

Вінницький національний технічний університет
(повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет інформаційних електронних систем
(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))

Кафедра інформаційних радіоелектронних технологій і систем
(повна назва кафедри (предметної, циклової комісії))

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему:

«Оптичний генераторний вимірювач концентрації газів»

Виконав: студент 2-го курсу, групи РТ-21м
спеціальності 172 – Телекомунікації
та радіотехніка

(шифр і назва напряму підготовки, спеціальності)

Кропив'янський Є.О.

(прізвище та ініціали)

Керівник: д.т.н., професор каф. ІРТС

Семенов А.О.

(прізвище та ініціали)

«20» 12 2022 р.

Опонент: к.т.н., професор каф. ІКСТ

Бортник Г.Г.

(прізвище та ініціали)

«20» 12 2022 р.

Допущено до захисту

Завідувач кафедри ІРТС

д.т.н., проф. Осадчук О.В.

(прізвище та ініціали)

«21» 12 2022 р.

Вінниця ВНТУ - 2022 рік

Вінницький національний технічний університет
 Факультет інформаційних електронних систем
 Кафедра інформаційних радіоелектронних технологій і систем
 Рівень вищої освіти II-й (магістерський)
 Галузь знань – 17 Електроніка та телекомунікації
 Спеціальність – 172 Телекомунікації та радіотехніка
 Освітньо-професійна програма – Радіотехніка


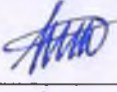
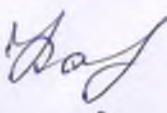
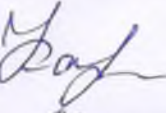
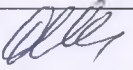
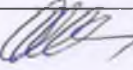
ЗАТВЕРДЖУЮ
 Завідувач кафедри ІРТС
 д.т.н., проф. Осадчук О.В.
 «16» вересня 2022 р.

**ЗАВДАННЯ
 НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

Кропив'янському Євгенію Олександровичу
 (прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Оптичний генераторний вимірювач концентрації газів
 керівник роботи д.т.н., проф., професор кафедри ІРТС Семенов А.О.
 затверджені наказом вищого навчального закладу від «14» 09.2022 р. №203
2. Строк подання студентом роботи 19.12.2022р.
3. Вихідні дані до роботи: Пристрій належить до побутової радіоелектронної апаратури і експлуатується на відкритому повітрі в районах з помірним кліматом (температура -35...+35 °С, відносна вологість 45...75%) з такими технічними параметрами: напруга живлення – +5 В, точність вимірювання показника заломлення оптичного променя – 10^{-7} .
4. Зміст текстової частини: літературний огляд сучасних газоаналізаторів, огляд існуючих методів визначення показника заломлення, типів вимірювачів концентрації газів та технічне обґрунтування розробки, розроблення математичної моделі та результати моделювання параметрів оптичного генераторного вимірювача концентрації газів, розробка оптичного генераторного вимірювача концентрації газів, економічна частина; охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях; висновки; список використаних джерел; додатки.
5. Перелік ілюстративного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): Інфрачервоні газоаналізатори з неселективними приймачами випромінювання. Загальна структурна схема оптичного газоаналізатора. Структурна схема плати контролера. Математична модель оптичного генераторного вимірювача концентрації газів. Структурна схема оптичного генераторного вимірювача концентрації газів. Схема електрична принципова пристрою. Друкована плата пристрою. Складальне креслення пристрою.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	виконання прийняв
Основна частина	д.т.н., професор Семенов А.О.		
Економічна частина	доцент каф. ЕПВМ к.е.н., Кавецький В.В.		
Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	професор кафедри БЖДПБ, доцент, д.п.н., Дембіцька С.В.		

7. Дата видачі завдання 17.09.2022 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Вибір, узгодження та затвердження тем МКР на випусковій кафедрі.	02.09.2022-07.09.2022	
2.	Огляд та аналіз літературних джерел.	08.09.2022-13.09.2022	
3.	Затвердження тем по ВНТУ. Розробка завдання на МКР.	14.09.2022-27.09.2022	
4.	Попередня розробка основних розділів. Аналіз вирішення поставленої задачі. Розробка структурної схеми та технічних рішень.	28.09.2022-10.10.2022	
5.	Математичне моделювання та електричні розрахунки. Експериментальне дослідження.	11.10.2022-04.11.2022	
6.	Розробка графічної частини МКР.	05.11.2022-13.11.2022	
7.	Економічна частина.	14.11.2022-20.11.2022	
8.	Охорона праці (ОП).	21.11.2022-25.11.2022	
9.	Оформлення пояснювальної записки та графічної частини.	26.11.2022-01.12.2022	
10.	Нормоконтроль.	02.12.2022-09.12.2022	
11.	Попередній захист МКР, доопрацювання, рецензування МКР.	10.12.2022-20.12.2022	
12.	Захист МКР ЕК.	21.12.2022-23.12.2022	

Студент

Кропив'янський Є.О.

Керівник роботи

Семенов А.О.

(підпис)

(підпис)

АНОТАЦІЯ

УДК 621.396

Кропив'янський Є.О. Оптичний генераторний вимірювач концентрації газів. Магістерська кваліфікаційна робота зі спеціальності 172 – телекомунікації та радіотехніка, освітня програма - радіотехніка. Вінниця: ВНТУ, 2022. 157 с.

На укр. мові. Бібліогр.: 58 назв; рис.: 24; табл. 21.

Магістерська кваліфікаційна робота присвячена розробці оптичного генераторного вимірювача концентрації газів. Проведено аналіз сучасного стану газових сенсорів, розроблена узагальнена класифікація сенсорів газу. Проведено теоретичне та практичне обґрунтування для створення оптичного генераторного вимірювача концентрації газів. Розроблена математична модель оптичного генераторного вимірювача концентрації газів. Отримано результати математичного моделювання. Здійснено розроблення структурної та принципової схеми оптичного генераторного вимірювача концентрації газів. Розроблена конструкція друкованої плати пристрою.

Графічна частина складається з 8 плакатів із результатами модельних та експериментальних досліджень. Також у магістерській кваліфікаційній роботі проведено розрахунки економічної частини та розділу охорони праці та безпека в надзвичайних ситуаціях.

Ключові слова: природний газ, концентрація, вимірювач, генераторний перетворювач, оптичний перетворювач.

ABSTRACT

Kropyvyanskyi E.O. Optical generator gas concentration meter. Master's qualification work in specialty 172 - telecommunications and radio engineering, educational program - radio engineering. Vinnytsia: VNTU, 2022. 157 p.

In Ukrainian language. Refs.: 58 titles; Figs.: 24. Tables: 21.

The master's thesis is devoted to the development of an optical generator gas concentration meter. An analysis of the current state of gas sensors was carried out, a generalized classification of gas sensors was developed. The theoretical and practical justification for the creation of an optical generator gas concentration meter was carried out. A mathematical model of the optical generator gas concentration meter was developed. The results of mathematical modeling were obtained. The structural and principle scheme of the optical generator gas concentration meter was developed. The design of the printed circuit board of the device is developed.

The graphic part consists of 8 posters with the results of model and experimental studies. Also in the master's qualification work, calculations were made of the economic part and the section of labor protection and safety in emergency situations.

Keywords: natural gas, concentration, meter, generator transducer, optical transducer.

ЗМІСТ

ВСТУП	7
1 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД СУЧАСНИХ ГАЗОАНАЛІЗАТОРІВ	11
1.1 Електрохімічні газоаналізатори на O_2	11
1.2 Магнітні газоаналізатори на O_2	11
1.3 Термохімічні газоаналізатори на O_2 і H_2	11
1.4 Теплові (термокондуктометричні) газоаналізатори, на H_2 , CO_2 , CH_4 , He, Ar, NH_3 , SO_2	12
1.5 Термохімічні газоаналізатори горючих газів і пари.....	12
1.6 Полум'яно-іонізаційні газоаналізатори на бензол, стирол, хлорвініл, дихлоретан і ін.	13
1.7 Загальна характеристика оптико-абсорбційного методу газового аналізу.....	13
1.8 Принципи спектроскопії.....	14
1.9 Лазерна спектроскопія.....	15
1.10 Лазерна спектроскопія абсорбції.....	17
1.11 Інфрачервоні газоаналізатори.....	23
2 ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ ВИЗНАЧЕННЯ ПОКАЗНИКА ЗАЛОМЛЕННЯ, ТИПІВ ВИМІРЮВАЧІВ КОНЦЕНТРАЦІЇ ГАЗІВ ТА ТЕХНІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ РОЗРОБКИ	33
2.1 Методи визначення показника заломлення газів.....	33
2.2 Загальна класифікація вимірювачів концентрації	48
2.3 Галузь використання оптико-електронного вимірювача концентрації газу, мета розробки	57
2.4 Вибір і обґрунтування аналогів оптико-електронного вимірювача концентрації газу	59
2.5 Вибір прототипів оптико-електронного вимірювача концентрації газу. .	61
3 РОЗРОБЛЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ТА РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ОПТИЧНОГО ГЕНЕРАТОРНОГО ВИМІРЮВАЧА КОНЦЕНТРАЦІЇ ГАЗІВ	66
3.1 Математична модель статичних характеристик оптичного каналу недисперсійного оптичного генераторного вимірювача концентрації газів	66
3.2 Розробка структурної схеми і методики вибору параметрів аналітичного каналу оптичного генераторного вимірювача концентрації газів	73
3.3 Математична модель похибки аналітичного каналу оптичного генераторного вимірювача концентрації газів.....	78

3.4 Розробка математичної моделі метрологічних характеристик аналітичного каналу оптичного генераторного вимірювача концентрації газів.....	81
3.5 Розроблення математичної моделі оптичного генераторного вимірювача концентрації газів і результати математичного моделювання.....	86
4 РОЗРОБКА ОПТИЧНОГО ГЕНЕРАТОРНОГО ВИМІРЮВАЧА КОНЦЕНТРАЦІЇ ГАЗІВ.....	90
4.1 Якісні показники газоаналізаторів для контролю концентрації природного газу.....	90
4.2 Розроблення структурної схеми оптичного генераторного вимірювача концентрації газів.....	91
4.3 Аналіз умов експлуатації оптичного генераторного вимірювача концентрації газів.....	95
4.4 Розроблення електричної схеми оптичного генераторного вимірювача концентрації газів.....	98
4.5 Розроблення конструкції оптичного генераторного вимірювача концентрації газів.....	108
5 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА.....	111
5.1 Проведення комерційного та технологічного аудиту науково-технічної розробки.....	111
5.2 Розрахунок узагальненого коефіцієнта якості розробки.....	115
5.3 Розрахунок витрат на проведення науково-дослідної роботи.....	117
5.4 Розрахунок економічної ефективності науково-технічної розробки при її можливій комерціалізації потенційним інвестором.....	130
5.5 Висновки до розділу.....	135
6 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ.....	136
6.1 Технічні рішення з безпечного виконання робіт.....	137
6.2 Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії.....	139
6.3 Законодавче і нормативно-правове забезпечення цивільного захисту.....	144
ВИСНОВКИ.....	147
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	148
Додаток А (обов'язковий). Ілюстративна частина.....	153
Додаток Б (обов'язковий). Протокол перевірки навчальної магістерської) кваліфікаційної роботи.....	162

ВСТУП

Актуальність теми.

Сенсори набувають все більшого значення в часи швидких технологічних змін. Зі збільшенням технологічної складності механічних, електричних та хімічних приладів з одного боку, та зі зростанням екологічної свідомості з питань індустриальних та технологічних відходів з іншого, буде зростати потреба в сенсорах. Крім того, сенсори виявляють себе в якості ключової технології для просування вперед автоматизацій у багатьох галузях промисловості та вдосконаленні багатьох приладів, і для збільшення їх конкурентної спроможності.

Характерна особливість поточного та майбутнього десятиріччя полягає в тому, що при подальшій електронізації усіх галузей народного господарства, змінюються вимоги до сенсора: на зміну громіздким, ненадійним, іноді без електричного виходу приладам, повинні прийти сенсори, сумісні з іншими виробами електроніки. Основні вимоги до таких сенсорів: висока точність, однозначність, швидкість вимірювання; інтеграція в одному пристрої чутливого елемента та ліній зв'язку: вибірковість, тобто здатність виявлення та виділення даного впливу на фоні інших зовнішніх факторів, що впливають; багатofункціональність, тобто здатність до одночасного контролю декількох різних впливів; низька вартість; працездатність у жорстких експлуатаційних умовах; довговічність.

Серед різноманіття напрямків використання сенсорів важливе місце посідають газоаналізаторні сенсори, що зазвичай використовуються для виявлення та визначення складу газу. В основному застосовуються для контролю навколишнього середовища, у технологічних лініях та в інших місцях, що характеризуються широким діапазоном концентрації, для детектування та вимірювання різних компонентів газової суміші, що дає можливість виявити перевищення гранично допустимих концентрацій у повітрі робочого середовища, в сигнальних пристроях для індикації вибухонебезпечних газів і т.д.

Проблема вимірювання концентрації газу в наш час є досить актуальною у різних галузях промисловості, таких як: металургія, гірничодобувна, харчова та інші.

Аналіз останніх досліджень.

За останні роки накопичений великий досвід розробки газоаналізаторів, що реалізують термохімічний, оптоакустичний та лазерно-дисперсійний методи вимірювання концентрації газів. Серед суто фізичних методів газового аналізу, також широкого застосовується полум'яно-іонізаційний та інші методи.

В зв'язку з розвитком матеріально-технічної бази в наш час виникає потреба повної автоматизації процесу контролю виробництва або функціонування приладів. Таким чином процес вимірювання параметрів виробництва має бути повністю автоматизований. З використанням сучасної мікропроцесорної техніки дана задача може бути вирішена з максимальною ефективністю.

Протягом останніх десятиліть досягнуті значні успіхи в області оптики, що по праву називають наукою XXI століття. На сучасному етапі розвитку оптичної науки і технологій створені принципово нові покоління джерел випромінювання, оптичних матеріалів і елементів, приймачів випромінювання, оптичних систем передачі й обробки інформації. Створено нові напрямки в оптиці інтегральна, волоконна, градієнтна і нелінійна оптика, мікро- і нанооптика, оптоелектроніка і т.д [5].

Характерною рисою розвитку сучасної оптики стає активне впровадження досягнень фундаментальної науки в практичні розробки. Яскравим прикладом є інформаційні технології, перспективи розвитку яких основані на оптичних принципах представлення, передачі, обробки і збереження інформації [19].

Вимірювання параметру концентрації газу дуже важливе у таких галузях як гірничодобувна промисловість, металургійна промисловість, теплогазокомунікації та інші. Отже мікропроцесорний прилад вимірювання концентрації газу має широку галузь застосувань.

Внаслідок швидкого науково-технічного прогресу в наш час часто виникають проблеми підвищення точності вимірювань, зменшення вартості та роз-

мірів вимірювальних приладів, тощо. Дані проблеми можна вирішувати шляхом впровадження новітніх технологій та розробок в області вимірювальних технологій. Отже, постійна модернізація вимірювальних приладів є обов'язковою для подальшого розвитку науки і техніки [23].

Метою роботи є розробка та дослідження Оптичний генераторний вимірювач концентрації газів.

Задачами досліджень магістерської кваліфікаційної роботи є:

- провести аналіз сучасного стану оптичних вимірювачів концентрації газів;
- провести літературний огляд теоретичних основ побудови оптичних генераторних вимірювачів концентрації газів;
- розробити оптичний генераторний вимірювач концентрації газів;
- здійснити дослідження оптичного генераторного вимірювача концентрації газів.

Об'єктом дослідження є процеси перетворення енергії електромагнітних оптичного сигналу в енергію інформаційного радіовимірювального сигналу в оптичному генераторному вимірювачі концентрації газів.

Предметом дослідження є часові та частотні параметри і характеристики інформаційних оптичних і електричних радіовимірювальних сигналів.

Наукова новизна одержаних результатів – отримав подальший розвиток метод побудови оптичних генераторних вимірювачів концентрації газів.

Практична новизна одержаних результатів – полягає в отриманих нових конструкцій і результатів експериментальних і модельних досліджень оптичних генераторних вимірювачів концентрації газів.

Апробація результатів роботи. Основні ідеї роботи доповідалися та обговорювалися на XI міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій», 12-14 грудня 2022 року, м. Запоріжжя, Національний Університет «Запорізька Політехніка» [9].

Публікації результатів наукових досліджень. За темою досліджень автором опубліковано 1 статтю у збірнику тез доповідей XI міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій», 12-14 грудня 2022 року, м. Запоріжжя, Національний Університет «Запорізька Політехніка» [9].

1 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД СУЧАСНИХ ГАЗОАНАЛІЗАТОРІВ

1.1 Електрохімічні газоаналізатори на O_2

Принцип дії електрохімічних газоаналізаторів полягає в електрохімічній реакції, що викликає утворення струму в електроліті при взаємодії кисню з електродом. Струм, що протікає по зовнішньому колу електроліту, пропорційний вмісту кисню в газовій суміші. У складі газової суміші не повинно бути електрохімічно-активних газів (хлору, оксидів азоту, сірководню і ін.).

Перевагою даного методу є висока точність. Недоліком є те, що на виміри затрачається певна частина проби та реактивів, а також жорсткі умови для проведення дослідів, за рахунок чого підвищується ціна їх проведення.

1.2 Магнітні газоаналізатори на O_2

Магнітні газоаналізатори працюють на парамагнітних властивостях кисню, який володіє найбільшою магнітною сприйнятливістю в порівнянні з іншими газами. У газоаналізаторах використовується явище термомагнітної конвекції, що виникає в нерівномірному магнітному полі біля нагрітого тіла, оточеного парамагнітним газом. Рух газу впливає на тепловіддачу нагрівального елемента, що призводить до зміни його температури і опору.

Недоліком таких видів газоаналізаторів є великі маса та габарити, а також складність виготовлення чутливого елемента, що не дозволяє використовувати даний тип газоаналізаторів у побуті.

1.3 Термохімічні газоаналізатори на O_2 і H_2

Термохімічні газоаналізатори працюють завдяки тепловому ефекту реакції окислення, що протікає в присутності каталізатора, яку вони вимірюють. Зміна опору чутливого елемента пропорційна кількості аналізованого газу, який міститься в суміші при її постійній витраті. Первинний перетворювач можна встановлювати у вибухонебезпечній зоні. Скидання газової суміші, що

утворюється в процесі експерименту, відбувається окремим трубопроводом за межі приміщення.

Перевагою даного методу є малі габарити, в порівнянні з попередньо описаними. Недоліком є висока температура сенсора, що є небезпечним при високих концентраціях вимірюваної суміші, також потрібне спеціальне приміщення для проведення дослідів.

1.4 Теплові (термокондуктометричні) газоаналізатори, на H_2 , CO_2 , CH_4 , He , Ar , NH_3 , SO_2

Дія термокондуктометричних газоаналізаторів полягає в вимірюванні теплопровідності газової суміші, яка практично однозначно визначається вмістом в ній компоненти, що аналізується. Обов'язковою умовою вимірювання є постійне співвідношення між вмістом невимірюваних компонентів в межах всієї шкали або постійність заданого середнього значення їх концентрації у суміші, що аналізується. Вимірювання теплопровідності реалізовується побічно, по зміні електричного опору чутливого елемента, що розміщений в газовій суміші.

Перевагою термокондуктометричних газоаналізаторів є досить велика точність, але вони мають значні масо-габаритні параметри, що призводить до складності транспортування. Аналізатори даного типу, не можуть застосовуватись при вибухонебезпечних концентраціях.

1.5 Термохімічні газоаналізатори горючих газів і пари

Дія термохімічних газоаналізаторів заснована на вимірюванні теплового ефекту хімічної реакції компоненти газової суміші, наприклад реакції окислення (горіння). У конструкціях газоаналізаторів використовується два типи катализаторів на яких відбувається процес окислення: твердий гранульований (тепловий ефект вимірюється в потоці газу за допомогою термометра опору) і каталітично-активна нитка з високою температурою, що є одночасно чутливим елементом - плечем вимірювального моста.

Недоліком такого методу є використання досить дорогого спецобладнання, втрата речовин-індикаторів, великі геометричні розміри та досить складний процес калібровки, що призводить до жорсткого обмеження сфер використання.

1.6 Полум'яно-іонізаційні газоаналізатори на бензол, стирол, хлорвініл, дихлоретан і ін.

Дія полум'яно-іонізаційних газоаналізаторів полягає у вимірюванні іонізації молекул органічних речовин в полум'ї водню і подальшому вимірюванні сили іонізаційного струму. У іонізаційну камеру між двома електродами подається водень, який підпалюється спеціальною спіраллю. Електрична провідність водневого полум'я за відсутності в ньому органічних речовин низька. Поява в аналізованому повітрі органічних речовин і іонізація їх у водневому полум'ї призводять до різкого збільшення електричної провідності полум'я і збільшення сили іонізаційного струму. Сила іонізаційного струму пропорційна кількості органічних речовин, що поступають в камеру в одиницю часу. Вимірювання сили іонізаційного струму камери здійснюється по падінню напруги на вимірювальному опорі.

Перевагою цього методу є можливість підвищити точність результатів. Недоліком є те, що в зв'язку з використанням складного технологічного процесу визначення концентрації компоненти в газовій суміші, неможливо проводити контроль поза межами спеціально призначених лабораторій.

1.7 Загальна характеристика оптико-абсорбційного методу газового аналізу

Останнім часом широкого поширення набув метод газового аналізу, що заснований на вибіркового поглинанні оптичної енергії. Як запевняють фірми - розробники аналітичних приладів США, Японії, ФРН, близько 40% аналітичних приладів, що використовуються в промисловості і лабораторній практиці

для визначення складу речовини, засновані на оптичному методі абсорбції. Причинами такого широкого застосування аналізаторів, є їх висока вибірковість і чутливість, а також універсальність.

Даний тип приладів поділяють на два класи – дисперсійні і не дисперсійні. Застосування складної і дорогої спектральної апаратури для аналітичних цілей виправдане тільки тоді, коли різноманітність аналітичних завдань викликає необхідність багаторазового переходу від одних спектральних інтервалів до інших. Проте в більшості випадків в умовах виробництва або оперативного контролю такої необхідності немає, оскільки аналітичні завдання мають стабільний характер протягом тривалого часу. Для вирішення подібних завдань звичайно використовуються недисперсійні абсорбційні аналізатори. Світлосила недисперсійних приладів звичайно набагато перевершує світлосилу дисперсійної апаратури, і чутливість недисперсійних газоаналізаторів вище.

Незалежно від того, в якій області спектру аналізована речовина поглинає випромінювання, способи виділення необхідних інтервалів спектру аналогічні: використання вибіркового джерела випромінювання; використання вибіркового приймачів; використання всіляких світлофільтрів; різні комбінації вказаних способів.

Метод, абсорбції, є одним з самих вибіркового методів газового контролю, це обумовлено високою специфічністю спектрів поглинання різних речовин.

Також одним із різновидів оптичних газоаналізаторів є спектрографи, що по отриманому в процесі дослідження спектру, можуть досить точно визначати склад та концентрацію різних домішок в газовій суміші.

1.8 Принципи спектроскопії

Інформацію про структуру атомів і молекул і їх взаємодію з навколишнім середовищем можна отримати різними шляхами із спектрів поглинання, випромінювання або розсіяння, що виникають в результаті взаємодії електромагнітного випромінювання з речовиною. Так, наприклад, вимірювання довжин хвиль спектральних ліній дозволяють визначити положення енергетичних рів-

нів, а їх інтенсивності - імовірності переходів. Вірогідність переходів, у свою чергу, залежить від хвилевих функцій енергетичних рівнів, між якими відбувається перехід, тобто від розподілу зарядів у відповідних станах. Спеціальні методи спектроскопії високої роздільної здатності дозволяють виміряти природну ширину спектральних ліній, тобто мінімальну ширину, яка обумовлена втратою енергії за рахунок випромінювання. Таким чином визначаються середні часи життя в збуджених станах.

Рух атомів призводить до доплерівського зміщення спектральних ліній окремих атомів, залежного від швидкості і напрямку руху щодо реєструючого приладу. Максвелівський розподіл атомів за швидкостями визначає те, що спектральні лінії, властиві розрідженим газам, виявляються додатково розширеними. Розподіл інтенсивності випромінювання по частоті ω всередині доплерівської спектральної лінії з центром при ω_0 описується функцією Гауса $I(\omega) = I(\omega_0) \exp\left[-4 \ln 2 (\omega - \omega_0)^2 / \delta\omega_D^2\right]$, де $\delta\omega_D = \omega_0 \left(8kT \ln 2 / (mc^2)\right)^{1/2}$ - повна ширина спектральної лінії на напіввисоті, що залежить лише від температури газу T , маси атомів m (k - постійна Больцмана, c - швидкість світла).

Таке розширення називається неоднорідним доплерівським, оскільки різні ділянки цього профілю спектральної лінії обумовлені поглинанням або випромінюванням атомів з різними швидкостями і напрямками руху. Доплерівські профілі спектральних ліній визначають розподіл випромінювання за швидкостями об'єктів і температурою речовини.

1.9 Лазерна спектроскопія

Застосування лазерів у поєднанні з іншими сучасними оптичними і електронними приладами відкрило якісно нові можливості в спектроскопії. Ці можливості можна умовно розбити на дві групи:

1) істотне удосконалення раніше існуючих методів, що дозволило отримувати нові результати;

2) кардинальне удосконалення раніше існуючих методів визначається можливостями концентрації лазерного випромінювання, яке наближається до граничного значення, що допускають закони фізики, і можливим лише для когерентного (регулярного в просторі і в часі) електромагнітного випромінювання.

До таких принципових переваг лазерного випромінювання і витікаючих з них можливостей удосконалення методів спектроскопії відносяться наступні:

1. Велика спектральна потужність (концентрація в спектральній інтервал), на багато порядків перевищує таку для некогерентних джерел. Наприклад, відношення ширини спектру лазерного випромінювання до його частоти може бути зменшене аж до величини порядку, тоді як для спеціальних ламп ця величина при менших або сумірних потужностях випромінювання складає $\sim 10^{-8}$. Це значно спрощує проблему зниження рівня шумів. За рахунок виділення вузького спектрального інтервалу вдається різко понизити рівень шумів приймача і фонового випромінювання.

2. Велика економія лазерних пучків (концентрація в малий тілесний кут) також дає значні експериментальні переваги. Наприклад, при вимірюванні малих коефіцієнтів поглинання можна використовувати велику довжину шляху променя, що походить через поглинаючий зразок. При цьому фонові шуми із-за розсіяння світла на стінках або віконцях кювети можна усунути значно легше, ніж у разі пучків, що розходяться, від немонохроматичних джерел.

3. Фокусування (концентрація в гранично малий об'єм) і подальша ефективна дія на детектор випромінювання лише з цього малого об'єму дозволяють різко підвищити просторову якість отриманої інформації.

4. Особливо істотною для спектроскопії високої роздільної здатності є мала спектральна ширина лазерного випромінювання (концентрація в спектральній інтервал). Окрім вище згаданих можливостей знизити рівень шумів це дозволяє підвищити спектральну роздільну здатність на багато порядків. Цей показник перевищує роздільну здатність навіть найбільших по розмірах і дорогих спектрографів.

5. Можливість плавної перебудови частоти високо монохроматичного вузько направлено лазерного випромінювання відкрила нову еру в спектроскопії, оскільки надає унікальну можливість поєднувати надвисоку роздільну здатність з великою спектральною яскравістю зареєстрованих випромінювань. Сукупність розроблених до теперішнього часу лазерів дозволяє перекрити практично повністю всі діапазони довжин хвиль від далекого інфрачервоного до далекого ультрафіолетового.

1.10 Лазерна спектроскопія абсорбції

Переваги використання лазерів краще всього видно з порівняння з традиційним методом, заснованим на використанні некогерентних джерел випромінювання.

1.10.1 Класична спектроскопія абсорбції

У класичній спектроскопії абсорбції зазвичай використовують джерела спонтанного випромінювання з широким спектром (наприклад, дуговий розряд в парах ртуті високого тиску, ксенонові імпульсні лампи і т.д.). Схема методу приведена на рис. 1.1, а.

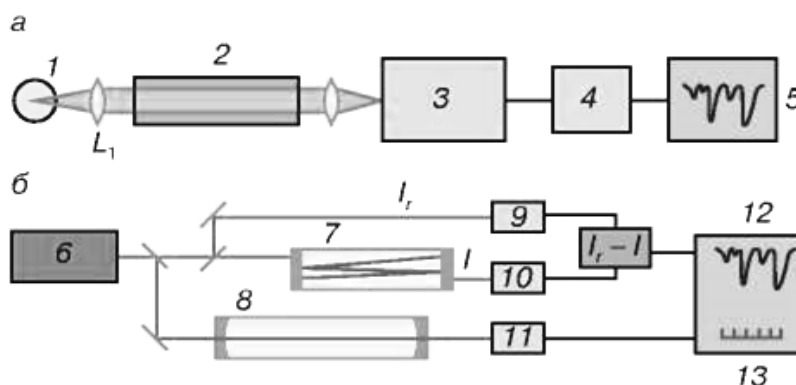


Рисунок 1.1 – Порівняння абсорбційної спектроскопії з використанням широко-смугового некогерентного джерела випромінювання (а) і лазера з плавною перебудовою частоти (б): 1 – джерело суцільного спектру; 2 – поглинаюча комір-ка; 3 – спектрограф; 4 – фотоприймач; 5 – індикатор; 6 – лазер з плавною пере-будовою частоти; 7 – багатоходова кювета; 8 – довгий інтерферометр Фабрі-Перо; 9-11 – фотодіоди; 12 – індикатор; 13 – мітки частоти

Випромінювання збирається лінзою L_1 і проходить через поглинаючий зразок. За допомогою диспергуючого приладу, що розділяє випромінювання з різними довжинами хвиль (спектрометра або інтерферометра), інтенсивність падаючого випромінювання $I(\lambda)$ вимірюється як функція довжини хвилі λ . Відніманням інтенсивності опорного пучка $I_r(\lambda)$, яке можна реалізувати, наприклад, шляхом змінного введення і виведення поглинаючого осередку зі світлового пучка, можна отримати спектр поглиненого випромінювання $\Delta I(\lambda) = a[bI_r(\lambda) - I(\lambda)]$, де постійні a і b враховують не залежні від довжини хвилі втрати I_r і I (наприклад, при віддзеркаленні від стінок кювети або розділових дзеркал).

Спектральна роздільна здатність зазвичай обмежується роздільною здатністю диспергуючого приладу, причому доплерівської межі вдається досягти лише за допомогою великих і дорогих установок. Чутливість установки визначається мінімальною потужністю, що поглинається, яку вдається зареєструвати на фоні початкового випромінювання. В більшості випадків це обмежується шумами приймача і флуктуаціями інтенсивності джерела випромінювання. Зазвичай межа поглинання, що виявляється, в даних умовах досягається при відносних поглинаннях $\Delta I/I$ і може бути знижена лише в сприятливих умовах за рахунок використання спеціальних джерел і методів синхронного детектування або техніки накопичення і усереднення сигналів. Заміна в цьому методі широкомуглового некогерентного випромінювання на лазер з плавною перебудовою частоти супроводжується рядом переваг:

- відпадає необхідність у використанні диспергуючих приладів, оскільки частотну залежність випромінювання, що поглинається, можна вимірювати безпосередньо по різниці інтенсивностей опорного I_r зареєстрованого I пучків (рис. 1.1, б). При цьому через монохроматичність випромінювання спектральна роздільна здатність визначається шириною спектральної лінії поглинання;

- значно зростає чутливість реєстрації, яка визначається відношенням поглиненої потужності випромінювання до її характерного початкового значення

$\Delta I/I$. Перша величина пропорційна ширині лінії поглинання, а друга — мінімальній спектральній ширині випромінювання, що виділяється спектральним приладом. Для немонохроматичного випромінювання ця ширина зазвичай істотно перевищує ширину лінії поглинання, тоді як весь спектр лазерного випромінювання може знаходитися усередині спектральної лінії поглинання. Таким чином, випромінювання, яке в принципі не може поглинутися, на фотоприймач не потрапляє. В результаті перехід до лазерного випромінювання і усунення обмежень з боку спектральних приладів призводять до зростання чутливості приблизно на вказаний показник, який може скласти десятки і більше разів;

- додаткове зростання чутливості за рахунок зменшення ролі шумів приймача, та використання інтенсивного вузькосмугового випромінювання і можливості придушення флуктуацій шляхом стабілізації цієї інтенсивності;

- стабілізація частоти лазерного випромінювання на центр лінії поглинання дозволяє підвищити точність вимірювання довжини хвилі в порівнянні з відносною величиною порядку 10^{-8} і вище. З такою ж точністю стає можливим вимірювати довжини хвиль поглинаючих переходів;

- довжину хвилі лазерного випромінювання можна досить швидко перебудувати на задану величину, що дозволяє просканувати декілька сусідніх переходів, що відповідають коливанням молекул речовини, що досліджується, за мікросекунди;

- вузькосмуговість і висока інтенсивність лазерного випромінювання дозволяє при його поглинанні вибірково збуджувати значну кількість молекул в певні збуджені стани, що відкриває принципово нові можливості вивчення і використання цих збуджених станів.

У розглянутому вище методі поглинене випромінювання реєструється як різниця між інтенсивностями що пройшло через середовище і опорного. Залежно від об'єктів, що вивчаються, і процесів часто виявляється доцільним реєструвати випадки поглинання випромінювання за допомогою деяких інших фізичних процесів, що супроводжують поглинання.

1.10.2 Лазерна оптикоакустична спектроскопія

Цей чутливий метод вимірювання малих інтенсивностей поглинання, використовується головним чином тоді, коли потрібно визначити малі концентрації певного газу у присутності інших компонентів за наявності великого тиску, наприклад, для визначення забруднень атмосфери різними шкідливими викидами. При цьому можуть бути використані переходи і джерела лазерного випромінювання в інфрачервоній області. Суть методу полягає в тому, що енергія збудження молекул, що поглинають, в результаті зіткнень з рештою перерозподіляється по всіх степенях свободи речовини. В кінцевому випадку це призводить до зростання температури і тиску при постійній густині в комірці. Якщо лазерний пучок переривати з деякими частотами (зазвичай менше 10 кГц), то в комірці генерується акустична хвиля на відповідній частоті. Вона може бути зареєстрована чутливим мікрофоном, поміщеним всередину кювети (рис. 1.2). За допомогою такого спектрофона вдається зареєструвати відносні концентрації молекул порядку 10^{-10} при загальному тиску суміші від декількох торр до декількох атмосфер.

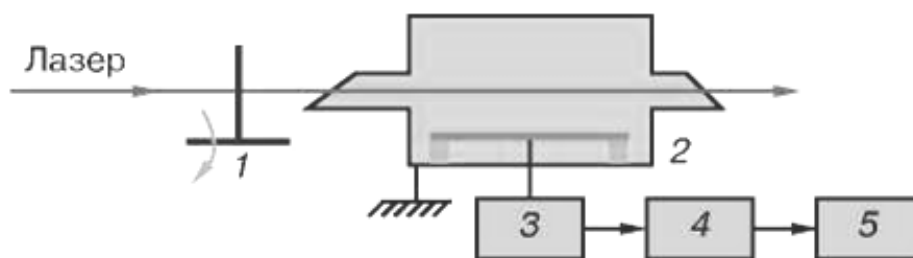


Рисунок 1.2 – Блок-схема експериментальної установки для оптикоакустичної спектроскопії: 1 – модулятор; 2 – ємнісний мікрофон; 3 – попередній підсилювач; 4 – синхронний підсилювач; 5 – індикатор

Оптикоакустична спектроскопія вдало використовується для швидкого контролю невеликих витоків отруйних газів, визначення відносного змісту ізотопів, вивчення структури молекул і процесів передачі енергії в різні міри свобо-

ди при їх зіткненнях, вивчення слабких переходів молекул, які виявляються в спектрах атмосфер планет і т. д.

1.10.3 Лазерна оптогальванічна спектроскопія

Це простий і ефективний метод спектроскопії газових розрядів. Його суть полягає в тому, що вірогідність іонізації атомів з різних рівнів різні. Тому резонансне випромінювання, поглинаючись, призводить до зміни розрядного струму, що реєструється по зміні падіння напруги на баластному опорі (рис. 1.3). Якщо інтенсивність випромінювання лазера модулюється за допомогою пристрою переривання, то виникає змінна напруга, яку можна безпосередньо подавати на синхронний підсилювач. При помірних потужностях лазерів в декілька міліват і розрядних струмах в декілька міліампер можна отримувати великі сигнали від мікро- до мілівольт. Поміщаючи в розряд незначну кількість атомів з відомим "густим" спектром (наприклад, уран і торій), оптогальванічні сигнали можна використовувати як абсолютні репери та простий спосіб калібрування довжини хвилі лазерного випромінювання. Одночасно можна визначити наявність інших елементів і температури їх надходження в газовий розряд з досліджуваних твердотільних зразків.

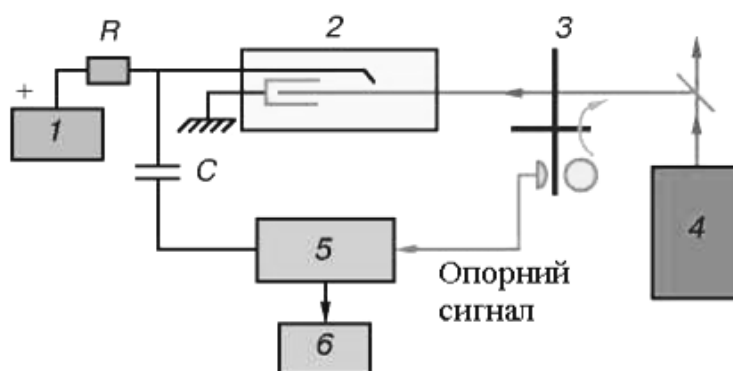


Рисунок 1.3 – Блок-схема експериментальної установки для оптогальванічної спектроскопії: 1 – джерело живлення для підтримки розряду; 2 – лампа з пустотілим катодом; 3 – модулятор інтенсивності лазерного і опорного випромінювання лампи для синхронізації підсилювача 5; 4 – неперервний лазер на барвникові; 5 – синхронний підсилювач; 6 – індикатор

1.10.4 Лазерна спектроскопія внутрішньорезонатора

Інтенсивність випромінювання всередині лазерного резонатора в десятки разів більше, ніж на виході з лазера. Тому, якщо помістити досліджувані кювети всередину резонатора, можна значно покращити характеристики всіх вище перерахованих методів (рис. 1.4). Крім того, самі по собі характеристики генерації лазера досить чутливі до внесення будь-якого поглинання всередину резонатора.

Це обумовлено як багатократним проходом випромінювання через комірку всередині резонатора і відповідним накопиченням ефектів, так і деякими специфічними резонансними нелінійно-оптичними процесами, що визначають генерацію. Внесення поглинаючих атомів, наприклад, вносить дизбаланс до взаємодії декількох близьких по частоті лазерних випромінювань, що одночасно генеруються (типів коливань резонатора). За рахунок нелінійності процесу ефект багато разів посилюється так, що стає можливим реєструвати виключно слабкі лінії поглинання. Показник збільшення чутливості за рахунок використання внутрішньорезонаторного поглинання може складати величину порядку 10^5 .

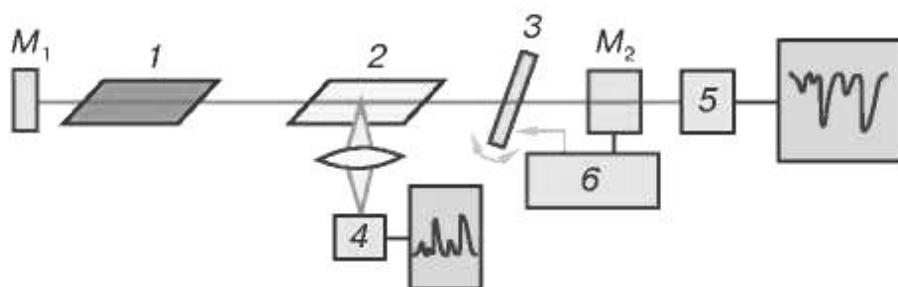


Рисунок 1.4 – Техніка внутрішньо-резонаторного поглинання: 1 – лазер; 2 – поглинаюча комірка; 3, 6 – система для перебудови частоти випромінювання лазера; 4 – детектор флуоресценції; 5 – детектор лазерного випромінювання; M_1 , M_2 - дзеркала

Здатність атома взаємодіяти з резонансним випромінюванням і здійснювати переходи характеризується "силою осцилятора" для даного переходу. Для

нормальних переходів ця величина близька до одиниці. Методи лазерної внутрішньорезонаторної спектроскопії дозволяють реєструвати надзвичайно слабкі переходи аж до сил осциляторів, менших 10^{-12} .

1.11 Інфрачервоні газоаналізатори

Найкраща вибірковість спостерігається в дальній інфрачервоній (ІЧ) області спектру, де обертальні лінії поглинання речовин строго специфічні, проте, на жаль, вони дуже слабкі. Крім того, детектори ІЧ-випромінювання в цій області спектру не володіють високою чутливістю.

У середній ІЧ-області спектру при достатньо інтенсивних смугах поглинання і ефективних приймачах вдається одержати хорошу вибірковість. Саме в цьому спектральному діапазоні працює велика кількість абсорбційних газоаналізаторів.

Чутливість методу абсорбції, досить велика, достатня для того, щоб використовувати абсорбційні аналізатори, для визначення слідів газів і гранично допустимих концентрацій в повітрі виробничих приміщень.

Універсальність методу абсорбції, характеризують наступні чинники:

- дозволяє визначати концентрацію широкого класу речовин;
- дозволяє перекривати практично весь діапазон вимірювання концентрації мікродомішок до 100%;
- допускає достатньо просте апаратне оформлення. При переході з одного аналізованого компонента на інший або на інший діапазон необхідні лише незначні конструктивні зміни (наприклад, зміна довжини кювети, концентрації заповнення приймача або зміни світлофільтру).

Перевагами приладів основаних на даному методі є досить велика точність, можливість проведення вимірів концентрацій, близьких до вибухонебезпечних, малі масо-габаритні показники, що дозволяє виконати прилади як для стаціонарного так і переносного використання. Недоліком є лише невелика складність виготовлення оптопар налаштованих на певний діапазон поглинання.

1.11.1 Інфрачервоні газоаналізатори з газонаповненими приймачами випромінювання

Серед всіх аналізаторів абсорбції ІЧ-газоаналізатори займають домінуюче положення. Інфрачервоним способом можна аналізувати всі гази, молекули яких складаються не менше ніж з двох різних атомів. У всьому світі для визначення основних промислових газів, таких, як CO, CO₂, CH₄, C₃H₈ і ін., використовуються тисячі ІЧ-газоаналізаторів, і кількість їх швидко збільшується.

Вибір тієї або іншої вимірювальної схеми газоаналізаторів визначається у кожному конкретному випадку вимогами до приладу, його метрологічних, експлуатаційних і економічних характеристик.

У зв'язку з необхідністю ефективнішого використання ІЧ-газоаналізаторів і розширення областей їх застосування зростають вимоги до підвищення стабільності, вибіркової, чутливості і надійності.

Найбільшого поширення в ІЧ-газоаналізаторах свого часу набули селективні оптико-акустичні приймачі (ОАП) з конденсаторними мікрофонами.

1.11.2 Інфрачервоні газоаналізатори з неселективними приймачами випромінювання

Разом з газоаналізаторами, що добре зарекомендували себе, з селективними ОАП останнім часом за кордоном стали все ширше застосовуватися газоаналізатори з твердотільними приймачами випромінювання.

Принцип дії і схемні рішення приладів з твердотільними приймачами аналогічні оптико-акустичним і засновані на вибіркового поглинанні молекулами газу ІЧ-випромінювання.

Будь-який інфрачервоний газоаналізатор з неселективним приймачем випромінювання складається з наступних вузлів: джерела ІЧ-випромінювання, модулятора, робочої кювети, світлофільтру і підсилювально-вимірювального пристрою.

Найбільшого поширення як приймачів випромінювання в цих газоаналізаторах набули фоторезистори і піроприймачі.

Однопроменеві газоаналізатори - найпростіші з цього класу приладів. У однопроменевих приладах (рис. 1.5) оптична енергія джерела проходить світлофільтр, робочу кювету з досліджуваним газом і падає на приймач. Сигнал приймача підсилюється і вимірюється тим або іншим пристроєм. За таким принципом були побудовані газоаналізатори: Beckman 598 (США), серія SS фірми ADC (Великобританія) MIRAN-101, 103 фірми "Foxboro" (США).

Протягом розвитку цього класу приладів фірма "Foxboro" випустила газоаналізатори з клиновими інтерференційними фільтрами, які дозволяють одним приладом вимірювати концентрацію широкого круга газоподібних речовин. Це, наприклад, прилад MIRAN-104. Для забезпечення максимальної чутливості ця ж фірма застосовує багатоходову робочу кювету з довжиною оптичного шляху до 20 м.

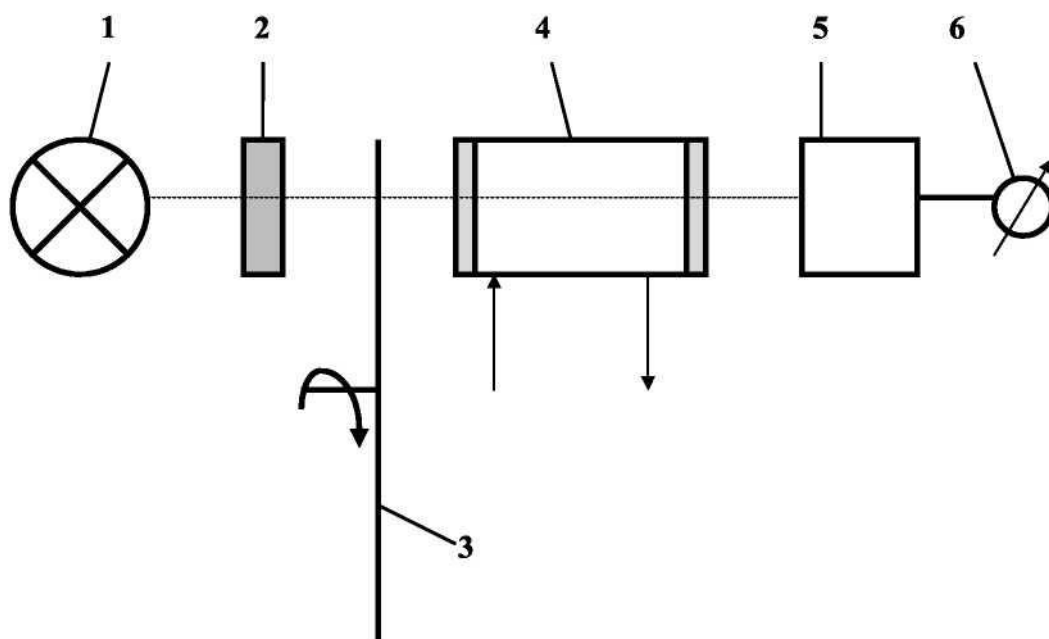


Рисунок 1.5 – Однопроменевий газоаналізатор з неселективним приймачем випромінювання: 1 - джерело ІЧ-випромінювання; 2 - світлофільтр; 3 – модулятор; 4 - кювета; 5 - приймач ІЧ-випромінювання; 6 - що показує прилад

Газоаналізатор MIRAN-80 вже оснащений мікрокомп'ютером, в пам'ять якого закладалася програма калібрування, вимірювання смуги пропускання, фільтру, обрахунку одержаних даних (це був важливий етап, що одержав розвиток в сучасних переносних приладах, про які буде сказано нижче). Газоаналізатор MIRAN-80 застосовується при аналізі складних газових сумішей, де кількість компонентів досягає 11.

Всі однопроменеві недиференціальні прилади володіють істотним недоліком: сигнал з приймача змінюється із зміною його чутливості, інтенсивності випромінювання джерела і підсилення, тому необхідне часте калібрування, що вимагає немало часу і, крім того, це не завжди зручно для приладів безперервної дії.

У двопроменевих приладах (рис. 1.6) випромінювання джерела розділяється на два пучки. Один з них проходить через робочу кювету з аналізованим газом, інший - через кювету порівняння з речовиною, що не поглинає ІЧ-випромінення на аналітичній довжині хвилі. Обидва потоки потрапляють на приймальний пристрій, і далі реєструється відношення або логарифм відношення інтенсивностей обох потоків.

По такій схемі реалізований прилад СН-тестер (СРСР). Перевагами двопроменевих приладів є вища стабільність і незалежність до зміни параметрів, що дестабілізують.

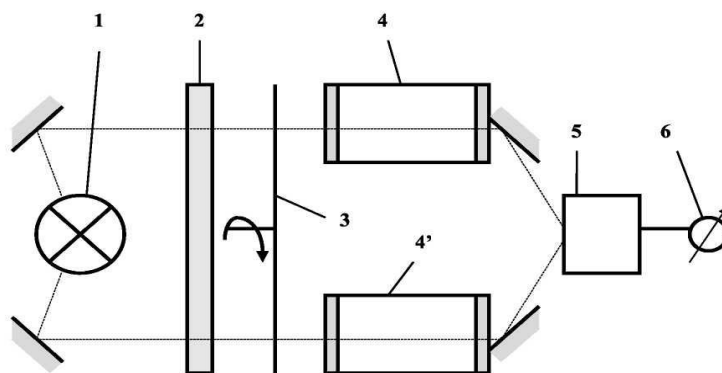


Рисунок 1.6 – Двопроменевий газоаналізатор з неселективним приймачем випромінювання: 1 - джерело ІЧ-випромінення; 2 - світлофільтр; 3 - модулятор; 4 - робоча кювета; 4' - порівняльна кювета; 5 - приймач ІЧ-випромінення; 6 - індикатор

Не зважаючи на очевидні переваги і універсальність двопробних приладів, з часом стали помітними і їх недоліки, особливо при використанні в промисловості. До основних недоліків необхідно віднести різний ступінь забруднення кювет і чутливість до невимірюваних компонентів при накладанні смуг поглинання. Крім того, пристрої розділення і зведення пучків випромінювання досить складні. Тому пізніше стали застосовувати і випускати прилади іншого класу - дво- та багато хвильові (променеві). На рис. 1.7 показана схема таких приладів.

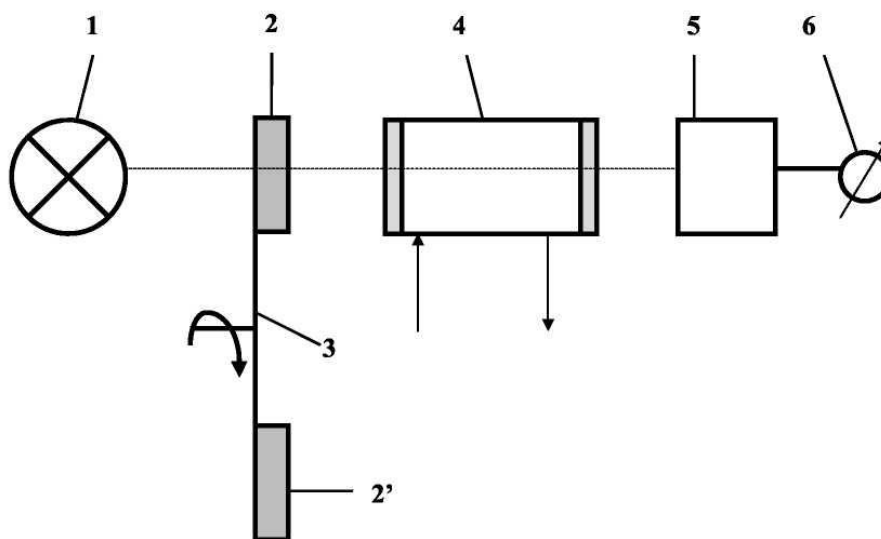


Рисунок 1.7 – Двохвильовий газоаналізатор: 1 - джерело ІЧ-випромінювання; 2 - світлофільтр робочий; 2' - світлофільтр порівняльний; 3 - модулятор; 4 - кювета; 5 - приймач ІЧ-випромінювання; 6 - індикатор

У цих приладах світлофільтрами виділяються область максимального поглинання аналізованої речовини і область, в якій поглинання відсутнє.

Ці схеми, що поєднують стабільність двопробних приладів і простоту однопробних, одержали назву двохвильових або бічастотних.

По такій схемі реалізовані газоаналізатори моделі 206 фірми "Anacon" (США). У цих приладах ІЧ-випромінювання проходить через обтюратор, що обертається. У ньому встановлені два вузькосмугові інтерференційних фільтри, вимірювальний і еталонний. Налаштувати газоаналізатор на вимірювання окре-

мого компоненту в суміші можна, встановлюючи відповідні світлофільтри вимірювання і порівняння.

Важливою особливістю із застосуванням світлофільтрів є те, що на їх базі порівняно легко можна реалізувати прилади для багатокомпонентного аналізу. Так, в приладі P1-503 АН-S фірми RIKEN (Японія) встановлені два аналітичних і один фільтр порівняння, що дозволяє контролювати одночасно концентрацію двох газів. Більші можливості має прилад Infragas 500 фірми KENT (Великобританія). У диску модулятора встановлені п'ять аналітичних і один фільтр порівняння. Цей прилад може одночасно аналізувати п'ять компонентів.

Фірма ANATEK розробила модель газоаналізатора PSA-401, в якій зміна світлофільтрів проводиться обертально - поступальним рухом фільтруючого блоку з частотою 6 Гц. Падаюче на приймач випромінювання промодульовано несучою частотою 600 Гц.

Слід зазначити, що твердотілі приймачі не мають тих унікальних якостей, якими володіють ОАП. Вибірковість і чутливість визначаються інтерференційними фільтрами, що в основному використовуються. Тому для покращення вибіркової використовуюється інший тип приладів з газонаповненим фільтром (рис. 1.8), заповненим сумішшю аналізованого компоненту і азотом.

ІЧ-випромінювання по черзі проходить через газонаповнений модулятор, що містить аналізований компонент і інертний газ. Зовнішнім світлофільтром з виділяється потрібний спектральний діапазон. Після проходження кювети випромінювання потрапляє на приймач. На рис. 1.4 ілюструється принцип дії таких приладів.

У відсутності аналізованого компонента в робочій кюветі сигнал з приймача відповідає сигналу на рис. 1.5, де імпульс 1 утворюється при проходженні випромінювання через газовий фільтр, заповнений аналізованим компонентом; сигнал 2 утворюється при проходженні випромінювання через газовий фільтр, заповнений азотом. У присутності аналізованого газу в кюветі сигнал з приймача має форму, зображену на рис. 1.9 пунктиром. Видно, що обидва сигнали змінилися, але абсолютна зміна сигналу 2 більше, ніж зміна імпульсу 1.

За таким принципом дії побудовані аналізатори: серія RF фірми ADC (Великобританія), модель 48 фірми "Thermo Electron" (США), модель 3003 фірми "Dasibi" (США). Останні дві моделі оснащені багатоходновою робочою кюветою, що дозволяє істотно підвищити чутливість аналізу.

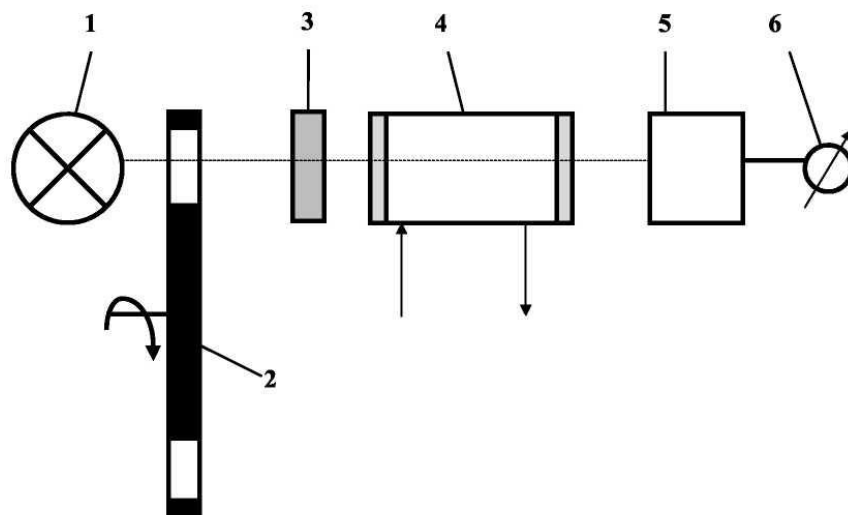


Рисунок 1.8 – Газоаналізатор з газонаповненим фільтром: 1 - джерело ІЧ-випромінення; 2 - газонаповнений фільтр-модулятор; 3 - світлофільтр; 4 - кювета; 5 - приймач ІЧ-випромінення; 6 – індикатор

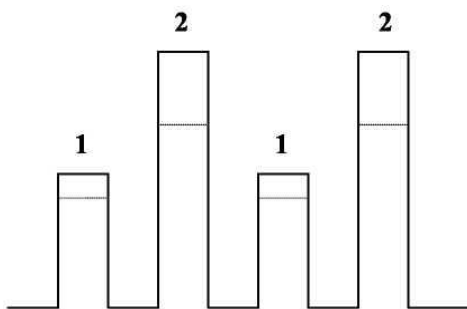


Рисунок 1.9 – Сигнал, що поступає з приймача випромінювання газоаналізатора з газонаповненим модулятором

За таким принципом дії побудовані аналізатори: серія RF фірми ADC (Великобританія), модель 48 фірми "Thermo Electron" (США), модель 3003 фірми "Dasibi" (США). Останні дві моделі оснащені багатоходновою робочою кюветою, що дозволяє істотно підвищити чутливість аналізу.

В даний час в НВО "Хімавтоматика" (Росія) знаходяться у виробництві такі прилади, як технологічний газоаналізатор "Кедр" з оптико-акустичним перетворювачем (ОАП), "Інфралайт 11Е" і "Інфралайт-МК". Оптико-акустичний "Кедр" використовується в основному в стаціонарних умовах, оскільки поперше, він нестійкий до вібрації, по-друге досить масивний.

Зараз, у зв'язку з наростаючою необхідністю контролю викидів автомобільного транспорту, з метою поліпшення екологічної обстановки, виникла гостра потреба в компактних переносних приладах: надійних, зручних і простих в експлуатації (особливо з урахуванням того, що експлуатуватися вони будуть не фахівцями).

Ці прилади призначені для вимірювання змісту СО і СН у викидах автотранспорту, а також числа оборотів двигуна. Газоаналізатори "Автокедр - М" і "Інфралайт 11Е" є мікропроцесорними приладами, вони схожі по своїх характеристиках, але мають конструктивні відмінності, обумовлені різною елементною базою.

"Автокедр - М" є повністю розробкою НВО "Хімавтоматика" і використовує схему вимірювання, аналогічну двохвилевому газоаналізатору (рис. 1.3), тільки з трьома світлофільтрами на модуляторі (один порівняння і два на канали СО і СН). "Інфралайт 11Е" базується на вимірювальному блоці фірми "Sensors inc." (США) і використовує пульсуюче джерело ІЧ-випромінення, що дозволяє не використовувати механічний модулятор. Схема вимірювання є двоканальною (рис. 1.10). Використання мікропроцесорної техніки дає можливість виключити порівняльний канал. Для цього як порівняльний сигнал використовувати сигнал, записаний в пам'яті контролера при "обнуленні" приладу (без аналізованої суміші). Обнулення відбувається автоматично, за заданим контролером регламентом і займає не більше 30 с.

Використання мікропроцесорної техніки дозволяє також зберігати результати вимірювань на зовнішній ЕОМ, коректувати алгоритм роботи приладу у разі потреби без перетворення конструкції приладу, поліпшити експлуата-

ційні характеристики газоаналізатора за рахунок використання вбудованої самодіагностики і автоматизації процесів підготовки і проведення вимірювання.

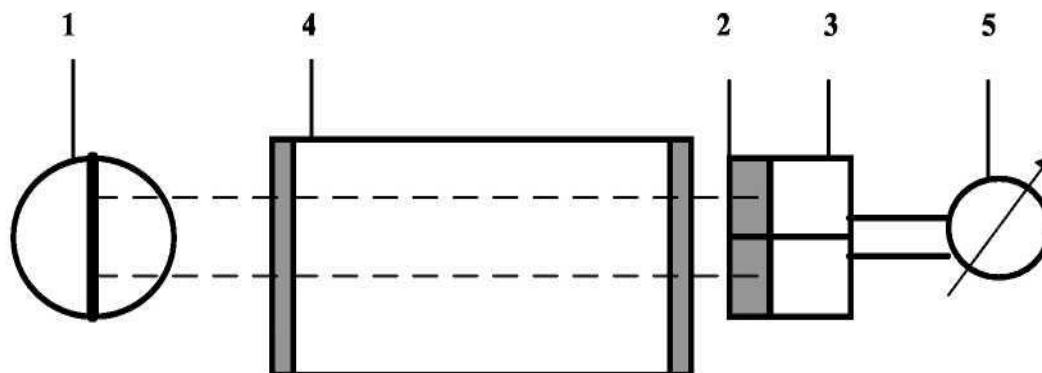


Рисунок 1.10 – Двоканальний газоаналізатор з неселективним приймачем випромінювання і пульсуючим джерелом випромінювання: 1 - пульсуюче джерело ГЧ-випромінювання; 2 - світлофільтри; 3 - приймачі ГЧ-випромінювання; 4 - кювета; 5- індикатор

Перспективою є розвиток приладів, в плані удосконалення засобів обробки інформації, що потрапляє з приймача випромінювання, а також створення схем з використанням нової елементної бази (типу імпульсних джерел випромінювання) і нестандартною компоновкою.

Так, наприклад, можна розташувати фільтри безпосередньо на приймачах випромінювання. Це використано в твердотільному приймачі, який умовно можна назвати селективним, а це, у свою чергу, дозволяє навіть за відсутності імпульсного джерела випромінювання усунути механічну систему передачі, розмістивши компактніший обтюратор на осі крокового двигуна (рис. 1.11). Це в свою чергу збільшує надійність, зменшує габарити приладів при майже тій самій вартості.

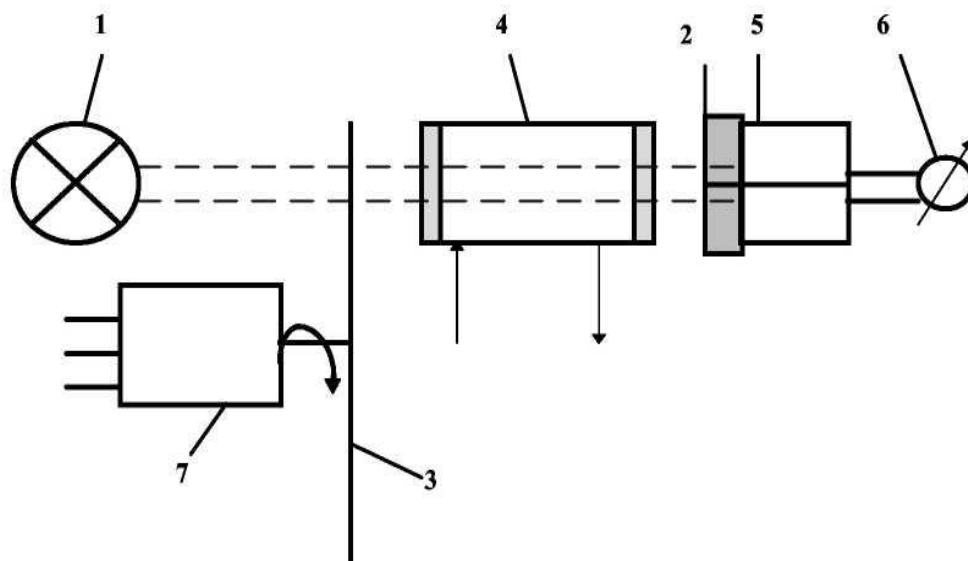


Рисунок 1.11 – Двоканальний газоаналізатор з неселективним приймачем випромінювання: 1 - джерело ГЧ-випромінення; 2 - світлофільтри; 3 - модулятор; 4 - кювета; 5 - приймачі ГЧ-випромінення; 6 - що показує прилад; 7 - кроковий двигун

2 ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ ВИЗНАЧЕННЯ ПОКАЗНИКА ЗАЛОМЛЕННЯ, ТИПІВ ВИМІРЮВАЧІВ КОНЦЕНТРАЦІЇ ГАЗІВ ТА ТЕХНІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ РОЗРОБКИ

2.1 Методи визначення показника заломлення газів

Існують два основних види методів визначення показника заломлення поглинаючого середовища — інтерферометрія і рефракція. Метод рефракції — метод призми, метод граничного кута, рефрактометр типу Пріше і рефрактометр типу Аббе.

2.1.1 Методи призми

Якісні гоніометри загального призначення є дорогим обладнанням, яке потребує кваліфікованого обслуговування, і коли потрібна максимальна точність і не критичні витрати часу, для вимірювань можна використовувати метод призми. Для великої кількості рутинних вимірювань і для деяких особливих випадків, коли використовується призмений метод (робота при високих температурах, використання невеликих кількостей рідин і т. д.), розроблені спеціальні конструкції більш простого, доступного, але не універсального обладнання. розроблені; деякі з них описані в цьому розділі.

2.1.2 Рефрактометр Хільгер – Ченс

Контроль виробництва сучасних оптичних стекол вимагає вимірювання показника заломлення з точністю декількох знаків 5-го ступення. Щоб зробити такі точні вимірювання за допомогою гоніомера, грані призми необхідно ретельно полірувати протягом тривалого періоду часу. Завдання швидкого вимірювання показника заломлення скла з точністю $1 \cdot 10^{-5}$ вирішувалося в різних країнах по-різному. Для цього відомі британські компанії Chancei Hilger створили спеціальний рефрактометр, заснований на відхиленні променів світла системою трьох призм [3].

Основною частиною приладу є V-подібний призмиений блок, що складається з двох призм 45-90-45 градусів, ретельно відполірованих і розміщених на оптичних контактах. Прямокутна порожнина, утворена цими призмами, містить зразок із двома майже перпендикулярними гранями. Грані зразка попередньо змочуються краплею контактної рідини, показник переломлення якої досить близький до вимірюваного показника переломлення зразка. Рідина заповнює нерівності поверхні зразка й клинчастий простір між гранями зразка й призм, що виникає при відхиленні заломлюючого кута зразка від прямого. Завдяки цьому відпадає необхідність полірувати зразок і точно вимірювати кут між його гранями, що дуже спрощує й прискорює виміру. Розрахунки показують, що зменшення різниці показників заломлення між контактною рідиною та зразком до 0,02 забезпечує точність вимірювання показника заломлення $1 \cdot 10^{-5}$, навіть якщо кут заломлення зразка відхиляється від прямої на $0,5'$.

Контроль виробництва сучасного оптичного скла вимагає виміру показників переломлення з точністю до декількох одиниць п'ятого знаку. При такій точності вимірів на гоніометрі необхідне ретельне й тривале полірування граней призм. Завдання швидкого виміру показників переломлення скла з точністю до $1 \cdot 10^{-5}$ вирішувалася в різних країнах по-різному. Відомими англійськими фірмами Ченс і Хільгер для цієї мети був створений спеціальний рефрактометр, заснований на відхиленні променів системою трьох призм [3].

Призми зразка та блоку утворюють трикутну систему призм.

У США використовуватимуть аналогічне обладнання для контролю оптичного скла [19].

Рефрактометри Hilger-Chance також можуть вимірювати показник заломлення рідин, для цього існує спеціальна кювета, яка являє собою блок, описаний вище, забезпечений бічними стінками та встановлений у порожньому металевому кожусі, з'єднаному з циркуляційним термостатом. Конструкція термостатованої сорочки, яка не щільно прилягає до кювети, не може вважатися вдалою, тому для точного вимірювання показника заломлення рідини може знадобитися персонал для термостатування приміщення. Перевагою цього типу ре-

фрактометра є те, що він може обробляти рідини з високою заломленням, показник заломлення яких виходить за межі більш поширених рефрактометрів з граничним кутом [8].

У сучасних рефрактометрах Пульфріха є V-подібні призмкові блоки й змінні коліматори, встановлення яких дозволяє використати всі переваги рефрактометрів Хільгер - Ченс.

2.1.3 Рефрактометр Джелі

Мікрорефрактометр Джелі, є найпростішим і дешевим з існуючих рефрактометрів. Прилад дозволяє здійснювати виміри показників заломлення нажто малих кількостей рідин (менш 10^{-4} мол). Такий прилад може бути виготовлений у будь-якій лабораторії [21]. Спочатку така конструкція призначалася для виміру показників заломлення рідин в одному з варіантів методу. Проте простота й доступність приладу забезпечили йому широке поширення для мікроаналізу органічних речовин. Також цей прилад застосовують у виробничих і фармацевтичних лабораторіях, де потрібні високі точності виміру порядку 10^{-3} .

Мікрокрапля рідини міститься в мініатюрну кювету, утворену притиснутим до невеликої скляної пластинки покривним склом (товщиною 0,2 мм), один край якого скошений під кутом 45° . Відшліфований край покривного скла з нанесеної на нього рідиною утворить описану в п. 3 систему із двох 45-градусних призм. Кювету встановлюється перед маленьким отвором у непрозорому екрані, за яким (на відстані близько 30 див) міститься вертикальна шкала із прорізаної в ній горизонтальної яскраво освітлюваної позаду щілиною. При із через мікрокювету з рідиною зображення щілини здається зміщеним по шкалі залежно від співвідношення показника переломлення досліджуваної рідини n і покривного скла N . На шкалі нанесені безпосередньо показники переломлення, які розраховуються по формулі, причому виправленням на зсув лучачи плоскопаралельною пластинкою при зазначеному досить великій відстані до шкали можна зневажити. У випадку самостійного виготовлення приладу можлива (і на-

віть краща) емпіричне калібрування шкали по рідинах з відомими показниками переломлення.

На рефрактометрі гель добре працює під білим світлом; зображення щілини розмите в спектрі, але не легко оцінити в межах 10^{-3} , використовуючи жовтий як еталон. Також можна використовувати оптичні фільтри [12].

Рефрактометр Jelli оснащений спеціальним електронагрівальним пристроєм, який може одночасно вимірювати температуру плавлення та показник заломлення в невеликій кількості, що дуже зручно для ідентифікації органічних речовин.

2.1.4 Рефрактометри типу Пульфіха

Рефрактометр Пульфіха є одним із основних приладів, який використовувався з кінця 11-го століття для вивчення сфер застосування хімії заломлення та для моніторингу виробництва оптичного скла.

Особливістю рефрактометра Pulfrich є використання джерела світла з лінійчастим спектром і вимірювальної призми з кутом заломлення 90° .

Для вимірювання показника заломлення рідини до вхідної (верхньої) грані призми, в яку наливають досліджувану рідину, приклеюють скло. Край верхньої поверхні призми відшліфовано в сферу, що робить вхідну грань круглою з радіусом трохи меншим за внутрішній діаметр чашки. У нижній частині чашки також є сферичний млин, який розмелює на сферичній частині призми. Завдяки цій конструкції призма та кювета ковзають вздовж вхідної поверхні променя, проходячи над з'єднанням кювети, не спотворюючись клейовим шаром.

Апарат для вимірювання кута ρ складається з оглядової труби і мікроскопа з мікрометричним окуляром, лінза якої щільно прикріплена до скляного обідка в корпусі приладу.

Взаємне розташування спектральних смуг залежить від відношення величини дисперсії вимірюваної речовини до скла призми. Чим більше вони відрізняються, тим більша видима відстань між смугами.

2.1.5 Рефрактометри типу Аббе

Цей тип рефрактометра, створений понад сто років тому, відкрив можливість широкого застосування рефрактометра завдяки геніальним конструктивним рішенням, які значно спростили техніку вимірювань і досі є найпоширенішими [1].

особливостями рефрактометрів Аббе є розташування вимірювальної призми, наявність додаткової так званої освітлювальної призми, використання для вимірювань «білого» (денного або штучного) світла, конструкція шкали. Прилад має вимірювальну призму з важкого кременю з кутом заломлення близько 60° . Краплю рідини, яку потрібно виміряти, поміщають на гіпотенузу (вхідну) грань цієї призми і стискають допоміжною (освітлювальною) призмою, залишаючи дуже тонкий (0,1-0,2 мм) шар між гранями гіпотенузи двох призм. Світлові промені потрапляють на допоміжну призму, потрапляють в рідину, заломлюються на межі з повітрям і потрапляють в оптичну трубу. При цьому методі рідинного освітлення не вдається отримати промені, які строго ковзають по вхідній грані вимірювальної призми. Оскільки що шар рідини дуже тонкий, тому граничний промінь, що спостережуваний у такій системі, відповідає граничному променю повного внутрішнього відбиття у необхідних межах точності.

Гіпотенуза світловипромінювальної призми виконана в матовій поверхні, щоб спостереженню лінії поділу не заважало зображення предметів, які знаходяться близько до джерела світла і випадково потрапляють в поле зору бочка об'єктива. Тип скла і кутовий розмір освітлювальної призми не мають значення.

Вимірювальні та освітлювальні призми встановлені в порожніх металевих сорочках (камерах), через які може циркулювати вода. Зовнішня поверхня камери, що контактує з вимірюваною рідиною, має антикорозійне покриття (нікель, золото). Камери шарнірно з'єднані між собою, утворюючи призматичний блок – найважливішу частину рефрактометра Аббе. Призматичний блок Аббе — це геніальна конструкція, яка забезпечує точні зміни, а також надійна для відносно невеликих кількостей рідини (0,05 моль).

Іншою помітною особливістю рефрактометра Аббе є його використання для вимірювання білого світла. Коли спостерігається повне внутрішнє відображення під білим світлом, межа між світлим і темним контрастом не є різкою, а розмитою райдужною спектральною смугою через дисперсію. Для усунення цього ефекту застосовую компенсатор дисперсії, який установлюваний перед об'єктивом зорової труби [15].

Шкала рефрактометра Аббе прямо масштабується зі значенням показника заломлення n_v . Обчислення не потрібні, а весь процес вимірювання займає лише кілька хвилин. У сучасних моделях шкала проектується на вид труби і видна одночасно з граничною лінією повного внутрішнього відбиття.

2.1.6 Основні інтерферометричні методи

Серед інтерферометричних приладів, що застосовуються в хімічних лабораторіях, найбільше поширення набули інтерферометри типу Релея. У цих інтерферометрах, призначених для точного вимірювання невеликих різниць у показниках заломлення рідин і газів, використовується явище дифракції Фраунгофера, про яке йшлося вище. Особливістю інтерферометрів типу Релея є можливість реалізації системи другої смуги, яка служить еталоном для вимірювання зміщення основної смуги.

Завдяки використанню еталонних брусків зменшується вплив механічної деформації приладу та підвищується точність вимірювання. Ще однією особливістю інтерферометрів типу Релея, пов'язаних з використанням дифракції Фраунгофера, є необхідність використання малих відстаней між щілинами і, як виявилось, між кюветами з речовинами порівняння. Отже, якщо відстань між щілинами 15 мм, фокусна відстань 200 мм, а довжина хвилі 600 нм, то ширина інтерференційної смуги становить лише 0,008 мм.

Для того, щоб дозволити такий вузький діапазон частот, необхідно використовувати дуже вузький проміжок на вході. Близькість кювети до порівнюваної речовини полегшує звичайне аналітичне застосування інтерферометра, але

не дозволяє використовувати схему Релея, коли речовина, що порівнюється, повинна мати іншу температуру або коли неможливо визначити місцезнаходження кювети. містить стандартну речовину в експериментальних умовах поруч із речовиною, що випробовується. У цьому випадку використовується інтерферометр типу Джамена, який характеризується потенційно значно збільшеним розрідженням когерентного пучка і високою яскравістю інтерференційних смуг.

В інтерферометрі Джамена роздвоєння потоку пучка здійснюється за допомогою точної плоскопаралельної пластини 1 з однорідного оптичного скла. Різниця ходу, що залишилася, змінюється залежно від нахилу балки. Використовуючи розширене джерело в полі зору, з'являється ряд рівномірних ізоклінічних смуг. У монохроматичному світлі однаково чітко видно смуги низького і високого порядку. Їх ширина збільшується в міру зменшення кута між пластинами. У білому світлі можна розрізнити ахроматичні смуги і кілька максимумів першого порядку. Однак значне розрідження інтерферуючого променя в інтерферометрі Джамена вимагає використання дуже товстих пластин з надзвичайно високою оптичною однорідністю та механічної обробки з найвищою точністю, чого важко досягти на практиці. Інтерферометр Маха-Цендера досягає екстремального розрідження інтерферуючого променя за схемою, подібною до інтерферометра Джамена, але кожна плоскопаралельна пластина замінена комбінацією напівпрозорих пластин. й плоского дзеркала. У тих випадках, коли потрібно значне видалення заважаючих променів, наприклад, дослідження однорідності більших скляних пластин, нагрітих або сильно охолоджених об'єктів, спостереження конвективних потоків повітря, кювет з порівняльними речовинами тощо, зручний інтерферометр Майкельсона.

Велике розведення інтерферуючих променів у схемі Майкельсона також має позитивні якості, але призводить до деяких труднощів проектування, оскільки пристрій стає чутливим до вібрації, механічних і температурних деформацій. Якщо кювету знімати не потрібно, інтерферуючі промені можна паралелі-

зувати і звести разом за допомогою додаткового дзеркала. Наприклад, така схема була реалізована в лабораторному інтерферометрі фірми Кіндер [3].

Переміщення інтерференційних смуг відбувається внаслідок проходження світла через кюветну камеру з речовиною порівняння і може бути виміряно різними способами:

1. Коли смуга поступово переміщується внаслідок зміни стану (концентрації, температури або тиску) однієї з речовин можна вважати смуги безпосередньо (у монохроматичному світлі), які проходять повз мітки (хреста) в окулярі.

2. Вимірювання зі зсувами можна проводити, змінюючи нахил однієї з пластин (або допоміжної призми) за допомогою мікрометричного гвинта для повернення інтерференційної картини в нульове (початкове) положення. У цьому випадку нульову смугу визначають за відсутністю кольорової рамки (у білому світлі), її положення відзначають на шкалі мікрометра, а кількість смуг підраховують при повільному обертанні мікрометра в монохроматичному світлі в іншу частину. його шкали, що відповідає положенню стрічки.

3. Інтерферограма повертається у вихідне положення. Вимірювання зсуву смуги можна досягти шляхом введення спеціального оптичного компенсатора різниці ходу.

4. Зміщення інтерференційної картини можна виміряти прямим зчитуванням на шкалі в межах поля зору приладу. Величина граничного кута на межі двох речовин залежить тільки від показників заломлення цих речовин.

2.1.7 Визначення показників заломлення методом граничного кута

На границі двох речовин величина граничного кута залежить лише від показників заломлення цих двох речовин. Отже, якщо відомо показник заломлення однієї речовини, то показник заломлення іншої речовини можна визначити, вимірявши граничний кут ϕ :

$$n_1 = n_2 \cdot \sin \phi. \quad (2.1)$$

Зручність цього способу в тому, що потрібен тільки один кут, а досліджуваному тілу не потрібно суворо надавати певну геометричну форму, оскільки для спостереження повного внутрішнього відбиття лише істотними є наявність плоскої границі.

Волластон, очевидно, вперше використав вимірювання граничного кута для визначення показника заломлення на початку 11 століття. З кінця XI ст. Коли була створена зручна конструкція спеціальних рефрактометрів, метод граничного кута став загальноприйнятим і в цей час став найважливішим методом вимірювання показника заломлення в хімічних застосуваннях рефрактометрів.

Важливою частиною більшості рефрактометрів, заснованих на визначенні граничного кута, є вимірювальна призма з оптичного скла з відомим показником заломлення N . Одна грань вимірювальної призми (так звана вхідна поверхня) приводиться в оптичний контакт з вимірюваним об'єктом і діє як межа розділу для заломлення та повного внутрішнього відбиття. Заломлення або відбиття світла на цій грані спостерігається, як правило, через другу (вихідну) грань призми в оптичну трубу.

Як зазначалося вище, кут α між вхідною гранями та вихідною гранями називається кутом заломлення призми. Промені, що відповідають граничному куту φ і граничному радіусу, після заломлення на границі скло та призми, тоді повітря становить деякий кут β із нормаллю до вихідної грані. При дослідженні граничних променів, що виходять із призми, поле зору труби ділиться на світлу і темну частини, причому межа між ними відповідає граничним променям.

Різні типи кутових рефрактометрів відрізняються вимірюванням величини кута заломлення призми, величиною показника заломлення, конструкцією гоніометричного приладу і використанням джерелом світла. Кожен рефрактометр граничного променя придатний тільки для вимірювання показника заломлення в певних межах його значення і не є в цьому відношенні абсолютно універсальним приладом. Верхня межа вимірюваного показника заломлення n залежить від показника заломлення скла вимірювальної призми N . З показаного на малюнку способу спостереження граничного променя неважко побачити, що

необхідно дотримуватися нерівності $n < N$, тобто вимірний показник заломлення має бути меншим за показник заломлення вимірювальної призми. Нижня межа вимірювання n залежить від конструкції приладу (кута α , розміру призми, кутомірного пристрою).

З наведеного вище видно, що в методі граничного кута кут ϕ зазвичай не вимірюється безпосередньо, а вимірюється кут β між граничним променем і нормаллю вихідної поверхні. Формулу, що зв'язує кут з показником заломлення n досліджуваної речовини, неважко отримати, враховуючи заломлення граничного променя на поверхні призми. Для повного внутрішнього відбиття вхідної грані пов'язані співвідношенням

$$\sin \phi = \frac{n}{N}. \quad (2.2)$$

Для об'єктивної реєстрації положення світлотіньової границі при вимірюванні граничного кута запропоновано спеціальний оптико-електронний прилад, який може вимірювати показник заломлення не тільки у видимій області світлі, але і в ближньому пучку. Показник заломлення вимірюється з похибкою 10-6 - інфрачервона область спектра. Для точної електрооптичної реєстрації необхідно враховувати кривизну межі повного внутрішнього відбиття.

2.1.8 Типи методів граничного кута

Наведений спосіб спостереження повного відбиття площини прозорої призми є основним варіантом методу граничного кута. Цей підхід буде використовуватися в більшості конструкцій рефрактометрів, що використовуються для вимірювань показників заломлення рідин й ізотропних твердих кристалів. Однак рефрактометри граничного кута зі скляною призмою є незручними для вимірювань при надто високих або надто низьких температурах. Рефрактометри цього типу також є незручними для вимірювання показників заломлення анізотропних кристалів, а також для роботи в невидимих областях спектра.

При розгляді граничних кутів на плоских призмах виявилось неможливим побудувати широкодіапазонну установку з рівномірною шкалою показника за-

ломлення, що є дуже бажаним для точності обчислень і для вимірювання градієнтів показника заломлення. Тому перед детальним описом техніки вимірювання рефрактометром у наступних розділах варто розглянути деякі інші варіанти методу граничного кута, який використовується в окремих випадках, описаних вище.

2.1.9 Спосіб скляної півсфери

У цьому варіанті полярного методу світлові промені заломлюються: не на грані призми, а на скляній півсфері з високим показником заломлення. Випробуваний об'єкт здійснює оптичний контакт з плоскою поверхнею півсфери і висвітлюється пучком світла, що ковзає по поверхні. Границя між світлою і темною частинами поля зору при огляді через оптичну трубу відповідає граничним променям, заломленим у центрі півкулі. Промені, що виходять радіально з центру півкулі, не заломлюються на сферичній поверхні, а тому кутомірний пристрій дає змогу безпосередньо визначити граничний кут. Показник заломлення досліджуваної речовини розраховують за найпростішою формулою, для якої необхідно знати показник заломлення складеної півсфери.

Умова радіального огляду граничного променя вимагає, щоб вісь обертання світлопровода проходила точно через центр півкулі. У зв'язку з цим потрібні спеціальні (досить складні) налаштування на півсфері, що робить розглянутий метод менш зручним для точних вимірювань, ніж метод призми. Однак при вимірюванні показника заломлення анізотропних кристалів півкулі мають дуже значні переваги перед призмами. Перевага полягає в можливості змінювати положення досліджуваного об'єкта відносно падаючого на нього світла обертанням півсфери навколо вертикальної осі АВ.

При вимірюванні показника заломлення анізотропного кристала необхідна певна орієнтація по відношенню до світла. Тому напівсферичний метод широко використовується в різних моделях так званих рефрактометрів для мінералогічних і кристалографічних досліджень.

2.1.10 Спосіб призми із циліндричною гранню

Ці роботи демонструють переваги спостереження повного внутрішнього відбиття на циліндричних немодифікованих поверхнях. Припустимо, прямокутна призма, гіпотенуза якої має форму увігнутого циліндра радіуса r , що контактує з рідиною n . Якщо відірвати призму від поверхні і просвітити рідину через одну площину, а подивитися через іншу, то спостерігати межу повного внутрішнього відбивання, положення якої буде визначати форму призми і величину граничного кута ϕ . Буква S позначає відстань від лінії розділення повного внутрішнього відбиття на циліндрі призми до площини, що проходить через вісь циліндра O і перпендикулярна до вихідної поверхні призми, одержимо співвідношення

$$\frac{S}{r} = \sin \phi, \quad (2.3)$$

або, беручи до уваги:

$$n = \frac{SN}{r} = \text{const } S. \quad (2.4)$$

Тому визначення показника заломлення рідини n зводиться до вимірювання пропорційної йому відстані S . Це вимірювання можна зробити за допомогою рівномірної шкали, спроектованої в поле зору напівпрозорим дзеркалом. Для максимальної точності межі перегляду можна збільшити систему лінз, а висвітлення здійснюється за допомогою коліматора крізь циліндричну вхідну грань. У такий кюветі можна досліджувати безпосередньо дифузійні та інші процеси, які приводять уздовж осі циліндричної поверхні до виникнення градієнта показника заломлення.

Призма з увігнутою циліндричною поверхнею може служити датчиком проточного рефрактометра, якщо вона буде вбудована в стінку трубопроводу та не заважати току рідини.

2.1.11 Спосіб плоскопаралельних пластинок

Майже одночасно з появою перших рефрактометрів Відеманн запропонував простий спосіб вимірювання граничного кута на межі з повітрям замість використання вимірювальної призми (або півсфери) зі скла, як у вищезгаданому пристрої. Дві прозорі пластини A_1 і A_2 склесні своїми краями так, що між ними знаходиться тонкий шар повітря B . Обидві пластинки занурені в рідину в посудині з вікнами O_1 і O_2 . Пластинки можна обертати в рідині навколо вертикальної осі, перпендикулярної до площини графа, вимірюючи їх кут. Якщо через посудину з рідиною спостерігати паралельний пучок світла, обертати пластину, то при певному куті повороту на межі з шаром повітря виникне повне внутрішнє відбивання. У цей час в полі зору з'явиться межа між темним полем і світлим полем, що відповідає граничному світлу. Різкість межі світлотінь залежить від товщини повітряного прошарку, яку підбирають дослідним шляхом, поміщаючи між краями пластин листочки слюди або фольги потрібної товщини.

Коли промінь світла падає з рідини з показником заломлення n під кутом i на пластину з показником заломлення N , він заломлюється спочатку на межі з рідиною, а потім на межі з шаром повітря. Відповідно до закону заломлення світла спостерігайте за співвідношенням між пластиною та рідиною

$$n \cdot \sin i = N \cdot \sin i_1, \quad (2.5)$$

а на границі з повітряним прошарком

$$N \cdot \sin i_1 = \sin i_2, \quad (2.6)$$

звідки

$$n \cdot \sin i = \sin i_2. \quad (2.7)$$

Для граничного променя $i_2 = 90^\circ$ й $\sin i_2 = 1$, отже

$$n = \frac{1}{\sin i_{\text{ПРЕД}}}. \quad (2.8)$$

Отже, знаючи кут u , під яким відбувається повне відбивання, можна визначити показник заломлення рідини. На практиці кут повороту пластини вимірюється від одного повністю відбиваючого положення до іншого, де нормаль до поверхні пластини знаходиться під тим самим кутом, що й падаючий промінь, але нахилена в протилежному напрямку. Цей кут повороту дорівнює

$$n = \frac{1}{\sin \frac{\theta}{2}} = \cos ec \frac{\theta}{2}. \quad (2.9)$$

Цей кут повороту дорівнює важливій особливості методу Відемана, що показник заломлення N пластини може залишатися невідомим, а розмір пластини не відіграє істотної ролі.

Повітряний проміжок між пластинами можна спорожнити, щоб можна було безпосередньо виміряти абсолютний показник заломлення. Завдяки цим характеристикам метод плоскопаралельних пластин є зручним.

Спосіб Відемана є корисним при визначенні показників заломлення зріджених газів. Спосіб Відемана також використаний у рефрактометрі для текстильних волокон. Недоліком цього способу Відемана є те, що для вимірювань потрібно порівняно велика кількість досліджуваної рідини.

2.1.12 Вимір малих різниць показників заломлення рідин по Гальваксу

Сучасні рефрактометри зі скляною призмою вимірюють показник заломлення з точністю до кількох одиниць 10^{-5} . Проте точність вимірювань невеликих відмінностей у показниках заломлення рідин (наприклад, розбавлених розчинів і розчинників) можна значно підвищити, якщо використовувати метод граничного кута, запропонований Гальваксом.

У методі Гальвакса порівнювані рідини поміщають у відсіки кювет. Перегородка кювети 1 і одна зі стінок 2 виконані з плоскопаралельних пластин,

строго перпендикулярних одна одній. Інші стінки кювети зроблені з простого дзеркального скла. Кювету встановлюють на платформу гоніометра і освітлюють монохроматичним світлом так, щоб вона ковзала по перегородці з боку рідини з меншим показником заломлення. У цьому випадку відрив кювети від рідини з більшим показником заломлення ($n > n_0$) виконує роль виміральної призми з кутом заломлення $\alpha = 90^\circ$.

Основна формула приймає для розглянутого випадку вид

$$n_0 = \sqrt{n^2 - \sin^2 \beta}. \quad (2.10)$$

Кут виходу граничного променя вимірюють гоніометром. Враховуючи, що в нашому випадку різниця $n - n_0$ невелика, рівняння можна перетворити так

$$n - n_0 = \sin^2 \frac{\beta}{2n_0}. \quad (2.11)$$

Точність виміру різниці $n - n_0$ визначається точністю виміру кута $n_0 \approx n$ відповідно до формули

$$\Delta n = \frac{\sin \beta \cdot \cos \beta}{n_0} \Delta \beta. \quad (2.12)$$

Якщо ми врахуємо, що кут β неважко виміряти з точністю до $0,1'$, то легко побачити, що методом Гальвакса можна виміряти невеликі відмінності показника заломлення ($< 0,01$) з точністю до декількох одиниць знаків одного шостий (10^{-6}). Однак слід пам'ятати, що для забезпечення такої точності необхідно, щоб усі частини кювети були абсолютно однакових температур. Крім того, зі зменшенням кута умови спостереження граничного променя стають все більш несприятливими, різкість межі зменшується і точність її візуалізації.

2.2 Загальна класифікація вимірювачів концентрації

При здійсненні цілого ряду виробничих процесів виникає необхідність вести безперервні або періодичні виміри концентрації речовини безпосередньо в технологічній лінії (виробничому агрегаті). Прилади, призначені для таких вимірів, називаються автоматичними вимірювачами концентрації.

Вимірювачі концентрації бувають показними і самописними, причому показні і самописні пристрої можуть бути встановлені або поблизу контрольованого об'єкта, або на відстані від нього. Застосування вимірювачів концентрації у сполученні з іншими пристроями дозволяє також автоматично регулювати концентрації речовини в технологічній лінії.

За принципом дії вимірювачі концентрації ділять на наступні основні групи:

2.2.1 Поплавкові вимірювачі концентрації

Поплавкові, основані на залежності між густиною рідини та газу і виштовхуючою силою, що діє на поплавець, занурений у контрольовану речовину.

Дія густиномірів, чутливим елементом яких є поплавець тієї або іншої форми й конструкції, засновано на принципі ареометра. Подібно ареометрам, поплавці бувають частково або повністю занурені; надалі для стислості перші йменуються плаваючими, а другі - зануреними. При зміні густини газу, у яких перебуває поплавець, змінюється виштовхуюча сила і поплавець переміщується відповідно нагору або вниз. Мірою густини є або переміщення поплавця, або виштовхуюча сила, діюча на поплавець. До цієї ж підгрупи належать й прилади компенсаційного типу, де поплавець увесь час залишається в нейтральному (вихідному) положенні, а сила, що виштовхує, урівноважується (компенсується) протилежно направленим зусиллям, створеним тим або іншим пристроєм, причому мірою густини служить та фізична величина, що яким-небудь способом перетвориться в зусилля, що врівноважує.

Існує багато різновидів густиномірами даної групи, що відрізняються конструкцією й формою поплавця, пристроєм для стабілізації потоку через ви-

мірювальну посудину, типом (механічні, електричні, пневматичні, оптичні прилади) і принципом дії (індуктивні, потенціометричні й ін.) перетворювача переміщень поплавця, способом температурної компенсації й т.д.

У густиномірів із плаваючим поплавцем для рідин залежність між глибиною l занурення поплавця й шуканою густиною ρ приймає вигляд

$$\rho = \frac{M + (V + lS)D}{V + lS - La}, \quad (2.13)$$

де M – маса поплавця за винятком маси повітря в його об'ємі; L і S – довжина окружності й площа поперечного переріза стрижня поплавця; V – об'єм поплавця без стрижня; a – капілярна постійна.

Простота конструкції густиноміра дозволяє виготовляти його з корозійно-стійких матеріалів, застосовувати при роботі з агресивними рідинами й при високому тиску.

Похибка ланцюжкового густиноміра $\pm 1,5\%$, а з термокомпенсацією - до $\pm 3\%$.

2.2.2 Зважувальний вимірювачі концентрації

Принцип дії зважувальних вимірювачів концентрації оснований на тому, що маса речовини при незмінному його об'ємі прямо пропорційна густині, тобто для виміру густини досить безупинно зважувати певний об'єм речовини, що протікає по трубопроводу.

Основні переваги цих вимірювачів концентрації: можливість застосування для пульп, суспензій, забруднених, грузлих та летучих рідин, газів; незалежність показів від властивостей і швидкості протікання газу; можливість виміру при підвищеному тиску до 2,5 МПа (25 кгс/см²); постійний поперечний переріз вимірювальної порожнини приладу, що виключає осадження твердих добавок, що містяться в потоці; висока чутливість і мала погрішність (від $\pm 0,5$ до $\pm 1\%$); можливість регулювання діапазону вимірювань у широких межах (від 100 до

2000 кг/м³). Область застосування зважувальних вимірювачів концентрації обмежена через неприпустимість газових добавок у рідині.

Типова схема, у якій безпосередньо реалізується зазначений вище принцип. Вимірювальна посудина відомого об'єму з'єднана знизу й зверху із гвинтовими трубчастими пружинами, які служать для введення й відводу рідини. Маса посудини як міру шуканої густини вимірюють за допомогою коромислових ваг.

Для густиноміра, рівняння рівноваги системи має вигляд

$$(m + V\rho)g = Mg + Cx; \quad (2.14)$$

де m , V – маса й об'єм посудини; M – маса противаги; C , x – твердість і переміщення пружини. При початковій щільності ρ_0

$$M = m + V\rho_0. \quad (2.15)$$

Тоді

$$x = \frac{gV}{C}(\rho - \rho_0). \quad (2.16)$$

Переміщення пружини й противаги, що є функцією шуканої густини, фіксується за допомогою індуктивного перетворювача. Похибка приладу становить ± 1 % діапазону вимірювань.

Діапазон вимірів 10 — 1300 кг/м³. Тиск, що допускає, 2,5 Мпа. Приведена похибка (при швидкості потоку до 5 м/с) $\pm 1,5$ %.

2.2.3 Радіоізотопні вимірювачі концентрації

Радіоізотопні, у яких використовується ослаблення інтенсивності випромінювання радіоактивних ізотопів при проходженні через газ.

Важливими достоїнствами радіоізотопних густиномірів є можливість виміру у важкодоступних місцях і відсутність контакту елементів приладу з контрольованим середовищем. Їх доцільно застосовувати для виміру густини агресив-

них або досить густих рідин, пульп і рідин, що перебувають під високим тиском або мають високу температуру, а також у трубопроводах великого діаметра, однак, лише в тих випадках, коли інші густинімири практично не можуть бути застосовані. Прикладом радіоізотопного густинімиру газу є електронний густинімір.

Істотним недоліком цих приладів є залежність показань від фізичних властивостей речовини, що вимагає індивідуального градування приладу для даної речовини.

У радіоізотопних густинімирах використовують три види ядерного випромінювання: альфа, бета й гама. Альфа-частинки є ядрами гелію, які швидко рухаються і складаються із двох протонів і двох нейтронів, і мають позитивний електричний заряд. Бета-випромінювання являє собою потік електронів або позитронів, що випускають ядрами атомів і рухаються зі швидкістю, близькою до швидкості світла. Гамма-випромінювання - це електромагнітні коливання з дуже малою довжиною хвилі - до $0,4 \cdot 10^{-10}$ м. Гамма-промені характеризуються значно більшою проникаючою здатністю в порівнянні з бета-частинками.

Альфа-випромінювання має малу довжину пробігу часток і тому застосовується тільки в густинімирах для газів. Бета- і гамма-випромінювання використовують у густинімирах для рідин і твердих речовин.

Проходження гамма-променів через речовину супроводжується ослабленням інтенсивності випромінювання (енергія випромінювання переходить в інші форми енергії). Ослаблення інтенсивності випромінювання визначається, з одного боку, енергією падаючого пучка і його спектральним складом, а з іншого боку - густиною й хімічним складом вимірюваного середовища. Поглинання гамма-випромінювання речовиною описується експонентним рівнянням

$$I = I_0 e^{-\eta d \rho}, \quad (2.17)$$

де I_0 - початкова інтенсивність пучка гамма-променів; I - інтенсивність гамма-випромінювання, що пройшло через шар речовини товщиною d і щільністю ρ ; η - масовий коефіцієнт поглинання випромінювання.

Діапазон шкали становить від 50 до 1000 кг/м³; діапазон вимірів 300-3500кг/м³; похибка ± 2 % діапазону шкали.

2.2.4 Вібраційні вимірювачі концентрації

До вібраційних вимірювачів концентрації відносять прилади, принцип дії яких заснований на залежності між параметрами пружних коливань, переданих трубці (посудині) з досліджуваною речовиною, з одного боку, і густиною речовини - з іншого. У цих густиномірах вимірюють функціонально пов'язану з густиною речовини частоту власних коливань резонатора.

Частота f_0 власних коливань механічного резонатора визначається співвідношенням

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{C}{m}}, \quad (2.18)$$

де C і m - твердість і маса резонатора відповідно.

Основними достоїнствами, що обумовили зростаюче застосування вібраційних густиномірів, є: висока точність, чутливість і надійність, безпосереднє перетворення обумовленого значення густини в частотний вихідний сигнал, можливість застосування при високих тисках для широкої номенклатури контрольованих середовищ (газів, рідин). До недоліків відносяться обмеження витрат речовини (визначається площею перетину проточного каналу), нелінійність шкали, необхідність спеціальних мір для компенсації впливу температури й тиску на параметри резонатора.

У віброчастотних густиномірах використовують два способи вимірювання:

- 1) частоту резонатора порівнюють із частотою опорного генератора, а вплив температури й тиски речовини компенсують за допомогою відповідних датчиків;
- 2) частоту резонатора з контрольованою речовиною порівнюють із частотою компенсаційного резонатора, заповненого допоміжною рідиною відомої густини.

Чутливими елементами вібраційних густиномірів можуть бути різного роду резонатори - електромагнітні або механічні (у вигляді коливного циліндра, стрижня, струни, пластини, камертона й т.д.). Резонатор приводиться в режим автоколивань на власній резонансній частоті, обумовленій густиною речовини, що перебуває в ньому або навколо його.

Механічні резонатори мають істотно більшу добротність у порівнянні з електромагнітними, тому густиноміри з електромеханічними коливальними системами одержали переважний розвиток і поширення.

Залежність періоду T коливань резонатора від щільності рідини має вигляд

$$T = T_0 \sqrt{1 + k\rho}, \quad (2.19)$$

де T_0 - початковий період коливань ($\rho = 0$); k - коефіцієнт чутливості. Значення T_0 залежить від розмірів резонатора й положення перемичок, а k визначається відношенням внутрішнього об'єму до маси одиниці довжини трубки.

Для виміру густини газів під високим тиском служить заглибний камертонний густиномір, у якому незатухаючі коливання камертона 16 на власній частоті збуджуються за допомогою працюючої на самозбудженні системи, що складається із двох пар полюсних наконечників постійних магнітів 14 з котушками 15 і транзисторного підсилювача 13; підсилювач підсилює електричні коливання, що надходять із однієї пари котушок, і подає їх на іншу пару. Сигнали від підсилювача рівняються зі стандартною частотою від кварцового генератора, і різниця, що є мірою густини газу, фіксується частотоміром. У відносно ву-

зькому діапазоні значень густини частота практично лінійно залежить від густини. Похибка становить $\pm 1\%$ (при постійній температурі).

2.2.5 Ультразвукові вимірювачі концентрації

Ультразвукові, основані на вимірі швидкості поширення або інтенсивності ультразвуку в газі.

Важливими достоїнствами радіоізотопних густиномір є можливість виміру у важкодоступних місцях і відсутність контакту елементів приладу з контрольованим середовищем. Їх доцільно застосовувати для виміру густини агресивних або досить грузлих рідин, пульп і рідин, що перебувають під високим тиском або мають високу температуру, а також у трубопроводах великого діаметра, однак, лише в тих випадках, коли інші густиноміри практично не можуть бути застосовані. Прикладом радіоізотопного вимірювача концентрації газу є електронний вимірювач концентрації.

Істотним недоліком цих приладів є залежність показань від фізичних властивостей речовини, що вимагає індивідуального градування приладу для даної речовини.

У радіоізотопних густиномірах використовують три види ядерного випромінювання: альфа, бета й гама. Альфа-частинки є ядрами гелію, які швидко рухаються і складаються із двох протонів і двох нейтронів, і мають позитивний електричний заряд. Бета-випромінювання являє собою потік електронів або позитронів, що випускають ядрами атомів і рухаються зі швидкістю, близькою до швидкості світла. Гамма-випромінювання - це електромагнітні коливання з дуже малою довжиною хвилі - до $0,4 \cdot 10^{-10}$ м. Гамма-промені характеризуються значно більшою проникаючою здатністю в порівнянні з бета-частинками.

Альфа-випромінювання має малу довжину пробігу часток і тому застосовується тільки в густиномірах для газів. Бета- і гамма-випромінювання використовують у густиномірах для рідин і твердих речовин.

Проходження гамма-променів через речовину супроводжується ослабленням інтенсивності випромінювання (енергія випромінювання переходить в

інші форми енергії). Ослаблення інтенсивності випромінювання визначається, з одного боку, енергією падаючого пучка і його спектральним складом, а з іншого боку - густиною й хімічним складом вимірюваного середовища. Поглинання гамма-випромінювання речовиною описується експонентним рівнянням

$$I = I_0 e^{-\eta d \rho}, \quad (2.20)$$

де I_0 - початкова інтенсивність пучка гамма-променів; I – інтенсивність гамма-випромінювання, що пройшло через шар речовини товщиною d і щільністю ρ ; η – масовий коефіцієнт поглинання випромінювання.

Діапазон шкали становить від 50 до 1000 кг/м³; діапазон вимірів 300-3500 кг/м³; похибка $\pm 2\%$ діапазону шкали.

2.2.6 Оптичні вимірювачі концентрації

Оптичні, основані на вимірі показника заломлення або граничного кута відбивання газу.

Концентрацію газу можна виміряти оптичним методом по зміні показника заломлення. Показник заломлення газу n зв'язаний лінійно з концентрацією молекул - числом часток в одиниці об'єму N - лінійною залежністю

$$(n-1) \approx N. \quad (2.21)$$

Число молекул в одиниці об'єму для ідеального газу можна обчислити на основі рівняння стану відповідно до формули

$$N = N_0 \frac{pT_0}{p_0T}, \quad (2.22)$$

де N_0 - постійна Лошміта (число Лошміта), рівна числу атомів в одиниці об'єму ідеального газу при нормальних умовах, p - тиск; T - абсолютна температура; $T_0 = 293,16$ К; $p_0 = 1025$ ГПа (760 Тор).

$$N_0 = \frac{N_A}{V_{\text{мол}}} = 2,6868 \cdot 10^{14} \text{ (ат / см}^3\text{)}, \quad (2.23)$$

де N_A - постійна Авогадро.

Виходячи з математичних викладок Лоренцо можна вивести формулу, яка пов'язує показник заломлення, питому рефракцію та поляризуємість.

$$R = \frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} \cdot \frac{M}{\rho} = 2.52 \cdot 10^{24} \alpha, \quad (2.24)$$

де R – питома рефракція, n – показник заломлення, M – молекулярна маса, ρ – густина газу, α – поляризуємість.

Тобто показник густина дорівнює

$$\rho = \frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} \cdot \frac{M}{2.52 \cdot 10^{24} \alpha}, \quad (2.25)$$

Для кожного газу α , M мають специфічне значення.

Методи виміру показників заломлення за ознакою явищ, що використовуються в них, можна розділити на наступні групи:

- 1 Методи, у яких безпосередньо використовується закон заломлення (вимірювання зводяться до визначення кутів відхилення світлових променів). Ці методи застосовуються в основному для виміру показників заломлення прозорих і слабкопоглинаючих речовин.
- 2 Тіньові методи, які використовуються переважно для вивчення неоднорідностей або розподілу оптичних властивостей у межах досліджуваного зразка. Ці методи застосовуються для прозорих речовин.
- 3 Інтерференційні методи, у яких показник заломлення впливає на величину різниці ходу між інтерферуючими світловими пучками.
- 4 Методи, що використовують формули Френеля про співвідношення інтенсивностей і поляризації між падаючим, відбитим і переломленим на границі розділу двох середовищ світловими пучками. Найбільш ефективні ці

методи при дослідженні оптичних властивостей сильнопоглинаючих середовищ, наприклад металів.

Такий поділ є умовним, тому що в деяких методах одночасно сполучаються кілька фізичних явищ, які можна віднести до різних груп.

2.3 Галузь використання оптико-електронного вимірювача концентрації газу

Збереження енергетичних ресурсів є одним із стратегічних завдань моєї країни і має пріоритетне опорне значення у вирішенні проблеми виснаження запасів енергоносіїв, таких як природний газ і нафта.

Проведення досліджень, пов'язаних з контролем якості природних газів, є однією із прикладних наукових проблем, спрямованої на зниження енергетичних витрат на об'єктах паливно-енергетичного комплексу країни, що особливо актуально на початку ХХ століття.

Природний газ як вид палива відіграє найважливішу роль у світовому енергоспоживанні.

Негативний вплив природного газу на навколишнє середовище менше, ніж від інших видів палива.

У структурі первинного виробництва енергоносіїв України питома вага природного газу становить більше 50 %. Експорт природного газу у більш ніж 25 країн далекого й ближнього зарубіжжя є одним з основних джерел валютних і податкових надходжень у державну скарбницю.

При постачанні постачальниками природного газу вітчизняних споживачів між ними виникають розбіжності з питань взаємних розрахунків за газ. Як правило, причинами розбіжностей є претензії споживачів до енергоскладу газу, що представляє собою добуток об'ємної теплоти (енергії) згоряння на об'єм газу, що поставляє.

Однією із причин подібних розбіжностей є використання споживачами й постачальниками природного газу різних методів вимірювань об'ємної теплоти згоряння і густини природного газу. Споживачі застосовують калориметричний

метод вимірів об'ємної теплоти згоряння і пікнометричний метод вимірів густини. Постачальники реалізують непрямі розрахункові методи оцінювання об'ємної теплоти згоряння і густини природного газу на основі даних, отриманих за результатами вимірювань вмісту компонентів хроматографічним методом.

У цей час поряд з калориметрами і густиномірами газу в промислових і наукових організаціях країни використовуються тисячі хроматографічних вимірювальних приладів (лабораторних і проточних газових хроматографів) з метою визначення складового складу природного газу і нижче із таким розрахунком основних фізичних властивостей (об'ємної теплоти згоряння, густини й ін.).

Переважає більшість лабораторних газових хроматографів, які використовуються для контролю показників якості природного газу, є вимірювальними приладами загального призначення, тобто такими, що не мають аналітичних завдань у нормативно-технічних документах при випуску їх з виробництва, незалежно від термінів. номенклатури. Кількість точок і діапазон вимірювання вмісту компонента.

Крім того, у нормативно-технічних документах такого обладнання не враховується випадковість похибки та характеристики похибки вимірювання вмісту складу систематичного складу, і, нарешті, немає похибки, яка дозволяє правильно оцінити методу розрахунку для визначення основних фізичних властивостей природного газу.

Тому проведення досліджень і нормування погрішності вимірювань вмісту окремих компонентів у природних газах різних родовищ України хроматографічним методом є актуальним завданням.

Метою розробки є створення оптико-електронного вимірювача густини природного газу, який в подальшому може бути використаний для вимірювань витрат природного газу на усіх станціях теплогазопостачання або може бути використаний для вимірювання густини газу у газопроводі. Через високу точність вимірювання фотоелектричного методу, просту конструкцію та відносну

дешевизну цей лічильник має бути серйозним конкурентом на ринку вимірювачів густини газу.

2.4 Вибір і обґрунтування аналогів оптико-електронного вимірювача концентрації газу

Спосіб серійної розробки газових пікнометрів використовуються методи, які вимірюють механічні характеристики газів. Такий густиномір має високу точність, але його структура відносно складна і надто чутлива до зовнішніх факторів. В результаті механічні газові ареометри страждають від проблем, пов'язаних з постійним калібруванням і швидким зносом окремих механічних частин. Рефракційні денситометри не мають цієї проблеми. Але оскільки для вимірювання показника заломлення газу потрібен дуже чутливий фоторецептор. Такий фотоприймач повинен реєструвати зміни в десятки мікрон. Оскільки така бібліотека компонентів була створена лише у 2006 році, можна сказати, що нове покоління густиномірів ось-ось буде представлено на світовому ринку.

Розрізняють два види густиномірів: рефракційні та інтерферометричні. Інтерферометричний густиномір має високу точність вимірювань, але в той же час він занадто чутливий до зовнішніх факторів і має високу вартість.

Аналогом цієї розробки є автоматичний густиномір природного газу «SOLARTRON».

Повністю автоматичний густиномір природного газу (надалі густиномір) використовується для безперервного й автоматичного вимірювання густини природного газу за стандартних умов для обчислення об'єму та об'ємної витрати газу та автоматичної корекції результату вимірювання густини газу.

За способом обробки вимірювальної інформації денситометри відносяться до групи інтелектуальних мікропроцесорних приладів.

Автоматичний густиномір призначений для використання у вибухонебезпечних зонах приміщень і відкритих промислових підприємствах, де можливе утворення вибухонебезпечних сумішей груп Т1 - Т3, груп ІА та ІІV згідно ДСТУ 12.1.011.

Автоматичні вимірювачі густини використовуються в різних галузях промисловості та комунального господарства в складі систем автоматичного контролю та керування технологічними процесами, а також автоматичного контролю витрати газу та у складі вузлів комерційного обліку.

Основні вимірювальні характеристики:

- Діапазон показів - від 0 до 1,16 кг/м³ ;
- Діапазон вимірювань - від 0,67 до 1,16 кг/м³ ;
- Основна абсолютна похибка - не більше 0,003 кг/м³ ;
- Границі абсолютної погрішності, що допускає, - $\pm 0,003$ кг/м³ ;
- Час встановлення показів - не більше 11 з;
- Умови експлуатації (у корпусі по стандарті NEMA 4X):
- атмосферний тиск становить від 84 до 106,7 кпа (від 630 до 800 мм рт. ст.);
- відносна вологість повітря не більше 95 % при температурі 35 °С і більш низькі температури без конденсації вологи;
- температура навколишнього середовища становить від мінус 30 °С (але не нижче від точки роси для вимірюваного газу) до 50°С
- рекомендований інтервал між калібруваннями - 1 рік.

До складу цього густиноміру входять:

1. Вимірювач густини газу типу 3098 А, виробництва фірми "SOLARTRON" (Великобританія);
2. Шафа підготовки й редукування газу;
3. Технічні засоби вимірювального комплексу "ФЛОУТЭК".

Будова та принцип роботи.

Вимірювач густини газу типу 3098 А складається з еталонної камери (камери порівняння) та датчика густини газу 7812.

Еталонна камера оточує вібраційний циліндр датчика, таким чином забезпечуючи рівність температури газу в камері порівняння та газу, що протікає через датчик, і що постійний (сталий) тиск підтримується з високою точністю на рівні газу, що протікає через датчик, порівняно з газом у камері порівняння. Тиск однаковий.

Конструкція густоміра передбачає калібрування та перевірку наповнення камери порівняння газом з вимірювальною лінією на місці експлуатації.

В якості калібрувальних газів переважно використовуються хімічно чисті гази, такі як сертифікований метан і азот. Значення щільності для даного газу наведені з урахуванням стисливості газу згідно ГОСТ 30319.1-96 ($Z_{ci} = 0,9981$ для метану, $Z_{ci} = 0,9997$ для азоту).

Для перевірки буде використана пробна газова суміш з межею абсолютної похибки щільності $PGS \pm 0,001 \text{ кг/м}^3$.

Недоліком цього пристрою є його великі розміри і складна конструктивна схема. Ця схема містить велику кількість елементів з малою надійністю.

2.5 Вибір прототипів оптико-електронного вимірювача концентрації газу

Відомо багато різних приладів для вимірювання щільності газів - від найпростіших до більш складних, в яких використовуються більш складні та якісніші радіоелектронні компоненти.

Прототипами цієї розробки можна назвати такі пристрої, як інтерферометр Релея та інтерферометр Джаміна.

Інтерферометр Джаміна. Основними частинами інтерферометра Джамена є дві однакові товсті плоскопаралельні скляні пластини P1 і P2, посріблені з одного боку.

Як правило, пластини розташовані так, що між їх площинами є невеликий кут.

Шлях променів в затворному інтерферометрі показаний на малюнку 1. 1.1 Світло від джерела світла падає на пластину P1 злегка розбіжним пучком. Розглянемо один із променів цього пучка. При відбитті від пластини П1 промінь розщеплюється (відбивається від передньої і задньої поверхонь). Кожен з двох паралельних променів I і II, що падають на пластину P2, при відбитті від її поверхні знову розщеплюється, утворюючи на виході приладу чотири паралельні між собою промені 1, 2, 3, 4. Між будь-якою парою балок, крім балок 2 і 3, існує значна різниця в ході через кількість проходів через товщину пластин P1 і

P2. Ця різниця ходу становить кілька сантиметрів, тому при використанні білого світла інтерференції між цими променями не спостерігається.

Інтерференція виникає тільки при накладенні променів 2 і 3, наявність променів 1 і 4 погіршує різкість інтерференційної картини, тому вони усуваються за допомогою діафрагми.

Давайте обчислимо різницю розповсюдження між променями 2 і променями 3. За розрахунками (див., наприклад, [1]) різниця поширення променів I і II, відбитих від передньої і задньої поверхонь пластини P1, дорівнює

$$\Delta_1 = n(AB + BC) - (AH) = 2hn \cdot \cos\psi_1, \quad (2.26)$$

де n - показник переломлення, h - товщина пластинки, $P1$ - кут переломлення в пластинці P1. Після відбиття від поверхонь пластинки P2 промені 2 й 3 здобувають додаткову різницю ходу, рівну

$$\Delta_2 = 2hn \cdot \cos\psi_2, \quad (2.27)$$

де P2 - кут переломлення в пластинці P2. Повна різниця ходу між променями 2 й 3 дорівнює

$$\Delta = \Delta_1 + \Delta_2 = 2hn \cdot (\cos\psi_1 - \cos\psi_2). \quad (2.28)$$

Вирази (2.26) і (2.27) не враховують різницю в умовах відбиття передньої і задньої поверхонь пластини. Це тому, що кожен з променів 2 і 3 зумовлений одним відбиттям від передньої поверхні та одним відбиттям від задньої поверхні.

Як видно з рис. 1.1, промені 2 й 3 паралельні між собою, тому інтерференцію можна спостерігати за допомогою зорової труби, настроєної на нескінченність, або просто оком, акомодованим на нескінченність. Ті точки, де максимуми освітлення лежать у фокальній площині оптичної труби, де сходяться промені з різницею ходу

$$\Delta = m\lambda. \quad (2.29)$$

Різниця ходу

$$\Delta = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda, \quad (2.30)$$

відповідає мінімальній освітленості.

Враховуючи задану геометрію пристрою, різниця ходів залежить від кутів λ_1 і λ_2 , які визначаються кутом, під яким світлові промені падають на пластину P1. При освітленні розбіжним променем можна спостерігати системи інтерференційних смуг.

Інтерферометр Джаміна можна використовувати для вимірювання невеликих змін показника заломлення. Для цього досліджувану речовину розташовують на шляху одного з променів (I або II), що вносить додаткові відмінності в процес і викликає зміщення інтерференційних смуг. Вимірювання найчастіше проводять компенсаційними методами. Одночасно на шляху другого променя розміщується ретельно відкалібрований компенсатор, положення якого вибирається таким чином, щоб повернути інтерференційну картину у вихідне положення.

Пластини інтерферометра Заміна встановлені не строго паралельно, а під невеликим кутом одна до одної. Якби це було не так, то кути 1 і 2 були б рівні між собою для всіх кутів падіння, а поле зору труби було б рівномірно освітлене для однієї і тієї ж ідеально плоскої інтерференційної пластини - інтерференційні смуги спостерігатися не будуть. Встановіть пластини інтерферометра під малими кутами одна до одної так, щоб ребра утвореного ними двогранника були горизонтальними. Вирівнюючи пластини в полі зору труби, виникає система горизонтальних інтерференційних смуг.

Дифракція Фраунгофера на двох щілинах використовується в інтерферометрі Релея.

Насправді інтерферометри Релея використовують біле світло. Це призводить до двох нових явищ.

1. При використанні досить монохроматичного світла фазовий зсув на 2π або $2\pi m$ (де m — ціле число) між коливаннями в двох щілинах не змінює жод-

ного співвідношення фаз і тому не може бути виявлений експериментально. Тому значення $k\Delta$ можна визначити лише з точністю до 2π .

При використанні білого світла інтерференційні смуги забарвлюються (через накладання інтерференційних смуг різних довжин хвиль, зміщених одна відносно одної). Винятком є так звана нульова смуга, в її максимумі різниця в коливальних процесах від двох щілин дорівнює нулю.

$$\Delta + d\phi = 0. \quad (2.31)$$

Якщо Δ не залежить від довжини хвилі, інтерференційні максимуми для всіх довжин хвиль накладаються в цій смугі. На відміну від інших інтерференційних смуг, нульова смуга біла. При $\phi = 0$ смуга розташована при $\Delta = 0$. За його переміщенням можна розрахувати різницю ходу Δ .

2. Відповідно до (4) інтерференційні смуги повинні спостерігатися при малих і як завгодно великих значеннях Δ . Цей результат є наслідком припущення про ідеальну монохроматичність світла. Реальні оптичні коливання мають кінцеву довжину послідовності. При великих значеннях Δ (перевищують довжину легкого ланцюга) інтерференційна картина не спостерігається, оскільки світлові флуктуації, що надходять в точку спостереження з різних щілин, стають некогерентними.

В принципі, дифракція Фраунгофера на двох щілинах може бути отримана за допомогою простої схеми на малюнку 1. 1.3 Відстані a_1 і a_2 повинні бути достатньо великими, щоб забезпечити виконання умови

$$\lambda\alpha_1 \gg d^2; \quad (2.32)$$

$$\lambda\alpha_2 \gg d^2. \quad (2.33)$$

де d — відстань між щілинами. Однак це призводить до неприпустимо великого розміру приладу, тому зазвичай використовується додатковий об'єктив з площиною огляду в його фокальній площині.

Експериментальний пристрій. Інтерферометр Релея — прилад, що використовується для вимірювання різниці показників заломлення — заснований на

явищі дифракції світла на двох паралельних щілинах. Лампа розжарювання Л за допомогою конденсора К яскраво освітлює вузьку вхідну щілину S у фокусі лінзи O1. Коліматор, що складається з щілини S і об'єктива O1, направляє паралельний промінь в отвір D з двома перпендикулярними щілинами. Світло, дифрагований на подвійній щілині, проходить через кювету L, що складається з двох однакових скляних камер, в які вводиться досліджуваний газ (у нашій установці - CO₂ або повітря). Кювета займає лише верхню частину простору між лінзами O1 і O2. За кюветою знаходяться дві скляні пластинки J і пластинка P, призначення яких ми обговоримо пізніше.

Однак це призводить до неприпустимо великого розміру приладу, тому зазвичай використовується додатковий об'єктив з площиною огляду в його фокальній площині. експериментальний пристрій. Інтерферометр Релея — прилад, що використовується для вимірювання різниці показників заломлення — заснований на явищі дифракції світла на двох паралельних щілинах.

Лампа розжарювання Л за допомогою конденсора К яскраво освітлює вузьку вхідну щілину S у фокусі лінзи O1. Коліматор, що складається з щілини S і об'єктива O1, направляє паралельний промінь в отвір D з двома перпендикулярними щілинами. Світло, дифрагований на подвійній щілині, проходить через кювету L, що складається з двох однакових скляних камер, в які вводиться досліджуваний газ (у нашій установці - CO₂ або повітря). Кювета займає лише верхню частину простору між лінзами O1 і O2. За кюветою знаходяться дві скляні пластинки J і пластинка P, призначення яких ми обговоримо пізніше.

3 РОЗРОБЛЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ТА РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ОПТИЧНОГО ГЕНЕРАТОРНОГО ВИМІРЮВАЧА КОНЦЕНТРАЦІЇ ГАЗІВ

При розробці нових видів пристроїв дуже важливо створити апарат математичного аналізу основних показників, в даному випадку таких як статична і метрологічна характеристики, а також розробити методику системи вибору параметрів, в даному разі – аналітичного каналу.

3.1 Математична модель статичних характеристик оптичного каналу недисперсійного оптичного генераторного вимірювача концентрації газів

У недисперсійному аналізі характерний "канал" визначається як спектральний інтервал, що збігається зі смугами поглинання компонентів аналіту. Технічне забезпечення будь-якого каналу багатокомпонентного газоаналізатора складається з наступних основних елементів: джерело інфрачервоного випромінювання; канал; вузькосмуговий фільтр - елемент, який виділяє в спектрі джерела інтервал, який збігається зі смугою поглинання аналізованого компонента; приймач сигналу вимірювальної інформації; Блок запису, в якому інформаційні параметри вимірювального інформаційного сигналу вибираються, перетворюються, обробляються та візуалізуються. Структурна схема каналу - це послідовне з'єднання перерахованих елементів. З огляду на характеристики компонентів неважко виразити статичні характеристики (СК) оптичного каналу недисперсійного інфрачервоного газоаналізатора

$$W(x) = K_n \cdot K_p \cdot T_e \cdot \int J_0(\nu) \cdot S_\phi(\nu) \cdot T(x, \nu) d\nu + \xi, \quad (3.1)$$

де $K_n; K_p; T_e$ – коефіцієнти передачі відповідно приймача, реєструючого блоку, робочої кювети, незаповненої аналізованою речовиною; $J_0(\nu)$ – спектр інтенсивності джерела випромінювання; $S_\phi(\nu)$ – спектр пропускання фільтруючого елементу; $\nu [cm^{-1}] = 10^4 / \lambda [mkm]$ – спектральна частота і довжина хвилі випромі-

нювання; ξ – власні шуми каналу; $T(x, \nu)$ – спектр пропускання речовини, що аналізується, що в наближенні за законом Бугера-Ламберта-Бера має вигляд

$$T(x, \nu) = \frac{J(\nu, x)}{J_0(\nu)} = e^{-D(x, \nu)}; \quad (3.2)$$

$$D(x, \nu) = l \sum_j \chi_j(\nu) x_j, \quad (3.3)$$

де $D(x, \nu)$ – оптична щільність речовини, що аналізується; $\chi_j(\nu)$ – коефіцієнт поглинання j -го компоненту; l – довжина робочої кювети; $T(x, \nu)$ – власне пропускання середовища, що аналізується; $x_j(\nu)$ – концентрація j -го компоненту.

При $x=0$ маємо згідно (3.1)

$$W(0) = K_n \cdot K_p \cdot T_e \cdot \int_0^{\infty} J_0(\nu) \cdot S_\phi(\nu) \cdot T(x, \nu) d\nu + \xi = U_1 + \xi, \quad (3.4)$$

де U_1 – узагальнений параметр каналу, що залежить від характеристик і параметрів всіх вхідних в нього ланок і відображає вихідний сигнал каналу в нульовій точці ($x=0$).

Враховуючи (3.2)-(3.4) виразимо СХ (3.1) у вигляді

$$W(x) = U_1 T(x) + \xi = U_1 (1 - Z(x)) + \xi; \quad (3.5)$$

$$T(x) = \frac{\int_0^{\infty} J_0(\nu) S_\phi(\nu) T(x, \nu) d\nu}{\int_0^{\infty} J_0(\nu) S_\phi(\nu) d\nu}, \quad (3.6)$$

де

$$Z(x) = 1 - T(x) \quad (3.7)$$

- функції пропускання і поглинання відповідно.

Співвідношення (3.5) визначає робочу (недетерміновану) СХ каналу. Нормується не робоча, а номінальна (детермінована) СХ, тобто СХ каналу при номінальних значеннях неінформативних параметрів $\hat{U}_1; \hat{\xi} = 0$.

$$\hat{W}(x) = \hat{U}_1 T(x) = \hat{U}_1 (1 - \hat{Z}(x)), \quad (3.8)$$

де символ " $\hat{}$ " вказує на номінальне значення відповідно параметра (функції), зазвичай рівне математичному очікуванню відповідної випадкової величини (функції).

У квазімонохроматичному режимі ($\nu = \nu_0$), коли функція $S_\phi(\nu)$ апроксимується прямокутником одиничної висоти і нескінченно малої ширини, співвідношення (3.2)-(3.8) перетворюються до вигляду

$$T(x) = T(x, \nu_0) = e^{-D(x, \nu_0)}; \hat{U}_1 = \hat{J}_0(\nu_0) \cdot \Delta \nu \phi \cdot \hat{K}_n \cdot \hat{K}_p \cdot \hat{T}_e; \hat{W}(x) = \hat{U}_1 e^{-D(x, \nu_0)}, \quad (3.9)$$

де

$$S = \frac{d\hat{W}}{dx} = -\hat{U}_1 \cdot \chi(\nu_0) \cdot l \cdot e^{-\chi(\nu_0)x} \quad (3.10)$$

- чутливість (коефіцієнт перетворення) оптичного каналу.

З (3.9) витікає, що СХ дисперсійного перетворювача має експоненціальний характер, тобто вихідний сигнал $\hat{W}(x)$ каналу і його чутливість S збільшуються прямо пропорційно \hat{U}_1 і зменшуються по експоненті при збільшенні вимірюваної концентрації x . Разом з тим, чутливість S неоднозначно залежить від параметрів $\chi(\nu_0)$ і l . З (3.9) видно, що чутливість при збільшенні добудку $\chi(\nu_0) \cdot l$ спочатку зростає, в точці $D=1$ досягає екстремуму, а потім спадає.

У недисперсійних ІЧ-аналізаторах використовується поліхроматичний режим. СХ поліхроматичного оптичного каналу в загальному вигляді визнача-

ються співвідношеннями (3.5)-(3.8). Для конкретизації виду СХ необхідно задатися видом спектральних функцій $J_0(\nu)$, S_ϕ , $\chi(\nu)$ та ін.

Спектральна характеристика неселективного джерела ГЧ-випромінення, що є аналогом абсолютно чорного тіла, звичайно задається формулою Планка

$$J_0 = \frac{\varepsilon_\lambda 8\pi h \cdot c \cdot \nu^5 \cdot s}{10^{20} (\exp(h\nu \cdot c / 10^4 \cdot kT) - 1)}, \quad (3.11)$$

де ε_λ - спектральний коефіцієнт чорноти джерела; h - постійна Планка; k - постійна Больцмана; T - абсолютна температура; c - швидкість світла; s - площа випромінюючої поверхні.

Спектральна характеристика інтерференційного фільтру $S_\phi(\nu)$ апроксимується залежно від умов різними функціями, серед яких найчастіше використовують

$$S_\phi(\nu) = \frac{T_\phi}{1 + 4\left(\frac{\nu - \nu_0}{\Delta_\phi}\right)^2}, \quad (3.12)$$

де T_ϕ - пропускання фільтру в максимумі (ν_0, λ_0) ; Δ_ϕ - ширина смуги пропускання фільтру по рівню $T_\phi/2$.

Спектральне пропускання газу в наближенні Бугера-Ламберта-Бера визначається співвідношеннями (3.3)-(3.9). Функція $\chi_i(\nu)$ має складний характер, але при модельних дослідженнях $\chi_i(\nu)$ звичайно описуються дисперсійною кривою

$$\chi_i(\nu) = \frac{\alpha_i \cdot \gamma_i}{\pi \left((\nu - \nu_{0i})^2 + \gamma_i^2 \right)}, \quad (3.13)$$

де $\alpha_i = \int_0^\infty \chi_i(\nu) d\nu$ - інтегральна інтенсивність i -лінії; γ_i - напівширина лінії; ν_{0i} -

центр лінії; $\chi(\nu)$ - коефіцієнт поглинання смуги.

Задаючись контуром коливально-обертальної смуги можна згідно (3.13) розрахувати $\chi(\nu)$. Проте у зв'язку з недостатністю знань про індивідуальні характеристики ліній $\chi_i(\nu)$ при розрахунку функцій пропускання звичайно використовується метод моделей спектрів, що включає гіпотези про характер розташування ліній в смугі і їх інтенсивності. У моделі Ельзассера, наприклад, передбачається рівність інтенсивностей ліній α_i , напівширини γ_i і відстаней між ними d . Проте цю модель можна застосувати лише у разі відсутності перекриття ліній. Інакше, більш відповідною виявляється статистична модель Гуді, в основі якої лежить припущення про випадковий розподіл положення і інтенсивності ліній в смугі при їх однаковій напівширині. При розподілі Больцмана інтенсивності ліній в смугі, функція поглинання смуги (без урахування апаратної функції каналу) має вигляд

$$Z_\nu(U) = 1 - \exp\left[-\frac{\bar{a}U}{\bar{d}\sqrt{1 + \bar{a}U/\pi\bar{\gamma}}}\right] = 1 - T_\nu(U), \quad (3.14)$$

де $U = P_\alpha l$ - маса газу, що поглина; P_α - парціальний тиск; l - товщина газу; \bar{a} , \bar{d} - середня інтенсивність і середня відстань між лініями в смугі, $\bar{\gamma}$ - середня ширина лінії на рівні 0,5.

Вираз (3.14) має наступні асимптотичні наближення:

- при $U \ll 1$

$$Z_\nu(U) = \frac{\bar{a}U}{\bar{d}};$$

при $U \gg 1$

$$Z_\nu(U) = 1 - \exp\left(-\sqrt{\bar{a} \cdot \bar{\gamma} \cdot U / 2\bar{d}^2}\right). \quad (3.15)$$

Співвідношення (3.14) і (3.15) не можуть бути використані для конкретизації виду СХ каналу газоаналізатора (3.5)-(3.8), оскільки при їх отриманні не враховувалися спектральні характеристики джерела $J_0(\nu)$ і фільтру $S_\phi(\nu)$.

Для отримання моделі СХ поліхроматичного каналу зробимо наступні припущення:

1) Спектр інтенсивності джерела $J_0(\nu)$ в смузі пропускання каналу приймаємо постійним $J_0(\nu) = J_0 = const$.

2) Для газу, що поглинає, введемо регулярну залежність, що враховує вид контура лінії поглинання

$$g_r(\nu) = \exp\left(-\frac{|\nu - \nu_{0\delta}|}{\delta}\right), \quad (3.16)$$

де $\nu_{0\delta}$ - частота, відповідна центру смуги поглинання; δ - напівширина смуги на рівні 0,5.

Тоді пропускання газової суміші відповідно до (3.14)

$$T_r = 1 - Z_\nu(U) \cdot g_r(\nu) \quad (3.17)$$

3) Функцію пропускання інтерференційного фільтра приймаємо у вигляді

$$S_\phi(\nu) = T_\phi \cdot \exp\left(-\frac{|\nu - \nu_{0\phi}|}{\Delta}\right), \quad (3.18)$$

де $\nu_{0\phi}$ - частота, відповідна центру смуги пропускання фільтру, Δ - напівширина смуги фільтру на рівні 0,5.

З врахуванням (3.4)-(3.7) і (3.16)-(3.18) виразимо СХ оптичного каналу ІЧ-газоаналізатора

$$\begin{aligned} W(\bar{x}) &= J_0 \cdot T_\phi \cdot T_e \cdot K_n \cdot K_p \cdot \int_0^\infty S_\phi(\nu) \cdot (1 - Z_\nu(U) \cdot g_r(\nu)) d\nu = \\ &= U_1 \left(1 - \frac{Z_\nu(U)}{\Delta} \int_0^\infty \exp\left(-\frac{|\nu - \nu_{0\delta}|}{\delta}\right) \cdot \exp\left(-\frac{|\nu - \nu_{0\phi}|}{\Delta}\right) d\nu \right), \end{aligned} \quad (3.19)$$

де $U_1 = J_0 \cdot T_\phi \cdot T_e \cdot K_n \cdot K_p \cdot 2\Delta$ - узагальнений параметр газоаналізатора.

Другий доданок в (3.19) після інтегрування перетвориться до вигляду

$$2\Delta \cdot Z_v(U) \cdot G, \quad (3.20)$$

де G - чинник спектральної настройки каналу, рівний

$$G = (M \cdot e^{-M/N} - e^{-N}) / (M^2 - 1), \quad (3.21)$$

де $M = \Delta / \delta$ - співвідношення напівширини фільтру і контуру смуги газу,

що аналізується; $N = \frac{V_{0n} - V_{0\phi}}{\delta}$ - безрозмірний розстройка фільтру відносно V_{0n} .

Враховуючи (3.20) робоча СХ каналу має вигляд

$$W(x) = U_1 (1 - Z_v(U)G) + \xi.$$

Одержане в (3.21) розділення змінних (інформативного параметра U або x і параметрів спектральної настройки G) є наслідком зроблених вище припущень і внаслідок цього лише приблизно відображає картину явищ в оптичному каналі.

Чутливість оптичного каналу S при прийнятих вище припущеннях має вигляд

$$S = \frac{dW}{dU} = U_1 \frac{dZ_v(U)}{dU}, \quad (3.22)$$

$U \rightarrow 0$) згідно (3.14)

$$S = U_i \frac{dZ_v(U)}{dU} = U_1 \cdot G \frac{\bar{\alpha} \cdot (2 + \bar{\alpha} \cdot U / \pi \bar{\gamma})}{\bar{d} \cdot (1 + \bar{\alpha} \cdot U / \pi \bar{\gamma})^{1.5}}. \quad (3.23)$$

Тобто при фіксованому рівні U_i чутливість залежить від параметрів спектральної настройки G . Встановимо, наприклад, залежність S від напівширини пропускання оптичного фільтру при нульових розстройках ($N=0$). В цьому випадку при фіксованому рівні $x(U)$ відносна чутливість каналу

$$S_{i\alpha} = S / \frac{U_1}{\Delta} \cdot \frac{dZ_v}{dU} = \frac{\Delta}{\Delta/\delta + 1}.$$

Робоча СХ оптичного каналу за наявності в аналізованій газовій суміші декількох компонентів із смугами поглинання, які частково перекриваються, видозмінюється і в простому випадку за наявності одного вимірюваного і одного невимірюваного компонентів згідно (3.19)-(3.21) може бути представлена у вигляді

$$W(x) = U_1 [1 - Z_v(U) \cdot G - Z_v(U_H) \cdot G_H] + \xi, \quad (3.24)$$

де $Z_v(U)$, $Z_v(U_H)$ - функції поглинання відповідно вимірюваного і невимірюваного компонентів в смузі каналу; G і G_H , визначаються згідно (3.20) фактору спектральної настройки для вказаних компонентів. Відповідно до (3.24) показник вибіркової каналу N , що визначається як відношення S (чутливість до компонента, що вимірюється) і S_H (що не вимірюється) компонентам

$$N = \frac{S}{S_H} = \frac{Z'_v(U)}{Z'_v(U_H)}. \quad (3.25)$$

3.2 Розробка структурної схеми і методики вибору параметрів аналітичного каналу оптичного генераторного вимірювача концентрації газів

Величезна різноманітність схем побудови оптико-абсорбційних газоаналізаторів базується на відносно невеликому числі елементів однакового призначення, що дозволяє побудувати класифікацію і здійснити типізацію оптико-фільтрових аналітичних приладів (АП).

У [7] показано, що типовими структурними схемами АП є: схема безпосередньої оцінки пропускання проби; диференціальна нерівноважна схема вимірювання пропускання $T(x)$; автоматично врівноважуванні (компенсаційні) схеми; різні варіанти схем відношення порівняльних в АП світлових потоків та ін. Порівняльний аналіз метрологічних характеристик (МХ) типових варіантів

побудови оптико-абсорбційних АП показав [7], що помітними перевагами володіють АП, що реалізовані на основі схеми відношення. У цих схемах ефективно придавлються адитивні і мультиплікативні складові похибки АП, а алгоритм відношення порівнюваних сигналів досить просто реалізується в цифровій формі на базі мікропроцесорних засобів.

Схеми відношення широко застосовуються при побудові дисперсійних і недисперсійних оптико-електронних АП [9]. У завданнях багатокомпонентного кількісного аналізу, до яких відноситься завдання контролю концентрації метану, переважно застосування багатоканальних однопроменевих або двопроневих оптичних схем.

Багатоканальність, що забезпечується за рахунок зовнішньої фільтрації зондуючого випромінювання за допомогою вузькосмугових інтерференційних фільтрів, дозволяє здійснювати практично незалежні вимірювання концентрацій декількох речовин, що мають смуги поглинання в ІЧ-області спектру. Застосування однопроменевої схеми дозволяє спростити оптичну схему приладу і істотно зменшити похибки аналізу, обумовлені неселективними впливаючими фізичними величинами, наприклад, вплив забруднень робочої кювети аналізатора. Виникаючі при цьому проблеми нелінійності СХ АП, викликані різними рівнями коефіцієнтів поглинання ІЧ-випромінювання для різних вимірюваних компонентів, у принципі також вирішуються за допомогою сучасних мікропроцесорних контролерів.

Оцифровані значення сигналу вимірювальної інформації j -го спектрального каналу оптико-абсорбційного АП можна представити у вигляді $W_j = U_j T(x_j)$; $W_{rf} = U_{rf}$, де $U_j = K_n \cdot K_p \cdot T_e \int J_0(\nu) \cdot S_\phi(\nu) d\nu$ - вихідний сигнал j -го каналу при $x_j=0$. Тут K_n , K_p , T_e - коефіцієнти передачі відповідно приймача випромінювання, реєструючого блоку, робочої кювети, що незаповнена речовиною; $J_0(\nu)$ і $S_\phi(\nu)$ - спектральні характеристики джерела випромінювання і селективного фільтруючого елемента; $T(x_j) = 1 - Z(X_j)$ - усереднена по смузі прозоро-

сті фільтру функція відносного пропускання ($Z(x_j)$ - поглинання) аналізованого газу, залежить від концентрації x_j j-го компоненту суміші.

При реалізації алгоритму відношення інформаційного сигналу можна використовувати співвідношення

$$\alpha(x_j) = \frac{\bar{W}_j}{\bar{W}_{rf}} = \frac{\bar{U}_j}{\bar{U}_{rf}} - \bar{T}(x_j).$$

Проте сигнал α_j не зручний для використання, оскільки при $x_j=0$, $\alpha_j(0) = \bar{U}_j / \bar{U}_{rf}$ цей сигнал досягає максимуму, тобто шкала сигналу α_j не має фіксованого нуля.

Більш зручною для практичного використання є комбінована вимірювальна схема, в якій поєднуються позитивні властивості диференціальної схеми і схеми відношення. В цьому випадку сигнал вимірювальної інформації можна використовувати як відношення різницевого сигналу $\bar{W}_{rf} - \bar{W}_j$ до порівняльного, тобто

$$\alpha'(x_j) = \frac{\bar{W}_{rf} - \bar{W}_j}{\bar{W}_{rf}} = 1 - \frac{\bar{W}_j}{\bar{W}_{rf}} = 1 - \frac{\bar{U}_j T(x_j)}{\bar{U}_{rf}}.$$

Сигнал α' при $x_j=0$ не рівний нулю, це не зручно при практичному використанні. Тому краще використовувати як сигнал вимірювальної інформації схеми відношення величину

$$y_j = 1 - \frac{\bar{W}_j}{\bar{W}_{rf}} K_j = 1 - K_j \frac{\bar{U}_j}{\bar{U}_{rf}} T(x_j), \quad (3.26)$$

де $K_j = \hat{U}_{rf} / \hat{U}_j$ - емпірично визначений для кожного компоненту коефіцієнт, рівний відношенню номінальних значень сигналів $S_{rf}(0)$ і $S_j(0)$. При установці нуля газоаналізатора необхідно виконати наступні умови для кожного компоненту

$$K_j \frac{\bar{U}_j}{\bar{U}_{rf}} = 1. \quad (3.27)$$

Такий встановлений режим можна вважати номінальним, при цьому

$$\hat{y}_j(x_j) = 1 - T(x_j) = Z(x_j), \quad (3.28)$$

тобто вимірювальний сигнал є функцією відносного поглинання і практично не залежить від неінформативних параметрів газоаналізатора. При $x_j=0$ функції $T(0)=1$; $Z(0)=0$, а отже $y_j(0)=0$.

При збільшенні рівня x_j сигнали $\hat{y}_j(x_j)$ і $y_j(x_j)$, що відображають номінальну і реальну статичні характеристики, змінюються, при цьому ці залежності мають нелінійний характер.

Вид функцій $T(x_j)$, $Z(x_j)$ відомий лише приблизно. Встановлення виду СХ здійснюється на стадії градуювання газоаналізатора по зразкових газових сумішах (ЗГС), коли визначається градуювальна характеристика $y_r(x_j)$. Градуювальна характеристика - це оцінка номінальної СХ $\hat{y}_j(x_j)$.

Оскільки метою аналітичного вимірювання є визначення оцінки вимірюваної концентрації x_j (позначимо її x_j^*), то необхідно використовувати номінальну СХ (точніше її оцінку) по алгоритму

$$x = \hat{y}_j^{-1}(y_j), \quad (3.29)$$

де \hat{y}_j^{-1} функція, зворотна номінальній характеристиці. Але оскільки відома не номінальна, а градуювальна характеристика $y_r(x_j) = \bar{y}(x_j) + \Delta y_r$, то замість (x_j) використовують

$$x_j^* = \hat{y}_j^{-1}(y_{rj}), \quad (3.30)$$

де Δy_r - похибка метрологічного забезпечення, що включає похибки ЗГС і апроксимації СХ. При поліноміальній апроксимації градуювальної характеристи-

ки кількість ЗГС, необхідних для побудови $y_r(x_j)$ j -ої шкали, на одиницю більше показника ступеня апроксимуючого полінома. Наприклад, при квадратичній апроксимації необхідно мінімум три ЗГС, відповідних різним точкам шкали.

Відповідно до (3.26) робоча СХ газоаналізатора має вигляд

$$y_j = y(x_j) = 1 - K_j \frac{\bar{U}_j}{\bar{U}_{rf}} T(x_j). \quad (3.31)$$

Номінальна СХ $y_j = 1 - K_j \frac{\hat{U}_j}{\hat{U}_{rf}} T(x_j)$, а при рекомендованій настройці параметрів газоаналізатора (3.29)

$$\hat{y}_j = l - T(x_j) Z(x_j). \quad (3.32)$$

Таким чином, номінальна СХ оптико-абсорбційного газоаналізатора, реалізованого по схемі відношення визначається лише параметрами усередненої по смузі прозорості фільтруючого елементу функції пропускання (поглинання)

$$T(x_j) = \int J_0(\nu) S_\phi(\nu) e^{-D(x_j)} d\nu / \int J_0 S_\phi(\nu) d\nu,$$

де $D(x_j)$ - оптична щільність аналізованої проби.

Чутливість j -го аналітичного каналу до вимірюваної величини

$$S_j = \frac{d\hat{y}_j}{dx_j} = -K_j \frac{\hat{U}_j}{\hat{U}_{rf}} \cdot \frac{dT}{dx_j} = \frac{dT}{dx_j}.$$

Чутливість j -го аналітичного каналу до i -ої невимірюваної величини

$$W_j = \frac{dy_j}{dx_{i3}} = -K_j \frac{\hat{U}_j}{\hat{U}_{rf}} \cdot \frac{dT}{dx_{i3}} = \frac{dT}{dx_{i3}}.$$

Показники вибіркості аналітичного каналу до і-того компонента, що не вимірюється

$$N_j = \frac{W_j}{W_{i^3}} = \frac{dT}{dx_3} / \frac{dT}{dx_{i^3}}. \quad (3.33)$$

3.3 Математична модель похибки аналітичного каналу оптичного генераторного вимірювача концентрації газів

Метрологічні характеристики і показники метрологічної надійності традиційно є об'єктом досліджень і оптимізації при розробці будь-яких засобів вимірювань, у тому числі і при створенні та вдосконаленні газоаналізаторів для контролю концентрації метану.

Модель похибки j-го аналітичного каналу в статистиці АХ, є випадковою величиною і може бути представлена у вигляді декількох складових, тобто

$$\Delta x_j = \frac{\Delta y_j}{S_j} = \frac{1}{S_j} \Delta y_j(\bar{u}, \bar{q}, \bar{\varepsilon}) = \Delta x_r + \sum_i^m \frac{\Delta x_{i^3}}{N_3},$$

де x_j - вимірювана величина, наприклад, концентрація компонента, що визначається; $y(x_j, \bar{u}, \bar{q}, \bar{\varepsilon})$ - робоча статична характеристика АП; $\bar{u}, \bar{q}, \bar{\varepsilon}$ - вектори неінформативних параметрів каналу, фізичні величини, що впливають, зовнішні умови, що відображають відповідно (\bar{u}), параметри АП (\bar{q}), шуми АП ($\bar{\varepsilon}$) супутні будь-якому вимірювальному процесу; $\hat{y}_j = y(x_j, \bar{u}, \bar{q}, \bar{\varepsilon})$ - номінальна СХ аналітичного каналу, при номінальних значеннях неінформативних параметрів; $\Delta y_j(x_j, \bar{u}, \bar{q}, \bar{\varepsilon}) = y_j - \hat{y}_j$ - похибка каналу по виходу, обумовлена випадковими відхиленнями неінформативних параметрів від номінальних рівнів; $\Delta x_r, \Delta x_r$ - похибка метрологічного забезпечення АП, обумовлена, головним чином, похибками ЗГС, що використовуються при градуюванні; Δx_{ni} - відхилення і-го невимірюваного компонента об'єкту контролю від номінального рівня, прийня-

того при градуванні АП; $N_j = \frac{S_j}{S_{ni}}$ - показник вибірковості АП по і-му компоненту, що не визначається; $S_j = \frac{d\hat{y}_j}{dx}$ - чутливість АП до вимірюваного компоненту; $S_{i3} = \frac{d\hat{y}_j}{dx_{i3}}$ чутливість АП по і-му компоненту, що не вимірюється.

Перший (Δ_{cj}) і другий центральний ($\sigma_{\Delta x_j}^2$) моменти (або їх оцінки), визначають відповідно систематичній і випадковій похибці каналу $\Delta c_j = M\{\Delta x_j\}$; $\sigma_{\Delta x_j}^2 = M\{(\Delta x_j - \Delta c_j)^2\}$, де $M\{\Delta x_j\}$ - математичне очікування Δx_j при фіксованому x_j ; $\sigma_{\Delta x_j}^2$ - дисперсія випадкової похибки каналу.

Основна абсолютна похибка Δ_j і показники δ_j , що базуються на ній, а також γ_j вибрані як критерій оптимізації газоаналізатора для контролю концентрації метану.

Модель похибки АП, що обумовлена неконтрольованими змінами неінформативних параметрів, як випадкової величини по виходу вимірювального перетворювача при фіксованому значенні x_j , тобто

$$\Delta y_j = y_j - \hat{y}_j = -\Delta(K_j \frac{\bar{U}_j}{\bar{U}_{rf}})T(x_j).$$

Модель похибки АП по вимірюваній координаті (концентрації j-го компоненту) рівна

$$\Delta x_j = \frac{\Delta y_j}{W_j} = \delta(K_j \frac{\bar{U}_j}{\bar{U}_{rf}})T(x_j) / \frac{dT}{dx_j},$$

де відносна випадкова величина $\delta(K_j \cdot \bar{S}_j / \bar{S}_{rf}) = \delta K_j + \delta \bar{U}_j - \delta \bar{U}_{rf}$.

Якщо коефіцієнт K_j підтримується в процесі вимірювання номінальному рівні \hat{K}_j , то приведена похибка АП

$$\gamma_j = \frac{\Delta x_j}{x_{mj}} = \frac{T(x_j)}{x_{mj} \cdot dT/dx_j} [\delta \bar{U}_j - \delta \bar{U}_{rf}], \quad (3.35)$$

де x_{mj} - найбільше значення, що відповідає верхній точці шкали АП.

Перепишемо модель (3.34) у вигляді

$$\gamma_j = \frac{[1 - z(x_j)]}{x_{mj} \cdot dT/dx_j} [\delta \bar{S}_j - \delta \bar{S}_{rf}]. \quad (3.35)$$

При $x_j = 0$, $Z(0)=0$, тоді величина

$$\gamma_{j0} = \gamma_j(0) = \frac{1}{x_{mj} \cdot dT(0)/dx_j} [\delta \bar{S}_j - \delta \bar{S}_{rf}], \quad (3.36)$$

відображає похибку АП (як випадкову величину) в нульовій точці шкали. Відповідно при $x_j > 0$ другий доданок в (3.35)

$$\gamma_{jm} = \frac{z(x_j)}{x_{mj} \cdot dT/dx_j} [\delta \bar{S}_j - \delta \bar{S}_{rf}]; \quad \gamma_j = \gamma_{j0} - \gamma_{jm}, \quad (3.37)$$

відображає мультиплікативну складову похибки АП. Оскільки $z(x_j) \leq x_{mj} \cdot dT/dx_j \cong z(x_{mj})$ і зазвичай $(3 \div 4)Z_{mj} \approx 1$, то відповідно до (3.36) і (3.37) в порівняльних умовах

$$\gamma_{j0} > \gamma_{jm}. \quad (3.38)$$

Таким чином, похибка оптико-абсорбційного АП, реалізованого по схемі відношення, визначається в основному адитивною складовою (або похибкою в нульовій точці шкали). Це створює необхідність більш частоті калібровки нульової точки шкали АП. Ця вимога, як правило, закладається в регламент настройки і перевірки оптико-абсорбційних газоаналізаторів.

Похибка (3.35) γ_j є випадковою величиною. У технічній документації нормується зазвичай межа основної похибки АП, що допускається, тобто γ_{jn} .

Відповідно до (3.26) і (3.35) складовими γ_{jn} є систематична ($\bar{\gamma}_{jn}$) і випадкова (σ_j) похибки, де в свою чергу складовими $\bar{\gamma}_{jn}$ є

- оцінка математичного очікування γ_j ;
- похибки метрологічного забезпечення АП, $\Delta x_{\bar{A}} / x_{mj}$, що включають похибки при градуванні ЗГС і похибки апроксимації СХ.

3.4 Розробка математичної моделі метрологічних характеристик аналітичного каналу оптичного генераторного вимірювача концентрації газів

Відповідно до даних, одержаних в попередніх підрозділах, робоча СХ будь-якого аналітичного каналу фільтрового оптико-абсорбційного газоаналізатора має вигляд

$$y_j = y_j(x_j) = 1 - K_j \cdot \frac{U_1}{U_2} T(x_j). \quad (3.39)$$

Номінальна СХ

$$\hat{y}_j(x_j) = 1 - \hat{K}_j \cdot \frac{\hat{U}_1}{\hat{U}_2} T(x_j), \quad (3.40)$$

а при рекомендованій настройці параметрів аналітичного каналу

$$\hat{y}(x_j) = 1 - T(x_j) = z(x_j). \quad (3.41)$$

Таким чином, номінальна СХ j -го аналітичного каналу газоаналізатора, реалізованого по рекомендованій комбінованій вимірювальній схемі, не залежить від таких параметрів аналітичного каналу як $J_0(\nu)$, T_1 , K_n , K_0 , а визначається лише спектральними характеристиками компонента, що визначається, і фільтруючого елементу, усередненими в смузі пропускання каналу і відносного пропускання, що відображається у вигляді функцій

$$T(x_j) = \frac{\int_{\Delta\nu} S_\phi(\nu) e^{D(\nu)\nu} d\nu}{\int_{\Delta\nu} S_\phi(\nu) d\nu}, \quad (3.42)$$

або поглинання

$$Z(x_j) = 1 - T(x_j). \quad (3.43)$$

Номінальна чутливість аналітичного каналу до вимірюваної в аналітичному каналі концентрації – рівна

$$S_i = \frac{d\hat{y}_j}{dx_j} = -K_j \cdot \frac{\hat{U}_1}{\hat{U}_2} \cdot \frac{dT}{dx_j} = \frac{dT}{dx_j} = \frac{dz}{dx_j}, \quad (3.44)$$

чутливість аналітичного каналу до невимірюваної в даному каналі концентрації рівна

$$S_{Hi} = d\hat{y}_j / dx_{Hi} = -dT / dx_{Hi}. \quad (3.45)$$

Показники вибірковості аналітичного каналу, налаштованого на j -ий компонент, до i -го, не вимірювального, компонента рівний

$$N_s = S_j / S_{Hi} = \frac{dT / dx_j}{dT / dx_{Hi}}. \quad (3.46)$$

Модель похибки аналітичного каналу, що обумовлена неконтрольованими змінами неінформативних параметрів, як випадкової величини, по виходу аналітичного каналу (при фіксованому значенні x_j) має вигляд

$$\Delta y_j = y_j - \hat{y}_1 = \Delta \left(K_j \frac{U_1}{U_2} \right) T(x_j). \quad (3.47)$$

Модель похибки каналу по вимірюваній величині (без урахування похибок апроксимації і лінеаризації СХ) має вигляд

$$\Delta x_j = \frac{\Delta y_j}{S_j} = \frac{\delta \cdot (K_j \frac{U_1}{U_2}) T(x_j)}{\frac{dT}{dx_j}} \cdot \quad (3.48)$$

Якщо коефіцієнт настройки K_j підтримується в процесі вимірювання на номінальному рівні K_{j0} (тобто $\delta K_j = 0$), то абсолютна Δx_j , відносна dx_j і приведена γ_j похибки аналітичного каналу як випадкові величини мають відповідно наступний вигляд

$$\Delta x_j = \frac{T(x_j)}{dT/dx_j} (\delta U_1 - \delta U_2); \quad (3.49)$$

$$\delta x_j = \frac{\Delta x_j}{x_j} = \frac{T(x_j)}{x_j \frac{dT}{dx_j}} (\delta U_1 - \delta U_2); \quad (3.50)$$

$$\gamma_j = \frac{\Delta x_j}{x_{mj}} = \frac{T(x_j)}{x_{mj} \cdot \frac{dT}{dx_j}} (\delta U_1 - \delta U_2), \quad (3.51)$$

де x_{mj} - значення, що відповідає верхній точці шкали j -го аналітичного каналу.

Провівши в моделях (3.49)-(3.51) заміну $T(x_j) = 1 - Z(x_j)$, отримаємо наприклад, для приведеної похибки

$$\gamma_j = \frac{[1 - z(x_j)]}{x_{mj} \cdot \frac{dT}{dx_j}} (\delta U_1 - \delta U_2). \quad (3.52)$$

Співвідношення вигляду (3.52) легші для аналізу складових похибки аналітичного каналу. При $x_j \rightarrow 0$, наприклад $T(x_j) \rightarrow 1$, $\frac{dT(0)}{dx_j} = const$ і співвідно-

шення $x_j(0) = \frac{1}{x_{mj} \frac{dT(0)}{dx_j}} (\delta U_1 - \delta U_2) = \gamma_j$ відображає похибки аналітичного ка-

налу в околі нульової точки шкали. Ця складова похибки не залежить від рівня x_j .

Із збільшенням рівня вимірюваної величини - функція $Z(x_j)$ зростає (відносно пропускання $T(x_j)$ - зменшується) і відповідно проявляється залежність похибки аналітичного каналу від x_j (тобто проявляється мультиплікативна похибка аналітичного каналу)

$$\gamma_{mj} = \frac{z(x_j)}{\frac{dT}{dx_j} x_{mj}} (\delta U_1 - \delta U_2). \quad (3.53)$$

Характер залежності γ_{jm} від x_j - істотно залежить від рівня вимірюваної величини. На лінійній ділянці СХ аналітичного каналу, де $T(x_j)$ і $Z(x_j)$ є лінійними функціями, а $\frac{dT}{dx_j} = const$, мультиплікативні складові абсолютної Δx_j і приведеної γ_j похибок каналу по модулю зростають пропорційно рівню x_j .

$$\gamma_{mj} = \frac{z(x_j) \cdot x_j}{x_j \frac{dT}{dx_j} x_{mj}} (\delta U_1 - \delta U_2) = \frac{x_j}{x_{mj}} (\delta U_1 - \delta U_2). \quad (3.54)$$

В той же час рівень відносної похибки δx_j на лінійній ділянці СХ, де

$$\frac{dT}{dx_j} x_j = -z(x_j) \ll 1, \text{ має вигляд}$$

$$\delta x_j = \frac{1 - z(x_j)}{x_j \frac{dT}{dx_j}} (\delta U_1 - \delta U_2) = \left[\frac{1}{z(x_j)} - 1 \right] (\delta U_1 - \delta U_2) \cong \frac{1}{z(x_j)} (\delta U_1 - \delta U_2), \quad (3.55)$$

тобто змінюється обернено пропорційно до рівня x_j (оскільки на лінійній ділянці СХ функція $Z(x_j)$ змінюється пропорційно рівню x_j) і визначає тим самим межі ви значення каналу.

З приведенного розгляду можна зазначити, що на лінійній ділянці робочої СХ аналітичного каналу, де зазвичай $x_j \ll x_{mj}$, абсолютна і приведена похибки каналу визначаються в основному адитивними складовими і практично не залежать від рівня вимірюваної концентрації x_j . На відміну від цього відносна похибка аналітичного каналу на тій же ділянці СХ має гіперболічний характер залежності від x_j і таким чином цілком визначається мультиплікативною складовою похибки.

При виході за межі лінійної ділянки СХ номінальні чутливості S_j аналітичних каналів зменшуються. У експоненціальному наближенні СХ, наприклад, це зменшення чутливості із збільшенням оптичної щільності аналізованої суміші відбувається по експоненті. Зменшення чутливості призводить до збільшення рівня похибок аналітичних каналів в співвідношенні $1/S_j$. Проте реальний характер залежності абсолютної і приведеної похибок аналітичних каналів від вимірюваної величини x_j визначається чинником, який із зростанням x_j збільшується менш повільніше, ніж $1/S_j$ (за рахунок зменшення функції $T(x_j)$).

Більш наочно уявлення про характер залежності похибки аналітичного каналу від вимірюваної величини, можна скласти на основі відношення поточного значення похибки $\Delta x_j(x_j)$, $\gamma_j(x_j)$ до відповідних значень похибки в нульовій точці шкали $\Delta x_j(0)$, $\gamma_j(0)$.

Склавши ці співвідношення для абсолютної і приведеної похибок аналітичного каналу, отримаємо відповідно до (3.54)-(3.55) співвідношення вигляду

$$\alpha(x_j) = \frac{\Delta x_j(x_j)}{\Delta x_j(0)} = \frac{\Delta y_j(y_j)}{\Delta y_j(0)} = \frac{dT(0)}{T(0)} \cdot \frac{dT(0)/dx_j}{dT(x_j)/dx_j} = \frac{T(x_j)}{T(0)} \cdot K_H(x_j), \quad (3.56)$$

де $K_H(x_j) = \frac{dT(0)/dx_j}{dT(x_j)/dx_j}$ поточний коефіцієнт нелінійності СХ аналітичного ка-

налу. Відповідно до приведених даних коефіцієнт $K_H(x_j) \geq 1$, причому $K_H(0) \rightarrow 1$ і збільшується із зростанням x_j .

3.5 Розроблення математичної моделі оптичного генераторного вимірювача концентрації газів і результати математичного моделювання

Прилад, що розробляється, відноситься до вимірювального приладу. Може використовуватися на теплових пунктах і станціях газопостачання для вимірювання густини природного газу. Крім того, прилад можна використовувати для контролю якості у виробничих і лабораторних умовах.

Після аналізу всіх існуючих методів вимірювання показника заломлення газів був обраний метод з найбільшою чутливістю (10^5) і найкращими масо-розмірними властивостями.

У методі Гальвакса порівнювані рідини поміщають у відсіки кювет. Перегородка резервуара і одна зі стінок 2 виконані з плоскопаралельних пластин строго перпендикулярно одна одній. Інші стінки кювети зроблені з простого дзеркального скла. Помістіть кювету на світлочутливу частину світла та освітліть її монохроматичним світлом так, щоб вона ковзала вздовж перегородки з боку газу з меншим показником заломлення. У цьому випадку відрив кювети від газу з більшим показником заломлення ($n > n_0$) виконує роль вимірювальної призми з кутом заломлення $\alpha = 90^\circ$. Кут виходу граничного променя вимірюється фотолінійкою.

Основна формула приймає для розглянутого випадку вид

$$n_0 = \sqrt{n^2 - \sin^2 \beta}. \quad (3.57)$$

Беручи до уваги, що різниця $n - n_0$ мала, а тому співвідношення можна перетворити таким чином

$$n - n_0 = \sin^2 \frac{\beta}{2n_0}. \quad (3.58)$$

Точність виміру різниці $n - n_0$ визначається точністю виміру кута $n_0 \approx n$ відповідно до формули

$$\Delta n = \frac{\sin \beta \cdot \cos \beta}{n_0} \Delta \beta. \quad (3.59)$$

Якщо ми врахуємо, що кут β неважко виміряти з точністю до 0,1', легко побачити, що метод Гальвакса може виміряти невеликі відмінності показника заломлення ($<0,01$) з точністю до декількох знаків шостої одиниці (10^{-6}). Однак слід пам'ятати, що для забезпечення такої точності необхідно, щоб усі частини кювети були абсолютно однакових температур. Крім того, зі зменшенням кута умови спостереження граничного променя стають все більш несприятливими, різкість межі зменшується і точність її візуалізації.

Отже концентрація газу дорівнює

$$\rho = \frac{n_0^2 + \sin^2 \beta - 1}{n_0^2 + \sin^2 \beta + 2} \cdot \frac{M}{2.25 \cdot 10^{24} \alpha}, \quad (3.60)$$

де n_0 - показник заломлення еталонного газу, M - молекулярна маса газу, ρ - концентрація газу, α - поляризуємість, β - кут відхилення граничного променя.

Або

$$\rho = \frac{n_0^2 + \sin^2 \left(\arctg \left(\frac{S}{h} \right) \right) - 1}{n_0^2 + \sin^2 \left(\arctg \left(\frac{S}{h} \right) \right) + 2} \cdot \frac{M}{2.25 \cdot 10^{24} \alpha}, \quad (3.61)$$

де S – відхилення граничного пучка від нуля променя, h – відстань між кюветою і променем.

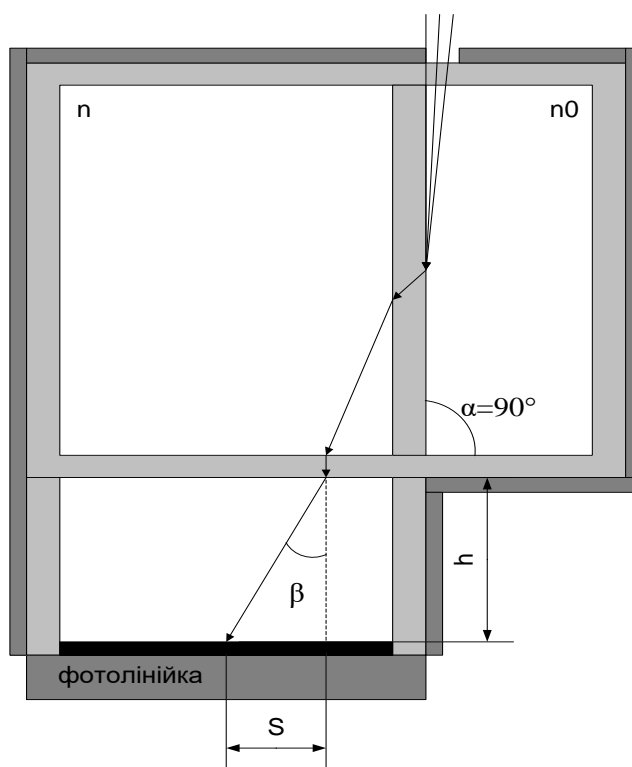


Рисунок 3.1 – Кювета для метода Гальвакса

Результати математичного моделювання оптичного генераторного вимірювача концентрації газів представлені на рис. 3.2 – рис. 3.3.

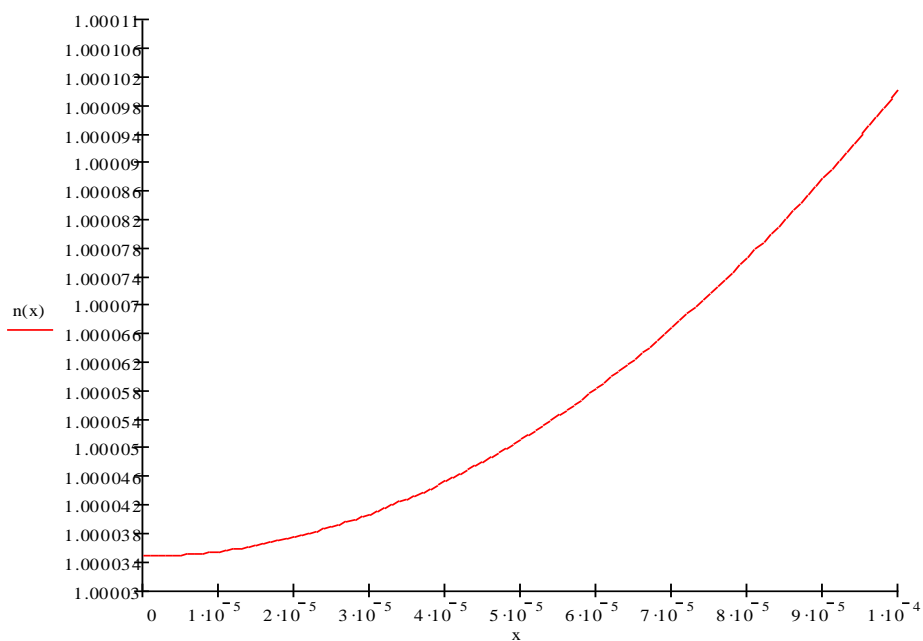


Рисунок 3.2 – Залежність зміщення граничного променя від зміни показника заломлення

З графічного представлення можна зробити висновок, що діапазон вимірювання показника заломлення сильно залежить від величини зміщення. При цьому найбільша чутливість спостерігається на початку діапазону вимірювань.

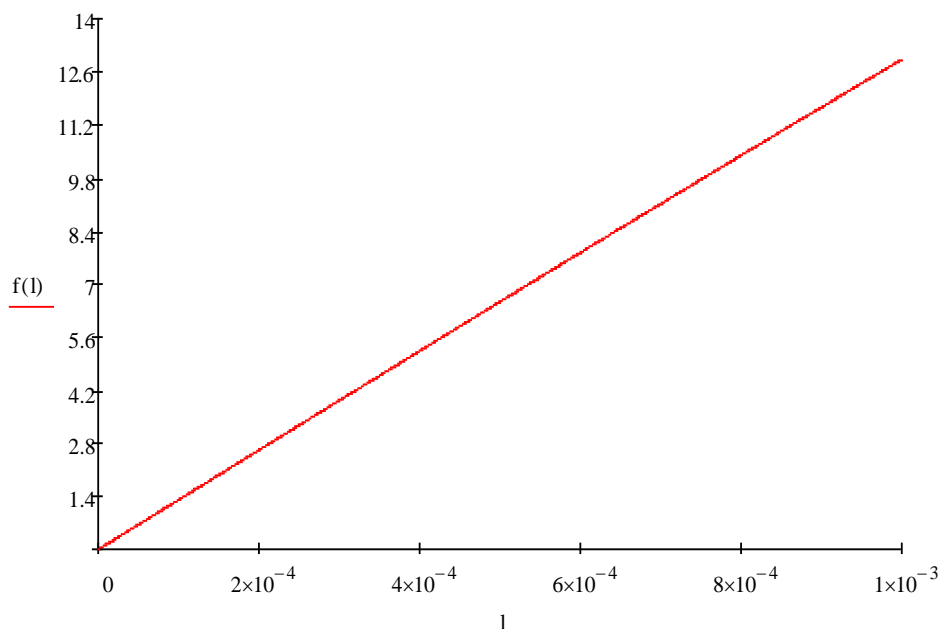


Рисунок 3.3 – Графік функції перетворення

4 РОЗРОБКА ОПТИЧНОГО ГЕНЕРАТОРНОГО ВИМІРЮВАЧА КОНЦЕНТРАЦІЇ ГАЗІВ

Останнім часом на ринку України підвищений попит мають різні переносні прилади для вимірювання концентрації природного газу. Це пов'язано з тим, що метан є одним з основних газів, який широко використовується починаючи з кожного будинку і закінчуючи великими підприємствами.

У даному розділі розглядаються теоретичні основи та завдання проектування одноканального переносного ІЧ газоаналізатора для контролю концентрації природного газу, зокрема: розробка оптимальної структури, оптико-абсорбційного газоаналізатора, вибір технічного, алгоритмічного і метрологічного забезпечення ІЧ газоаналізатора.

4.1 Якісні показники газоаналізаторів для контролю концентрації природного газу

Основними якісними показниками газоаналізаторів для контролю концентрації природного газу є: показники призначення; показники надійності; метрологічні показники.

Показники призначення, що включають, діапазони зміни контрольованих параметрів, вид виконання і ін., визначаються в основному діючими у відповідних країнах нормативними документами. Нормативна база, що діє в даний час в Україні стосовно контролю по використанню вибухонебезпечних газів. Відповідне вдосконалення нормативної бази стримується головним чином реальним станом вітчизняного машинобудівного і паливного комплексів, для модернізації яких потрібні величезні інвестиційні вкладення. Саме ці чинники стримують вдосконалення показників призначення вітчизняних газоаналізаторів для контролю концентрації природного газу.

Показники надійності газоаналізаторів для контролю концентрації природного газу визначаються системотехнікою приладів і елементною базою, що в них використовується. Вітчизняна елементна база в цілому поступається ім-

портній по технічних характеристиках, надійності і особливо номенклатурі. Тому в багатьох вітчизняних газоаналізаторах використовується, разом з вітчизняною, імпортна комплектація. У цих умовах для забезпечення конкурентоспроможності вітчизняних приладів доводиться ускладнювати системотехніку газоаналізаторів.

Головним чином за рахунок системотехнічних рішень разом з частковою імпортною комплектацією вдається підтримувати показники надійності, а також метрологічні характеристики газоаналізаторів для контролю концентрації природного газу, на рівні кращих зарубіжних зразків.

4.2 Розроблення структурної схеми оптичного генераторного вимірювача концентрації газів

В даний час, у зв'язку із зростаючою необхідністю поліпшення контролю викидів газу (особливо у вугільних шахтах) виникла гостра потреба в компактних переносних приладах: надійних, зручних, і простих в експлуатації (особливо з урахуванням того, що експлуатуються вони, як правило, не фахівцями).

Відповідно до рекомендацій, одержаних в другому розділі дисертації, в однокомпонентному газоаналізаторі слід використовувати двоканальну оптичну схему вимірювання. Сигнали вимірювання каналів - один робочий і, відповідно, один порівняльний, виділяються за допомогою двох інтерференційних світлофільтрів, встановлених на обтюраторі. Так як у переносних ІЧ газоаналізаторах бажано використовувати безобтюраторні схеми вимірювання, у однокомпонентному газоаналізаторі, що розробляється, використовуються один аналітичний канал в якому використовується комбінована вимірювальна схема (розділ 2). Використання мікропроцесорної техніки дає можливість у принципі виключити порівняльний канал, а як порівняльний сигнал використовувати сигнал, одержаний при первинній настройці приладу при продуванні його чистим повітрям. Цей сигнал запам'ятовується контролером і потім використовується при обробці сигналів вимірювальної інформації.

Використання мікропроцесорної техніки дозволяє також зберігати результати вимірювань в пам'яті ЕОМ, коректувати алгоритм роботи приладу у разі потреби без переробки конструкції приладу, спрощує використання газоаналізатора, оскільки програма проводить самодіагностику і підготовку приладу до роботи, а також здійснює управління процесом вимірювання.

У газоаналізаторі, що розробляється, як основні елементи оптичної схеми вибрані (рис. 4.1).

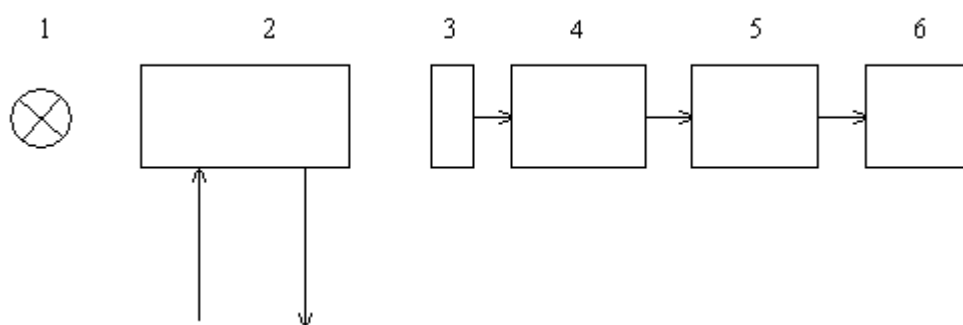


Рисунок 4.1 – Структурна схема газоаналізатора: 1 – джерело ІЧ - випромінювання; 2 – кювета; 3 – ІЧ датчик; 4 – генератор; 5 – мікроконтролер; 6 – блок індикації

Джерело ІЧ випромінювання (1) - ніхромова нитка розжарення, що живиться стабілізованим джерелом напруги у 2 В; 100мм кювети (2); піроелектричний приймач з вбудованим вузькосмуговим інтерференційним світлофільтром (3), настроєним на максимум пропускання для $\lambda_{CH_4} = 3,31$ мкм; частотний перетворювач (4) формує вимірювальний сигнал у вигляді періодичних однополярних імпульсів амплітудою до 4В і різною частотою. Ці імпульси поступають на лічильник мікроконтролера (5), який в режимі вимірювання працює як частотомір. Програма, записана в мікроконтролері, по закладеній таблиці відповідності виводить на індикатор (6) вже готове значення концентрації.

Плата контролера (ПК) виконує наступні функції:

1. керування модуляцією ІЧ-випромінювача;
2. керування живленням всіх складових;
3. зчитування команд з клавіатури управління;

4. управління цифровим обміном з ЕОМ у форматі RS-232;
5. підрахунок частоти, яка поступає з первинного перетворювача;
7. обчислення концентрації;
8. виведення обрахованих даних на індикатор.

Структурна схема плати контролера показана на рис. 4.2.

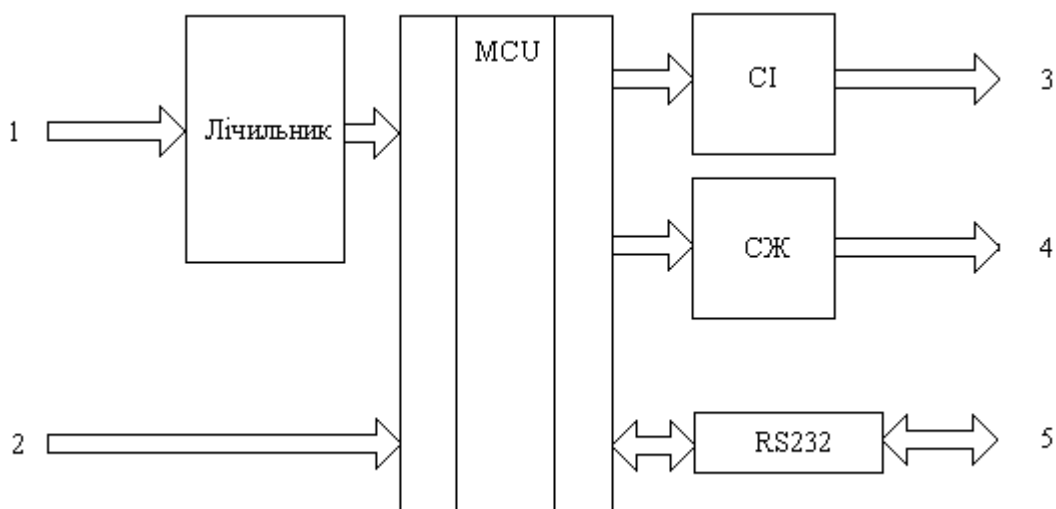


Рисунок 4.2 – Структурна схема плати контролера:

- 1 – вихід частотного перетворювача;
- 2 – виходи з клавіатури управління
- 3 – система управління індикацією;
- 4 – система управління живленням;
- 5 – інтерфейс зв'язку з ЕОМ.

Проблема вибору типу центрального процесора є однією з найважливіших при проектуванні. Наприклад, на етапі відладки програмного забезпечення необхідно, щоб процесор не тільки виконував всі вищезазначені завдання, але і забезпечував достатньо швидко модернізацію програми. Основна вимога до центрального процесора - забезпечення заданої швидкодії. Випромінювач працює з частотою 1 Гц, отже, час існування вихідного сигналу з частотного перетворювача складає близько 500 мс. Тобто протягом цього часу процесор повинен встигнути обробити дані, провести усереднювання, розрахувати концентрацію по таблиці відповідності і вивести результат на індикатор.

Виходячи зі всього цього, для проектування дослідних зразків газоаналізатора був вибраний процесор Atmega16L фірми ATMEL. Процесор має достатню швидкодію для поставленої задачі, його тактова частота складає 8МГц. Об'єм його оперативної пам'яті складає 16 кБайт, що дозволяє не обмежувати можливості розробленої програми недостатньою кількістю пам'яті. Мікропроцесор має вбудований контролер послідовного порту, що особливо важливо при відладці програми, коли часто доводиться вносити в неї необхідні коректування. Ця особливість дозволяє виключити використання програматора, а натомість підключати мікроконтролер прямо до послідовного порту будь-якого комп'ютера і здійснювати прошивку програми з його допомогою.

У газоаналізаторі контролер здійснює наступні функції: виділення аналітичних сигналів, обробка сигналів по заданих алгоритмах, лінеаризація СХ газоаналізатора, управління режимами роботи газоаналізатора.

Зупинимось докладніше на алгоритмах обробки сигналів вимірюваної інформації, використаних в газоаналізаторі.

При включенні режиму вимірювання, мікроконтролер (МК) подає живлення на перетворювач і ІЧ-випромінювач. Внаслідок чого на виході частотного перетворювача формуються прямокутні імпульси з амплітудою близько до 5 В і частотою, яка відповідає концентрації природного газу, що знаходиться у вимірювальній кюветі. Оскільки включений режим вимірювання, лічильник МК активований і підраховує кількість імпульсів, які в свою чергу поступають від перетворювача. Після закінчення 500мс підрахунок імпульсів закінчується, контролер вимикає живлення перетворювача і ІЧ-випромінювача для економії енергії. У подальші 500 мс виконуються такі і в такій послідовності операції:

1. перехід від кількості порахованих імпульсів в частоту;
2. лінійно апроксимуючи контрольні точки, занесені в пам'ять МК, по прямому перетворенню, частоту перераховує в концентрацію і записує значення в пам'ять МК;
3. виведення значення на індикатор (РКІ);
4. у випадку підключення до послідовної шини ЕОМ, передати дані.

Структурна схема оптичного генераторного вимірювача концентрації газів наведена на рис. 4.3.

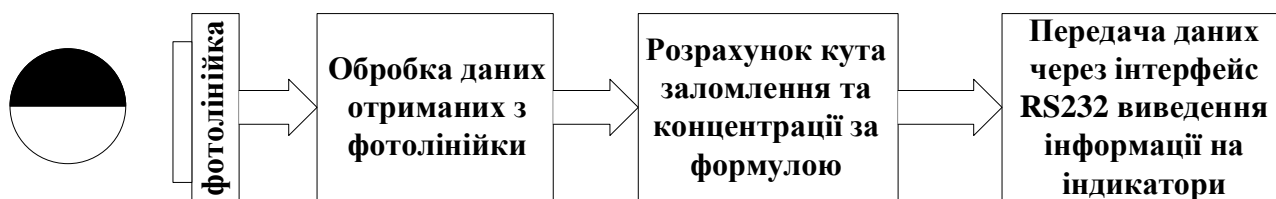


Рисунок 4.3 – Структурна схема оптичного генераторного вимірювача концентрації газів

Структурна електрична схема оптичного генераторного вимірювача концентрації газів наведена на рис. 4.4.

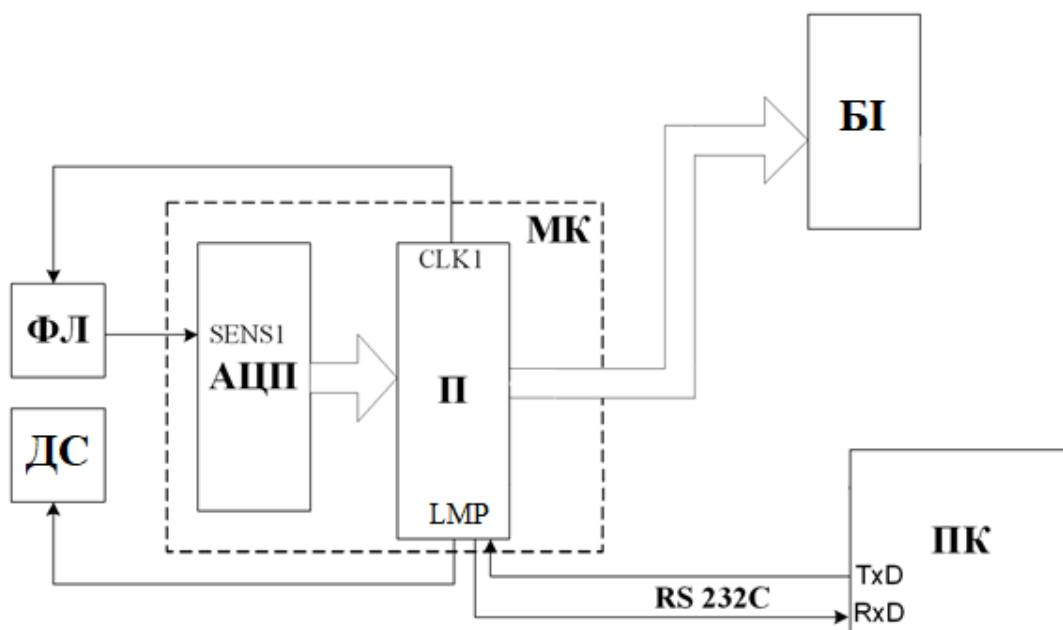


Рисунок 4.4 – Структурна електрична схема оптичного генераторного вимірювача концентрації газів

4.3 Аналіз умов експлуатації оптичного генераторного вимірювача концентрації газів

У даній роботі представлено фотоелектричний датчик Galvaх для визначення концентрації газу методом рефракції. Цей датчик призначений для під-

вищення точності концентрації природного газу.

Це обладнання класифікується як переносне наземне обладнання.

Цей прилад є побутовим радіоелектронним пристроєм, призначеним для експлуатації на відкритому повітрі в умовах помірного клімату (температура - 35...+35 °С, відносна вологість повітря 45...75%). Виникають додаткові механічні напруги і вібрації.

За параметрами роботи обладнання відноситься до категорії 1.1 - обладнання, призначене для експлуатації і зберігання операцій в приміщеннях зі штучним кліматом і для короткочасної роботи в інших умовах, в тому числі на повітрі.

Спростимо аналіз умов експлуатації до наступного вигляду (табл. 4.1).

Таблиця 4.1 - Аналіз умов експлуатації

Клас використання	Наземна
Група використання	Переносна (портативна)
Підгрупа використання	Побутова
Категорія розміщення	Навколишнє середовище (нестабільна температура та вологість)
Група виконання	Апаратура, яка працює на відкритому повітрі

Вибрані класи обґрунтуємо відповідно до [1].

Категорія використання - Наземна (обладнання призначене для використання в наземних оптичних системах);

Група використання - Портативне (обладнання для занять спортом на природі);

Підгрупа використання - Побутове (обладнання призначене для використання особами без спеціальної підготовки);

Категорія розміщення - 1.1 (для експлуатації і зберігання в кліматизованих камерах і короткочасної роботи в інших умовах, в тому числі в закритих кондиціонованих приміщеннях в кондиціонованих умовах);

Група ефективності - для м'якого клімату, холодів і середньорічного мінімуму температура нижче $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Таблиця 4.2 підсумовує специфікації зовнішніх дій

Таблиця 4.2 – Норми зовнішніх дій

Вид дії	Норма
Міцність при транспортуванні	
Довжина ударного імпульсу, мс	5-15
Прискорення пікове, g	15
Кількість ударів у хвилину	1000
Робоча температура, $^{\circ}\text{C}$	-35...+35
Граничні температури:	
Максимальна $^{\circ}\text{C}$	+45
Мінімальна, $^{\circ}\text{C}$	-45
Вологостійкість:	
Відносна вологість, %	90
Температура, $^{\circ}\text{C}$	35
Стійкість до зниженого атмосферного тиску, кПа	100

Аналіз технічних умов:

1. Найменування пристрою – багатоканальний вимірювач концентрації газу.

2. Призначення – використання в системах визначення параметрів природного газу.

3. Комплектація - корпус, плата, ЕРУ, з'єднувальні провідники, гвинти, шайби.

Вимоги до конструкції пристрою:

1. Зовнішній вигляд - корпус прямокутної форми з отворами всередині для розміщення роз'ємів живлення, вхідного та вихідного сигналу.

2. Зовнішній вигляд обладнання повинен задовольняти всім ергономічним та естетичним характеристикам, а саме: психофізіологічним, гігієнічним, інформаційній виразності. Раціональність форми і цілісність композиції.

3. Основний корпус пристрою повинен бути виготовлений з міцного вологостійкого матеріалу.

4.4 Розроблення електричної схеми оптичного генераторного вимірювача концентрації газів

Основними елементами приладу, що розробляється, є керуючий контролер обробки інформації, мікросхема світлоприймача (світла) для здійснення реєстрації, інтерфейс RS232 для зв'язку з ПК та пам'ять для тимчасового зберігання результатів вимірювань.

Принципова електрична схема показана в графічній частині проекту і наведена в додатку.

Основним призначенням системи є реєстрація та обробка зображень, обмін інформацією через послідовний інтерфейс RS-232.

За допомогою фотолінійки прочитайте потрібне зображення. Оцифрування зображення здійснюється за допомогою 10-розрядного АЦП, вбудованого в МК на каналах PF0 і PF1.

Для можливого підключення системи до мережі зв'язку схема повинна мати спеціальний адаптер мікросхеми для послідовного каналу зв'язку.

Пристрій має два інтерфейси для послідовної передачі даних: інтерфейс RS-232. В якості мікросхеми інтерфейсу RS-232 використовується мікросхема ADM 232A.

Адаптери включені для перетворення сигналів у схеми. Напруга живлення цієї мікросхеми становить +5 В. Дані послідовно вводяться та виводяться через входи RxD (PD0) та TxD (PD1) відповідно. Дані, що передаються, і отримані дані зберігаються в спеціальному реєстрі UDR. Параметри прийому-передачі даних знаходяться в реєстрі UCR. Інформація про статус UART зберігається в реєстрі статусу USR. Швидкість передачі даних встановлюється в реєстрах UBRR[10, 11].

Аналіз бібліотеки компонентів, щоб визначити, чи забезпечує вона специфічні характеристики продукту, які продиктовані умовами експлуатації та режимом роботи, і чи необхідно окреслити функції, розроблені будь-якими нормальними проектними заходами. номінальні характеристики елементів схеми

повинні враховувати відповідність потужності, їх швидкості, технічні вимоги до забезпечення обладнання та конструкції, наявність цих типів елементів у масовому виробництві.

Відповідно до електричної схеми виконуємо опис підібраних радіодеталей і характеристик обраних радіоелементів. Варто відзначити, що при виборі компонентної бази перевага віддається радіодеталям з найменшими габаритними показниками, щоб пристрій мав мінімально можливі габарити. Через це вітчизняних радіодеталей в пристрої небагато, чи то через габаритність елементів, чи то через відсутність закордонних аналогів. Однак ці та інші доступні зараз, чого не було раніше. Крім того, деякі радіодеталі коштують навіть менше, ніж у нас.

Головним елементом даної системи є мікроконтролер, який здійснює керування роботою всієї системи. Дана система побудована на базі однокристальної мікроЕОМ АТМega163 фірми Atmel.

Приведемо нижче технічні характеристики МК та опишемо можливості даного МК.

- 130 команд, які виконуються, більшість за один машинний такт.
- 32 робочих регістрів загального призначення.
- Цілком статичний режим роботи.
- Продуктивність до 8 MIPS при 8 МГц.
- Вбудований 2-х тактовий помножувач.
- Енергонезалежна пам'ять програм і даних.
- 16К байт із кількістю циклів перепрограмування до 10 000.
- 512 байт EEPROM із припустимою кількістю циклів стирання запису. до 100 000.
- 1024 байт внутрішньої SRAM.
- Периферійні функції.
- два 8-бітних таймери/лічильника із режимом порівняння.
- один 16-бітний таймер/лічильник із режимом порівняння і захоплення.

- лічильник реального часу з програмувальним генератором.
- 8-и каналний, 10-и бітний АЦП.
- байт-орієнтований, двопровідний інтерфейс
 - 32 програмувальних виходи вхід-вихід.
 - 40 вивідний корпус PDIP.
 - Напруга живлення: 4.5 В до 5.5 В.
 - Тактова частота: 0-8 МГц.

T0	1	PB0	PA0	40	ADC0
T1	2	PB1	PA1	39	ADC1
AIN0	3	PB2	PA2	38	ADC2
AIN1	4	PB3	PA3	37	ADC3
SS	5	PB4	PA4	36	ADC4
MOSI	6	PB5	PA5	35	ADC5
MISO	7	PB6	PA6	34	ADC6
SCK	8	PB7	PA7	33	ADC7
RES	9	RESET	AREF	32	
	10	VCC	AGND	31	
GND	11	GND	AVCC	30	
X2	12	XTAL2	PC7	29	TOSC2
X1	13	XTAL1	PC6	28	TOSC1
RxD	14	PD0	PC5	27	
TxD	15	PD1	PC4	26	
INT1	16	PD2	PC3	25	
INT0	17	PD3	PC2	24	
OC1A	18	PD4	PC1	23	SDA
OC1B	19	PD5	PC0	22	SCL
ICP	20	PD6	PD7	21	OC2

Рисунок 4.5 – Схемне позначення ATmega163

ATmega163 містить 16Кбайт FLASH пам'яті програм, що програмується, 512 байт EEPROM, 1024 байт SRAM, 32 лінії входів-виходів, 32 робочих регістра, три гнучких таймери-лічильника з модулем порівняння, внутрішні і зовнішні переривання, послідовний програмувальний інтерфейс UART, байт-орієнтований двохпровідний послідовний інтерфейс, 8-каналний, 10-бітний АЦП, Watchdog таймер із внутрішнім генератором що програмується, порт SPI і чотирма режимами заощадження енергії, що програмуються. У режимі очікування ЦП не працює, але SRAM, таймери, лічильники, порти SPI і система переривань працюють. У режимі вимкнення процесор зберігає вміст усіх регістрів, зависає генератор тактового сигналу та зупиняє всі інші функції кристала, доки не надійде зовнішнє переривання або зовнішня команда скидання. У ре-

жимі очікування тактовий генератор працює, коли інші функції контролера припиняються. У режимі придушення шуму АЦП, ЦП і всі блоки вводу/виводу вимикаються (крім АЦП), щоб мінімізувати вплив цифрового шуму.

АТmega163 містить 16Кбайт FLASH пам'яті програм, що програмується, 512 байт EEPROM, 1024 байт SRAM, 32 лінії входів-виходів, 32 робочих регістра, три гнучких таймери-лічильника з модулем порівняння, внутрішні і зовнішні переривання, послідовний програмувальний інтерфейс UART, байт-орієнтований двохпровідний послідовний інтерфейс, 8-и каналний, 10-и бітний АЦП, Watchdog таймер із внутрішнім генератором що програмується, порт SPI і чотирма режимами заощадження енергії, що програмуються. У режимі очікування ЦП не працює, але SRAM, таймери, лічильники, порти SPI і система переривань працюють у вимкненому режимі.

Процесор зберігає вміст усіх регістрів, зависає генератор тактового сигналу і зупиняє всі інші функції кристала до надходження зовнішнього переривання або зовнішньої команди скидання. У режимі очікування тактовий генератор працює, коли інші функції контролера припиняються. У режимі придушення шуму АЦП центральний процесор і всі модулі введення і виведення, крім АЦП і асинхронного таймера, зупиняються, щоб мінімізувати вплив цифрового шуму на результати перетворення АЦП [7, 13].

10-розрядний модуль послідовного наближення АЦП, що входить до складу АТmega163, має такі основні параметри:

- Абсолютна похибка: $\pm 2 \text{ MZP}$
- Інтегральна нелінійність: $+0,5 \text{ MZR}$
- Швидкість: близько 15 000 вибірок/с.

Як джерело опорної напруги для АЦП можна використовувати як напругу живлення мікроконтролера, так і внутрішнє або зовнішнє джерело опорної напруги.

На вході для АЦП усіх моделей є 8-канальний аналоговий мультиплексор, що надає в розпорядження користувача 8 каналів з несиметричними входами.

Під час роботи АЦП має можливість працювати в режимах:

- Режим одиночного перетворення, коли ініціювання кожного перетворення ініціюється користувачем;
- Режим безперервного перетворення, коли ініціювання перетворення виконується послідовно через заданий інтервал часу.

Щоб дозволити роботу АЦП, потрібне ведення журналу. 1 до біта ADEN регістра ADCSR, вихід 0. Якщо АЦП вимикається протягом періоду перетворення, то перетворення не буде завершено (результат попереднього перетворення залишиться в регістрі даних АЦП).

В ATmega163 режим роботи АЦП визначається станом ADFR біт. Якщо встановлено значення «1», АЦП працює в режимі безперервного перетворення. У цьому режимі початок кожного наступного перетворення виконується автоматично після закінчення поточного перетворення. Якщо біт ADFR скинутий на «0», АЦП працює в режимі одиночного перетворення, а початок кожного перетворення виконується командою користувача [3].

Виконуйте кожне перетворення в режимі одиночного перетворення, а перше — у режимі безперервного перетворення здійснюється установкою в «1» розряду ADSC регістра ADCSR. У одиночному та безперервному режимах перетворення цикл перетворення починається з першого наростаючого фронту тактового сигналу без встановлення біта ADSC. Якщо використовується тригер переривання, перетворення починається на першому наростаючому фронті сигналу після встановлення вибраного прапора переривання. Крім того, коли цей прапор встановлено, перетворювач модуля АЦП буде скинуто.

Це забезпечує фіксовану затримку між генерацією запиту на переривання та початком циклу перетворення.

Тривалість циклу становить 13 циклів з асиметричними входами і 13 або 14 циклів з диференціальними входами, вибірка і збереження вхідного сигналу займає 1,5 і 2,5 циклу відповідно. Після 13 (14) циклів перетворення завершується, біт ADSC апаратно скидається на «0» (у режимі одиночного перетворення), а результат перетворення зберігається в регістрі АЦП. У той же час прапор

переривання регістра ADIF встановлюється для генерації запиту на переривання. Як і прапори для інших переривань, прапор ADIF скидається апаратно, коли підпрограма обробки переривань запускається з АЦП, або програмно шляхом запису в нього журналу. 1. Переривання виконуються встановленням біта ADIE регістра ADCSR на «1» і встановленням прапора I регістра SREG [5].

Якщо АЦП працює в режимі безперервного перетворення, нове перетворення розпочнеться одразу після запису результату. У одноразовому режимі перетворення нове перетворення може бути розпочато відразу після біта ADSC (до збереження поточного результату перетворення), а цикл перетворення фактично розпочнеться не раніше, ніж через один раз після завершення поточного перетворення.

Для мінімізації погрішності самого АЦП необхідно правильно вибрати тактову частоту перетворення. З цією же метою на вході АЦП рекомендовано встановлювати фільтр низьких частот. Крім того, при розробці конструкції і топології друкованої плати варто дотримувати загальних правил проектування цифроаналогових пристроїв:

- на друкованій платі необхідно передбачити область суцільної металізації під аналогову «землю». Аналогова частина мікроконтролера й аналогова частина всього пристрою повинні розташовуватися над цією областю. Аналогові і цифрова «землі» повинні з'єднуватися один з одним у єдиній крапці друкованої плати;

- провідники, по яких поширюються аналогові сигнали повинні бути як можна коротше і розташовуватися над аналоговою «землею». Крім того, вони повинні бути розміщені якнайдалі від швидкодіючих цифрових ланцюгів;

- вихід AVCC мікроконтролера повинний підключатися до джерела харчування Vcc через Lc-фільтр.

- якщо які-небудь виводи АЦП використовуються як цифрові виходи, вони не повинні переключатися під час перетворення.

Для мінімізації електромагнітних перешкод, викликаних ядром процесора, всі розглянуті мікроконтролери мають додатковий режим «сплячого» режи-

му - ADC Noise Reduction (Analog-to-Digital Converter Noise Reduction Mode). У цьому режимі з усіх периферійних пристроїв функціонують тільки АЦП і сторожовий таймер. Патерни можна використовувати з тією ж метою (але менш ефективно).

У цьому режимі з усіх периферійних пристроїв функціонують тільки АЦП і сторожовий таймер. Режим очікування можна використовувати з тією ж метою (але менш ефективно).

Щоб використовувати АЦП у кожному зазначеному режимі, ви повинні переконатися, що АЦП увімкнено і не перетворює, потім переведіть АЦП у режим одиночного перетворення та ввімкніть переривання від АЦП, а потім переведіть мікроконтролер у режим зменшення шуму АЦП (або режим очікування) [4, 7].

ікл перетворення розпочнеться одразу після зупинки процесора.

Після завершення перетворення АЦП згенерує переривання, яке переведе мікроконтролер в активний режим, і запуститься програма обробки цього переривання.

В якості світильника використовувалася лінійна чутлива матриця TH7804A (рис. 4.6) виробництва ATMEL.

TH7804A призначена для використання в широкому різноманітті застосувань, включаючи сканування зображення, зчитування символів та кодів, оптичного розпізнавання кодів, виділення країв і позиціонування, оптичного лінійного та кутового кодування [27].

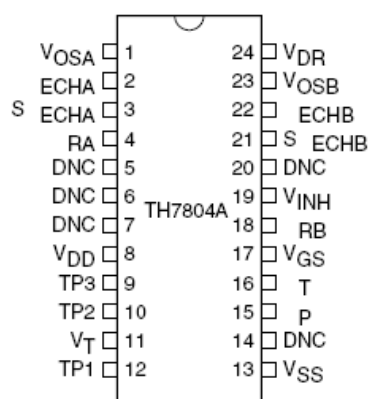


Рисунок 4.6 – Позначення виводів TH7804A

Опишемо технічні можливості та характеристики даної ФЛ.

- елементна організація 1024*1.
- крок чутливості у 400 точок на дюйм.
- висока лінійність та монотонність 256 півтонного (8-бітного) використання.
- низька затримка зображення до 0,5%.
- діапазон робочих температур в вільному повітрі 0-70 °С.
- діапазон температур зберігання -55-150 °С.
- максимальна довжина хвилі для джерела світла 1100 нм.
- максимальний час інтеграції становить 100 мс.
- діапазон вхідного цифрового струму становить -20-20 мА.
- напруга живлення становить 5В.

Датчик складається з 1024 фотодіодів впорядкованих в одномірну матрицю. Розміри пікселів 13 мкм (висота) на 13 мкм (ширина). Функціонування спрощується внутрішньою схемою управління, яка потребує два тактових сигнали на вході (SECHA – для непарних діодів, SECHB – для парних діодів). Падіння світлової енергії на фотодіодах генерує фотострум, який ділиться схемою на дві частини VOSA (непарні діоди), VOSB(парні діоди).

Як вже зазначалося в попередньому підрозділі, в якості мікросхеми інтерфейса RS-232 використана мікросхема типу ADM 232A.

Роз'єми DRB-9F і CN-USB_Type_B використовуються для підключення пристрою до ПК через послідовний інтерфейс RS-232 і USB.

Роз'єм PWL-4 використовується для підключення джерела живлення 5В.

Найвищими електричними параметрами володіють тверді танталові конденсатори поверхневого монтажу. При однакових геометричних розмірах танталові конденсатори мають більшу ємність, менший розподіл параметрів, меншу і передбачувану залежність ємності від температури, частоти та часу. Герметичність корпусу забезпечує захист від вологи [21, 35]. Електричні характеристики наведені в таблиці 4.3.

Резистори – метало плівкові, характеристики їх наведені у таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Електричні характеристики танталових конденсаторів

Діапазон номінальних ємностей	0,1 мкФ...100 мкФ (ряд Е6)
Допустиме відхилення ємності	+/- 10%, +/- 20%
Номінальна напруга	4В; 6,3В; 10В; 16В; 20В; 25В; 50В
Діапазон робочих температур	-55...+125 ⁰ С
Тангенс кута втрат	0,06...0,08
Струм витікання	0,4...4мкА

Таким чином, ці елементи відповідають заданим вимогам і забезпечують роботу нашого обладнання найкращим чином. У таблиці 4.3 наведені конструктивні та робочі характеристики цих компонентів.

Площа монтажу компонентів на друкованій платі розраховується наступним чином.

Таблиця 4.3 – Електричні характеристики метало плівкових чип-резисторів

Клас точності	5%	5%	5%	5%
Типорозмір	0603	0805	1206	0805
Номінальна потужність за 85 ⁰ С	0,1 Вт	0,125 Вт	0,25 Вт	0,125 Вт
Робоча напруга	50В	150В	200В	150В
Максимальна напруга	100В	300В	400В	300В
Діапазон робочих температур	-55...+125 ⁰ С	-55...+125 ⁰ С	-55...+125 ⁰ С	-55...+125 ⁰ С
Діапазон номінальних Опорів	1 Ом...10 МОм ряд Е24		10 Ом...1 МОм ряд Е96	

Якщо елемент має круглий переріз (для конденсаторів, транзисторів, вертикально встановлених резисторів тощо), площа обчислюється за формулою

$$S = d^2 \quad (4.1)$$

де d – діаметр компонента.

Якщо компонент розміщено горизонтально на платі, то це місце монтажу

$$S = a \cdot b, \quad (4.2)$$

де a , b – відповідно ширина і довжина установки.

Згідно з даними табл. 4.4 оптимальна площа друкованої плати приблизно 8000 (100X80) мм².

Таблиця 4.4 – Конструктивно-експлуатаційні характеристики радіоелементів

Назва і тип елемента	К-ть	Конструктивні параметри і надійність				
		Площа установки, мм ²	Діаметр виводів, мм	Надійність 10 ⁻⁶ 1/год	Діапазон температур, °C	Маса, г
Резистори						
0805	14	6,4	-	0,01	-55...+125	0,4
Конденсатори						
K53-66	5	9,6	-	0,01	-10...+85	0,2
K50-35	2	36	0,8	0,01	-55...+125	1,2
Кварцові резонатори						
SF-4000K	2	10	0,7	0,1	-40...+85	0,15
Мікросхеми						
ATMEGA163	1	264	0,75	0,1	0...+70	3,5
MC330	1	138	-	0,1	-10...+70	2,5
ADM232A	1	138	-	0,1	-10...+70	2,5
TH7804A	2	450	0,51	0,1	0...+70	5
Роз'єми						
DRB-9F	1	287	-	0,01	-45...+125	6
CN-USB_Type_B	1	126	-	0,01	-45...+125	4
PWL-4	1	140	-	0,01	10...+70	4

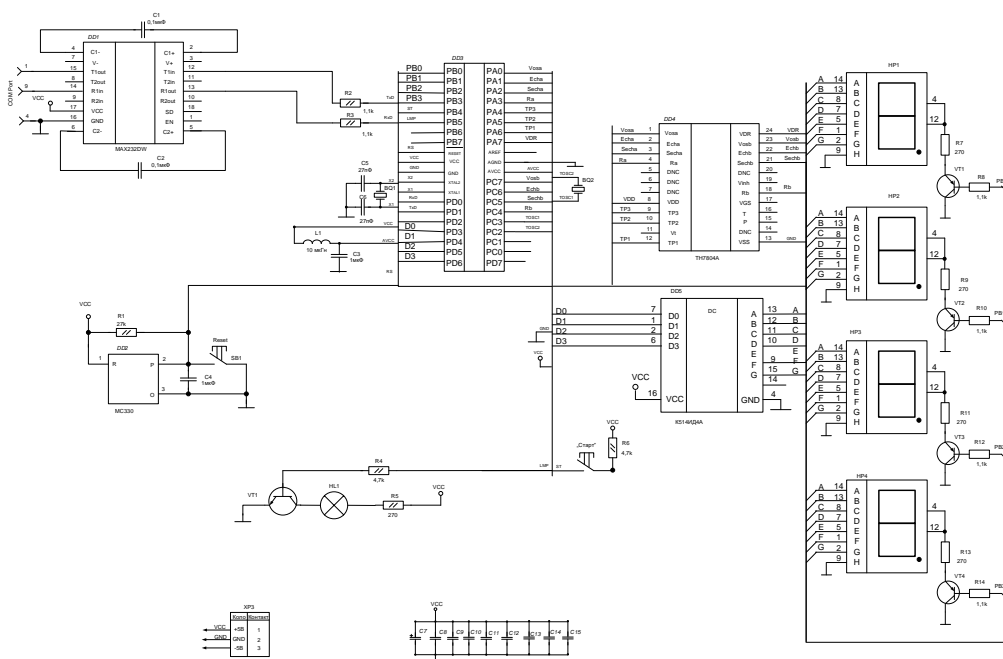


Рисунок 4.7 - Схема електрична принципова оптичного генераторного вимірювача концентрації газів

4.5 Розроблення конструкції оптичного генераторного вимірювача концентрації газів

Розробка топології плати та її компонування здійснюється за допомогою графічного пакету.

Топологічне креслення друкованої та складальне креслення оптичного генераторного вимірювача концентрації газів представлені на рис. 4.8 - рис. 4.9.

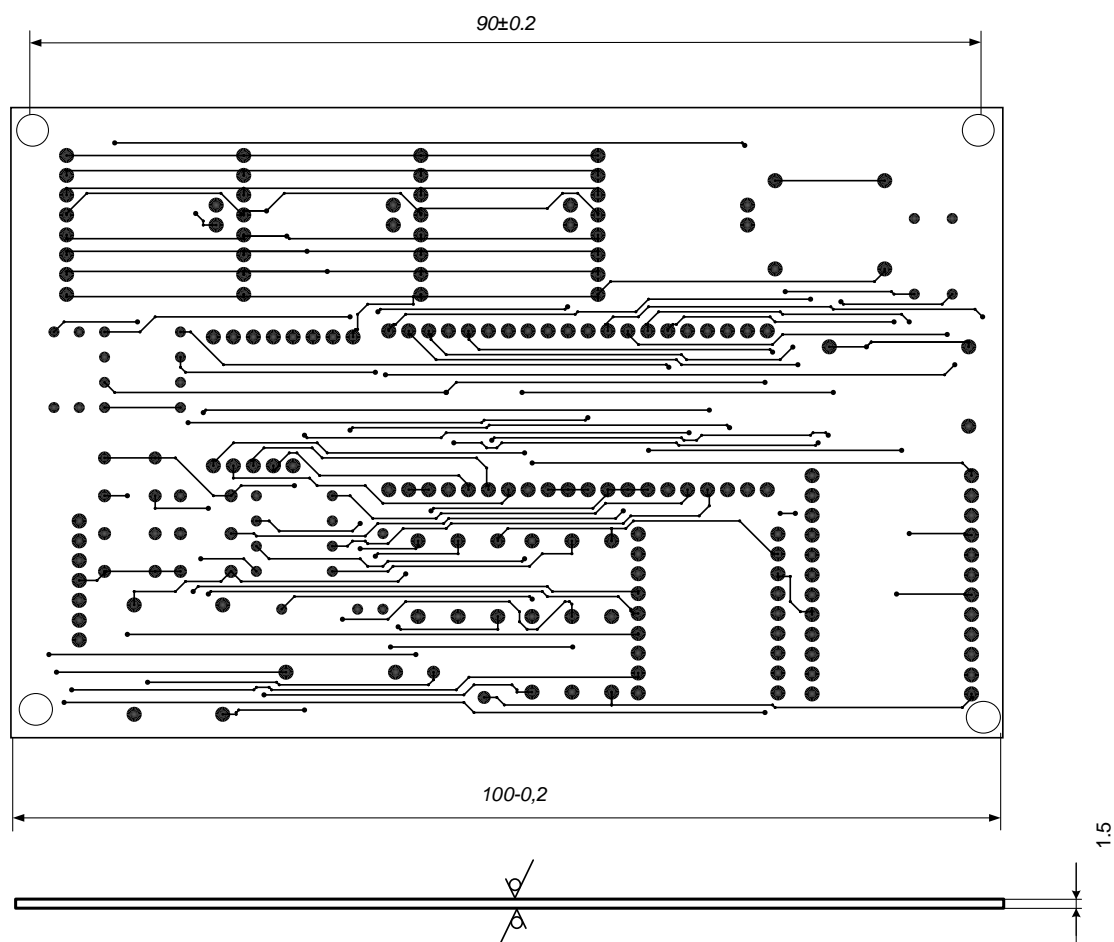


Рисунок 4.8 – Топологія верхньої сторони друкованої плати

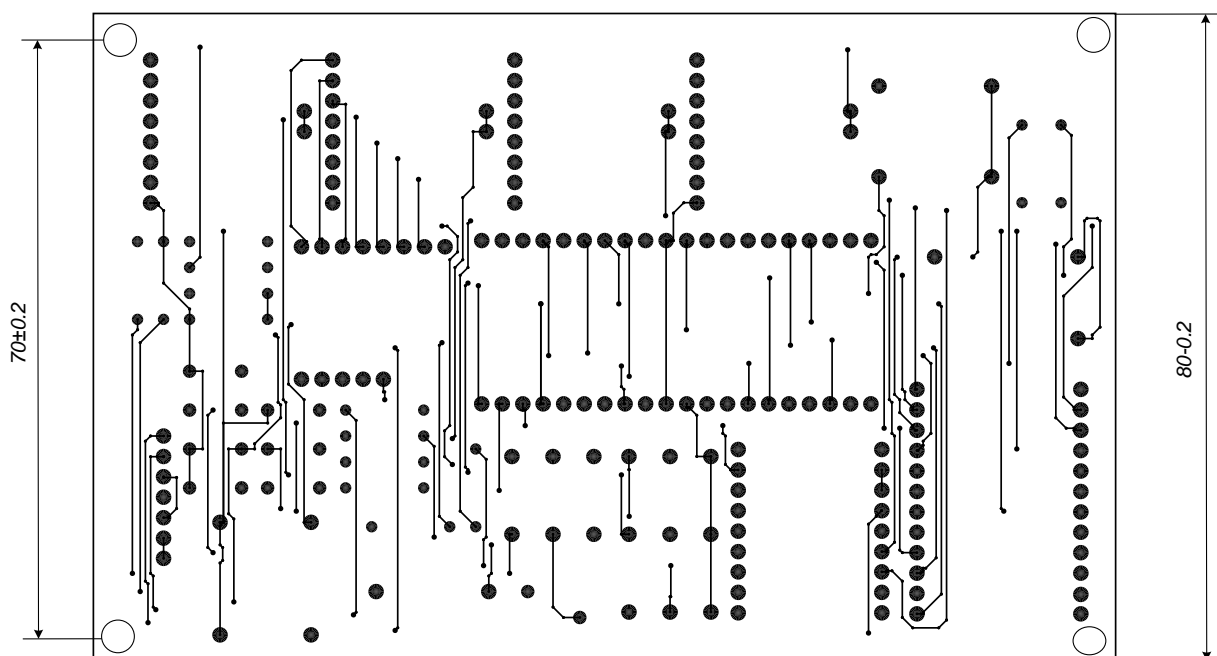


Рисунок 4.9 – Топологія нижньої сторони друкованої плати

5 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

Науково-технічна розробка має право на існування та впровадження, якщо вона відповідає вимогам часу, як в напрямку науково-технічного прогресу та і в плані економіки. Тому для науково-дослідної роботи необхідно оцінювати економічну ефективність результатів виконаної роботи.

Магістерська кваліфікаційна робота з розробки та дослідження «Оптичний генераторний вимірювач концентрації газів» відноситься до науково-технічних робіт, які орієнтовані на виведення на ринок (або рішення про виведення науково-технічної розробки на ринок може бути прийнято у процесі проведення самої роботи), тобто коли відбувається так звана комерціалізація науково-технічної розробки. Цей напрямок є пріоритетним, оскільки результатами розробки можуть користуватися інші споживачі, отримуючи при цьому певний економічний ефект. Але для цього потрібно знайти потенційного інвестора, який би взявся за реалізацію цього проекту і переконати його в економічній доцільності такого кроку.

Для наведеного випадку нами мають бути виконані такі етапи робіт:

- 1) проведено комерційний аудит науково-технічної розробки, тобто встановлення її науково-технічного рівня та комерційного потенціалу;
- 2) розраховано витрати на здійснення науково-технічної розробки;
- 3) розрахована економічна ефективність науково-технічної розробки у випадку її впровадження і комерціалізації потенційним інвестором і проведено обґрунтування економічної доцільності комерціалізації потенційним інвестором.

5.1 Проведення комерційного та технологічного аудиту науково-технічної розробки

Метою проведення комерційного і технологічного аудиту дослідження за темою «Оптичний генераторний вимірювач концентрації газів» є оцінювання

науково-технічного рівня та рівня комерційного потенціалу розробки, створеної в результаті науково-технічної діяльності.

Оцінювання науково-технічного рівня розробки та її комерційного потенціалу рекомендується здійснювати із застосуванням 5-ти бальної системи оцінювання за 12-ма критеріями, наведеними в табл. 5.1 [49].

Таблиця 5.1 – Рекомендовані критерії оцінювання науково-технічного рівня і комерційного потенціалу розробки та бальна оцінка

Бали (за 5-ти бальною шкалою)					
	0	1	2	3	4
Технічна здійсненність концепції					
1	Достовірність концепції не підтверджена	Концепція підтверджена експертними висновками	Концепція підтверджена розрахунками	Концепція перевірена на практиці	Перевірено працездатність продукту в реальних умовах
Ринкові переваги (недоліки)					
2	Багато аналогів на малому ринку	Мало аналогів на малому ринку	Кілька аналогів на великому ринку	Один аналог на великому ринку	Продукт не має аналогів на великому ринку
3	Ціна продукту значно вища за ціни аналогів	Ціна продукту дещо вища за ціни аналогів	Ціна продукту приблизно дорівнює цінам аналогів	Ціна продукту дещо нижче за ціни аналогів	Ціна продукту значно нижче за ціни аналогів
4	Технічні та споживчі властивості продукту значно гірші, ніж в аналогів	Технічні та споживчі властивості продукту трохи гірші, ніж в аналогів	Технічні та споживчі властивості продукту на рівні аналогів	Технічні та споживчі властивості продукту трохи кращі, ніж в аналогів	Технічні та споживчі властивості продукту значно кращі, ніж в аналогів
5	Експлуатаційні витрати значно вищі, ніж в аналогів	Експлуатаційні витрати дещо вищі, ніж в аналогів	Експлуатаційні витрати на рівні експлуатаційних витрат аналогів	Експлуатаційні витрати трохи нижчі, ніж в аналогів	Експлуатаційні витрати значно нижчі, ніж в аналогів

Продовження таблиці 5.1 - Рекомендовані критерії оцінювання науково-технічного рівня і комерційного потенціалу розробки та бальна оцінка

Ринкові перспективи					
6	Ринок малий і не має позитивних перспектив	Ринок малий, але має позитивні перспективи	Середній ринок з позитивною перспективою	Великий стабільний ринок	Великий ринок з позитивною перспективою
7	Активна конкуренція великих компаній на ринку	Активна конкуренція	Помірна конкуренція	Незначна конкуренція	Конкуренція немає
Практична здійсненність					
8	Відсутні фахівці як з технічної, так і з комерційної реалізації ідеї	Необхідно найняти фахівців або витратити значні кошти та час на навчання наявних фахівців	Необхідне незначне навчання фахівців та збільшення їх штату	Необхідне значне навчання фахівців	Є фахівці з питань як з технічної, так і з комерційної реалізації ідеї
9	Потрібні значні фінансові ресурси, які відсутні. Джерела фінансування ідеї відсутні	Потрібні незначні фінансові ресурси. Джерела фінансування відсутні	Потрібні значні фінансові ресурси. Джерела фінансування є	Потрібні незначні фінансові ресурси. Джерела фінансування є	Не потребує додаткового фінансування
10	Необхідна розробка нових матеріалів	Потрібні матеріали, що використовуються у військово-промисловому комплексі	Потрібні дорогі матеріали	Потрібні дешеві матеріали	Всі матеріали для реалізації ідеї відомі та давно використовуються у виробництві
11	Термін реалізації ідеї більший за 10 років	Термін реалізації ідеї більший за 5 років. Термін окупності інвестицій більше 10-ти років	Термін реалізації ідеї від 3-х до 5-ти років. Термін окупності інвестицій більше 5-ти років	Термін реалізації ідеї менше 3-х років. Термін окупності інвестицій від 3-х до 5-ти років	Термін реалізації ідеї менше 3-х років. Термін окупності інвестицій менше 3-х років

Продовження таблиці 5.1 - Рекомендовані критерії оцінювання науково-технічного рівня і комерційного потенціалу розробки та бальна оцінка

12	Необхідна розробка регламентних документів та отримання великої кількості дозвільних документів на виробництво та реалізацію продукту	Необхідно отримання великої кількості дозвільних документів на виробництво та реалізацію продукту, що вимагає значних коштів та часу	Процедура отримання дозвільних документів для виробництва та реалізації продукту вимагає незначних коштів та часу	Необхідно тільки повідомлення відповідним органам про виробництво та реалізацію продукту	Відсутні будь-які регламентні обмеження на виробництво та реалізацію продукту
----	---	--	---	--	---

Результати оцінювання науково-технічного рівня та комерційного потенціалу науково-технічної розробки потрібно звести до табл. 5.2.

Таблиця 5.2 – Результати оцінювання науково-технічного рівня і комерційного потенціалу розробки експертами

Критерії	Експерт (ПІБ, посада)		
	1	2	3
	Бали:		
1. Технічна здійсненність концепції	5	5	5
2. Ринкові переваги (наявність аналогів)	4	4	4
3. Ринкові переваги (ціна продукту)	2	2	2
4. Ринкові переваги (технічні властивості)	5	4	4
5. Ринкові переваги (експлуатаційні витрати)	1	1	1
6. Ринкові перспективи (розмір ринку)	3	3	3
7. Ринкові перспективи (конкуренція)	1	2	1
8. Практична здійсненність (наявність фахівців)	3	3	3
9. Практична здійсненність (наявність фінансів)	3	4	4
10. Практична здійсненність (необхідність нових матеріалів)	4	4	4
11. Практична здійсненність (термін реалізації)	4	4	4
12. Практична здійсненність (розробка документів)	4	4	3
Сума балів	39	40	38
Середньоарифметична сума балів CB_c	39,0		

За результатами розрахунків, наведених в табл. 5.2, зробимо висновок щодо науково-технічного рівня і рівня комерційного потенціалу розробки. При цьому використаємо рекомендації, наведені в табл. 5.3 [49].

Таблиця 5.3 – Науково-технічні рівні та комерційні потенціали розробки

Середньоарифметична сума балів СБ , розрахована на основі висновків експе-	Науково-технічний рівень та комерційний потенціал розробки
41...48	Високий
31...40	Вище середнього
21...30	Середній
11...20	Нижче середнього
0...10	Низький

Згідно проведених досліджень рівень комерційного потенціалу розробки за темою «Оптичний генераторний вимірювач концентрації газів» становить 39,0 балів, що, відповідно до табл. 5.3, свідчить про комерційну важливість проведення даних досліджень (рівень комерційного потенціалу розробки вище середнього).

5.2 Розрахунок узагальненого коефіцієнта якості розробки

Окрім комерційного аудиту розробки доцільно також розглянути технічний рівень якості розробки, розглянувши її основні технічні показники. Ці показники по-різному впливають на загальну якість проектної розробки.

Узагальнений коефіцієнт якості (B_n) для нового технічного рішення розрахуємо за формулою [50]

$$B_n = \sum_{i=1}^k \alpha_i \cdot \beta_i, \quad (5.1)$$

де k – кількість найбільш важливих технічних показників, які впливають на якість нового технічного рішення;

α_i – коефіцієнт, який враховує питому вагу i -го технічного показника в загальній якості розробки. Коефіцієнт α_i визначається експертним шляхом і при цьому має виконуватись умова $\sum_{i=1}^k \alpha_i = 1$;

β_i – відносне значення i -го технічного показника якості нової розробки.

Відносні значення β_i для різних випадків розраховуємо за такими формулами:

Відносні значення β_i для різних випадків розраховуємо за такими формулами:

- для показників, зростання яких вказує на підвищення в лінійній залежності якості нової розробки

$$\beta_i = \frac{I_{ni}}{I_{ai}}, \quad (5.2)$$

де I_{ni} та I_{na} – чисельні значення конкретного i -го технічного показника якості відповідно для нової розробки та аналога;

- для показників, зростання яких вказує на погіршення в лінійній залежності якості нової розробки

$$\beta_i = \frac{I_{ai}}{I_{ni}}; \quad (5.3)$$

Використовуючи наведені залежності можемо проаналізувати та порівняти техніко-економічні характеристики аналогу та розробки на основі отриманих наявних та проектних показників, а результати порівняння зведемо до таблиці 5.4.

Таблиця 5.4 – Порівняння основних параметрів розробки та аналога

Показники (параметри)	Одиниця вимірювання	Аналог	Проектований пристрій	Відношення параметрів нової розробки до аналога	Питома вага показника
1. Похибка вимірювання	%	25	10	2,5	0,25

Продовження таблиці 5.4 – Порівняння основних параметрів розробки та аналога

2. Споживана потужність	Вт	2	0,4	5	0,4
3. Діапазон вимірювання концентрації газу	мг/мм ³	500	400	0,8	0,1
4. Напруга живлення	В	6	5	1,2	0,2
5. Маса	г	1000	1000	1	0,05

Узагальнений коефіцієнт якості (B_n) для нового технічного рішення складе

$$B_n = \sum_{i=1}^k \alpha_i \cdot \beta_i = 2,5 \cdot 0,25 + 5 \cdot 0,4 + 0,8 \cdot 0,1 + 1,2 \cdot 0,2 + 1 \cdot 0,05 = 3,00.$$

Отже за технічними параметрами, згідно узагальненого коефіцієнту якості розробки, науково-технічна розробка переважає існуючі аналоги приблизно в 3,00 рази.

5.3 Розрахунок витрат на проведення науково-дослідної роботи

Витрати, пов'язані з проведенням науково-дослідної роботи на тему «Оптичний генераторний вимірювач концентрації газів», під час планування, обліку і калькулювання собівартості науково-дослідної роботи групуємо за відповідними статтями.

5.3.1 Витрати на оплату праці

До статті «Витрати на оплату праці» належать витрати на виплату основної та додаткової заробітної плати керівникам відділів, лабораторій, секторів і груп, науковим, інженерно-технічним працівникам, конструкторам, технологам, креслярам, копіювальникам, лаборантам, робітникам, студентам, аспірантам та іншим працівникам, безпосередньо зайнятим виконанням конкретної теми, обчисленої за посадовими окладами, відрядними розцінками, тарифними

ставками згідно з чинними в організаціях системами оплати праці.

Основна заробітна плата дослідників

Витрати на основну заробітну плату дослідників (Z_o) розраховуємо у відповідності до посадових окладів працівників, за формулою [49]

$$Z_o = \sum_{i=1}^k \frac{M_{ni} \cdot t_i}{T_p}, \quad (5.2)$$

де k – кількість посад дослідників залучених до процесу досліджень;

M_{ni} – місячний посадовий оклад конкретного дослідника, грн;

t_i – число днів роботи конкретного дослідника, дн.;

T_p – середнє число робочих днів в місяці, $T_p=21$ дні.

$$Z_o = 13200,00 \cdot 35 / 21 = 22000,00 \text{ (грн.)}$$

Проведені розрахунки зведемо до табл. 5.5.

Таблиця 5.5 – Витрати на заробітну плату дослідників

Найменування посади	Місячний посадовий оклад, грн	Оплата за робочий день, грн	Число днів роботи	Витрати на заробітну плату, грн
1. Керівник проекту	13200,00	628,57	35	22000,00
2. Ст. науковий співробітник	12500,00	595,24	21	12500,00
3. Інженер-схемотехнік	12100,00	576,19	21	12100,00
4. Інженер-радіотехнік 1 кат.	12100,00	576,19	15	8642,86
5. Інженер-метролог	12210,00	581,43	5	2907,14
6. Технік I-ї категорії	6950,00	330,95	15	4964,29
Всього				63114,29

Основна заробітна плата робітників

Витрати на основну заробітну плату робітників (Z_p) за відповідними найменуваннями робіт НДР на тему «Оптичний генераторний вимірювач концентрації газів» розраховуємо за формулою

$$Z_p = \sum_{i=1}^n C_i \cdot t_i, \quad (5.3)$$

де C_i – погодинна тарифна ставка робітника відповідного розряду, за виконану відповідну роботу, (грн/год.);

t_i – час роботи робітника при виконанні визначеної роботи, год.

Погодинну тарифну ставку робітника відповідного розряду C_i можна визначити за формулою

$$C_i = \frac{M_M \cdot K_i \cdot K_c}{T_p \cdot t_{зм}}, \quad (5.4)$$

де M_M – розмір прожиткового мінімуму працездатної особи, або мінімальної місячної заробітної плати (в залежності від діючого законодавства), прийmemo $M_M=2600,00$ (грн.);

K_i – коефіцієнт міжкваліфікаційного співвідношення для встановлення тарифної ставки робітнику відповідного розряду (табл. Б.2, додаток Б) [49];

K_c – мінімальний коефіцієнт співвідношень місячних тарифних ставок робітників першого розряду з нормальними умовами праці виробничих об'єднань і підприємств до законодавчо встановленого розміру мінімальної заробітної плати.

T_p – середнє число робочих днів в місяці, приблизно $T_p = 21$ дн;

$t_{зм}$ – тривалість зміни, год.

$$C_i = 2600,00 \cdot 1,70 \cdot 1,65 / (21 \cdot 8) = 43,41 \text{ (грн.)}$$

$$Z_{pl} = 43,41 \cdot 15,00 = 651,16 \text{ (грн.)}$$

Таблиця 5.6 – Величина витрат на основну заробітну плату робітників

Найменування робіт	Тривалість роботи, год	Розряд роботи	Тарифний коефіцієнт	Погодинна тарифна ставка, грн	Величина оплати на робітника грн
1. Виготовлення макетної плати	15,00	5	1,70	43,41	651,16
2. Монтаж компонентів	10,00	6	2,00	51,07	510,71
3. Налаштування компонентів	5,20	6	2,00	51,07	265,57
4. Випробування плати	1,25	7	2,20	56,18	70,22
5. Налаштування пристрою	2,50	7	2,20	56,18	140,45
6. Регулювання пристрою	0,60	6	2,00	51,07	30,64
Всього					1668,76

Додаткова заробітна плата дослідників та робітників

Додаткову заробітну плату розраховуємо як 10 ... 12% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою

$$Z_{\text{дод}} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{\text{дод}}}{100\%}, \quad (5.5)$$

де $H_{\text{дод}}$ – норма нарахування додаткової заробітної плати. Прийmemo 12%.

$$Z_{\text{дод}} = (63114,29 + 1668,76) \cdot 12 / 100\% = 7773,97 \text{ (грн.)}$$

5.3.2 Відрахування на соціальні заходи

Нарахування на заробітну плату дослідників та робітників розраховуємо як 22% від суми основної та додаткової заробітної плати дослідників і робітників за формулою

$$Z_n = (Z_o + Z_p + Z_{\text{дод}}) \cdot \frac{H_{\text{зн}}}{100\%} \quad (5.6)$$

де H_{zn} – норма нарахування на заробітну плату. Приймаємо 22%.

$$Z_n = (63114,29 + 1668,76 + 7773,97) \cdot 22 / 100\% = 15962,54 \text{ (грн.)}$$

5.3.3 Сировина та матеріали

До статті «Сировина та матеріали» належать витрати на сировину, основні та допоміжні матеріали, інструменти, пристрої та інші засоби і предмети праці, які придбані у сторонніх підприємств, установ і організацій та витрачені на проведення досліджень за темою «Оптичний генераторний вимірювач концентрації газів».

Витрати на матеріали (M), у вартісному вираженні розраховуються окремо по кожному виду матеріалів за формулою

$$M = \sum_{j=1}^n H_j \cdot C_j \cdot K_j - \sum_{j=1}^n B_j \cdot C_{\epsilon j}, \quad (5.7)$$

де H_j – норма витрат матеріалу j -го найменування, кг;

n – кількість видів матеріалів;

C_j – вартість матеріалу j -го найменування, грн/кг;

K_j – коефіцієнт транспортних витрат, ($K_j = 1,1 \dots 1,15$);

B_j – маса відходів j -го найменування, кг;

$C_{\epsilon j}$ – вартість відходів j -го найменування, (грн/кг.).

$$M_1 = 2,00 \cdot 280,00 \cdot 1,1 - 0,000 \cdot 0,00 = 616,00 \text{ (грн.)}$$

Проведені розрахунки зведемо до табл. 5.7.

Таблиця 5.7 – Витрати на матеріали

Найменування матеріалу, марка, тип, сорт	Ціна за 1 кг, грн	Норма витрат, кг	Величина відходів, кг	Ціна відходів, грн/кг	Вартість витраченого матеріалу, грн
Папір офісний А4 білий	280,00	2,00	0	0	616,00
Диск оптичний	25,00	4,00	0	0	110,00
Органайзер офісний	270,00	3,00	0	0	891,00
Канцелярське приладдя	220,00	4,00	0	0	968,00
Картридж змінний Canon	1060,00	2,00	0	0	2332,00
FLASH-пам'ять 32Gb	230,00	1,00	0	0	253,00
Матеріали дослідного блока аналізатора					
Припой ПОС-61	520,00	0,10	0,050	50,00	54,70
Лак УР-231	345,00	0,011	0,005	100,00	3,67
Склотекстоліт	295,00	0,020	0,008	50,00	6,09
Провод монтажний	365,00	0,014	0	0	5,62
Спирт технічний	156,00	0,100	0	0	17,16
Клей	395,00	0,18	0	0	78,21
Термопластик	680,00	0,30	0	0	224,40
Полістирол	345,00	0,21	0	0	79,70
Всього					5639,55

5.3.4 Розрахунок витрат на комплектуючі

Витрати на комплектуючі (K_e), які використовують при проведенні НДР на тему «Оптичний генераторний вимірювач концентрації газів», розраховуємо, згідно з їхньою номенклатурою, за формулою

$$K_e = \sum_{j=1}^n H_j \cdot C_j \cdot K_j \quad (5.8)$$

де H_j – кількість комплектуючих j -го виду, шт.;

C_j – покупна ціна комплектуючих j -го виду, грн;

K_j – коефіцієнт транспортних витрат, ($K_j = 1,1 \dots 1,15$).

$$K_g = 1 \cdot 260,00 \cdot 1,1 = 286,00 \text{ (грн.)}$$

Проведені розрахунки зведемо до табл.5.8

Таблиця 5.8 – Витрати на комплектуючі

Найменування комплектуючих	Кількість, шт.	Ціна за штуку, грн	Сума, грн
AT90S2313	1	260,00	286,00
PST523D	1	62,00	68,20
Конденсатор В37981-Х7R-50V-10%-33-нФ	3	12,10	39,93
Індуктивність ЕС24-331К-330мГн-10%	10	11,80	129,80
Макетна плата WBU-502	1	215,00	236,50
Транзистор КТ368А	1	86,75	95,43
Всього			855,86

5.3.5 Спецустаткування для наукових (експериментальних) робіт

До статті «Спецустаткування для наукових (експериментальних) робіт» належать витрати на виготовлення та придбання спецустаткування необхідного для проведення досліджень, також витрати на їх проектування, виготовлення, транспортування, монтаж та встановлення.

Балансову вартість спецустаткування розраховуємо за формулою

$$B_{\text{спец}} = \sum_{i=1}^k C_i \cdot C_{\text{пр.і}} \cdot K_i, \quad (5.9)$$

де C_i – ціна придбання одиниці спецустаткування даного виду, марки, грн;

$C_{\text{пр.і}}$ – кількість одиниць устаткування відповідного найменування, які придбані для проведення досліджень, шт.;

K_i – коефіцієнт, що враховує доставку, монтаж, налагодження устаткування тощо, ($K_i = 1, 10 \dots 1, 12$);

k – кількість найменувань устаткування.

$$B_{\text{спец}} = 16820,00 \cdot 1 \cdot 1,1 = 18502,00 \text{ (грн.)}$$

Отримані результати зведемо до табл.5.9.

Таблиця 5.9 – Витрати на придбання спецустаткування по кожному виду

Найменування устаткування	Кількість, шт	Ціна за оди- ницю, грн	Вартість, грн
Газоаналізатор лабораторний	1	16820,00	18502,00
Програматор мікроконтролер- ний	1	11500,00	12650,00
Всього			31152,00

5.3.6 Програмне забезпечення для наукових (експериментальних) робіт

До статті «Програмне забезпечення для наукових (експериментальних) робіт» належать витрати на розробку та придбання спеціальних програмних засобів і програмного забезпечення, (програм, алгоритмів, баз даних) необхідних для проведення досліджень, також витрати на їх проектування, формування та встановлення.

Балансову вартість програмного забезпечення розраховуємо за формулою

$$B_{\text{прог}} = \sum_{i=1}^k C_{\text{инрг}} \cdot C_{\text{прог.і}} \cdot K_i, \quad (5.10)$$

де $C_{\text{инрг}}$ – ціна придбання одиниці програмного засобу даного виду, грн;

$C_{\text{прог.і}}$ – кількість одиниць програмного забезпечення відповідного найменування, які придбані для проведення досліджень, шт.;

K_i – коефіцієнт, що враховує інсталяцію, налагодження програмного засобу тощо, ($K_i = 1, 10 \dots 1, 12$);

k – кількість найменувань програмних засобів.

$$B_{\text{прз}} = 8155,00 \cdot 1 \cdot 1,1 = 8970,50 \text{ (грн.)}$$

Отримані результати зведемо до табл. 5.10.

Таблиця 5.10 – Витрати на придбання програмних засобів по кожному виду

Найменування програмного засобу	Кількість, шт	Ціна за одиницю, грн	Вартість, грн
ОС Windows	1	8155,00	8970,50
Прикладний пакет Microsoft Office	1	8900,00	9790,00
Прикладний пакет моделювання процесів MatLab	1	9065,00	9971,50
Всього			28732,00

5.3.7 Амортизація обладнання, програмних засобів та приміщень

В спрощеному вигляді амортизаційні відрахування по кожному виду обладнання, приміщень та програмному забезпеченню тощо, розраховуємо з використанням прямолінійного методу амортизації за формулою

$$A_{\text{обл}} = \frac{Ц_{\text{б}}}{T_{\text{е}}} \cdot \frac{t_{\text{вик}}}{12}, \quad (5.11)$$

де $Ц_{\text{б}}$ – балансова вартість обладнання, програмних засобів, приміщень тощо, які використовувались для проведення досліджень, грн;

$t_{\text{вик}}$ – термін використання обладнання, програмних засобів, приміщень під час досліджень, місяців;

$T_{\text{е}}$ – строк корисного використання обладнання, програмних засобів, приміщень тощо, років.

$$A_{\text{обл}} = (35600,00 \cdot 2) / (3 \cdot 12) = 1977,78 \text{ (грн.)}$$

Проведені розрахунки зведемо до табл. 5.11.

Таблиця 5.11 – Амортизаційні відрахування по кожному виду обладнання

Найменування обладнання	Балансова вартість, грн	Строк корисного використання, років	Термін використання обладнання, місяців	Амортизаційні відрахування, грн
Обчислювальний комплекс та комп'ютеризована система проектування	35600,00	3	2	1977,78
Вимірювальний комплекс метрологічної системи	14250,00	5	2	475,00
Осцилограф	9600,00	4	2	400,00
Автоматизоване робоче місце ст. наукового співробітника	21650,00	4	2	902,08
Автоматизоване робоче місце інженера схемотехніка	21650,00	4	2	902,08
Автоматизоване робоче місце інженера радіотехніка	21650,00	4	1	451,04
Пристрої виводу інформації	6800,00	3	1	188,89
Лабораторія досліджень	268500,00	25	1	895,00
Всього				6191,88

5.3.8 Паливо та енергія для науково-виробничих цілей

Витрати на силову електроенергію (B_e) розраховуємо за формулою

$$B_e = \sum_{i=1}^n \frac{W_{yi} \cdot t_i \cdot C_e \cdot K_{\text{вн}i}}{\eta_i}, \quad (5.12)$$

де W_{yi} – встановлена потужність обладнання на визначеному етапі розробки, (кВт.);

t_i – тривалість роботи обладнання на етапі дослідження, (год.);

C_e – вартість 1 кВт-години електроенергії, (грн.); (вартість електроенергії визначається за даними енергопостачальної компанії), прийmemo $C_e = 6,12$ (грн.);

$K_{\text{вн}i}$ – коефіцієнт, що враховує використання потужності, $K_{\text{вн}i} < 1$;

η_i – коефіцієнт корисної дії обладнання, $\eta_i < 1$.

$$B_e = 0,56 \cdot 240,0 \cdot 6,12 \cdot 0,95 / 0,97 = 822,53 \text{ (грн.)}$$

Проведені розрахунки зведемо до табл. 5.12.

Таблиця 5.12 – Витрати на електроенергію

Найменування обладнання	Встановлена потужність, кВт	Тривалість роботи, год	Сума, грн
Обчислювальний комплекс та комп'ютеризована система проектування	0,56	240,0	822,53
Вимірювальний комплекс метрологічної системи	0,42	120,0	308,45
Газоаналізатор лабораторний	0,10	60,0	36,72
Осцилограф	0,80	60,0	293,76
Автоматизоване робоче місце ст. наукового співробітника	0,32	120,0	235,01

Продовження таблиці 5.12 – Витрати на електроенергію

Автоматизоване робоче місце інженера схемотехніка	0,32	120,0	235,01
Автоматизоване робоче місце інженера радіотехніка	0,32	120,0	235,01
Всього			2166,48

5.3.9 Службові відрядження

До статті «Службові відрядження» дослідної роботи на тему «Оптичний генераторний вимірювач концентрації газів» належать витрати на відрядження штатних працівників, працівників організацій, які працюють за договорами цивільно-правового характеру, аспірантів, зайнятих розробленням досліджень, відрядження, пов'язані з проведенням випробувань машин та приладів, а також витрати на відрядження на наукові з'їзди, конференції, наради, пов'язані з виконанням конкретних досліджень.

Витрати за статтею «Службові відрядження» розраховуємо як 20...25% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою

$$B_{cv} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{cv}}{100\%}, \quad (5.14)$$

де H_{cv} – норма нарахування за статтею «Службові відрядження», приймемо $H_{cv} = 20\%$.

$$B_{cv} = (63114,29 + 1668,76) \cdot 20 / 100\% = 12956,61 \text{ (грн.)}$$

5.3.10 Витрати на роботи, які виконують сторонні підприємства, установи і організації

Витрати за статтею «Витрати на роботи, які виконують сторонні підприємства, установи і організації» розраховуємо як 30...45% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою

$$B_{cn} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{cn}}{100\%}, \quad (5.15)$$

де H_{cn} – норма нарахування за статтею «Витрати на роботи, які виконують сторонні підприємства, установи і організації», прийmemo $H_{cn} = 40\%$.

$$B_{cn} = (63114,29 + 1668,76) \cdot 40 / 100\% = 25913,22 \text{ (грн.)}$$

5.3.11 Інші витрати

До статті «Інші витрати» належать витрати, які не знайшли відображення у зазначених статтях витрат і можуть бути віднесені безпосередньо на собівартість досліджень за прямими ознаками.

Витрати за статтею «Інші витрати» розраховуємо як 50...100% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою

$$I_{is} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{is}}{100\%}, \quad (5.16)$$

де H_{is} – норма нарахування за статтею «Інші витрати», прийmemo $H_{is} = 85\%$.

$$I_{is} = (63114,29 + 1668,76) \cdot 85 / 100\% = 55065,59 \text{ (грн.)}$$

5.3.12 Накладні (загальновиробничі) витрати

До статті «Накладні (загальновиробничі) витрати» належать: витрати, пов'язані з управлінням організацією; витрати на винахідництво та раціоналізацію; витрати на підготовку (перепідготовку) та навчання кадрів; витрати, пов'язані з набором робочої сили; витрати на оплату послуг банків; витрати, пов'язані з освоєнням виробництва продукції; витрати на науково-технічну інформацію та рекламу та ін.

Витрати за статтею «Накладні (загальновиробничі) витрати» розраховуємо як 100...150% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою

$$B_{нзв} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{нзв}}{100\%}, \quad (5.17)$$

де $H_{нзв}$ – норма нарахування за статтею «Накладні (загальновиробничі) витрати», прийmemo $H_{нзв} = 125\%$.

$$B_{нзв} = (63114,29 + 1668,76) \cdot 125 / 100\% = 80978,81 \text{ (грн.)}.$$

Витрати на проведення науково-дослідної роботи на тему «Оптичний генераторний вимірювач концентрації газів» розраховуємо як суму всіх попередніх статей витрат за формулою

$$B_{заг} = Z_o + Z_p + Z_{доп} + Z_n + M + K_g + B_{спец} + B_{прз} + A_{обл} + B_e + B_{св} + B_{сн} + I_g + B_{нзв}. \quad (5.18)$$

$$B_{заг} = 63114,29 + 1668,76 + 7773,97 + 15962,5422 + 5639,55 + 855,86 + 31152,00 + 28732,00 + 6191,88 + 2166,48 + 12956,61 + 25913,22 + 55065,59 + 80978,81 = 338171,53 \text{ (грн.)}.$$

Загальні витрати ZB на завершення науково-дослідної (науково-технічної) роботи та оформлення її результатів розраховується за формулою

$$ZB = \frac{B_{заг}}{\eta}, \quad (5.19)$$

де η - коефіцієнт, який характеризує етап (стадію) виконання науково-дослідної роботи, прийmemo $\eta=0,9$.

$$ZB = 338171,53 / 0,9 = 375746,15 \text{ (грн.)}.$$

5.4 Розрахунок економічної ефективності науково-технічної розробки при її можливій комерціалізації потенційним інвестором

В ринкових умовах узагальнюючим позитивним результатом, що його може отримати потенційний інвестор від можливого впровадження результатів

тієї чи іншої науково-технічної розробки, є збільшення у потенційного інвестора величини чистого прибутку.

Результати дослідження проведені за темою «Оптичний генераторний вимірювач концентрації газів» передбачають комерціалізацію протягом 4-х років реалізації на ринку.

В цьому випадку майбутній економічний ефект буде формуватися на основі таких даних:

ΔN – збільшення кількості споживачів пристрою, у періоди часу, що аналізуються, від покращення його певних характеристик.

Таблиця 5.13 - Збільшення кількості споживачів

Показник	1-й рік	2-й рік	3-й рік	4-й рік
Збільшення кількості споживачів, осіб	520	890	1000	800

N – кількість споживачів які використовували аналогічний пристрій у році до впровадження результатів нової науково-технічної розробки, прийmemo 1800 осіб;

C_o – вартість пристрою у році до впровадження результатів розробки, прийmemo 7450,00 (грн.);

$\pm \Delta C_o$ – зміна вартості пристрою від впровадження результатів науково-технічної розробки, прийmemo 14767,75 (грн.)

Можливе збільшення чистого прибутку у потенційного інвестора $\Delta \Pi_i$ для кожного із 4-х років, протягом яких очікується отримання позитивних результатів від можливого впровадження та комерціалізації науково-технічної розробки, розраховуємо за формулою [49]

$$\Delta \Pi_i = (\pm \Delta C_o \cdot N + C_o \cdot \Delta N)_i \cdot \lambda \cdot \rho \cdot \left(1 - \frac{\rho}{100}\right), \quad (5.20)$$

де λ – коефіцієнт, який враховує сплату потенційним інвестором податку на додану вартість. У 2022 році ставка податку на додану вартість складає 20%, а коефіцієнт $\lambda = 0,8333$;

ρ – коефіцієнт, який враховує рентабельність інноваційного продукту).
Прийmemo $\rho = 25\%$;

ϑ – ставка податку на прибуток, який має сплачувати потенційний інвестор, у 2022 році $\vartheta = 18\%$;

Збільшення чистого прибутку 1-го року:

$$\begin{aligned} \Delta\Pi_1 &= (14767,75 \cdot 1800,00 + 22217,75 \cdot 520) \cdot 0,83 \cdot 0,25 \cdot (1 - 0,18/100\%) = \\ &= 6488700,88 \text{ (грн.)} \end{aligned}$$

Збільшення чистого прибутку 2-го року:

$$\begin{aligned} \Delta\Pi_2 &= (14767,75 \cdot 1800,00 + 22217,75 \cdot 1410) \cdot 0,83 \cdot 0,25 \cdot (1 - 0,18/100\%) = \\ &= 9853212,52 \text{ (грн.)} \end{aligned}$$

Збільшення чистого прибутку 3-го року:

$$\begin{aligned} \Delta\Pi_3 &= (14767,75 \cdot 1800,00 + 22217,75 \cdot 2410) \cdot 0,83 \cdot 0,25 \cdot (1 - 0,18/100\%) = \\ &= 13633562,68 \text{ (грн.)} \end{aligned}$$

Збільшення чистого прибутку 4-го року:

$$\begin{aligned} \Delta\Pi_4 &= (14767,75 \cdot 1800,00 + 22217,75 \cdot 3210) \cdot 0,83 \cdot 0,25 \cdot (1 - 0,18/100\%) = \\ &= 16657842,81 \text{ (грн.)} \end{aligned}$$

Приведена вартість збільшення всіх чистих прибутків $ПП$, що їх може отримати потенційний інвестор від можливого впровадження та комерціалізації науково-технічної розробки

$$ПП = \sum_{i=1}^T \frac{\Delta\Pi_i}{(1 + \tau)^i}, \quad (5.21)$$

де $\Delta\Pi_i$ – збільшення чистого прибутку у кожному з років, протягом яких виявляються результати впровадження науково-технічної розробки, грн;

T – період часу, протягом якого очікується отримання позитивних результатів від впровадження та комерціалізації науково-технічної розробки, роки;

τ – ставка дисконтування, за яку можна взяти щорічний прогнозований рівень інфляції в країні, $\tau = 0,11$;

t – період часу (в роках) від моменту початку впровадження науково-технічної розробки до моменту отримання потенційним інвестором додаткових чистих прибутків у цьому році.

$$\begin{aligned} ПП &= 6488700,88/(1+0,11)^1 + 9853212,52/(1+0,11)^2 + 13633562,68/(1+0,11)^3 + \\ &+ 16657842,81/(1+0,11)^4 = 5845676,47 + 7997088,32 + 9968743,53 + 10973037,02 = 3478 \\ &4545,34 \text{ (грн.)}. \end{aligned}$$

Величина початкових інвестицій PV , які потенційний інвестор має вкласти для впровадження і комерціалізації науково-технічної розробки

$$PV = k_{инв} \cdot ЗВ, \quad (5.22)$$

де $k_{инв}$ – коефіцієнт, що враховує витрати інвестора на впровадження науково-технічної розробки та її комерціалізацію, приймаємо $k_{инв} = 2$;

$ЗВ$ – загальні витрати на проведення науково-технічної розробки та оформлення її результатів, приймаємо 375746,15 (грн.).

$$PV = k_{инв} \cdot ЗВ = 2 \cdot 375746,15 = 751492,30 \text{ (грн.)}.$$

Абсолютний економічний ефект $E_{абс}$ для потенційного інвестора від можливого впровадження та комерціалізації науково-технічної розробки становитиме

$$E_{абс} = ПП - PV \quad (5.23)$$

де $ПП$ – приведена вартість зростання всіх чистих прибутків від можливого впровадження та комерціалізації науково-технічної розробки, 34784545,34 (грн.);

$$PV \text{ – теперішня вартість початкових інвестицій, } 751492,30 \text{ (грн.)}.$$

$$E_{абс} = ПП - PV = 34784545,34 - 751492,30 = 34033053,05 \text{ (грн.)}.$$

Внутрішня економічна дохідність інвестицій E_g , які можуть бути вкладені потенційним інвестором у впровадження та комерціалізацію науково-технічної розробки

$$E_g = T_{ж} \sqrt[4]{1 + \frac{E_{abc}}{PV}} - 1, \quad (5.24)$$

де E_{abc} – абсолютний економічний ефект вкладених інвестицій, 34033053,05 (грн.);

PV – теперішня вартість початкових інвестицій, 751492,30 (грн.);

$T_{ж}$ – життєвий цикл науково-технічної розробки, тобто час від початку її розробки до закінчення отримання позитивних результатів від її впровадження, 4 роки.

$$E_g = T_{ж} \sqrt[4]{1 + \frac{E_{abc}}{PV}} - 1 = (1 + 34033053,05/751492,30)^{1/4} = 1,61.$$

Мінімальна внутрішня економічна дохідність вкладених інвестицій τ_{min} :

$$\tau_{min} = d + f, \quad (5.25)$$

де d – середньозважена ставка за депозитними операціями в комерційних банках; в 2022 році в Україні $d = 0,11$;

f – показник, що характеризує ризикованість вкладення інвестицій, прийємо 0,25.

$\tau_{min} = 0,11 + 0,25 = 0,36 < 1,61$ свідчить про те, що внутрішня економічна дохідність інвестицій E_g , які можуть бути вкладені потенційним інвестором у впровадження та комерціалізацію науково-технічної розробки вища мінімальної внутрішньої дохідності. Тобто інвестувати в науково-дослідну роботу за темою «Оптичний генераторний вимірювач концентрації газів» доцільно.

Період окупності інвестицій $T_{ок}$ які можуть бути вкладені потенційним інвестором у впровадження та комерціалізацію науково-технічної розробки

$$T_{ок} = \frac{1}{E_г}, \quad (5.26)$$

де $E_г$ – внутрішня економічна дохідність вкладених інвестицій.

$$T_{ок} = 1 / 1,61 = 0,62 \text{ р.}$$

$T_{ок} < 3$ -х років, що свідчить про комерційну привабливість науково-технічної розробки і може спонукати потенційного інвестора профінансувати впровадження даної розробки та виведення її на ринок.

5.5 Висновки до розділу

Згідно проведених досліджень рівень комерційного потенціалу розробки за темою «Оптичний генераторний вимірювач концентрації газів» становить 39,0 бала, що, свідчить про комерційну важливість проведення даних досліджень (рівень комерційного потенціалу розробки вище середнього).

При оцінюванні за технічними параметрами, згідно узагальненого коефіцієнту якості розробки, науково-технічна розробка переважає існуючі аналоги приблизно в 3,00 рази.

Також термін окупності становить 0,62 р., що менше 3-х років, що свідчить про комерційну привабливість науково-технічної розробки і може спонукати потенційного інвестора профінансувати впровадження даної розробки та виведення її на ринок.

Отже можна зробити висновок про доцільність проведення науково-дослідної роботи за темою «Оптичний генераторний вимірювач концентрації газів».

6 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

Дія Закону України «Про охорону праці» поширюється на всіх юридичних та фізичних осіб, які відповідно до законодавства використовують найману працю, та на всіх працюючих.

Під час укладання трудового договору роботодавець повинен проінформувати працівника під розписку про умови праці та про наявність на його робочому місці небезпечних і шкідливих виробничих факторів, які ще не усунуто, можливі наслідки їх впливу на здоров'я та про права працівника на пільги і компенсації за роботу в таких умовах відповідно до законодавства і колективного договору.

Усі працівники згідно із законом підлягають загальнообов'язковому державному соціальному страхуванню від нещасного випадку на виробництві та професійного захворювання, які спричинили втрату працездатності.

Працівники мають бути забезпечені спецодягом, іншими засобами індивідуального захисту, мийними та знешкоджувальними засобами.

Відповідно до Закону України «Про охорону праці» роботодавець забезпечує функціонування системи управління охороною праці.

У магістерській кваліфікаційній роботі досліджується оптичний генераторний вимірювач концентрації газів. Всі дослідження і експериментальні процеси відбуваються з участю ПК.

Всі трудові процеси потребують заходів з охорони праці, для забезпечення безпеки працівника на робочому місці і для виключення або зменшення впливу шкідливих факторів, що можуть впливати на нього в процесі трудової діяльності.

На працівників, що проводять дослідження на ПК можуть впливати такі небезпечні та шкідливі фактори, у відповідності з прийнятою класифікацією за ГОСТ 12.0003.-74 [51].

Фізичні: підвищена та понижена температура повітря робочої зони; підвищена та понижена рухливість повітря робочої зони; недостатня освітленість робочої зо-

ни; недостатність природного освітлення; небезпечний рівень напруги в електричному колі, замикання якого може відбутися через тіло людини; підвищена та понижена вологість повітря; підвищений рівень електромагнітного опромінення.

Психофізіологічні: нервово – психічні перевантаження (монотонність праці, емоційні перевантаження, перенапруга аналізаторів).

6.1 Технічні рішення з безпечного виконання робіт

6.1.1 Технічні рішення з організації робочого місця під час проектування

Працюючий перед початком роботи повинен пройти інструктаж. Результати інструктажу заносяться в «Журнал реєстрації інструктажів з питань охорони праці на робочому місці», в журналі після проходження інструктажу повинен бути підпис особи, яка інструктує та працівника, а також відмітка у стовпчику 12 про допуск до роботи.

Комп'ютери повинні мати передбачений заводом -виробником захист від ураження електричним струмом.

Комп'ютер встановлюють на відстані не менше 1 м від стін, між собою на відстані не менше 1,5 м; Виключають можливість прямого засвічування екрану джерелом природного освітлення; Поверхня екрану повинна знаходитись на відстані 400-700 мм, від очей користувача; Висота робочої поверхні столу повинна становити 680-800 мм, ширина не менше 500 мм; Стілець повинен мати висоту 280-320 мм, ширину не менше як 380 мм; При роботі з текстом, інформацією рекомендується працювати на світлому (білому) фоні з чорними знаками.

6.1.2 Електробезпека виробничого приміщення

Класифікація приміщень за категоріями електробезпеки залежно від мікроклімату виробничих будівель. Допустимими визнаються умови праці у будівлях, де відносна вологість повітря не перевищує 60%, температура повітря не перевищує 35 °С, а пил та хімічно агресивне середовище – відсутні. За таких умов праці мікроклімат вважається сухим. Вологими називаються умови роботи, де відносна вологість повітря становить від 60% до 75%. Сирі – це такі умо-

ви, які характеризуються відносною вологістю повітря в будівлі більшою за 75%. Особливо сирі умови – це умови, із майже стовідсотковою відносною вологістю повітря. Гарячими умовами праці є становище, при якому температура повітря перевищує 35 °С. Запиленими визнаються умови, при яких виділяється велика кількість виробничого пилу, внаслідок чого він може залишатись на зовнішніх поверхнях або навіть проникати у середину обладнання чи апаратів. До умов праці з хімічно активним середовищем відносять умови, при яких у повітрі протягом тривалого часу залишаються гази або краплі рідин, які негативно впливають на ізолюючі властивості і струмопровідні елементи електричних інструментів.

Класифікація приміщень за рівнем електробезпеки Відповідно до ПУЕ, усі промислові приміщення (цехи, майстерні, склади) за ступенем ймовірності ураження електричним струмом можна розділити на три категорії: Будівлі з підвищеною небезпекою До цього типу будівель належать споруди, в яких наявний принаймні один із таких факторів: сирі приміщення, відносна вологість в яких протягом тривалого часу перевищує 75%; приміщення, в яких пил покриває провідники, забивається всередину машин та обладнання; приміщення зі струмопровідними підлогами (металевими, земляними, цегляними, залізобетонними); приміщення, в яких середня температура повітря зазвичай перевищує +30 °С; приміщення, в яких існує ймовірність одночасного торкання співробітника до зовнішніх елементів електричного устаткування і заземлених металевих конструкцій будівель, технологічного обладнання тощо.

Будівлі з особливо небезпечними умовами Ці будівлі характеризуються як дуже сирі приміщення зі стовідсотковою відносною вологістю. Стеля, стіни, підлога, устаткування у таких приміщеннях постійно вкриті тонким шаром крапель чи пліснявою. Слід бути вкрай обережними, оскільки при виконанні робіт з використанням електричної напруги на відкритому повітрі, всередині посудин, всередині непросохлих приміщень ймовірність ураження співробітників чи сторонніх осіб електричним струмом дуже висока. До будівель з особливо небезпечними умовами належать також споруди з хімічно активним середови-

щем, яке завдяки своїм властивостям завдає шкоду ізоляції та електричним матеріалам. Окрім того, будівлі, які мають одночасно дві або більше ознаки приміщень з підвищеною небезпекою так само належать до будівель із особливо небезпечними умовами.

Будівлі без факторів збільшеної небезпеки До цієї категорії належать будівлі, в яких немає жодної з ознак, властивих приміщенням з підвищеною або особливою небезпекою [52].

Для створення оптимальних умов електробезпеки в виробничому приміщенні потрібно підтримувати режим вологості повітря на рівні 60%, для того щоб приміщення було сухим, та температуру повітря не вище 35°C. Постійний моніторинг середовища, на предмет пилу та хімічно агресивних речовин у складі повітря, для забезпечення електробезпеки приміщення.

6.2 Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії

6.2.1 Мікроклімат

Мікроклімат виробничих приміщень (санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень ДСН 3.3.6.042–99) можна оцінювати за сукупністю таких факторів, як температура (t , °C), відносна вологість (ϕ , %), швидкість руху повітря (V , м/с) та величина інтенсивності теплового опромінення (E , Вт/м²).

За ступенем впливу на тепловий стан людини мікрокліматичної умови поділяють на оптимальні та допустимі. Оптимальні мікрокліматичні умови – поєднання параметрів мікроклімату, які при тривалому та систематичному впливі на людину забезпечують зберігання нормального теплового стану організму без активізації механізмів терморегуляції. Вони забезпечують відчуття теплового комфорту та створюють передумови для високого рівня працездатності [53]. Допустимі мікрокліматичні умови – поєднання параметрів мікроклімату, які при тривалому та систематичному впливі на людину можуть викликати зміни теплового стану організму, що швидко минають і нормалізуються та супроводжуються напруженням механізмів терморегуляції в межах фізіологічної адаптації. При цьому не виникає ушкоджень або порушень стану здоров'я, але мо-

жуть спостерігатися дискомфортні тепловідчуття, погіршення самопочуття та зниження працездатності [53].

Категорія робіт – розмежування робіт за важкістю на основі загальних енерговитрат організму [53]. Легкі фізичні роботи (категорія І) охоплюють види діяльності, при яких витрата енергії дорівнює 105–140 Вт (90–120 ккал/год.) – категорія Іа та 141–175 Вт (121–150 ккал/год.) – категорія Іб. До категорії Іа належать роботи, що виконуються сидячи і не потребують фізичного напруження. До категорії Іб належать роботи, що виконуються сидячи, стоячи або пов'язані з ходінням та супроводжуються деяким фізичним напруженням.

Визначаємо наявну категорію робіт, як Іа.

Отже повинні забезпечуватися такі оптимальні величини температури, відносної вологості та швидкості руху повітря, що зазначені в нормативному акті НПАОП 0.00-7.15-18 Вимоги щодо безпеки та захисту здоров'я працівників під час роботи з екранними пристроями [54].

Оптимальні параметри мікроклімату наведені в табл. 6.1.

Таблиця 6.1 – Оптимальні параметри мікроклімату при виконанні робіт операторського типу на ЕОМ для робіт категорії Іа

Період року	Температура повітря, °С	Відносна вологість, %	Швидкість руху, м\с
Холодний	22-24	60-40	0,1
Теплий	23-25	60-40	0,1

При плануванні умов робочого місця потрібно дотримуватись саме цих параметрів мікроклімату для досягнення оптимальних умов праці, що виконує важливу роль в якості виконаної роботи працівником та в безпеці його трудової діяльності.

6.2.2 Склад повітря робочої зони

При дослідженні ефективності природної вентиляції приміщенні потрібно враховувати, що відповідно до СНиП 2.04.05–91 [55] за умови, якщо об'єм робочого приміщення, що припадає на кожного працюючого, менше 20 м³, необ-

хідний повітрообмін повинен становити не менше $L' = 30$ м³/год на одну особу. При об'ємі 20 м³і більше на одного працюючого повітрообмін повинен становити не менше $L' = 20$ м³/год. При об'ємі 40 м³і більше на одного працюючого за наявності в приміщенні вікон та дверей повітрообмін не лімітується.

Також для профілактики та підтримки оптимального складу повітря потрібно дотримуватись гігієни приміщення: проводити вологе прибирання, регулярно провітрювати приміщення.

6.2.3 Виробниче освітлення

Відповідно до ДБН В.2.5-28:2018 [56] Система природного освітлення відноситься до бокової. Характеристика зорових робіт – середньої точності.

Норми освітленості при штучному освітленні та КПО (для III пояса світлового клімату) при природному та сумісному освітленні зазначені у табл. 6.2.

При експлуатації штучного освітлення здійснюється контроль за рівнем напруги освітлювальної мережі, своєчасна заміна перегорілих ламп, забезпечується чистота повітря у приміщенні. Забезпечити освітлення робочого місця таким чином, щоб не утворювались відблиски від клавіатури та екрану відео монітора в напрямку очей працюючого.

6.2.4 Виробничий шум

Нормативним документом, який регламентує рівні шуму для різних категорій робочих місць службових приміщень, є ДСН 3.3.6.037-99 [57].

При виникненні ситуації коли рівень шуму вище допустимої норми рекомендовано користуватись засобами індивідуального захисту (наушники або протишумові вкладки).

Таблиця 6.2 - Норми освітленості в приміщенні

Характеристика зорової роботи	Найменший розмір об'єкта розрізнення	Розряд зорової роботи	Підрозряд зорової роботи	Контраст об'єкта розрізнення з фоном	Характеристика фона	Освітленість, лк		КПО, %			
						Штучне освітлення		Природне освітлення		Сумісне освітлення	
						Комбіноване	Загальне	Верхнє або верхнє і бокове	Бокове	Верхнє або верхнє і бокове	Бокове
Середньої точності	Від 0,5 до 1,0	IV	б	середній	середній	200	500	4	1,5	2,4	0,9

Таблиця 6.3 – Допустимі рівні звукового тиску в октанових смугах частот, рівні шуму та еквівалентні рівні шуму

Робоче місце	Рівні звукового тиску (дБ) в октанових смугах з середньо герметичними частотами, Гц									Рівні шуму та еквівалентні рівні шуму, (дБ)
	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Для програмістів операторів ЕОМ (ПЕОМ)	86	71	61	54	49	45	42	40	38	50

6.2.5 Електромагнітні випромінювання

Під час проведення роботи із використанням ПК на дослідника діє підвищений рівень електромагнітного поля.

Електромагнітні випромінювання радіочастотного діапазону, що генеруються ВДТ пов'язані перш за все з частотою формування елемента зображення, а також з інтенсивністю електронного променя, що зумовлює яскравість точок на екрані.

Допустимі рівні випромінювань моніторів ПК (за вимогами MPR II 1990:10 Шведського національного комітету з вимірювань та досліджень та нормами ТСО 9295) наведені в табл. 6.4.

Таблиця 6.4 - Допустимі рівні випромінювань моніторів ПК

Вид поля	ТСО	MPR II
Змінне електричне поле		
5 Гц – 2 кГц	10 В/м	2,5 В/м
2 кГц – 400 кГц	1 В/м на відстані 0,3 м від центра екрана і 0,5 м навколо монітора	2,5 В/м на відстані 0,5 м навколо монітора
Змінне магнітне поле		
5 Гц – 2 кГц	250 нТл 200 мА/м	250 нТл 200 мА/м
2 кГц – 400 кГц	25 нТл 20 мА/м на відстані 0,3 м від центра екрана і 0,5 м навколо монітора	25 нТл 20 мА/м на відстані 0,3 м від центра екрана і 0,5 м навколо монітора

Для зменшення впливу електромагнітного випромінювання на працівника слід дотримуватися раціонального режиму роботи та відпочинку.

6.2.6 Психофізіологічні фактори

Можлива психоемоційна напруга при тривалій роботі з екраном відеомонітору, тому для забезпечення безпечності праці пропонуються наступні рішення:

Працюючі за комп'ютером повинні дотримуватися наступного режиму праці:

При введенні даних, читанні інформації з екрану безперервна тривалість роботи не повинна перевищувати 4-х годин при 8-годинному робочому дні;

Через кожен годину роботи необхідно робити перерву на 5-10 хвилин, а через 2 години на 15 хвилин;

Перерви використовувати для зорового та фізичного розвантажування:

Стоячи або сидячи робити похитування головою ліворуч-праворуч (темп швидкий);

Стоячи або сидячи робити нахили голови уперед-назад (темп помірний);

Масаж лоба, злегка його погладжуючи, а також погладжуючи ділянки над бровами у напрямку до скронь;

Стоячи або сидячи проводити самомасаж шиї та потилиці, погладжуючи потилицю та шию у напрямку до торса;

6.3 Законодавче і нормативно-правове забезпечення цивільного захисту

(ЦЗ) визначене Конституцією України, законами України: “Про правові засади цивільного захисту”, “Про захист населення і територій від надзвичайних ситуацій техногенного і природного характеру”, “Про цивільну оборону України”, “Про правовий режим надзвичайного стану”, “Про правовий режим воєнного стану”, “Про аварійно-рятувальні служби”, “Про пожежну безпеку”, “Про об’єкти підвищеної небезпеки” та іншими законодавчими та нормативно-правовими документами. Конституція України у ст. 3, 16, 27, 50, з урахуванням вимог Загальної декларації прав людини, прийнятої ООН у 1948 р., Женевських конвенцій від 1949 р., закріплює основні засади забезпечення невід’ємних конституційних прав людини на життя і здоров’я, захисту від небезпек. Для реалізації прав громадян на захист життя і здоров’я від наслідків надзвичайних ситуацій (НС) у мирний та воєнний час наша держава як гарант цього права створила державну систему захисту населення – цивільну оборону (ЦО) України, увівши в дію Законом України “Про цивільну оборону України” № 2974-ХІІ від 03.02.1993 р.

У новій редакції (1999 р.) вказано, що Закон установлює правові, економічні й організаційні основи діяльності системи ЦО, захисту населення і територій від НС техногенного, природного, екологічного і військового характеру. Закон також визначає правові засади захисту інтересів фізичних осіб, органів виконавчої влади і місцевого самоврядування на випадок застосування засобів ураження. Законом України “Про правові засади цивільного захисту” № 1859-

IV від 24.06.2004 р. визначені правові та організаційні засади у сфері захисту населення і територій від НС техногенного, природного та військового характеру, повноваження органів виконавчої влади та інших органів управління. Законом замість системи цивільної оборони України запроваджено систему цивільного захисту (ЦЗ). Закон України “Про аварійно-рятувальні служби” № 1281-XIV від 14.12.1999 р. фіксує правові та економічні засади створення і діяльності аварійно-рятувальних служб (АРС), обов’язки, права, гарантії соціального захисту та відповідальність рятувальників, а також питання міжнародного співробітництва у сфері ліквідації НС. Закон України “Про правовий режим надзвичайного стану” № 1550-III від 16.03.2000 р. закріплює особливий правовий режим надзвичайного стану, який може тимчасово вводитися в Україні чи в окремих її місцевостях при виникненні НС техногенного або природного характеру не нижче загальнодержавного рівня, що призвели чи можуть призвести до людських і матеріальних втрат, створюють загрозу життю і здоров’ю громадян, або при спробі захоплення державної влади чи зміни конституційного ладу України шляхом насильства. Закон України “Про правовий режим воєнного стану” № 1647-III від 06.04.2000 р. визначає особливий правовий режим воєнного стану, що вводить в Україні або в окремих її місцевостях у разі збройної агресії чи загрози нападу, небезпеки державній незалежності України, її територіальній цілісності [58].

Вплив конкретних чинників, що може негативно позначатися на здоров’ї і житті людини (або створює загрозу безпеці людини), так само регулюється відповідними нормативноправовими актами. Основні із них: Закон України “Про об’єкти підвищеної небезпеки” № 2245-III від 18.01.2001 р. містить правові, економічні, соціальні та організаційні основи діяльності, пов’язаної з об’єктами підвищеної небезпеки, і спрямований на захист життя і здоров’я людей та довкілля від шкідливого впливу аварій на цих об’єктах шляхом запобігання їх виникненню, обмеження (локалізації) розвитку і локалізації наслідків; Закон України “Про використання ядерної енергії та радіаційну безпеку” № 39/95-ВР від 08.02.1995 р. є основоположним у ядерному законодавстві України. Він

встановлює пріоритет безпеки людини та навколишнього природного середовища, права і обов'язки громадян у сфері використання ядерної енергії, регулює діяльність, пов'язану з використанням ядерних установок і джерел іонізуючого випромінювання, встановлює правові основи міжнародних зобов'язань України щодо використання ядерної енергії. Важливими елементами нормативно-правового регулювання процесу створення і функціонування сучасної системи захисту населення від НС в Україні є укази Президента України: № 28 від 1996 р. "Про створення Міністерства України з питань надзвичайних ситуацій та у справах захисту населення від наслідків Чорнобильської катастрофи", № 47/2003 від 27.01.2003 р. "Про заходи щодо вдосконалення державного управління в сфері пожежної безпеки і захисту населення і територій від надзвичайних ситуацій"; № 1467/2003 від 19.12.2003 р. "Про державну програму перетворення військ Цивільної оборони України, органів і підрозділів пожежної охорони в Оперативно-рятувальну службу цивільного захисту на період до 2005 року"; № 1328/2003 від 21.11.2003 р. "Про вдосконалення управління у сфері запобігання і реагування на надзвичайні ситуації техногенного та природного характеру" та ін.

ВИСНОВКИ

В магістерській кваліфікаційній роботі розроблено оптичний генераторний вимірювач концентрації газів. Проведено порівняльну характеристику приладу, що розробляється, з вже існуючими прототипами та аналогами, вказані переваги та недоліки. Запропоновано структурну схему та електричну принципову схему пристрою на основі мікроконтролера типу ATmega163. У ході виконання магістерської кваліфікаційної роботи розроблено та досліджено оптичний генераторний вимірювач концентрації газів з покращеними метрологічними і експлуатаційними характеристиками. Зокрема:

1) Побудовані моделі метрологічних характеристик оптичного і аналітичного каналів ІЧ-газоаналізаторів, що враховують вплив основних параметрів приладу і неінформативних параметрів аналізованого середовища.

2) Обґрунтований вибір структурної схеми аналітичного каналу, що поєднує властивості диференціальної схеми і схеми відношення, що дозволяє ефективно (більш ніж на порядок) надавлювати адитивні і мультиплікативні складові похибки.

3) Здійснена параметрична оптимізація аналітичного каналу на основі метрологічних показників.

4) На основі проведених досліджень здійснений вибір технічного і алгоритмічного забезпечення аналітичних каналів і розроблені за участю автора оптичний генераторний вимірювач концентрації газів.

На основі електричної принципової схеми проведено трасування та встановлені розміри плати виробу 100×80 мм. Для друкованої плати як матеріал обрано склотекстоліт фольгований двосторонній марки СФ-2-35-2, що має товщину фольги 35 мкм, а також товщину фольги 2 мм. Час безвідмовної роботи оптичного генераторного вимірювача концентрації газів становить 73125 годин. В результаті розрахунків було виявлено, що пристрій задовольняє всі технічні параметри та може бути впроваджений у серійне виробництво.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Белинский В.Т., Гондюл В.П., Грозин А.А., Круковский–Синевиц К.Б., Мазур Ю.Л. Практическое пособие по учебному конструированию РЭА. К.: Вища школа, 1992. 494 с.
2. Технология деталей электронной аппаратуры. Учеб. пособие для вузов/С.Е. Ушаков, В.С. Сергеев, А.В. и др. М.: Радио и связь. 1986. 256 с.
3. А.А. Яншин. Теоретические основы конструирования, технологии и надежности ЭВА: Учеб. пособие для вузов. М.: Радио и связь, 1983. 312 с.
4. Філінюк М.А, Козлов В.В., Пастушенко О.Л. Проектування конструкцій РЕА. – Вінниця: ВДТУ, 2002. 99с.
5. Разработка и оформление конструкторской документации РЭА: Справочное пособие / Э.Т. Романычева, А.К.Иванова, А.С. Куликова, Т.П. Новикова. М.: Радио и связь. 1984. 256 с.: ил.
6. Горобец А.И., Степаненко А.И., Коронкевич В.М. Справочник по конструированию радиоэлектронной аппаратуры. К.: Техника, 1985.–310с.
7. Герасимова М.В. Довідник з електронних приладів. К.: Техніка, 1991 239с.
8. Байбородин Ю. В. Введение в лазерную технику. К.: Техника, 1977. 240 с.
9. Семенов А.О., Донський О.В., Кропив'янський Є.О. Цифровий частото-мір радіотехнічних сигналів на програмованих логічних інтегральних мікросхемах. Збірнику тез доповідей XI міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій», 12-14 грудня 2022 року, м. Запоріжжя, Національний Університет «Запорізька Політехніка». С. 44-45.
10. Гребнев В.В. Микроконтроллеры семейства AVR фирмы Atmel. М.:ИП Радиософт, 2002. 176с.
11. Евстифеев А.В. Микроконтроллеры AVR семейства Tiny и Mega фирмы Atmel. М.: Издательский дом «Додэка-XXI», 2004.

12. Баранов В.Н. Применение микроконтроллеров AVR: схемы, алгоритмы, программы. М.: Издательский дом «Додэка-XXI», 2004.
13. ГОСТ 23751–86. Платы печатные. Основные параметры конструкции. Введен 01.01.87.
14. ГОСТ 2417–78. Правила выполнения чертежей печатных плат.
15. Каталог электронных компонентов и материалов „СЕА”. Январь. 2002.
16. Матсон Э.А. и др. Конструирование и расчет микросхем и микроэлементов ЭВА.: [Учебное пособие для радиотехнических спец. вузов]. М. Высшая школа, 1979.
17. Ненашев А.П. Конструирование радиоэлектронных средств. М. Высшая школа, 1990. 424 с.
18. Преснухин Л.Н., Шахнов В.А. Конструирование электронных вычислительных машин и систем. М. Высшая школа, 1986.
19. Компьютерная фотоника: Принципы, проблемы и перспективы. СПб.:СПбГУ ИТМО, 2004.
20. Кожем'яко В.П., Гаркушевський В.С., Петрук В.Г. Оптоелектронні системи та пристрої. Навч. пос. Вінниця: ВНТУ, 2005.
21. Радиокомпоненты и материалы. Справочник. Радиософт, 1998. 720 с.
22. Журнал “Радио” № 11. 2003.
23. Декларацийний патент АС №1591976, А61 F9/08.
24. Декларацийний патент №59045, А61 F9/08
25. 8-bit Microcontroller with 64K Bytes In-System Programmable Flash ATmega64. Preliminary// Atmel Corporation. 2003.
26. TSL1401 128 × 1 linear array with hold. Production data//Texas Advanced Optoelectronic Solutions, Inc. 1999.
27. AS7C4096, AS7C34096///Alliance Semiconductor Corporation. 2001.
28. FT245BM USB FIFO (USB - Parallel) I.C.//Future Technology Devices Intl. Limited. 2002.
29. Chu F., Zucholl K., Chemische Senoren Grundlagen, Trends und Anwendungen. Technische Rundschau, №42 1988, p. 154-159

30. Носов Ю.Р. Оптоэлектроника. – М.: Советское радио, 1980. – 230 с.
31. Выдоров И.П. Детектор концентрации компонентов газовых смесей. Патент Украины №1550404. МКИ G01N27/18 15.03.1990 Бюл. №10
32. Видова Р.В., Розинов Г.Л., Скрупский С.В. Измеритель теплопроводности и состава потока газовой смеси. Патент СССР №851242. МКИ G01N27/18. 30.07.81 Бюл. №28
33. Бойко В.О. Фрундін В.Ю., Ісаєв В.В. Термокондументричний датчик. Патент України №13933 МКИ G01N27/18. 28.02.2000. Бюл. №1
34. Таланчук П.М., Троц А.Л. Електрохімічний датчик. Патент України №34543 МКИ G01N27/407. 15.03.2001
35. Аманназаров А., Каабак М.Я., Кораблев И.В., Рылов В.А. Сравнительный анализ измерительных схем оптико-абсорбционных газоанализаторов. - Тула: в кн.ст. «Состояние и перспективы развития аналитического приборостроения до 1985 г.», секция «Газоанализаторы для контроля», ноябрь: 1975.- стр. 108-116.
36. Борисович Н.А. и др. Инфракрасные фильтры - Минск.: Наука и техника, 1971.
37. Бреслер П.И. Оптические абсорбционные газоанализаторы и их применение. -Л.: Энергия, Ленинградское отделение, 1980. 164 с.
38. Осадчук В.С., Осадчук О.В., Прокопова М.О. Пристрій для вимірювання газу. Патент України №47906А МКИ G01N27/12. 15.07.2002. Бюл. №7.
39. Бреслер П.И. Поглощение радиации в колебательно-вращательных полосах некоторых газов. - М.: «Оптика и спектроскопия», 1958.- стр.135.
40. Новицкий П.В. Основы информационной теории измерительных устройств. - Л.: Энергия, 1968. - 348 с.
41. Онищенко А.М. Оптимизация приборов для контроля состава веществ. М.: «Машиностроение», 1990.- 304 с.
42. Павленко В.А. Газоанализаторы. -М.: "Машиностроение", 1965.-112 с.
43. Проспект фирмы "S.A. Environment" (Франция), 2000.
44. Проспект фирмы "Оптэк" (Россия), 2001.

45. Рылов В.А., Кораблев И.В., Гальцова Г.А. Информационный критерий оценки качества автоматических газоанализаторов (Вопросы квалитметрии). - Тамбов: Вторая международная теплофизическая школа «Повышение эффективности теплофизических исследований технологических процессов промышленного производства и их метрологического обеспечения», сентябрь, 1995.

46. Салль А.О. Инфракрасные газоаналитические измерения. М.: Издательство стандартов, 1971. - 100 с.

47. Солодов А.В. Теория информации и ее применение к задачам автоматического управления и контроля. - М.: "Наука", 1967.- 75 стр.20.

48. Сташин В.В., Урусов А.В., Мологонцева О.Ф. Проектирование цифровых устройств на однокристалльных микроконтроллер - М.: "Энергоатомиздат", 1990.

49.Методичні вказівки до виконання економічної частини магістерських кваліфікаційних робіт / Уклад. : В. О. Козловський, О. Й. Лесько, В. В. Кавецький. Вінниця : ВНТУ, 2021. 42 с.

50.Кавецький В. В. Економічне обґрунтування інноваційних рішень: практикум / В. В. Кавецький, В. О. Козловський, І. В. Причепа. Вінниця : ВНТУ, 2016. 113 с.

51.ГОСТ 12.0.003-74 ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация.

52.Правила улаштування електроустановок. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://www.energiy.com.ua/PUE.html>

53.Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. ДСН 3.3.6.042–99 [Електронний ресурс]. –Режим доступу: <http://www.dnaop.com>

54.НПАОП 0.00-7.15-18 Вимоги щодо безпеки та захисту здоров'я працівників під час роботи з екранними пристроями. [Електронний ресурс]. Режим доступу: http://sop.zp.ua/norm_npaop_0_00-7_15-18_01_ua.php

55.СНиП 2.04.05-91*У. Отопление, вентиляция и кондиционирование[Електронний ресурс]. Режим доступу: https://dnaop.com/html/1671/doc-%D0%A1%D0%9D%D0%B8%D0%9F_2.04.05-91_%D0%A3

56.ДБН В.2.5-28:2018 Природне і штучне освітлення. [Електронний ресурс]
Режим доступу: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=79885

57.ДСН 3.3.6.037-99 Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://document.ua/sanitarni-normi-virobnichogo-shumu-ultrazvuku-ta-infrazvuku-nor4878.html>

58.Наказ від 08.04.2014 № 248 Про затвердження Державних санітарних норм та правил Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу [Електронний ресурс] Режим доступу: http://online.budstandart.com/ua/catalog/topiccatalogua/labor-protection/14_nakazy_ta_rozpor_183575/248+58074-detail.html

Додаток А
(обов'язковий)

ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА
ОПТИЧНИЙ ГЕНЕРАТОРНИЙ ВИМІРЮВАЧ КОНЦЕНТРАЦІЇ
ГАЗІВ

Виконав: студент 2-го курсу, групи РТ-21м
спеціальності 172 – Телекомунікації та
радіотехніка

(шифр і назва напряму підготовки, спеціальності)

 Кропив'янський Є.О.

(прізвище та ініціали)

Керівник: д.т.н., проф., проф. каф. ІРТС

 Семенов А.О.

(прізвище та ініціали)

« _____ » _____ 2022 р.

Інфрачервоні газоаналізатори з неселективними приймачами випромінювання

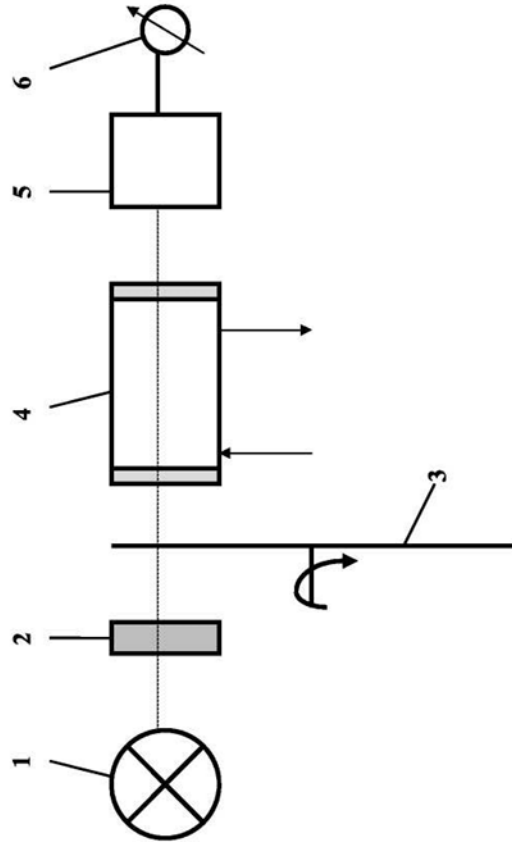


Рисунок 1 – Однопроменевий газоаналізатор з неселективним приймачем випромінювання: 1 - джерело ІЧ-випромінювання; 2 - світлофільтр; 3 – модулятор; 4 - кювета; 5 - приймач ІЧ-випромінювання; 6 - що показує прилад

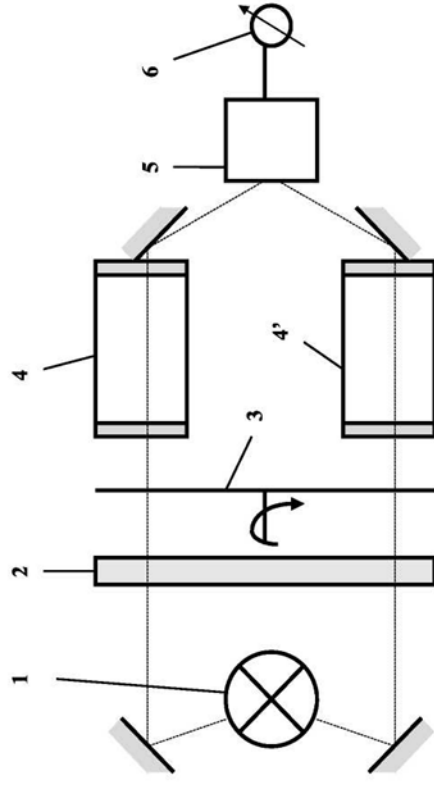
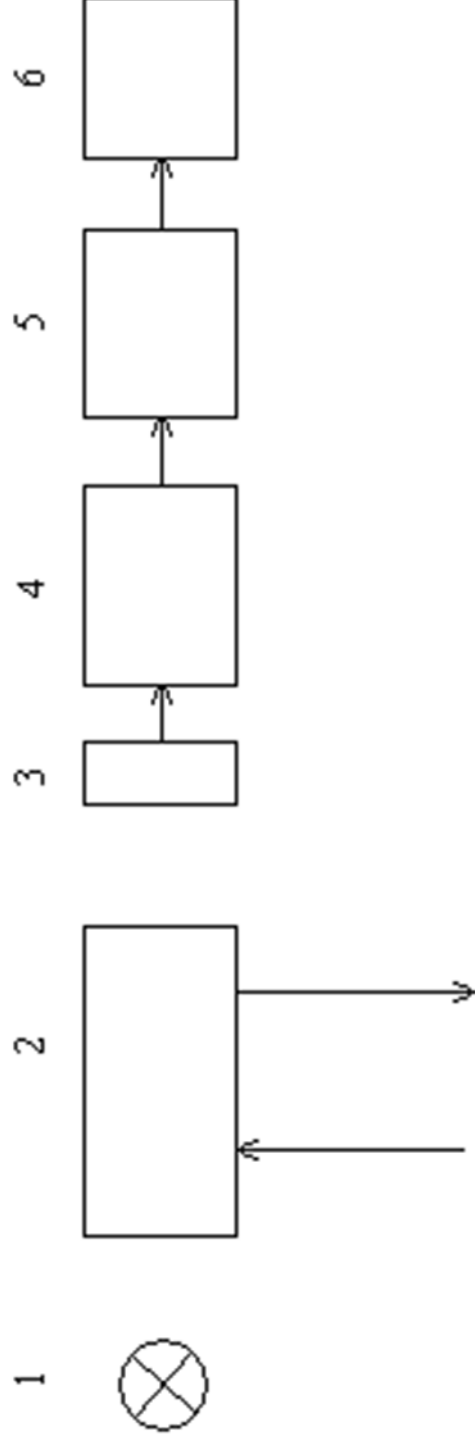


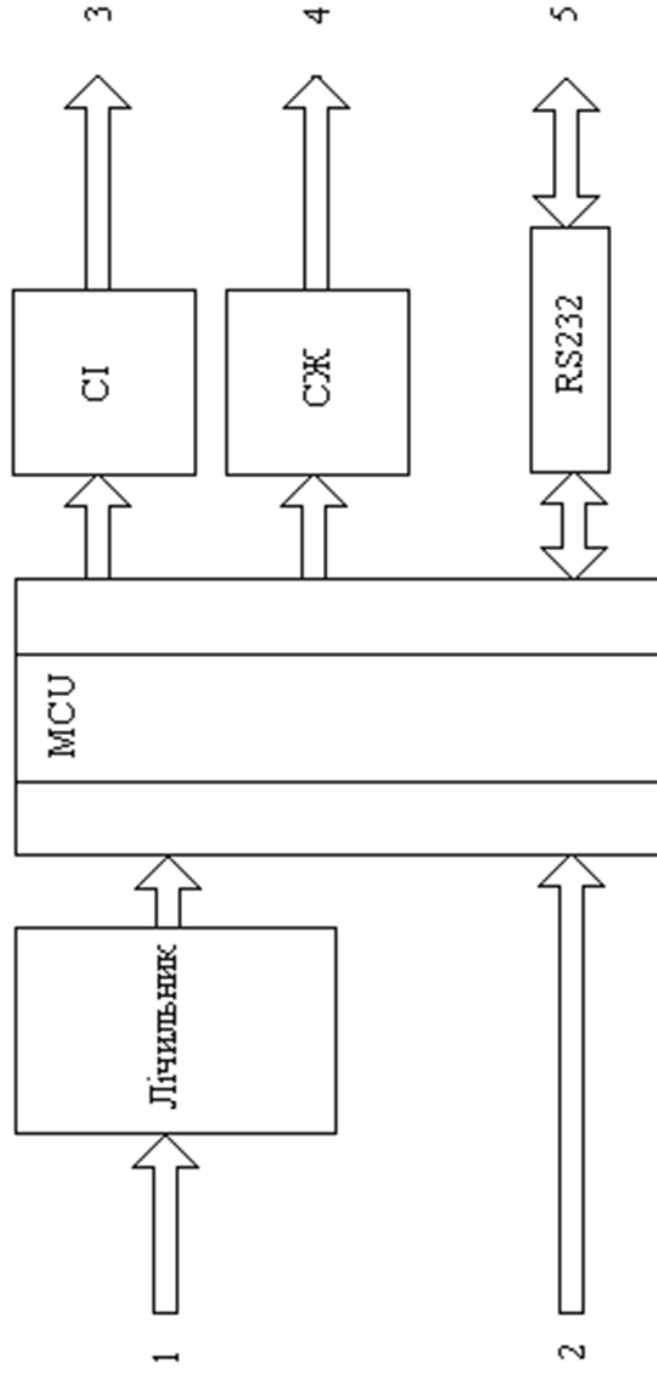
Рисунок 2 – Двопроменевий газоаналізатор з неселективним приймачем випромінювання: 1 - джерело ІЧ-випромінювання; 2 - світлофільтр; 3 - модулятор; 4 - робоча кювета; 4 - порівняльна кювета; 5 - приймач ІЧ-випромінювання; 6 - індикатор

Загальна структурна схема оптичного газоаналізатора



- 1 – джерело ІЧ - випромінювання;
- 2 – кювета;
- 3 – ІЧ датчик;
- 4 – генератор;
- 5 – мікроконтролер;
- 6 – блок індикації.

Структурна схема плати контролера



- 1 – вихід частотного перетворювача;
- 2 – виходи з клавіатури управління
- 3 – система управління індикацією;
- 4 – система управління живленням;
- 5 – інтерфейс зв'язку з ЕОМ.

Математична модель оптичного генераторного вимірювача концентрації газів

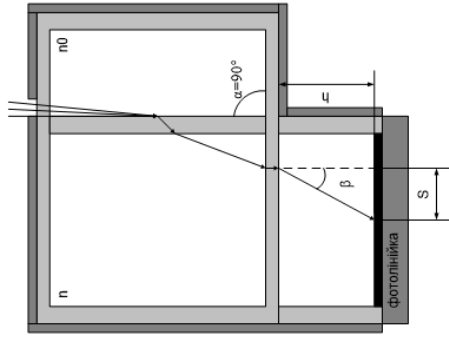
Метод визначення показника заломлення по Гальваксу

$$n_0 = \sqrt{n^2 - \sin^2 \beta}$$

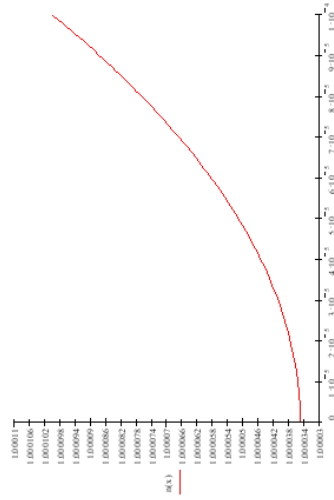
$$n = \sqrt{n_0^2 + \sin^2 \left(\arctg \left(\frac{S}{h} \right) \right)}$$

$$\rho = \frac{n_0^2 + \sin^2 \beta - 1}{n_0^2 + \sin^2 \beta + 2} \cdot \frac{M}{2.25 \cdot 10^{24} \alpha}$$

$$\rho = \frac{n_0^2 + \sin^2 \left(\arctg \left(\frac{S}{h} \right) \right) - 1}{n_0^2 + \sin^2 \left(\arctg \left(\frac{S}{h} \right) \right) + 2} \cdot \frac{M}{2.25 \cdot 10^{24} \alpha}$$

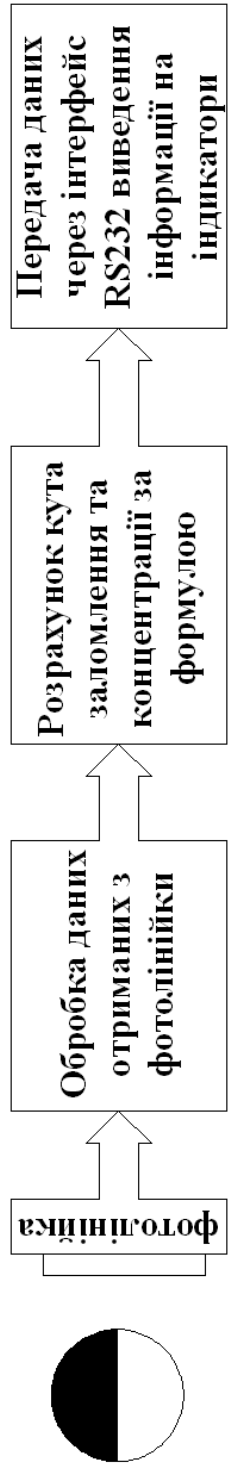


Кювета для визначення показника заломлення

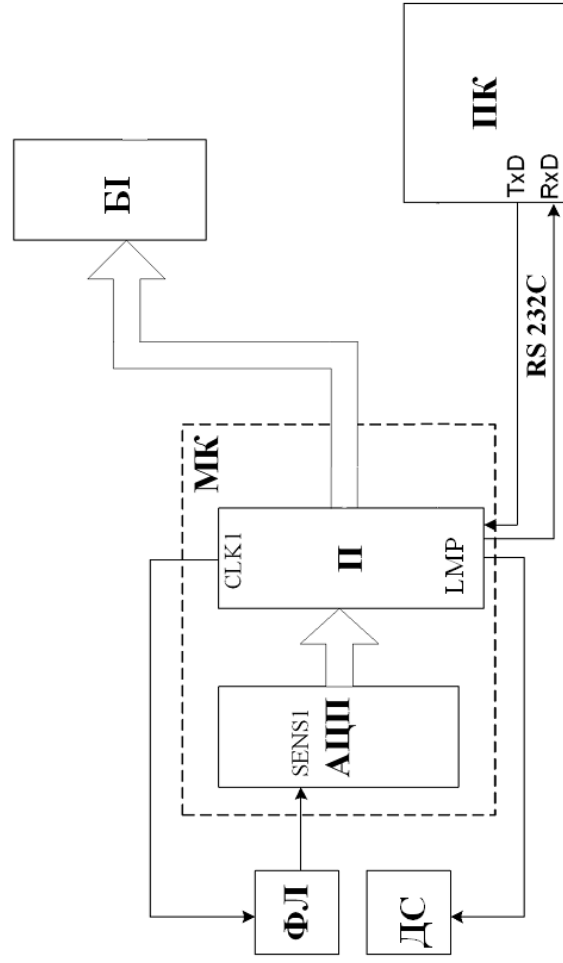


Залежність зміни показника заломлення від
зміщення S

Структурна схема оптичного генераторного вимірювача концентрації газів

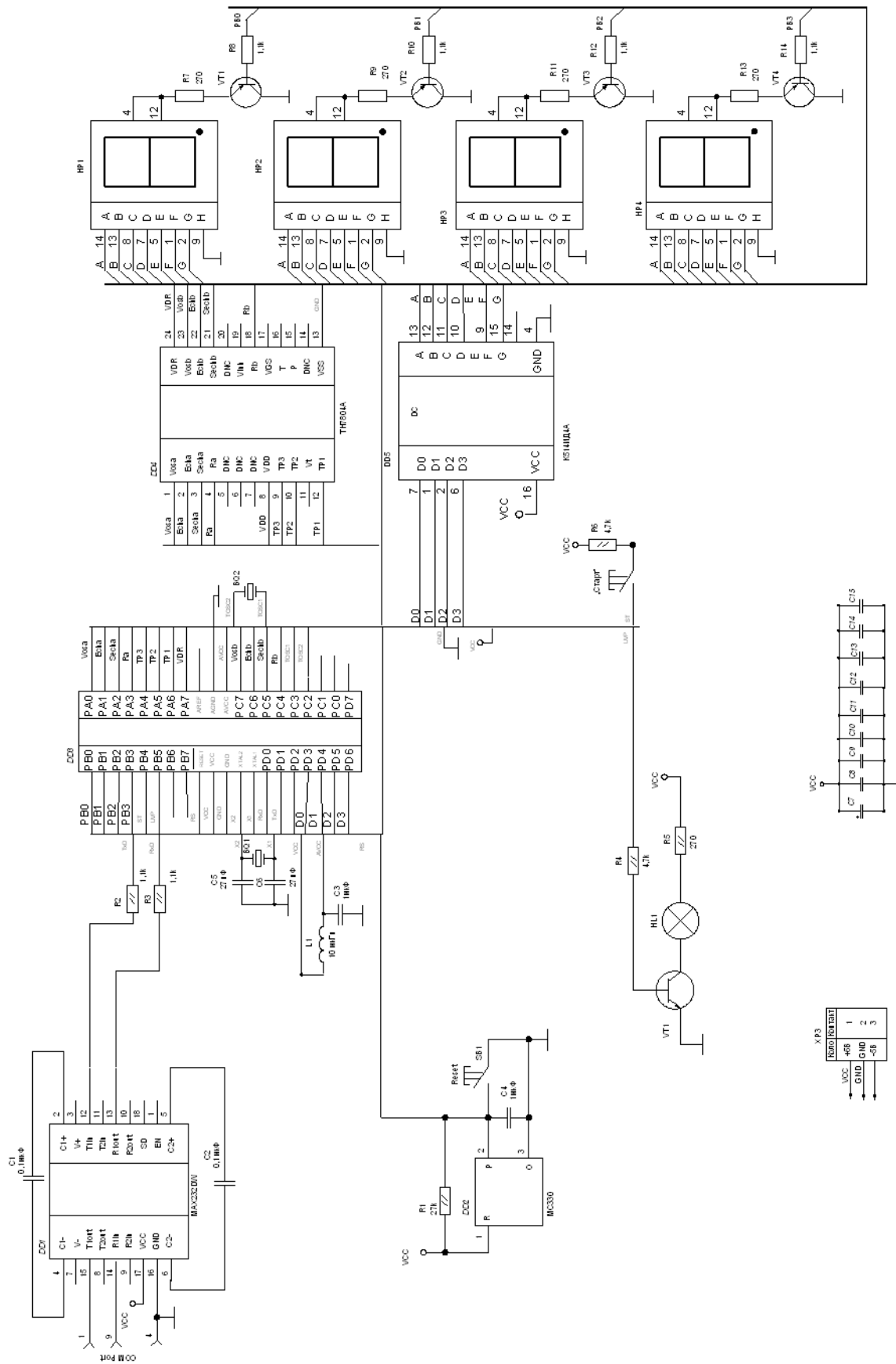


Структурна схема визначення концентрації газу



Структурна електрична схема

Схема електрична принципова пристрою



XP3

КНОПКА	1	C15
VCC	46	C14
GND	3	C13
		C12
		C11
		C10
		C9
		C7

Додаток Б
(обов'язковий)

**ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ РОБОТИ
ОПТИЧНИЙ ГЕНЕРАТОРНИЙ ВИМІРЮВАЧ КОНЦЕНТРАЦІЇ
ГАЗІВ**

**ПРОТОКОЛ
ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ
НА НАЯВНІСТЬ ТЕКСТОВИХ ЗАПОЗИЧЕНЬ**

Назва роботи: «Оптичний генераторний вимірювач концентрації газів»

Тип роботи: Магістерська кваліфікаційна робота
(БДР, МКР)


Підрозділ кафедра ІРТС
(кафедра, факультет)

Показники звіту подібності Unicheck

Оригінальність 93,75% Схожість 6,25%

Аналіз звіту подібності (відмітити потрібне):

1. Запозичення, виявлені у роботі, оформлені коректно і не містять ознак плагіату.
2. Виявлені у роботі запозичення не мають ознак плагіату, але їх надмірна кількість викликає сумніви щодо цінності роботи і відсутності самостійності її виконання автором. Роботу направити на розгляд експертної комісії кафедри.
3. Виявлені у роботі запозичення є недобросовісними і мають ознаки плагіату та/або в ній містяться навмисні спотворення тексту, що вказують на спроби приховування недобросовісних запозичень.

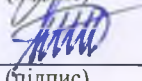
Особа, відповідальна за перевірку 
(підпис)

Звягін О.С.
(прізвище, ініціали)

Ознайомлені з повним звітом подібності, який був згенерований системою Unicheck щодо роботи.

Автор роботи 
(підпис)

Кропив'янський Є. О.
(прізвище, ініціали)

Керівник роботи 
(підпис)

Семенов А. О.
(прізвище, ініціали)