

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Західноукраїнський національний університет
Факультет комп'ютерних інформаційних технологій
Кафедра спеціалізованих комп'ютерних систем

РУДА МАРІЯ МИКОЛАЇВНА

Система оптичного вимірювання концентрації газів у
промислових викидах / Optical measurement system for gas
concentrations in industrial emissions

спеціальність 152 – Метрологія та інформаційно-вимірвальна техніка
освітньо-професійна програма – Технології інтернету речей

Кваліфікаційна робота

Виконав студент групи
МТІРЗ – 41 М.М.Руда

Науковий керівник :
к.т.н., доцент Б.О.Масляк

Кваліфікаційну роботу
допущено до захисту

«___» _____ 2026р.

Завідувач кафедри

_____ А.І.Сегін

Тернопіль - 2026

Факультет комп'ютерних інформаційних технологій
Кафедра спеціалізованих комп'ютерних систем
Освітній ступінь "бакалавр"

Спеціальність: 152 – Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка
Освітньо-професійна програма – Технології інтернету речей

“ЗАТВЕРДЖУЮ”
Завідувач кафедри СКС

_____ А.І. Сегін
“ _____ ” _____ 2025р.

ЗАВДАННЯ
НА ВИПУСКНУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ
Савченко Вікторії Ігорівні

(прізвище, ім'я по-батькові)

1. Тема випускної кваліфікаційної роботи

Інформаційно-вимірювальна система відтворення та передачі одиниць часу та частоти на базі GPS-еталона / Information and measurement system for reproducing and transmitting time and frequency units based on the GPS standard

Керівник роботи _____ к.т.н., доцент Б.О.Масляк
затверджені наказом по університету від «1» грудня 2025р. № 894

2. Строк подання студентом закінченої випускної кваліфікаційної роботи: 25 травня 2026р.

3. Вихідні дані до випускної кваліфікаційної роботи:

1. Фізичні основи одиниць часу та частоти.
2. Методи відтворення та зберігання одиниць часу та частоти
3. Принципи передачі розміру одиниці часу і частоти.
4. Нормативно-правова база. ДСТУ та міжнародні стандарти.

4. Основні питання, які потрібно розробити:

1. Архітектура та принцип роботи системи GPS, GPS-дисциплінований генератор (GPSDO): структура та параметри
2. Структурна схема інформаційно-вимірювальної системи.
3. Технологія передачі даних про хімічні загрози.
4. Програмно-апаратна реалізація системи.

5. Перелік графічного матеріалу у роботі:

1. Структурна схема системи відтворення та передачі одиниці часу та частоти хімічних загроз.
2. Схема апаратної реалізації системи.

6. Консультанти розділів випускної кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
1	Масляк Б.О.		
2	Масляк Б.О.		
3	Масляк Б.О.		

7. Дата видачі завдання 1 грудня 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назви етапів випускної кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Особливості функціонування GPS – системи	01.12.2025р. – 15.01.2026р.	
2	Обґрунтування вибору реалізації технічного рішення та апаратних компонентів системи	16.01.2026р. – 15.03.2026р.	
3	Апаратно-програмна реалізація пристрою	16.03.2026р. – 30.04.2026р.	

Студент

_____ Савченко В.І.
(підпис)

Керівник роботи

_____ к.т.н., доц. Масляк Б.О.
(підпис)

РЕФЕРАТ

Об'єкт дослідження — система оптичного вимірювання концентрації газів у промислових викидах на базі мікроконтролера ESP32.

Предмет дослідження виступають методи оптичного вимірювання концентрації газів та оцінювання невизначеності результатів вимірювань, зокрема, метод недисперсійної інфрачервоної спектроскопії (NDIR), методи оцінювання невизначеності типу А та типу В відповідно до ДСТУ ISO/IEC Guide 98-3:2018 (GUM), методи системного аналізу при проектуванні апаратної і програмної складових.

Метою роботи є проектування та розробка апаратно-програмного комплексу для вимірювання концентрації газів у промислових викидах із застосуванням NDIR-методу на основі ESP32 та забезпечення метрологічних вимог до системи.

У роботі проведено аналіз методів вимірювання концентрації газів; обґрунтовано вибір NDIR-методу; розроблено структурну та принципову схеми на базі ESP32 з інтерфейсами I²C, SPI, UART та RS-485; розроблено програмне забезпечення (Arduino IDE, C++, MQTT); виконано оцінювання бюджету невизначеності та підтверджено відповідність системи вимогам ДСТУ 9023:2020.

Практична цінність — розроблено функціональний прототип системи для контролю концентрацій CO₂, CO, SO₂ та NO₂ у промислових викидах в межах вимог екологічного моніторингу.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: NDIR-СПЕКТРОСКОПІЯ, ESP32, КОНЦЕНТРАЦІЯ ГАЗІВ, ПРОМИСЛОВІ ВИКИДИ, НЕВИЗНАЧЕНІСТЬ ВИМІРЮВАННЯ, МЕТРОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ, MQTT.

ABSTRACT

The object of the study is a system for optical measurement of gas concentrations in industrial emissions based on the ESP32 microcontroller. The subject of the study is methods for optical measurement of gas concentrations and assessment of uncertainty of measurement results, in particular, the non-dispersive infrared spectroscopy (NDIR) method, methods for assessing uncertainty of type A and type B in accordance with DSTU ISO/IEC Guide 98-3:2018 (GUM), methods of system analysis in the design of hardware and software components.

The purpose of the work is to design and develop a hardware and software complex for measuring gas concentrations in industrial emissions using the NDIR method based on ESP32 and ensuring metrological requirements for the system. The work analyzes methods for measuring gas concentrations; justifies the choice of the NDIR method; develops a structural and schematic diagram based on ESP32 with I²C, SPI, UART and RS-485 interfaces; develops software (Arduino IDE, C++, MQTT); uncertainty budget assessment was performed and the system's compliance with the requirements of DSTU 9023:2020 was confirmed.

Practical value — a functional prototype of the system was developed to control the concentrations of CO₂, CO, SO₂ and NO₂ in industrial emissions within the requirements of environmental monitoring.

KEYWORDS: NDIR SPECTROSCOPY, ESP32, GAS CONCENTRATION, INDUSTRIAL EMISSIONS, MEASUREMENT UNCERTAINTY, METROLOGICAL ASSURANCE, MQTT.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	7
Вступ	8
Розділ 1. Аналіз методів вимірювання концентрації газів у промислових викидах	12
1.1. Характеристика промислових газових викидів	
1.2. Аналіз методів вимірювання концентрації газів	17
1.3 Вибір оптимального підходу для розробки та постановка задачі	23
Розділ 2. Проектування системи оптичного вимірювання	26
2.1. Розробка структури системи	26
2.2. Вибір компонентів системи	27
2.3. Розробка алгоритму обробки сигналів	31
3. Програмне та метрологічне забезпечення системи	37
3.1. Програмне забезпечення системи	37
3.2. Особливості визначення невизначеності результатів вимірювань.	44
3.3 Метрологічне забезпечення системи та рекомендації щодо підвищення точності	48
Висновки	51
Список використаних джерел	52

					ДП.МТІР.10781594.00.00.00.000 ПЗ					
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Система оптичного вимірювання концентрації газів у промислових викидах / Optical measurement system for gas concentrations in industrial emissions			Літ.	Арк.	Акрушів
Розроб.		Руда М.М.								
Перевірив.		Масляк Б.О.							6	62
Консульт.								ЗУНУ.ФКІТ.МТІР-41		
Н. Контр.		Масляк Б.О								
Затверд.		Сегін А.І.								

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

МК – мікроконтролер;

ВК – вимірювальний канал

АЦП – аналого-цифровий перетворювач

ЦАП – цифро - аналоговий перетворювач

ПЗ – програмне забезпечення

					ДП.МТІР.10781594.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						7
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

ВСТУП

Актуальність теми дослідження. Стрімке зростання промислового виробництва протягом останніх десятиліть призвело до суттєвого збільшення обсягів газових викидів в атмосферу. Промислові підприємства — металургійні комбінати, теплові електростанції, нафтопереробні та хімічні заводи — щорічно викидають мільярди тонн забруднювальних речовин, серед яких домінують діоксид вуглецю (CO_2), оксид вуглецю (CO), діоксид сірки (SO_2), оксиди азоту (NO_x) та тверді частинки. За даними Міжнародного енергетичного агентства (МЕА), лише у 2023 році глобальні викиди CO_2 від спалювання палива перевищили 37,4 Гт — рекордний показник за всю історію спостережень [1, 2].

Екологічне законодавство Європейського Союзу, зокрема Директива 2010/75/ЄС про промислові викиди (IED), а також вимоги системи IPPC (Integrated Pollution Prevention and Control) зобов'язують підприємства здійснювати безперервний автоматизований моніторинг концентрацій забруднювачів у відхідних газах. Україна, як країна — кандидат на членство в ЄС, поступово наближає власне природоохоронне законодавство до стандартів ЄС, що зумовлює нагальну потребу в сучасних системах газового аналізу [3].

Традиційні методи контролю промислових викидів — електрохімічні, парамагнітні, хроматографічні — хоча й забезпечують прийнятну точність, мають суттєві практичні обмеження: значний час відгуку (десятки секунд — хвилини), потребу в регулярному обслуговуванні та заміні витратних матеріалів, а також складність роботи в умовах високих температур і агресивних середовищ. Контактні датчики в жорстких умовах труб і газоходів швидко деградують, що призводить до похибок вимірювань і дорогого технічного обслуговування.

Оптичні методи вимірювання концентрацій газів, засновані на явищах поглинання, розсіювання та випромінювання електромагнітного випромінювання, позбавлені більшості цих недоліків. Зокрема, метод диференціальної оптичної абсорбційної спектроскопії (DOAS), лазерна абсорбційна спектроскопія з перестроюваними лазерами (TDLAS) та

					ДП.МТІР.10781594.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		8

широкосмугова спектроскопія поглинання (IBBCEAS) демонструють можливість отримання результатів у режимі реального часу, без відбору проб, із роздільною здатністю до одиниць ppb, в агресивних промислових середовищах. Розвиток компактних напівпровідникових джерел випромінювання (лазерні діоди, світлодіоди), кремнієвих фотодетекторів та сучасних методів цифрової обробки сигналів відкриває нові можливості для побудови портативних і стаціонарних аналітичних систем з покращеними метрологічними характеристиками [4].

Актуальність даного дослідження визначається, по-перше, посиленням екологічних вимог до моніторингу промислових викидів в Україні та світі; по-друге, недостатністю наявних вітчизняних розробок у галузі оптичних аналізаторів газів; по-третє, необхідністю синтезу сучасної компонентної бази оптоелектроніки з алгоритмами машинного навчання для підвищення точності ідентифікації та кількісного визначення компонентів складних газових сумішей. Зазначені фактори і обумовили вибір теми бакалаврської роботи: «Система оптичного вимірювання концентрації газів у промислових викидах».

Метою бакалаврської роботи є розробка та дослідження системи оптичного вимірювання концентрації газових компонентів у промислових викидах на основі методу інфрачервоної абсорбційної спектроскопії, що забезпечує безперервний багатокомпонентний аналіз у режимі реального часу.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Провести аналіз сучасного стану методів і засобів оптичного газового аналізу, визначити переваги та обмеження кожного з підходів.
2. Обрати та обґрунтувати фізичний принцип вимірювань, придатний для контролю промислових газових викидів в умовах підвищених температур, тиску та наявності аерозольних завад.
3. Розробити структурну та функціональну схеми вимірювальної системи, вибрати і обґрунтувати елементну базу оптичної та електронної частин.

					ДП.МТІР.10781594.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		9

4. Побудувати математичну модель взаємодії інфрачервоного випромінювання з досліджуваним газовим середовищем на основі закону Бугера–Ламберта–Бера.

5. Розробити алгоритм цифрової обробки спектральних даних, що включає корекцію матричних ефектів, компенсацію дрейфу нуля та ідентифікацію компонентів газової суміші.

6. Реалізувати програмне забезпечення вбудованої системи збору та первинного опрацювання даних.

7. Провести метрологічну оцінку розробленої системи: розрахунок похибок, перевірку діапазону вимірювань та порівняння з вимогами чинних стандартів.

8. Виконати техніко-економічне обґрунтування доцільності впровадження системи.

Об'єктом дослідження є процес оптичного вимірювання концентрацій газових компонентів — CO_2 , CO , SO_2 , NO_x та CH_4 — у потоці промислових відхідних газів в умовах реального технологічного середовища.

Предметом дослідження є методи, алгоритми та технічні засоби інфрачервоної абсорбційної спектроскопії для кількісного визначення концентрацій компонентів складних газових сумішей; закономірності формування аналітичного сигналу та джерела його спотворення в умовах промислових викидів; метрологічні характеристики вимірювальної системи — чутливість, роздільна здатність, похибки, завадостійкість.

У роботі застосовано комплекс теоретичних та експериментальних методів дослідження

Теоретичні методи:

— Фізико-математичне моделювання процесів поглинання інфрачервоного випромінювання на основі закону Бугера–Ламберта–Бера.

— Методи теорії сигналів і систем для обробки спектрів поглинання та виділення аналітичного сигналу на тлі шумів.

					ДП.МТІР.10781594.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		10

– Метод найменших квадратів та регресійний аналіз для побудови калібрувальних залежностей.

Інструментальні та програмні засоби:

– Схемотехнічне проектування аналогового та цифрового трактів у середовищі.

– Розробка вбудованого ПЗ мовою C/C++ у середовищі ArduinoIDE.

Наукова новизна роботи полягає у компенсації зміщення нуля оптичного тракту, викликаного забрудненням вікон вимірювальної камери пилом та конденсатом.

Практична цінність результатів роботи полягає у моніторингу джерел викидів промислових підприємств відповідно до вимог Директиви 2010/75/ЄС та ДСТУ EN 14181:2023 «Якість атмосферного повітря». Отримані результати є підґрунтям для проектування приладів класу CEMS (Continuous Emission Monitoring Systems) вітчизняного виробництва, що дозволить скоротити залежність від імпортного газоаналітичного обладнання.

Бакалаврська робота складається із вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел. Загальний обсяг роботи — ____ сторінок, у тому числі ____ рисунків, ____ таблиць. У висновках підведено підсумки роботи, сформульовано основні здобуті результати та рекомендації щодо подальшого розвитку дослідження.

					ДП.МТІР.10781594.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		11

1. АНАЛІЗ МЕТОДІВ ВИМІРЮВАННЯ КОНЦЕНТРАЦІЇ ГАЗІВ У ПРОМИСЛОВИХ УМОВАХ

1. Фізичні принципи взаємодії випромінювання з газовими середовищами

Сучасне промислове виробництво супроводжується значним антропогенним навантаженням на атмосферне повітря. Газоподібні відходи, що утворюються внаслідок технологічних процесів, мають різноманітний хімічний склад і відрізняються за характером впливу на навколишнє природне середовище та здоров'я людини. Ефективне управління екологічною безпекою потребує чіткої систематизації цих речовин та застосування жорстких інструментів державного регулювання. У нормативно-правовій та науковій практиці промислові газові викиди класифікують за їхнім домінантним екологічним та токсикологічним впливом на геосфери. На основі цього критерію виділяють три основні групи компонентів: парникові гази, сполуки кислотного характеру та специфічні токсичні речовини [5].

До групи парникових газів відносять сполуки, які мають здатність поглинати та перевипромінювати інфрачервоне випромінювання, спричиняючи зміну теплового балансу атмосфери:

- Вуглекислий газ (CO_2) є основним антропогенним парниковим газом за обсягами емісії. Його надходження пов'язане з декарбонізацією вапняку в цементній промисловості, процесами відновлення руд у металургії та спалюванням викопного палива на теплових електростанціях.
- Метан (CH_4) характеризується значно вищою порівняно з CO_2 теплопоглинальною здатністю, яка в сторічній перспективі оцінюється потенціалом глобального потепління у межах 28–36 одиниць. Основними джерелами його дифузного надходження є технологічні втрати під час транспортування природного газу, вентиляційні системи вугільних шахт та анаеробні процеси на полігонах твердих побутових відходів.

					ДП.МТІР.10781594.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		12

Кислотоутворюючі гази та механізми їхньої трансформації вступають у хімічні реакції з атмосферною вологою, трансформуючись у кислоти та зумовлюючи транскордонне забруднення:

– Діоксид сірки (SO_2) утворюється переважно під час окиснення сірковмісних сполук, що присутні у твердому та рідкому паливі. Цей газ має виражену фітотоксичність, викликає деградацію лісових масивів через механізм закислення ґрунтів та активізує процеси корозії промислових конструкцій.

– Оксиди азоту NO_x , переважно у формі NO та NO_2 є результатом фіксації атмосферного азоту за умов високих температур у камерах згоряння палива. Окрім прямого негативного впливу на респіраторну систему людини, вони виступають прекурсорами формування фотохімічного смогу та тропосферного озону під дією сонячної радіації.

Окрему екологічну загрозу становлять токсичні та канцерогенні домішки, що виникають як продукти неповного згоряння та випаровування. Це оксид вуглецю (CO), який має здатність утворювати стійкі сполуки з гемоглобіном крові, а також леткі органічні сполуки (ЛОС). Останні містять широкий спектр вуглеводнів, що мають безпосередню токсичну та канцерогенну дію на живі організми.

Для запобігання незворотним змінам в екосистемах та забезпечення безпеки населення функціонує дворівнева система нормування, яка поєднує медико-біологічні критерії з технологічними можливостями промисловості. Напрямок санітарно-гігієнічного нормування якості повітря базується на концепції безшкідливості довкілля для людини і реалізується через встановлення Гранично допустимих концентрацій (ГДК) речовин у приземному шарі атмосфери населених пунктів:

– Максимально разова ГДК встановлюється для попередження рефлекторних реакцій людини (відчуття запаху, подразнення дихальних шляхів) під час короткочасного впливу речовини протягом 20 хвилин.

					ДП.МТІР.10781594.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		13

– Середньодобова ГДК розраховується з метою виключення хронічного загальнотоксичного, канцерогенного або мутагенного впливу сполуки за умов її тривалого, багаторічного вдихання.

Ці показники є універсальними медичними константами і не залежать від технічного стану промислових об'єктів.

На відміну від санітарних норм, екологічні нормативи спрямовані на регулювання потоків забруднюючих речовин безпосередньо у точці їхнього відведення від технологічного устаткування. Основним інструментом довгострокового планування є Гранично допустимий викид (ГДВ), який визначає масу речовини в одиницю часу для конкретного підприємства. Розрахунок ГДВ здійснюється шляхом математичного моделювання розсіювання газів в атмосфері з урахуванням висоти джерела, метеорологічних факторів та фонового забруднення району. Величина ГДВ встановлюється на такому рівні, щоб сумарні викиди всіх підприємств регіону не призводили до перевищення гігієнічних ГДК у житлових зонах.

На сучасному етапі розвитку екологічного права відбувається перехід до технологічного нормування, заснованого на впровадженні Найкращих доступних технологій (НДТ). Цей підхід передбачає встановлення питомих нормативів викидів на одиницю виробленої продукції. Таким чином, підприємства стимулюються до модернізації виробництва, очищення димових газів за допомогою абсорбційних чи каталітичних методів та переходу до принципів циркулярної економіки.

Ефективність функціонування системи екологічного нормування та контролю безпосередньо залежить від достовірності, повноти та оперативності отримання даних про обсяги і склад промислових викидів. Сучасне екологічне законодавство України перебуває на етапі глибокої трансформації та адаптації до нормативно-правового поля Європейського Союзу, що зумовлює перехід від періодичного інструментального контролю до безперервного автоматизованого моніторингу безпосередньо на джерелах викидів.

					ДП.МТІР.10781594.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		14

Ефективність функціонування системи екологічного нормування та контролю безпосередньо залежить від достовірності, повноти та оперативності отримання даних про обсяги і склад промислових викидів. Сучасне екологічне законодавство України перебуває на етапі глибокої трансформації та адаптації до нормативно-правового поля Європейського Союзу, що зумовлює перехід від періодичного інструментального контролю до безперервного автоматизованого моніторингу безпосередньо на джерелах викидів.

Основою європейського підходу до контролю промислового забруднення є Директива 2010/75/ЄС про промислові викиди (інтегроване запобігання та контроль забруднення). Згідно з цим документом, для великих спалювальних установок, сміттєспалювальних заводів та підприємств, що працюють у межах регулювання Найкращих доступних технологій (НДТ), обов'язковим є впровадження Автоматизованих систем моніторингу викидів (АСМВ), відомих у європейській практиці як Continuous Emission Monitoring Systems (CEMS).

Технічні вимоги до таких систем в ЄС жорстко регламентовані серією стандартів EN 14181, які визначають три рівні забезпечення якості (QAL1, QAL2, QAL3) та щорічний аудит (AST):

- QAL1 (Кваліфікація обладнання): Сертифікація вимірювальних приладів на відповідність стандартам точності перед їх встановленням.
- QAL2 (Калібрування та валідація): Періодичне калібрування системи незалежними акредитованими лабораторіями за допомогою референтних методів безпосередньо на об'єкті.
- QAL3 (Поточний контроль): Безперервна автоматична перевірка стабільності роботи приладів (контроль дрейфу нуля та діапазону вимірювань) під час експлуатації.

Директива вимагає безперервного вимірювання таких базових параметрів, як концентрація SO₂, NO_x, пилу, CO, а також допоміжних фізичних показників — об'ємної витрати газу, температури, тиску та вмісту водяної пари.

В Україні правові засади моніторингу атмосферного повітря визначені Законом України «Про охорону атмосферного повітря» та Порядком здійснення

					ДП.МТІР.10781594.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		15

державного моніторингу в галузі охорони атмосферного повітря. Процес гармонізації з європейськими нормами активізувався з прийняттям та реалізацією положень, що координують впровадження інтегрованих довкільних дозволів для великих підприємств-забруднювачів.

Сучасні вимоги українського законодавства до систем моніторингу промислових підприємств базуються на таких критеріях:

- **Обов'язковість автоматизації для великих джерел:** Підприємства першої групи, які мають значні обсяги викидів та технологічне устаткування високої потужності, зобов'язані обладнувати джерела викидів автоматизованими системами контролю.
- **Безперервність та передача даних в реальному часі:** Сучасні технічні специфікації вимагають від підприємств інтеграції АСМВ з державними інформаційними системами (зокрема, з Єдиною екологічною платформою «ЕкоСистема»). Дані про концентрації забруднюючих речовин мають передаватися в автоматичному режимі з визначеною дискретністю (як правило, кожні 20–30 хвилин).
- **Метрологічна атестація та верифікація:** Усі засоби вимірювальної техніки, що входять до складу вітчизняних систем моніторингу, повинні бути внесені до Державного реєстру або пройти процедуру оцінки відповідності згідно із Законом України «Про метрологію та метрологічну діяльність» [6].

Головною спільною рисою українського та європейського підходів є перенесення фінансового та організаційного тягаря моніторингу безпосередньо на оператора установки (принцип «забруднювач платить»). Підприємство самостійно забезпечує проектування, монтаж та обслуговування вимірювальних систем.

Проте, ключова розбіжність, яка наразі усувається в процесі реформ, полягала у рівні інтеграції даних. Якщо в ЄС автоматизований моніторинг є частиною повсякденного технологічного контролю з миттєвим реагуванням на перевищення, то в Україні тривалий час домінував підхід періодичного інструментального контролю (забір проб лабораторією кілька разів на рік).

					ДП.МТІР.10781594.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						16
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Перехід до повноцінного безперервного моніторингу є обов'язковою умовою для інтеграції українського промислового сектору до спільного європейського економічного простору.

1.2. Аналіз методів вимірювання концентрації газів

Для забезпечення безперервного екологічного моніторингу та дотримання жорстких законодавчих норм застосовують широкий спектр аналітичних методів вимірювання концентрації газів. Вибір конкретного методу зумовлений хімічною природою цільового компонента, необхідним діапазоном вимірювання, умовами експлуатації первинного перетворювача (сенсора) та вимогами до точності й швидкодії системи [7].

Електрохімічні сенсори базуються на принципі реєстрації електричних параметрів, що виникають внаслідок проходження окисно-відновних реакцій на межі розділу фаз «електрод–електроліт» за участю молекул цільового газу. Найбільшого поширення набули амперометричні триелектродні комірки, які містять робочий електрод (електрод порівняння), допоміжний електрод та допоміжну систему підтримки потенціалу (потенціостат). Принцип роботи: Молекули газу (CO , SO_2 , NO_2) дифундують крізь захисну гідрофобну мембрану до робочого електрода, де піддаються селективному хімічному окисненню або відновленню. Зміна сили струму в ланцюзі між робочим і допоміжним електродами є прямо пропорційною парціальному тиску (концентрації) досліджуваного газу в газовій суміші. Переваги та обмеження: Електрохімічні первинні перетворювачі характеризуються високою чутливістю у діапазоні малих концентрацій (на рівні млн^{-1} , ppm), низьким енергоспоживанням та відносно низькою вартістю. Водночас суттєвими недоліками є часовий дрейф градувальної характеристики внаслідок висихання або деградації електроліту, обмежений термін служби (зазвичай 1–3 роки), а також перехресна чутливість до супутніх газових компонентів.

					ДП.МТІР.10781594.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		17

Каталітичні вимірювальні перетворювачі (пелістори) орієнтовані на детектування концентрацій горючих і вибухонебезпечних газів (насамперед метану CH_4 , водню, парів вуглеводнів) у повітрі в межах до нижньої концентраційної межі поширення полум'я. Принцип роботи: Сенсор конструктивно складається з двох платинових спіралей, одна з яких покрита активним каталізатором (оксид алюмінію, легований платиною або паладієм), а друга є пасивною (компенсаційною) для нівелювання впливу температури довкілля. При протіканні струму спіралі розігріваються до робочої температури ($400 - 500^\circ\text{C}$). При контакті з горючим газом на активному елементі відбувається безполум'яне поверхневе окиснення (горіння), що супроводжується додатковим виділенням тепла. Зміна температури призводить до зміни електричного опору платинової спіралі, яка реєструється за допомогою вимірювального мосту Уїтстона. Пелістори відрізняються високою надійністю, простотою схемотехнічної реалізації та стійкістю до коливань тиску. Головними дестабілізуючими факторами є потреба у наявності кисню в аналізованому середовищі, високе енергоспоживання через постійний нагрів, а також ризик «отруєння» каталізатора сполуками сірки, кремнію чи хлору, що призводить до незворотної втрати чутливості.

Дія напівпровідникових сенсорів (резистивного типу) базується на зміні питомої електричної провідності тонкоплівкових шарів оксидів металів (SnO_2 , ZnO , In_2O_3 , WO_3) під час адсорбції молекул газу на їхній поверхні. Дані датчики мають надвисоку чутливість (здатні фіксувати концентрації на рівні часток ppm) та низьку вартість завдяки сучасному розвитку технологій MEMS. Проте їм притаманна суттєва нелінійність вихідної функції перетворення, значна температурна залежність та низька селективність, що ускладнює їхнє застосування у багатокомпонентних промислових викидах без додаткових селективних фільтрів або систем термоцикування.

Оптичні (абсорбційні) методи є найбільш досконалими та перспективними для застосування в автоматизованих системах моніторингу екологічних параметрів. Проходження променю інфрачервоного (ІЧ) лазера або світлодіода

					ДП.МТІР.10781594.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		18

через газове середовище супроводжується «поглинанням» частини фотонів, і до детектора долітає послаблений сигнал – рисунок 1.1.

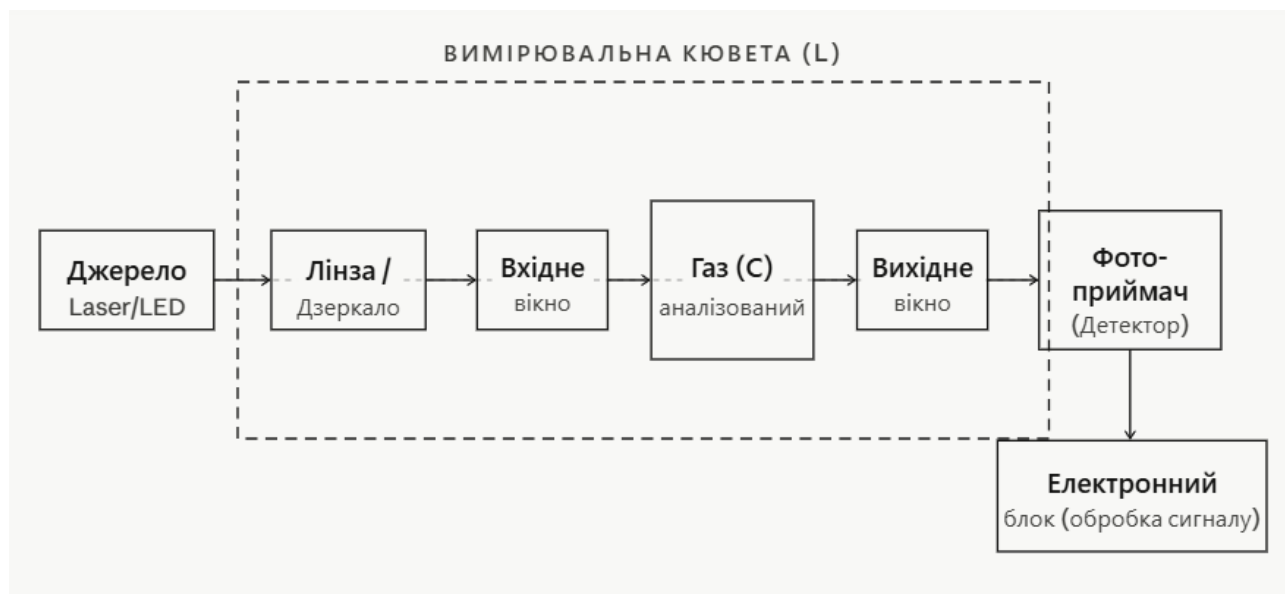


Рисунок 1.1 – Структура типової оптико-електронної вимірювальної системи

Саме ця закономірність лежить в основі оптичної газової аналітики. Кількісно цей ефект описується законом Бугера–Ламберта–Бера (ЗЛББ), відомим у літературі також як закон Бера або закон Бера–Ламберта [1]. Закон стверджує: якщо монохроматичне випромінювання з інтенсивністю I_0 проходить крізь однорідне газове середовище довжиною l , то інтенсивність I , що виходить з протилежного кінця, визначається виразом:

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) \cdot \exp(-\alpha(\lambda) \cdot c \cdot l)$$

де $I_0(\lambda)$ — вхідна інтенсивність на довжині хвилі λ , Вт/м²;

$I(\lambda)$ — інтенсивність після проходження кювети, Вт/м²;

$\alpha(\lambda)$ — коефіцієнт поглинання (абсорбції) газу на довжині хвилі λ , (м·моль/л)⁻¹;

c — концентрація поглинаючого компонента, моль/л або ppm; l — довжина оптичного шляху крізь газ, м.

Логарифм відношення I_0/I називається оптичною щільністю, або абсорбансом A :

$$A(\lambda) = \lg(I_0 / I) = \alpha(\lambda) \cdot c \cdot l / \ln(10) \quad \text{або} \quad A = \varepsilon \cdot c \cdot l$$

У такому записі ε — молярний коефіцієнт поглинання (extinction coefficient), л/(моль·см). Формула є «робочою» версією ЗЛББ. Цей добуток визначається при калібруванні.

На рисунку 1.2 показана фізична суть закону: товсті стрілки — вхідний промінь, тонкіші — ослаблений після проходження кювети завдовжки l . ЗЛББ є строго лінійним лише за певних умов.



Рисунок 1.2 – Ілюстрація закону Бугера–Ламберта–Бера

По-перше, випромінювання повинне бути монохроматичним (або вузькосмуговим) — у реальній смузі поглинання коефіцієнт α змінюється, і тоді зв'язок між A та c стає нелінійним.

По-друге, закон справедливий за відсутності значного розсіювання (аерозолі, пил). По-третє, за дуже великих концентрацій виникають міжмолекулярні взаємодії, що порушують адитивність поглинання. У промислових застосуваннях ці ефекти враховуються через корекційні алгоритми. Кожен газ поглинає ІЧ-випромінювання лише на певних, строго фіксованих довжинах. Для найпоширеніших промислових забруднювачів основні смуги поглинання розташовані у «вікнах прозорості» атмосфери в діапазоні 1–15 мкм. На рисунку 1.3 показано схематичний розподіл смуг поглинання основних компонентів промислових викидів у середньому ІЧ-діапазоні.

					ДП.МТІР.10781594.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		20

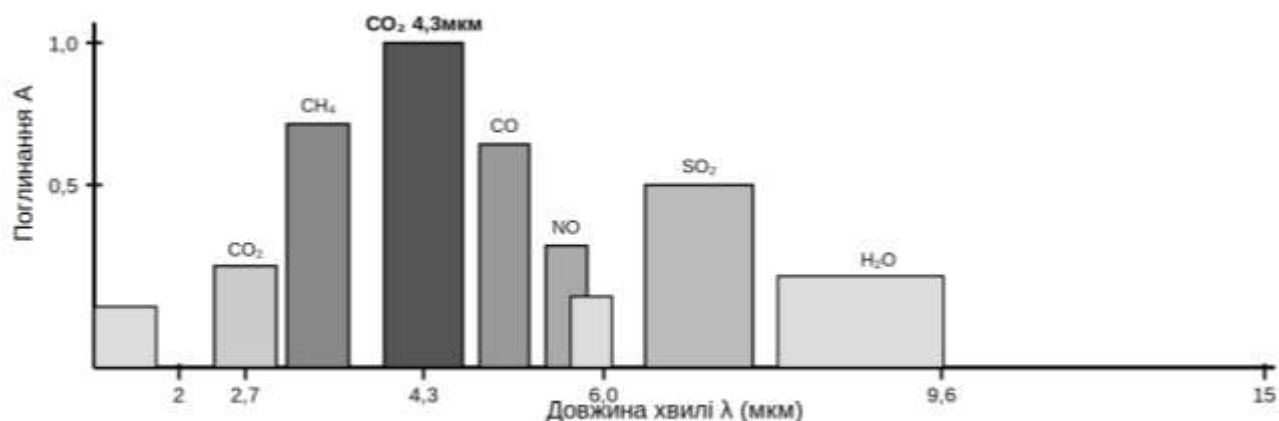


Рисунок 1.3 – Смути поглинання основних газів у ІЧ-діапазоні

Зі схеми видно, що деякі смуги перекриваються — наприклад, смуги CO₂ та H₂O в районі 2,7 мкм. Це створює проблему перехресних завад: прилад, налаштований на CO₂, «бачитиме» і водяну пару.

Таблиця 1.1 – Характеристичні смуги поглинання та коефіцієнти основних газів

Газ	λ (мкм)	ν (см ⁻¹)	ϵ , л/(моль·см)	Примітка
CO ₂	4,26	2349	$\sim 2,5 \cdot 10^3$	Асим. розтягнення ν_3
CO	4,67	2143	$\sim 3,0 \cdot 10^2$	Розтягнення ν_1
SO ₂	7,35	1360	$\sim 1,8 \cdot 10^2$	Асим. розтягнення ν_3
NO	5,30	1876	$\sim 1,2 \cdot 10^2$	Основна смуга
CH ₄	3,31	3018	$\sim 5,0 \cdot 10^2$	Розтягнення C–H
H ₂ O	6,27	1595	$\sim 2,0 \cdot 10^2$	Деформаційне ν_2
NO ₂	6,15	1627	$\sim 5,0 \cdot 10^1$	Асим. розтягнення

У сучасних газоаналізаторах вибір джерела світла визначає селективність та роздільну здатність всієї системи:

– Широкосмугові джерела (лампи розжарювання, мікронагрівачі): Використовуються переважно у недисперсійних інфрачервоних (NDIR)

сенсорах. Вони випромінюють у широкому ІЧ-діапазоні, що потребує обов'язкового застосування додаткових інтерференційних світлофільтрів для виділення аналітичної довжини.

– Світлодіоди (LED): Напівпровідникові джерела середнього ІЧ-діапазону (Mid-IR LED). Мають вищу енергетичну ефективність, можливість високочастотної модуляції струму живлення та вузьку спектральну лінію порівняно з лампами.

– Напівпровідникові лазери (діоди з вертикальним резонатором, квантово-каскадні лазери): Вони мають надвузьку лінію випромінювання, яку можна динамічно перебудовувати (сканувати) за частотою шляхом модуляції струму інжекції чи температури. Це дозволяє виділяти поодинокі лінії поглинання конкретного газу (наприклад, метану або NO_x), повністю нівелюючи вплив завад.

Оптичні елементи призначені для формування, фокусування та транспортування світлового потоку в межах вимірювального тракту:

- лінзи та дзеркала - використовуються для колімації (створення паралельного пучка) випромінювання від джерела та його подальшого фокусування на чутливу площадку детектора. В ІЧ-діапазоні стандартне силікатне скло є непрозорим, тому лінзи та вікна кювет виготовляють із таких матеріалів, як селенід цинку, фторид кальцію, сапфір або високочистий германій.
- світловоди (оптичні волокна) - спеціальні оптичні волокна дозволяють реалізувати концепцію дистанційного моніторингу, коли оптичний блок аналізатора винесено у безпечну зону, а світло транспортується безпосередньо до димової труби або технологічного реактора.

Фотоприймачі та детектори виконують функцію зворотного перетворення інтенсивності оптичного випромінювання, що пройшло крізь газ, в електричний сигнал. Це теплові детектори (піроелектричні приймачі, термопари): Реєструють зміну температури чутливого елемента внаслідок поглинання ІЧ-світла. Вони мають широку спектральну характеристику, але відрізняються низькою

					ДП.МТІР.10781594.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		22

швидкодією (стала часу в межах мілісекунд). Напівпровідникові фотодіоди (InGaAs, InAsSb, МСТ — ртуть-кадмій-телур): Базуються на внутрішньому фотоефекті. Характеризуються надзвичайно високою швидкодією (наносекундний діапазон) та високою виявляльною здатністю, що є критично важливим при використанні високочастотної лазерної модуляції сигналу.

Таким чином, в результаті порівняльного аналізу методів вимірювання промислових викидів виділено оптичний метод, як перспективний.

1.3. Вибір оптимального підходу для розробки та постановка задачі

Особливістю даного розділу є визначення, що саме повинна вміти система і в яких умовах вона буде працювати. Постановка задачі фіксує вимоги до системи ще до початку проєктування. У даному підрозділі сформульовано вимоги до системи оптичного вимірювання концентрації газів (CO, CO₂, CH₄, SO₂, NO₂) у промислових димових та технологічних викидах.

Промислові газові викиди можуть містити цільові компоненти у надзвичайно широкому концентраційному діапазоні — від слідових кількостей (одиниці ppm) до відсоткових часток. Для кожного газу встановлено окремий робочий діапазон вимірювань, виходячи з типових промислових концентрацій та гранично допустимих концентрацій (ГДК), нормованих ДСТУ EN 14181:2020 та директивою ЄС 2010/75/EU про промислові викиди.

Позначення «ПШД» у колонці точності означає «повна шкала діапазону» (англ. Full Scale, FS) — стандартний спосіб нормування похибки для газоаналізаторів промислового класу. Наприклад, для CO при діапазоні 2000 ppm похибка $\pm 2\%$ ПШД дорівнює ± 40 ppm абсолютного відхилення.

Час відгуку системи (T₉₀ — час досягнення 90 % від кінцевого значення) не повинен перевищувати 30 секунд. Це вимога EN ISO 12039:2019 «Стаціонарні джерела викидів — визначення концентрацій CO, CO₂ та O₂» для безперервного контролю викидів (CEMS — Continuous Emission Monitoring System). Тривалість

					ДП.МТІР.10781594.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		23

одного вимірювального циклу встановлюється не більше 1 секунди, щоб забезпечити відображення даних у реальному часі. Для зниження впливу флуктуацій концентрації застосовується ковзне середнє з вікном 10 вимірювань.

Таблиця 1.2 – Вимоги до діапазонів вимірювань цільових газів

Газ	Хімічна формула	Діапазон вимірювань	ГДК р.з. (ДСТУ)	Точність вимірювань
Монооксид вуглецю	CO	0 – 2 000 ppm	20 мг/м ³ (17 ppm)	± 2 % ПШД
Діоксид вуглецю	CO ₂	0 – 20 %об.	9 000 мг/м ³ (5 000 ppm)	± 1 % ПШД
Метан	CH ₄	0 – 5 % (0–100 % НКМЗ)	7 000 мг/м ³ (5 400 ppm)	± 2 % ПШД
Діоксид сірки	SO ₂	0 – 2 000 мг/м ³	10 мг/м ³ (3,5 ppm)	± 2 % ПШД
Діоксид азоту	NO ₂	0 – 500 мг/м ³	2 мг/м ³ (1 ppm)	± 3 % ПШД

Роздільна здатність перетворення встановлюється на рівні 24 бітів для АЦП основного каналу, що забезпечує теоретичну розрізняльну здатність 1/16 777 216 від повного діапазону. Для діапазону CO 0–2000 ppm це означає розрізнення концентрацій на рівні 0,0001 ppm, що з запасом перебиває реальну потребу (0,1 ppm).

Оптична система призначена для роботи безпосередньо на промисловому об'єкті — у технологічному приміщенні або поблизу димової труби. Вимоги до умов експлуатації встановлюються жорсткішими, ніж для лабораторних приладів.

Промислові газові викиди є складними багатокомпонентними сумішами. Окрім цільових газів (CO, CO₂, SO₂), вони містять водяну пару (до 30 %об.), аерозолі, пил та інші хімічно активні сполуки. Присутність водяної пари є головною завадою при оптичних вимірюваннях у ІЧ-діапазоні, оскільки вона має широкі смуги поглинання, які перебиваються зі смугами CO (смуга ~4,65 мкм) та SO₂ (~7,35 мкм). Саме тому більшість промислових аналізаторів або

видаляють вологу (метод extraction), або застосовують диференційну оптичну схему (in-situ) з програмною корекцією перехресних завад.

На підставі порівняльного аналізу (розділ 1.2) обрано метод NDIR — Non-Dispersive Infrared (Недисперсійний інфрачервоний метод). Його вибір зумовлений трьома ключовими факторами: NDIR забезпечує необхідну точність при помірній вартості компонентів; відсутність рухомих елементів гарантує надійність в умовах промислової вібрації. В основі NDIR-методу лежить закон Бугера–Ламберта–Бера (рисунок 1.4).



Рисунок 3.2 – Принцип поглинання ІЧ-випромінювання газом (закон Бугера–Ламберта–Бера). Джерело: розроблено автором

Рисунок 1.4 – Принцип ослаблення ІЧ-випромінювання газом за законом Бугера–Ламберта–Бера

Інтенсивність монохроматичного випромінювання I після проходження через шар поглинаючого газу товщиною L пов'язана з початковою інтенсивністю I_0 і концентрацією C . Вимірявши відношення I/I_0 через два оптичних канали — вимірювальний для цільового газу) та референсний отримуємо концентрацію промислових викидів.

2. ПРОЕКТУВАННЯ СИСТЕМИ ОПТИЧНОГО ВИМІРЮВАННЯ

					ДП.МТІР.10781594.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		25

2.1. Розробка структури системи

Оптична схема вимірювальної системи включає чотири ключові елементи: джерело ІЧ-випромінювання, вимірювальну кювету, спектральний фільтр та фотодетектор. Структурна схема показана на рисунку 2.1.

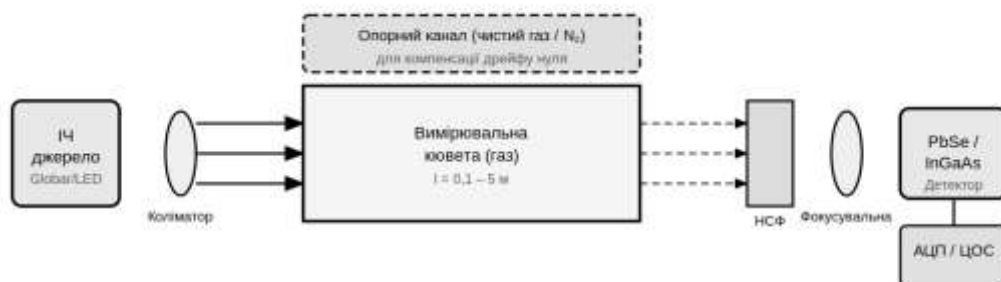


Рисунок 2.1 – Оптична схема NDIR-аналізатора з опорним каналом

Структурна схема описує, з яких функціональних блоків складається система і як вони взаємодіють між собою [10-12]. Вона не показує конкретних мікросхем або схемотехніки — для цього є принципова схема — але чітко відповідає на питання: «який блок що робить і кому передає сигнал». Більш детальна схема приведена на рисунку 2.2.



Рисунок 2.2 – Деталізована структура оптичної системи

Оптичний вимірювальний блок є «серцем» системи. Він складається з джерела ІЧ-випромінювання (широкосмугова NDIR-лампа або LED-масив), двох вузькосмугових інтерференційних фільтрів (вимірювальний і референсний канал), газової кювети довжиною 100–200 мм та фотодетектора. Двоканальна

схема (рисунок 2.1, блок «Газова кювета / канал») є принциповою: референсний канал компенсує дрейф потужності джерела та забруднення оптики, тому система не потребує частого нульового калібрування.

Аналоговий сигнал з фотодетектора (струм або напруга, пропорційні інтенсивності ІЧ-поток) підсилюється і надходить до 24-бітного АЦП. Мікроконтролер зчитує цифрові відліки, виконує медіанну фільтрацію, температурну компенсацію та обчислює концентрацію за законом Бугера–Ламберта–Бера. Весь алгоритм обробки детально описано у підрозділі 3.5.

Результати вимірювань відображаються на вбудованому дисплеї (OLED 128×64 або символьний LCD 20×4). Паралельно дані записуються в журнал на SD-карту у форматі CSV з часовою міткою RTC-модуля DS3231. Веб-інтерфейс на базі ESP32 дозволяє переглядати поточні показники та графіки трендів через будь-який браузер у локальній мережі без встановлення програмного забезпечення.

Для передачі даних використовуються промислові інтерфейси, як проводові, так і безпроводові.

Таким чином, в даному розділі розроблена структура системи оптичного вимірювання концентрації промислових газів.

2.2. Вибір компонентів системи

Вибір конкретних компонентів виконується після того, як структурна схема затверджена. Для кожного ключового вузла нижче наведено порівняльний аналіз альтернатив та обґрунтовано остаточний вибір [13, 14].

Обґрунтування джерела випромінювання. Для NDIR-систем традиційно застосовуються два типи джерел: широкосмугові теплові емітери (лампи розжарювання або мікромеханічні MEMS-нагрівачі) та вузькосмугові ІЧ-LED/лазерні діоди. Теплові джерела серії IR-Si виробництва фірм Pyreos або IRSource мають спектр, що наближається до чорного тіла при $T \approx 700^{\circ}\text{C}$ і

					ДП.МТІР.10781594.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		27

охоплюють весь діапазон 2–12 мкм з ресурсом випромінювання більше 100 000 годин. На відміну від вольфрамових ламп, вони не мають скляних крихких елементів і споживають лише 0,5–1 Вт, що робить їх ідеальними для портативних і вбудованих газоаналізаторів. Для даної системи обрано MEMS-джерело типу IIRSource HLS-1000 – рисунок 2.3.



Рисунок 2.3 – Джерело випромінювання HLS 1000

Прилад генерує безперервний широкосмуговий спектр радіаційного випромінювання, що охоплює видиму область та ближній інфрачервоний діапазон від 340нм до 2000нм. Спектральний розподіл енергії джерела є близьким до випромінювання абсолютно чорного. Типова інтегральна вихідна оптична потужність випромінювача становить 6.0мВт за умови його стикування зі стандартним кварцовим волоконно-оптичним світловодом. Конструкція вихідного оптичного порту оснащена уніфікованим роз'ємом типу SMA905, що забезпечує високу ефективність введення світлового потоку в оптичний тракт без додаткового юстування.

Центральними оптичними елементами є вузькосмугові інтерференційні фільтри — по одному на кожний вимірювальний канал. Вони пропускають лише вузьку смугу λ шириною 50–150 нм, відповідну пікові поглинання цільового газу, і відсікають все решта. Наприклад, для СО обирається фільтр з $\lambda = 4,65 \text{ мкм} \pm 100 \text{ нм}$, для CO_2 — $\lambda = 4,26 \text{ мкм} \pm 80 \text{ нм}$. Фільтри виробляють компанії Spectrogon (Швеція) і Thorlabs (США) – рисунок 2.4.

					ДП.МТІР.10781594.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		28



Рисунок 2.4 - Фільтри фірми Spectrogon (Швеція)

Оптична кювета виготовляється з нержавіючої сталі AISI 316L з дзеркальним покриттям внутрішньої поверхні (золоте або срібне) для збільшення ефективного оптичного шляху без подовження фізичних розмірів (Herriott cell або White cell конфігурація).

Таблиця 2.1 – Вибрані компоненти системи

Вузол	Обраний компонент	Ключові параметри	Виробник / посилання
Джерело ІЧ	IRSource HLS-1000	λ 2–12 мкм, 0,5 Вт, ресурс >100 000 год	Pyreos Ltd
ІЧ-фільтр (CO)	BP 4650/100	$\lambda=4,65$ мкм, $\Delta\lambda=100$ нм, $T>85\%$	Spectrogon AB
ІЧ-фільтр (CO ₂)	BP 4260/80	$\lambda=4,26$ мкм, $\Delta\lambda=80$ нм, $T>85\%$	Spectrogon AB,
Фотодетектор	PbSe-модуль PD-5A	λ 1–5 мкм, NEP<1·10 ⁻¹¹ Вт/Гц ^{0.5}	Judson Technologies
АЦП	ADS1256	24-біт, SPI, 8 каналів	Texas Instruments
Мікроконтролер	ESP32		
Барометр/термометр	BME280	T ±0,5°C, P ±1 гПа, I ² C/SPI	Bosch Sensortec,
RS-485 трансивер	MAX485E	±до 115 200 бод	Maxim Integrated

Фотодетектор перетворює потік ІЧ-фотонів в електричний струм. Для діапазону 3–5 мкм (смуги CO, CO₂, CH₄) найбільш поширені детектори на основі сульфиду свинцю (PbS) та селеніду свинцю (PbSe). Фотодетектори із сульфиду свинцю мають спектральну чутливість у діапазоні 2–5 мкм, що усуває необхідність криогенного охолодження та пікову чутливість близько 4,5 мкм — в смузі поглинання CO. Для роботи при підвищених температурах навкол. середовища (до +60°C) варто обрати детектор з термоелектричним охолодженням Пельтьє, що стабілізує його характеристики.

АЦП ADS1256 від Texas Instruments є 24-бітним сігма-дельта перетворювачем з програмованим підсилюючим коефіцієнтом (PGA 1–64×) і вбудованим фільтром нижніх частот. Роздільча здатність сягає 21–22 бітів при частоті дискретизації 10 SPS, що достатньо для вимірювань [13, 14].

Мікроконтролер ESP32 здатний виконувати ці задачі в реальному часі. ESP32 має двоядерний процесор Xtensa LX6 з тактовою частотою до 240 МГц і 520 КБ оперативної пам'яті. Для порівняння — закон Бугера–Бера зводиться до обчислення натурального логарифма та кількох множень, що займає лічені мікросекунди навіть на слабшому залізі.

Медіанний фільтр по 16 вибіркам і фільтр Гауса — це прості операції з масивами. При циклі вимірювання 50 мс ESP32 витрачає на весь ланцюжок обробки орієнтовно 1–5 мс, тобто залишається понад 90 % часу циклу вільними. ESP32 підтримує FreeRTOS із коробки, що дозволяє виділити окрему задачу з фіксованим пріоритетом для вимірювання та обробки. Це гарантує детермінований час відгуку без затримок від Wi-Fi або інших фонових процесів — за умови правильного розподілу задач по ядрах (ядро 0 — комунікації, ядро 1 — вимірювання та обробка).

Єдиний нюанс — апаратний АЦП ESP32 має відносно невисоку точність (12 біт, з нелінійністю). Якщо в схемі використовується зовнішній 24-бітний АЦП (як зазначено у вашій схемі), то ESP32 отримує вже оцифровані дані через SPI/I²C і займається лише обчисленнями — це ще простіше.

					ДП.МТІР.10781594.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						30
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Для даної системи ESP32 є достатнім мікроконтролером. Складніші задачі (наприклад, FFT по 1024 точках або нейромережева обробка) він також виконує в реальному часі завдяки вбудованому апаратному прискорювачу.

2.3. Розробка алгоритму обробки сигналів

Еволюція засобів вимірювальної техніки привела до повного домінування комп'ютерних вимірювальних систем, де класична апаратна частина тісно інтегрується з обчислювальними засобами та мікропроцесорною технікою. У таких структурах первинні вимірювальні перетворювачі забезпечують лише фізико-хімічне сприйняття параметрів середовища, тоді як фінальна точність, надійність, аналітична інформативність та швидкість функціонування комплексу майже стовідсотково визначаються якістю його алгоритмічного забезпечення [11].

Однією з найважливіших функцій алгоритмів у комп'ютерних вимірювальних системах є мінімізація інструментальних та методичних похибок за допомогою програмних методів. Будь-який фізичний сенсор має низку внутрішніх недоліків, серед яких найбільш критичними є температурний дрейф нуля, нелінійність статичної функції перетворення та перехресна чутливість до супутніх компонентів середовища. Традиційне вирішення цих проблем суто апаратним шляхом суттєво здорожує та ускладнює конструкцію приладу, а в умовах мікропроцесорних модулів часто є взагалі неможливим.

Застосування алгоритмів багатовимірної інтерполяції та апроксимації дозволяє математично компенсувати нелінійність характеристики перетворення в реальному часі. Використовуючи заздалегідь отримані калібрувальні матриці, мікроконтролер динамічно коригує вихідне значення коду АЦП залежно від поточної температури кристала та інших дестабілізуючих факторів. Алгоритми цифрової корекції забезпечують довгострокову стабільність вимірювального

					ДП.МТІР.10781594.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		31

тракту, дозволяючи програмно нівелювати навіть природне старіння елементної бази або поступову деградацію хімічно активних шарів датчиків.

У реальних промислових умовах корисний сигнал на виході первинних перетворювачів завжди змішується з широким спектром завад електромагнітного, теплового та вібраційного походження. Важливість алгоритмів цифрової фільтрації полягає в їхній здатності виділяти інформативний сигнал на тлі високочастотних шумів і випадкових імпульсних сплесків, які інакше призвели б до хибного спрацьовування систем екологічного чи технологічного захисту.

Залежно від архітектури та обчислювальних потужностей системи, алгоритми реалізують процедури медіанної фільтрації для відсікання аномальних завад, або застосовують цифрові фільтри з кінцевою (КІФ) чи нескінченною (НІФ) імпульсною характеристикою для виділення конкретних частотних діапазонів. При розробці динамічних систем, що функціонують в умовах високої невизначеності та швидкої зміни параметрів потоку, критично важливого значення набувають алгоритми адаптивної фільтрації, зокрема рекурсивний фільтр Калмана. Даний алгоритм дозволяє здійснювати оптимальне оцінювання стану динамічної системи на основі серії зашумлених вимірювань, поєднуючи математичну модель процесу з поточними інструментальними даними для досягнення мінімальної дисперсії похибки.

Сучасні екологічні та промислові вимірювальні комплекси рідко обмежуються фіксацією лише одного параметра, оскільки реальні газові суміші або технологічні потоки є багатокomпонентними та взаємопов'язаними системами. У цьому контексті математичні алгоритми виконують роль координатора, що реалізує концепцію інтеграції даних або сенсорної фузії (Sensor Fusion). Об'єднання даних від масиву різнорідних первинних перетворювачів дозволяє отримати інтегровану оцінку стану об'єкта, яка є недоступною при ізольованому аналізі сигналів.

					ДП.МТІР.10781594.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		32

Таким чином, алгоритмічне забезпечення виступає базовим фундаментом, який зв'язує фізичний світ вимірювань, цифрові методи обробки та вимоги законодавчої метрології в єдиний цілісний інструментальний комплекс.

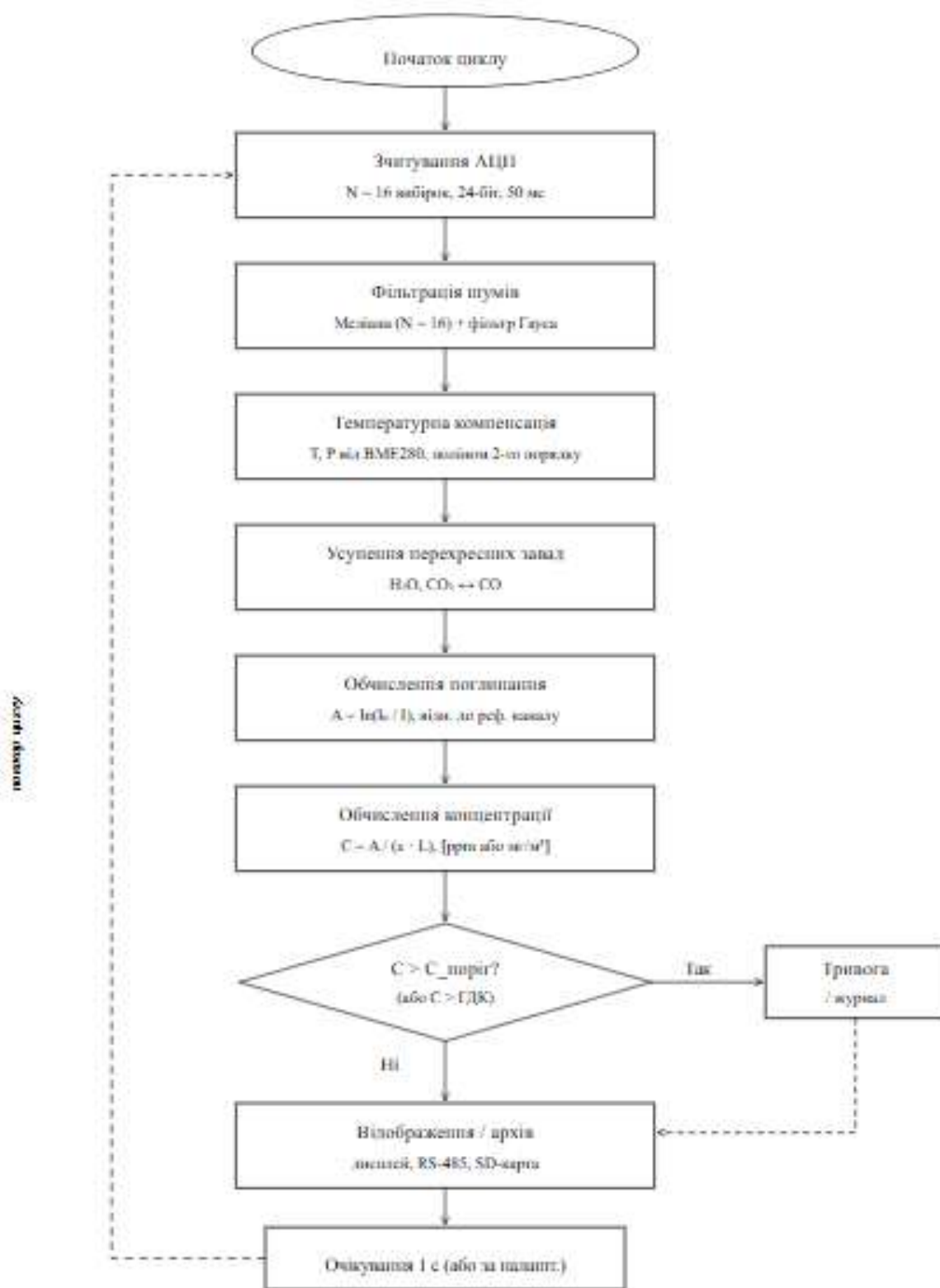


Рисунок 2.5 - Алгоритм обробки сигналів оптичної системи вимірювання концентрації газів у промислових викидах

Представлений алгоритм описує повний цикл цифрової обробки сигналів у системі оптичного газового аналізу, побудованій на принципі диференційної абсорбційної спектроскопії. Система призначена для безперервного моніторингу концентрації шкідливих газів у промислових викидах та порівняння отриманих значень з нормами гранично допустимих концентрацій (ГДК). Алгоритм реалізується мікроконтролером і виконується циклічно — без зупинок протягом усього часу роботи приладу.

Кожен вимірювальний цикл розпочинається із зчитування аналого-цифрового перетворювача. АЦП виконує шістнадцять послідовних вибірок сигналу, що надходить із фотоприймача, з розрядністю 24 біти та інтервалом між вибірками 50 мілісекунд. Використання серії вибірок замість одиничного відліку є принциповим рішенням: воно дозволяє суттєво підвищити відношення сигнал/шум ще на етапі первинного отримання даних, до будь-якої математичної обробки. Висока розрядність АЦП забезпечує необхідну чутливість для реєстрації малих змін інтенсивності світлового потоку, що відповідають низьким концентраціям газу.

Отриманий масив із шістнадцяти відліків надходить на блок цифрової фільтрації шумів, який працює у два послідовні етапи. Спочатку застосовується медіанний фільтр, що сортує вибірки за величиною та обирає середнє значення, відкидаючи крайні елементи. Цей підхід ефективно усуває імпульсні завади — короточасні різкі стрибки сигналу, спричинені електромагнітними наводками, вібрацією або механічними ударами. Після медіанної фільтрації сигнал проходить через фільтр Гаусса, який здійснює зважене усереднення сусідніх відліків із гаусівськими коефіцієнтами. Такий фільтр ефективно придушує рівномірно розподілений (білий) шум, що залишається після медіанної обробки, та забезпечує плавну без артефактів форму відфільтрованого сигналу.

Наступним етапом є температурна та барометрична компенсація — надзвичайно важливий крок для забезпечення метрологічної точності приладу в реальних умовах експлуатації. Температура і тиск навколишнього середовища зчитуються з інтегрованого цифрового датчика BME280, що відрізняється

					ДП.МТІР.10781594.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		34

високою точністю та малим споживанням енергії [9]. На підставі цих даних мікроконтролер розраховує поправковий коефіцієнт за поліномом другого порядку, який коригує показання з урахуванням температурного дрейфу оптичних елементів, зміни густини газу та відхилення умов вимірювання від стандартних. Без цієї компенсації похибка вимірювання в діапазоні робочих температур могла б сягати десятків відсотків.

Після температурної корекції алгоритм переходить до усунення перехресних завад від супутніх газів. У реальних промислових викидах разом із цільовим компонентом завжди присутні водяна пара (H_2O) і вуглекислий газ (CO_2), смуги поглинання яких частково перекриваються зі смугами поглинання вимірюваного газу — наприклад, чадного газу (CO). Ця спектральна інтерференція призводить до систематичної похибки, якщо не застосовувати спеціальної компенсації. На даному етапі мікроконтролер розраховує і віднімає внески кожного із газів-заважаючих від загального поглинання, використовуючи попередньо визначені коефіцієнти перехресної чутливості.

Очищений від артефактів сигнал використовується для розрахунку оптичного поглинання за законом Бугера–Ламберта–Бера. Поглинання A обчислюється як натуральний логарифм відношення інтенсивності опорного каналу I_0 до інтенсивності сигнального каналу I після проходження через газову суміш. Використання двоканальної схеми з опорним каналом є принципово важливим: воно компенсує флуктуації потужності джерела випромінювання, забруднення оптичних елементів та старіння лазера або світлодіода, завдяки чому довгострокова стабільність приладу суттєво підвищується.

Отримане значення поглинання A перераховується в концентрацію газу C за формулою $C = A / (\varepsilon \cdot L)$, де ε — молярний (питомий) коефіцієнт поглинання даного газу на робочій довжині хвилі, а L — ефективна довжина оптичного шляху в кюветі. Результат може виражатися в одиницях ppm (частин на мільйон за об'ємом) або mg/m^3 залежно від вимог до метрології та нормативних документів, що регулюють контроль викидів на конкретному підприємстві.

					ДП.МТІР.10781594.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						35
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Обчислена концентрація порівнюється з пороговим значенням $C_{\text{поріг}}$, яке відповідає встановленій нормі ГДК для даного газу. Якщо виміряна концентрація перевищує поріг, система негайно активує сигнал тривоги та формує запис у журналі подій із зазначенням часу, виміряного значення та ідентифікатора каналу. Цей механізм забезпечує своєчасне реагування персоналу або автоматичних систем захисту на аварійні ситуації. Якщо концентрація знаходиться в межах норми, тривога не активується і цикл продовжується в штатному режимі.

Незалежно від результату перевірки, кожне вимірне значення передається на вихідні інтерфейси системи. Дані відображаються на вбудованому дисплеї приладу, передаються по шині RS-485 до системи диспетчерського керування або SCADA, а також записуються на SD-карту для формування архіву вимірювань. Архівування є обов'язковою вимогою для промислових систем екологічного моніторингу, оскільки дозволяє ретроспективно аналізувати динаміку викидів і підтверджувати відповідність підприємства екологічним нормам.

Після завершення всіх перелічених операцій мікроконтролер переходить у режим очікування тривалістю приблизно одна секунда або на час, заданий налаштуваннями приладу, після чого автоматично запускає наступний вимірювальний цикл. Таким чином формується безперервний замкнений процес моніторингу, що забезпечує актуальність даних про стан газового середовища в реальному часі та гарантує надійний контроль промислових викидів протягом усього часу роботи обладнання.

					ДП.МТІР.10781594.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						36
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

3. ПРОГРАМНЕ ТА МЕТРОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМИ

3.1. Програмне забезпечення системи

Програмне забезпечення (ПЗ) вбудованої системи написано на мові C (стандарт C11) з використанням середовища розробки Arduino IDE. Структуру ПЗ ілюструє рисунок 3.1.

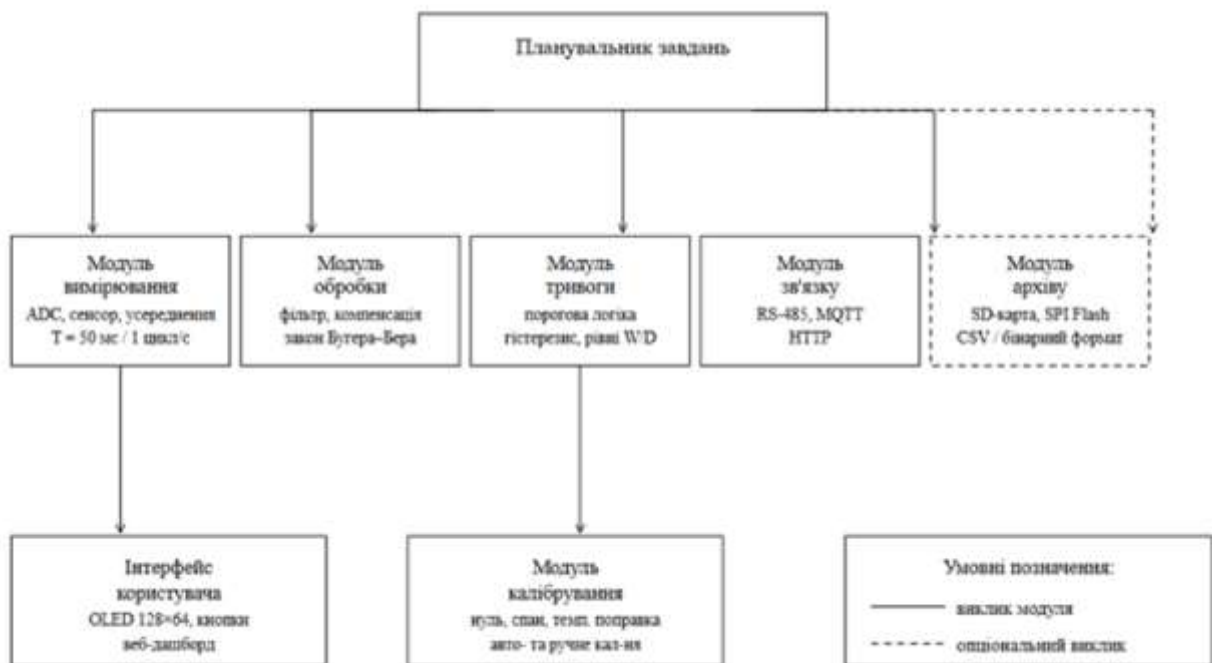


Рисунок 3.1 – Структура програмного забезпечення системи

Головним завданням планувальника є запуск вимірювального циклу через програмний таймер (xTimerCreate). Цикл складається з чотирьох підзадач, виконуваних послідовно: зчитування відліків АЦП з паузою між відліками; зчитування сигналів сенсорів; обробка сигналу та публікація результату в черги для підзадач відображення, архівування і передачі даних.

Вбудований OLED-дисплей відображає три екрани, між якими перемикаються кнопкою: «Поточні значення» (C усіх каналів + T + RH), «Статус тривоги» (перевищення порогів, якщо є) та «Системна інформація» (версія ПЗ, час роботи, стан зв'язку). Веб-інтерфейс доступний за адресою [http://\[IP-адреса\]](http://[IP-адреса])

приладу] і реалізований як Single Page Application на ESP32-C3 субмодулі, який отримує дані від основного STM32 через UART. Сторінка відображає числові показники та графік за останні 24 години, побудований бібліотекою Chart.js.

Кожна секунда вимірювань записується у файл CSV на SD-карту (SPI-інтерфейс, SDSC/SDHC до 32 ГБ). Файли розбиваються по добах: ім'я формату YYYYMMDD.csv. Запис у форматі RFC 4180 з роздільником «крапка з комою» забезпечує сумісність із Microsoft Excel та LibreOffice Calc без конвертації. При заповненні SD-карти понад 90 % система автоматично видаляє найстаріші файли за принципом FIFO (First In First Out), зберігаючи щонайменше 6 місяців даних за умови наявності карти ємністю 16 ГБ.

Основою для програмування системи та мікроконтролера ESP32 є Arduino IDE - безкоштовне кросплатформне середовище розробки з відкритим кодом, що підтримує мікроконтролери Arduino_x компанії Espressif Systems [13-15]. Для підготовки середовища необхідно встановити підтримку плат ESP32 через менеджер плат (Board Manager). У меню File -> Preferences вказується URL-адреса репозиторію Espressif: https://raw.githubusercontent.com/espressif/arduino-esp32/gh-pages/package_esp32_index.json. Після цього у вікні Tools -> Board -> Boards Manager виконується пошук пакету esp32 та його інсталяція (версія 2.0 і вище). Рисунок 3.2 ілюструє вигляд менеджера плат із встановленим пакетом ESP32.

					ДП.МТІР.10781594.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		38

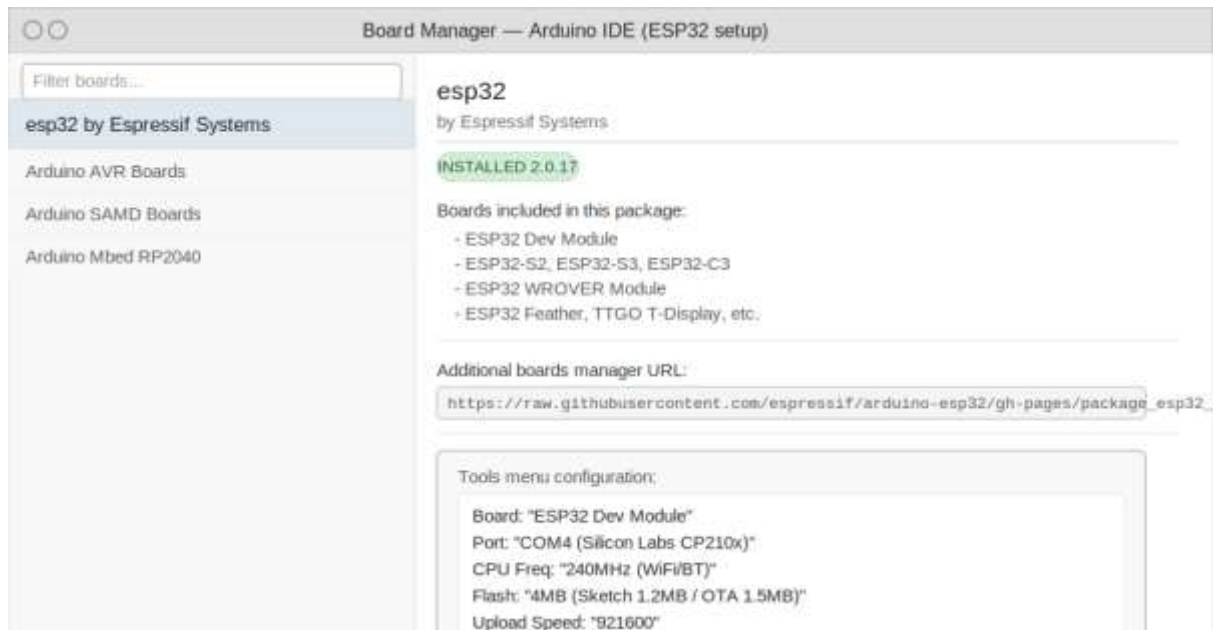


Рисунок 3.2 — Менеджер плат Arduino IDE з встановленим пакетом ESP32 by Espressif Systems

Після встановлення пакету у меню Tools -> Board обирається плата ESP32 Dev Module, у Tools -> Port вказується відповідний COM-порт, а швидкість завантаження встановлюється 921600 бод для прискорення прошивки. Бібліотеки, необхідні для роботи з датчиками та периферією, встановлюються через Library Manager (Sketch -> Include Library -> Manage Libraries). На рисунку 3.3 зображено вікно Library Manager із встановленими залежностями проекту.

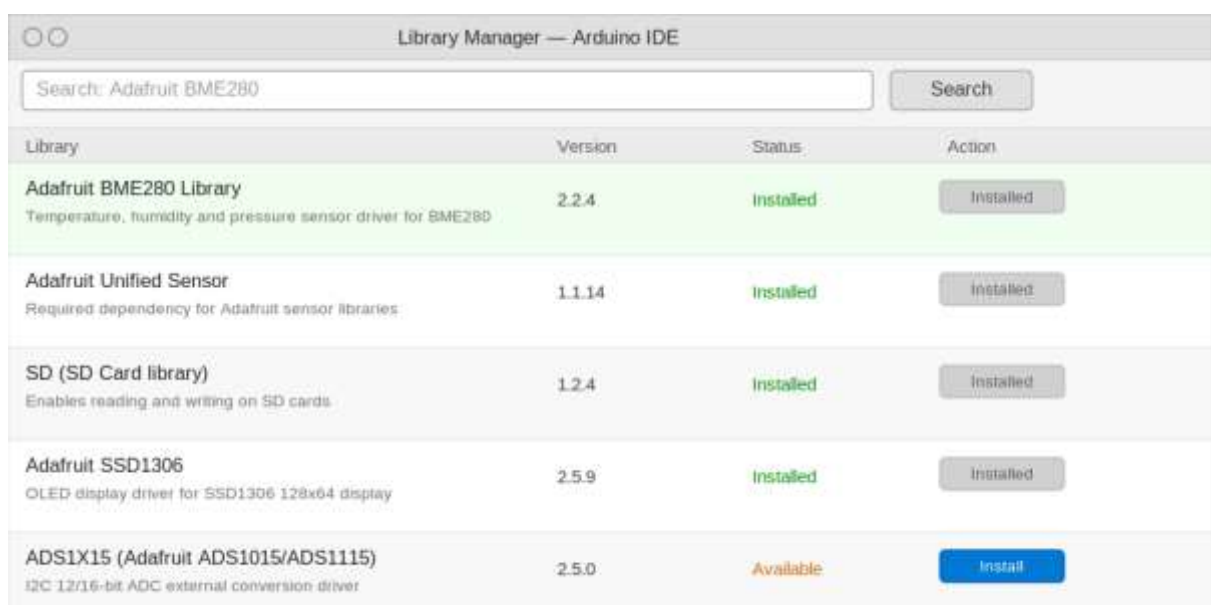


Рисунок 3.3 — Менеджер бібліотек Arduino IDE з встановленими залежностями проекту

Програмний скетч у середовищі Arduino IDE складається з двох обов'язкових функцій: `setup()` та `loop()`. Функція `setup()` виконується один раз при увімкненні мікроконтролера і призначена для ініціалізації периферії. Функція `loop()` є нескінченним циклом, у якому послідовно виконуються всі кроки вимірювального алгоритму [2]. На рисунку 3.3 показано головне вікно Arduino IDE з початковими рядками коду скетчу.

```

esp32_gas_monitor.ino
1  #include <Wire.h>
2  #include <Adafruit_BME280.h>
3  #include <SD.h>
4
5  #define ADC_PIN 34
6  #define ALARM_PIN 25
7  #define C_THRESH 50.0
8  #define N_SAMPLES 16
9
10 // BME280 object
11 Adafruit_BME280 bme;
12 float rawSamples[N_SAMPLES];
13
14 void setup () {
15   Serial.begin(115200);
16   Wire.begin(21, 22);
17   bme.begin(0x76);
18   SD.begin(5);
19   Serial.println("System OK");
20 }

```

Рисунок 3.3 — Головне вікно Arduino IDE: код скетчу `esp32_gas_monitor.ino`, панель інструментів та консоль компілятора

Ієрархічна структура скетчу наведена нижче. На верхньому рівні розміщуються директиви `#include` та константи `#define`, далі об'єкти бібліотек та глобальні змінні, а потім функції `setup()` і `loop()` із підфункціями обробки сигналу – рисунок 3.4.


```

esp32_gas_monitor.ino
|
+-- #include <Wire.h>
+-- #include <Adafruit_BME280.h>
+-- #include <SD.h>
|
+-- setup()
|   +-- Serial.begin(115200)
|   +-- Wire.begin(21, 22)
|   +-- bme.begin(0x76)
|   +-- SD.begin(5)
|
+-- loop()
    +-- readADC(N=16)          -> rawSamples[]
    +-- medianFilter()         -> medVal
    +-- gaussFilter()          -> smoothVal
    +-- tempCompensate()        -> corrVal
    +-- crossCompensate()       -> cleanVal
    +-- calcAbsorption()        -> A
    +-- calcConcentration()     -> C
    +-- checkThreshold()        -> alarm
    +-- displayAndLog()
    +-- delay(1000)

```

Рисунок 3.4 - Ієрархічна структура скетчу

Циклічне опитування сенсорів реалізується у функції `loop()`. На кожній ітерації АЦП ESP32 виконує $N = 16$ послідовних вибірок із фотоприймача оптичного каналу. Для підвищення точності застосовується зовнішній 16-бітний АЦП ADS1115 за інтерфейсом I2C [4]. Перший етап фільтрації — медіанний фільтр — сортує масив та обирає середній елемент, усуваючи імпульсні завади. Другий етап — фільтр Гаусса — реалізується як зважена згортка з коефіцієнтами нормального розподілу.

Температурна та барометрична компенсація здійснюється за показниками датчика BME280 [5] за поліномом другого порядку:

$$K(T, P) = a_0 + a_1 \cdot T + a_2 \cdot T^2 + b_1 \cdot P + b_2 \cdot P^2$$

де a_0, a_1, a_2, b_1, b_2 — калібрувальні коефіцієнти;

T — температура (°C);

P — тиск (гПа).

					ДП.МТІР.10781594.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		41

Оптичне поглинання розраховується за законом Бугера-Ламберта-Бера:

$$A = \ln(I_0 / I)$$

де I_0 — інтенсивність опорного каналу,

I — вимірювального.

Концентрація газу:

$$C = A / (\epsilon \cdot L) \quad [\text{ppm або mg/m}^3]$$

де ϵ — молярний коефіцієнт поглинання,

L — довжина оптичного шляху кювети.

У таблиці 3.1 наведено основні оператори та функції скетчу із зазначенням призначення.

Таблиця 3.1 — Основні оператори та функції скетчу

Оператор / функція	Призначення
#include <lib.h>	Підключення зовнішньої бібліотеки
#define CONST val	Визначення іменованої константи
void setup()	Блок ініціалізації, виконується один раз
void loop()	Основний нескінченний цикл вимірювання
analogRead(pin)	Зчитування аналогового сигналу (12-бітний АЦП)
Wire.begin(SDA, SCL)	Ініціалізація шини I2C
bme.readTemperature()	Читання температури з BME280
Serial.print()	Виведення у Serial Monitor для відлагодження
Serial2.print()	Передача даних на RS-485
SD.open(file, WRITE)	Відкриття файлу на SD-карті
delay(ms)	Затримка циклу (мс)
sort(arr, arr+N)	Сортування масиву для медіанного фільтра
if (C > C_THRESH)	Перевірка порогу / ГДК
digitalWrite(ALARM_PIN, HIGH)	Активація сигналу тривоги

Відлагодження базується на використанні функції Serial.print() у критичних точках алгоритму та Serial Monitor (Tools -> Serial Monitor, Ctrl+Shift+M). Швидкість обміну 115200 бод задається викликом

Serial.begin(115200) у функції setup(). Після кожного етапу обробки сигналу у консоль виводяться: масив вибірок АЦП, результати фільтрації, значення Т та Р з ВМЕ280, обчислені А та С, статус тривоги. Рисунок 3.5 демонструє типовий вивід Serial Monitor під час роботи системи, включаючи момент перевищення порогу концентрації та активацію тривоги.

Блок обробки тривог реалізовано у функції checkThreshold(). При перевищенні концентрацією С порогового значення C_THRESH активується цифровий вихід (digitalWrite(ALARM_PIN, HIGH)), формується рядок повідомлення та записується у файл alarm_log.csv на SD-карті. Архівування вимірювань виконується у форматі CSV: часова мітка, Т, Р, А, С, ознака тривоги.

Нижче наведено ключовий фрагмент коду:

```
void checkThreshold(float C) {
  if (C > C_THRESH) {
    digitalWrite(ALARM_PIN, HIGH);
    String msg = "ALARM: C=" + String(C, 2) + " ppm";
    Serial2.println(msg);
    logToSD("alarm", msg);
  } else {
    digitalWrite(ALARM_PIN, LOW);
  }
}
```

Рисунок 3.6 — Фрагмент коду функції checkThreshold()

					ДП.МТІР.10781594.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		43

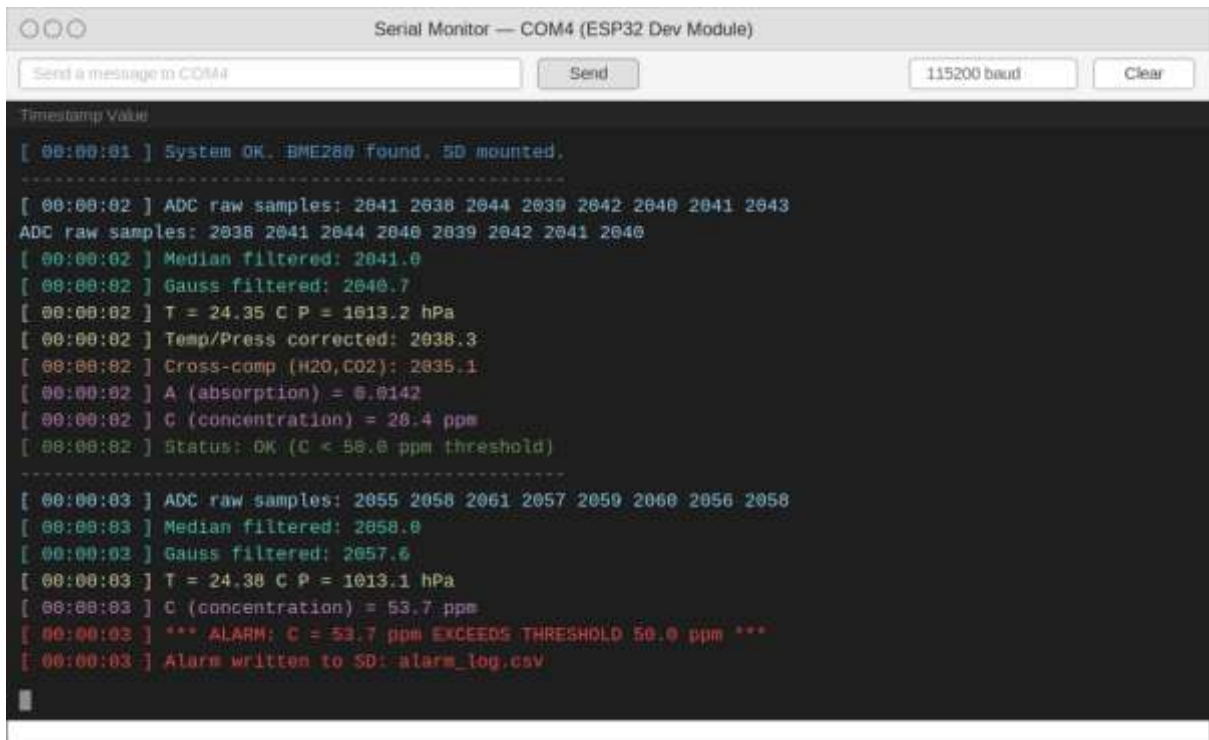


Рисунок 3.5 — Serial Monitor Arduino IDE: вивід результатів обробки сигналу та активація тривоги при $C > 50$ ppm

Таким чином, в даному розділі розроблено програмне забезпечення системи вимірювання оптичної концентрації промислових викидів на базі мікроконтролера ESP32 з використанням середовища Arduino IDE. Відлагодження виконано засобами Serial Monitor.

3.2. Особливості визначення невизначеності результатів вимірювань.

Сучасні оптичні системи контролю промислових викидів широко застосовуються для вимірювання концентрації шкідливих газів, аерозольних частинок та продуктів згоряння у димових каналах промислових підприємств. Перевагами таких систем є безконтактний принцип вимірювання, висока швидкодія, можливість дистанційного моніторингу та автоматизації процесу контролю екологічних параметрів. У більшості випадків робота оптичних газоаналізаторів базується на явищах поглинання, розсіювання або

					ДП.МТІР.10781594.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		44

випромінювання світлового потоку під час проходження через газове середовище. При цьому результат вимірювання залежить не лише від концентрації газу, але й від великої кількості зовнішніх та внутрішніх факторів. Саме тому оцінювання невизначеності результатів вимірювань є одним із найважливіших етапів розробки та експлуатації таких систем [8].

Основою багатьох оптичних методів є закон Бугера–Ламберта–Бера, який описує зменшення інтенсивності світлового потоку при проходженні через середовище, що поглинає випромінювання.

Під час функціонування оптичних систем контролю промислових викидів виникають різні види похибок, які можуть суттєво впливати на достовірність результатів вимірювань. У метрології прийнято поділяти похибки на систематичні, випадкові, грубі, методичні та інструментальні.

Систематичні похибки характеризуються постійним або закономірно змінним відхиленням результатів вимірювання від істинного значення. В оптичних системах контролю викидів вони можуть виникати внаслідок нестабільності джерела випромінювання, температурного дрейфу фотоприймачів, забруднення оптичних елементів або неправильного калібрування системи.

Наприклад, поступове осідання пилу на оптичних вікнах призводить до зменшення інтенсивності випромінювання, що помилково може інтерпретуватися як збільшення концентрації газу. Аналогічно температурні зміни можуть викликати дрейф характеристик фотодетекторів та електронних підсилювачів. Систематична похибка визначається як різниця між середнім результатом вимірювання та еталонним значенням. Для зменшення систематичних похибок використовують автоматичне калібрування, температурну компенсацію, стабілізацію джерела випромінювання та періодичне очищення оптичного тракту.

Випадкові похибки виникають через випадкові фактори, які неможливо точно передбачити або усунути. До таких факторів належать електронні шуми, флуктуації температури, турбулентність газового потоку, нестабільність

					ДП.МТІР.10781594.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						45
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

живлення та електромагнітні завади. У реальних умовах експлуатації концентрація газу в димовому каналі може нерівномірно змінюватися у просторі та часі. Це призводить до нестабільності вимірюного сигналу навіть за незмінних параметрів системи. Для оцінювання випадкових похибок використовують статистичну обробку серії вимірювань. Основним параметром є середньоквадратичне відхилення. Чим менше значення середньоквадратичного відхилення, тим стабільнішою є робота вимірювальної системи.

Грубі похибки або промахи виникають внаслідок аварійних або нетипових ситуацій. Причинами можуть бути короткочасне перекриття оптичного каналу, збої мікроконтролера, втрата сигналу, електричні перешкоди або помилки передачі даних. Такі похибки суттєво відрізняються від інших результатів вимірювання та можуть призвести до неправильного аналізу екологічного стану об'єкта. Для виявлення промахів застосовують статистичні критерії, одним із яких є критерій Граббса - Якщо розраховане значення перевищує критичне, результат вважається аномальним та виключається із подальшого аналізу.

Методичні похибки пов'язані з недосконалістю математичних моделей або спрощенням алгоритмів обробки сигналів. В оптичних системах контролю викидів вони можуть виникати через неврахування впливу вологості, температури, багатокомпонентного складу газової суміші або нелінійності процесів поглинання випромінювання. Особливо значними методичні похибки стають у багатокомпонентних газових середовищах, де спектри поглинання різних газів можуть частково перекриватися. У такому випадку система може помилково визначати концентрацію одного компонента через вплив іншого газу. Для зменшення методичних похибок використовують багатоспектральний аналіз, цифрову фільтрацію та математичні алгоритми компенсації.

Інструментальні похибки визначаються технічними характеристиками апаратної частини системи. До них належать похибки фотодетекторів, аналого-цифрових перетворювачів, підсилювачів, джерел живлення та мікроконтролерів. Наприклад, нелінійність АЦП призводить до нерівномірного перетворення аналогового сигналу в цифровий код, а нестабільність лазерного джерела змінює

					ДП.МТІР.10781594.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		46

інтенсивність випромінювання. У технічній документації виробники зазвичай задають інструментальну похибку у вигляді двочленної формули.

У реальних умовах всі складові похибок діють одночасно, тому для оцінювання точності системи необхідно визначати сумарну похибку вимірювання. Комбінована стандартна невизначеність визначається методом кореня квадратного із суми квадратів окремих складових. Такий підхід дозволяє врахувати внесок кожного фактора в загальну невизначеність результату вимірювання.

Гранична похибка визначає максимально можливе відхилення результату вимірювання від істинного значення з певною довірчою ймовірністю.

Для комплексного оцінювання точності оптичної системи формується бюджет невизначеності, який містить усі джерела невизначеності та їх внесок у кінцевий результат.

Типовий бюджет невизначеності включає:

- невизначеність калібрувального газу;
- шум фотоприймача;
- температурний дрейф;
- нестабільність джерела випромінювання;
- похибку АЦП;
- нестабільність оптичного каналу;
- похибки цифрової обробки.

Результатом аналізу є комбінована та розширена невизначеність вимірювання.

Таким чином, визначення невизначеності результатів вимірювань в оптичних системах контролю промислових викидів є складним багатофакторним процесом. На точність вимірювання впливають оптичні, електронні, алгоритмічні та експлуатаційні фактори.

Особливу увагу під час розробки таких систем необхідно приділяти стабільності оптичного тракту, якості калібрування, компенсації температурних впливів, аналізу шумів та контролю деградації оптичних елементів.

					ДП.МТІР.10781594.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						47
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Комплексний аналіз похибок і формування бюджету невизначеності дозволяють забезпечити високу достовірність результатів вимірювання та відповідність систем вимогам сучасної промислової метрології і екологічного моніторингу.

3.3 Метрологічне забезпечення системи та рекомендації щодо підвищення точності

Навіть найточніший прилад без правильного калібрування дає хибні результати. Калібрування — це процедура встановлення функціональної залежності між сигналом детектора та відомою концентрацією газу, а також перевірка метрологічних характеристик [8].

Використання еталонних газових сумішей дозволяє значно підвищити точність вимірювань. Еталонна газова суміш (ЕГС) — це суміш з точно відомою концентрацією цільового газу, атестована відповідно до вимог ДСТУ ГОСТ 8.315 або стандарту ISO 6141. В Україні ЕГС виготовляють метрологічні лабораторії та спеціалізовані підприємства, наприклад, ДП «НДІМВС» - Державне підприємство «Науково-дослідний інститут медико-біологічних проблем». Для промислових аналізаторів клас точності ЕГС — не гірше $\pm 1\%$ відносно від атестованого значення. Еталонні газові суміші виготовляються методом гравіметричного або манометричного змішування компонентів у балонах під тиском. Гравіметричний метод є первинним: компоненти зважуються на аналітичних терезах і змішуються у балоні, маса кожного компонента визначається як різниця мас порожнього і заповненого балона.

Для калібрування системи необхідно мати щонайменше два балони ЕГС:

- «Нуль» (zero gas) — суміш N_2 або синтетичне повітря без цільового газу, для встановлення нульової точки ($A = 0$).
- «Спен» (span gas) — суміш з концентрацією, що відповідає $\sim 80\text{--}90\%$ верхньої межі діапазону вимірювань, для визначення нахилу калібрувальної прямої.

					ДП.МТІР.10781594.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		48

Якщо передбачається, що залежність $A(c)$ може відхилятися від лінійної (наприклад, через широкосмугове джерело або ефекти насичення), проводять багатоточкове калібрування: вимірюють сигнал детектора для 5–10 різних значень концентрації ЕГС.

На рисунку 3.7 показана приклад калібрувальної кривої для CO_2 в діапазоні 0–800 ppm, отриманої за 7 точками.

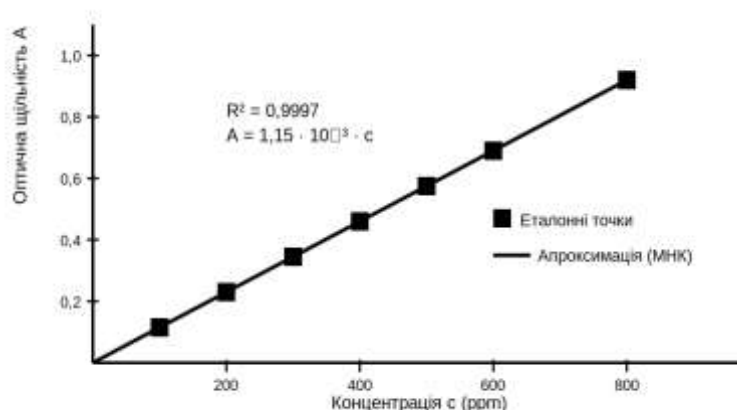


Рисунок 2.5 – Калібрувальна крива CO_2 (7 точок, апроксимація МНК)

Для ліній регресії першого порядку (лінійна модель) коефіцієнти a_0 , a_1 знаходяться за методом найменших квадратів:

$$a_1 = (N \cdot \sum c_i A_i - \sum c_i \cdot \sum A_i) / (N \cdot \sum c_i^2 - (\sum c_i)^2); \quad a_0 = (\sum A_i - a_1 \cdot \sum c_i) / N$$

Коефіцієнт детермінації R^2 характеризує якість апроксимації:

$$R^2 = 1 - SS_{\text{res}} / SS_{\text{tot}} = 1 - \sum (A_i - \hat{A}_i)^2 / \sum (A_i - \bar{A})^2$$

Для промислових CEMS вимагається $R^2 \geq 0,999$.

Дуже перспективним є застосування методів динамічного (автоматичного) калібрування. Промислові системи CEMS, що працюють безперервно, не можна зупиняти щотижня для ручного калібрування. Тому застосовується автоматичне

динамічне калібрування (Automatic Quality Assurance, AQA) згідно з ДСТУ EN 14181. Алгоритм AQA передбачає наступне. З певною заданою (наприклад, щоденною) частотою система автоматично перемикає вхід кювети від вимірюваного газу на нульовий газ (zero check) і перевіряє, чи не змістився нуль більш ніж на $\pm 2\%$ від діапазону. Якщо так — коригується константа a_0 . Потім подається спен-газ — перевіряється нахил. Якщо нахил відхилився більш ніж на $\pm 5\%$ — коригується a_1 . У разі виходу поза межі допуску система фіксує несправність і сповіщає оператора. Цей підхід суттєво зменшує потребу в ручному обслуговуванні та дозволяє виявляти забруднення оптики, деградацію джерела або дрейф підсилювача. Для зберігання калібрувальних коефіцієнтів та часових міток у мікроконтролерній системі виділяється окрема область флеш-пам'яті.

Таким чином, у даному розділі розглянуто питання метрологічного забезпечення системи оптичного вимірювання концентрації промислових викидів, зокрема, калібрування.

					ДП.МТІР.10781594.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		50

ВИСНОВКИ

В результаті виконання кваліфікаційної роботи розглянуто питання забруднення газового середовища промисловими викидами. Аналіз методів вимірювання концентрації газів показав, що NDIR-метод (оптичні вимірювання) забезпечує найвищу селективність та відтворюваність для вимірювання CO₂, CO, SO₂, NO₂ у промислових викидах, що обумовило його вибір як основи системи.

Розроблено структурну схему системи: NDIR-оптичний модуль — первинний перетворювач; ESP32 — центральний обчислювальний вузол із вбудованими інтерфейсами I²C, SPI, UART, Wi-Fi; 16-бітний АЦП; блок температурної компенсації; модуль передачі даних MQTT. Розроблено схему апаратного забезпечення з підключенням NDIR-датчика через I²C до контролера, розглянуто схеми термостабілізації оптичної. Розроблено програмне забезпечення (C++, Arduino IDE): ініціалізація та самодіагностика; зчитування даних з частотою 10 Гц; корекція за температурою і тиском згідно з законом Ламберта–Бугера–Бера; фільтрація ковзним середнім; передача результатів за MQTT.

Виконано оцінювання бюджету невизначеності відповідно до GUM (Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement) - Настанова з вираження невизначеності у вимірюваннях.

					ДП.МТІР.10781594.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		51

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Руда М.М., Яцина Л.В. Автоматизовані системи контролю параметрів рідин та повітря на основі сенсорних технологій - Проблемно-наукова міжгалузева конференція «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології (АКІТ - 2026)», Тернопіль, 2026 – с. 68-70.
2. Хилько М. І. Екологічна безпека України : навчальний посібник. Київ : Знання, 2017. 324 с.
3. ДСТУ 9023:2020. Метрологія. рН-метри та іоніметри промислові. Методика повірки.
4. Боголюбов В. М., Клименко М. О., Мокін В. Б. та ін. Моніторинг довкілля: підручник / за ред. В. М. Боголюбова. — 2-е вид., перероб. і доп. — Вінниця : ВНТУ, 2010. — 232 с.
5. Клименко М. О., Прищепя А. М., Вознюк Н. М. Моніторинг довкілля: підручник. — 2-ге вид., допов. та перероб. — Рівне : НУВГП, 2023. — 350с.
6. Основи метрології та електричних вимірювань : підручник / В. В. Кухарчук, В. Ю. Кучерук, Є. Т. Володарський, В. В. Грабко. – Херсон: Олді-плюс, 2013. – 538 с.
7. Основи метрології та вимірювальної техніки / Лис, О.М., Якименко, М.В., Шинкаренко [та ін.]. - Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2021. – 424 с.
8. Васілевський О.М., Кучерук В.Ю., Володарський Є.Т. Основи теорії невизначеності вимірювань : підручник. — Вінниця : ВНТУ, 2015. — 230с.
9. Обробка результатів фізичних вимірювань: навч. посібник / І.Ф.Скіцько, О.І.Скіцько. - КПІ ім .Ігоря Сікорського. - Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. - 88 с. [Електронний ресурс]: - Режим доступу: https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/25320/1/Obrobka_rezult._fizych._vymi_ruvan.pdf.
- 10.Бабак В. П., Бабак С. В., Єременко В. С. та ін. Теоретичні основи інформаційно-вимірювальних систем : підручник / за ред. В. П. Бабака. —

					ДП.МТІР.10781594.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		52

2-е вид., перероб. і доп. — Київ : Університет новітніх технологій; НАУ, 2017. — 496 с.

11.Лахно В. А., Гусєв Б. С., Смолій В. В., Місюра М. Д., Касаткін Д. Ю. Технології проектування комп'ютерних систем : навч. посіб. Ч. 1. — Київ : НУБіП України, 2019. — 205 с.

12.Поліщук Є. С., Дорожовець М. М., Стадник Б. І. та ін. Засоби та методи вимірювань неелектричних величин : підручник / за ред. Є. С. Поліщука. — Львів : Видавництво «Бескид Біт», 2008. — 618 с.

13.Arduino LLC. Arduino IDE 2 Documentation. — 2024. URL: <https://docs.arduino.cc/software/ide-v2> (дата звернення: 18.04.2025).

14.Espressif Systems. Arduino-ESP32 Getting Started Guide. — 2024. URL: https://docs.espressif.com/projects/arduino-esp32/en/latest/getting_started.html (дата звернення: 18.04.2025).

15.Програмування Arduino / [Електронний ресурс]. / Режим доступу - <https://forum.arduino.ua/viewforum.php?id=1>.

					ДП.МТІР.10781594.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		53