу для життя. Тому створення ефективного сигналізатора для своєчасного виявлення метану і монооксиду вуглецю є важливим завданням у сфері забезпечення безпеки.

У ході виконання роботи було проаналізовано існуючі методи визначення концентрації газів та обґрунтовано вибір напівпровідникового сенсорного елемента, що працює за адсорбційним принципом. Обрана технологія забезпечує необхідну чутливість до контрольованих газів, характеризується невеликими розмірами, низьким енергоспоживанням та можливістю реалізації компактного вимірювального пристрою.

Крім того, виконано аналіз аналогічних пристроїв, представлених на ринку України, що дозволило оцінити їх функціональні можливості, технічні характеристики та конструктивні особливості. Результати цього аналізу були враховані під час формування вимог до розроблюваного сигналізатора.

У процесі роботи сформовано структурну схему та функцію перетворення вимірювального каналу, які стали основою для вибору елементної бази та подальшого розроблення схемотехнічних рішень.

На підставі проведених розрахунків і технічного аналізу обрано основні компоненти системи: мікроконтролер MSP430G2233, радіомодуль CC2420 та газовий сенсор TGS3870. Для забезпечення коректної роботи пристрою розраховано параметри кіл живлення нагрівача, визначено номінали резисторів вимірювальної схеми та кола контролю температури. Також отримано поправочні коефіцієнти, що використовуються для лінеаризації

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | MIMT.480.004.082 – ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       | 65   |

характеристики сенсора та компенсації похибок, викликаних температурними змінами навколишнього середовища.

Розроблений алгоритм функціонування приладу відображає послідовність виконання вимірювань, обробки отриманих даних та передачі повідомлень про аварійні ситуації. Запропоновані схемотехнічні та програмні рішення забезпечують виконання всіх вимог, визначених технічним завданням.

Для оцінювання якості спроектованого сигналізатора проведено аналіз його основних технічних характеристик, серед яких швидкодія, точність вимірювання, пороги спрацьовування, тривалість прогрівання, термін експлуатації та масогабаритні показники. Отримані результати свідчать про можливість використання розробленого пристрою для ефективного контролю концентрації метану та чадного газу з метою підвищення рівня безпеки користувачів.

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | МІМТ.480.004.082 – ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       | 66   |

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- 1) Постанова Кабінету Міністрів України від 30.03.1998 № 391 Про затвердження Положення про державну систему моніторингу довкілля
- 2) Закон України від 25.06.1991 № 1264-XII Про охорону навколишнього природного середовища
- 3) Моніторинг довкілля: підручник / М. О. Клименко, А. М. Прищеп, Н. М. Вознюк підручник. 2-ге вид., допов. та перероб. – Рівне : НУВГП, 2023. – 350 с.
- 4) Моніторинг довкілля / [Боголюбов В. М., Клименко М. О., Мокін В. Б. та ін.] під ред. В. М. Боголюбова. [ 2-е вид., перероб. і доп.]. – Вінниця : ВНТУ, 2010.– 232 с.
- 5) Моніторинг довкілля. Т. 1.: підручник / А. К. Запольський, А. П. Войцицький, І. А. Пількевич [та ін.]; за ред А. К. Запольського. – Кам'янець-Подільський : Медобори-2006, 2012. – 408 с.
- 6) Моніторинг довкілля : підруч. : Том. 2. / Запольський А. К., Войцицький А. П., Пількевич І. А., Малярчук П. М., Багмет А. П., Парфенюк Г. І. – Кам'янець-Подільський : ПП «Медобори-2006», 2012. – 360 с.
- 7) Автоматизовані системи екологічного моніторингу та ресурсозбереження [Електронний ресурс] : семінарські заняття: навч. посіб. для здобувачів ступеня магістра за освіт. програмою «Технічні та програмні засоби автоматизації» спец. 174 «Автоматизація, комп'ютерно- інтегровані технології та робототехніка» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: А. О. Абрамова. – Електрон. текст. дані (1 файл). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. – 96 с.
- 8) Екологічний моніторинг довкілля [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://mepr.gov.ua/diyalnist/napryamky/ekologichnyj-monitoring/ekologichnyj-monitoring-dovkillya/> (дата звернення: 20.03.2026).

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | МІМТ.480.004.082 – ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       | 67   |

9) Допустимі концентрації газів у повітрі [Електронний ресурс].  
Режим доступу: <https://atom.net.ua/dopustymi-kontsentratsii-haziv-u-povitri.html/> (дата звернення: 20.03.2026).

10) Основи газових детекторів: принцип роботи та необхідність їх використання [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.skztester.com/uk/blog/gas-detector-basics-how-they-work-and-why-you-need-one> (дата звернення: 23.03.2026).

11) Аналітичні екологічні прилади та системи. — Монографія. / Під заг. ред. В. А. Порєва. — Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2009. — 336 с.

12) <https://simvolt.ua/gazoviy-detektor-walcom-w-k-600-co2.html/>

13) <https://simvolt.ua/gazovyy-detektor-4-v-1-walcom-ht-1805-ua.html/>

14) <https://simvolt.ua/mulyhazovyi-detektor-termohihrometr-o2-co-co2-rh-temp-cem-gd-3803/>

15) <https://standart-pribor.com.ua/product/msp430g2233ipw20r/>

16) <https://www.ti.com/product/MSP430G2233>

17) <https://www.ti.com/product/CC2420>

18) [https://www.figarosensor.com/product/docs/tgs3870-f00\\_product%20infomation%28fusa%29\\_rev03.pdf](https://www.figarosensor.com/product/docs/tgs3870-f00_product%20infomation%28fusa%29_rev03.pdf)

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | МІМТ.480.004.082 – ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                       | 68   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       |      |

